

レアアースの生産に伴う環境破壊と 金属のリサイクルについて

岡部 徹

レアアースは高性能モータなどに利用され、人々の生活を豊かにしている。今後もその利用は、質・量ともに世界規模で増え続けるであろう。一方で、新たな資源開発や天然資源の採掘や製錬に伴って環境破壊も進んでいく。本稿では、レアアースの生産にともなう「影の部分」、すなわち廃棄物の問題について概説し、リサイクル推進の重要性について論じる。

はじめに

自動車やロボット、スマートフォンなどの性能が向上するに伴って、希土類合金磁石を使った高性能モータの需要が増大している。工業製品の性能が向上し、生活が豊かになるのは、好ましいことではある。しかし、その一方で、希土類(レアアース)などの採掘や製錬にともなって、環境破壊も進んでいる。金属資源は新技術に役立つ面(光の部分)だけではなく、環境に負荷を与える面(影の部分)もあることは意外と知られていない。

また、レアアースをはじめとするレア金属については、資源や供給のボトルネックに関して大きな誤解も蔓延している。日本近海の海底をはじめ、世界中で大量のレアアースを含む鉱物が発見されたことがしばしば話題となる¹⁾。地学の研究としては、発見そのものはすばらしいことである。しかし、資源の量が多いという条件だけでは、そのまま社会に利用できるわけではない。一般社会で使われる金属は、採掘や製錬、廃棄物の処理などのコスト・パフォーマンスによって利用できるか否かが決定される。経済合理性がポイントである。

一般的には、レアアースは枯渇の恐れがあると思われがちだが、資源量の不安はほとんどない。レアアースの供給は中国に偏っているが、実際に

は世界中に優良な鉱山が多数存在する。陸上で発見されているだけで1億3000万トン以上と、世界需要の1000年分以上もある²⁾。現在の需要では、レアアースは、陸上資源だけでも無尽蔵と考えてよい。

それにもかかわらずレアアースの供給が、中国に偏るのはなぜか。中国には資源を取り出す際に生じる大量のゴミを安く捨てる場所があり、そこに捨てるのが容認されているからである。金属の生産においては、採掘や製錬の際に大きな環境問題を引き起こす場合が多く、廃棄物の処理コストなどの環境コストが問題となる。経済性が最優先される現在の社会では、環境コストが供給を制約する要因となる。しかし、消費国の多くの人々は、直接目にする事ができない、こうした資源産出国のバックヤードでの環境コストのからくりをまったく認識していない。

自動車1台を製造するために、必要なレアアースの量は、1kg以下と大した量ではない。しかし、そのレアアースを取り出すためには、何トンもの鉱石が処理される。産業利用されている高品位のレアアース鉱石中のネオジウム(Nd)の濃度は、高々1%程度である²⁾。必要なレアアースを取り出したあとは、残りのゴミを捨てる場所が必要となる。そのまま廃棄できればよいが、仮に、先進国で処理する場合、有害物を含むので処理コストがかかる。

