総 説

レアメタルと再資源化の可能性

西村 山治¹・芝田 隼次^{2*}・佐野 誠²

Rare Metals and Possibility for Recycling

Sanji NISHIMURA¹, Junji SHIBATA^{2*} and Makoto SANO²

¹Professor Emeritus of Kansai University

²Department of Chemical, Energy and Environmental Engineering, Kansai University, Suita, Osaka 564-8580, Japan

Abstract

Rare metal resources remain after their utilization, which are different from energy resources. We have a lot of industrial wastes, that is, urban mine in Japan. It is important to recycle valuable rare metals from the industrial wastes by applying suitable separation technologies. The contents of rare metals are usually higher than those of natural resources. They could be used without mining from the ground, though it is necessary to collect a certain amount. The importance of rare metal recycling is discussed here from the various aspects.

Key words: Rare metals, Recycling, Urban mine, Lithium ion battery

1. はじめに¹⁻³

金属資源は、エネルギー資源と異なり、使用後に他の製品となって残っている。都市鉱山とは1988年東北大学選鉱製錬研究所の南條らが提唱したのが最初である¹。都市鉱山開発—包括的資源観によるリサイクルシステムの位置付けと題する論文の中で、都市で大量に廃棄される家電製品などから資源を回収し、再利用することを提唱した時に使った言葉で、都市で大量に廃棄される家電製品などの中に存在する貴金属やレアメタルなど有用な資源を鉱山に見立てたものである。資源をリサイクルして、再生・有効活用できる可能性のある地上資源の一つである。

一旦、地下から採掘・製錬され、人間の活動圏の中に入ってしまった金属などを資源として再活用していくことは必要である。鉱物資源は地下から採取されるが、既に20世紀の末には、これまでに採掘した既採掘量の方が金属資源の確認埋蔵量よりも多い状態になっている。この人間活動圏の中にある既採掘金属を資源として、有効に活用することが望ましい。

都市に大量に廃棄される使用済み家電製品や電子機器

等には、貴金属やレアメタルなどの金属資源が多く含まれており、これらは都市生活の中に埋もれた鉱山といえることができる。日本には金属の高度な製錬、製造技術があり、これを用いて使用済み製品から金属を回収リサイクルすれば、都市は金属を産み出す鉱山となる。鉱物資源に乏しい日本にあっては有用廃棄物が注目され、物質材料研究機構の試算によるとわが国の有用廃棄物の資源量は世界有数の資源国に匹敵するといわれている。しかし、これらの有用廃棄物では、一製品当たりの含有量が微量であったり、種々の素材と混合されていたりするため、技術的、コスト的に鉱物資源の抽出が容易ではない。また、数多くの製品が市中に散在しているため、製品回収コストが高くつくことも、資源回収が進みにくい理由の一つとなっている。その結果、有用金属を含んだ製品が廃棄されたり、海外に流出していたりするのが現状である。

これらの問題解決には、有用金属を効率的に抽出する技術の開発や使用済み製品や有用金属を含む部品の効率的な回収網の整備が不可欠である。考え方のブレークスルーや技術のブレークスルーが必要となる。

2. レアメタルの再資源化のメリット^{3,7-9}

スクラップ類から非鉄金属を回収する場合は、原料鉱物から採鉱、選鉱、製錬という一連の操作により生産する場合と比べて、エネルギー消費量やCO₂排出量が少なく、また採鉱に伴う環境負荷も発生しない。再生アル

キーワード: レアメタル, リサイクル, 都市鉱山, リチウムイオン電池

¹ 関西大学名誉教授

² 関西大学環境都市工学部

平成25年11月25日受理

*e-mail: shibata@kansai-u.ac.jp

ミ地金を作るには、アルミ1トンあたり600 kWhであり、ボーキサイトから作るときの約3%の電力ですむ。再生銅を作るのは、鉄鉱石から始めるのとは比べて1/3のエネルギーでよい。

