

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、とも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⁾しているのでもここでは割愛する。

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、ともすると、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機会が多い。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年のネオジウム(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)}。ネオジウム磁石は、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ウ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)}。

ネオジウム磁石の原料となるネオジウ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、鉱石からネオジウ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、ネオジウ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)

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 産出鉱床 (産出国)	バストネサイト		モナザイト	イオン吸着鉱
	バイヤンオポー (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
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
REO中の含有比率(wt%)	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
	HfO ₂ 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: バイヤンオポーの鉱石は、モナザイトも含む(バストモナス、共生鉱)場合もある。



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⁾

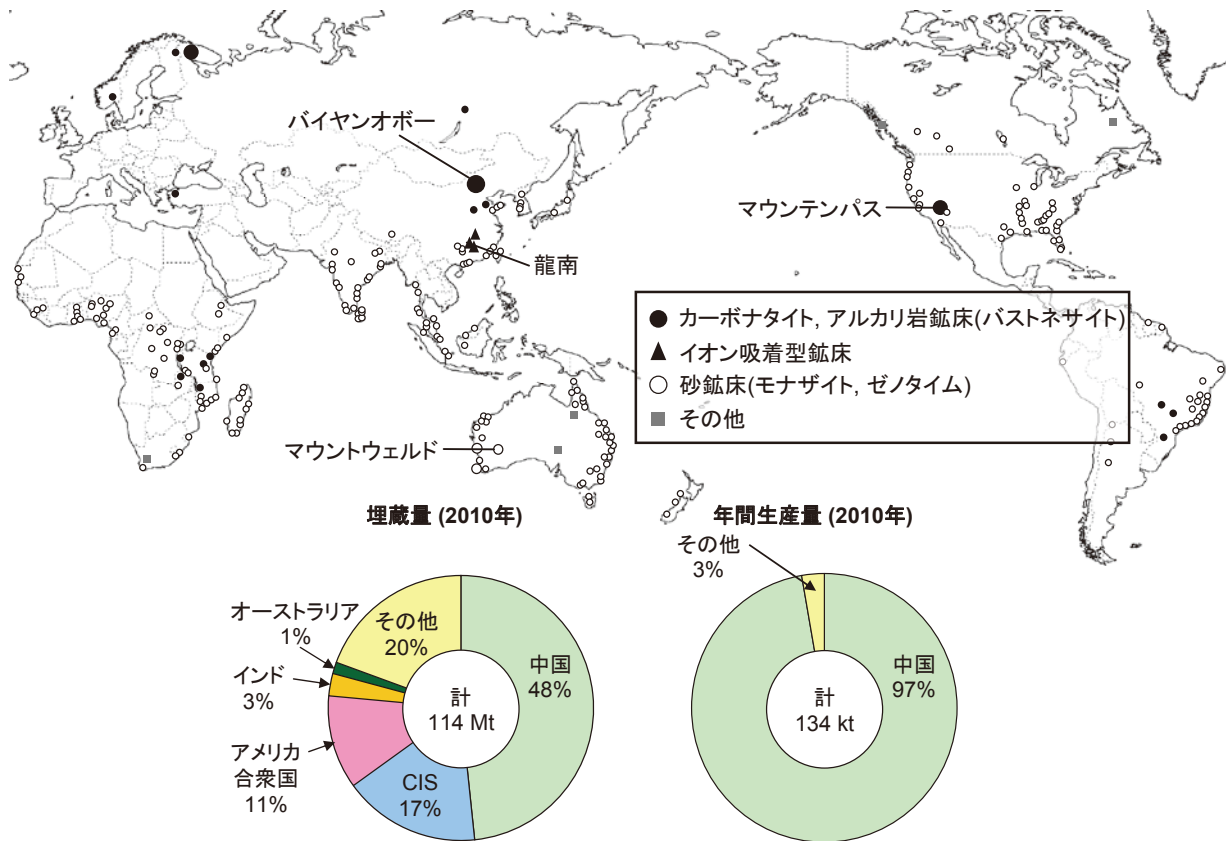


図2 主なレアアース鉱床と資源の国別埋蔵量・生産量 (酸化物換算) ^{5),8),9)}

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、ネオジウムは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:
1kg合金磁石/台 × 100万台
= 1,000 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トンのネオジウム(Nd)と30~90トンのジスプロシウム(Dy)が必要。

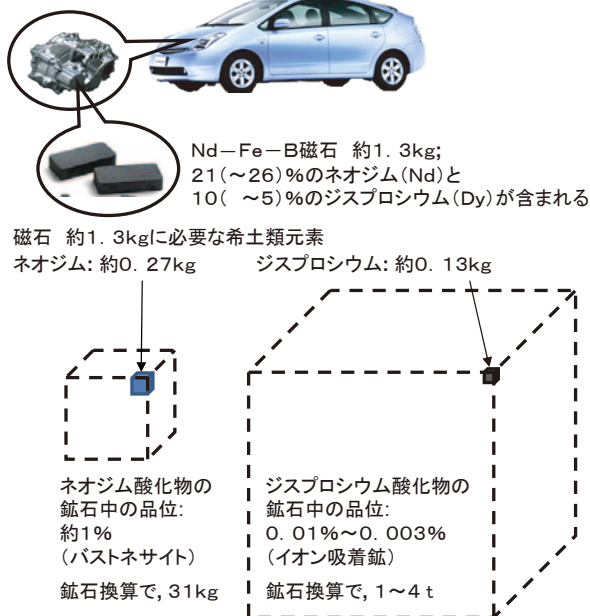
中国では、27,000トンのNd、4,000トンのDyが生産されている。

→多く見積もっても現在の需要の3%程度。ネオジウ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ウム、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)}

ハイブリッド車一台あたり
約1.3kgのレアアース合金磁石(Nd-Fe-B磁石)が必要。



最低でも1t以上の鉱石が必要であり、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。また、採掘や製錬には環境負荷が伴う。

図4 次世代自動車を使用するネオジウム、ジスプロシウムの量とその生産に必要な鉱石の量の概算値^{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、ネオジウ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、ネオジウ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。レアアースの鉱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。前述のイオン吸着鉱のようにウランやトリウムをほとんど含まない特殊な鉱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、イオン吸着鉱は重希土類に富んでいるものの、鉱石中のジスプロシウム品位は30～100ppmと低い。イオン吸着鉱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もの鉱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、極めて特殊な鉱床の価値(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、鉱石から生産されるレアアースの供給量は、鉱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. ネオジウム磁石の生産とリサイクルの現状

ネオジウ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鉱石と見立てた場合、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。ネオジウ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、市場に出たネオジウム磁石に関しては、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、ネオジウ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)}。

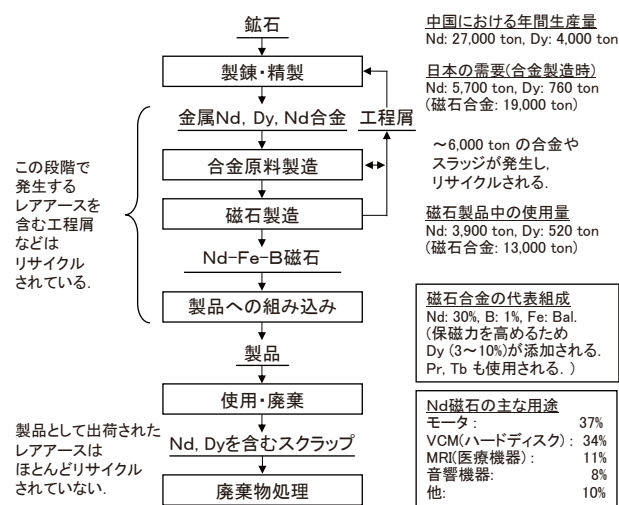


図5 磁石生産におけるネオジウム、ジスプロシウムのマテリアルフロー^{12), 13)}

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ウ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、その重要性はいつそう高まるだろう。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、ネオジウ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) 'ネオジウム磁石のすべて—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.

□ 特集 2 永久磁石 □

東北大学 大学院工学研究科

杉本 諭

1. はじめに

電気自動車(EV), ハイブリッド自動車(HEV), 風力発電, 高性能モータ, ハードディスク(HDD)など, 身の回りにある製品の近年における高性能化, 特に省エネルギーならびに高効率化に向けた発展には目を見はるものがある。これらの機器やデバイスの高性能化に貢献している材料のひとつに永久磁石がある。本稿では, その永久磁石におけるレアメタル, 特にジスプロシウム(Dy)の使用量削減技術について述べる。

2. 磁石の歴史と Nd-Fe-B 系磁石の用途

人類が永久磁石を作れるようになったのは意外と新しく, 1917年本多光太郎のKS鋼の発明がその発端である。それ以来90年あまりが経過するが, 最近のNd-Fe-B系磁石をKS鋼と比較すると, その強さ(最大エネルギー積 $(BH)_{max}$)は図1¹⁾のように約60倍に達している。

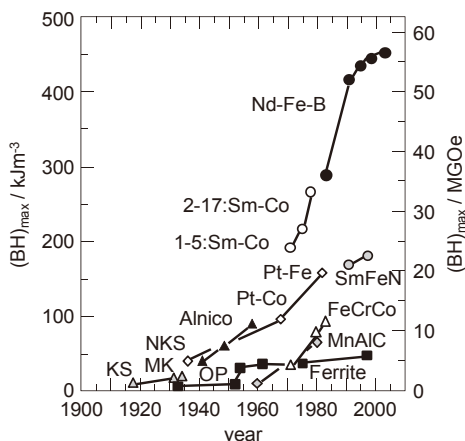


図1 永久磁石の歴史¹⁾

現在の永久磁石は大別すると金属系磁石と酸化物系磁石に分けられるが, 金属系磁石は金属間化合物の強い結晶磁気異方性を利用して保磁力を発現し, 高い $(BH)_{max}$ が得られるSm-Co系磁石やNd-Fe-B系磁石などの希土類磁石と, 高飽和磁気分極を有するFeCo粒子の形状異方性によって保磁力を発現するアルニコ磁石やFe-Cr-Co系磁石に分けられる。一方, 酸化物系磁石は, 鉄の酸化物を主成分とする化合物磁石であり, 作製コストが既存の磁石の中では最も安く, 重量当たりの生産量で全磁石生産量の約80%以上を占めるフェライト磁石である。これら現在使用されている主な永久磁石材料の中で飛躍的に発展しているのはNd-Fe-B系磁石といえる。

Nd-Fe-B系磁石の用途をみると, 2000年ごろはハードディスクのVCMに用いられているものが多かったのに対し, 最近ではモータや発電機への用途が急増している。この傾向には環境問題, すなわちCO₂排出量低下のため電力消費の低減, 省エネが求められるようになったことが関係している。日本における年間の電力消費量は約9000億kWh, そのうちモータで消費される電力は全体の約50%に達している。モータの効率を1%向上させれば原子力発電所1基分の電力が節約できると試算されていることから, モータが誘導モータから効率の高いマグネットモータに切り替わり, 高性能のNd-Fe-B系磁石が利用されるようになってきた。

さらに環境問題から考えるとNd-Fe-B系磁石がなければ実現できなかったもののひとつにHEVが挙げられ, この駆動モータならびに発電機に用いられているのがNd-Fe-B系焼結磁石である。また, HEVの需要も環境問題対策などから拡大しており, HEVだけでなくEVも市販されるようになってきた。最近では東日本大震災の影響から代替エネルギーの大きな柱となりつつあるものに風力発電があり, この発電機にも

Nd-Fe-B系磁石を用いたものが検討されている。このようなことから、Nd-Fe-B系磁石はまさに低炭素社会実現に向けてのキーマテリアルと位置づけられる。

3. Nd-Fe-B系焼結磁石におけるDy量削減の要望

しかしながら、Nd-Fe-B系焼結磁石の主相のNd₂Fe₁₄B化合物のキュリー温度が低く、保磁力の温度係数も大きいことから、HEVの駆動モータなど使用環境が高温となる用途では、Nd-Fe-B三元系合金では保磁力が低下し、磁石として機能なくなってしまうという問題がある。この対策として、図2のようにDyを添加して室温で高い保磁力を実現し、高温でもある程度保磁力を確保する方法がなされている。しかしDyの添加は(BH)_{max}を下げ、さらにDyは希土類磁石中の含有量が少なく原産地も中国に限定されることから、Dy量が少なくても保磁力の高いNd-Fe-B系磁石の開発が切望され、様々な研究機関で研究されている。

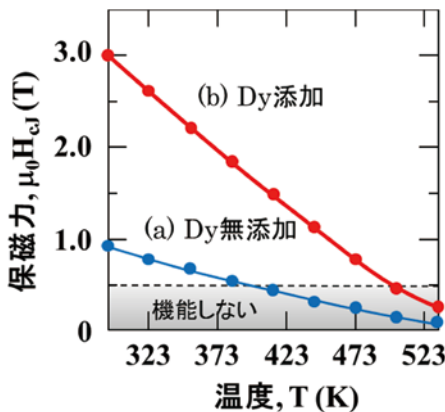


図2 Nd-Fe-B系磁石におけるDy添加効果

4. 保磁力向上へのアプローチ

Nd-Fe-B系磁石の保磁力は、主相の表面や欠陥からの逆磁区の発生によって左右される核発生型と考えられている。結晶粒界に存在するNd-rich相は高温で液相となるため、焼結時に充填化に寄与するだけでなく、Nd₂Fe₁₄B相の表面にある欠陥を修復し、逆磁区の発生を抑える役割を果たしているといわれている。したがって、保磁力を増加させるには逆磁区の発生確率を減らすことが重要であり、そのためには図3で示したように①Nd₂Fe₁₄B結晶粒表面のみの磁気異方性を向上させること、②主相のNd₂Fe₁₄B相とNd-rich相との界面の状態を良好にすること、③磁石の結晶粒径を小さくし単磁区粒径に近づけること、が必要と考えられている。

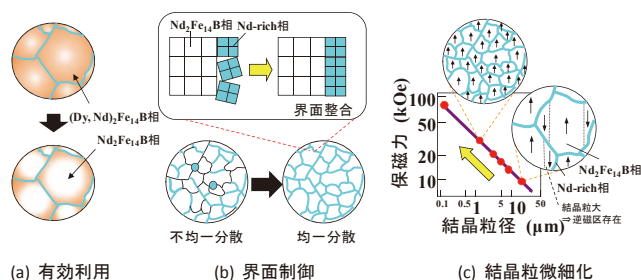


図3 保磁力向上の方法

5. Dy使用量削減技術の紹介

4で示した3つのアプローチにおいて、まず、①についてはDyの添加が最も有効であるが、上述したようにこの量が問題となる。Nakamuraら²⁾は、DyをNd-Fe-B系焼結磁石の粒界部のみ偏析させ残留磁束密度B_rの低下を招かないで保磁力を増加させることが工業的に可能な粒界拡散法“Grain Boundary Diffusion Process (GBDP)”を開発した。GBDPでは重希土類元素のTbまたはDyの酸化物、またはフッ化物をスラリー状にして焼結磁石に塗布し、800℃～900℃の温度域で熱処理する。この温度域では、焼結磁石の粒界に存在するNd-rich相が液相となり、重希土類元素と置換し、その液相が主相のNd₂Fe₁₄B相と希土類元素の置換を行うため、主相の粒界部に近いところが(Nd, Dy)₂Fe₁₄B相となって、保磁力が増加する。従来の焼結法と比べて温度が低いいため、Dyが粒内深く拡散せず粒界部に偏析することから、図4のように高保磁力が得られ、かつ大きな磁化の減少は生じず、高い(BH)_{max}が維持されるという長所がある。また、この方法を用いることによってDy使用量を減らすことができるといったメリットもある。さらに最近では塗布法ではなく、Dyの蒸気圧が比較的高いことに基づき真空蒸着を利用する方法も報告され、同様に高い磁気特性が報告されている。

