総 説

希少金属リサイクルのための物理選別技術開発

大木 達也^{1*}・古屋仲 茂樹¹・西須 佳宏¹・林 直人¹

Advanced Physical Separation Technology for Rare Metal Recycling

Tatsuya OKI¹, Shigeki KOYANAKA¹, Yoshihiro NISHISU¹ and Naohito HAYASHI¹

¹Advanced Recycling Technology Group, Research Institute for Environment Management,
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba 305-8569, Japan

Abstract

Physical separation is a technology to produce valuable metal powder from metals included in waste products. Many separation technologies are already used in conventional recycling processes for the recovery of common and precious metals. However, there are few separation technologies for the recovery of expensive metals such as tantalum and rare earth metals, which are called “rare-metals” in Japan, from small domestic appliances (SDAs). Advanced grinding, sorting and separation techniques have been investigated in our research group in order to recycle these metals from SDAs. Our representative studies for advanced physical separation processes are introduced, and the future picture of physical separation which we have painted is described in this report.

Key words: Recycling, Physical separation, Rare-metals, Grinding, Sorting

1. 緒 言

国内に広く分散して存在する廃製品等から希少金属を回収する所謂「都市鉱山」の開発においては、これらを合理的に収集できる社会基盤整備が、資源化への第一歩となる。これについては、すでに経済産業省や環境省がモデル地域に対して収集実験を行っており、種々、克服すべき課題はあるものの、システム構築に向けて着実に前進している¹。一方、廃製品等の継続的な大規模収集が実現したとしても、これらに含まれる全ての金属が資源化できるわけではない。既に中間処理－製錬技術が確立されている鉄、アルミ、銅、貴金属など、大規模かつ組織的な再資源化が可能な金属は、種類としてはごく限られている。特に多くの希少金属は廃製品中に低濃度でしか含まれず、そのまま湿式製錬工程で回収することは経済的に難しい。また、低濃度の貴金属を効率的に回収できる銅製錬工程でも、希少金属はスラグ側に配分されるものが多く、その回収は技術的に困難となる。

このような廃製品中に含有するより多くの希少金属に対して、資源価値を付与する1つの方法が物理選別によ

る金属の1次濃縮である。廃製品から資源を回収する際に最初に施されるプロセスであり、製錬の前処理工程であるので中間処理とも呼ばれる。廃製品を解体、粉碎、選別する工程からなるが、多種多様な製品から精度良く金属を回収するために、我が国においても、未だ多くの工程で手作業が多用されているのが実状である。しかし、希少金属を対象とした場合には、それが微小な部品であったり、製品中に極少量しか利用されていないなど、手作業による回収が著しく非効率であることが少なくない。また、国際競争力を維持した再資源化を目指すには、廃製品から希少金属を大量かつ低コストに回収するため、選別プロセスの機械化、あるいは既存機の最適化、高度化を図ることが不可欠となってくる。

これらの問題を解決するため、筆者らは、固体粒子の粉碎、選別、認識技術を駆使した物理選別の要素技術や、各種廃製品に特化した物理選別技術の開発を行っている。本稿では、その社会的ニーズと、筆者らが開発している代表的な物理選別技術の概要について紹介すると共に、我々が目指す物理選別技術の将来像とその役割について付記した。

キーワード：リサイクル、物理選別、レアメタル、粉碎、ソーティング

¹ 産業技術総合研究所環境管理技術研究部門リサイクル基盤技術研究グループ

平成23年6月21日受理

*e-mail: t-oki@aist.go.jp

2. 手選代替個別破碎・選別技術

2.1 製品の資源価値評価

従来の中間処理工程においては、廃製品を一緒くたに粉碎し、比重や磁性などの物性の差に基づいて、鉄やア

Fig. 1 3D-lazer sensing system

ルミなど一部の金属を回収していた。しかし、このようなベースメタルを回収する方法では、含有率の低い特定の希少金属のみを回収することは不可能に近い。また、廃製品中に含有する希少金属の量は、製品により様々である。例えば、携帯電話あるいはデジタルカメラといった同一種類の製品に限定したとしても、製造年代やメーカー、機種などにより、希少金属の構成は千差万別である。ここで、物理選別工程に投入する前に、予め特定の希少金属を多く含む製品だけを集めることができれば、その後、より高精度な選別ができる可能性も生まれる。例えば、製品中の希少金属元素含有量を記録したICチップを製品に貼付すれば、センサーでこれを読み込むことで、将来的には希少金属濃度別に製品を予備選別することも可能となろう。しかし、全ての製品にこの方式が普及し、かつ、これらが廃製品として中間処理されるまでには、10年から20年以上の月日が必要となる。

