

MATERIALS and PROCESSING



Materials and Processing
Division Newsletter October 2012

NO.44



日本機械学会
機械材料・材料加工部門ニュースレター

巻頭言

「レアメタルの現状」



東京大学
生産技術研究所
岡部 徹



成蹊大学
理工学部
システムデザイン学科
酒井 孝

いまや、レアアースをはじめとするレアメタルという言葉は、小学生や主婦でも知っている一般用語となっている。しかし、2001年までは、レアメタルに対する関心は低く、材料の専門家からでさえも、その製造方法やリサイクルに関する研究については、「そんな研究やって意味があるのか？」という見方が大勢を占めていた。

2006年あたりからレアメタルの供給障害や価格高騰が産業界・経済界の話題となり始め、いわゆる「レアメタルブーム」が現出した。当初、メディアではレアメタル→希少資源→枯渇という短絡的見解に基づく見方が多く、とすると間違った認識の報道が行われていた。しかし実際には、レアメタルは、その産業構造上、供給障害や需給のアンバランスは頻繁に起こるが、枯渇する可能性が高いものはほとんどない。

2010年には、尖閣諸島領有問題に端を発した外交問題が契機となり、中国によるレアアースの輸出停止にまで発展した。この結果、レアアースを必要とする日本の産業界はハイテク産業を中心に一時的なパニックに陥った。この「レアア

スショック」により、これまで一般には馴染みのなかった、レアメタルやレアアースといった専門用語が、メディアで頻繁に報道されるようになり、一般名詞として使われるようになった。

この10年間に起ったレアメタルにまつわる急激な状況変化は、世間の耳目を集めたという点では、大きな意義があったが、レアメタルを取り巻く状況や研究開発をめぐる本質的な状況は以前と何も変わっていない。

生活の豊かさや便利さを目指せば、それにつれて必要となるレアメタルの量は増大する。これまでは、レアメタルの多くは電子機器や通信機器、一部の高性能合金などに使われてきた。これからは、次世代自動車や航空機、エネルギー変換のための材料としてのレアメタルの需要がさらに増大するものと予想される。ハイテク機器や高性能な機械は、多種多様のレアメタルを必要とする。このため、日本は、レアメタルを使用する部品の製造やリサイクルについては、今も世界のトップランナーである。今後も、日本が競争力のあるレアメタル産業を維持して発展させ、世界をリードするためには、一層の研究と技術開発が重要であることは論を俟たない。

さらに、鉱物資源のほぼ全量を輸入している日本にとって、ハイテク産業に不可欠なレアメタルの資源確保のための投資政策に加え、資源セキュリティの観点から、備蓄制度の充実やリサイクル技術の開発、社会基盤システムの整備もきわめて重要な政策課題である。

レアメタルの種類はじつに多いので、すべてを拾い上げることはできない。そこで、日本の産業にとって重要性が特に高いレアメタル、あるいは、供給障害や価格高騰により日本の産業がダメージを受ける可能性が高いいくつかのレアメタルについて、特集として取り上げる。

本企画が、機械材料や材料加工分野の関係者にとって新しい知見や方向性などを得ていただくヒントを与えるきっかけとなれば幸いである。

2012年10月

■特集：レアメタルの現状**□ 特集 1 レアアースの現状と問題 □**

東京大学 生産技術研究所
岡部 徹

1. はじめに

日本で金属資源の物質フローやリサイクルに関して議論が行われる場合には、大体において産業的な側面、特に経済的あるいは資源供給上の問題点が中心となる。とりわけレアアース（希土類元素）をはじめとするレアメタルに関しては、資源ナショナリズムや領土問題、投機を含むビジネス、外交や政治、環境問題などが複雑に絡み合った貿易問題・経済問題としてクローズアップされることが多い。

ハイテク産業に不可欠なレアメタルに対する一般的な関心が高まってきた結果、レアメタルの物量ベースあるいは経済ベースの物質フローの解析や関連の研究が、近年急速に進みつつある。しかし、金属資源の物質フローに関する中長期展望を考える上で、最も重要な概念である「自然がもたらした真の価値 (Value of Nature)」については、残念ながら現状ではほとんど議論されることがない^{1), 2)}。Value of Nature という重要な概念やレアメタルのリサイクルの是非や今後の物質フローのトレンドなどについては、別所で考察²⁾しているの

