

レアメタルの環境・リサイクル技術の 課題と展望

岡部 徹*

1. はじめに

チタン(Ti)やレアアース(希土類元素, Rare Earth Metals: REMs)をはじめとするレアメタルの製錬・リサイクル技術に関する研究に筆者が取り組んでから25年以上が経過したが, レアメタルの研究を取り巻く環境はこの10年間で大きく変わった。

10年以上前には, レアメタルの研究, 特に製錬やリサイクルについては, 材料研究の専門家でさえもその意義や重要性を十分に理解していなかった。ごく一部の専門家は, 将来レアメタルのプロセス技術が産業的に重要になることを認識していた。しかし, 関連分野の研究者の多くはこの分野から離れて行った。これは, 製錬やリサイクルに関するプロセス技術に関する研究は, 学術論文の生産性が低く, 見かけ上の研究成果を稼ぐのが難しいため, 研究者として生き残るのが困難な状況であったためと考えられる。

ところが, 産業界では2006年頃から情報技術(Information Technology: IT)の発展を中心にレアメタル需要が急増してレアメタル・ブームが巻き起こり, 日本のハイテク産業を支える基幹材料として, レアメタルの重要性が一般社会にも認識されるようになった。このころから, 新聞やテレビ等一般のメディアでも, レアメタルという言葉が頻繁に使われるようになった。

一方, 供給面では2010年に尖閣諸島の領有問題に端を発した外交問題から, 突如中国がレアアースの輸出を停止した。このレアアース・ショックを機に, 需給の逼迫による資源価格の高騰に供給不安も加わって, 日本のハイテク産業は一時期パニックに陥り, 深刻な産業・経済問題へと発展した。この結果, 産業界だけではなく子供を含む一般の人々の間にも, レアアースをはじめとするレアメタルが, 日本のハイテク産業を支える基幹材料として極めて重要であるという

認識が広まった。

近年, レアメタルについては, 供給面のリスクだけでなく, その製錬やリサイクルに伴って発生する有害な廃棄物の処理の問題など, 生産をめぐる環境汚染問題も報道されるようになった。その結果, 鉱物資源のほとんどを輸入し, 環境規制が極めて厳しい日本では, 資源確保だけではなく, 環境調和型の高効率リサイクル技術の開発による資源の循環利用が重要であることも広く知られるようになってきた。

このように, 材料研究, 特にプロセス技術に関する研究分野において, レアメタルのリサイクル技術がクローズアップされるようになったのは, 最近の出来事である。

2. レアメタルの供給問題のボトルネック

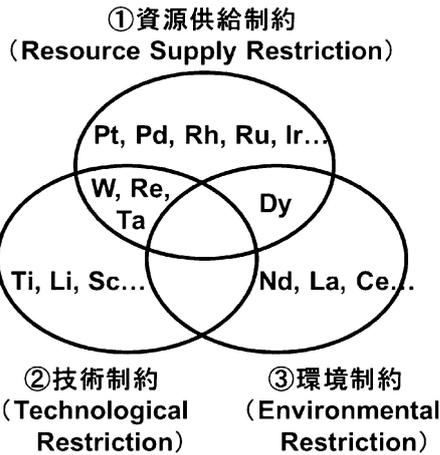
レアメタルの供給に関するボトルネックを的確に認識することは, レアメタルの将来動向やリサイクルについて考える上でも極めて重要である。このボトルネックの態様について, 著者は各所で論じているので⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾, ここではポイントのみを記述する。

レアメタルの生産と供給におけるボトルネックとして考慮しなければならない主な項目は以下の3点である。

- ① 資源供給制約(Resource Supply Restriction)
- ② 技術制約 (Technological Restriction)
- ③ 環境制約 (Environmental Restriction)

上記の①②③の制約は, 独立して存在するのではなく, お互いに密接に関連している。レアメタルの生産を商業化するには, 上記①②③の制約すべてを解決することが不可欠である。しかし, 近年の海底レアアース泥の報道の事例からもわかるように, ①のみで議論する事例が多い。ポリビアのウユニ湖からのリチウムの採取・製錬の可能性や企業化の議論も, ②や③を無視して, ①のみがデフォルメされて報道されている典型的な事例の一つである。(図1参照⁽¹⁾)