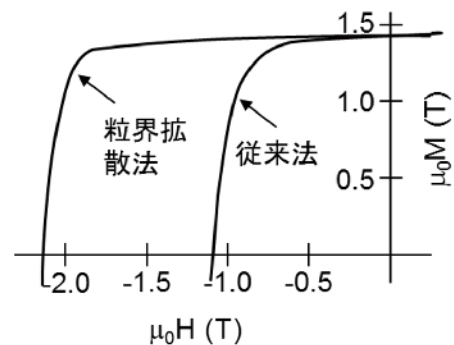


図4 粒界拡散法による磁気特性の向上²⁾

一方、日高ら³⁾も、従来の2合金法を改良し、Dy源合金を主相合金の1/10程度まで小さくして混合させることによって、Dyをより薄く主相内の粒界部に近い領域に偏析させることに成功している。この方法はH-HAL (Homogeneous High Anisotropy Layer)法と呼ばれ、この方法を用いることによって6.5mass%以下のDy添加でμ₀H_{cJ} = 3 T以上の保磁力が得られ、従来よりDyを35%削減できると報告されている。

②については、Nd-Fe-B系焼結磁石の保磁力機構がNd₂Fe₁₄B相とNd-rich相の界面組織が関係していると考えられていることから、数多くの研究者によって界面組織の観察がなされてきており、Nd-rich相の組成や磁性(強磁性であること)、などが明らかにされてきている。

一方、③の結晶粒微細化では、焼結磁石の結晶粒を微細化させるため、各プロセスにおける組織を微細にする工法がとられている。SagawaとUne⁴⁾はHeガスを用いた高速ジェットミルを利用することによって、2μm以下の微粉末の製造

に成功するとともに、高圧力を要せず微粉末を成形できる“Press-less Process (PLP)”という磁場プレス方法を開発した。PLP法はジェットミル粉末をモールド中にタッピング処理によって充填し、磁場を印加してNd₂Fe₁₄B相の磁化容易軸方向であるc軸方向を配向した後、モールドに粉末を充填したまま焼結、熱処理を行う方法である。2 μm以下のジェットミル粉末とPLP法を用いて作製した焼結磁石は、図5に示したようにDy無添加でも2 T以上の保磁力を発現すると

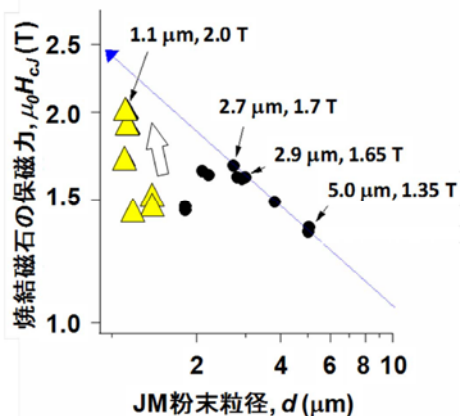


図5 結晶粒微細化による保磁力の向上

も、(BH)_{max}も400kJ/m³を示すことが報告されている。また、この磁気特性が従来からDyを40%程度削減した磁石と同等の磁気特性に匹敵することから結晶粒微細化の有効性が示唆されている。

6. まとめ

今後、上述した①から③に関係した研究が複合的に行われ、その相乗効果によって、さらに磁気特性やプロセス技術が発展していくと考えられる。今後の研究に期待したい。

参考文献

- 1) S. Sugimoto, J. Phys. D: Appl. Phys., 44, 064001, (2010).
- 2) H. Nakamura et al, IEEE Trans. Magn., 41, pp.3844 (2005).
- 3) 日高 徹也, BM NEWS (日本ボンド磁性材料協会 (JABM)), 43, pp.105 (2010).
- 4) M. Sagawa and Y. Une, Proc. 20th Int. Workshop on Rare Earth Permanent Magnet & their Applications, (Knossos-Crete) ed D. Niarchos (Greece: Admore), pp 103-105, (2008).

□ 特集3 自動車触媒に用いられるレアメタルについて □

日産自動車(株) パワートレイン生産技術本部

藤川 真一郎, 内川 文博

1. はじめに

環境への高い関心、エネルギー源の多様化といった観点から、内燃機関による自動車はハイブリッド車をはじめEV,FCV等新たな動力機構にシフトすると見られている。それでも新興国を中心として増加する自動車では内燃機関が動力の中心であり、排気浄化触媒が果たすべき役割はまだ重要であると言える。一方、最近の供給懸念から注目されるレアアースは排気触媒にとり重要な材料である。本稿では自動車触媒とレアアースの関わりについてその一端を紹介する。

2. 自動車触媒におけるレアアース

自動車のエンジンから排出されるガスには有害な一酸化炭素(CO)や窒素酸化物(NOx)、未燃の炭化水素(HC)が含まれる。この有害成分を浄化するよう、エンジンに供給される燃料・空気の吸入量やエンジン燃焼の点火時期などの精密な制御が高度に組み合わされた結果、最近の小型乗用車では

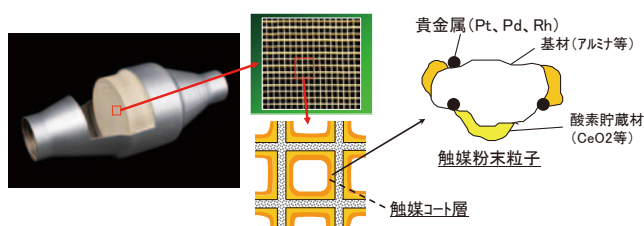


図1 自動車触媒の一般的な構造

排気が周辺の大気よりも清浄であるほど後処理技術は進んでいる。浄化反応は共に含まれる酸素や水分、水素などが関与する複雑な反応であるが、HC、COの浄化である酸化反応と、NOxの浄化である還元反応を同時に行うことが開発当初は難課題であった。この三成分を同時に浄化する触媒は三元触媒と呼ばれ、一般的には、貴金属(Pt, Pd, Rh)、貴金属を高分散に保持する土台である基材(アルミナなど)、そして助触媒(レアアースなど)が主な成分であり、これらを含むコート層がハニカム構造体の貫通孔(セル)内部に形成されている(図1)。

この触媒をうまく機能させるのにエンジンの空燃費の制御が重要である。空燃費とはエンジンに供給される空気と燃料の重量比であり、空気が多ければ酸化反応が有利に、空気が少なければ還元反応が進みやすい。酸化される成分と還元さ

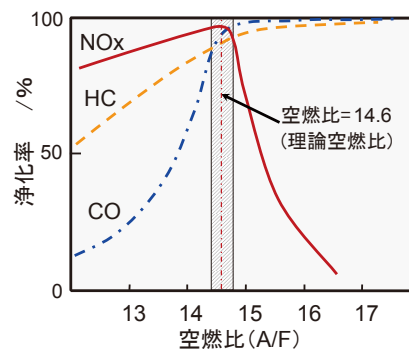
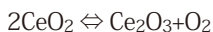


図2 三元触媒の浄化特性

れる成分が合致する理論空燃比の近傍では、三成分が最も良い転化性能を示す領域となる(図2)。しかしこの好ましい空燃比の範囲から逸脱すると著しく転化率が下がってしまう。これを補うのがレアアースである。

レアアースの中でもセリアは酸化数の変化により酸素雰囲気の変動を緩衝する働きを持っている。



周囲の酸素が不足すると酸素を放出し、逆に周囲に酸素が過剰となると酸素を吸収する。このようなセリアの酸素を貯蔵し吸放出する能力は酸素ストレージ能(OSC: Oxygen Storage Capacity)と呼ばれ近傍の酸素濃度変動を緩和するため、セリアは排ガス浄化に不可欠と言える。

3. 自動車触媒の開発

3.1 自動車触媒開発

一般に工業用触媒は最適な環境・条件で使用されるが、自動車触媒は始動・加速・減速と変化する運転状況で、排ガスの温度・流量・成分比も大きく変動する。排ガス温度はエンジン始動時の常温から800～900℃のような高温となることもあり、この過酷な条件で使用され続けた三元触媒では、含まれる貴金属やその基材、助触媒であるレアアースが凝集して肥大化し表面積が小さくなる。つまり反応する場所が減るので反応活性が低下する。そこで触媒の開発では、浄化性能の向上として劣化の抑制が重要である。特に希少で高コストである貴金属については、耐久性を向上させることで使用量を減らす研究が盛んである。貴金属と基材の結びつきを強めて凝集を抑制する技術が様々な開発されているが、弊社ではさらに貴金属を担持した基材粒子同士も凝集しないように仕切る構造を組合せて実用化している(図3)。ここでもPt粒子の基材には結合力の強いセリアを選択している。

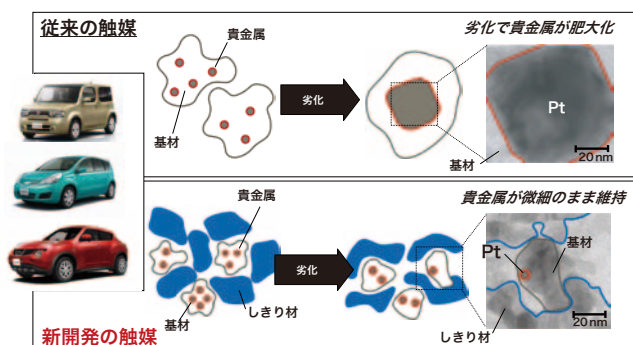


図3 自動車触媒の改良事例

3.2 レアアースによる助触媒の開発

レアアースを主成分とした助触媒の開発は三元触媒浄化性能向上に寄与してきた。酸素の吸収・放出を素早く大量に、そして高温での使用後も高表面積を維持する高性能な複合酸化物が研究されてきた。1990年代初頭にCeO₂にZrO₂を添加することで酸素の吸収放出機能が上昇するとの報告¹⁾や、CeO₂-ZrO₂系の状態図から助触媒作用の変化を相変化に

よるものと説明する報告²⁾など、様々な研究されレアアースを用いた助触媒は相当な進化を遂げてきた。しかし自動車触媒に使用されるレアアース量はさほど変わっていない。これはより高価な貴金属の使用量削減に助触媒改良の成果が適用されてきたためである。

よく知られていることだが、貴金属とレアアースでは価格、産出量ともに大きな差がある。Ptの価格は、2011年は1722\$/gに対して、Ceは乱高下したものの2011年末には50\$/kg、言い換えると0.05\$/gとなる。供給量についてはPtは全世界あわせて2.36t/年(2002～2011年の平均値)³⁾が供給されているが、対してセリウムは日本だけの輸入量でも9847t/年(2000～2009年の平均値)⁴⁾と桁違いである。

4. リサイクル

触媒はコージュライトを材料とするハニカム担体が重量上は過半を占めており、含まれる貴金属やレアアースは含有濃度が低くその抽出は容易ではないが、貴金属のリサイクルは活発である。例えば2011年のプラチナ供給量に占める廃車からのリサイクル量は30%弱にも及ぶ。しかし廃触媒からのレアアース(セリアなど)のリサイクルはまだ実用化されていないようである。技術的には廃触媒からレアメタルの抽出が可能であることは検証されており、当社においても溶媒抽出法による貴金属回収の過程でレアアースも分離回収できることを確認しているが、この工程では高コストであったため結局実用化には至っていない。しかし最近のレアアース供給懸念からリサイクルについて新たな研究が開始されている。例えば、経済産業省が取り組む「希少金属代替材料開発プロジェクト」の一環として、三菱マテリアルは、NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)の助成を受け、使用済み自動車から希少金属を回収する技術の実証に着手されている。

5. 今後の展望

中国以外からのレアアース供給が本格化すれば供給懸念が解消されると見られてきたが、環境の懸念から事業認可が危ぶまれている計画もあり、まだ予断を許さない。そこで自動車触媒に適用されるレアアースについても、高価な貴金属量削減に影響するものの、その使用量を減らす取組みを要望されていくであろう。日本は世界の中でも触媒研究者数が上位であり、かつ産学連携による新技術開発が促進されており、今後の助触媒開発に期待したい。

参考文献

- 1) T.Murota: J. Alloys&Compounds, 193 (1993), 298.
- 2) 八尾:資源・素材'94(秋季大会)
- 3) PLATINUM Interim Review Johnson Matthey社 日本語版(平成23年12月 田中貴金属工業株式会社)
- 4) 財務省貿易統計

□ 特集 4 固体高分子形燃料電池用 Pt カソード触媒の Pt 使用量低減の試み □

1. はじめに

二酸化炭素排出削減, 都市部の環境改善, 非常用電源確保等の観点から, 固体高分子形燃料電池 (PEFC) の普及が期待されている。我が国では, 家庭用 PEFC システム (エネファーム) が世界に先駆けて発売されている。しかし PEFC の本格的普及に向け, 様々な技術課題が山積している。それらの課題の 1 つとしてカソード触媒の低コスト化と耐久性向上が挙げられる。PEFC ではアノードで水素の酸化 ($H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e$), カソードで酸素の還元 ($O_2 + 4H^+ + 4e \rightarrow 2H_2O$) が進行することで発電する。現行の PEFC 両極で炭素担持 Pt 触媒が利用されているが, アノードでの水素の酸化に比較して, カソードでの酸素の還元の反応速度が著しく遅いため, カソードで多量の Pt 触媒が利用されている。Pt は高価であり, 資源量も限られるため, カソード触媒中の Pt 使用量低減が求められている。そこで炭素担持 Pt カソード触媒の高活性化が検討されている。図 1 には現行の炭素担持 Pt カソード触媒の透過型電子顕微鏡 (TEM) 写真を示した。直径 50 ~ 60nm 程度の炭素 (カーボンブラック) 上に直径 2 ~ 3nm 程度の Pt 粒子が高密度に担持されていることが分かる。Pt 粒子表面が触媒活性点として作用するため, 粒子径を小さくすることで Pt 重量あたりの表面積は大きくなり, その結果 Pt 使用量を低減できる。しかし現行触媒の 1/10 程度まで Pt 使用量を低減させることが目標とされており, 微粒子化だけでこの目標を達成することは難しい。そこで近年, 異種金属添加による Pt 触媒の高活性化が検討されている。その代表例としてコア-シェル型触媒が挙げられる¹⁾。この触媒では, 粒子コア部分に直径 2 ~ 3nm 程度の金属粒子 (例えば, Pd, Au など) が使用され, その粒子表面に Pt が単原子層で析出されている。コア-シェル型触媒では粒子表面にのみ Pt が存在し, コア部の金属との化学的相互作用により Pt の触媒活性が向上するため, Pt 使用量低減に貢献できる。しかし PEFC カソード触媒では耐久性も要求される。PEFC では電解質として酸性の固体高分子 (通常はナフィオン) が利用され, カソード触媒はこの電解質と接触するため, 触媒は酸に対して耐性をもたなければならない。さらにカソード触媒は, 高い正電位, 酸素雰囲気, 高温 (80°C 程度) にさらされるため, この条件では金 (Au) 以外のすべての金属は金属カチオンとして溶解する。図 2 には PEFC で長時間使用した炭素担持 Pt カソード触媒の TEM 写真を示した。PEFC で使用する前の触媒と異なり (図 1), 使用後には直径 5 nm 以上の Pt 粒子が数多く存在する。炭素担体上を Pt 粒子が移動し, 粒子同士が接触するため, Pt 粒子径が増大する。また大きな Pt 粒子に比べ, 小さな粒子は熱力学的に不安定であるため, 小さな粒子表面からカチオン性 Pt 種が溶解し, それらが大きな粒子上に再析出することで粒子径が成長する。この Pt 粒子径の増大により, カソード触媒は失活する。現行の PEFC カソードでは触媒活性低下を考慮し