でここでは割愛する。

レアアースに限らず金属資源は、探鉱→鉱山開発→採掘→製錬・高品質化→加工などの種々の工程を経て、最終的には工業製品に組み込まれ利用される。工業製品の利用価値が無くなると、その製品は廃棄物となる。廃棄物中に含まれる金属などの価値が高く、再利用による経済性が見いだせる場合には、廃棄物中の一部の金属はリサイクルされ再利用される。スクラップ中のレアメタルの多くは、リサイクルしても経済的な価値が発生しない場合が多く、廃棄物として埋め立てられるなどして処分され、循環利用されることは少ない。

経済原理を優先する日本では、金属資源の価値を評価する場合、その金属の経済的な価値が評価基準となる。その結果、工業製品に組み込まれたレアアースは、現状ではリサイクルされない。しかし、本来はその金属が生み出されるまでに生じた環境負荷、さらには、その金属を生み出した「貴重で有限の鉱物資源の本質的な価値」についても考慮し、金属資源の価値やリサイクルの是非について根本的なところから議論すべきである。

現在の経済システムでは、市場で流通する金属の価格は、上述の探鉱、鉱山開発、採掘、製錬、高品質化、加工、物流、その他のコストが積算されたものがベースとなっている。市場における金属の需要家は、より低いコストで調達しようとするため、競争にさらされている生産者は、より低いコストで金属を生産する努力をする。その結果、とすると、鉱山開発、採掘、製錬に伴って生じる環境汚染を防止・低減するためのコスト、すなわち環境コストは、だれも支払わないという

ケースも多く存在する。とくに発展途上国では、採掘や製錬に伴う環境破壊よりも、経済成長のほうが優先される場合が多いため、この傾向が顕著である。

世界有数の優良なレアアース鉱山である米国のマウンテンパス鉱山が、2002年に休山に追い込まれたのは、環境規制の厳しい米国で採掘・製錬する場合に発生する環境コストの負担が大きな要因であった。他にもさまざまな要因が考えられるが、鉱石の枯渇や品位の低下などの要因によるものではなく、コスト競争力が無くなったことが操業を停止した直接的な要因であった³⁾。一方、経済的な成長戦略を優先した中国は、環境コストを度外視して、極めて低いコストでレアアースを生産し、輸出し続けたため、世界市場を独占することに成功した。価格に反映される見かけ上のコストでの価格競争力という指標のみで供給者の優劣が決定する競争原理至上の現在の経済システムでは致し方のないところである。

最近では、中国の輸出規制・価格統制を受けてレアアースの価格が急騰したため、マウンテンパス鉱山の生産再開(2011年)に加え、オーストラリア、ベトナムなど中国以外の国でのレアアース鉱山の開発が活発化している。オーストラリアにあるレアアース鉱石の多くは、ウラン(U)、トリウム(Th)などの放射性元素を含有するため、製錬してレアアースを得る過程で、同時に放射性廃棄物が発生する場合が多い。豪政府は自国内での鉱石の製錬やそれに伴って発生する廃棄物の処理に関して、自国内での最終処分を許可しない、あるいは厳しい環境規制を要求する可能性がある。つまり、資源国の外貨収入となる採掘と輸出は許可する一方、国内での放射性廃棄物が発生する製錬は認めない、あるいは高いペナルティーを課すということである。

仮に、オーストラリア国内での製錬が認められたとしても、オーストラリアは他の先進国と同様、環境保護規制が厳しいため、採掘した鉱石の製錬を現地で行う場合には、廃棄物処理や廃液処理などの環境対策コストが増大し、利益を生むビジネスとしては魅力が低下する。

表1に示すように金属の製錬に伴う原料、エネルギー、各種環境規制の遵守のための環境コストや人件費は、国や地域によって大きく異なる。当然ながら、製錬で発生する廃棄物の処理コストも各国の環境規制によって異なる⁴⁾。このため、オーストラリアで採掘したレアアース鉱石を国外に持ち出して、主に発展途上国などの環境規制が緩慢な別の国で製錬や高純度化を行い、レアアース原料を必要とする需要国に低い価格で再輸出するというビジネスモデルが模索されている(図1参照)⁴⁾。このように地域的な環境コストの差が、レアメタルの物質フローを大きく変化させる。地域による環境規制

の格差が広がれば、レアメタルの物質フローの量や流れそのものが現状とは全く変わる可能性もある。

上述のように、日本をはじめとする先進国においては、消費者からは見えないところで発生している環境負荷などのコストはほとんど考慮せず、もっとも安く品質の高い金属や合金、化合物を世界中から調達して、ハイテク製品を製造している。このような環境負荷を無視した事例は、レアメタルに限らず多くの国際商品に見られる。