* 東京大学生産技術研究所 持続型エネルギー・材料統合研究センター;センター長, 教授(〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1) Challenge and Vision of Environment and Recycling Technologies for Rare Metals; Toru H. Okabe(Integrated Research Center for Sustainable Energy and Materials, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Tokyo)
Keywords: rare metals, recycling, non-ferrous metal smelting, environmental technology
2016年5月12日受理[doi:10.2320/materia.56.157]



①資源供給制約のみが、メディアでは注目され、②技術制約や③環境制約については、あまり報道されない。(企業も②と③については、報道されると困る場合が多い。)

図1 レアメタルの製造や供給を制約する主な要因。レアメタルの製造や供給の制約については、資源供給制約が問題となるものは少なく、むしろ、技術制約や環境制約が実際には主な制約となることが多い。

技術が進歩すれば、深い深度の地底や海底の資源を利用できるようになり、また、品位が低く製錬が困難な鉱物の利用も可能となるかも知れない(①の解決)。一方で、レアメタルの分離精製などについては、現状では環境規制により実施できる国や地域が制限されている場合が多いが、有害物の処理技術が進歩すれば、これらの環境制約が無くなる場合もある(②③の解決)。社会の動向や、技術革新により上述の制約は変化する。

詳細は割愛するが、レアメタルの供給については、資源の埋蔵量が制約となっている事例よりも、採掘や製錬の技術やコスト、さらには環境破壊が制約要因(ボトルネック)になっている事例の方がむしろ多いことを認識することが肝要である。

3. レアメタルの用途の拡大と重要性の増大

レアメタルの用途は多様であり、その分類方法は千差万別である⁽⁵⁾⁽⁶⁾。図2は、普段、元素周期表を目にすることがない一般の人に対し、著者が説明に利用しているレアメタルの分類法の一例である。この用途別分類法は、科学的でない部分もあるが、レアメタルの歴史や今後の動向を理解する上で有用である。

レアメタルの多くは、電子材料や磁性材料として利用されてきた。ハイテク製品には必須の基幹材料であるが、製品中の部品の素材として利用されて通常の生活では直接目にする事が無いため、一般には馴染みの少ない元素であった。しかし、デジタル機器の高性能化と普及に伴ってレアメタルの用途が拡大した結果、「①電子材料用レアメタル」の中には価格が高騰するものも多くなり、メディアに登場して一般の話題となるレアメタルも多い⁽²⁾⁽³⁾。電子機器には不可欠な

レアメタルの用途別分類

① 電子材料用レアメタル

- 半導体(Si, Ge, GaAs, ...)
- 磁性材料(Nd, Dy, Sm, Co, ...)
- 各種電子材料(In, Ta, Li, Ba, Sr, ...)

② 合金用レアメタル

- 工具用特殊合金(W, Co, Ta, ...)
- 鉄鋼添加用(V, Cr, Mo, Nb, ...)

③ 航空・宇宙材料用レアメタル(空飛ぶレアメタル)

- 航空機材料
- (Ti, Ni基超合金, Re, PGMs, Al-Sc合金, ...)

④ 自動車用レアメタル(走るレアメタル)

- 合金添加元素(Mo, V, Nb, Ti, ...)
- 磁石材料(Nd, Dy, Sm, Co, ...)
- 触媒(Pt, Pd, Rh, ...)

⑤ エネルギー関連レアメタル

- 太陽光発電(Si, Cd, Te, In, Ga, Ru, Ag, ...)
- 電池材料(Li, Co, Ni, Pt, ...)
- 電極・送電材料(Ag, Nb, Sn, Bi, ...)

⑥ 原子力関連レアメタル

- 原子炉用材料(Zr, Hf, 特殊合金...)
- 放射性廃棄物(PGMs, ...)