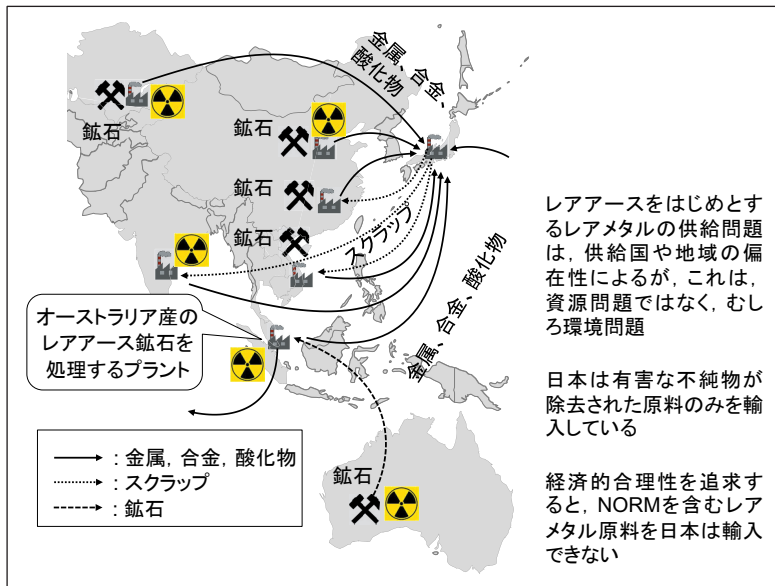


図1 レアアースの鉱石、金属、合金、酸化物、スクラップ等の物流の模式図。

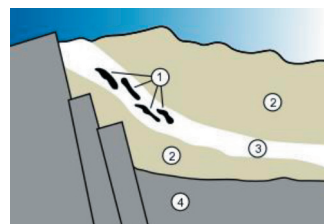
図1に示すように、オーストラリアから輸出するレアアースの鉱石は、鉱石に含まれる放射性物質などの有害物を除くためマレーシアで中間処理したあと、日本をはじめ世界中に運ばれている¹⁾。マレーシアでは錫(Sn)の製錬を長年行っており、放射性物質を処理する社会システムが整っている。

本稿では、レアアースの生産にともなう影の部分、すなわち廃棄物の問題について概説し、リサイクル推進の重要性について論じる。

NORM (自然起源放射性物質)

一般にはあまり知られていないが、太古の昔、天然の原子炉が存在していた。ガボン共和国オートオゴウェ州オクロには、20億年ほど前、「オクロの天然原子炉³⁾」とよばれる原子炉が存在し、数十万年にわたって、平均で100kW相当の出力の核反応が起きていたという(図2参照)。この天然原子炉では、ウラン(U)に富んだ鉱床に地下水が染み込んで、水が中性子減速材として機能することで核分裂反応が起きていたと考えられている。核分裂反応による熱で地下水が蒸発してなくなると反応が減速して停止し、鉱床の温度が冷える。短命の核分裂生成物が崩壊したあと、地下水が染

オクロの天然原子炉
(ガボン共和国オートオゴウェ州オクロ)



ガボンの天然原子炉の構造
 ① 核反応ゾーン
 ② 砂岩
 ③ ウラン鉱床
 ④ 花崗岩

図2 オクロの天然原子炉の模式図。20億年ほど前、数十万年にわたって、平均で100kW相当の出力の核反応が起きていた。(出典:フリー百科事典 ウィキペディア (Wikipedia), <https://ja.wikipedia.org/wiki/オクロの天然原子炉>)

み込むと、核分裂反応が再開し、サイクルを繰り返していた。このような核分裂反応は、連鎖反応ができなくなるまで数十万年にわたって続いたと考えられている³⁾。

太古の地球には、ウランをはじめとする放射性核種が多く存在していた。半減期の短い核種は、安定した核種に変化する。一方、半減期が長いウランやトリウムなど、安定した核種になる速度が遅いものは地球誕生から46億年過ぎた現在でも残っている。そのため、現在、地球を構成するすべての天然資源(主に土壌や岩石、鉱石)には、地域や物質で差はあるものの、自然起源の放射性核

種が含まれている。

この自然起源放射性物質は、NORM (Naturally Occurring Radioactive Materials) とよばれる。地球の形成過程で宇宙空間から地球に取り込まれた主な自然起源の放射性核種としては、K-40, Rb-87, La-138, Sm-147, Lu-176, Th-232 系列, U-238 系列などの核種がある。

これとは別に、宇宙線によって自然に生成される主な自然起源の放射性核種 (H-3, Be-7, Na-22, C-14, Cl-36 など) も存在する。土壌や岩石などに含まれる自然起源の放射性核種は、植物や動物などの食物を介して人体に取り込まれるため、自然起源の放射性核種は人体内にも微量ながら含まれている。