2. レアアースの生産と需要

2010年のネオジム(Nd)焼結磁石の国内生産量は約13,000t、世界生産量は約45,000tとみられている^{3), 5)}。ネオジム磁石は、高温で急激に保磁力が低下するという欠点があるが、重希土類であるジスプロシウム(Dy)やテルビウム(Tb)を添加する技術の開発によって高温下での使用が可能となり、動力用モータへの応用が進んだ。ハイブリッド自動車(HEV)の駆動用モータなど、動作温度が200℃近くになる用途には、最大で10mass%程度ものジスプロシウムが添加される場合もある。最近では、ジスプロシウム価格の高騰や供給不安の増大に伴って、ジスプロシウムの使用量についても削減努力が行われ、省ジスプロシウム技術などの各種技

術開発が進んでいる。しかし、省エネルギーに対するニーズの拡大に伴って、次世代自動車の駆動用モータ以外にも、エアコンのコンプレッサ用モータや発電機向けに、ジスプロシウムを添加したネオジム磁石の需要が拡大している。表2に示すように、自動車のモータに使用される磁石は電気自動車(EV)で一台あたり1.3kgにもなるため、今後は次世代自動車の普及を受けて、ジスプロシウムを多量に含む高性能磁石の市場拡大がさらに加速すると予想される^{5), 6)}。

ネオジム磁石の原料となるネオジムとジスプロシウムは、いずれもレアアースでありながら、資源的に抱える問題は異なる。表3にレアアースの代表的な鉱物と、それぞれの鉱物中のレアアースの酸化物品位および各希土類酸化物の含有比率を示す^{5), 7), 8)}。主に軽希土類を産出するバストネサイト、モナザイトなどの鉱物は、図2^{5), 8), 9)}に示すように地球上に広く分布しており、資源的に豊富である。しかし、これらの希土類鉱石にはイオン半径の近いウランやトリウムなどの自然起源の放射性核種(自然起源放射性物質放射性元素, NORM: Naturally Occurring Radioactive Materials)が含まれる場合が多い。したがって、鉱石からネオジムを生産する際には、選鉱や製錬に伴って濃縮される放射性元素や有害物の処理が課題となる。一方、ネオジムなどの軽希土類と比較すると、重希土類の鉱石中の品位は格段に低く、ジスプロシウムやテルビウムは資源的に希少である。現在、重希土類は中国南部の

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⁴⁾

	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)

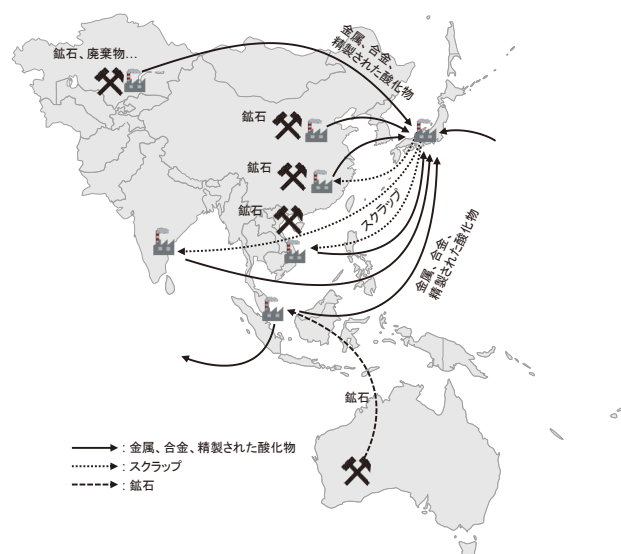


図1 レアアースなどの金属や合金を製造する場合やそのスクラップを処理する場合の世界的なマテリアルフローの概略⁴⁾

表2 代表的なレアアース磁石製品の原単位(概数)^{5), 6)}

製品	希土類磁石原単位 (kg/台)
HEV	0.25 - 1.25 ^{a)}
EV	1.3
パワーステアリング	0.09
エアコン	0.12
ハードディスクドライブ(HDD)	0.01
携帯電話	0.0005
核磁気共鳴画像装置(MRI)	1500