⑦ 医療・生体用レアメタル、その他

- 生体材料(Ti, Nb, Ta, ...)
- 薬品・健康食品

⑧ ロボット産業用レアメタル(働くレアメタル)

図2 レアメタルの用途。これまでは、電子材料用、合金用、航空機材料用のレアメタルが主な需要であったが、今後は、「走るレアメタル」、および、「エネルギー関連レアメタル」の需要が大幅に増大する。

“産業のビタミン”として、レアメタルの重要性の重要性は広く一般にも認識されるようになった。

一方、電子材料用のレアメタルと同様、古くから利用されてきたレアメタルとして、「②合金用レアメタル」がある。その代表格は、工具材料や特殊鋼の基幹素材としても不可欠なタングステン(W)やコバルト(Co)、ニッケル(Ni)、クロム(Cr)などである。また、バナジウム(V)やニオブ(Nb)などのように、鉄鋼材料の添加用の合金元素としての需要が大きいものもある。これらの元素は、鉄鋼やアルミニウム合金の性能を向上させる添加元素として利用される。

鉄(Fe)やアルミニウム(Al)、銅(Cu)などと比べれば、これらの添加元素として利用されるレアメタルの使用量は微々

たるものである。しかし、鉄鋼関係に利用される「②合金用レアメタル」は、鉄鋼やアルミニウム合金の産業そのものが桁違いに大きいため、レアメタルの中では消費量が大きいことも特徴のひとつである。化学プラントや発電所などの反応容器や配管材料にも、レアメタルを含む特殊合金が多量に使われる。

電子機器や自動車などの付加価値が大きい工業製品の高性能化に伴い、図2に示す「①電子材料用レアメタル」や「②合金用レアメタル」の需要はこの30年間で飛躍的に増大した。今後もこれらのレアメタルの重要性はさらに増大するため、レアメタルの用途や生産量は一層拡大するであろう。特に、中国をはじめとする新興国の経済発展は、これらのレアメタルの需要を今後さらに拡大させる要因となっている。

航空関連産業の発展に伴い、航空機などの構造材として使用される「③空飛ぶレアメタル」の需要も増大している。これらの「空飛ぶレアメタル」の代表格は、チタンであろう。軽くて抜群の強度を有するチタン合金は、航空機産業には不可欠な材料である。ジェットエンジンのタービンブレードに利用されるニッケル基超合金にも、多種多様のレアメタルが使用されている。「空飛ぶレアメタル」の将来は明るく、今後も一層発展するであろう。しかし、ニッケル基超合金の添加元素として利用されるレニウム(Re)やマイナーな白金族金属(Platinum Group Metals: PGMs)など、資源的に稀少で大幅な増産が困難なレアメタルの供給動向は筆者の気かりの一つであり、これらのレアメタルのリサイクル技術の開発は重要な課題である。

自動車産業の発展に伴い、電子材料や合金用の「④走るレアメタル」の需要も増大した。今後もこの傾向は一層加速するものと考えられる。なぜなら、燃費を向上させるためにより軽量・高強度かつ高性能な材料を使うようになるであろうし、さらには、自動車に搭載される制御機器やセンサ、通信機器、電池、モータ類に使用されるレアメタルは、これまで以上に増えることが予想されるからである。

自動車に使われる電子部品は、同じ機能であっても携帯電話やPCなどに使われる電子部品よりも、はるかに高い信頼性が要求される。熱や振動、温度などの環境変化に対する長期間の安定性を追及する自動車用の電子部品には、一般の家電製品より多くのレアメタルが必要となる。このため、自動車の電装化に伴い、「走るレアメタル」の需要は増大した。

将来、ハイブリッド自動車や燃料電池自動車が増産されるようになると、高出力モータや触媒材料の需要が大幅に拡大する。特に、高性能磁石の素材として不可欠なネオジウム(Nd)やジスプロシウム(Dy)などのレアアース、排ガス浄化触媒や燃料電池の触媒として不可欠な白金(Pt)やロジウム(Rh)などの白金族金属などの必要性は、さらに増大するであろう。車載用リチウム2次電池にはリチウム(Li)やコバルトなどのレアメタルが多量に使用される。自動車の高性能化・高機能化に伴い、「走るレアメタル」の需要は、急激に増大する可能性が高い。

さらに近年では、太陽電池をはじめとする、エネルギー関連のレアメタルも注目を集めている。高純度シリコンを主原

料とする多結晶シリコン太陽電池や周辺の制御装置も基幹材料として多くのレアメタルが使われる。また、今後発展が期待される新型太陽電池も多種多様のレアメタルを使用する。太陽光発電には、蓄電や変換(インバータ)、送電などの設備も不可欠であるが、これらの機器の基幹部品には、レアメタルやその化合物が多量に使用されている。

