同位体地球化学から見たアイスランド

I. アイスランドホットスポットの同位体地球化学的特徴

A review of isotope geochemical studies for Iceland

I. Isotope-geochemical characterization of Icelandic hot spot

牧 嶋 昭 夫 (Akio MAKISHIMA)*

In this article, the isotope geochemical study for Iceland is reviewed. Iceland is geologically unique because it is a subaerial exposure of Mid-Atlantic Ridge, which is caused by the interaction between the ridge and the Icelandic hot spot. To investigate what is happening beneath Iceland, many geochemical studies have been done. The geochemical studies using conventional Sr, Nd, Pb, He and O isotope tracers revealed the heterogeneity not only of the oceanic mantle, but also of the Icelandic hot spot mantle itself. Furthermore, the oxygen isotope studies revealed the reworking of the Icelandic crust which is altered by meteoritic water. The characterization of the Icelandic hot spot from the isotope geochemistry is very important in testing the hypothesis of the mantle-crust recycling. In near future, new tracers such as Li, B or Ce will be applied to this problem, and new constraints will be obtained.

Keywords: Iceland, Isotope geochemistry, Mantle heterogeneity, Oxygen, Helium, Neodymium, Strontium, REE

I. はじめに

アイスランドは大西洋中央海嶺上に位置する火山島で、中央海嶺が海上に出ている特異な場所である。そのため、1970年代前半には微量元素(特に希土類元素)を用いて、活発にアイスランドの火成岩の成因についての議論がおこなわれた(e.g. Shimokawa and Masuda, 1972; Schilling, 1973; 第III章第1節参照)。1970年代後半にネオジウム(Nd)やストロンチウム(Sr)の同位体を地球化学的トレーサーとして活用する、マルチアイソトープの手法が開発されると、これが真っ先にアイスランドの火成岩に適用されて、ホットスポットマンタルの不均質が論じられた(e.g. O'Nions *et al.*, 1977; Zindler *et al.*, 1979; 第III章第2節参照)。さらに、ウラントリウムの放射非平衡を用いた火成岩の成因論の議論も、研究の黎明期にアイスランドの火成岩が対象となった(Condomines *et*

al., 1981)。なお、この放射非平衡については第2部(牧嶋, 1995)で説明する。このように、アイスランドは地球化学、特に同位体地球化学の上では、さまざまなトレーサーがはじめに用いられる「試金石」的な位置を占めて、これらのトレーサーの活用によってアイスランドの火成岩の成因について新しい考えが生まれ出されてきた。

本総説・第一部では、アイスランドの同位体地球化学的な研究について、研究史を中心に紹介する。過去の研究を振り返ることで、今後、新しい地球化学的トレーサーを開発した場合に、アイスランドのどこをどのように攻めればそのトレーサーの真価を最大限に発揮できるかということに対して、ひとつの指針を与えることができるに違いない。また、アイスランドの地球化学を学ぶことは、同時に、同位体地球化学の歩みを知ることにもなるので、専門を異とする研究者に対しても興味深いテーマではなかろうか。

(平成7年3月15日受付, 平成7年9月26日受理)

* 岡山大学固体地球研究センター・PML, 〒682-01 鳥取県東伯郡三朝町山田 827

* The Pheasant Memorial Laboratory, Institute for Study of the Earth's Interior, Okayama University, Misasa, Tottori-ken 682-01, Japan

Fig. 1. Map of Iceland showing neovolcanic and fracture zones, central volcanoes and volcanic areas.

SNVZ, Snaefellsnes volcanic zone; RRZ, Reykjanes rift zone; SIVZ, MIVZ and NIRZ are South Iceland volcanic zone, Mid-Iceland volcanic zone and North Iceland rift zone, respectively. TFZ is Tjornes fracture zone. A, O and S are central volcanoes of Askja, Olaefajokull and Snaefellsjokull. H, K and V are volcanic areas of Hekla, Krafla and Vestmannaeyjar. The map is modified from Sigmarsson *et al.* (1992).

また、アイスランドでは、ソレイト質玄武岩だけでなく、ソレイト質安山岩や流紋岩等も産出する。第二部（牧嶋，1995）では、これらのフェルシクな岩石の成因について論じることにする。

II. アイスランドの成り立ちと火山帯の概要

アイスランドについてよく知っている読者ばかりではないと思われるので、本章で、氷河期以降の火山帯の概要とアイスランドの成り立ちについて述べることにする。

1. アイスランドの氷河期以降の火山帯の概要

Fig. 1 に、最後の氷河期以降に火山活動をおこなった火山帯を示した。アイスランド南西の海中の Reykjanes 海嶺が、Reykjanes 地溝帯 (RRZ) を通って（この半島を Reykjanes 半島と呼ぶ）、アイスランド中央火山帯 (MIVZ) につながっている。ここから火山帯は北に折れ曲がり、アイスランド北部地溝帯 (NIRZ) となり、さらに、アイスランド北部の海中の Tjornes 断裂帯を通して Kolbeinsey 海嶺に続いている。また、地溝帯以外の場所にも、Snaefellsnes 火山帯 (SNVZ)（この半島を Snaefellsnes 半島と呼ぶ）やアイスランド南部火山帯 (SIVZ) といった火山帯が存在する。SIVZ