a: HEVの場合、モータ出力の違いによって希土類磁石の使用量は異なる。
出力の小さいHEVでは0.25kg/台、
出力の大きいHEVでは1.25kg/台程度。

表3 代表的なレアアース鉱石の組成^{5), 7), 8)}

鉱種	バストネサイト		モナザイト	イオン吸着鉱	
産出鉱床 (産出国)	バイヤンオボー (中国)	マウンテンパス (アメリカ)	マウントウェルド (オーストラリア)	龍南 (中国)	
鉱石中のREO品位 (wt%)	6	8.9	11.2	0.05 - 0.2	
REO中の 含有比率 (wt%)	La ₂ O ₃	23.0	33.2	25.1	1.82
	CeO ₂	50.0	49.1	48.5	0.37
	Pr ₆ O ₁₁	6.20	4.30	5.30	0.74
	Nd ₂ O ₃	18.5	12.0	16.7	3.00
	Sm ₂ O ₃	0.80	0.79	2.20	2.82
	Eu ₂ O ₃	0.20	0.12	0.60	0.12
	Gd ₂ O ₃	0.70	0.17	0.90	6.85
	Tb ₄ O ₇	0.10	微量	0.10	1.29
	Dy ₂ O ₃	0.10	微量	0.20	6.67
	Ho ₂ O ₃	微量	微量	微量	1.64
	Er ₂ O ₃	微量	微量	微量	4.85
	Tm ₂ O ₃	微量	微量	微量	0.70
	Yb ₂ O ₃	微量	微量	0.10	2.46
	Lu ₂ O ₃	微量	微量	微量	0.36
Y ₂ O ₃	微量	0.09	0.40	65.0	