重要なメリットとして以下の点が考えられる。

1) 埋蔵天然資源の節約

地球に存在する資源の量は限られている。有用廃棄物を活用することは、天然資源の採掘量を抑制することにつながる。

2) 最終処分場の寿命の延長

有用廃棄物開発とは、いわばこれまで廃棄されてきたゴミを資源に変えることである。3R, すなわち Reduce(発生抑制), Reuse(再使用), Recycle(再生利用)の取り組みを高度化することは、最終処分場の寿命延長に資することになる。

3) 資源開発に伴う環境への影響の低減

金属を天然の鉱石から製造する場合、鉱山から鉱石を掘り出す必要がある。銅鉱石の銅の含有率は1%程度であり、10円玉の重さは約4.5gで10円玉2枚作るためには、約1kgの銅鉱石を掘り出す必要がある。有用廃棄物を開発することは、鉱石の採掘量を減らし、環境への影響を小さくすることにつながる。

4) CO₂ 排出量の削減(地球温暖化進行の抑制)

有用廃棄物から回収されるリサイクル原料から銅地金を製造する場合のCO₂発生は、鉱山から採掘された鉱石から製造する場合の1/4程度である。

3. レアメタル再資源化の必要性^{3,7}

天然の鉱山は、対象とする鉱石しか存在しないが、廃棄物には貴金属のほか、多くのレアメタルも含まれている。最近、このような有用廃棄物への関心が急速に高まってきた背景には、世界的な資源価格の高騰がある。資源価格高騰の背景には、国際的な資源ナショナリズムの台頭がある。世界のレアメタルは偏在しており、その埋蔵国は限られている。主要産出国である中国は、最近、自国の自動車産業や電気機械産業への供給を優先するために、戦略的に輸出を抑制するなど、自国に存在する資源を自国で管理・開発しようとする動きを強めている。これが資源価格高騰の一因となっている。

レアメタルは産業のビタミンと言われるように、電子機器や自動車などの工業製品には不可欠な資源であり、その安定的な確保は日本の産業にとって至上命題である。こうした資源価格高騰と需給の逼迫を背景に、企業はリサイクル技術や代替素材技術の開発を活発化させている。このような状況下において、有用廃棄物からの金属リサイクルのビジネスチャンスが拡大し、廃棄される

電気・電子機器等の工業製品から、貴金属やレアメタルを取り出す技術開発への注目度が高まりつつある。

使用済みのIT機器などはしばしば宝の山といわれるが、廃棄製品を集めて、そこから金属を回収する技術がなければ、宝の持ち腐れであり、さらに、その回収コストが取り出せる金属の価値より安くならなければ、ビジネスとして成り立たない。

この意味で有用廃棄物からの金属をリサイクルする経済的価値は、その時の鉱物資源価格によって決まる部分が多い。鉱物資源価格が上昇すればするほど、有用廃棄物開発の経済的価値が高まる。

4. 再資源化できるレアメタルの量¹¹

作られては捨てられる家電や自動車、そうした工業製品に使われている電子回路基板にはAuやPt、Inのような貴金属やレアメタルが使われている。1枚の基板に使われるレアメタルはごく微量であるが、数が集まると無視できない。国立環境研究所の循環型社会・廃棄物研究センターによると、パソコンの基板1トンには約140gのAuが含まれている。Auは1gあたり4,469円前後(2013年9月25日)であるので、約63万円の金額となる。

それぞれの金属ごとに日本にある有用廃棄物の規模が、世界の現有埋蔵量の何%を占めるかを見ると、Au 16% (6,800トン)、Ag 22% (60,000トン)、Sn 11% (660,000トン)、Ta 10.4% (4,400トン)など、電子部品等に多用されている金属は、いずれも世界の埋蔵量の1割を超える規模となっている。また、透明電極としてディスプレイや太陽光発電に使われているInは61% (1,700トン)にのぼるほか、プラスチックの難燃助剤として使われるSbは19% (340,000トン)の規模となっており、わが国の有用廃棄物は世界有数の資源量に匹敵する。