は、NIRZ の南方向への延長と考えられている。

全岩の化学組成は、RRZ と MIVZ はカンラン石がノルムにあるソレイト質玄武岩（カンラン石ソレイト）、NIRZ は石英がノルムにあるソレイト質玄武岩（石英ソレイト）を、SNVZ がアルカリ・カンラン石-玄武岩を主に噴出している。また、SIVZ は北から南にかけて、全岩化学組成が、ソレイト質玄武岩からアルカリ・カンラン石-玄武岩へと変化していく (Jakobsson, 1972)。

さらに、フェルシクな火山岩（流紋岩、フェルシクな凝灰岩、グラノファイアー）を噴出している中心火山が 42 個以上も存在し、フェルシクな火山岩はアイスランドの地殻の 10% 程度を占めているといわれている (Saemundsson, 1979)。そのなかでも、歴史に記載があって噴火年代を特定できる著名な火山（地域）としては、Hekla, Askja, Krafla などあげられる（これらの位置は Fig. 1 に示した）。第二部（牧嶋，1995）では、研究が最も多くおこなわれているこれらの 3 地域におもにスポットをあてて、フェルシクな火山岩の成因をとりあげる。

2. アイスランドの成り立ち

ここでは、海洋底の古地磁気に基づいた Oskarsson *et al.* (1985) の、アイスランドの成り立ちについてのモデルを簡単に紹介することにする。

アイスランドの成り立ちは、まず、36 Ma に、Reykjanes 海嶺 (RR) の北東に離れて位置していた Aegir 海嶺 (AR) と RR の間にホットスポットが位置し、RR と AR を結ぶ Kolbeinsey 海嶺 (KR) が発生したところから始まった。この KR は、現在の NIRZ から MIVZ を通り、SIVZ に至る火山帯の基礎となると考えられている。

ホットスポットの位置に対して、海嶺を含めてプレートは北西へと移動している。そのため、ホットスポットは別の火山帯を引きずりながら、相対的に南東へ移動した。20 Ma になると、KR と RR は離れ、ホットスポットが引きずった火山帯は、KR と RR とを結ぶ延長線に平行した、現在の NIRZ から MIVZ を通って SIVZ にいたる、アイスランド東側の火山帯を形成した。さらに、9 Ma には、RR の北に別の火山帯 (SNVZ) が生じた。

その後、現在に至るまで、KR と RR の距離は増加しつつあり、また、ホットスポット上の火山帯も南東へと移動している。このホットスポットの移動によって、SIVZ では先に形成された地殻を再溶融することが可能になったと考えられている

III. アイスランドホットスポットの同位体的地球化学的特徴

1. Reykjanes 海嶺からアイスランドにかけて見られる同位体比の系統的变化

アイスランドの成因として、ホットスポットやマントルプリュームというアイデアが地球物理学的に支持されるようになったのは1960年後半である。Schilling (1973) は、この地域、すなわち、Reykjanes 海嶺から Iceland にかけてのソレアイトの、La 濃度と La/Sm 比の系統的增加を発見した (Fig. 2a)。彼は、このような系統的变化が、2 種類のマントル物質、すなわち、中央海嶺を作るマントルと、始原始的 (コンドライト的) な組成を持つマントルプリュームの混合で作られたと考えた。一方、O'Hara (1973) は、このような系統的变化を、均一なマントルから生じたメルトの結晶分化作用で定性的に説明した。

Hart *et al.* (1973) は、Sr 同位体比も Reykjanes 海嶺から Iceland にかけて大きくなっていくという系統的变化を見いだした (Fig. 2b)。同時期に、O'Nions and Gronvold (1973) は、Sr 同位体比の海嶺からアイスランドにかけての系統的变化を確認するとともに、氷河期後のアイスランドの火山岩は Sr 同位体比に関しては均一であることを報告した。均一なメルトの結晶分化作用だけでは、このような Sr 同位体比の系統的变化は作り得ない。そのため、同じマグマソースの結晶分化作用という考え方は否定されることとなった。

O'Nions and Pankhurst (1973) は、第三紀から更新世の火山岩の Sr 同位体比を分析し、15 Ma から 2 Ma にかけて、Sr 同位体比が 0.7036 から 0.7033 に、系統的变化していくことを見いだした。そして、これを説明するためには、(1) 非平衡の部分溶融がおこった (古い火山岩ほど選択的に放射壊変起源の Sr を多く抽出した)、(2) マントルプリュームが不均質 (このような系統的变化が偶然生じた)、(3) 2 成分の混合比が時代によって変化した、という 3 つのモデルを提案した。アイスランドの成因論で単純な 2 成分の混合モデル (海嶺を作るマントルとマントルプリュームの混合) が盛んななかであって、マントルプリュームの不均質をはじめて議論したのは、この論文が嚆矢であろう。