注: バイヤンオボーの鉱石は、モナザイトも含む(バストモナズ、共生鉱)場合もある。

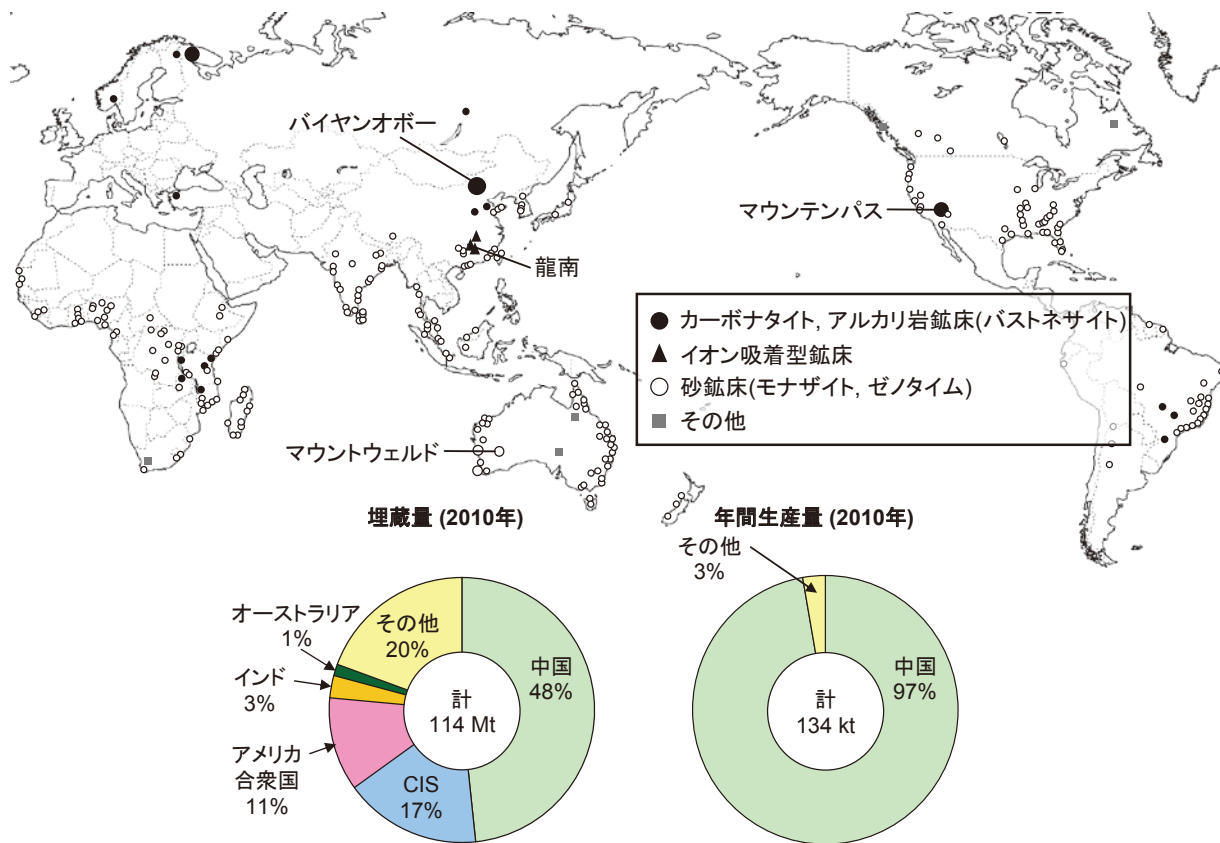


図2 主なレアアース鉱床と資源の国別埋蔵量・生産量（酸化物換算）^{5),8),9)}

イオン吸着型鉱床と呼ばれる極めて特殊な風化鉱床から生産されている。この鉱床は、高温多湿の気候の下でレアアースを含む花崗岩などが長い年月をかけて風化される際に、放射性元素が風雨によって洗い流され、重希土類が優先的に粘土層にイオン吸着されて地表に濃縮した極めて特殊な鉱床である（表3参照）。本鉱床は、放射性元素をほとんど含まない上に、硫酸アンモニウムなどの酸や溶離剤による溶出によって容易に鉱石中のレアアースを分離・抽出できるため、レアアース資源として極めて優良である。しかし、イオン吸着型鉱床は前述のような特殊な気候条件や地質条件によって形成されるため、現時点では中国南部や東南アジアの一部の地域でしか発見されていない。図2を見てわかる通り、レアアースは埋蔵量ベースでは莫大な量が存在し、世界中に広く分布するが、中国の優良な鉱床や環境規制の緩慢さ、安価な労働力などが要因となって他国の鉱山や製錬所は経済的な競争力を持たず、生産が現在中国に一極化している。

3. レアアースの資源が抱える問題と対策

前述したように、レアアースは資源的に比較的豊富であるため、仮にEVやHEVが100万台生産されるようになったとしても、必要なレアアース資源量の問題は少なく、磁石生産の原料を供給する上で長期的には深刻な問題となることはない（図3参照^{3),10)}）。しかし、レアアースは多くのレアメタルと同様、投機や政治問題、鉱山や製錬所の操業停止などによる短期的な供給障害のリスクが極めて高いという問題を抱

えている。2004年以降、中国政府は国内産業の育成政策の強化、国内でのレアアースの需要の増大、さらには環境保護の必要性などの理由から、レアアースの金属や化合物の輸出に対して規制を強化しはじめた³⁾。その結果、レアアースの価格は重希土類を中心に高騰し、最近ではレアアースを必要とする日本の産業界は深刻な供給障害に直面した。2011年7月には、レアアースの価格は、ネオジムは420 US\$ / kg、ジスプロシウムは3,600 US\$ / kg (CIF 日本) と高値となった¹¹⁾。ジスプロシウムの価格が50 US\$ / kg 前後であった10年前は、外貨獲得のための不当廉売だったのかもしれない

概算:

