

クリティカルメタルの資源循環の現状と課題

岡部 徹

レアメタルを中心に、供給リスクが高く、産業における重要性が高い金属、すなわちクリティカルメタルの資源循環を実現する SDGs の重要性について解説する。とりわけ、今後、非鉄金属産業の資源循環において SDGs が果たす役割について、工業製品のスクラップからのレアメタルのリサイクルを例に、その意義について論じる。

はじめに

核戦争や新型コロナウイルス禍の何倍ものパンデミック等で、地球の人口が激減すれば、人類はそれまでに生産した資源を循環利用して生活せざるを得なくなるであろう。

また、将来、エネルギー革命が起こり製錬に関する技術革新が進展すると、人類は金属資源の多くを、天然鉱石からではなく、スクラップからリサイクルして循環利用し、持続的な生活を営んでいるかもしれない。

しかしながら、現状では、世界の人口は依然として増え続けている。また、人々の生活が豊かになるに伴い、人類が消費する資源とエネルギーの量は、毎年、増大している。

現在の技術を用いる限り、多くの場合、スクラップから金属を抽出して循環利用するよりも、自然界で特異的に濃縮された天然鉱石を利用する方が、所要エネルギーも少なく、コスト的にははるかに合理的である。この結果、経済合理性が優先される今日では、天然鉱石を利用する金属の生産量は増大し続ける。同時に、採掘や製錬にともなう環境破壊が全世界で進展する。

本稿では、持続可能な開発目標 (SDGs) を見据えて、レアメタルを中心に、供給リスクが高く、産業界において重要性が高い金属、すなわちクリティカルメタルの資源循環について解説する (図 1)。

持続可能な開発目標 (SDGs) (2015年9月25日国連持続可能な開発サミットで採択 2016年1月1日発効)



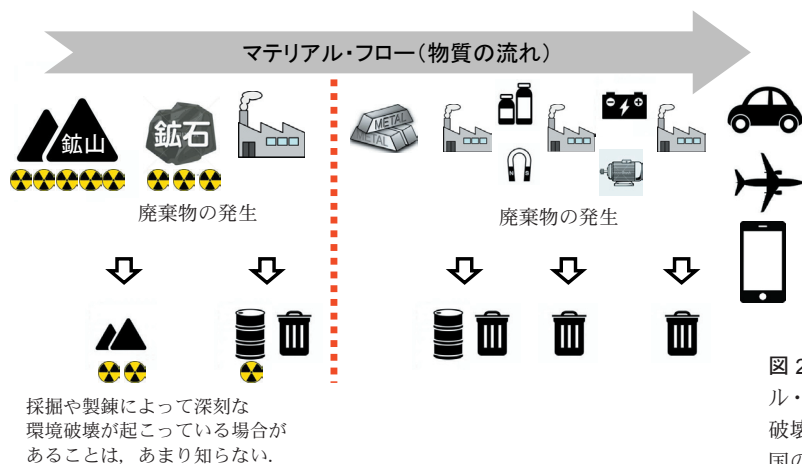
図 1 筆者が取り組んでいる、SDGs の領域は、9 産業と技術革新の基盤をつくろう、11 住み続けられるまちづくりを、12 つくる責任つかう責任、の 3 つの分野である。

レアメタル鉱石の品位と廃棄物の問題

工業製品を生産する場合、とくに、ハイテク・省エネ関連の製品を製造する場合、レアメタルをはじめとする多種多様のクリティカルメタルが必要となる。

今や、自動車や航空機、ロボット、スマートホンなどは、レアメタルの塊と言っても過言ではない。

自動車をはじめ、工業製品を一つ製造するために、必要なレアメタルの総量は大した量ではない。しかし、その製品に使われるレアメタルの多くは、鉱石品位が低いため、工業製品一つを生産するためには、何トンもの原鉱石が採掘され処理される



(図2 参照)。詳しい事例については、最近、筆者が執筆したレアアースについての事例解説を参照いただきたい¹⁾。

ここでは、レアアースやタンタル、ニオブなどの具体的な事例について概略を紹介する。

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ム(Nd)の濃度は、高々1%程度である^{1)~5)}。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、有害物質を含むので多額の処理コストがかかる。

中国では、レアアースに関しては、採掘、鉱石の処理、製錬、精錬、合金の製造を国内で一貫して行うことができる。しかし、仮に日本に安価な鉱石を輸入することができても、鉱石から有用な金属を取り出す過程で発生する有害物の処理に多大なコストがかかる。このため、経済的な観点からは、日本で鉱石を製錬・精錬処理し、レアアースを抽出して利用することはできない。