なお、一般的にはマントルの不均質という場合には、中央海嶺玄武岩 (MORB) を作る地球規模でかなり均質なマントル中に、同位体地球化学的に異なる海洋島玄武岩 (OIB) を作るホットスポットマントルが存在することを意味する。しかしながら、本総説では、この

Fig. 2. Variation of La_N/Sm_N (a), $^{87}Sr/^{86}Sr$ (b) and $^{206}Pb/^{204}Pb$ (c) from Iceland to Reykjanes Ridge with distance from Reykjanes Peninsula.

Data sources: Schilling (1973); Hart *et al.* (1973); Sun *et al.* (1975).

ようなマントルの不均質と、ホットスポットマントルの不均質、すなわち、ホットスポットマントル (あるいはマントルプリューム) の中にさらに不均質があるということ、の 2 つのマントル不均質を扱う。そのため、誤解を招かないように注意されたい。また、本総説ではマントル不均質を担っている、OIB マントルの分類についての説明は行わないので、詳しく知りたい読者は、Zindler and Hart (1986)、また、それらの成因については、Weaver (1991a, b) を参照されたい。

一方 Sun and Jahn (1975), Sun *et al.* (1975) は、Reykjanes 海嶺からアイスランドにかけての鉛同位体比を測定し、鉛同位体比も系統的に変化するところを見いだした (Fig. 2c)。また、彼らは、鉛同位体比と $1/Pb$ のプロットが直線になる (Fig. 3) ことから、2 成分の混合モデルを支持した (2 成分の混合では、横軸に放射壊変によって作られる元素の濃度の逆数、縦軸にその元素の同位体比をプロットすると直線となる)。また、これらの論文で注目すべき点は、アイスランドの鉛同位体比を説明するには 1400 My 程度のかかなり長い時間が必要であることを指摘した点である。これはのちに Hofmann and White (1982) が指摘した、マントル-地殻サイクリングというアイデアへ発展する。

この、マントル-地殻サイクリングというのは、マントルの不均質の問題を考える上で非常に重要である。プレートテクトニクスでは、海洋地殻上に堆積した、大陸地殻を起源物質とする堆積物は、海洋地殻と

Fig. 3. Tests of the binary mixing model for the data of Sun *et al.* (1975).

All plots show the linearity (shown as the line in the figure) expected for a binary mixing model.

ともに沈み込み帯でマントルに沈み込む。そして、その一部は島弧火山岩となって地上に再び噴出する。一方、マントルに沈み込んだ海洋地殻と堆積物は上部マントル物質と混合されて、中央海嶺から再び海洋地殻としてその姿を現わす。また、沈み込んだ物質の一部は、上部マントルと下部マントルの境界、もしくは、下部マントルと核との境界に保持され、これを起源物質とするブリュームとなり、海洋島玄部岩として再び地表へ運ばれる。このような地殻物質とマントル物質間の物質の大循環をマントル-地殻リサイクルと呼んでいる。

なお、OIB 起源物質に関しては、McKenzie and O'Nions (1983) が、大陸下部から剥離した大陸下部のリソスフェアマントルが OIB の起源物質であるという仮説を提唱したり、Allegre and Turcotte (1986) が、上部マントルがマーブルケーキ状になっており、これが溶融して OIB の起源物質になっているということを提案したりしている。さらに詳しく知りたい方は牧嶋ら (1991) の総説を参照されたい。

O'Nions *et al.* (1976) は、アイスランドの火山岩の Sr 同位体比と希土類元素のデータを増やして、Sr 同位体比と $1/\text{Sr}$ をプロットすると直線にはならないことから、アイスランドの成因は Sun and Jahn (1975) や Sun *et al.* (1975) が指摘したような 2 成分のマントルの、単純な混合では説明できないこと、また、ソレアイトの Ce_N/Yb_N (N はコンドライトの濃度で規格化した濃度を表す) と Sr 同位体比がきれいな相関を示すことは、少なくとも 100-200 Ma に元素間のフラ