ゴールドシュミットの分類

ウラン (U) やトリウム (Th) などの NORM は、すべてのレアアース鉱物に一定量含まれているわけではなく、特定の鉱種に濃縮して含まれる場合が多い。一例をあげると、モナザイトなどの鉱石の多くは、NORM を多量に含む場合が多い。これは、レアアースの鉱石の多くが酸化物を主体とするものであり、また、ウランやトリウムなども同様に、酸化物を主体とする化合物の安定性が高く、同時にレアアース鉱石との親和性が高いためである。

特定の元素がどの鉱種に存在するかを理解する

上で、「ゴールドシュミットの分類 (Goldschmidt classification)」という概念の理解は重要である。ヴィクトール・モーリッツ・ゴールドシュミット (Victor Moritz Goldschmidt)⁴⁾ は、鉱物の不均一性を説明するために、「ゴールドシュミットの分類」⁵⁾ と呼ばれる、化学的挙動の類似性に着目した元素の分類を行った。具体的には、図3と図4に示すように、地球化学的に種々の元素が濃集する特徴を元素ごとに、以下のように分類した。

- 親鉄元素 (siderophile)
- 親銅元素 (chalcophile)
- 親石元素 (lithophile)
- 親気元素 (atmosphile)

当初は、上記の四大区分であったが、後に親生元素 (biophile) が付け加えられた。

図3と図4からもわかるように、レアアース (希土類) の鉱石には、ゴールドシュミットの分類で同じカテゴリに分類されるウランやトリウムなどの NORM が随伴することが多い。逆に、ウランの鉱物にも、多くのレアアースが含まれる場合が多い。

ゴールドシュミットの分類を理解すると、鉱石から有価物を抽出するうえで、随伴して産出される副産物の元素についても予想がつく。一例をあげると、銅や亜鉛などの親銅元素を硫化物鉱石から抽出する場合、ヒ素 (As) やカドミニウム (Cd)、水銀 (Hg) などと同時に産出する場合が多く、これらの有害物の処理が必要となる場合が多い⁷⁾。

Lithophile elements (rock-loving)	親石元素
Al, At, B, Ba, Be, Br, Ca, Cl, Cr, Cs, F, I, Hf, K, Li, Mg, Na, Nb, O, P, Rb, Sc, Si, Sr, Ta, Th, Ti, U, V, Y, Zr, W, Lanthanides	
Siderophile elements (iron-loving)	親鉄元素
Au, Co, Fe, Ir, Mn, Mo, Ni, Os, Pd, Pt, Re, Rh, Ru	
Chalcophile elements (sulfide ore-loving or chalcogen-loving)	親銅元素
Ag, As, Bi, Cd, Cu, Ga, Ge, Hg, In, Pb, Po, S, Sb, Se, Sn, Te, Tl, Zn	
Atmosphile elements (gas-loving)	親気元素
H, C, N, noble gases	
Biophile elements (bio-loving)	親生元素
C, H, O, N, S, P, Ca, K, Mg, B, Na, Mn, Zn, Fe	

図3 ゴールドシュミットの分類 (Goldschmidt classification). 元素の化学的挙動の類似性に着目した元素の分類。希土類元素 (レアアース) は、親石元素に分類される。