$$1\text{kg 合金磁石} / \text{台} \times 100\text{万台} = 1,000 \text{ トンの磁石が必要}$$

日本だけでも、13,000トンの合金磁石が生産されている。

1,000トンのレアアース合金磁石をつくるには、300トンのネオジム(Nd)と30~90トンのジスプロシウム(Dy)が必要。

中国では、27,000トンのNd、4,000トンのDyが生産されている。

→多く見積もっても現在の需要の3%程度。ネオジムについては中国の鉱山一つで約38年の耐用年数がある。このレベルでは資源的には大きな問題ない。

1,000万台以上のモータ仕掛けの車が走り回るとなると、供給構造を変え、また効率の良いリサイクルシステムを構築しなければならない。

図3 次世代自動車を使用するネオジム、ジスプロシウムの量とその生産に必要なレアアースの量の概算値^{3),10)}

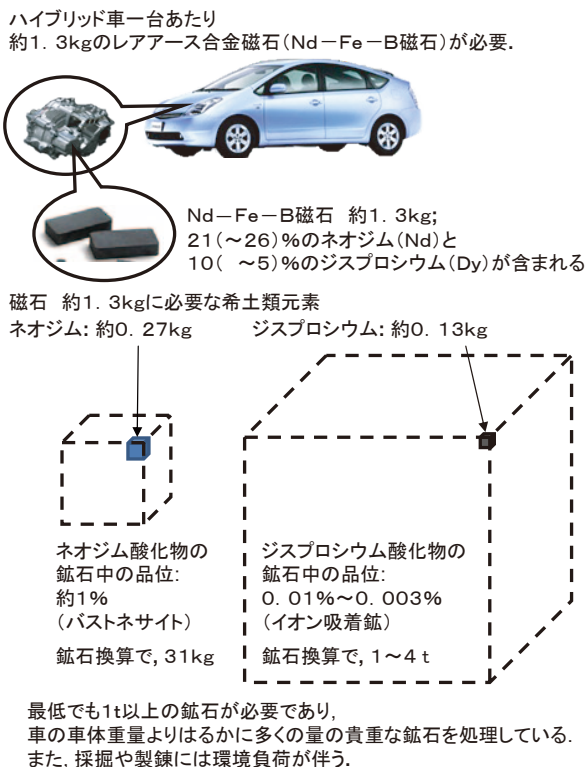


図4 次世代自動車を使用するネオジム、ジスプロシウムの量とその生産に必要な磁石の量の概算値^{3),5)}

いが、逆に、輸出規制が行われるようになってからのレアアースの価格は異常な状況と言えよう。

今後も、ネオジム磁石の基幹原料であるレアアース金属やその化合物を、長期的かつ安定的に供給するためには、産官学が連携して①資源供給源の多様化、②備蓄(資源バッファ)の構築、③リサイクル、製品のリユース・長期利用のほか、④代替材料の開発、使用量の削減技術の開発などの解決策に多角的に取り組む必要がある³⁾。

供給資源の多様化については、オーストラリアのマウントウェルド鉱山の開発や、カザフスタンのウラン製錬の残渣(廃棄物)からジスプロシウムを抽出する試みなど、複数の民間企業が海外での権益確保に動いている。しかし、ジスプロシウムについては現状では中国以外に低コストで生産できる鉱床がほとんど存在しないため、レアアース原料の生産コストが圧倒的に低い中国への依存から脱却するのは容易ではない。希少性の高いジスプロシウムについては、ネオジム磁石への添加量を減らすための技術開発や、価格が低下したときに国家備蓄を進められるような法制度の整備も必要である。

経済合理性の枠に捉われず、環境保護の観点から資源問題について論じることが重要である。レアアースの磁石を採掘する際には多くの場合、放射性物質(NORM)を含む廃棄物の処理が問題となる。前述のイオン吸着磁のようにウランやトリウムをほとんど含まない特殊な磁物を利用する場合でも、地中に直接、抽出剤を打ち込んで採掘するため、自然環境を破壊する。また、イオン吸着磁は重希土類に富んでいるものの、磁石中のジスプロシウム品位は30～100 ppmと低い。イオン吸着磁からジスプロシウムを抽出する場合、図4^{3),5)}に

示すように自動車1台あたり1～4tもの磁石を処理している計算になるため、採掘や製錬に伴う環境破壊は決して軽視できるものではない。地球が何万年、何億年の時をかけて奇跡的な自然現象によって形成した、極めて特殊な磁床の価値(Value of Nature)を認識し、経済原則のみを優先した従来の考え方からは脱却しなければならない^{1),2)}。

また、一般にはあまり議論されていないが、磁石から生産されるレアアースの供給量は、磁石中の存在比の制約をうけるため、資源的に希少なジスプロシウムやテルビウムなどの需要のみが大きくなると、余剰の副生産物の処理コストが発生する(表3参照)。このように供給メカニズムにアンバランスが生じる結果、供給障害や価格の高騰が生じる可能性もある。副産物を含めた資源の有効利用という観点からは、高効率のリサイクル技術の開発が極めて重要な技術課題の一つである。

4. ネオジム磁石の生産とリサイクルの現状

ネオジム磁石を巡るマテリアルフローを図5¹²⁾⁻¹⁴⁾に示す。原材料であるレアアースの金属や合金は中国から輸入される。磁石の製造は主に、原料の溶解、合金の粉碎、成型、焼結、切削加工、着磁、などの工程からなる。原料のレアアースの金属や合金は、リサイクル品などを中心に一部国内での製造を行っている例もあるが、ほぼ全てが中国から輸入されている。

レアアース磁石合金の製造プロセスでは、多量のスクラップが発生する。これらのスクラップの多くは、酸素などの不純物濃度が高くオフスペックになったものや、合金を加工する際に発生する削り粉などである。また、磁石の製造の際には、切削加工時に生じる切削屑(スラッジ)に加え、各段階で規格からはずれた個体のスクラップも発生する。このため、合金原料から最終製品への歩留まりは、現状では5割から8割と低い。