クシヨネーションが上部マントル内において不均質が生じ、この不均質が Sr 同位体比に反映されたと考えた。

2. アイスランドホットスポットマントルの不均質

1976 年、 ^{147}Sm の α 壊変を用いる Sm-Nd 法が実用化された (DePaolo and Wasserburg, 1976; Richard *et al.*, 1976)。この方法は、地球化学的挙動が比較的よくわかっている希土類元素同士の放射壊変をトレーサーとして用いることができる点と、 ^{147}Sm の半減期が極めて長い (1060 億年) ために長期間にわたる Sm と Nd の間のフラクシヨネーションを議論できる点において画期的であった。O'Nions *et al.* (1977) は、この Nd 同位体比を用いる方法をすぐに Reykjanes 海嶺とアイスランドの試料に適用した。その結果、Nd 同位体比と Sr 同位体比には負の相関が見られ (Fig. 4)、かつ、どちらの試料も中央海嶺を作るマントルよりも低い Sm/Nd 比と高い Rb/Sr 比 (よりインコンパティブル元素に濃集していた傾向) を長期間保持していたことが明らかとなった。この期間は、Sun and Jahn (1975) が指摘したような、 10^9 年のオーダーを持つ、長い期間である。これは、最近おきたマントルの溶融のほかに、このような古い時代になんらかのフラクシヨネーションをおこしたできごとがあったことを意味した。

さらに、Zindler *et al.* (1979) は、Reykjanes 半島 (Fig. 1 の RRZ からなる半島) の玄武岩 (ピクライト、カンラン石ソレアイト、ソレアイト) の希土類元素を定量し、Sr-Nd 同位体比を測定した。その結果、 La_N/Sm_N 比は、ひとつのマントルソースから作るのは困難な 0.33-1.25 という大きなばらつきを持っていた。また、Sr 同位体比は一樣かつ中央海嶺を作るマントルよりは高く、Nd 同位体比は比較的大きなばらつきを示した (Fig. 4)。これらのことから、Reykjanes 半島の玄武岩は、不均質なホットスポットマントルのいろいろな部分をいろいろな部分溶融の程度で溶解して、中央海嶺を作るマントルと混合して生じたというモデルが作られた。また、Sr 同位体比にくらべて Nd 同位体比が大きくなばらつきを持つことは、このホットスポットマントルの不均質を作ったプロセスが、Rb/Sr よりも Sm/Nd を相対的に大きく変動させたことを意味した。彼らは、これは、ガーネットと単斜輝石を固相に残して部分溶融をおこしたメルトならば可能であると説明した。さらに、Nd 同位体比と $1/\text{Nd}$ のプロットはコンドライト的な値よりはるかに大きな端成分同士の混合を示したので、ホットスポットマントルブリュームが始原的 (コンドライト的) な微量元素組成 (Nd 同位体と Nd 濃度の両方) を持つという Schilling (1973)

Fig. 4. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ plot for Iceland volcanic rocks.

Data sources for solid circles: O'Nions and Gronvold (1973); O'Nions and Pankhurst (1973); O'Nions *et al.* (1976); O'Nions *et al.* (1977). Data sources for open circles: Zindler *et al.* (1979).

の考えは完全に否定された。

一方、アイスランド北部の Kolbeinsey 海嶺 (KR) とアイスランドホットスポットとは、互いに物質的なやりとりをしていないことが報告されている (Mertz *et al.*, 1991)。彼らは、KR から Tjornes 断列帯にかけて Sr・Nd・Pb 同位体比を測定し、その結果、(1) Sr 同位体比はアイスランドに向けて若干増加していく (0.70280 から 0.70298), (2) Nd 同位体比はアイスランドに向けて若干減少していく (0.51323 から 0.51307), (3) Pb 同位体比は低く ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.912 - 18.053$), 系統的な変化を示さない, ということを見いだした。このことから、Sr・Nd 同位体比の変化は KR を作ったマントル内の不均質であり、アイスランドホットスポット物質は KR の物質と混合していないという結論が得られた。

3. He 同位体比から見たアイスランド

Condomines *et al.* (1983) は、マフィックからフェルシックまでの化学組成を持つ、地溝帯の火山岩ガラスの $^3\text{He}/^4\text{He}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, $\delta^{18}\text{O}$ を測定した。マフィックなガラスの $^3\text{He}/^4\text{He}$ (R) は $4 < \text{R}/\text{Ra} < 24$ (Ra は大気の $^3\text{He}/^4\text{He}$) という広い範囲を示し、中間からフェルシックな組成を持つガラスは大気とほとんど同じ値を示した (Fig. 5)。また、マフィックなガラスの $^3\text{He}/^4\text{He}$ は、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ や $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ と全く相関を見せず、 $\delta^{18}\text{O}$ とは、ごく弱い正の相関を見せた。

Fig. 5. $^3\text{He}/^4\text{He}$ values in R/Ra units of Iceland. Hollow and solid symbols indicate data from Condomines *et al.* (1983) and Kurz *et al.* (1985), respectively.