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⁴⁾。マレーシアではスズ(Sn)の製錬を長年行っており、放射性物質などの有害物質を処理する社会システムが整っている。このため、レアアース鉱石の処理に伴って発生する廃棄物

の処理を低コストで行うことができるからである。

このように、レアアース、とくに永久磁石の原料であるネオジムに関しては、資源埋蔵量の問題ではなく、採掘や製錬に伴って発生する廃棄物の処理コスト、すなわち環境コストが、供給面での主な制約要因となっているという認識が不可欠である。

ここでは、代表的な事例としてレアアースを取り上げたが、他のクリティカルメタルについても、有害物の種類や量は異なるものの、同様に環境コストが制約要因となる場合が多い。

NORM（自然起源放射性物質）

太古の地球には、ウランをはじめとする放射性核種(同位体)が多く存在していた⁶⁾。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(主に土壌や岩石や鉱石)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⁷⁾。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。

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 (モナズ石) 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濃縮する傾向があ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。本稿では詳細を割愛するが、詳細は、筆者の解説³⁾や関連資料⁸⁾⁹⁾を参考としていただきたい。

レアアース (希土類元素) の鉱石には、ゴールドシュミットの分類で同じカテゴリ (親石元素) 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ている場合が多い。

レアアースを鉱石から生産する場合の NORM の処理について

前述したように、レアアースを鉱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。中国南部に存在するイオン吸着鉱など、NORM の含有量が特異的に少ない鉱体も存在するが、高性能磁石の製造に不可欠なネオジム (Nd) などの鉱石には、NORM が含まれていることが多い。

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

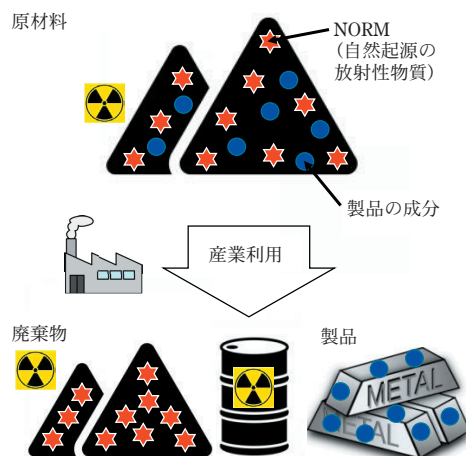


図3 NORMを含む鉱石から有用物を抽出すると、生産工程で廃棄物などに放射性核種が濃縮される。レアアースはその典型事例。

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多大なコストがかかることがある (図3 参照)。

現在、環境規制や廃棄物処理の法律は国ごとに定められているため、NORM の処理コストは国や社会システムによって大きく異なる。現状では、日本における NORM の処理に関する規制は極めて厳しいため、仮に国内で希土類鉱石を処理しようとすると多大なコストがかかる。このため、NORM の処理は、鉱石の産出地域あるいは、NORM の処理に適した社会システムを有する国で行われている。

ニオブ、タンタルを鉱石から生産する場合について

鉱石からレアアースを生産する場合の NORM の問題は、典型的な事例であるが、他のレアメタルについても同様の問題が生じる場合がある。

たとえば、ニオブを鉱石から生産する場合も NORM の処理の問題が発生する。また、タンタルについても、鉱石によるが、NORM の濃度が高く処理が難しい鉱石が多数存在する。

そもそも、現在稼働している最大級のニオブ鉱山 (Araxia 鉱山, ブラジル) は、ウランの探査の過

程で発見されたものである。鉱山の発見時は、ウラン濃度は商業利用できるほどは高くはないが、ニオブ濃度は特異的に高いことが報告されていた。のちに、ニオブの需要が急増したため、現在は、ニオブ鉱山として採掘が行われている。

スズの鉱石に、タンタルが含まれる場合があり、タンタルの一部は、スズ製錬の副産物であるスズスラグから生産される場合がある。この場合、スズスラグの中に NORM が含まれる場合もあり、取り扱いが難しくなる場合もある。

前述のレアアースの話題に話が戻るが、マレーシアで、NORM を含むレアアースの鉱石の処理を行うことが可能なのは、古くからこの国では、スズの製錬を行ってきたためである。この国のスズ製錬から発生する副産物は NORM を含む場合が多く、この国では、長年の産業実績から NORM を含む廃棄物の処理を行う法的な整備が進み、また、社会インフラが整っている。

国や地域によって、環境規制などの法的な規制が大きく異なるのは致し方ないことであるが、レアメタルの場合は、規制や環境コストの高低差をうまく利用して生産が行われ、世界に流通している。

この事実を多くの一般の人々は知らない。しかし、レアメタルをはじめとする非鉄金属を利用して便益や富を享受している消費国の人々は、廃棄物の処理問題の「影の部分」に隠されている環境問題を認識しておく必要がある¹⁾¹⁰⁾(図2参照)。

