

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？

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 教授、センター長 岡部 徹

以前、日本の大手自動車会社の幹部が私の講演を聴いた後にやって来て「先生の講演を聞いて目から鱗が落ちました。金属資源の採掘や製錬に伴って、これほどまでに激しく自然環境が破壊されているとは知りませんでした」と驚いて、「私たちの会社は10年掛けて工場のゴミゼロ化を達成しました。金属を多量に使用する自動車を作る以上、環境保護の取り組みは今後も続けていきます」と言っていたことがある。

日本で暮らしている多くの人が、「ゴミゼロ化運動」＝「環境に優しい取り組み」と勘違いしている。しかし、行き過ぎたゴミゼロ化運動は、見えないところで環境負荷やエネルギー消費が大きくなり、状況によっては環境に優しくない場合もあることはあまり知られていない。

ここでは、自動車などの工業製品の製造に不可欠な非鉄金属の生産に関する事例を中心に、日本における行き過ぎたゴミゼロ化運動は、ともすると「ナンセンスなアクション」になりかねないことを紹介する。

🗑️ ゴミの出ない家は、環境に優しい住まいか？

まずは、分かりやすい例え話をしてみよう。

ゴミゼロ化運動が環境に優しい取り組みだと信じているAさんは、会社だけでなく、自宅でもゴミが出ない生活を追求することにした。そのため自宅のゴミ箱を廃棄し、同時に排水も極力減らすことにした。

ゴミゼロ化運動を徹底しているAさんに対し、「食事や洗濯はどうしているのか」と尋ねると、「基本、食事は外食で、自宅で食べる場合は出前やケータリングで済ませ、ゴミは出さないようにしている」と答えた。さらに、「洗濯も排水が多くなるので、衣服はすべてクリーニングに出している」と自慢げに話していた。確かにAさんが徹底的に取り組むことによって、自宅からほとんどゴミや排水は発生しなくなる。

しかし、ゴミの発生源が自宅から外に移っただけで、Aさん宅のゴミゼロ化運動は、社会全体で見ると、ゴミの発生あるいはエネルギー

消費は減ることがなく、むしろ増大している場合もあるのである。自宅でのゴミゼロ化の取り組みは、一見、環境に優しいアクションであるかに思える。しかし、つきつめて考えてみると、多くの場合、逆に環境負荷を増し、エネルギー消費が大きくなるのが分かる。

このような例を考えてみれば、自宅から出るゴミや排水を徹底的に減らす取り組みは、状況によってはナンセンスであることが、専門的な知識がなくても容易に理解できよう。

🏭 環境に優しい製品製造の実態

では、本題である自動車などの工業製品を製造する組立工場から出るゴミや排水を徹底的に減らす試みは、本当に環境に優しい取り組みなのだろうか。

各社が環境に優しいと謳っているハイブリッド車は、高出力モータなどの大きな電流を流す機器を多く搭載しているため、1台当たり約50kgの銅(Cu)を使用する。

また、排ガスを浄化する触媒のために白金族金属(PGM)が数g程度必要となる。さらに、高性能モータの製造には、数kgの希土類(レアアース、REM)の合金磁石が必要である。電気自動車やハイブリッド車の場合、大容量の高性能蓄電池(バッテリー)が必要となるため、これにもリチウム(Li)やコバルト(Co)などが多量に使われている。これらの金属は、資源の希少性や生産コストの観点からレアメタルと呼ばれている(図1)。