これらの結果、彼らは、マントル由来の高い $^3\text{He}/^4\text{He}$ を持つマグマが、放射壊変起源の低い $^3\text{He}/^4\text{He}$ を持つ、熱水変質した地殻と反応して、マフィックな火山岩が幅広い $^3\text{He}/^4\text{He}$ を持つようになったと説明した。また、中間からフェルシックな組成を持つ岩石は、マフィックな岩石よりも浅いところにマグマだまりがあったために、大気の He が多く混入したと説明した。

Kurz *et al.* (1985) は、氷河期中に噴出した地溝帯の玄武岩ガラスを、真空中で割ることによって脱ガスさせて、その中の $^3\text{He}/^4\text{He}$ を測定した。その結果、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ は $8 < \text{R}/\text{Ra} < 26.2$ で、MORB よりはあきらかに大きな値を示した。また、SIVZ の試料の R/Ra が 18~26.2, NIRZ が 8~11, RRZ から MIVZ にかけてが 12~16 と、地域によって限定された範囲の値を示し、Condomines *et al.* (1985) の測定結果とは異なることを示した (Fig. 5)。彼らは、Condomines *et al.* (1985) の地殻の融解モデルでは、(1) 各火山帯によって $^3\text{He}/^4\text{He}$ が狭い範囲をとるためには、熱水変質した地殻と反応したのちに均一化した非常に大きなマグマだまりが必要となるが、これは現実的でない、(2) SIVZ は地殻が厚いために、マグマが変質した地殻と反応して低い $^3\text{He}/^4\text{He}$ をとると予想されるが、そのような事実はない、といった理由から、Condomines らのモデルは誤りであると結論した。そして、地球生成以来脱ガスしていない高い $^3\text{He}/^4\text{He}$ を持つマントルブリウムが、アイスランドの下の部分溶融したマントルと大規模に混合して、各々の火山帯に特徴的な $^3\text{He}/^4\text{He}$ を作ったと考えた。そして、地球物理学的観測から予想されているマントルブリウムの中心の位置が MIVZ と SIVZ の接点にあり、この場所の $^3\text{He}/$

Fig. 6. Histograms of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (a), $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (b), $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (c) and $^3\text{He}/^4\text{He}$ (d) in MORB (mid-ocean ridge basalt) and OIB (oceanic island basalts). The histogram is from Zindler and Hart (1986), and the reference is therein. The range of Iceland volcanic rocks is shown in the dotted area in the figure. The range is based on Hart *et al.* (1973), O'Nions and Gronvold (1973), O'Nions and Pankhurst (1973), Sun and Jahn (1975), Sun *et al.* (1975), O'Nions *et al.* (1976, 1977), Zindler *et al.* (1979) and Kurz *et al.* (1985).

^4He も極めて高いことは、このアイデアを支持すると考えた。

Kurz *et al.* (1985) の He 同位体の測定の方が Condomines *et al.* (1983) よりも信頼性が高いと考えられるが、議論が He 同位体比にだけに頼っており、今後、他のトレーサーを含めた、より詳細な議論が必要であると考えられる。

4. アイスランドの火山岩の持つ同位体比的特徴の位置づけ

アイスランドの同位体比的特徴を位置づけるために、Fig. 6 に、Zindler and Hart (1986) による、MORB と OIB (海洋島玄武岩: Ascension, Azores, Canaries, Easter, Gough, Hawaii, Iceland, Kerguelen, Samoa, Society, St. Helena, Tahiti, Reunion, Tristan 等) の Nd・Sr・Pb($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)・He 同位体比のヒストグラムを示した。さらに、アイスランドの火山岩の持つ範囲も図中に示した。

アイスランドの火山岩の Nd・Sr 同位体比は、OIB 全体から見ると MORB に近い値を示す (Fig. 6a, b)。Pb 同位体比は MORB と OIB との中間的な値を示す

(Fig. 6c)。すなわち、アイスランドの火山岩の Nd・Sr・Pb 同位体比は、St. Helena, Kerguelen, Samoa といった代表的な OIB と比べて、MORB 的な特徴を強く持っている。

一方、アイスランドの火山岩の He 同位体比は、範囲が大きく、極めて大きな値 ($\text{R}/\text{Ra}=26$) を持つものも見いだされている (Fig. 6d)。このように大きい He 同位体比は、他には、Hawaii (Loihi) でしか見いだされていない。すなわち、アイスランドの He 同位体比は極端に高い値を示し、代表的な OIB よりもはるかに OIB らしい特徴を持っている。このような He 同位体比と Nd・Sr・Pb 同位体比の矛盾は、アイスランドに限ったものではなく、St. Helena, Kerguelen, Samoa 等の代表的な OIB が比較的低い He 同位体比を示す ($\text{R}/\text{Ra}<20$) ことから指摘されている。この原因については明確な結論は出されていないが、Nd・Sr・Pb と He の揮発性の違いと、ホットスポットの熱構造とが関係していると考えられている (e.g. Rubin and Mahoney, 1993)。すなわち、Nd・Sr・Pb 同位体比に関してホットスポット物質の寄与が最も大きい、ホット

スポットの中心部は最も高温なために揮発性の高い He は移動してしまい、中心部の He 同位体比は必ずしも最もホットスポット的な特徴を示すとは限らないという考えである。