日本の有用廃棄物だけで、世界の消費量の何年分をまかなえるかを試算すると、多くの金属の2~3年分がまかなえ、とりわけ電池材料になるLiは7.4年分、触媒や燃料電池や電極に不可欠なPtは5.7年分の蓄積量となる。また、日本の有用廃棄物の規模を各国の天然資源埋蔵量と比較した場合の順位をみると、Au、Ag、Pb、Inが世界1位、Cuは世界2位となる。

上記の数字は試算に過ぎず、また、有用廃棄物から実際に資源を効率的かつ経済性を伴う形で回収するには、数多くの難題があることを考えれば、日本が世界1、2の資源国と表現するのは、現時点では適切でないかもしれない。しかし、日本の有用廃棄物がかなり大きな規模であることは間違いなく、地下にあった金属資源がその所在が地上に変えたことで、日本は地上の資源国という顔を持つようになっている。

このような有用廃棄物に含まれるレアメタルは天然原料に比べて含有量が高い。Au の場合、天然鉱石 1 トン中に数十グラムあれば、極めて含有量の多い鉱石であり、一般には 5 g 程度である。携帯電話の場合には、1 トン中の Au は 300 ～ 400 g で、天然鉱石の 10 ～ 80 倍に近い。国内には、現在使用中のものも含めて 2 億台の携帯電話が存在し、全体で 6 ～ 8 トンの Au が含まれている。パソコンの基板などを加えれば、さらに多くの Au が眠っている。Cu 鉱石に含まれる Cu の品位は 1% 程度であるが、電子製品の基板には Cu が 10% 程度含まれている。携帯電話には Li や Ni などのレアメタルが使われているが、一台の携帯電話に含まれる金属の価値は 100 ～ 300 円と言われている。

レアメタルへの世界の需要は高まる一方であるが、産出国の輸出規則もあり、国際価格は高騰を続けてきた。一例は、大容量ハードデスクの成膜用材料となる Ru であり、9 倍に高騰したことがあった。その時、底力を見せたのが、日本の優れた技術であった。Ru の加工最大手企業は 2008 年に新工場を稼働させ、Ru 生産能力を年間 20 トンに引き上げた。これは世界需要の約半分に相当し、その結果として、Ru の価格は半値以下に落ちついた。

5. 日本版グリーンニューディールの推進と レアメタルの再資源化

オバマ大統領がグリーンニューディール政策を 2009 年に発表して以来、世界各国でも類似の考え方が打ち出されている。電気自動車や太陽電池など、グリーンニューディールで推進されている製品を普及させるには、原材料となる素材の安定確保やリサイクルが大きな課題である。例えば、電気自動車のモーターや 2 次電池には、レアアースや Co, Ni, Li などのレアメタルが使用されるが、わが国の場合、これらのほとんどを海外に依存している。太陽電池に使われるシリコンも、原料である SiO₂ は地球上に広く存在しているが、工業用素材として還元処理された金属シリコンとなると、日本を始め多くの国々は電力の安い国に頼っている。シリコンを使わない太陽電池の新材料として研究が進んでいる CIGS (Cu, In, Ga, Se の化合物) でも、Cu, In, Ga, Se などのレアメタルが欠かせない。

日本版グリーンニューディールを進めて行くには、これらの原料や素材をグローバル競争の中で、安定的に確保していく必要がある。豊富な資源を持たない日本にとって有用廃棄物の有効活用が重要なポイントとなる。三菱総研の行った試算によると、日本の有用廃棄物には、現在、Co が約 6 年分、レアアースの 1 つである Nd が約

5 年分存在する。物質・材料研究機構の調査でも、日本の有用廃棄物を有効活用すれば、多くの金属資源について世界消費の 2 ～ 7 年分をまかなうことができるという。

グリーンニューディールは、地球温暖化対策という環境側面ばかりが強調されがちであるが、資源供給リスクへの適切な対応が不可欠ということを考えると、廃棄物を原料とする逆工場の概念を包含する産業構造への変革、発展にまで視野を広げるべきである。