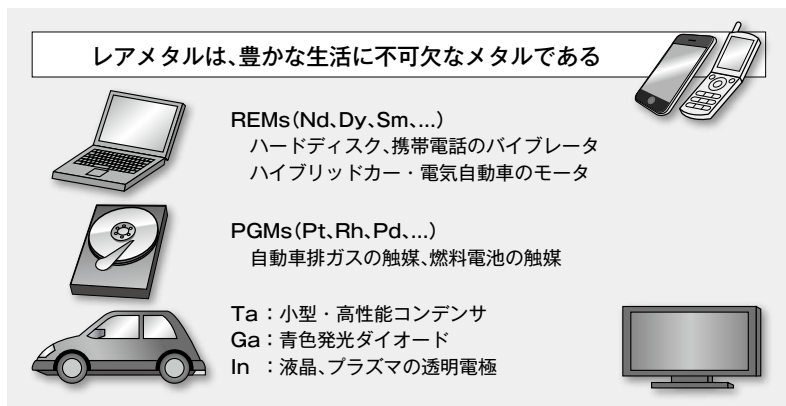


図1 ●省エネ高性能製品に必要なレアメタル

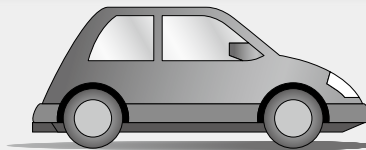
鉄鋼部材(特殊鋼・ハイテンなど) →合金添加元素(Cr、Mn、Mo、V、Nb、Ti、…)	排気ガス浄化触媒 →白金族金属(Pt、Pd、Rh、…)
モータ類 →磁石材料(Nd、Dy、Sm、Co、Tb…) 現在、100個以上のモータが1台の車に使われている ハイブリッド車や電気自動車には、多量のNdやDyが必要	電池 →ニッケル水素電池(Ni、Co、…) →リチウムイオン電池(Li、Co、…) →燃料電池の触媒や電極(Pt、…)
	照明 →LEDライト(Ga、In、…) →ハロゲンランプ(Sc、…)
	液晶ディスプレイ →透明電極(In、…)
自動車の製造時にも多くのレアメタルが使われる →工具用特殊合金(W、Co、Ta、…) →工作ロボット用のモータ(Nd、Dy、Sm、…)	電子基板・センサ等 →トランジスタ(Si、Ge、Ga、In、…) →コンデンサ(Ta、Ag、Pd、…) →抵抗(Ru、Pd、…) →電極(Au、Ag、Pt、Pd、…) →はんだ(In、Ga、Bi、…)
未来の車には、さらに多くのレアメタルが使われる →超長寿命・軽量材料(Ti、Sc…)	

図2 ●自動車に使われるレアメタル(走るレアメタル)の一例

自動車の製造に必要な金属素材の原単位の詳細については、筆者らによる解説⁽¹⁾を参照していただきたい。今やモータやバッテリー、センサを多量に搭載している自動車は、レアメタルを多量に消費する工業製品となっている。自動車は、まさに「走るレアメタル」なのである(図2)。

自動車が走るレアメタルになったことによって燃費は大幅に向上し、走行時に排出するCO₂の量は劇的に低下した。しかし、一般の人は、石油の消費量を減らし、CO₂の発生量が抑えられている裏には、石油よりもはるかに貴重なレアメタルなどの金属資源が大量消費されているという現実があることを知らない。「ガソリンの消費量 = CO₂の発生量」という偏った尺度でしか、環境負荷について考えない人が多くなっているのは由々しき事態である。

また、一般の人が天然鉱物から原材料がどのように生産されるのか知らないことにつけ込んで、原材料の生産過程における環境破壊の実態に頬かむりをし、CO₂の発生量の削減効果のみを宣伝して「環境に優しい」と強弁する企業の在り方にも問題がある。企業も今後は原材料生産過程に関わる環境負荷の実態を開示するように改める必要があると筆者は考えている。

🏭 自動車1台を製造するための環境負荷

人類は何億年、何万年の年月を費やして地表近くに濃縮した金属資源を上手く利用して文明を築いてきた。しかし、鉱物資源の消費速度は年々増大しているため、銅などの非鉄金属資源は、年々鉱石の品位(=鉱石中の有

価金属の濃度)が低下している。鉱石の品位の低下に伴って、採掘や製錬に関わる環境負荷は、年を追うごとに増大している。

近年、銅鉱石の品位は銅の含有比率0.5%程度にまで低下している。したがって、銅鉱石から銅を抽出するためには、99.5%が確実にゴミとなり、そのほとんどが鉱山の周辺で処分されている。そのゴミの中には、ヒ素(As)やカドミウム(Cd)、水銀(Hg)などの有害な元素が含まれていることは一般に知られていない。銅だけに注目しても、最終製品の金属銅の少なくとも200倍の量の有害物を含むゴミが発生するという現実を理解すべきである。

ハイテク自動車を一台製造するためには、約50kgの銅が必要であるが、このためには、最低でも10tの銅鉱石を処理する必要がある。すなわち、銅だけでも、有害物を含む10tの廃棄物が発生する。自動車の重量を約1tとすると、その10倍以上の廃棄物が、その1台の自動車を製造するためだけに発生しているのである。

高性能モータの製造には、銅以外にも、希土類金属(レアアース)が不可欠である。高性能モータに使われる希土類合金磁石の主原料は、ネオジム(Nd)という希土類金属であり、これを鉱石から抽出して生産する際にも、放射性物質(NORM)を含んだ廃棄物が多量に発生する^{(2)、(3)}。希土類鉱石の採掘や製錬の過程でも、環境を大きく破壊し、多量の有害な廃棄物が発生する。