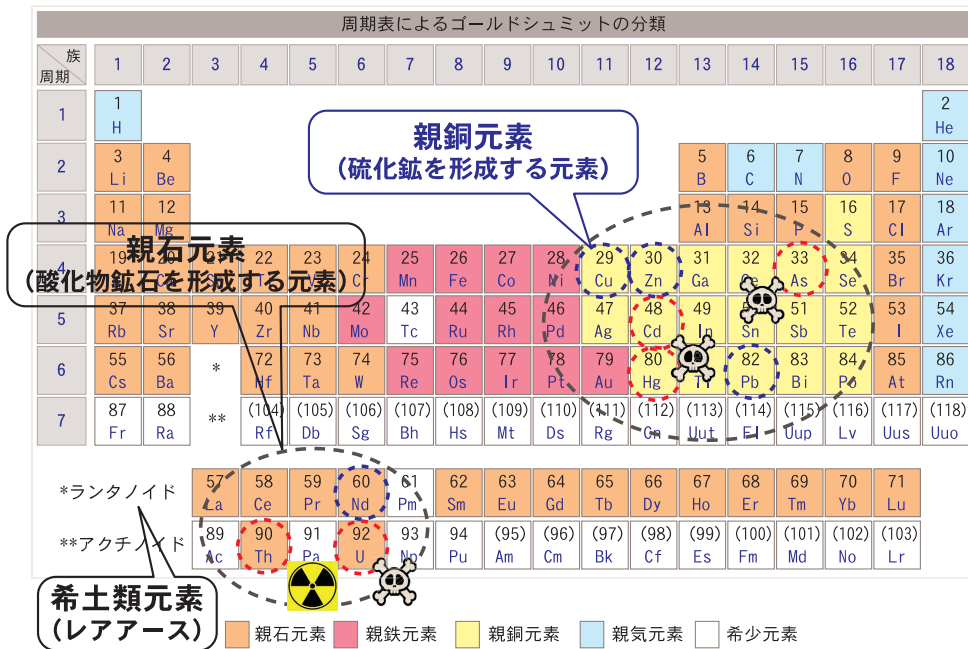


図4 ゴールドシュミットの分類 (Goldschmidt classification). 元素の化学的挙動の類似性に着目した元素の分類. (フリー百科事典ウィキペディア (Wikipedia) http://en.wikipedia.org/wiki/Goldschmidt_classification をもとに作成)

あまり話題にしない副産物
大根の“毒”葉っぱ

- 砒素 (As), ←銅 (Cu) や亜鉛 (Zn) の副産物
- 水銀 (Hg),
- 鉛 (Pb), カドミウム (Cd)
- ウラン (U), ←レアアース (希土類金属) の副産物
- トリウム (Th)
- 鉍石によって, NORMの含有量は大きく異なる.
- 大根の葉 ←大根



図5 主産物 (大根) と副産物 (大根の葉) の関係. 主産物を利用しようとする時、副産物を利用する必要がある。

レアアースを鉍石から生産する場合の NORM の処理について

レアアースを鉍石から生産する過程で、多くの場合、NORMの処理が問題となる。イオン吸着鉍など、NORMの含有量が特異的に少ない鉍体も存在するが、高性能磁石の製造に不可欠なネオジムなどを鉍石から製造する場合は、その鉍石には、ほ

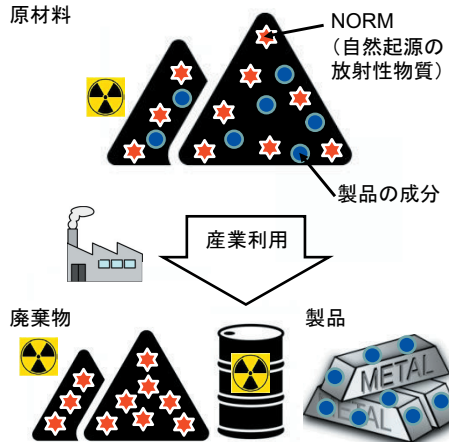


図6 NORMを含む鉍石から有用物を抽出すると、生産工程で廃棄物などに放射性核種が濃縮される。

とんどの場合 NORM が含まれている (図5 参照)。

副産物が無害、あるいは、有価である場合は、主産物の製造には大きな影響を及ぼさない。しかし、副産物の中に NORM が多く含まれている場合には、その処理に困難が伴いコストがかかることがある (図6 参照)。

採掘している。自然が何万年、何億年という歳月を費やし、Miracle of the Earth (地球の奇跡) によって形成された貴重な鉱物である。したがって、これらの鉱物が有する価値 (Value of Nature) はきわめて高い¹⁾ (図9 参照)。