それまでの間、これに類するシステムを導入するための技術開発として、筆者らは、安価なセンシング技術を駆使した廃製品の総合的資源価値判断システムを検討している。アルミやマグネシウムの選別で実績のある3次元レーザーセンシング (Fig.1 参照) により、いくつかの製品について、3次元形状、体積、重量など、安価に計測可能な物性情報を取得している^{2,3}。ニューラルネットワークを駆使して、これらの物性情報と予め取得した製品の資源価値情報を照合しながら、製品及びその資源価値の判別を行うものである。この方法では、前述のICチップ貼付に比べ、選別の不確かさや製品情報の網羅性などが懸念されるが、比較的高品位の製品を予め抜き出すのに、必ずしも100%の選別精度は必要でなく、また、製品情報の整った特定の製品だけに限って実施したとしても一定の効果を期待することができる。現在、携帯電話など特定の製品について、部品レベルでの資源的価値を瞬時に判定、どのような物理選別工程が相応しいのか

Fig. 2 HDD cutting separator

を総合的に判断して、これらを自動選別するシステムの実現を目指している。

2.2 個別破碎・選別技術

製品を機械的に破碎する前に、破碎に適さない硬い部品や強力な磁石、あるいは破碎により価値が低下する部品などは、予め手解体、手選別により回収することが望ましい。しかしながら、我が国において、手解体、手選別を多用することは、大量処理を困難にするだけでなく、再生資源の国際競争力を失う結果にもなりかねない。その機械化を目指して検討を進めているのが、個別破碎技術である。これは、手解体の代替として、機械が対象物を1つ1つ認識しながら破碎を行う、筆者らが開発中の技術である。

現在、その手始めとして、ハードディスクドライブ (HDD) 用の磁石抜き取り装置、HDD カutting セパレータ (HDD-CS) を近畿工業株式会社と共同で開発中である (Fig.2 参照)⁴⁻⁶。HDD のボイスコイルモータには、ネオジウムやジスプロシウムなどのレアアースを含むネオジウム磁石が使用されており、その回収の期待が高まっている。しかし、HDD を通常の破碎機に投入して集合破碎すると、ネオジウム磁石が鉄スクラップとして回収されてしまうばかりでなく、その強力な磁力によって破碎機内に強固に磁着し、スクリーンの閉塞などトラブルの原因にもなる。また、運よく破碎機から排出されても、他の鉄片などと強固に磁着し高度な濃縮を達成することができない。

その1つの解決法が、事前に脱磁することである。ネオジウム磁石はキュリー点が比較的低いため、300°C 程度に加熱すれば概ね磁力が失われる。しかし、重量割合で

わずか2~3%しか含まれない磁石を脱磁するのに、HDD全体を加熱するのは効率が悪い。強力な磁場に置いて非加熱脱磁する方法も有力な手段であるが、装置が高価であるなど汎用性に課題がある。このような背景から、現状では手作業による解体が現実的な回収方法であるが、経済性や生産性に富む実用的な機械化技術が求められていた。

HDD-CS では、2 個の位置センサーと 4 個の磁気センサーを配し、HDD の表面に漏洩する磁気をセンシングすることで、ネオジム磁石を含有するボイスコイルモータ (VCM) の位置を非破壊で瞬時に特定することができる。その後、VCM 部を非磁性鋼製の刃の直下に搬送し、VCM 部のみを打ち抜くことにより、HDD を脱磁せずに、ネオジム磁石を 10 倍程度に濃縮することが可能である。処理時間は 1 台あたり 15 ~ 20 秒程度で、打ち抜かれたネオジム磁石部以外、HDD は、ほぼ無傷で回収できることも特徴の 1 つである。1/10 の量に濃縮された磁石部は、脱磁処理をしたのち、現在開発中の選択粉碎プロセスにより、ラボスケールにおいて、純度 94 ~ 97% 程度の脱磁されたネオジム磁石合金粉末を回収することに成功している。

HDD-CS は、現在、3.5 インチ HDD 専用機を試作した段階である。しかし、廃製品中の見えない部位をセンシングにより検知し、ピンポイントで切り抜く技術は、様々な対象物に対して適用が可能であり、今後、希少金属リサイクルの可能性を広げる重要な技術の 1 つとして発展することが期待される。