自動車の排ガスを浄化するためには、白金(Pt)やパラジウム(Pd)などの白金族金属が不可欠だが、これらの白金族金属の鉱石品位はppmオーダーである。すなわ

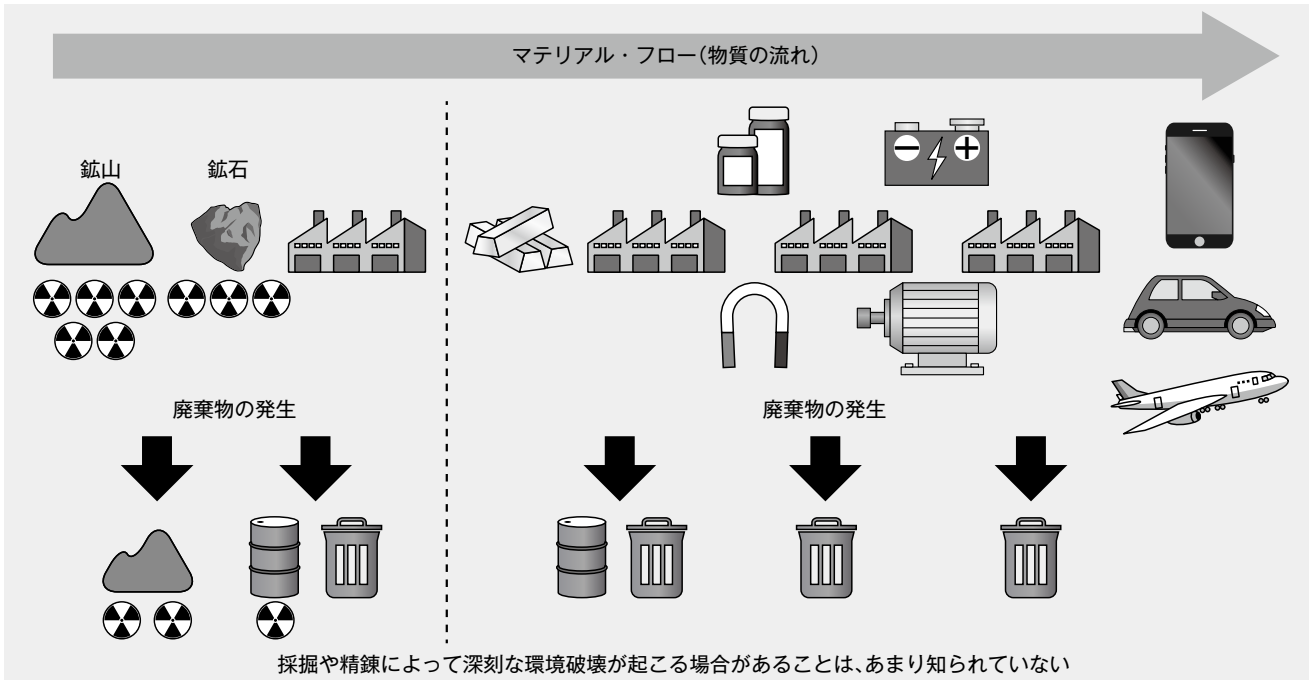


図3 ●採掘・製錬により生じる環境負荷

ち、鉱石中に白金族金属は100万分の1程度の濃度しか含まれていないため、白金族金属を生産するためには、100万倍の廃棄物が発生し、その製錬には多量のエネルギーを消費する。自動車には数gの白金族金属しか使用しないが、その生産のためには、自動車の重量よりもはるかに大きな量の廃棄物が発生しているのである。

このように自動車を1台製造するためには、見えないところで、その何十倍の量のゴミが発生していることを認識する必要がある。また、そのゴミの中には多くの場合、有害物が含まれていることも理解するべきである。

先進国の自動車企業は、国外で有害物がロンドンリングされた(=ゴミが落とされた)高純度の素材を購入して製品を製造している。このため、先述の「ゴミが発生しない工場」をつくるのが可能となっている。しかし、天然鉱石を利用して自動車を製造する以上、自動車がハイテク化すればするほど、有害物を含むゴミの発生量が見えないところで増え続けることを認識する必要がある。

省エネ、低CO₂排出の工業製品は環境に優しいと信じている人が多いが、天然鉱石を利用する以上、それを採掘・製錬することによって生じる環境負荷についても思考を巡らせ、環境について包括的に理解・認識する必要があると筆者は考えている(図3)。



先進国の多くの人々は、レアメタルを海外から輸入し、高性能・省エネのハイテク製品を作って環境保全に貢献

していると信じている。

天然鉱物から金属素材を製造する工程の実態を知らない消費者や株主に対して、企業のCSRとして、ゴミゼロ化運動=環境に優しい取り組み、と喧伝することは、環境意識を高めるという観点からは、ある程度は許されるかもかもしれない。しかし、行き過ぎたエコ宣伝やその取り組みは、かえって環境を破壊し、エネルギー消費が多くなる場合があることを認識するべきである。

「ゴミゼロ」というキーワードでネット検索を行うと、省エネ・ハイテク製品を製造する企業のHPが多数閲覧できるが、一連の取り組みは本当に環境に優しいのか、大元の天然鉱物資源の採掘・製錬の段階から総合的に考えてみる必要がある。

ここでは詳細は紹介できなかったが、ハイテク製品を生産する企業とそれを使用するユーザーは、NIMBY(not in my backyard)という概念にもとづく放射性元素を含む廃棄物(NORM)の処理などについても⁽²⁾、正確に実態を理解するべきである。

◆参考文献◆

- (1) 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, 自動車技術ハンドブック 第10分冊設計(EV・ハイブリッド)編, 自動車技術会, pp.38-59, 2015
- (2) 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, Vol.43, No. 4, pp.1-6, 2015
- (3) 新エネルギー・産業技術総合開発機構編: 解説レアメタル, NEDO レポート, 日刊工業新聞社, 2016年2月23日発行

私見卓見

OPINION

東京大学生産技術研究所教授
(レアメタル製錬・リサイクル) 岡部徹

日本近海の海底で大量のレアアースが発見されたことが話題になっている。科学の研究として発見自体は素晴らしいことだと思う。ただ金属資源の開発や活用については一般的に誤解もある。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。むしろ供給を制約する要因は、採掘や製錬の際に大変な環境問題を引き起こすところにある。

レアアースは中国に供給が偏っているが、実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1億3000万ト以上と、世界需要の1000年分以上もある。にもかかわらず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