今後はロボットやドローンなどの関連産業に使われるレアメタルの需要も増大するであろう。

4. レアメタルのリサイクルの重要性

レアメタルというと、「希少金属→枯渇」といった短絡的な理解に基づいた内容でのメディア報道が多い。しかし、実際にはレアアースをはじめとする多くのレアメタルの供給面では、資源の埋蔵量そのものはあまり問題ではなく、その採掘や製錬時のコストや環境負荷が問題となる。資源供給制約よりも、採掘や製錬の技術や環境負荷とこれらに関するコストの方が、大きな制約要因となっている事例の方が多いという事実を材料研究の関係者も認識するべきである。

リサイクル原料からレアメタルを抽出して再利用する場合には、天然鉱石を処理する際に発生する鉱物由来の難処理廃棄物はまったく出ない。これはリサイクルによる資源循環利用の大きな利点のひとつである。

一例をあげると、高性能磁石に使用されるネオジウムを鉱石から抽出する場合、ウラン(U)やトリウム(Th)などの天然由来の放射性元素(Naturally Occurring Radioactive Materials: NORM)を含む廃棄物が発生するケースが多い。しかし、工業製品のスクラップをリサイクルして、ネオジウムを抽出する場合には、NORMを含む廃棄物は一切発生しない。

現在の技術水準でレアメタルのリサイクル・コストを算出すると、ほとんどのレアメタルについて、工業製品のスクラップからリサイクルするのは、経済的にはメリットが少ない。これは、鉱石や廃棄物の処理コストについて大きな地域差があり、天然鉱石を処理し、低いコストで廃棄物を処分したほうがコスト的に有利なためである。例外として、白金族金属等の極めて価格が高いレアメタルや工場から工程内スクラップとしてまとまった量が発生するレアメタルのスクラップについては、リサイクルに経済的な合理性が生じる。

レアメタルについては、経済的な観点からばかりではなく、鉱物資源や地球環境を保全するという観点からリサイクルを推進すべきであると筆者は考えている。レアメタルの鉱石の採掘やその製錬には、環境を破壊するケースが多く、修復が困難であることがリサイクルを推奨する主たる理由である。

しかし一方で、技術的に解決しなければならない課題や経済的なメリットを無視して強引にリサイクルを推進すると、別の問題を生むことも多い。工業製品の中のレアメタルを無理にリサイクルすると、ともすると膨大なエネルギーを消費する、あるいは精錬工程から新たな有害物が発生するといった問題があり、その処理コストの方が高くなる場合もある。今後は、高効率、かつ、環境調和型のリサイクル技術の開発

が重要となることは論をまたない。

5. 環境調和型の高効率リサイクル技術

鉱石からレアメタルを抽出して分離・精製する技術の多くはすでに確立されている。しかし、工業製品のスクラップ中に微量に存在するレアメタルを効率良くリサイクルする技術の開発は、現時点では十分に進んでいない。これは、天然鉱石とは異なりスクラップ中に共存する元素が多様で、かつ時代とともにスクラップ中のレアメタルの含有量や不純物・有害物の種類と量が大きく変化するためである。

日本には、銅・鉛・亜鉛製錬の健全な産業が存在するため、スクラップ中の貴金属や銅については、これらの非鉄製錬プロセスを応用することにより効率良くリサイクルすることができる。しかし、図2に列記したレアメタルのほとんどは、現状では、工業製品のスクラップからはリサイクルされていない。これは、スクラップの回収だけでも大きなコストがかかるだけでなく、現在の技術レベルでレアメタルをリサイクルしようとする処理が困難な廃棄物が発生する、あるいはエネルギー消費が大きい多段のプロセスを要する場合が多く、分離・抽出にコストがかかるためである。

環境調和型のリサイクル技術の開発にあたって重要なポイントは、以下の項目である。

- ① 高効率・高速プロセスであること
- ② 省エネルギープロセスであること
- ③ 有害な廃棄物が発生しないプロセスであること

今後、環境規制は世界的な規模で強化されていくであろう。このため、有害な廃液や廃棄物を発生させずに、スクラップ中のレアメタルを効率良く分離・回収する技術は海外でも重要となる。