生産や消費システムがグローバル化した今日、究極のリサイクルシステムの構築は日本単独では難しく、グローバル循環を見据えた適材と適循環を目指す必要がある。新たな産業構造について、自動車産業を例に考えると、HV 車、電気自動車、燃料電池自動車などの次世代自動車では、モーターや電池の小型化にレアメタルが必要である。レアメタルは現在でもモーター部分などに使われているが、パワステ向けなどの小型モーターが中心で、その量は少なく、金属として回収されたとしても、レアメタルの量的確保までにはいたらない。しかし、次世代自動車のモーターはエンジンに変わる基幹部品で、使用するレアメタルの量はこれまでとはけた違いに大きい。

自動車販売台数の約 7 割が次世代自動車になると、モーターの磁石に必要な Nd は現在の 500 トン弱から約 5,000 トン、Li 電池に必要な Co も現在の僅少量から 4 万トン以上に跳ね上がる。

レアメタルの回収と素材段階までのリサイクルは、産業として十分成り立つようになり、素材→部品→製品→使用というこれまでの流れを逆向きにした都市鉱山の採掘を起点とする Reverse Manufacturing が形成されることが考えられる。こうした新産業システムの構築は、厳しい環境下にある自動車産業を次世代自動車を核に再生し、将来に向けて安定的に成長させていく前提条件となるだろう。自動車産業に限らず、電機、IT など多くの分野でも、同様の可能性が考えられる。

6. 小型電子機器等の再資源化の促進に関する法律

使用済小型電子機器等の再資源化の促進に関する法律が、平成 25 年 4 月 1 日から施行された。使用済小型電子機器等（デジタルカメラ、ゲーム機等）は、その相当部分が廃棄物として排出され多くは一般廃棄物として市町村による処分が行われる。市町村により処分される場合には、鉄やアルミ等一部の金属しか回収できず、金や銅などの有用金属は埋立処分されている。このため、廃棄物の適正な処理及び資源の有効な利用の確保を図る観点から、使用済小型電子機器等の再資源化を適正かつ確実に行うことができる者についての認定制度を創設し、廃棄物の処理及び清掃に関する法律（昭和 45 年法律第

137号、廃棄物処理法)の特例措置等、所要の措置を講じ、使用済小型電子機器等の再資源化を促進していく必要がある。

このような現状に鑑み、使用済小型電子機器等の再資源化の促進に関する法律は第180回通常国会に提出され成立した。法案の概要は以下のようである。

(1) 基本方針の策定

主務大臣は、使用済小型電子機器等の再資源化の促進に関する基本方針を定めることとする。

(2) 再資源化事業計画の認定

使用済小型電子機器等の再資源化のための事業を行うとする者は、当該事業の実施に関する計画を作成し、主務大臣の認定を受けることができることとする。

(3) 特例措置

1) (2)の認定を受けた者が使用済小型電子機器等の再資源化に必要な行為を行うときは、廃棄物処理法に基づく一般廃棄物収集運搬業、一般廃棄物処分業、産業廃棄物収集運搬業および産業廃棄物処分業の許可は不要とする。

2) 使用済小型電子機器等の再資源化のための事業の用に供する施設を整備するために必要とする資金の調達のため、(2)の認定を受けた者については、産業廃棄物の処理に係る特定施設整備の促進に関する法律に基づき産業廃棄物処理事業振興財団が行う債務保証等の対象とする。

7. リサイクルの現状^{2,4,6,10}

携帯電話とパソコンは、通信事業者などが回収、再資源化に取り組んでいるが、回収台数は伸び悩んでいる。再資源化の面では、Au、Ag、Cuは国内銅製錬施設で取り出せるため、事業として成り立つ。レアメタルは既存施設では抽出できないものが多く、新施設を建設する必要があるが、大量の廃棄物を効率的に集荷する仕組みがなければ採算をとるのが困難である。