金属資源開発、環境コスト忘れるな

所があるのだ。

電気自動車(EV)やハイブリッドカーの高性能モーターに必要なスズ、プロシウムは、自動車1台分作るのに1〜4トの鉱石がいる。数百トのスズ、プロシウムを取りだしたあと、残りのゴミを捨てる場所が欠かせない。そのまま廃棄できればいいが、仮に鉱石が無料であっても、日本ではゴミを捨てる費用だけで採算がとれない。

銅は自動車1台に必要な50キログラムを取り出すのに10トの鉱石がいる。残った大量の鉱石にはヒ素や水銀などの有害な物質が含まれる。有用な金属を得るだけでなく、有害な物質を取り除き環境に出さないことも大切だ。

オーストラリアから輸出するレアアースの鉱石はマレーシアで中間処理したあと、日本に運ばれる。鉱石に含まれる放射性物質などを除くため

だ。マレーシアは放射性物質を処理する社会システムと技術を持っている。環境負荷を抑えるにはどのような規制と技術を持つべきか。日本も考えなければいけない問題だろう。

先進国の消費者は電気自動車(EV)などのハイテク製品を賢く使うことで環境問題に貢献していると考えられるが、これは偏った見方だ。EVで二酸化炭素(CO₂)排出量が減っても、レアアースや銅などの使用が増えれば鉱石から大量のゴミが出る。こうしたバックヤードの環境コストをまったく見ていない。

金属資源は新技術に役立つ面と環境に負荷を与える面がある。ひとつの製品でどのような環境への負荷を減らすか。新たな資源開発だけでなく、コストはかかってもリサイクルを進めるべきではないだろうか。

当欄は投稿や寄稿を通じて読者の参考になる意見を紹介します。〒100-8066東京都千代田区大手町1-3-7日本経済新聞社東京本社「私見卓見」係またはkaisetsu@nex.nikkei.comまで。原則1000字程度。住所、氏名、年齢、職業、電話番号を明記。添付ファイルはご遠慮下さい。趣旨は変えずに手を加えることがあります。電子版にも掲載します。

自動車に不可欠なレアアース資源 の現状と課題*

Current Status and Related Problems of Rare Earth Resources Essential for Automobiles

岡部 徹¹⁾
Toru H. Okabe

As the performance of automobiles increases, the amount of rare metals consumed by the automobile industry will increase significantly in the future. Rare earth elements, which are one group of the rare metals, are used as a key material for permanent magnets used in high-performance motors, etc. Rare earth is now an essential element for high-performance EVs. On the other hand, environmental destruction is ongoing with the mining and smelting of rare earth natural resources. This review paper outlines the "shadow (or dark side)" associated with the production of rare metals such as rare earths. Waste and environmental problems, and the importance of promoting recycling are discussed in the review.

KEY WORDS

Environment • Energy • Resources, Recycling, Environmentally Conscious Production /
Rare Metal, Rare Earth, Environment Issues, Resources, Material Circulation [D2]

1 はじめに

内燃機関のエンジンを積んで走っている自動車がほとんどであった時代、ボデーは鉄鋼、エンジンブロックはアルミニウム合金、他はプラスチック等の樹脂などで自動車はつくられていた。

自動車に不可欠な非鉄金属といえば、蓄電池（バッテリー）の鉛や、ワイヤハーネスなどに使われ電気信号を伝える銅、排ガスを浄化する触媒に使われる白金、パラジウム、ロジウムなどの白金族金属などであった。

近年、モータで駆動する自動車が普及し、また、自動制御技術が進展するに伴い、自動車に搭載されるセンサやアクチュエータ、制御装置等の数は飛躍的に増えている。これらの電子機器にはレアメタルが多く使われているため、自動車には多種多様なレアメタルが使用されるようになった（図1）。

今や自動車は、レアメタルをはじめとする非鉄金属を満載したハイテク工業製品、すなわち、「走るレアメタル」となっている。今後も自動車に使われるレアメタルの種類や量はさらに増え続けるであろう。

自動車に使われるレアメタルの種類や原単位、資源供給や需要などについては、すでに『自動車技術ハンドブック』¹⁾で筆者らが詳細な解説を行っているため、これをご参照願いたい。

最近では、自動車の電動化・自動化がさらに進展し、レアアース（希土類元素）合金磁石を使った高性能モータの需要が増大している。また、高性能バッテリーに使われるリチウムやコバルトなどの需要も増えている。

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、これらの工業製品に不可欠なレアアースなどの金属資源の採掘や製錬に伴って、環境破壊も世界的に進んでいる。

金属資源は、新技術に役立つ面（光の部分）ばかりが脚光を浴び、環境に負荷を与える面（影の部分）があることは意外と知られていない。特に、先進国に住む人々は、精製されたレアメタルを輸入しているので、採掘や製錬に伴って生じるさまざまな問題を目にするのではない。

本稿では、レアアースなどのレアメタルの生産に伴う「影の部分」、すなわち廃棄物の問題や環境問題について概説し、レアメタルのリサイクルの推進の重要性について論じる。

2 レアアースに関する誤解の数々

レアアースをはじめとするレアメタル資源の供給面でのボトルネックに関しては大きな誤解も蔓

* 2020年5月14日受付

1) 東京大学 生産技術研究所
(153-8505 目黒区駒場4-6-1 東京大学生産技術研究所 Fw301号室)
E-mail: okabe@iis.u-tokyo.ac.jp