以上の背景を踏まえ、筆者らは、有害な廃液や廃棄物が発生しない環境調和型のレアメタルのリサイクルの開発に取り組んでいる。一例を挙げると、王水や塩素ガスなどの強力な酸化剤を使わずに、簡単な前処理により、難溶性の白金を塩酸のみで高い効率で溶解する新しい技術の開発を行っている⁽⁷⁾。仮に貴金属を塩酸や塩水のみで溶解することができれば、有害な廃液を発生しない環境調和型のリサイクルプロセスが構築できる。また最近では、スクラップ中の貴金属を鉄などと合金化することにより、磁力などを用いて効率良く物理的に分離・回収する新しいリサイクル技術の開発も行っている⁽⁸⁾。

現時点では、コスト等を考えると実用化は難しいものがほとんどであるものの、将来的には技術革新と新たな社会システム構築により、工業製品のスクラップからレアメタルを効率良くリサイクルして循環利用する新技術の開発が期待される。

6. おわりに

現代の便利で豊かな社会を支えるべく高機能化された様々な工業製品には、種々のレアメタルおよびその化合物が多量に利用されている。新興国の発展によるレアメタル消費量の

世界的な増加、工業製品のさらなる高機能化、環境規制の強化などを背景に、レアメタルの需要は増大の一途をたどっている。

日本は、自国に有用な鉱物資源をほとんど持たないにもかかわらず、大量のレアメタル資源を海外より調達し、製品や工業材料に加工して世界中に供給し富を得ている。

一方、寡占化した資源供給国が主導する資源戦略や環境保護政策などの様々な要因により、レアメタルの価格は常に乱高下するリスクを抱えている。これらのリスクを回避しつつ、レアメタル資源を継続的に安定して確保するためには、スクラップからのレアメタルの回収による資源の循環利用が重要となる。

また、鉱物資源の採掘や製錬には自然環境の破壊を伴うことから、自然環境を維持しつつ持続的な社会の実現させるためにも、環境に配慮したレアメタルの効率の良いリサイクル技術の開発が求められている。

レアメタルの製錬やリサイクル技術の開発において、現時点では日本は世界をリードしている。環境調和型の高効率リサイクル技術の開発とその技術の社会実装を通じて貴重な天然資源や環境の保全に貢献することが、われわれに課せられた最重要課題であると考えている。

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**(2015), 1-6.
- (2) 岡部 徹, 野瀬勝弘：レアメタルの供給と需要に関する今後の展望, 金属, **83**(2013), 943-949.
- (3) 岡部 徹：レアメタルの実情と日本の課題, 工業材料, **55**(2007), 18-25.
- (4) 岡部 徹：レアメタルにまつわる誤解, 現代化学, no.448, (2008), 16-21.
- (5) レアメタル辞典, 堂山昌男 監修, フジ・テクノシステム/日本工業技術振興協会編集, 東京, (1991).
- (6) レアメタル便覧 第1版, 足立吟也 監修, 丸善株式会社, 東京, (2011).
- (7) C. Horike, K. Morita and T. H. Okabe: Effective Dissolution of Platinum by Using Chloride Salts in Recovery Process, Metall. Mater. Trans. B, **43B**(2012), 1300-1307.
- (8) Y. Taninouchi, A. Suzue and T. H. Okabe: Upgrade of Autocatalyst Scrap for Recycling Platinum Group Metals, Proceedings of Bill Davenport Honorary Symposium of COM 2014, Vancouver, Canada, Sep. 27-Oct. 1, (2014), No. 8455. ISBN: 978-1-926872-24-7.



岡部 徹

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

1993年 京都大学 大学院博士課程修了
 1993～1995年 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を経て、2001年より東京大学 生産技術研究所助教授。
 09年から教授。15年度より、同研究所 副所長。
 ◎25年以上、一貫してレアメタルの研究に取り組んでいる。“プロセス技術がレアメタルをコモディティに変える”ことを夢見て、チタンなどの新製錬技術の開発を行っている。最近では、白金族金属、レアアース、レニウムなどのレアメタルの製造プロセスや新規リサイクル技術、環境技術の研究もを行っている。

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★