IV. アイスランドの地殻の再溶融

Muehlenbachs *et al.* (1974) は、アイスランドのさまざまな時代のさまざまな場所の玄武岩の酸素同位体比を測定した (Fig. 7 参照)。氷河期以後の玄武岩の酸素同位体比は、 $\delta^{18}\text{O}=1.8\text{--}5.7\text{‰}$ で、大部分のソレアイトは、変質していない一般的な海洋島玄武岩や中央海嶺玄武岩の範囲 ($\delta^{18}\text{O}=5.5\text{--}6.5\text{‰}$) よりも 1‰ 以上低い値を示した。また、ゼオライトや蛇紋石等の変質鉱物を多く含む、第三紀から更新世にかけての玄武岩は、 $4.8\text{--}9.8\text{‰}$ という、ソレアイトよりは高い値を示した。さらに、Reykjanes 半島のソレアイトや Snaefellsnes 半島のアルカリ玄武岩 (Fig. 1 の SNVZ) は、他の海洋島玄武岩と同じような酸素同位体比を示した ($4.8\text{--}5.6\text{‰}$, $5.2\text{--}5.6\text{‰}$)。

一般的に、堆積物や、花こう岩の酸素同位体比は玄武岩よりも高く、天水の酸素同位体比は低い (アイスランドの天水は $-8\text{--}-11\text{‰}$; Arnason, 1976)。また、岩石と同じ同位体比を持つ水による低温 ($<100^\circ\text{C}$) での変質作用では、変質した岩石の同位体比が高くなり、 300°C を越えると酸素同位体の交換が十分速くおこなうようになって、同位体分別の効果は小さくなる。そのため、彼らは、アイスランドの酸素同位体比が低い理由として、(1) $\delta^{18}\text{O}$ が低い水 (天水) が直接マグマと反応した、(2) 天水と高温で ($>300^\circ\text{C}$) 反応した低い $\delta^{18}\text{O}$ を持つようになった玄武岩を再溶融してミキシングした、(3) アイスランド下部のマントルが酸素同位体比的に異常な値を持つ (低い)、といった理由を考えた。そして、天水をマグマと直接反応させるのは困難であり、また、酸素同位体比がこのように低いマントル物質はほとんど存在しないため、2 番目の説明が最も自然であると彼らは考えた。

Woodhead *et al.* (1993) は、OIB (Society, Pitcairn) の起源物質を探るために、酸素同位体比と Sr・Nd・Pb 同位体比を測定した。その結果、これらの OIB の起源物質に、 $\delta^{18}\text{O}$ が $+7.4\text{‰}$ よりも大きい物質の関与が認められた。これは、マントル地殻リサイクルの証拠と考えられている。しかしながら、この試料のように、マントルブリウム成分の影響を強く示す試料でも、酸素同位体比は高く、アイスランドのような 5‰ より低い同位体比は示さない。このことから、先

Fig. 7. $\delta^{18}\text{O}$ values of recent basalts of Iceland. Data source: Muehlenbachs *et al.* (1974).

ほどの 3 番目の仮説の信憑性は低いと考えられる。

Hattori and Muehlenbachs (1982) は、Reydarfjörður (東アイスランドの第三紀の玄武岩台地)、Reykjavik (アイスランドの首都で、Reykjanes 半島のつけねのすぐ北、鮮新世—更新世)、Krafla (Fig. 1 参照) の 3 か所の、地表から地下 $2\text{--}3\text{ km}$ までの、熱水 ($300\text{--}400^\circ\text{C}$) で変質した玄武岩地殻の掘削試料の酸素同位体比を測定した。酸素同位体比はそれぞれ 3.9 ± 1.3 , 2.4 ± 1.1 , -7.7 ± 2.4 で、深いところの試料ほど低い値を示した。これらの試料の水素同位体比も低かったため、熱水は天水であると結論された。また、Krafla の試料が極めて低い酸素同位体比を持つ理由としては、Reydarfjörður と Reykjavik の試料は熱水反応での水/岩石比が <0.1 であったのに対して、Krafla では >5 であったためであると考えられた。そして、アイスランド全体に見られる低い酸素同位体比は、アイスランドの玄武岩が変質前に、すでに変質した酸素同位体比が低い岩石を $10\text{--}20\%$ ほど、溶解して同化したか、酸素同位体比を交換したためであると結論された。

V. おわりに

筆者は、1991 年に次のような、同位体地球化学に対する指摘を行った (牧嶋ら, 1991)。少し長いが、ここで引用しよう。

「従来の鉛・Sr・Nd 同位体比をトレーサーとして用いる研究は行き詰まりを見せているのではなかろうか。これまで述べてきたように、ここ、十年来、これらのトレーサーを用いて、マントル中の成分 (“component” または “reservoir”) の認識や分類がなされてきた。そして、複数の成分の成因を説明する概念的なモデルがいろいろと考えられてきた。しかし、これらの