鉄鋼部材(特殊鋼・ハイテンなど)
→合金添加元素(Cr, Mn, Mo, V, Nb, Ti, …)

排気ガス浄化触媒
→白金族金属(Pt, Pd, Rh, …)

モータ類
→磁石材料(Nd, Dy, Sm, Co, Tb, …)
現在、100個以上のモータが1台の車に使われている
ハイブリッド車や電気自動車には、多量のNdやDyが必要



<http://shop.fsystem.co.jp/toyota/>

自動車の製造時にも多くのレアメタルが使われる
→工具用特殊合金(W, Co, Ta, …)
→工作ロボット用のモータ(Nd, Dy, Sm, …)
未来の車にはさらに多くのレアメタルが使われる
→超長寿命・軽量材料(Ti, Sc, …)

電池
→ニッケル水素電池(Ni, Co, …)
→リチウムイオン電池(Li, Co, …)
→燃料電池の触媒や電極(Pt, …)

照明
→LEDライト(Ga, In, …)
→ハロゲンランプ(Sc, …)

液晶ディスプレイ
→透明電極(In, …)

電子基板・センサ等
→トランジスタ(Si, Ge, Ga, In, …)
→コンデンサ(Ta, Ag, Pd, …)
→抵抗(Ru, Pd, …)
→電極(Au, Ag, Pt, Pd, …)
→はんだ(In, Ga, Bi, …)

図1 自動車に使われるレアメタル(走るレアメタル)の一例

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はしばしば話題となっている。資源の発見そのものはすばらしいことであり、また、重要な学術研究の成果でもある。しかし、資源の埋蔵量が多いからといって、すぐに採掘して有効利用できるわけではない。

埋蔵されている金属資源が一般社会で利用できるかどうかは、採掘や製錬、廃棄物処理などのコストや製品のパフォーマンスによって決定される。レアメタルの利用についても例外ではなく、採掘・精錬関連のコスト如何で決まる。要するに経済合理性の問題である。

一般的には、レアアースをはじめとするレアメタルの多くは枯渇の恐れがあると思われるが、埋蔵資源量の不安はほとんどない。レアアースの供給は、現在は中国一国に偏っているものの、優良なレアアース鉱山は世界中に多数存在する。陸上で発見されている埋蔵量だけで1億3,000万トン以上と、世界需要の1,000年分以上もある⁽²⁾(図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⁽³⁾⁽⁴⁾(表1, 図3)。中国がレアアースの供給の9割を独占で

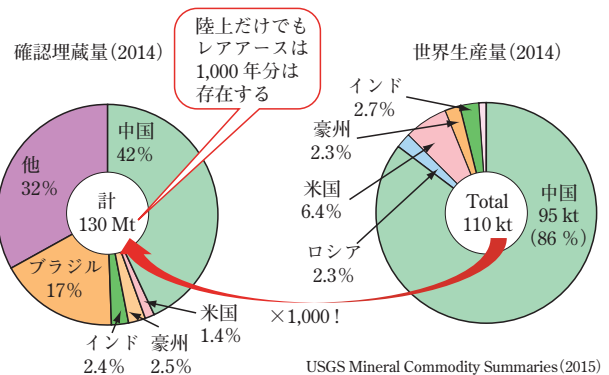


図2 希土類の資源量と年間生産量。陸上資源だけでも1,000年以上の可採埋蔵量が確認されている。現在は中国が世界供給の約9割を独占している(資料提供: 東北大学 竹田修准教授)

きている主な理由は、優良な鉱山の存在だけでなく、廃棄物の処理コストなどの環境コストが他の先進国に比べて極端に低いためである。

金属の生産においては、採掘や製錬の際に甚大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。

日本では、レアメタルに関しては“資源の量”ばかりが議論の中心となり、環境コストが議論の俎上に上がることはほとんどない。

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重要な要因となる。しかし、消費国の多くの人々は、直接目にすることができない、こうした資源産出国のバックヤードでの環境コストや環境破壊の実態をまったく認識してい

表 1 レアアースなどの金属や合金を製造する場合の各種コスト比較

	日本	米国	中国	オーストラリア
原料コスト	×(高い)	×(高い)	◎(極めて低い)	○(低い)
エネルギーコスト	×(高い)	○(低い)	?	○(低い)
環境コスト	×(極めて高い)	×(高い)	◎(極めて低い)	×(高い)
人件費などのコスト	×(高い)	×(高い)	○(低い)	×(高い)



(a) 世界最大のレアアース(希土類)鉱山の(白雲鄂博鉱山)から採掘された精鉱は、包頭市に運ばれて精製される。廃棄物は廃鉱滓処分場(図(b))などで処分される



(b) レアアース(希土類元素)を抽出する際に生成する廃棄物は、精錬所近くの廃棄物処分場に捨てられる。廃棄物は NORM を含む場合もある

図 3 廃棄物処分場の様子

ない。これは、一般人の理解不足はもとより、業界関係者の不作為に起因するが、物事の一面しか報じないメディア報道の偏りにも問題があるのかもしれない。

3 レアアースの鉱石の品位と廃棄物の問題

自動車一台を製造するために必要なレアアースの量は、1 kg 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(表 2, 図 4)。