九州大学大学院 工学研究院

竹中 壮, 岸田昌浩

た量の Pt が用いられており, 触媒の耐久性が改善されれば, Pt 使用量を低減できる。

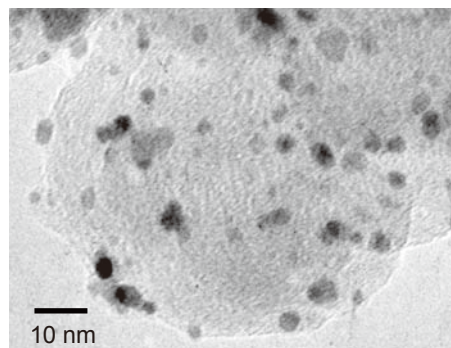


図 1 炭素担持 Pt 触媒の TEM 写真

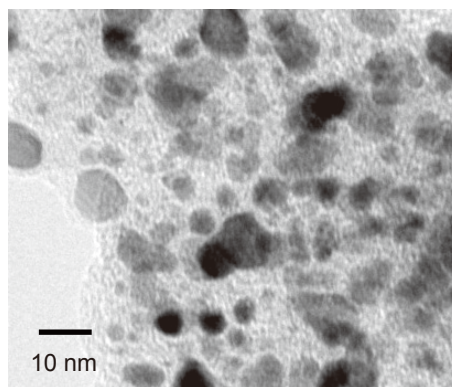


図 2 カソードで使用した炭素担持 Pt 触媒の TEM 写真

2. シリカでの被覆による炭素担持 Pt 触媒の耐久性向上

我々は炭素担持 Pt カソード触媒を厚さ数 nm のシリカ層で被覆することで, 触媒の耐久性向上に成功している²⁾。図 3 にはシリカ層で被覆されたカーボンナノチューブ担持 Pt 触媒 ($SiO_2/Pt/CNT$) の TEM 写真を示した。CNT 上に直径 2 ~ 3 nm 程度の Pt 粒子が担持されており, Pt 粒子と CNT が厚さ 2 nm 程度のシリカ層で被覆されていることが分かる。図 4 には Pt/CNT (シリカ未被覆) および $SiO_2/Pt/CNT$ の酸素還元活性を示した。図では Pt/CNT の初期活性を 1 とし, その他の触媒の比活性を示している。 $SiO_2/Pt/CNT$ は Pt/CNT と同程度の初期活性を示し (図中 fresh), 長時間使用しても $SiO_2/Pt/CNT$ の活性は高く保持されていることが分かる (図中 used)。図 5 には使用後の $SiO_2/Pt/CNT$ の TEM 写真を示した。シリカ層で被覆されていない Pt 触媒をカソードに使用すると Pt 粒子径は増大したが (図 2), $SiO_2/Pt/CNT$ では Pt 粒子径増大は確認できなかった。シリカ被覆 Pt 触媒では, Pt 粒子がシリカ層で被覆されているため, Pt 粒子同士が接触しない。またシリカ層で被覆された Pt 粒子表面からもカチオン性 Pt 種が溶解するが, それらがシリカ層外部に溶出せず, 元の Pt 粒子表面に再析出したと考えられる。これらの理由に

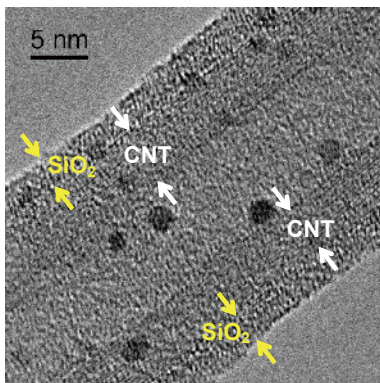
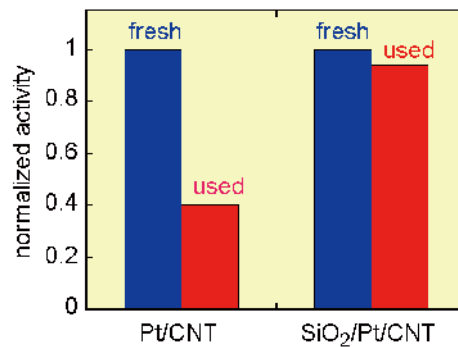
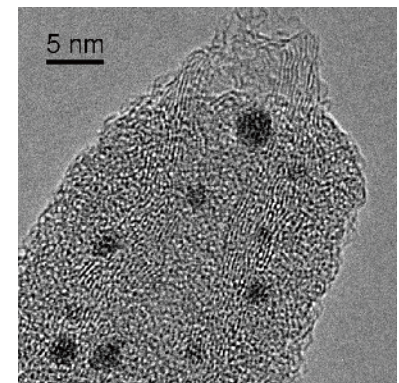
図3 SiO₂/Pt/CNTのTEM写真

図4 各 Pt カソード触媒の比活性

図5 カソードで使用した SiO₂/Pt/CNT の TEM 写真

より、シリカ被覆 Pt カソード触媒は優れた耐久性を示したと考えている。

3. さいごに

カソード触媒の低コスト化に向け、触媒の非 Pt 化は理想的である。しかしカソード条件でほとんどの金属種は溶解・溶出するため、カソード触媒の非 Pt 化は極めて困難である。一方我々が開発したシリカでの被覆法を応用すれば、カソードの非 Pt 化も達成できる。Pd は Pt の 1/4 程度の価格であり、高い酸素還元活性を示す。しかし Pd は Pt より安定性に劣るため、Pd をカソード触媒として利用できない。一方シリカでの被覆を応用すると、カソード条件での Pd の溶出も抑制できる³⁾。現在、カソード触媒の更なる低コスト化に向け、貴金属以外の金属種の利用を検討している。

謝辞

本研究は(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の支援により行われた。

参考文献

- 1) J. Zhang, et. al., J. Phys. Chem. B, 108, 10955-10964 (2004).
- 2) S. Takenaka, et. al., J. Phys. Chem. C, 111, 15133-15136 (2007).
- 3) S. Takenaka, et. al., Chem. Commun., 46, 8950-8952 (2010).

□ 特集5 ガスセンサとレアメタル □

長崎大学 大学院工学研究科

清水 康博

1. はじめに

民生用のガス漏れ警報器や産業用のガス保安管理システム等のガス検知素子として、ガスセンサが広く利用されている。これらのガスセンサには、その量は少ないが Pt や Pd などのレアメタルが使用されている。これらのレアメタルは、電極、リード線およびヒーター線として使用されるだけでなく、それらの超微粒子が増感剤として添加され、ガス応答特性等の性能を支配する重要な役割を担っている。

本稿では、種々のガスセンサの中で、接触燃焼式ガスセンサと半導体ガスセンサに絞って、レアメタルの役割を解説する。

2. 接触燃焼式ガスセンサ

主に Pt の超微粒子を担持したアルミナで Pt 線コイルを被覆した検知素子(図1(a)参照)が、室温以上の適切な温度に保持された状態で可燃性ガスを含む空気に曝されると、可燃性ガスの接触燃焼に伴う温度上昇により Pt 線コイルの抵抗値が増加する。接触燃焼式センサは、この抵抗値変化を利

用して被検ガスを検出する²⁾。通常、線径 10 ~ 20 μm でコイル巻数が 6 ターン程度の Pt 線コイルが用いられる。実際には、この検知素子と、貴金属触媒無担持のアルミナで Pt 線コイルを被覆した補償素子とでブリッジ回路を構成し、電気的出力信号を取り出している。その出力は可燃性ガス濃度に比例し、可燃性ガスの爆発下限濃度の 1/20 程度まで検出できる。

なお、大きなガス応答のためには、アルミナ担体の高比表面積化や担持触媒の高分散化による可燃性ガスの効率的な燃焼と、検知素子の小型化による熱容量の低下が重要である。また、担持する貴金属触媒を変えることにより、特定の可燃性ガスに対する応答特性を制御・調整できる。このタイプのセンサでは、次に述べる半導体ガスセンサに比べて、数~10wt% 程度の多量の Pt や Pd 等の貴金属触媒が担持されている。市販のセンサでは、10 年以上の長期安定性を賦与・保証するために、少量の添加剤等により貴金属担持アルミナの触媒材料が失活しないように材料設計が行われている。

3. 半導体ガスセンサ

金属酸化物半導体粉末の多孔質厚膜(図1(b)参照)または多孔質焼結体(図1(c)参照)からなる検知素子が、室温以上の適切な温度に保持された状態で可燃性ガスまたは酸化性ガスに曝されると、抵抗値の変化が起こる。半導体ガスセンサは、この抵抗値変化を利用して被検ガスを検出する。このタイプのセンサ素子で多孔質厚膜型の場合、絶縁体基板表面の楕形電極にPtが、また、基板背面のヒーターにPtまたはRuO₂ペースト³⁾等のレアメタルまたはその酸化物材料が使用されている。

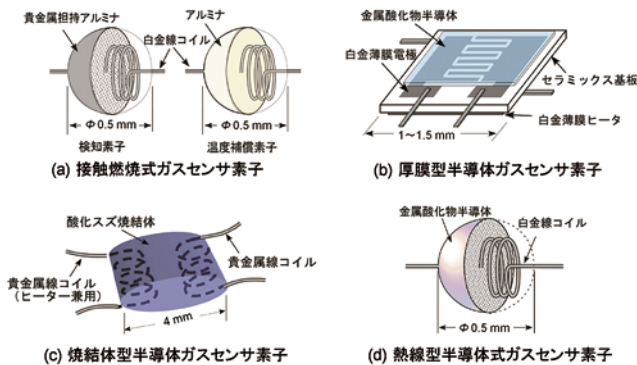


図1 各種ガスセンサ素子の構造¹⁾

もちろん、楕形電極材料には、レアメタルではないがAuも多用される。焼結体素子の場合には、コイル状貴金属電極が焼結体内部に直接埋め込まれており、それがヒーターとしても機能する。コイル状貴金属電極材料には、Ir-Pd合金線⁴⁾のレアメタルが使用されている。

このタイプのセンサ材料として、主にSnO₂やWO₃などのn型金属酸化物半導体を利用される。大気中の高温での試料調製段階等(活性化吸着過程)で、酸素分子がn型酸化物半導体粒子から電子を奪い、粒子表面に分子状または解離して負電荷吸着(化学吸着酸素種: O₂, O, O²⁻)している。

これは、n型酸化物半導体のフェルミレベルに比べて化学吸着酸素の表面準位が低いことに起因する。その結果、粒子

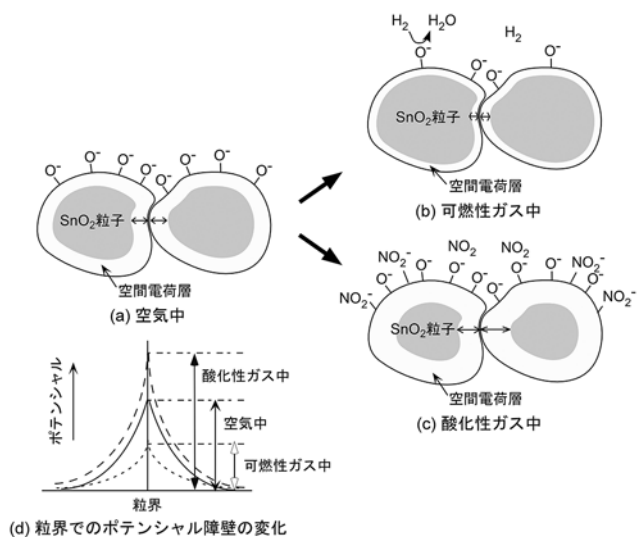


図2 半導体ガスセンサの粒界ポテンシャル障壁モデル

表面近傍の電子濃度は、粒子内部のバルクのそれに比べて低くなり、表面近傍に空間電荷層(空乏層)が形成され、高抵抗状態になっている。特に、部分焼結状態で作製されているセンサ素子内部では、粒子間の粒界またはネック部は完全に空間電荷層で占有され、粒子間に電子移動の障壁、すなわちポテンシャル障壁、が形成されている(図2参照)。センサ素子が可燃性ガスに曝されると、化学吸着酸素種が可燃性ガスとの反応で消費される。そのため、定常状態での化学吸着酸素種の被覆率が低下し、化学吸着酸素種にトラップされていた電子が金属酸化物半導体粒子に戻され、空間電荷層が薄くなる。その結果、粒子間のポテンシャル障壁が低下し、センサ素子の抵抗が空気中の値より低下する。一方、オゾンやNO₂などの酸化性ガスに曝されると、これらのガスが粒子表面に負電荷吸着して空間電荷層が厚くなり、ポテンシャル障壁が高くなるために、センサ素子の抵抗が空気中の値より増加する。このようなセンサ素子の抵抗変化を電気信号として取り出すことにより被検ガスの存在を検知し、その濃度を測定できる⁵⁾。

ちなみに、スパッタリング法で調製されたSnO₂膜の空气中、250℃での空間電荷層の厚さは、約3nmと計算されている⁶⁾。従って、センサ材料の金属酸化物半導体粒子の直径が10nm以下と超微細な場合には、作動温度の空气中で粒子全体が空間電荷層で占められている可能性がある。この場合には、可燃性ガス雰囲気中での粒子内部の空間電荷層の完全消失による大きな導電率変化に基づくガス検知モデル、すなわち超微粒子モデル⁷⁾または粒径制御モデル⁸⁾、が支配的であることを示す実験結果が得られている。

なお、このタイプのガスセンサでも、被検ガス、特に可燃性ガスに対する応答を大きくするために、金属酸化物半導体粒子表面にPtやPdなどのレアメタルが担持されている。ただし、その担持量は、通常、1wt%以下程度と、接触燃焼式センサの場合の担持量に比べて小さい。これらの担持貴金属の増感効果は、表1に示すように、可燃性ガスの化学吸着酸素との反応を促進する化学的増感作用の他に、電子的増感作用があることが実証されている⁹⁾。後者では、(i)担持貴金属の仕事関数と金属酸化物半導体の電子親和力との差に基づく金属酸化物半導体粒子から担持貴金属への電子移行、(ii)空气中での担持貴金属表面への化学吸着酸素の形成または表面の部分的な酸化層の形成による金属酸化物半導体粒子から担持貴金属へのさらなる電子移行のために、空气中での金属酸化物半導体粒子内の電子濃度が低下し、高抵抗状態になっている。この状態では、被検ガスと化学吸着酸素との反応で金属酸化物半導体粒子に戻される電子数が、貴金属担持前と例え同じでも、電子濃度の増加の割合が相対的に増えるので、ガス応答は増加する。また、担持貴金属表面の化学吸着酸素も反応で消費され、さらに貴金属表面の酸化層が還元されれば、ガス応答はさらに増加する。

このタイプのガスセンサ素子では、厚膜型でも焼結型でも感応部は内部の電極近傍なので、担持貴金属量を多くして、センサ材料表面での化学吸着酸素と可燃性ガスの反応性を高めすぎると、ガス応答値は逆に低下する。これは、センサ素

子表面部で可燃性ガスが燃焼消費され、内部まで到達する可燃性ガス量が減少するためであることが実証されている^{5,10)}。したがって、センサ材料の粒子表面での被検ガスの反応性と、多孔質センサ素子内部への被検ガスの拡散性の両因子のバランスの取れた材料設計が重要である。

表1 担持貴金属による増感効果の種類⁹⁾

種類	モデル図	貴金属の役割	センサ例
化学的増感作用		被検ガスの活性化 (触媒作用：反応性の促進)	Pt/SnO ₂
電子的増感作用		担持貴金属と半導体粒子間の電子移行 (空気中でのセンサ素子の高抵抗化)	Ag/SnO ₂ Pd/SnO ₂

4. ガスセンサ素子中のレアメタル使用量の低減

ガスセンサ素子に使用するレアメタル量を減らすためには、

- a) センサ素子のマイクロ化： センサ素子1個当たりの貴金属担持センサ材料の使用量の低減
- b) センサ材料である金属酸化物半導体の微粒化： 反応面積の増加による触媒活性の向上
- c) 異種金属酸化物の添加や異種金属イオンの置換固溶： 表面化学組成の制御による触媒活性の向上
- d) 異種金属イオンの置換固溶： 原子価制御法による金属酸化物半導体の電子濃度の最適化

等々の方法が考えられ、実際には、a) ~ d) を複合化した様々な検討が行われている。

具体例をいくつか紹介すると、まず、従来の接触燃焼式センサをマイクロマシン技術で小型化した吸着燃焼式マイクロガスセンサ(図3参照¹¹⁾)が挙げられる。このセンサは室温保持と設定測定温度とのパルス加熱サイクルの採用により、接触燃焼式センサにガス濃縮機能も賦与され高感度化を達

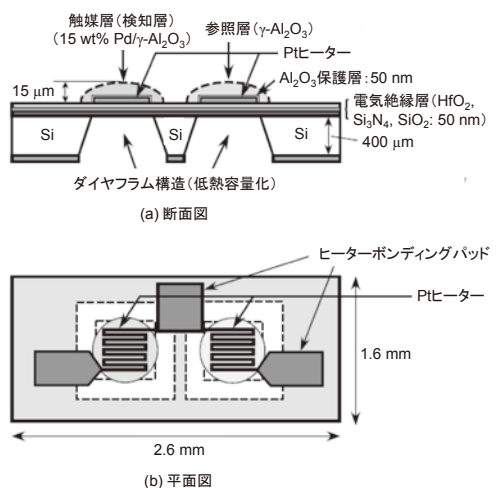
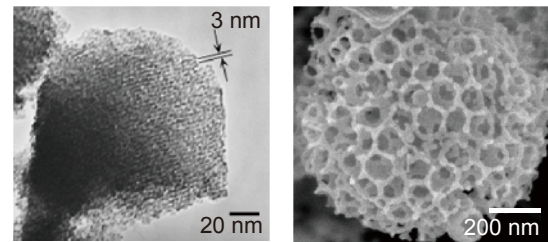