製品の中に組み込まれる前の製造工程で発生する内製スクラップは、回収・分別のコストがほとんどかからず、また必要とする有価なレアアースを多量に含む。このため、これらのスクラップを磁石と見立てた場合、非常に高品位の原料と考えることができる。しかし、工程内で発生したスラッジは、水分や油分による汚染が激しいため、一般的には湿式法により酸に溶解して一度水溶液に戻してから、分離精製される。一方、規格外品などの比較的汚染の少ないものについては、高温で再溶解して再び原料合金として再利用される場合もある。現在、磁石の製造時に発生するスクラップについては、工程内での回収および再利用の技術は確立されており、高い回収率でリサイクルされている。ネオジム合金磁石の工程屑のリサイクルについては、処理コストの問題などから、一部は海外の製錬業者に委託されているようであるが、これらの流通については不明な点が多い。

一方、一度製品に組み込まれ、市場に出たネオジム磁石に関しては、主としてコストの問題からMRI用の磁石など一部の大型のものを除いてはほとんど回収されていない。しかし先に述べたように、将来的にはEVやHEVなどに比較的大

型の磁石が組み込まれ、一定の割合で長期間にわたって製品スクラップが発生すると予想される。したがって今後、大型モータなどの製品スクラップから、ネオジムやジスプロシウムなどの有価元素を効率良く回収することは重要な課題である。

日本で発生するレアアースを含むスクラップの多くは、リサイクルする場合でも海外に持ち出して製錬プロセスの上工程に投入して再処理されることが多いようであるが、今後は資源の安定供給や環境保全の観点から、国内で効率良く回収して分離・抽出し、循環利用できる新しい技術の開発が望まれる。

レアアースのリサイクル技術の詳細については、著者らがすでに幾つかの解説を行っているのでそれらを参照されたい^{13), 14)}。

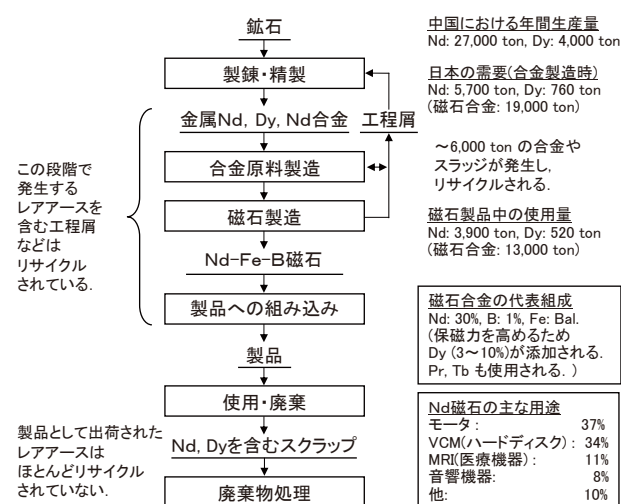


図5 磁石生産におけるネオジム、ジスプロシウムの
マテリアルフロー^{12), 13)}

5. おわりに

現代のいわゆるハイテク技術はレアメタルなしには成立し得ない。レアメタルを活用したハイテク技術により、日本は世界トップの性能を誇る工業製品を世界に供給してきた。しかしながら、国内のレアメタルの鉱物資源は乏しく、重要なレアメタル資源の多くは、中国などのごく限られた国に偏在することから、レアメタルの継続的な入手可能性は、日本の産業競争力や安全保障にとって極めて重要である。このため、高度循環型社会を構築して、物質・資源の循環により環境を保全すると同時に、海外資源に依存しない工業プロセスによる産業構造の変革をもたらす、循環資源立国を目指すのは重要な課題である。

ハイテク産業に不可欠な高い付加価値のレアメタルに関しては、今もなお日本は世界に冠たる生産大国・技術“超”大国である。日本は高い人件費とエネルギーコスト、厳しい環境規制という幾つものハンディがありながらも、鉱物資源を全量輸入して多量のレアメタルを生産している。特に、製錬が困難で高度な製造技術を要するものや、ハイテク機器の電子材料用の高純度・高機能レアメタルやその化合物について

は、我が国の生産シェアが際立って高く、抜群の国際競争力を有している。今後も日本がレアメタルの生産において世界のトップを走り続けるために、また、資源セキュリティという観点からも、国内に蓄積されているスクラップ(都市鉱山)を活用したリサイクルを含めた新規なプロセス技術の開発が不可欠である。