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⁽⁴⁾(表 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、有害物質を含むので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、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、日本で鉱石を処理してレアアースを抽出して利用することはできない。

図 5 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⁽³⁾。これは、マレーシアでは錫(Sn)の製錬を長年行っており、放射性物質などの有害物質を処理する社会システムが整っているためである。

このように、レアアース、特に永久磁石の主原料であるネオジウムに関しては、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主な制約となっている問題であるという認識が不可欠である(図 6)。

4 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。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)と呼ばれる。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。

ウラン(U)やトリウム(Th)などのNORMは、

表2 主な鉱石中のNd, Dy品位. 現在, 利用されている鉱石中のDyの絶対品位は極めて低い

鉱石		イオン鉱	バストネサイト		モナザイト
採掘場所		竜南 (中国)	バイコンオボ (中国)	マウンテンパス (アメリカ)	マウントウエルド (オーストラリア)
鉱石中のREO(希土類酸化物)品位 (wt%)		0.05~0.2	6.0	8.9	11.2
REO中の品位 (wt%)	Nd	3.0	18.5	12.0	15.0
	Dy	6.7	0.1	trace	0.2
鉱石中の品位 (wt%)	Nd	0.0015~0.006	1.11	1.1	1.7
	Dy	0.0034~0.013	0.006	trace	0.022

ハイブリッド車や電気自動車に不可欠な高性能・高出力モータには、
約1.3kgのレアアース(希土類)合金磁石(Nd-Fe-B磁石)が必要

約1.3kgの希土類合金磁石には、
21(～26)%のネオジウム(Nd)と
10(～5)%のジスプロシウム(Dy)
が含まれる。(残りは鉄とボロン)
→耐熱性が要求されるモータには多くのジスプロシウムが必要

ネオジウムの鉱石品位は約1%(バストネサイト)
ジスプロシウムの鉱石品位は0.01%～0.003%(イオン吸着鉱)

高性能モータには、
ネオジウム 約0.27kg 鉱石換算で31kg
ジスプロシウム 約0.13kg 鉱石換算で1～4トン
(↑鉱体に直接、溶離剤を打ち込むので、鉱石は動かない)
が必要。したがって、上記モータ一つを作るのに、最低でも1トン以上の鉱石が必要となる。
また、採掘は環境を破壊する。

車の車体重量より、はるかに多くの量の貴重な鉱石を処理していることになる。

図4 自動車に必要なレアアースの原単位とその生産に必要な鉱石の量

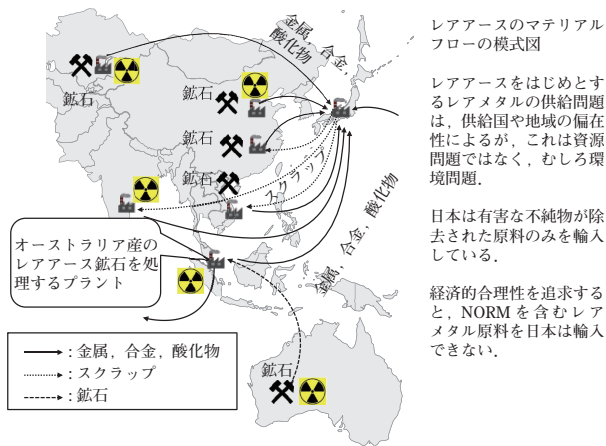


図5 レアアースの鉱石、金属、合金、酸化物、スクラップ等の物流の模式図

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。一例を挙げると、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。

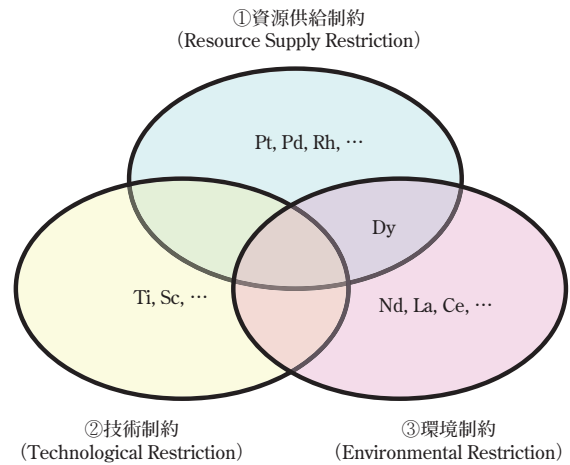


図6 レアメタルの生産と供給に関するボトルネックについて考えるにあたって考慮しなければならない主な項目。①資源供給制約のみがメディアでは注目され、②技術制約や③環境制約についてはあまり報道されない(企業も②と③については、報道されたら困る場合が多い)

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うえで、「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、詳細は著者の解説⁽²⁾や関連資料⁽⁶⁾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る場合が多い。

5 レアアースを鉱石から生産する場合の NORM の処理

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。しかし、副産物の中に NORMが多く含まれている場合に