どうすればたくさん集められるだろうか。秋田県、福岡県などの7ヶ所でスーパーや公共施設に小型電子機器の回収箱を置き、どの程度集まるかを調べる国のモデル事業が行われた。この調査で、例えばAuは国内で販売された基板に含まれる約4.7トンのうち、約0.3トンが回収可能とされるなど、現状と課題が明らかになった。

経済産業省によると、2009年11月から全国で実施した使用済み携帯電話の回収キャンペーンの結果、約56万7000台を回収し、回収された携帯電話からAu 22kg(約9800万円)、Ag 79kg、Cu 5670kg、Pd 2kgなどが回収された。いずれも製錬企業に販売されて精製・再利用された。家庭などに眠っている使用済みの未回収携帯

電話は国内に2億台程度あるとされている。

携帯電話は家電製品などからレアメタルを回収できる有用廃棄物の代表格とみなされている。携帯電話は携帯音楽プレーヤーに次いで、AuやAgの含有量は高く、PdやBiは群を抜いて高い。携帯電話のリサイクルについては、通信事業者や携帯電話メーカーなどがモバイルリサイクルネットワークを組織して、東京都などの自治体と協力してリサイクルに取り組んでいる。

携帯電話だけ集めるのはナンセンスと指摘する研究者もいる。試算によると、家電製品に占める携帯電話の金属比率は重量で0.2%程度であり、携帯電話に含まれるレアメタルなどの金属の含有量は高いが、重量は小さく、資源性からみれば、必ずしも莫大とはいえないとして、CDプレーヤーやデジカメなど小型家電製品全体を見据えたリサイクルの必要性を訴えている。

8. リサイクルを考えた部品設計^{4,5}

パナソニックモバイルコミュニケーションズは携帯電話の設計者に実際に解体作業を体験してもらい、リサイクル時の課題を把握させている。分解のしやすさや単一素材の使用などリサイクル性を考慮したものづくりが重要と考えて、メーカー側も設計段階からのリサイクル促進に積極的な姿勢を示し始めた。メーカーが製造段階から部品を取り外し易い設計や規格の統一を行うことによって、解体時の手間やコストを抑えることが可能になる。国や自治体もレアメタルを含む廃家電・部品の移動や管理基準について、規制緩和を進める必要がある。資源小国「日本」の有用廃棄物を開拓できるか否かは、製造者とユーザーの意識の変化にかかっている。

携帯電話に含まれる金属の価値は1台100～150円で、レアメタルの価値は10円未満に過ぎない。価値の大半がAuとAgである。鉱石から取れるレアメタルがNiやCuの副産物が多いように、単独での回収はコスト面で採算に合わないことも大きな課題である。いくつかの電子機器に含まれるレアメタルの価値は以下のようである。

電子機器基板に含まれるレアメタルの地金相応価格概算値(単位:一台当り円)

ビデオカメラ	150
オーディオ	372
デジタルカメラ	110
ポータブルCDプレーヤー	67
ポータブルMDプレーヤー	108
液晶テレビ	70
DVDプレーヤー	32
電話機	10

カーナビ	21
ゲーム機	66
フラッシュメモリー	43
携帯電話	119

NdやDyなどのレアアースを使った希土類磁石は、優れた磁気特性からHDD（ハードデスクドライブ）やハイブリッド車のモーター、MRI検査装置、音響機器など幅広く使用されている。レアアース磁石の製造では、切屑や破損などの工程屑として全体の2割～3割が製造過程でのスクラップとなり、この工程屑は既にリサイクルされている。しかし、製品となって出まわっているレアアース磁石のリサイクルはあまり行われていない。HDDを例にとってみると、HDD全体に占める磁石の割合は2～3%程度である。信越化学や三徳がレアアース磁石のリサイクルを行っているが、70%含まれているFeをうまく処理する必要がある。消磁－粉碎－酸溶解－水酸化物沈殿法によるFeの除去－希土類の分離の湿式処理では、水酸化物沈殿に共沈するレアメタル成分が10%以上あり、技術的課題である。70%のFeと希土類成分とを効率よく分離してリサイクルするための技術のブレークスルーが必要である。