図3 吸着燃焼式マイクロガスセンサ¹¹⁾



(a) メソポーラスSnO₂ (b) マクロポーラスIn₂O₃

図4 メソ、マクロポーラス金属酸化物半導体粉末

成するとともに、過渡応答挙動からガス種の識別も可能にしている¹²⁾。

また、原子価制御法で低抵抗化したSnO₂やIn₂O₃の金属酸化物半導体で、Pt線コイルを覆った素子構造(図1(d)参照)の熱線式半導体型ガスセンサでも、焼結体型半導体ガスセンサ素子(図1(c)参照)に比べて、マイクロ化に成功している。なお、このタイプのセンサは、比較的低濃度の可燃性ガスに曝露されても金属酸化物半導体の抵抗が減少し、その結果、金属酸化物半導体とPt線コイルの合成抵抗も減少することを利用して被検ガスを検知している¹³⁾。さらに、長期間の経時安定性の観点からも、貴金属担持量の低減の検討も行われている。

センサ材料の高比表面積化については、調製条件の最適化により、10 nm以下のSnO₂超微粒子が調製できる⁸⁾。このような粒径自体の微細化以外にも、界面活性剤をテンプレートに用いて、SnO₂粒子内部にメソ細孔を導入(図4(a)参照)することにより、空气中、600℃、5 hの焼成後でも、300 m²/g以上の高比表面積を維持することが可能である¹⁴⁾。ただし、焼成段階での結晶子成長を抑制し、高比表面積を維持するためには、焼成前の試料粉末をリン酸で処理することが不可欠である。このような高比表面積のSnO₂粉末をセンサ材料に用いることで、ガス応答の向上が実現できる。また、ポリメチルメタクリレート球状粒子をテンプレートに用い、このテンプレートを含む金属酸化物前駆体溶液の噴霧熱分解法¹⁵⁾により、マクロ細孔を有するかご型金属酸化物半導体粒子も調製できる(図4(b)参照)。なお、センサ材料の粒子内部へのマクロ細孔の導入は、ガス応答の大きさを向上させるだけではなく、応答・回復速度の改善にも有効である。

5. おわりに

現時点では、接触燃焼式ガスセンサと半導体ガスセンサのどちらも、PtやPdなどのレアメタルが使用されている。空气中、高温で、雑ガスを含む過酷な作動環境を考えると、電極材料、リード線およびヒーター線に関しては、適切な代替材料が無いのが現状である。しかし、増感剤として使用されている担持貴金属については、必要なガス応答値やガス選択性を実現するための代替手法開発の余地はあり、現実に精力的な検討が行われている。今後、筆者も含めて、多くのセンサ技術者・研究者の研究の益々の進展により、センサ技術が快適で安全・安心な社会システムの構築に貢献できることを願っている。

参考文献

- 1) 新コスモス電機(株) ガス検知警報装置総合カタログ (http://www.new-cosmos.co.jp/infor/index_3.html), p.39.
- 2) 江頭 誠, 接触燃焼式センサ, センサ実用便覧, 清山哲郎監修, フジテクノシステム(1986) pp.61-71.
- 3) 兼安一成, 自動車用ガスセンサ, 月刊Material Stage, 9 (1), 46-48 (2009).
- 4) 松浦吉展, 酸化半導体ガスセンサの高性能化に関する研究ならびにその実用化による新領域開拓, Chemical Sensors, 17 (2), 42-48 (2001).
- 5) Y. Shimizu, M. Egashira, Basic Aspects and Challenges of Semiconductor Gas Sensors, MRS Bulletin, 24 (6), 18-24 (1999).
- 6) H. Ogawa, M. Nishikawa, A. Abe, Hall Measurement Studies and an Electrical Conduction Model of Tin Oxide Ultrafine Particles Films, J. Appl. Phys., 53 (6), 4448-4455 (1982).
- 7) M. Ippommatsu, H. Ohnishi, H. Sasaki, T. Matsumoto, Study on the Sensing Mechanism of Tin Oxide Flammable Gas Sensors Using the Hall Effect, J. Appl. Phys., 69 (12), 8368-8374 (1991).
- 8) C. Xu, J. Tamaki, N. Miura, N. Yamazoe, Grain Size Effects on Gas Sensitivity of Porous SnO₂-based Elements, Sens. Actuators, B3 (2), 147-155 (1991).
- 9) N. Yamazoe, N. Miura, Some Basic Aspects of Semiconductor Gas Sensors, in Chemical Sensors Technology, Vol. 4, Ed. by S. Yamauchi, Kodansha-Elsevier (1992) p.19-42.
- 10) Y. Shimizu, Y. Nakamura, M. Egashira, Effects of Diffusivity of Hydrogen and Oxygen through Pores of Thick Film SnO₂-based Sensors on Their Sensing Properties, Sens. Actuators B, 13/14 (1-3), 128-131 (1993).
- 11) 江頭 誠, 笹原隆彦, 吸着燃焼式マイクロガスセンサ, マテリアルインテグレーション, 21 (5), 87-92 (2008).
- 12) T. Sasahara, A. Kido, T. Sunayama, S. Uematsu, M. Egashira, Identification and Quantification of Alcohol by a Micro Gas Sensor based on Adsorption and Combustion, Sens. Actuators B, 99 (2-3), 532-538 (2004).
- 13) 皆超知世, 前川 亨, 鈴木健吾, 野村勝裕, 蔭山博之, 半導体式ガスセンサの信頼性の向上, マテリアルインテグレーション, 21 (5), 37-42 (2008).
- 14) T. Hyodo, N. Nishida, Y. Shimizu, M. Egashira, Preparation and Gas-Sensing Properties of Thermally Stable Mesoporous SnO₂, Sens. Actuators B, 83 (1-3), 209-215 (2002).
- 15) K. Hieda, T. Hyodo, Y. Shimizu, M. Egashira, Preparation of Porous Tin Dioxide Power by Ultrasonic Spray Pyrolysis and Their Application to Sensor Materials, Sens. Actuators B, 133 (1), 144-150 (2008).

□ 特集6 レアアースを含むガラス □

京都大学大学院人間・環境学研究科

相間環境学専攻 物質機能相関論分野 田部 勢津久

子切断波長変換材料に的を絞って例に取り上げ、4f 電子エネルギー準位を利用した光学遷移が機能発現にどう生かされているかを紹介してみたい。

1. はじめに

レアアースは周期表 IIIB 族を構成する Sc, Y と第 6 周期の La に始まる 15 種類のランタニド元素からなるが, Sc と Pm を除くいずれの元素も種々の機能性ガラス材料の重要な構成元素であり, その役割は元素毎に個性的かつ様々である。ガラス形成能と分極率に優れる La₂O₃ 高含有低分散高屈折率レンズや Y₂O₃ を含み高強度を実現したハードディスク基板ガラスなど, 主成分として用いられる例も少なくないが, 多くの光機能性ガラスにおいてはランタニドが微量添加発光中心元素として利用され, それらイオンの内殻 4f 電子の関与する蛍光を利用した波長変換ファイバ¹⁾, 固体照明²⁾ など広い分野で材料開発が進んでいる。固体レーザー³⁾ や通信用光ファイバ増幅器⁴⁻⁶⁾ の様な誘導放出を利用したものも例外ではない。最近では入射光子の 2 倍数の光子を生成する量子切断蛍光を太陽光発電の効率向上に利用しようという研究も盛んになりつつあり⁷⁾, その応用分野はますます広がりを見せている。4f 電子軌道は 7 つあるために, ランタニドは 3 価イオンに限っても原子番号に応じて 13 種類の多彩なエネルギー準位を有する。本稿は, 機能, 材料例も多岐にわたるレアアース含有ガラスの紹介文であるが, 今回は光ファイバ増幅器と量

2. 希土類光ファイバ増幅器

2.1. 波長多重通信 (WDM) における増幅器

光ファイバの低損失化と分散制御が完成した 80 年代の第 2 世代光通信波長は 1.55 μ m であり, Er³⁺ 添加光ファイバ増幅器 (EDFA) が 90 年代に通信能力を飛躍的に向上させた。今後, 波長多重方式による容量増大を計るためにも, 波長領域の拡大は必須である。図 1 は通信用光ファイバの近赤外域損失スペクトルにランタニドイオンの発光波長域を重ね書きしたものである⁶⁾ であるが, 希土類ドープファイバでアンプを構成する限り, 候補となる元素は右図にあるものに絞られてくる。適切な波長のレーザーダイオード (LD) が開発され, かつシリカをホストとできるが故に開発直後に大成功を収めたエルビウム (Er³⁺) とは異なり, 多くの元素はエネルギー準位の特質から, 高い増幅利得を実現するためにシリカ以外のガラスをホストとする必要がある。

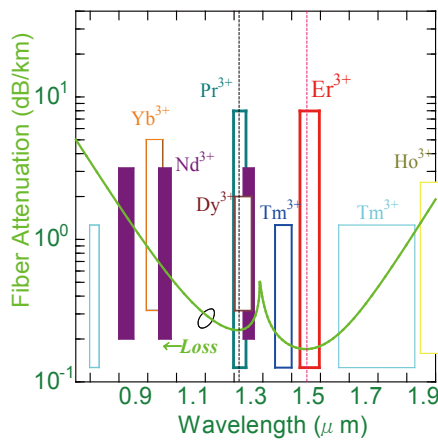


図1 光ファイバの損失スペクトルとランタニドの光増幅遷移波長

2.2.1. 3μm 帯プラセオジウム：PDFA

当初シングルモード光ファイバのゼロ分散波長は 1.3μm であったため、第一世代通信波長でもあり、この波長域は現在 WDM の帯域の中で、O バンドと呼ばれる。90 年代までは Nd³⁺ や Dy³⁺ イオンも研究されたが、励起状態吸収 (ESA) や多フォノン緩和 (MPR) による損失が回避できないことがわかってきて、Pr³⁺ イオンがこの波長域で唯一の実用化アンプの構成元素で高性能化の可能性が有力な候補である。2 つの欠点は光増幅始準位である ¹G₄ の下準位 ³F₄ とのエネルギーギャップ ΔE が 3300cm⁻¹ しかないために、フッ化物など低フォノンエネルギーホストでしか発光が観測しにくい、また ¹G₄ より上に適切な励起可能な準位がなく、かつ ¹G₄ への吸収遷移断面積が極めて小さく、適切な LD が存在しないために、パワー変換効率が低いことである。後者の欠点はファイバ長を長くして、また LD 励起 Nd³⁺ 固体レーザーを光源とすることによりカバーされている。

3. 高効率太陽光発電のための量子切断蛍光体

3.1. その意義

温暖化ガス削減が叫ばれる中、太陽光発電の高効率化の重要性について、議論の余地はなからう。新材料として、CdTe 系、CuInGaSe 系、またバンドギャップ (E_g) の異なる III-V 族

半導体の多接合型デバイスの開発が進んでいる。今後、高効率化は進むであろうが依然、実用段階での最も高い変換効率 (~ 25%) と普及率を誇っているのは結晶シリコン (c-Si) 系であり、他の材料系と比べ、総合的優位は続くものと考えられる。c-Si の E_g は 1.1eV であり、分光感度は波長約 1μm で最大となる。太陽光スペクトルのピークは 0.5μm 付近であるが、E_g より遙かに高エネルギーの光子の入射は熱損失の原因になる。Shockley-Queisser の予測⁷⁾によれば、c-Si に限らず単接合型太陽電池の変換効率の理論的限界は 30% であり、これ以上の高効率化は望めない。ところが、もし波長 0.5μm 以下の成分を効率よく吸収して、量子切断により 2 倍数の 1μm フォトンに変換できれば、c-Si 太陽電池の光電変換効率を 1.3 倍高めることができるはずである。

Yb³⁺ イオンは 4f¹³ 電子配置 (ホールが 1 つ) であるため、励起準位が 1 つしかないため、0.9μm 以下の波長では完全に透明であり、Yb³⁺ レーザがそうである様に、本質的に高効率な 1μm 発光を示す。我々は太陽光の 0.5μm 以下の高エネルギー光子を吸収し、1μm に変換する材料の開発を行っており⁸⁾、その一部を紹介する。

3.2. Pr-Yb 共添加ガラス

Pr³⁺ イオンは波長 590nm に弱い吸収帯 (¹D₂ 準位) と 430 ~ 490nm の波長範囲により強い吸収帯 (主に ³P_{2, 1, 0} 準位) を有する (図 3 参照)。同ホストに Yb³⁺ を共添加すると両準位はいずれも励起ドナーとなり、1μm 発光が観測される。

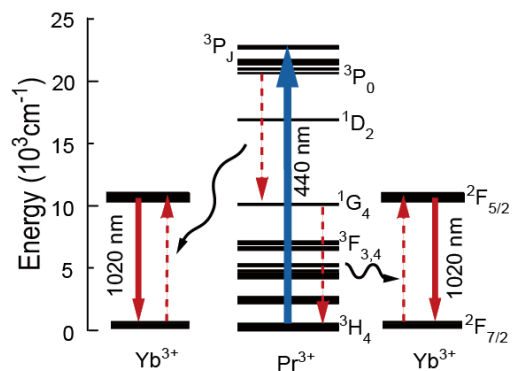


図3 Pr³⁺, Yb³⁺ のエネルギー準位と量子切断機構

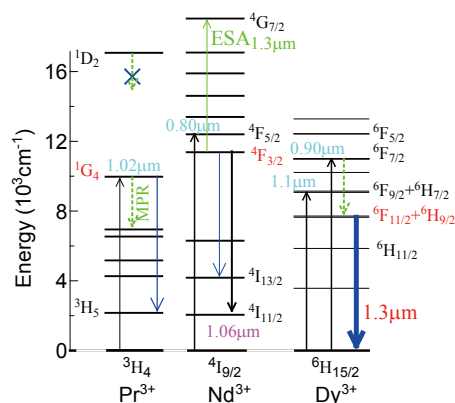


図2 1.3μm 帯光増幅元素である Pr³⁺, Nd³⁺, Dy³⁺ イオンのエネルギー準位

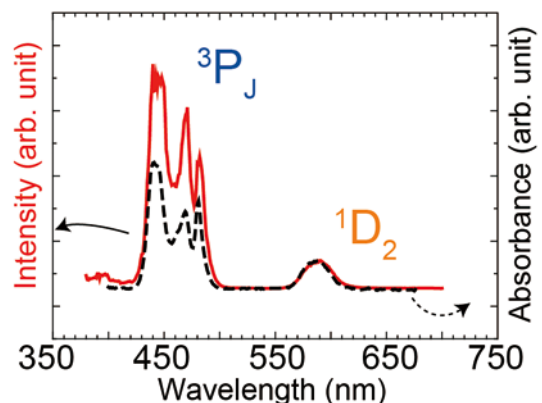


図4 可視域での Pr³⁺ 吸収と Yb³⁺ 励起スペクトル

図4に共添加ガラスの可視域の吸収スペクトルと $\text{Yb}^{3+}:\text{1}\mu\text{m}$ 発光の励起スペクトルの比較を示す⁹⁾。吸収係数の違い以上に短波長側の $\text{Pr}^{3+}:\text{3P}_1$ 帯が 1D_2 帯よりも1.6倍高い励起効率を持っていることがわかる。 Pr^{3+} イオンが中間の $10,000\text{cm}^{-1}$ に 1G_4 準位を有しているために、青色励起の後、2段階的に、 $\text{3P}_0 \rightarrow \text{1G}_4$ と $\text{1G}_4 \rightarrow \text{3H}_4$ という2段階の遷移により共鳴エネルギー移動を2つの Yb^{3+} イオンに対して起こし、量子切断による $1\mu\text{m}$ 発光が観測されるということである。

4. おわりに

レアアースの有する各種機能や物性は、ガラスに限らず多くの材料において欠くことができず、それらは基幹材料として活用されている。安価な元素だけからなる代替材料を探す研究も必要であるが、レアアースの高い機能を考えると「言うは易し」というのが現状である。

参考文献

- 1) 田部勢津久: 平尾一之, 虎溪久良: 固体物理 27[3] (1992) 186-196.
- 2) 田部勢津久: 応用物理 79[1] (2010) 54-58.
- 3) 例えば, 「希土類の機能と応用」(足立吟也監修, シーエムシー出版, 2006) 第3章: 光機能分野への応用.
- 4) S.Tanabe: "Advances in Photonic Materials and Devices", (The Am. Ceram. Soc., 2005) pp.1-16.
- 5) 田部勢津久: 希土類 41, (2002) pp.1-10.
- 6) S. Tanabe: C.R.Chimie 5, (2002) 815-824.
- 7) W.Shockley, H.J.Queisser: J.Appl.Phys. 32, (1961) 510-515.
- 8) 田部勢津久, 上田純平: マテリアルインテグレーション 23[1], (2010) 34-39.
- 9) Y.Katayama, S.Tanabe: Materials 3[4], (2010) 2405-2411.