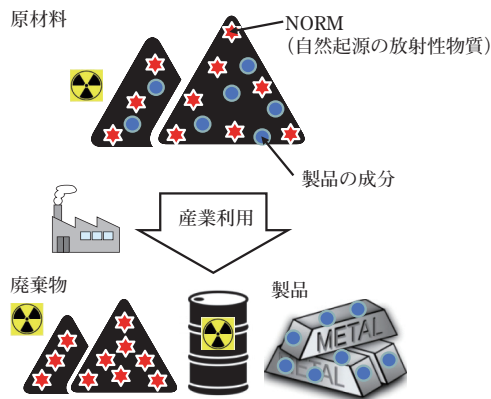


図7 NORMを含む鉱石から有用物を抽出すると、生産工程で廃棄物などに放射性核種が濃縮される。レアアースはその典型事例

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7）。

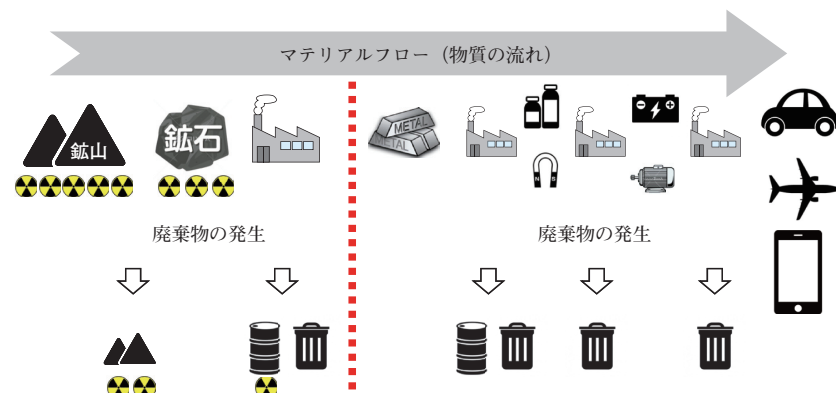
現在、環境規制や廃棄物処理の法律は国ごとに定められているため、NORMの処理コストは国や社会システムによって大きく異なる。現状では、日本におけるNORMの処理に関する規制は極めて厳しいため、仮に国内で希土類鉱石を処理しようとするると多大なコストがかかる。このため、NORMの処理は、鉱石の産出地域あるいは、NORMの処理に適した社会システムを有する国で行われる（図5）。

この事実を多くの一般の人々は知らない。しかし、レアアースをはじめとする非鉄金属を利用して富を享受している消費国の人々は、廃棄物の処理問題等の「影の部分」に隠されている環境問題も認識しておくべきである⁽⁸⁾（図8）。

6 レアアースリサイクルの重要性⁽⁹⁾

現在、産業利用されているレアアースの鉱山では、地表近くに特異的にレアアース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、これらの鉱物が有する価値（Value of Nature）は極めて高い⁽¹⁾（図9）。

前述したように、レアアース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をリサイクルして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。



採掘や製錬によって深刻な環境破壊が起こっている場合があることは、あまり知られていない。

図8 鉱石から製品までのマテリアルフロー。採掘や製錬によって環境破壊が生じる場合があることは、消費国の多くの人々は認識していない

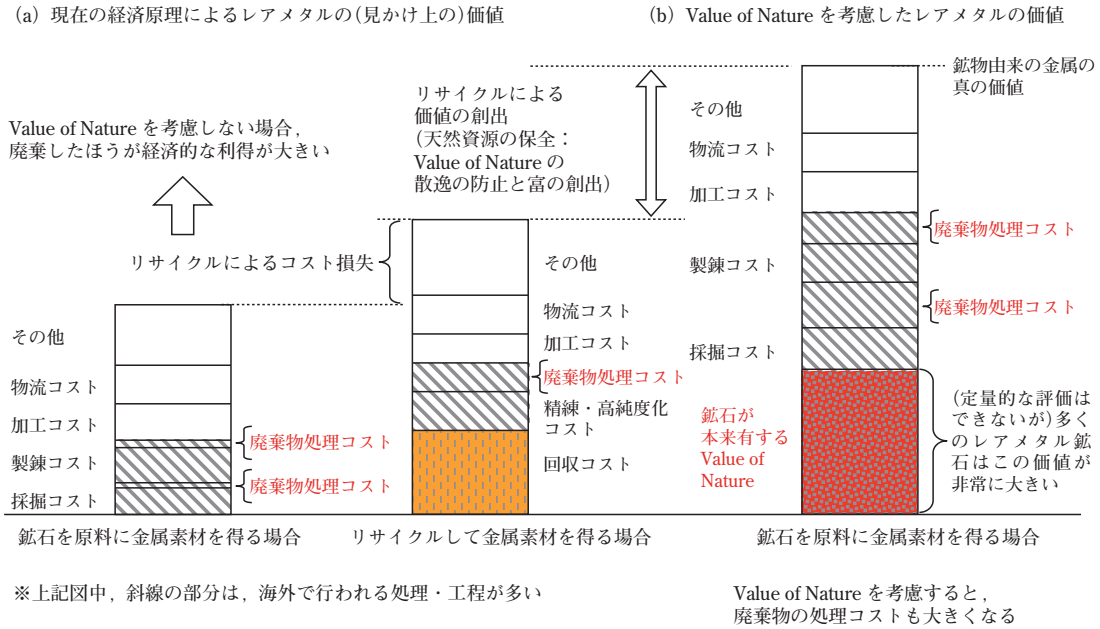


図9 金属素材の価値の考え方(現在の社会システムでは Value of Nature について考慮されていない)