このように、人類にとって有用かつ不可欠なレ

アメタルを生産する場合、富を生むという“光”の部分と、有害な廃棄物処理という“影”の部分があることを理解する必要がある。光と影の両面を正確に認識せずに、レアメタルの生産やリサイクルについて議論しても、机上の空論となる。

レアメタルのリサイクルの重要性

現在、産業利用されているレアメタルの鉱山では、地表近くに特異的にレアメタルが濃縮した鉱物を採掘している。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、これらの鉱物がある価値 (Value of Nature) はきわめて高い¹⁾⁴⁾¹¹⁾。

前述したようにレアアースやニオブ、タンタルの採掘時には、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やニオブ、タンタルを抽出してリサイクルで循環利用する場合には、鉱石由来の 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メタルを抽出する場合、鉱物由来の有害物が一切発生しないという点は重要なポイントである¹⁾¹¹⁾。

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メタルを効率よ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。天然資源を採掘してレアメタルを生産する方がコ

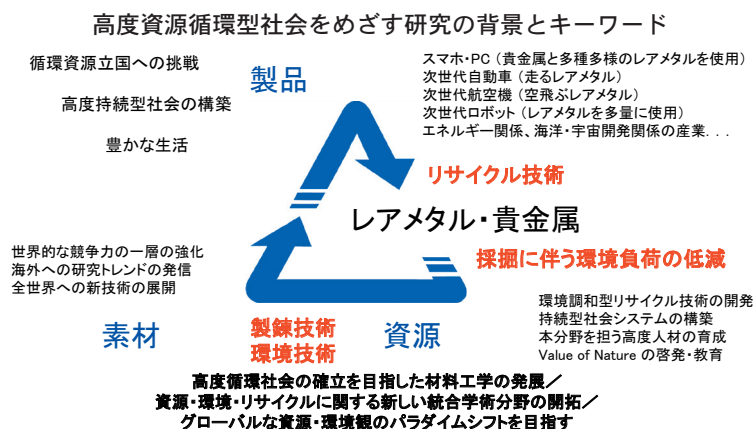


図4 レアメタルや貴金属を例にとって、高度資源循環型社会を実現を目指すために不可欠な、リサイクル技術や環境技術とその関連重要項目とキーワードを列記した。

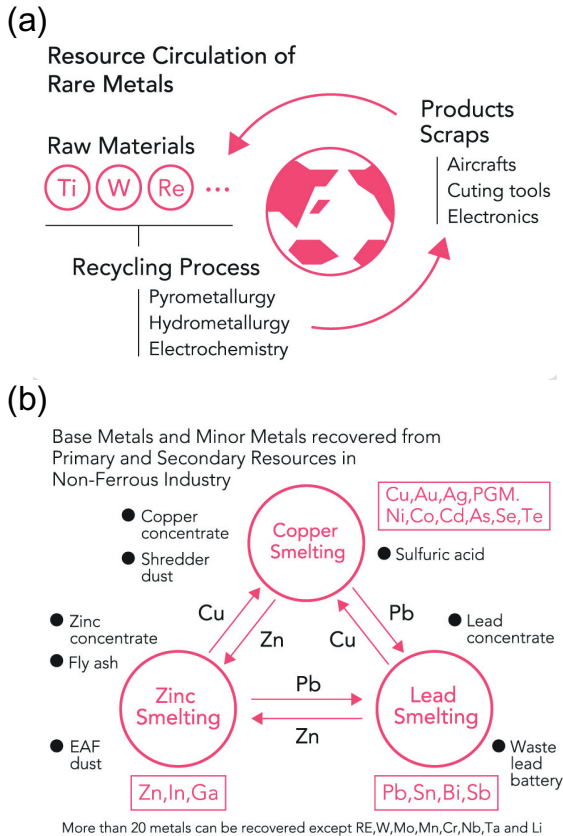


図5 東京大学生産技術研究所非鉄金属資源循環工学寄付研究部門 (JX 金属寄付ユニット) では、岡部徹特任教授および中村崇特任教授が、それぞれ上記の (a) (b) の取り組みを行ってきた。

スト的にははるかに有利である。しかしながら、今後は地球全体の環境保全を図るべく、レアメタルのリサイクル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、将来、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。今後、資源循環利用の取り組みの重要性は、より一層高まっていくことは間違いない (図4参照)。

リサイクルの重要性とその意義の啓発

上記の背景から筆者らは、長年、レアメタルや



図6 図5に示す非鉄金属資源循環工学寄付研究部門の取り組みを、デザイナー (山中研) に依頼すると上記のような図ができた。広く一般の人に対し、本分野の重要性をわかりやすくアウトリーチするには、デザインの力も重要である。