トレーサーは、各成分の成因の根底をなす地球化学的諸現象に対する“感度”と“分解能”が不十分なために、複数のモデルを共存させている。同じトレーサーを用いる限り情報の質には変化がないため、今後、これらの同位体比のデータが蓄積されたとしても、成分の数やモデルの数が増えるだけ、という可能性は十分にある。また、Allegre and Lewin (1989) に代表される、同位体比データの数学的モデル化もその行き詰まりを象徴している。すなわち、このような数学的モデル化を行うだけの質・量ともに十分なデータが、現在すでに出されているのである。この行き詰まりを打破するには、地球内部での元素の挙動を高圧実験を用いて動的に把握して従来のトレーサーを再評価すること、また、従来にはなかった新しいトレーサーを開発して用いることが必要であろう。」

この指摘から、4 年たった現在も、この状況には変化が見られないと思われる。この目的のために、PML では、リチウム同位体比 (森口ら, 1993)・ホウ素同位体比 (石川・中村, 1989)・セリウム同位体比 (牧嶋ら, 1991) といったトレーサーを開発・確立してきた。リチウム・ホウ素は、それぞれ 2 つの安定同位体を持ち、低温での熱水変質や海水との反応で大きく同位体比が変化する。そのため、地表物質の OIB 起源物質への関与が明確に指摘できる。また、セリウム同位体はネオジム同位体と組み合わせて、長時間にわたる軽希土類元素のフラクショネーションについての知見を得ることができ、OIB 起源物質の持っていた軽希土類元素の特徴を推定できる。なお、これらの、おのおののトレーサーの詳細については、先に示した文献(総説)を参照されたい。これらのトレーサーを、アイスランドの試料に適用すれば、このマントル-地殻リサイクリングという仮説に対して、どのような物質が実際にリサイクリングしているか、また、どのようなプロセスがリサイクリングに関与しているかについて、新しい制約を与えることができるにちがいない。

このテーマに関しては、Reykjanes 半島の玄武岩試料が最も適していると考えられる。なぜならば、酸素同位体比からは、NIRZ や SIVZ では変質した地殻物質の影響が見られているが、Reykjanes 半島の酸素同位体比は一般の海洋島玄武岩の範囲に入るため、このような変質した地殻の影響を受けていないと考えられるからである。

謝 辞 アイスランドに興味を持つきっかけをつくって下さった、アイスランド海外学術調査の研究代

表者である東京大学・河野長教授、及び、研究分担者の方々、中でも、本研究の直接的な動機をつくってくださり、アイスランドでの試料採集も共同しておこなってくださった、東京大学地震研究所・小屋口剛博博士に感謝する。また、アイスランド研究の今後の進め方について議論・助言をしてくださった、岡山大学固体地球内部研究センター・中村栄三教授、及び、本総説の草稿に目を通して適切な助言・忠告をしてくださった青木謙一郎東北大学名誉教授に感謝する。

本研究をおこなうにあたり、文部省科学研究費補助金、及び、文部省科学研究費補助金(海外学術調査)を使用した。

引用文献

- Allegre, C.J. and Lewin, E. (1989), Chemical structure and history of the Earth: evidence from global non-linear inversion of isotopic data in a three-box model. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **96**, 61-88.
- Allegre, C.J. and Turcotte, D.L. (1986), Implications of a two-component marble-cake mantle. *Nature*, **323**, 123-127.
- Arnason, B. (1976), Groundwater System in Iceland, Traced by Deuterium. *Societas Scientiarum Islandica, Reykjavik*, pp. 236.
- Condomines, M., Morand, P., Allegre, C.J. and Sigvaldason, G. (1981), ^{230}Th - ^{238}U disequilibrium in historical lavas from Iceland. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **55**, 393-406.
- Condomines, M., Gronvold, K., Hokker, P.J., Muehlenbachs, K., O'Nions, R.K., Oskarsson, N. and Oxburgh, E.R. (1983), Helium, oxygen, strontium and neodymium isotopic relationships in Icelandic volcanics. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **66**, 125-136.
- DePaolo, D.J. and Wasserburg, G.J. (1976), Inferences about magma sources and mantle structure from variations of $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$. *Geophys. Res. Lett.*, **3**, 743-746.
- Hart, S.R., Schilling, J.-G. and Powell, J.L. (1973), Basalts from Iceland and along the Reykjanes Ridge: Sr isotope geochemistry. *Nature Phys. Sci.*, **246**, 104-107.
- Hattori, K. and Muehlenbachs, K. (1982), Oxygen isotope ratios of the Icelandic crust. *J. Geophys. Res.*, **87**, 6559-6565.
- Hofmann, A.W. and White, W.M. (1982), Mantle plumes from ancient oceanic crust. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **57**, 421-436.
- 石川剛志, 中村栄三 (1989), ホウ素の同位体地球・宇宙化学, 地球化学, **23**, 23-34.