□ 特集7 ガラス用鏡面研磨材酸化セリウムの使用量低減技術 □

立命館大学 理工学部

谷 泰弘, 村田順二

1. はじめに

ガラスの鏡面研磨材である酸化セリウムは、優れた研磨特性が得られる一方、希土類金属の酸化物の一つであり、その供給量の90%以上を中国が占める供給リスクの高い材料である。中国のレアアース輸出制限を受け、2010年の中頃から酸化セリウム研磨材の価格が高騰しており、ガラス研磨における酸化セリウム研磨材の使用量低減技術が強く要望されている。このような状況を受け、立命館大学は(株)アドマテックス、(株)クリスタル光学、九重電気(株)の3機関とコンソーシアムを形成し、経済産業省の「希少金属代替材料開発プロジェクト」に参画し、鏡面研磨における酸化セリウムの使用量を低減する研究開発を遂行している。本稿ではこの研究プロジェクトの一端を紹介する。

2. 酸化セリウム使用量低減の研究戦略

本プロジェクトでは砥粒(研磨材粒子)の滞留性(動きにくさ)に着目し、それを改善した高付加価値研磨技術の開発を行っている。砥粒の滞留性が向上すれば、ガラス工作物表面に作用する砥粒の数が増加するため、研磨能率の向上や仕上げ面粗さの改善が可能となる。また、工作物と砥粒の相対速度が向上するため、これによっても研磨能率の向上が見込める。研磨能率の向上により短い研磨時間で所望の仕上げ面が得られるため、砥粒の使用量を低減することができる。上記の研究戦略のもと、現在、大きく分けて①複合砥粒の研究開発、②複合粒子研磨法の適用、③高機能研磨パッドの開発、④新プロセス技術の4つの研究開発テーマを遂行している。①では酸化セリウムより比重の軽いコアシェル構造の複合砥粒を開発し、砥粒の滞留性と分散性を高め、加工圧を集中させることで研磨能率の向上を図っている。②では加工域に4

種類の固体が存在する4BODY研磨の適用で解空間を増加させ、研磨能率と仕上げ面粗さをともに向上できないというトレードオフの関係を打破し、研磨特性を向上させることを検討している。③では、研磨パッド材質の最適化による研磨特性の向上を、④では化学複合研磨による代替砥粒を開発している。本稿では、プロジェクトの研究成果の一部として、エポキシ樹脂研磨パッドと酸化ジルコニウム系代替砥粒について紹介する。

3. 多孔質エポキシ樹脂研磨パッドによる使用量低減

研磨パッドは砥粒を保持し、工作物表面に作用させる工具であり、遊離砥粒研磨の研磨特性を左右する重要な要素の一つである。現在、主流となっているのはポリウレタン樹脂を用いた研磨パッドである。著者らは研磨パッドの材質を見直すことで砥粒の滞留性改善を図り、様々な樹脂の中からエポキシ樹脂が研磨特性の向上に有効であることを見出した。そこで、図1に示すようなエポキシ樹脂を採用した多孔質研磨パッド(エポキシパッド)を開発した。一般にエポキシ樹脂は

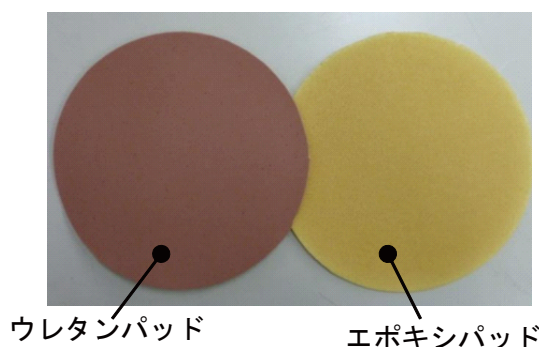


図1 研磨パッドの外観

ウレタン樹脂に比べ硬くて脆い性質を示すが、樹脂の種類や製造条件の検討によりウレタン樹脂並の硬度や柔軟性を持つエポキシ樹脂研磨パッドの製造が可能となっている。開発したエポキシパッドを用いて酸化セリウム砥粒によるソーダガラスの研磨特性を評価したものが図2である。同硬度のウレタンパッドと研磨特性を比較すると、硬度 (JIS-A) 78 と 90 のパッドのいずれの場合も、エポキシパッドにより 1.5~2 倍程度の研磨能率が得られた。また、ウレタンパッドよりも優れた仕上げ面粗さが得られることがわかった。

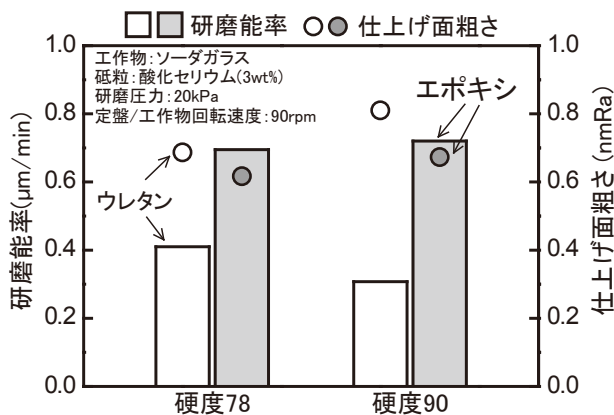


図2 ウレタンパッドとエポキシパッドの研磨特性の比較

上記のエポキシパッドによる高い研磨特性の要因を調査するため、研磨パッド上における砥粒の滞留性を評価した。図3に示すようにスラリーを滴下した研磨パッドの傾斜角を変化させて、スラリーが滑り落ちる時の角度(滑落角)を測定した。ウレタンパッド上では約 30° の傾斜でスラリーが滑落したのに対し、エポキシパッドでは 90° 近くまでスラリーを保持することがわかった。上記のように、エポキシパッド上ではウレタンパッドに比べ砥粒の滞留性が改善されることが示されており、これがエポキシパッドにより研磨特性が向上する要因であると言える。

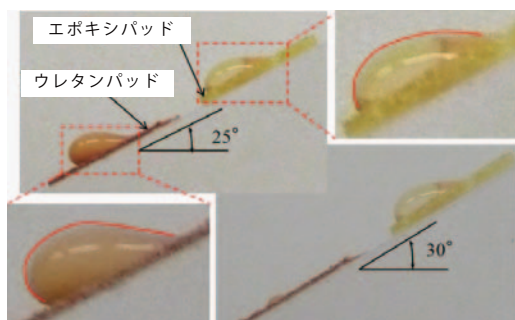


図3 研磨パッド上におけるスラリー滑落角の測定

エポキシパッドによる砥粒の滞留性改善効果は、酸化セリウム以外の砥粒にも有効である。エポキシパッドと代替砥粒の組み合わせにより、ウレタンパッドと酸化セリウムを用いた従来研磨と同等以上の研磨能率が達成できれば、酸化セリウムを完全に代替することが可能である。そこで、エポキシパッドを用いて各種酸化物砥粒による研磨特性の評価を行ったも

のが図4である。いずれの砥粒を使用しても、エポキシパッドによりウレタンパッドを上回る研磨能率が得られた。特に、市販の酸化ジルコニウム砥粒を用いた場合、ウレタンパッドと比較してエポキシパッド使用時に約 4 倍の研磨能率が得られた。またウレタンパッドと酸化セリウム砥粒を使用した従来研磨に比べて、研磨能率が 7 割程度向上する結果が得られた。酸化ジルコニウム砥粒とエポキシパッドにより研磨した仕上げ面粗さは従来研磨と同等であり、これにより酸化セリウムの完全な代替を実現した。この多孔質エポキシパッドは 2012 年 4 月から九重電気(株)より市販を開始している。

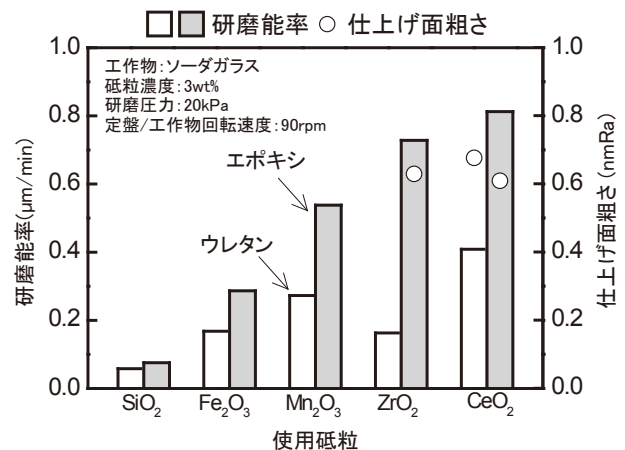


図4 エポキシパッドによる代替砥粒の研磨特性

4. 酸化ジルコニウムによる酸化セリウム代替の検討

エポキシパッドはスラリーの保持力が高く、砥粒の滞留性を改善することができた。一方、砥粒そのものを改良し滞留性を向上すれば、いかなる研磨パッド上でも研磨特性の向上が期待できる。そこで、滞留性を改善した酸化ジルコニウム砥粒を開発し、酸化セリウムの代替を図った。

酸化ジルコニウム砥粒の滞留性を高める手段の一つとして、砥粒をスラリー中において凝集させる化学液の添加を検討した。酸化ジルコニウム(比重:5)は酸化セリウム(比重:7)よりも比重が小さいため滞留性が悪いが、砥粒を凝集させることによってスラリー中での沈降速度が高まり、滞留性が向上すると考えた。酸化ジルコニウムのゼータ電位を評価した結果、等電点となる pH はおよそ 5 であった。そこで、スラリーの pH が 5 付近となる添加剤を検討し、研磨特性を調べたものが図5である。酸化ジルコニウムのみでは、酸化セリウムと比較して研磨特性が劣るが、ガラスに対する腐食性の小さい硫酸第一鉄を添加することで研磨能率が向上することがわかった。この酸化ジルコニウム砥粒は酸化セリウムの研磨能率には及ばないものの、10分研磨後の表面粗さは酸化セリウムよりも優れており、代替砥粒としての可能性が示された。

滞留性を改善するもう一つの方法が、砥粒の転動を抑制する高比重粒子の添加である。比重の高い粒子が障害物となることで、酸化ジルコニウム砥粒が動きにくくなり滞留性が改善される。様々な添加物粒子が酸化ジルコニウム砥粒の研磨特性に与える影響を調べたものが図6である。酸化ジルコ

ニウム 3wt% に対し、比重が 7 程度の酸化タンゲステンを 1wt% の濃度で添加した結果、研磨特性が向上し酸化セリウムと遜色ない研磨特性を達成した。酸化タンゲステンそのものはガラスの研磨作用が極めて小さいため、酸化ジルコニウム砥粒の滞留性を改善することに寄与したと考えられる。

図 5 と図 6 の効果は独立に作用するため、相乗効果で酸化セリウムと研磨特性が同等か優れる酸化ジルコニウム代替砥粒が実現可能である。また、酸化ジルコニウムは洗浄性が優れるため、この点において酸化セリウムに対し優位性があると言える。この酸化ジルコニウム砥粒は近々の商品化を目指している。

5. おわりに

本稿では、著者らが国家プロジェクトとして取り組んでいる「鏡面研磨用酸化セリウムの使用量低減技術」の成果の一部を紹介した。エポキシ樹脂研磨パッドはガラスだけでなくシリコン基板など他材料の研磨においても高い研磨特性を発揮することがわかっている。また、滞留性を改善した砥粒は粗研磨（ラッピング）への応用も可能であり、本プロジェクトで開発した技術は、遊離砥粒研磨技術の高付加価値化に貢献できるものと期待される。

謝辞

本研究は、経済産業省 / 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の希少金属代替材料開発プロジェクトの援助を受けて行われました。ここに深く謝意を表します。

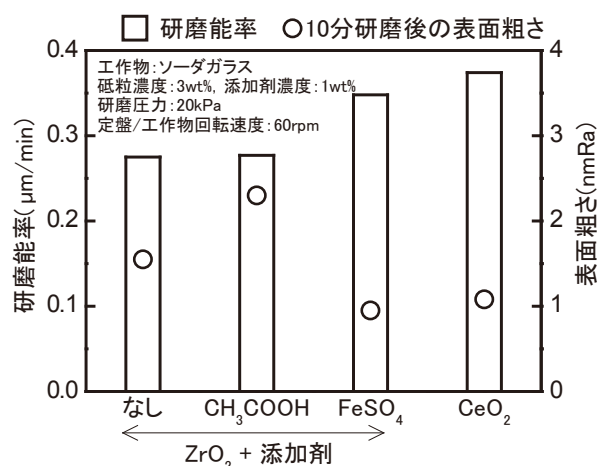


図 5 化学液添加による酸化ジルコニウム砥粒の研磨特性

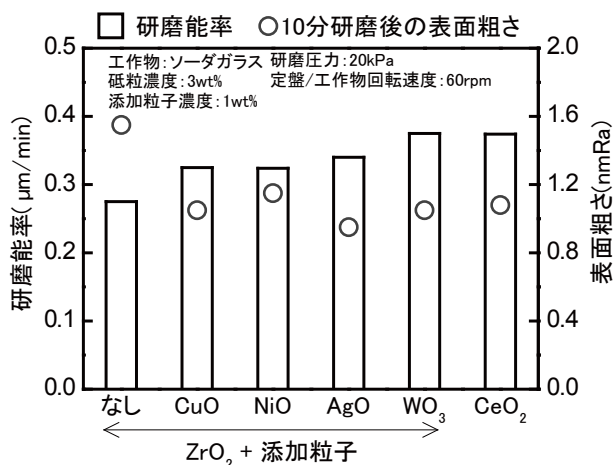


図 6 高比重粒子添加による酸化ジルコニウム砥粒の研磨特性

□ 特集 8 希土類蛍光体 □

新潟大学大学院 自然科学研究科

戸田健司

1. はじめに

ルミネセンスとは、物質中の電子が基底状態から励起状態に遷移して再び基底状態に戻る時に受け取ったエネルギーをある波長の光として放出する発光現象である。このルミネセンスの原理に基づき、発光する粉末や薄膜材料を蛍光体という。化学的な安定性から実用蛍光体としては、主として無機蛍光体が利用されている。一般的な無機蛍光体は、母体結晶と呼ばれる物質に発光イオンを微量に添加することにより作られる。例えば、蛍光灯に用いられている赤色蛍光体である $Y_2O_3:Eu^{3+}$ を例に挙げると、コロンの (:) の左側に書かれた Y_2O_3 が母体結晶であり、右側の Eu^{3+} が発光イオンとして母体結晶の構造に添加されていることを表している。母体結晶に微量の発光イオン（賦活剤や発光中心と呼ばれることもある）を固溶させ、それぞれの組成や種類を変えることにより様々な光が得られる。発光イオンを導入する理由は、励起エネルギーを空間的に閉じ込める働きにより発光を効率的にするためである。言い換えるならば、半導体に見られる量子井戸や量子ドットのような量子構造を、発光イオンの電子軌道