貴金属の環境調和型リサイクル技術の開発に取り組んでいる。技術開発に関する研究だけでなく、一般社会に対しても、その重要性和社会的な意義の啓発を行うべく、各種活動を行っている。

2012年には、非鉄金属資源循環工学寄付研究部門を立ち上げた。ここでは、非鉄金属産業が資源リサイクルにとって不可欠な存在であり、今後、持続型社会の構築に向けて重要な役割を果たすことを、広く一般社会に啓発してきた (図5、図6参照)。

同時に、若手の研究者や技術者の育成にも注力してきた。今後は、SDGsを目指した取り組みも主な活動範囲に加え、多角的な活動を行う予定である¹³⁾。

おわりに

今後も当面は、レアメタルの生産は、特定の国に

表1 レアメタルの多くは、需要が少ないため、ごく一部の国や地域から生産されれば、世界の需要がまかなえる。一方、特定の国が供給を寡占化するため、資源供給という観点からは、クリティカルリティ（供給障害の危険性）が高くなる。

鉱種	資源の上位算出国 (2015 年)						上位3国のシェア
レアアース	①中国	85%	②豪州	8%	③米国	3%	96%
アンチモン	①中国	77%	②ロシア	6%	③豪州	4%	86%
白金族	①南アフリカ	70%	②ロシア	13%	③ジンバブエ	7%	90%
タングステン	①中国	82%	②ベトナム	6%	③ロシア	3%	90%
リチウム	①豪州	41%	②チリ	36%	③アルゼンチン	12%	89%
インジウム	①中国	49%	②韓国	20%	③日本	10%	78%
モリブデン	①中国	38%	②米国	21%	③チリ	18%	77%
コバルト	①コンゴ	51%	②中国	6%	③カナダ	5%	62%
ニッケル	①フィリピン	21%	②ロシア	9%	③カナダ	9%	40%
チタン	①中国	16%	②豪州	13%	③ベトナム	10%	39%

USGS Mineral Commodity Summaries (2016). <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2016/mcs2016.pdf>

よる寡占が続くであろう(表1参照)。資源セキュリティという観点からは、一国からの資源供給に依存するのはリスクが高い。こうした観点から、供給源を多角化するだけではなく、リサイクル等により、レアメタルの供給ルートの多様化を推進することが工業立国である日本にとっては重要な課題である。

レアメタルは、ハイテク機器に利用され、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。

このような情勢下で、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SDGsに適合した持続的な社会を実現するためにも、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少できるよう資源のリサイクル利用を進めるべきではなかろうか。

参考文献

- 岡部徹：自動車技術, **74** No.9 (2020), 82-88.
- 岡部徹, 野瀬勝弘：第1章 自動車を取り巻く諸情勢, 1.6 自動車用のレアメタルとリサイクル(分担執筆), 自動車技術ハンドブック第7分冊設計, EV・ハイブリッド編, 社団法人自動車技術会 (2016.2 新版発行), pp.38-59. (ISBN-10: 4904622057, ISBN-13: 978-4904622056, ISBN: 978-4-904056-62-2)

- 岡部徹：金属, **90** No.2 (2020), 93-98.
- 岡部徹：環境情報科学, **43** No.4 (2015), 1-6.
- O. Takeda and T. H. Okabe: Metallurgical and Materials Transactions E, **1A** (June, 2014), 160-173.
- 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)
- フリー百科事典 ウィキペディア (Wikipedia), https://en.wikipedia.org/wiki/Naturally_occurring_radioactive_material
- 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・モリーツ・ゴルトシュミット](https://ja.wikipedia.org/wiki/ヴィクトール・モリーツ・ゴルトシュミット)
- フリー百科事典 ウィキペディア (Wikipedia), http://en.wikipedia.org/wiki/Goldschmidt_classification
- 岡部徹：OHM(オーム社), **104** No.11 (2017), 40-42.
- T. H. Okabe: Mineral Processing and Extractive Metallurgy, **126** No.1-2, (2017), 22-32.
- Annual Review 2017 素材編(工業レアメタル), アルム出版社, (2017).
- JX 金属, ニュース(イベント・お知らせ 2020 年度) 大井特別理事がレアメタル研究会で「非鉄金属資源素材業界とSDGs/ESG」と題して講演を実施. <https://www.nmm.jx-group.co.jp/information/2020/sdgsesg.html>

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年博士号取得。米国マサチューセッツ工科大学(MIT)の博士研究員、東北大学素材工学研究所の助手、東京大学生産技術研究所の助教授(准教授)を経て、2009 教授に就任。2015-2019 生産技術研究所副所長。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)。現在は東京大学副学長。