貴重な天然資源の保全の重要性は論を俟たない。また前述したように、レアアースについては、採掘時に多くの場合 NORM 処理の問題が生じる。一方、工業製品のスクラップからレアアースを抽出してリサイクルで循環利用する場合には、NORM は発生せず、その処理問題は起きない。工業製品のスクラップからレアアースを抽出する場合、鉱物由来の有害物が一切発生しないのは重要なポイントである。

残念ながら、現時点では、複雑かつ多様な元素を含む工業製品からレアアースを効率良く分離してリサイクルする低コストの技術は存在しない。天然資源を利用し、レアアースを生産する方がコスト的にはるかに有利である。しかし、今後は地球全体の環境を考慮したレアメタルのリサイクルプロセス技術の開発が重要な課題となる。

このような背景から、筆者らは、国内にすでに蓄積されている、あるいは今後大量に発生するレアメタル含有スクラップからレアアースをはじめとする有用なレアメタルを回収し、資源を効率よく循環利用するための研究を多角的に行っている。この循環利用の取り組みの重要性が今後より一層高まっていくことは間違いない。

おわりに

レアアースは高性能モータなどに利用され、人々の生活を豊かにしている。今後もその利用は、質・量ともに世界規模で増え続けるであろう。同時に、新たな資源開発や天然資源の採掘や製錬に伴って環境破壊も進んでいく。

世界規模で環境負荷を抑えるにはどのような社会システムを導入すべきか、日本をはじめとする技術先進国はこの課題にしっかりと対応しなければならない。

自然環境を維持しつつ持続的な社会の発展を実現させるためにも、コストはかかっても天然資源の採掘量や廃棄物の発生量を少しでも減らすべく、資源リサイクルを進めるべきではなかろうか。

参考文献

- 1) 岡部徹：‘レアアースをはじめとするレアメタルの資源戦略と環境制約’，環境情報科学，**43** No.4 (2015)，1-6.
- 2) O. Takeda and T. H. Okabe, “Current Status on Resource and Recycling Technology”, Metallurgical and Materials Transactions E, **1A** June (2014), 160-173.
- 3) フリー百科事典 ウィキペディア (Wikipedia), [https://ja.wikipedia.org/wiki/ オクロの天然原子炉](https://ja.wikipedia.org/wiki/オクロの天然原子炉)
- 4) フリー百科事典 ウィキペディア (Wikipedia), [https://ja.wikipedia.org/wiki/ ヴィクトール・モーリッツ・ゴルトシュミット](https://ja.wikipedia.org/wiki/ヴィクトール・モーリッツ・ゴルトシュミット)
- 5) フリー百科事典 ウィキペディア (Wikipedia), http://en.wikipedia.org/wiki/Goldschmidt_classification
- 6) 岡部徹, 中村崇: ‘レアメタルを巡る誤解を解く’, OHM (オーム社), **97** No.9 (2010), 44-47.
- 7) 岡部 徹: ‘レアメタルに関する大きな誤解: 工場のゴミゼロ化は本当に環境に優しいのか’, OHM (オーム社), **104** No.11 (2017), 40-42.
- 8) T. H. Okabe: ‘Bottlenecks in Rare Metal Supply and the Importance of Recycling—a Japanese Perspective’, Mineral Processing and Extractive Metallurgy, **126** No.1-2 (2017), 22-32.

おかべ・とおる OKABE Toru H.

1988 京都大学工学部冶金学科卒業。同大学院博士課程へと進み、チタンなどのレアメタルの精錬に関する研究で1993年に博士号を取得。米国マサチューセッツ工科大学 (MIT) 博士研究員、東北大学素材工学研究所助手、東京大学生産技術研究所助教授 (准教授) を経て、2009 教授に就任。2015-2019 生産技術研究所副所長。現在は、東京大学副学長、生産技術研究所持続型エネルギー・材料統合研究センターセンター長、同所非鉄金属資源循環工学寄付研究部門特任教授 (兼務)。