に担わせているということである。

蛍光体の発光イオンとして希土類がよく用いられるのは、図 1 に示すように発光に関わる 4f 電子軌道が比較的原子核に近い位置にあり、エネルギーの高い励起状態でも電子雲が容易に広がらないために、熱によりエネルギーを失いにくく高い発光効率を示すことができるためである。一方で、許容遷移である 5d - 4f 遷移で発光する Ce^{3+} や Eu^{2+} イオンでは、外殻軌道である 5d 軌道の準位が結晶場により影響を受けるために、母体結晶に依存して発光波長が変化すると共に発光スペクトルも幅広くなる。一般的に発光イオンが存在する母体結晶のサイトが小さくなれば、結晶場の影響が強まることにより 5d 軌道の分裂が大きくなり、基底状態と励起状態間のエネルギー差が小さくなるために発光波長は低エネルギー側すなわち長波長にシフトする。すなわち、希土類イオンは、結晶場の制御すなわち母体結晶の構造変化により必要に応じて発光波長を変化させ、またそのスペクトル幅を自在に設計できるという点で、まさに蛍光体の発光イオンとして最適な元素群である。

ただし、希土類には供給に関する問題がある。最近の中国による希土類輸出の制限から、価格が高騰している。Yが33 ppm, Laが30 ppm, Ceが60 ppm(例えばZnが70 ppm, Pbが12.5 ppm)という地殻中の存在量が希少ではないという事実より、現在休業中の鉱山の再開や新鉱山の開発により希土類問題はなくなるという楽観論も多い。しかし、蛍光体に使用される中重希土類のEuやTbイオンはイオン吸着鉱という形で中国南部に偏在している。ベトナムで新しい鉱床を探索する試みも行われているが、当面は中国からの供給に頼らざるを得ない。中国政府の希土類政策が不透明な事もあり、希土類フリー蛍光体の開発は依然として重要なテーマである。

無機蛍光体における励起源は非常に多種多様であり、同じ無機蛍光体であっても、用途により材料の選択および設計の指針は大きく異なる。本稿では、実用の無機蛍光体を中心に、それぞれの応用用途において使用されている材料について基本的な解説を行う。

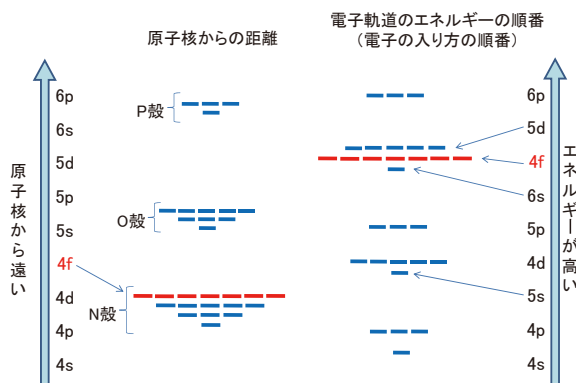


図1 希土類の電子軌道

2. 電子線励起用蛍光体 (CRT, FED, FEL)

CRTディスプレイ用蛍光体は、20 keV以上のエネルギーを持った電子線により励起される。そのため、CRTディスプレイ用蛍光体は帯電せず長時間安定に発光することが要求される。母体結晶としては硫化物または酸硫化物が用いられ、赤色蛍光体として $Y_2O_3:Eu^{3+}$ が利用されている。CRTディスプレイ用蛍光体への電子の侵入深さは μm のオーダーであるので、蛍光体表面での帯電および劣化を抑制するためメタルバックと言われる金属膜被覆を行っている。これに対して、薄型のフィールドエミッションディスプレイ(FED)では、数kV以下にまで加速電圧を低くする方向にあり、電子線は蛍光体の内部まで侵入できない。そのため、FEDではメタルバックの技術を使用できない。また、FEDにおける電流密度はCRTよりも高くなるので、蛍光体の劣化がCRTよりも発生しやすくなっている。CRTで用いられていた硫化物系の蛍光体は、高密度電子線の照射で分解し、飛散した硫黄がカソードを被毒することも問題となっている。そのため、 $Y_2SiO_5:Ce^{3+}$ (青)のような酸化物蛍光体が評価されているが、やはり劣化が顕著である。

ブラウン管テレビ(CRT)およびFEDはビジネスとして、すでに過去のものとなりつつあるが、最近では電子放出源とし

て炭素系材料の特性向上が著しく、蛍光体と組み合わせたフィールドエミッションランプ(FEL)として特殊照明分野への展開が図られている。最新のFELでは、高加速電圧と高電流密度という過酷な励起条件の下で安定な材料が要求されており、重要な研究課題となっている。

3. 真空紫外線励起用蛍光体 (PDP)

他に母体励起を利用する蛍光体としては、PDP用蛍光体がある。PDPでは、XeとNeの混合気体の放電により紫外線を発生させ、この紫外線が蛍光体を光らせて表示する。Xe放電では、147 nm (8.4 eV) および 173 nm (7.2 eV) の真空紫外線が放出される。このエネルギーは、一般的な酸化物のバンドギャップよりも大きく、蛍光体は母体結晶の吸収を経由して発光することになる。蛍光体としては、真空紫外線を効率的に吸収できる(Y,Gd)BO₃:Eu³⁺(赤)・Zn₂SiO₄:Mn²⁺(緑)・BaMgAl₁₀O₁₇:Eu²⁺(青)が用いられている。3D表示PDPでは、左眼のデータと右眼のデータを交互に表示する必要がある。液晶ディスプレイ(LCD)より表示が速く、自発光で明るいことからPDPの方が3D表示に適している。従来使用されていたZn₂SiO₄:Mn²⁺(緑)は残光が長いので、残光が短いY₃Al₅O₁₂:Ce³⁺(YAG:Ce)系の蛍光体が用いられている。

4. 紫外線励起用蛍光体 (FL)

水銀を 10^{-2} mmHg程度の蒸気圧で放電させると、効率的な254 nm(および185 nm)の紫外線を発する。この紫外線を蛍光体により可視光に変換することが蛍光灯の原理である。蛍光灯における蛍光体に最も必要な特性は、254 nmの紫外線を吸収して効率よく可視光を発光することである。また、放電空間にさらされるために、化学的に安定な物質でなければならない。酸化物系の材料が用いられている。

古くから利用されている代表的な蛍光体は、Sb³⁺およびMn²⁺を付活したハロリン酸カルシウム $3Ca_3(PO_4)_2 \cdot Ca(F,Cl)_2$ である。この蛍光体においてSb³⁺は480 nm付近の青緑の発光を示し、Mn²⁺は橙色の領域に発光を示す。Sb/MnおよびF/Cl比を変えることにより、一つの蛍光体で青白い白色から暖かみのある白色までの連続的な色の発光を得ることができる一方で、赤色領域の光が不足しているので色を正確に再現するという演色性が低い。そのため、現在では三原色の希土類蛍光体を用いた三波長型蛍光灯に切り替わってきている。発光の半値幅の狭い希土類を利用する三原色蛍光体を組み合わせることで、良好な演色性を保ちながら視神経における色を感じる三原色の錐体細胞を強く刺激し、明るく感じる白色光を実現できる。使用されている材料としては、BaMgAl₁₀O₁₇:Eu²⁺(青)、LaPO₄:Ce³⁺,Tb³⁺(緑)、Y₂O₃:Eu³⁺(赤)やその改良型の蛍光体がある。

5. 可視光励起用蛍光体 (長残光蛍光体, 白色LED)

長残光蛍光体(いわゆる夜光塗料)や白色LED用蛍光体は、可視光によって励起できなければならない。そのため、5d-4f遷移で発光するEu²⁺やCe³⁺のような発光イオンを用いる。

図2に Eu^{2+} と Ce^{3+} のエネルギー準位を示す。外殻軌道である 5d 軌道の準位が強い結晶場により分裂すると、基底状態と励起状態の間のエネルギー差は小さくなり、励起バンドを長波長側に移動できる。 Ce^{3+} では基底状態の分裂も見られるため、長波長で発光させるほど発光のスペクトル幅が広がる。そのため、幅広い波長領域をカバーする必要がある照明用途の蛍光体において、 Ce^{3+} の発光は有用である。一般的に、同一の結晶母体中では Ce^{3+} の発光は Eu^{2+} より短波長になるため、青色光励起による赤色発光蛍光体のような長波長の発光を得るためには Eu^{2+} が用いられる。蛍光体の母体としては、共有結合性の強いケイ酸塩、アルミン酸塩、リン酸塩のような酸化物や、窒化物(酸窒化物)が用いられることが多い。

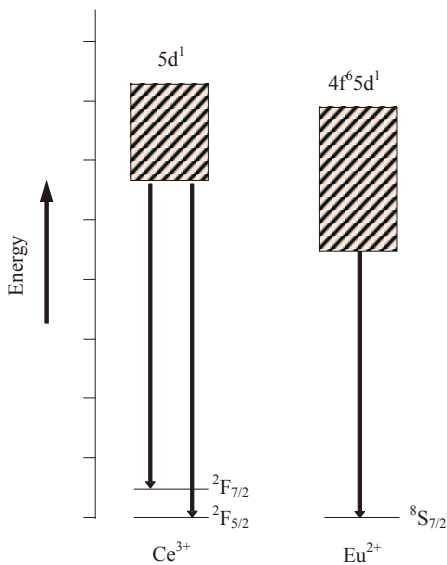


図2 Eu^{2+} および Ce^{3+} のエネルギー準位図

既存の白色 LED 用蛍光体の代表的なものとして、青色光の励起の下で効率の高い黄色発光を示す $(\text{Y,Gd})_3(\text{Al,Ga})_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$ (YAG:Ce) および $(\text{Ba,Sr})_2\text{SiO}_4:\text{Eu}^{2+}$ (BOS) がある。図3は、人間の目の比視感度曲線を示している。明るい環境の下では 555 nm において人間の目の比視感度が最も高いので、この領域に発光を示す黄色蛍光体を用いて、青色 LED からの青色光と補色のある黄色光で白色光を構成すると、その光を明るく感じさせることができる。図4に白色 LED 用黄色蛍光体として知られる YAG:Ce の励起および発光スペクトルを示す。また、青色光の利用は、紫外光からの色変換に比べて励起光と発光のエネルギー差が小さく、本質的なエネルギー変換効率も高い。ただし、この組み合わせでは、演色性が悪い。現在の白色 LED が擬似的な白色と呼ばれる理由は、三原色ではなく補色関係の二色の光を組み合わせることにある。物体の色は、照射した光の反射により見えるので、擬似的な白色光照射の下では赤色の物体色が鮮やかでないという問題がある。

白色 LED において光の三原色を含む真の白色光を得るためには、三原色の LED を用いるか、紫外 LED で三原色の蛍光体を発光させるか、または青色 LED で緑および赤色の二色の蛍光体を発光させる必要がある。三原色 LED の組み合わ

せは、コストアップと演色性の低下をもたらす。LED の発光スペクトルの形状は半導体のバンドギャップにより決まっており、スペクトルの幅を用途に合わせて自由に変化させることは難しい。また、三原色の LED はそれぞれ異なる電気特性を持つため補正回路が複雑になり、コストを押し上げる要因になる。紫外 LED も 400 nm 以下の短い波長で効率低下する傾向にあること、および封止樹脂を劣化させるという問題がある。そのため、現状では、高い演色性を必要とする用途では、青色 LED と緑および赤色の二色の蛍光体を組み合わせる方法が用いられている。照明用では黄色蛍光体を緑色側にシフトさせて赤色蛍光体と組み合わせる方法が採用されている。赤色蛍光体としては、 $(\text{Sr,Ca})\text{SiAlN}_3:\text{Eu}^{2+}$ が代表的である。最近話題となっている液晶ディスプレイ (LCD) における LED バックライトでは、LCD における画素の色は白色光を三原色フィルタに透過させることで作られる。各色の色純度を保つために緑色フィルタの波長幅を超えないように狭い発光スペクトルを持つ緑色蛍光体である $\text{Si}_{6-x}\text{Al}_x\text{O}_y\text{N}_{6-y}:\text{Eu}_z$ (ベータサイアロンと呼ばれる) が用いられている。

LED において、しばしば蛍光体フリー半導体材料がアピールされている。LED の発光スペクトル幅を変化させるためには、組成を連続的に変化させる必要があり、安価に実用的な特性を得られていない。特に、波長カバー範囲が広い照明用白色 LED において蛍光体を用いないで演色性を高めることは困難である。そのため、照明およびバックライトの用途に合わせて、多くの新しい蛍光体が開発され、白色 LED における蛍光体材料の重要性は年々高まっている。

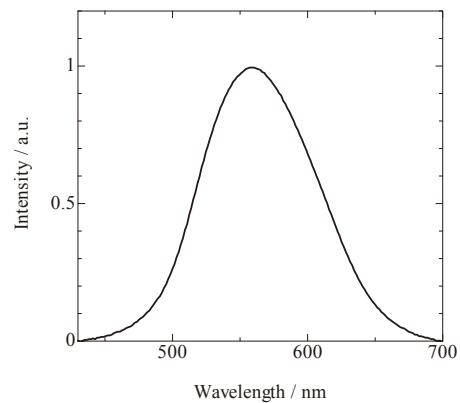


図3 人の標準視感度曲線

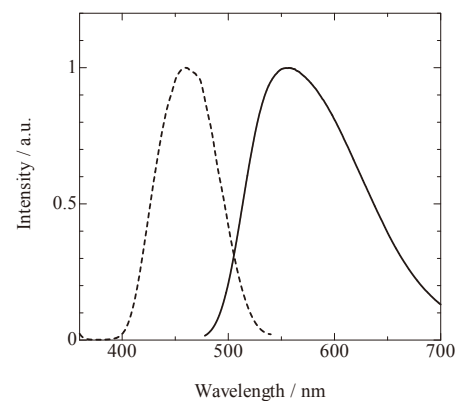


図4 黄色蛍光体 YAG:Ce の励起および発光スペクトル

□ 特集9 資源問題の現状と元素戦略 □

物質・材料研究機構 特命研究員

原田幸明

1. 資源問題の新段階

我が国では資源問題を中国の戦略上の問題かのように誤解している論者も多いが、世界的に資源問題は新たな段階に突入している。20世紀に入って資源の価格は長期低落傾向であり、それ以前のように資源貿易が価値を生み出す余地は小さくなってきていた。そのため資源メジャーもどちらかという石油メジャーの後塵を拝していたが、ここ近年になって積極的にM&Aを繰り返して巨大化し過去の恐竜がよみがえって食い合いを始めているといわれるほどである。そして、図1に金の価格の変化を示すように価格はリーマンショックをも振り切って急上昇している。この傾向は、石油がそうであるように石油そのものの物の価値よりも金融商品としての価値が先行する傾向が金属資源にももたらされだしたとみることができる。すなわち、これからは資源そのものの使用価値ではなく、資源価格の変動操作による金融商品としての価値が市場を席捲し、高値や変動が一時的なものではなく恒常的な市場操作として展開される段階に入ってきたとみるべきである。

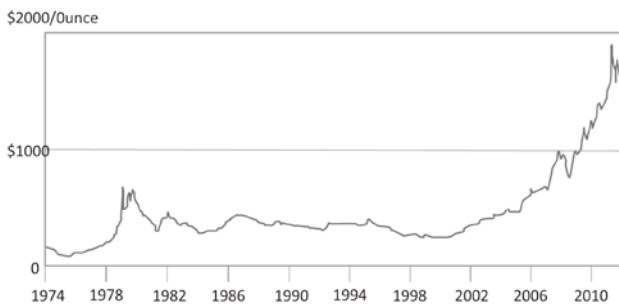


図1 金の価格の推移

そのような中で、一部の貴重な金属では重要な変化が起き出している。本稿の末尾(図8)に各金属資源の現状を知るためのサステイナブル周期表を付けた。その4段目に「増大」の項目があり1999年から2009年までの生産量の伸び指数を示している。鉄の例をとると指数165で165%に生産が伸びたことを表している。このように多くの金属消費は右肩上がりの成長であり、それが将来の資源問題に危惧を持たせているのであるが、その中で有害性を指摘されたCd,Hg等の金属の減少は致し方ないとして、重要な金属が生産の減少もしくは停滞となっている。それはNd(ネオジム)とAu(金)である。これらは片や電気自動車や風力発電のモータやダイナモの磁石として、片や情報産業や半導体にとっては高密度安定電子授受の接点として不可欠な素材である。これらの生産指数が停滞しているということは、その需要が減退している事を意味するものではない。使用量を徹底的に削減して素材効率を高める方法がとられ出してきたからである。これまで、資源問題は現世代の問題ではなく将来世代に対する責任の問題であると論じられてきた。しかし、今や、資源制約が製品の