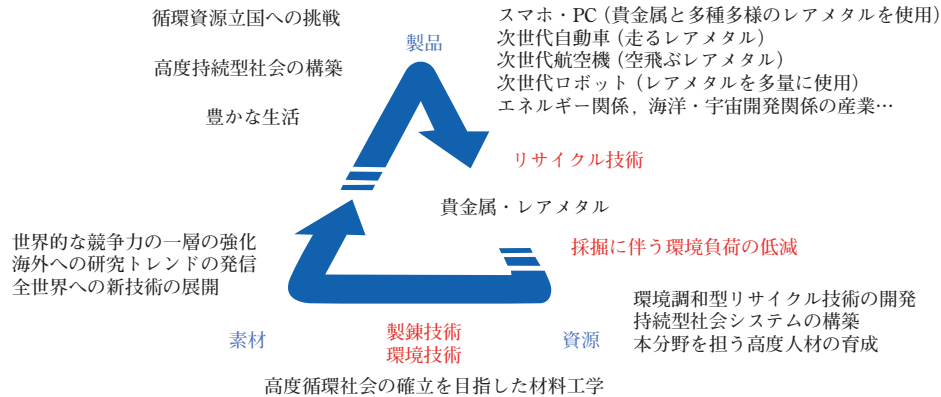


図10 貴金属・レア金属(レアアース含む)のリサイクル技術や環境技術の重要性と関係性を示すキーワード

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⁽⁹⁾。

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。天然資源を採掘してレアアースを生産する方がコ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、レア金属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金属含有スクラップからレアアースをはじめ

とする有用なレア金属を回収し、資源を効率良く循環利用するための研究を多角的に行っている。この資源循環利用の取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(図10)。

7 おわりに

今後も当面はレアアース、特にジスプロシウム(Dy)などの重希土の生産は中国による寡占が続くであろう(表3)⁽¹⁰⁾。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。こうした意味では、供給ルートが多角化、さらには、リサイクル等によりレアアースの供給ルートの多様化を推進することは、高性能磁石やモータの製造大国であり、工業立国であ

表3 レアアース市場の全体像(2017年)(単位:REO t/年)。Dyなどの重希土については、今も中国が世界市場を独占している

供給国	La ₂ O ₃	CeO ₂	Pr ₆ O ₁₁	Nd ₂ O ₃	Sm ₂ O ₃	Eu ₂ O ₃	Gd ₂ O ₃	Tb ₄ O ₇	Dy ₂ O ₃	Y ₂ O ₃
中国(全土)	40,729	57,047	9,462	29,176	4,202	612	3,049	373	1,947	10,910
オーストラリア(Lynas)	3,825	7,011	798	2,775	341	66	113	11	18	38
ロシア(Lovozerskiy)	521	1,081	101	265	20	3	4	-	-	-
インド(Indian Rare Earth)	270	582	67	222	32	-	14	-	-	-

出典:工業レアメタル, Annual Review 2017, アルム出版社(2017)

る日本にとっては重要である。

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、資源のリサイクル利用を進めるべきではなかろうか。

謝辞

本稿をまとめるにあたり、東北大学大学院工学研究科金属フロンティア工学専攻 竹田修准教授に貴重なご助言・コメントをいただいた。厚く御礼申し上げます。

参考文献

- (1) 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, 岡部徹, 野瀬勝弘(分担執筆: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), p. 38-59, 自動車技術会(2016)
- (2) 岡部徹: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, 金属, Vol. 90, No. 2, p. 93-98 (2020)
- (3) 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, Vol. 43, No. 4, p. 1-6 (2015)

- (4) O. Takeda, T. H. Okabe: Current Status on Resource and Recycling Technology, Metallurgical and Materials Transactions E, Vol. 1A, June, p. 160-173 (2014)
- (5) 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>
- (6) 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>
- (7) フリー百科事典 ウィキペディア (Wikipedia), http://en.wikipedia.org/wiki/Goldschmidt_classification
- (8) 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), Vol. 104, No. 11, p. 40-42 (2017)
- (9) Toru H. Okabe: Bottlenecks in Rare Metal Supply and the Importance of Recycling - a Japanese Perspective, Mineral Processing and Extractive Metallurgy, Vol. 126, No. 1-2, p. 22-32 (2017)
- (10) Annual Review 2017 素材編(工業レアメタル), アルム出版社(2017)

フェイス

“環境にやさしい自動車”という言葉や宣伝に接する機会が多い。確かに、日本が誇る高性能車の多くは走行時のCO₂の発生量が少なく、とすると、まったく有害物質を排出せずに走っている。これは素晴らしい技術開発の成果であり、今後もさらに推進すべき重要な開発課題である。しかし、これらの高性能車を作るために使われている「レアメタルの採掘や製錬の実情」を知っている筆者からみたら、自動車業界における“環境にやさしい”という言葉が詭弁と思えることがある。



岡部 徹