現在は技術的に可能なものもありながら、リサイクルコストが高く、市場も小さいためにあまり目を向けられていないレアアースのリサイクルについても、今後は重要視されてくるものと考えられる。

9. 技術のブレークスルー

廃棄物のリサイクルは難しい。2次電池、特にリチウムイオン電池（LIB）のリサイクルには問題が多い。用い

られる金属成分が多く、Al箔やCu箔に電極材料がコーティングされているからである。携帯電話やパソコンの電源に用いられてきたLIBがハイブリッド車や電気自動車に搭載されるようになり、LIBの需要は急増している。三菱自動車のアイミーブやアメリカ・シリコンバレーのテスラ社の電気自動車は初期の製品である。テスラ社のスポーツカーには18650型の小型LIBが7000個用いられ、電池価格だけで600万円ほどしたのは驚きであった。LIBの1kwhあたりの価格は2010年の10万円から2015年の3万円にまで低下すると思われる。生産量の増加と正極材料がLiCoO₂から3元系（LiCo_{1/3}Ni_{1/3}Mn_{1/3}O₂）、LiMn₂O₄と安価な材料に向かってゆくからである。さらに、LiFePO₄のような材料が使われる可能性があり、価格の低下とともに回収対象のレアメタルがなくなるという新たな問題が発生している。

自動車用途のリチウムイオン電池は、この3年間でいろいろな点で大きく変化した。形状は、18650型の鉄製ケースの円筒形電池からアルミ製長方形型の大型電池へと変わった。正極材はコバルト酸リチウムLiCoO₂を主成分とするものから、3成分系Li(Co_{1/3}Ni_{1/3}Mn_{1/3})O₂やAlを含むLi(Ni_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05})O₂やマンガン酸リチウムLiMn₂O₄へと変化した。このような短期間での組成の変化は、リサイクルという点で好ましくない。初期に検討されたリチウムイオン電池（LiCoO₂を主成分とする18650型電池）の処理プロセスは、電池の放電処理－焼成－粉碎－分級－磁力選別－ふるい下産物の湿式処理である（Fig.1参照）。価値の高いレアメタルはふるい下産物に含まれ、回収対象は主にCoとLiであった¹³⁻¹⁵（Fig.2参照）。残りは銅やアルミや鉄を含む銅濃縮物と鉄濃縮物の残渣となり、用途は少ない。固体残渣は銅製錬所や製鉄所で処理できるかもしれない。湿式処理工程でも

Fig. 1 Recycling process for lithium ion battery

Fig. 2 Composition of separated products of 18650 LIB

ふるい下産物の硫酸溶解液に含まれるFe, Al, Mnなどの除去をしなければならない。そのようなことで電池の75%以上は2次廃棄物である。

このような処理技術は、正極材が LiMn_2O_4 や LiFePO_4 と変化すると、なおさら適用できなくなる。ならば、10-15年後に多量に発生する使用済みリチウムイオン電池をほっておいていいのだろうか？いま、筆者らが考えている処理方法は、使用済みリチウムイオン電池のゼロエミッション化である。放電-電解液抜き取り-電極材取り出し-アルミ箔から正極材の剥離回収-銅箔からグラファイトの剥離回収のプロセスである。電解液は六フッ化リン酸リチウムを電解質として含むので、溶媒と分離して回収する。アルミ箔や銅箔やアルミケースはそれぞれの材料として利用する。グラファイトやセパレータはRDFとして利用、正極剤からはLiを回収する。このようにして、使用済みリチウムイオン電池のすべての部分を有効利用できるにすれば、リサイクル処理できると考えている。リチウムイオン電池のゼロエミッション化である。いま、このような方向で検討を進めている。