設計に制約を与える段階に突入したのである。つまり、我々は過去の賢人が持続可能性の問題として指摘してくれた「将来世代」の入り口に立っているのである。

2. 資源端重量で考えることの重要性

このような資源問題は基本的に次の二つの要素によって大きくなっている。ひとつは、これまで取り残されてきた人口80%にもおよぶ発展途上国の当然の権利としての豊かさの追求であり、もう一つは先進諸国における環境・エネルギー・情報などでのイノベーションに対する新素材への期待である。これに対する資源の側からの制約の形成は一樣ではなく、図2の左下に示したような、量的、地政学的、エネルギー的、環境的要素となって表れる。特に注意したいのは、その下に付け加えてある供給速度の問題であり、副産物の場合にはその需要ではなく主生産の需要により供給速度が決まるためアンバランスが起き市場での不安定性を生み出しやすい。そして、レアメタルの多くは副産物である。これは、先述した金融商品化の波にさらされやすいことも意味しており、レアメタルについては特に供給変動のリスクに耐えるシステム作りを準備する必要がある。

このような中で様々な領域で持続可能性が危機にさらされるわけであるが、特に我が国では国民経済の持続可能性に敏感である。これは基本的に資源が国境を越えて偏在していることに起因している。末尾の周期表の三段目「占有」は生産シェア一位の国を国連に基づく国コードで(南ア ZA, 中国 CN, オーストラリア AU のように)表し、数字はそのシェア%である。有名な希土類はランタノイド(Ln)のところに97%中国のように記載してある。

人間経済の持続可能性となると国境を越えた全体の資源状況が問題となる。末尾の周期表の第一段「耐用」はいわゆる「耐用年数」であり現有可採埋蔵量を年間消費量で割った値である。もちろん年間消費量は年々変わるし、埋蔵量も現有の技術と経済環境で採掘可能であるが未だ掘っていないもの

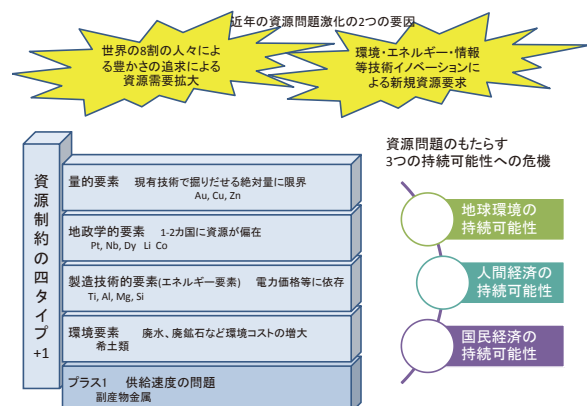


図2 近年の資源問題激化の2つの要因

と定義されており、経済の概念が入っているため経済状況で変化する。そのため耐用年数は資源がいつまで持つかという年数を示すものではない。しかし、この値が小さいほど自動車操業をしていると理解しておいてよい。

このような中で注意しなければならないのは地球環境の持続可能性である。多くの金属資源が生物多様性に富む地域で採掘され、その環境破壊に大きくかかわっている。さらに、資源の確保が厳しくなるにつれて対象とする鉱石の品位は年々低下しており、これは同一量の金属を得るために必要な土壌などの天然資源量を増大させている。このある量の金属などの製品を得るためにどのくらいの天然資源を必要とするかという量は関与物質総量 (TMR: Total Material Requirement) と呼ばれる。図3には単位量の金属に相当する TMR 量を TMR 係数として縦軸に示した。なお、このグラフの横軸は1トンの金属生産に係る CO₂ 発生量、バブルの大きさは細胞毒性の程度を表している。この図から鉄の TMR 係数は8程度であるが、金では百万を超える値となっている。多くの廃水を発生する希土類も一万以上と大きい。このように貴金属やレアメタルの TMR 係数は鉄やアルミニウムに対してけた外れに大きく、たとえ製品の中で使われる量が微量であっても資源の採掘サイトでは大量の物質を取扱い、環境への影響も大きくなる。たとえば、消費者の手元では100gに満たない携帯電話機に数mgの金が用いられているが、この TMR でみると総量は30kgを超え、その2/3は金に関与している。このように消費段階の重量を消費端重量とよぶならば、TMR でみた重量は資源端重量になる。これはある意味では資源の重み、資源の価値ということもできる。この資源端重量で製品を見て、その減量化や代替を図ることが、資源国に対するコミュニケーションにおいてこれから重要になってくる。

3. 都市鉱山開発の新たな意義

このように3つの持続可能性が危機にさらされる中で、問われてくるのが元素戦略であり、“代替”、“減量”、“循環”がその柱となる。これは、資源問題に対してそれを使う側が“代替”、“減量”、“循環”によって資源端重量を下げていく取り組みをすすめることに他ならない。

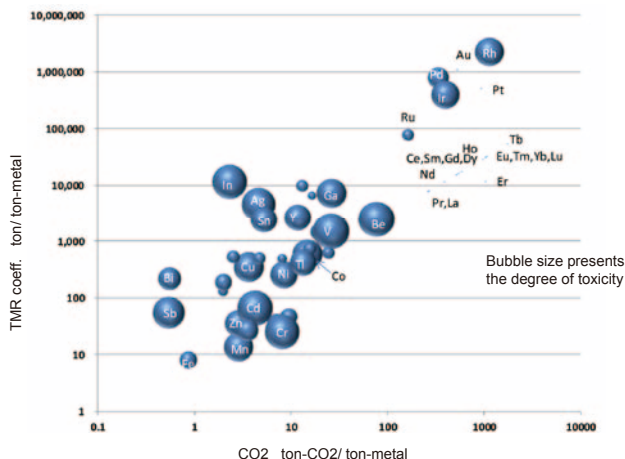


図3 金属元素の環境インパクト

“循環”は一旦人間経済圏に取り入れられた物質を再利用し極力資源端での掘削を削減することで全体としての資源端重量を小さくする。この人間経済圏に存在する物質が形成するのが「都市鉱山」である。「都市鉱山」は使用済小型家電のような家庭屑を指すのではなく、産業屑、工場屑などすべての利用可能な人間経済圏内の資源を指す。むしろ、産業屑や工場屑のほうが集中して存在し鉱脈としては利用価値が高い。

冒頭に述べた資源の状況を反映して、この都市鉱山の位置づけが現在大きく変わってきている。かつては、図4の左のように、天然鉱山に対するもう一つの供給源でしかなかった。しかし現在では、まず、金、銀をはじめとする多くの種類の金属で、すでに採掘され人間経済圏に持ち込まれたものの量が、地下に存在する天然鉱山の埋蔵量より多いという段階に至っている。著者が2008年に発表した我が国の都市鉱山蓄積ポテンシャルもその一例で、我が国だけでも世界の埋蔵量の1割以上の金属が眠っているのである。次に重要なことは、資源の偏在が問題となる中で、「都市鉱山」の持つ優れた優位性がある。それは、消費地が即原材料であるスクラップの発生地であり、資源と消費の偏在の問題が大きく解消できることである。さらに、リスク管理の側面が注目される。これから供給変動のリスクにさらされるレアメタル類に対して、消費直結もしくは工場直結の形でショートサーキットのサプライ・サブチェーンを準備し、供給リスクに備えていくうえで、都市鉱山はまさに身近にそれを形成できるルートである。資源供給リスクが増大する中でリサイクル型のサブチェーンを持っていないハイテク製造業は、復水器の機能しない原子炉にも例えられるだろう。

都市鉱山の役割が変化し大きくなる中で、リサイクルの方法や技術にもそれに対応すべき変化が求められる。リサイクルはこれまで廃棄物の減量化のためのリサイクルと資源の確保のためのリサイクルの二つの側面があるとされてきた。図5でいう、廃棄物リサイクルと金属回収リサイクルである。しかしここにハイテク産業のリスク管理の観点が入るとそれでは不十分になる。なぜならば金属回収リサイクルは必要とするハイテク製造業に戻るのではなく汎用製品として市場に出ていく構造になっている。市場においてリサイクルの位置が大きい鉄やアルミでは資源確保としての循環が行われるが、リサイクル市場の未熟なレアメタルではむしろワングレード落ちるものとして循環を形成しえなくなっている。すなわち、現状のリサイクルは資源確保のリサイクルではなく、使用済みの有価物を「お金」に変える「換金リサイクル」の側面が強いのである。今リサイクルに求められているのは、いかにして「換金リサイクル」を卒業し、供給リスクにも対応できる「原料確保リサイクル」として循環を造りだすかである。

「換金リサイクル」の場合は汎用インゴットにして市場に出すことが目的となる。「原料確保リサイクル」では、使用目的に応じた組成、不純物のコントロールが重要になる。たとえば電子材料に用いるときの金は銀の混入を嫌う。リチウムイオン電池に用いるコバルトはナトリウムを嫌う。これらは製品製造側から忌避物質と呼ばれる。これらの忌避物質をコントロー

ルレア金属を的確に製品原料に繋げるリサイクル技術、
 いうなればこれまでのメタラジーに対して「ファイン・ケミカル・リサイクル」というべき新しい技術の誕生が待たれている。

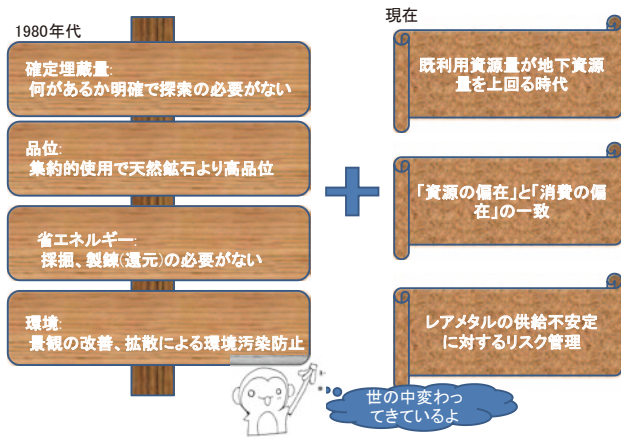


図4 都市鉱山の意義

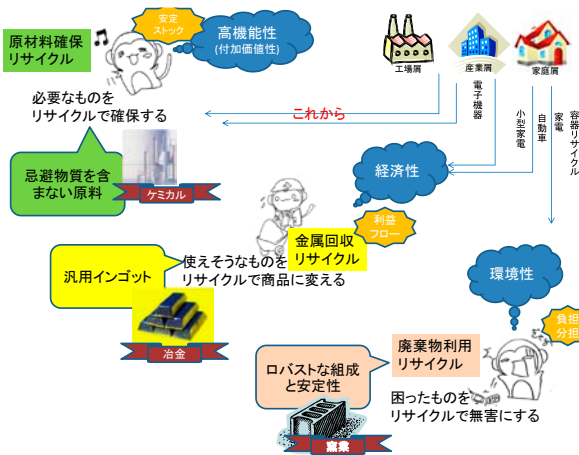


図5 異なる3種類のリサイクル

4. 抜本的代替の可能性

もうひとつの重要な元素戦略は「代替」である。この代替技術の開発は2007年から開始された文科省の元素戦略プロジェクト、経産省の希少金属代替プロジェクトで積極的に取り組まれ、ジスプロシウム(Dy)減量化など優れた成果が出ている。図6に示したのはその代表的テーマである。図からも分かるように、文科省と経産省は協力関係で役割分担をして進めている。図6の青の部分が経産省の受け持ちの部分で、具体的な代替、減量化の対象と量的目標を決め5年をめどに成果を出して実用化へと進めることを目指している。他方、図6の緑のテーマが文科省であり、メモリー機能をアルミの酸化状態等で得ようとするなど将来の抜本的な代替を目指している。

両者を通じての優れた成果はDyの減量化、代替の技術である。Dyは世界最強のNd-Fe-B磁石の弱点である高温での保持力の低下を抑えるために添加されていた元素である。技術開発はこの高温保持力の低下抑制を、従来の代替のようにDyの役割を他の成分で置き換える成分代替で行うのではなく、結晶粒の微細化による磁区反転の困難化や粒界構造の解析知見に基づいた反転磁区発生の核形成制御というメカニズ

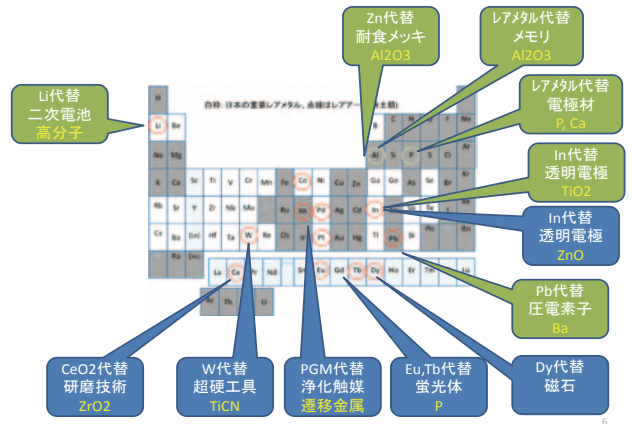


図6 元素戦略・希少金属代替プロジェクトでの取り組み例

ム代替で可能とした。このように、従来の代替は、資源の逼迫に押されて類似の資源による成分置き換えで行われていたのに対して、機能発現に対する科学的知見をもとにして、そのメカニズムから代替しようと試みている。これは、従来の成分置き換えでは類似の資源は同様の資源問題に遭遇するという制約を持っていたが、全く違った元素群を利用することができ、代替の可能性を大きく書き換えている。また、このようにメカニズムからの代替は材料として使用される関連属性をも大幅にコントロールすることができ、既存の製品への代替的利用の枠を超えて、製品への新しい技術の導入とともに生かされることができ、代替を受動的イメージから、能動的進化的代替へと前進したものになっている。

そもそも、我々が利用する物質の機能は原子配列と電子構造によって決まっている。従来はこの原子配列も電子構造も自然界での反応を通じた安定構造の中から選択せざるを得なかった。しかし、現在では非平衡論的な不可逆過程を利用したプロセスや原子レベルをコントロールするナノファブリケーション技術が進歩し、さらに自然界では到達しがたい準安定系を含めて計算科学により ab initio (アビニシヨ:ラテン語で初めからの意)からの物質状態予測もかなりの程度可能になっている。これらをベースにして図7のような原子配列と電子状態のコントロールを進めれば、普遍的に存在する元素(EAE; earth abundant elements)で機能を引き出すことも可能となる。

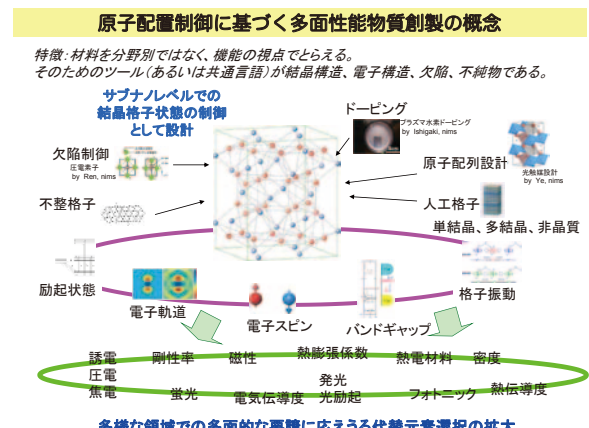


図7 電子・原子構造を考えたアプローチ

近代科学は献金術を否定し、元素の概念を持ち込むところから始まった。ナノテクノロジーの前進は、この元素にとらわれることなく原子配列と電子状態制御に必要な機能を取り出しうるところまで達している。これは、ある意味では nano-alchemy と呼べるアプローチである。この nano-alchemy は

資源問題解決の入り口である。なぜならば、資源問題の根源は、天が我々に与えた元素の配分と、我々の用いている元素の市場規模が大きく異なることによる。われわれが EAE を使いこなせるようになればそれは資源問題の抜本的解決になるのである。