- Jakobsson, S.P. (1972), Chemistry and distribution pattern of Recent basaltic rocks in Iceland. *Lithos*, **5**, 365-386.
- Kurz, M.D., Meyer, P.S. and Sigurdsson, H. (1985), Helium isotopic systematics within the neovolcanic zones of Iceland. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **74**, 291-305.
- 牧嶋昭夫 (1995), 同位体地球化学から見たアイスランド. II. アイスランドのフェルシッな火山岩の成因. 岩鉱, **90**, 413.
- 牧嶋昭夫, 中村栄三, 増田彰正 (1991), ランタン-セリウム法の地球化学. 火山, **36**, 161-175.
- McKenzie, D. and O'Nions, R.K. (1983), Mantle reservoirs and ocean island basalts. *Nature*, **301**, 229-231.
- Mertz, D.F., Devey, C.W., Todt, W., Stoffers, P. and Hofmann, A.W. (1991), Sr-Nd-Pb isotope evidence against plume-asthenosphere mixing north of Iceland. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **107**, 243-255.
- 森口拓弥, 中村栄三, 石川剛志 (1993), リチウムの地球・宇宙化学—Li 同位体のトレーサーとしての可能性と課題—. 岩鉱, **88**, 415-431.
- Muehlenbachs, K., Anderson, Jr., A.T. and Sigvaldason, G.E. (1974), Low- O^{18} basalts from Iceland. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **38**, 577-588.
- O'Hara, M.J. (1973), Non-primary magmas and dubious mantle plume beneath Iceland. *Nature*, **243**, 507-508.
- O'Nions, R.K. and Gronvold, K. (1973), Petrogenetic relationships of acid and basic rocks in Iceland: Sr-isotopes and rare-earth elements in late and postglacial volcanics. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **19**, 397-409.
- O'Nions, R.K. and Pankhurst, R.J. (1973), Secular variation in the Sr-isotope composition of Icelandic volcanic rocks. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **21**, 13-21.
- O'Nions, R.K., Hamilton, P.J. and Evensen, N.M. (1977), Variations in $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios in oceanic basalts. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **34**, 13-22.
- O'Nions, R.K., Pankhurst, R.J. and Gronvold, K. (1976), Nature and development of basalt magma sources beneath Iceland and the Reykjanes Ridge. *J. Petrol.*, **17**, 315-338.
- Oskarsson, N., Steinthorsson, S. and Sigvaldason, G.E. (1985), Iceland geochemical anomaly: origin, volcanotectonics, chemical fractionation and isotope evolution of the crust. *J. Geophys. Res.*, **90**, 10011-10025.
- Richard, P., Shimizu, N. and Allegre, C.J. (1976) $^{143}\text{Nd}/^{146}\text{Nd}$, A natural tracer: An application to oceanic basalts. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **31**, 269-278.
- Rubin, K. and Mahoney, J. (1993), What's on the plume channel? *Nature*, **362**, 109-110.
- Saemundsson, K. (1979), Outline of the geology of Iceland. *Jokull*, **29**, 7-28.
- Schilling, J.-G. (1973), Iceland mantle plume: geochemical study of Reykjanes Ridge. *Nature*, **242**, 565-571.
- Shimokawa, T. and Masuda, A. (1972), Rare-earth in Icelandic neovolcanic rocks. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **37**, 39-46.
- Sigmarsson, O., Condomines, M. and Fourcade, S. (1992), Mantle and crustal contribution in the genesis of Recent basalts from off-rift zones in Iceland: Constraints from Th, Sr and O isotopes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **110**, 149-162.
- Sun, S.-S. and Jahn, B.-J. (1975), Lead and strontium isotopes in post-glacial basalts from Iceland. *Nature*, **255**, 527-530.
- Sun, S.-S., Tatsumoto, M. and Schilling, J.-G. (1975), Mantle plume mixing along the Reykjanes ridge axis: lead isotopic evidence. *Science*, **190**, 143-147.
- Weaver, B.L. (1991), Trace element evidence for the origin of ocean-island basalts. *Geology*, **19**, 123-126.
- Weaver, B.L. (1991), The origin of ocean island basalts end-member compositions: trace element and isotopic constraints. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **104**, 381-397.
- Woodhead, J.D., Greenwood, P., Harmon, R.S. and Stoffers, P. (1993), Oxygen isotope evidence for recycled crust in the source of EM-type ocean island basalts. *Nature*, **362**, 809-813.
- Zindler, A. and Hart, S.R. (1986), Chemical Geodynamics. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **14**, 493-571.
- Zindler, A., Hart, S.R., Frey, F.A. and Jakobsson, S.P. (1979), Nd and Sr isotope ratios and rare earth element abundances in Reykjanes Peninsula basalts: evidence for mantle heterogeneity beneath Iceland. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **45**, 249-262.