10. おわりに

レア金属の再資源化は、以前から技術的にある程度可能であったが、ほとんど行われてこなかった。それが

ここにきて、急に開花し始めている理由は、資源価格高騰によって、有用廃棄物からの金属リサイクルが採算にの可能性がある見え始めたことによる。

資源価格が大幅に上昇すれば、今まで手を付けられなかった資源の開発が可能になる。原油高騰を受けて、オイルシェールやメタンハイドレードの開発が加速しているのはその一例であるが、最近の再資源化ビジネスの盛り上がりも、これらと同様の現象と言える。

製造業企業にとって、資源価格高騰は原料高で収益を圧迫するマイナス要因であることは言うまでもない。しかし、一方で、資源高で資源リサイクル事業や代替素材開発の採算性が高まることにより、ビジネスチャンスが拡大する面がある点を見逃してはならない。最近のレア金属価格の上昇を背景に、多くの金属メーカーがレア金属のリサイクル事業に参入し、レア金属を回収する大型設備の建設に踏み出している。また、化学メーカーは、電気機器製造に不可欠なレア金属を含む素材の代替素材の開発を活発化させている。こうした動きは、決して一過性のものではなく、資源価格は時には一時的に反落し、調整局面になったりするが、中長期的には新興経済国の需要拡大と資源ナショナリズムの高まりを背景に高騰が不可避とみられる。このため、昨今の資源高を一過性のものでない不可逆的なパラダイムシフトと見なして、抜本的な対策を打ち始める企業が増えつつある。

資源価格高騰で生じたコスト構造などの環境変化を利用して、高い技術力を武器にして資源の生産面で新たな価値を創造すれば、資源高という逆境を勝機に変えることができる。有用廃棄物ビジネスの勃興は、日本企業のこのような可能性を教えてくれる事例として注目に値するものである。

References

1. M. Nanjou: Bulletin of the Research Institute of Mineral Dressing and Metallurgy, Tohoku University, **43**, (2), pp. 239–251 (1988)
2. T. Nakamura, E. Shibata, H. Shiratori: J. Japan Soc. Waste Man. Experts, **17**, (5), pp. 301–310 (2006)
3. H. Shiratori and T. Nakamura: J. MMIJ, **122**, (6, 7), pp. 325–329 (2006)
4. T. Yumoto and H. Shiratori: J. MMIJ, **125**, (2), pp. 75–80 (2009)
5. T. Yumoto, H. Shiratori, T. Nakamura: J. MMIJ, **126**, (3), pp. 95–102 (2010)
6. S. Kano, H. Shiratori, T. Nakamura: J. MMIJ, **125**, (10, 11), pp. 547–554 (2009)
7. H. Shiratori and T. Nakamura: J. MMIJ, **123**, (4, 5), pp. 171–178 (2007)
8. T. Nakamura: Bulletin of the Japan Institute of Metals, **30**, (8), pp. 706–715 (1991)
9. T. Nakamura and K. Hrada: Bull. Japan Inst. Metals, **41**, (11), pp. 744–749 (2002)
10. T. Okabe: Trans. Japan Inst. Electronics Packaging, **11**, (6), pp. 396–402 (2008)
11. National Institute for Materials Science: Special Issue for Rare Metal and Rare Earth, <http://www.nims.go.jp/research/elements/rare-metal/urban-mine/data.html>.
12. <http://www.env.go.jp/recycle/recycling/raremetals/law.html>.
13. S. Koyanaka, K. Horai, H. Kawai, S. Kato, J. Shibata, N. Murayama, T. Ohki, K. Masuda: J. MMIJ, **128**, (6), pp. 232–240 (2012)
14. S. Tanaka, H. Mukuta, K. Horai, N. Murayama, J. Shibata: Kagaku Kogaku Ronbunshu, **39**, (4), pp. 294–300 (2013)
15. S. Tanaka, H. Mukuta, N. Murayama, J. Shibata, T. Saeki: Kagaku Kogaku Ronbunshu, **39**, (5), pp. 466–471 (2013)