図8 サステイナブル周期表

2011 年度部門賞・部門表彰の受賞者決定

○フェロー賞 :1 件



フェロー賞を受賞して

大阪工業大学
 柘植 浩志

この度は ICM&P2011 において発表いたしました“VERTICAL TYPE TWIN ROLL CASTER WITH SCRAPERS FOR CASTING CLAD STRIPS” に対し機械材料・材料加工部門のフェロー賞を賜り大変光栄に存じます。本研究を進めるにあたりご指導いただいた羽賀俊雄教授、本賞にご推薦くださいました先生方および委員の皆様方に心よりお礼申し上げます。

クラッド材は複数の異なる合金を組み合わせることでより単一素材では得ることのできない特性を有した板材です。例えば、リサイクル材に少量の表材を組み合わせることでリサイクル材を有効活用させることが可能です。しかし、クラッド材の製造工程は D.C. 鋳造熱間圧延法による板作製工程と接合工程からなり多くの工程を要し、高コストとなっているため、製造工程の省工程化が求められています。そこで、我々は縦型タンデム双ロールキャスターを考案しました。この装置は溶湯から直接薄板を作製することが可能な縦型双ロールキャスターを上下に配置した構造となっており、芯材と表材で構

成される 3 層クラッド材の芯材を上側双ロールキャスターで、表材の作製と芯材との接合を下側双ロールキャスターで行い 2 工程クラッド材の作製を行います。まず、芯材に高融点、表材に低融点の材料を用いた 3 層クラッド材の作製を試みました。その結果、接合界面が明瞭なクラッド材の作製を行うことが可能でした。次に各層の融点関係を反転させたクラッド材の作製を試みました。その結果、芯材と表材が混合したクラッド材となりました。この原因として、融点の低い材料の芯材が融点の高い表材の溶湯によって再溶解されたことが原因と考えられました。混合層のないクラッド材を作製することを実現するためには融点の高い材料を融点の低い材料の溶湯で加熱する必要があります。そこでスクレイパーを使用した縦型双ロールキャスターを考案しました。この装置には 1 対の縦型双ロールキャスターの各ロールにスクレイパーを装備しています。スクレイパーは可動式の軟鋼板に断熱材を貼り付けたプレートで回転支持となっています。スクレイパーを使用することにより、芯材と表材の溶湯を混合させることなくロール上に注湯させること、融点の高い表材を作製して、融点の低い芯材の溶湯で加熱することを可能にしました。作製を試みた結果、芯材に低融点、表材に高融点の材料を使用した混合層のない 3 層クラッド材の作製が達成できました。これらの結果より、縦型双ロールキャスターにより省工程で 3 層クラッド材の作製が可能であることを示すことができました。

今後はこの受賞を励みにして、技術者としてより一層の努力をしていく所存でございます。有難うございました。

機械材料・材料加工部門「部門賞・一般表彰」公募のお知らせ

機械材料・材料加工部門では、第90期部門賞および部門一般表彰候補を下記の要領で公募します。自薦他薦を問わず奮ってご応募下さい。

*公募締切：2012年12月3日(月)厳守

*推薦書類：推薦・申請用紙を部門ホームページよりダウンロードしてお使い下さい。

*被推薦者資格：各賞とも日本機械学会会員であることが受賞資格となります。

*書類提出先：日本機械学会 機械材料・材料加工部門 (担当者 石澤 章弘)

〒160-0016 東京都新宿区信濃町35 信濃町煉瓦館5階

電話 (03) 5360-3502, E-mail : ishizawa@jsme.or.jp

推薦された候補者は第3技術委員会で審査され、部門運営委員会で受賞者を決定します。結果は、今年度中に本人に連絡し、次期(2013年度)のニュースレターに掲載します。また、受賞者は、2013年度年次大会開催時に表彰する予定です。なお、本件に関するご質問・お問合せ等は、第3技術委員会委員長(藤本浩司、電話(03)5841-6567, E-mail : tfjmt@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp)までお願いします。

各賞の概要

- (1) 功績賞：機械材料・材料加工分野に関する学術、教育、出版、内外の交流など諸般の活動において、本部門の発展と進歩に積極的な貢献または顕著な業績のあった者に授与する。
- (2) 業績賞：機械材料・材料加工分野に関する研究または技術開発において、顕著な業績のあった者に授与する。
- (3) 国際賞：機械材料・材料加工分野における学術、教育、出版などに関する国際的な活動を通し、本部門の発展と進歩に積極的な貢献または顕著な業績のあった者に授与する。

- (4) 部門表彰(優秀講演論文部門)：当該年度に開催された本部門企画、担当、主催または共催の講演会において発表された機械材料・材料加工分野の講演論文中、学術・技術の進歩発展に寄与したと認められる論文の著者を対象とする。
- (5) 部門表彰(奨励講演論文部門)：当該年度に開催された本部門企画、担当、主催または共催の講演会において発表された機械材料・材料加工分野の講演論文中、将来当分野の学術・技術の進歩発展に寄与すると期待される若手講演登壇者(2013年4月1日現在において32歳以下の者)を対象とする。
- (6) 部門表彰(新技術開発部門)：機械材料・材料加工分野において本部門企画、担当、主催または共催の集会、出版物等において発表された新技術、新製品の開発者中、工業技術の進歩発展に特に貢献した者を対象とする。
- (7) 部門表彰(国際貢献部門)：本部門の国際会議や国際交流に関し、特に優れた貢献のあった者を対象とする。

2012年度年次大会『日本再生に向け新たな未来を切り拓く機械工学』in 金沢の御報告

第89期第一技術委員会(年次大会担当)

米山 猛(金沢大学)

2012年度の年次大会が、2012年9月9日(日)～12日(水)の日程で、金沢大学角間キャンパスにおいて開催されました。多数の方が参加され、活発な発表・討論が行われました。

国際基調講演では、Veronique Michaud 先生より、「Processing of smart composite materials, towards tailored damping and matrix healing」の御講演がありました。基調講演として、「DLC コーティングの最前線」、「米国における生産技術における国際会議の動向」の御講演がありました。ワークショップでは、「減災・サステナブル工学研究会創設に向けて」の提案がありました。先端技術フォーラム「M & P 最前線」では、各種材料の最前線についての御報告がなされました。

部門同好会では、基調講演の講師の方も交え、楽しく交流が行われました。御尽力下さいました皆様に感謝申し上げます。

[G040] 機械材料・材料加工部門一般セッション (28件)

[S041] 粉末成形とその評価 (9件)

[S042] セラミックスおよびセラミックス系複合材料 (9件)

[S044] 溶射・コールドスプレー皮膜とその評価 (10件)

[J032] 安全安心の先進デバイス設計に向けたマイクロ・ナ

ノ材料プロセス工学のイノベーション(材料力学部門、マイクロ・ナノ工学専門会議との共同企画、9件)

[J041] 工業材料の変形特性と強度およびそのモデル化(計算力学部門、材料力学部門との共同企画、22件)

[J042] 超音波計測・解析法の新展開(材料力学部門との共同企画、20件)

[J043] 高分子基複合材料の加工と評価(材料力学部門との共同企画、19件)

[J044] 知的材料・構造システム(材料力学部門、機械力学・計測制御部門、宇宙工学部門との共同企画、54件)

[J045] 締結・接合部の力学と評価(計算力学部門、材料力学部門との共同企画、13件)

[J111] 摩擦・摩耗制御のための材料及び表面改質(機素潤滑設計部門との共同企画、15件)

[J164] マイクロナノ理工学：nm から mm までの表面制御とその応用

(情報・知能・精密機器部門、機械力学・計測制御部門、機素潤滑設計部門、生産加工・工作機械部門、マイクロ・ナノ工学専門会議との共同企画、15件)

3rd Asian Symposium on Materials and Processing (ASMP2012) in Madras の報告

シンポジウム委員長 武藤睦治 (長岡技術科学大学)

実行委員長 井原郁夫 (長岡技術科学大学)

第3回機械材料・材料加工に関するアジア国際会議 (ASMP2012) は、2012年8月30日から31日まで、インドのチェンナイ市にあるインド工業大学マドラス校 (IIT Madras) において、同大学の協力を得て開催されました。インド、日本、タイ、マレーシア、中国、スウェーデン、フィリピンなどから多数の参加者を迎え、機械材料・加工・評価などの各分野の研究者や技術者間の国際交流ならびに情報交換の場として大変有意義な国際会議となりました。

講演数は口頭発表2件、ポスター発表48件でした。31日には日立製作所横浜研究所生産技術研究センター長の沢真司氏による基調講演「Simulation-based technology for advanced manufacturing」が行われ、先進生産プロセスにおけるシミュレーション技術の活用に関する興味深い話題が提供されました。また、日本より3件の招待講演がなされました。なお、アブストラクト申込数は360件を数え(ただし、大半はインド国内)、講演採択率は約50%であったことから、本シンポジウムに対するアジア諸国の参加者の関心の高さを再認識することができました。

バンケットはチェンナイ市内のホテルで開催され、部門表彰(国際貢献部門3件)も行われました。バンケットならびに

初日のオープニングセレモニーにはチェンナイ総領事の中野氏ならびにIIT関係者を迎え、盛大かつ和やかな雰囲気の中でインドとの相互理解を一層深めることができました。最終日のクロージングセレモニーでは、ベストポスター賞の発表が行われ、2名の日本人学生を含む6名の将来有望な若手研究者が表彰されました。

最後になりますが、本シンポジウムの準備・実行に多大なご尽力をいただきました実行委員会の皆様、IIT関係者ならびに参加者全ての方々に、この場をお借りして厚く御礼申し上げます。



会場 (Industrial Consultancy and Sponsored Research Building) 前にて

第20回機械材料・材料加工技術講演会 (M&P2012) 開催のお知らせ

今年度のM&P2012は大阪工業大学で開催させていただきます。本講演会では、「日本を支えるものづくり」をテーマとし、新たなオーガナイズドセッションが企画されています。多数の皆様のご参加をお待ちしています。

URL : <http://www.jsme.or.jp/conference/mpdconf12/>

開催日 : 2012年11月30日(金)、12月1日(土)・2日(日)

会場 : 大阪市旭区大宮 5-16-1 大阪工業大学大宮キャンパス

技術講演会 12月1日(土)、2日(日)

OSテーマ

A : 材料

A-1 : 高分子/高分子基複合材料, A-2 : 金属/金属基複合材料, A-3 : セラミックス/セラミックス基複合材料, A-4 : 複合機能化材料・デバイスとその加工プロセス, A-5 : 摩擦・磨耗材料, A-6 : アルミニウム合金およびマグネシウム合金の創製と加工, A-7 : 生体・福祉機器・環境適用型材料の創製と特性評価, A-8 : 電磁プロセスによる先端機能材料創成

B : 加工

B-1 : 塑性加工とその周辺技術, B-2 : 溶融加工・半凝固加工, B-3 : 粉末成形とその評価, B-4 : 粉体・粒子を用いた成形, 成膜ならびに表面加工技術, B-5 : 超精密加工・マイクロ・ナノ加工, B-6 : 高エネルギー加工, B-7 : 表面改質および薄膜コーティング, B-8 : 上記以外の加工

C : 特性・評価

C-1 : 溶接・接合のプロセスと評価, C-2 : 締結・接合・接

着部のCAEモデリング・解析・評価技術, C-3 : 知的材料・構造システム, C-4 : 材料・加工・構造物の信頼性を支える評価・モニタリング技術, C-5 : 材料・構造部材の動的特性

D : 三分野融合

D-1 : 伝統産業工学, D-2 : リサイクルと省エネプロセス, D-3 : 金属マイクロ/ナノ材料の創製・評価・応用, D-4 : ポラス金属の最新技術と産業利用

見学会 11月30日(金)

見学先 : ㈱三共合金鋳造所, 見学内容 : 凍結鋳造システム

子供ものづくり教室 12月1日(土)

特別講演会 12月1日(土)

講師 : 棚橋 秀行氏 (東大阪宇宙開発協同組合 専務理事), 講演題目 : 「人工衛星プロジェクトーモノづくりは人づくりー」

技術フォーラム 12月1日(土)

テーマ : 「大阪の中小企業の底力」

ワークショップ 12月1日(土)、2日(日)

①軽量化材料の可能性を探る

- ② 締結・接合・接着部の CAE モデリング・解析・評価技術
- ③ 減災・サステナブル工学創成に向けて

参加登録料（講演会開催期間中、受付にて申し受けます）：

- 正・准員 8,000 円（講演論文集 CD を含む）
 - 会員外 15,000 円（講演論文集 CD を含む）
 - 学生員・一般学生 2,000 円（講演論文集 CD は別売：3,000 円）
- 「特別講演」、「技術フォーラム」、「ワークショップ」のみの参

加は無料（講演論文集 CD は別売：3,000 円）

問い合わせ先：

〒 535-8585
 大阪市旭区大宮 5-16-1
 大阪工業大学工学部機械工学科 羽賀俊雄
 TEL/FAX：06-6954-4888, E-mail：haga@med.oit.ac.jp

2013 年度年次大会のご案内と特別行事企画ご提案のお願い

2013 年度の年次大会は、2013 年 9 月 8 日（日）～ 11 日（水）の 4 日間、岡山大学（岡山市北区）にて開催されます。会場の津島キャンパスは都市の中心部にあり、JR 岡山駅よりバスで 10 分程度と、交通に便利です。晴れの国、岡山へぜひお越し下さい。桃太郎と高級フルーツが皆様をお待ちしております。9 月はマスカットが食べ頃の季節です。また、日本三名園の一つである「後楽園」、鴉城として有名な「岡山城」、文化と芸術の香り高い「倉敷白壁通り」も必見です。

本年次大会のキャッチフレーズは『メカニカルイノベーションによる新エネルギー社会の実現』、テーマは「エネルギー」、「オープンイノベーション」、「次世代モビリティ」です。当部門からは、以下のように多数のオーガナイズドセッションが予定されています（他部門との共催を含む）。

- ① 超音波計測・解析法の新展開
- ② 工業材料の変形特性・強度およびそのモデル化
- ③ 厚膜形成技術と厚膜の機械特性評価
- ④ セラミックスおよびセラミックス系複合材料
- ⑤ ソフトマター・イノベーション
- ⑥ 知的材料・構造システム
- ⑦ 減災・サステナブル工学
- ⑧ 高分子基複合材料の加工と評価
- ⑨ 粉末成形とその評価
- ⑩ “壊れない” マイクロシステムのためのナノ力学・ナノ計測
- ⑪ マイクロ・ナノ材料創成とそのデバイス応用
- ⑫ 摩擦・摩耗制御のための材料及び表面改質
- ⑬ マイクロナノ理工学：nm から mm までの表面制御とその応用

多くの皆様のご参加を期待し、ここにご案内申し上げます。

第 1 技術委員会 委員長 品川一成（香川大学）
 委員 清水一郎（岡山大学）

さて、例年どおり下記の特別行事企画を募集しております。

- ① 基調講演
- ② 先端技術フォーラム
- ③ ワークショップ
- ④ 部門同好会
- ⑤ 新技術開発リポート
- ⑥ 新企画行事

特に複数部門にまたがる部門横断企画をご検討頂けましたら幸いです。締切は 2012 年 12 月 21 日（金）です。奮ってご提案ください。

特別行事企画申込み・問い合わせ先：第 1 技術委員会
 委員長 品川 一成 (shina@eng.kagawa-u.ac.jp)
 幹事 大津 雅亮 (otsu@u-fukui.ac.jp)



岡山大学正門の並木道と時計台

編集後記 b-M&P 部門ニュースレター No. 44 をお届け致します。

本号を発行するにあたり、ご尽力賜りました皆様に深く御礼申し上げます。また、小林委員長をはじめ、広報委員会委員の皆様のご多大なご支援に心より感謝致します。今回の特集記事では、近年国内外で注目を浴びているレアメタルについて話題を集めました。多くの方々にとって有益となる情報提供となりましたら幸いです。本ニュースレターに関する読者の皆様からのご感想、ご意見、ご要望、お問い合わせは、広報委員会幹事（酒井：sakai@st.seikei.ac.jp）までお願い致します。

発行 発行日 2012 年 10 月 31 日
 〒 160-0016 東京都新宿区信濃町 35 信濃町煉瓦館
 一般社団法人 日本機械学会 機械材料・材料加工部門
 第 90 期部門長 浅沼 博
 広報委員会委員長 小林 訓史
 Tel. 03-5360-3500 Fax. 03-5360-3508