今後も需要が大幅に増大すると予想される永久磁石の原料であるネオジムやジスプロシウムなどのレアアースのリサイクル技術についても、資源セキュリティに関する議論をする上で欠かすことのできない一例である。レアアースやその化合物の用途も需要も21世紀を通じて拡大を続け、その重要性はますます高まるだろう。用途や需要が増えれば、多様なスクラップに適した新しいリサイクル技術を開発しなければならない。レアアースの優良な鉱山が中国一国に偏っているということも念頭に置き、資源のセキュリティ・安定供給の面からも、ネオジムやジスプロシウムなどのレアアースの高度なリサイクル技術を開発し、日本国内に蓄積された製品やスクラップを都市鉱山として利用する必要がある¹⁵⁾。

レアアースをはじめとするレアメタルのリサイクル技術や社会システムを発展させ、信頼性の高い資源バッファ(緩衝機能)を築き上げ、継続的な供給と循環利用ができる安定した資源ルートを確認することは、循環資源立国を目指す日本にとって重要な課題である¹⁶⁾。新しいリサイクル技術によるスクラップからのレアメタル生産は、有限かつ貴重な鉱物資源の保全はもちろんのこと、環境問題を解決するとともに、循環型社会の構築に対して多大な貢献をもたらすと考えられる。

謝 辞

本稿をまとめるにあたり、東北大学 工学研究科 竹田 修 助教に貴重なコメントや情報の提供を戴いた。記して感謝する。

参考文献

- 1) '誰も知らないレアアースの現実', ECO JAPAN リポート(中西清隆, 日経エコロジー), 2010年11月15日(<http://eco.nikkeibp.co.jp/article/report/20101112/105248/>).
- 2) 岡部 徹, 野瀬 勝弘: 'レアメタル資源の物質フローに関する中長期展望', 廃棄物資源循環学会誌, vol.22, no.6, (2011), pp.403-411.
- 3) 'ネオジム磁石のすべて—レアアースで地球(アース)を守ろう—', [監修] 佐川 真人, 発行 アグネ技術センター (ISBN 978-4-901496-58-2 C3054), (2011).
- 4) 'レアメタルの最新動向', シーエムシー出版, 岡部 徹, 野瀬 勝弘 監修, (2012), 316 頁.
- 5) 白山 栄, 岡部 徹: 'レアアースの現状とリサイクル技術', 自動車技術, vol. 65, no. 11, (2011), pp. 87-94.
- 6) '循環型社会における3Rに関する研究調査(産業機械分野の3Rに係るレアメタル対策推進に関する調査委員会)報告書', 財団法人クリーン・ジャパン・センター:平成21年度財団法人JKA補助事業(2010).

- 7) 石原舜三ほか: 'レアアース資源を供給する鉱床タイプ', 地質ニュース, 624号, (2006) pp. 10-24.
 - 8) U.S. Geological Survey: Mineral Commodity Summaries, URL: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earths/
 - 9) 南博志, 'レアメタル2007 (2) レアアース (希土類) の需要・供給・価格動向等', 金属資源レポート, (独) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構, vol. 37, no. 2, (2007), pp. 127-133.
 - 10) '自動車技術ハンドブック第10分冊 (EV・ハイブリッド) 編', (編集:自動車技術ハンドブック編集委員会 (委員長:堀洋一), 社団法人自動車技術会, 東京), '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', (2011).
 - 11) レアメタルニュース, アルム出版社, No. 2493, (2011) p.1, No. 2487, (2011) p.1, No.2460, (2010) p.3. など
 - 12) 工業レアメタル, アルム出版社, No. 126, (2010) p.60. など
 - 13) 岡部 徹: '希土類金属の製造技術とリサイクル', 金属, vol. 77, no. 6, (2007) pp. 10-16.
 - 14) 白山 栄, 岡部 徹: '希土類合金磁石の現状と乾式リサイクル技術', 溶融塩および高温化学, vol.52, no.2, (2009), pp.213-225.
 - 15) '使用済製品からのネオジム磁石の回収・リサイクルに関する調査研究', 2009年3月, 財団法人クリーン・ジャパン・センター (平成20年度財団法人KJA補助事業新規資源循環社会システムの形成に関する調査研究, 委員長: 小林 幹男).
 - 16) 岡部 徹: 'レアメタルの実情と日本の課題', 工業材料, vol.55, no.8, (2007), pp.18-25.
-