3. 集合破碎・選別技術

3.1 選択粉碎技術

使用済み製品から適当な部品レベルに選別されたものや、優先的に部品が取り出されたあとの製品は、集合粉碎 (従来の粉碎) 工程に送られる。この工程では、単に、粒子を目的のサイズにするためだけでなく、着目金属の単体分離 (1 粒子が 1 成分からなる状態) を促進させることが重要な目的となる⁷。物理選別は、粒子を選り分ける操作であるから、粒子が単体分離していなければ、高度な選別は達成されない。例えば、回収対象の着目粒子がある 1 種の金属元素である場合には、1 粒子がその金属元素から構成される状態を単体分離した状態と呼ぶ。また、着目粒子が特定の合金であれば 1 粒子が 1 種の合金からなる状態を、着目粒子が部品など特定の複合体ならば、それが 1 粒子として構成されていれば同様に単体分離したと扱ってよい。廃製品は人工物ゆえ、着目成分が複合体中で特定のドメインサイズを有していることが多い。また、破壊特性が極端に異なる物と隣り合って配

Fig. 3 Separation results using an active grinding

置されることも少なくなく、製品によっては天然鉱石に比べても、単体分離させやすい場合がある⁸。しかしながら、これまで、単体分離の促進を主目的に開発された破碎機はほとんどなく、現状においては、廃製品と既存粉碎機の膨大な組み合わせを検証して、偶然、特定の製品の単体分離に適した破碎機を見出す他に方法はない。

そこで筆者らは、単体分離の促進を主目的とした破碎技術の開発を手がけている。アクティブ粉碎 (Fig.3 参照) は、ハンマクラッシャの実時間的運転制御により、特定の素材を優先的に破壊したり、異相境界面での破壊を促進させる選択粉碎技術である^{9,10}。試料を連続バッチ式に投入し、ハンマの回転速度やスクリーンの開口の度合いを実時間的に制御し、最適化する。これにより、破碎初期に異相境界面にクラックを発生させ、その後、クラックなどの脆弱部に応力を集中させることで選択的な粉碎を促進させる。また、細粒化した粒子の排出を促すことで過粉碎を防ぐこともでき、結果的に粗粒段階での単体分離を達成させることができる。Fig.3 の検討例は、異なる銅品位の非実装プリント基板を用い、エアテーブル選別後の成績で、アクティブ粉碎と従来破碎機の単体分離の度合いを比較したものである。銅品位 59.4% の高品位プリント基板を従来型ハンマクラッシャで破碎後、エアテーブルで選別した場合、銅の品位 80.5%、総合分離効率 57.5% であった。一方、アクティブ粉碎を適用した例では、同じエアテーブルで選別しても、銅品位 35.0% の低品位プリント基板から、総合分離効率 73.6% で銅品位 84.3% の産物を得ることに成功した。

しかし、アクティブ粉碎も、必ずしも全ての廃製品の単体分離促進に有効な訳ではない。今後、個別の小型・

Fig. 4 Tantrum capacitors recovered with a pneumatic separator

中型家電製品等に対する実用的選択破碎機の選定、改造、開発へ展開することも予定している。

3.2 総合選別システム

選択粉碎により単体分離した粒子群が得られたとしても、この段階では、未だ複数成分粒子の混合物であり、着目成分を選別して回収しなければ意味がない。上述した非実装プリント基板のように、銅とガラス・エポキシ樹脂という単純な構成の場合には、比較的容易に最適選別条件を見出せることが多い。しかしながら、極めて多くの種類の粒子から構成される場合、特定の希少金属を含む粒子だけを選別することは容易なことではない。この場合、対象となる粒子群の情報をより正確に取得しなければ、精密な分離をすることは困難である。

そこで、筆者らはプリント基板に実装される電子素子を対象に、粒子群情報の調査を行った。プリント基板から剥離した 40 万個以上の電子素子について、種類、形状、サイズ、比重、磁性等の物性データや、篩分け、磁選、気流選別等の選別データを取得した。そして、この分析データに基づいて、重量割合で 3% 程度しか含まれないタンタルコンデンサを、回収率 90%、品位（重量割合）90% 程度に濃縮できる選別条件を突き止めた。回収されたタンタルコンデンサの例と選別プロセスの核となる気流選別機（実験用試験機）を Fig. 4 に示す。筆者らが提案する気流選別を含む 3 段階の選別プロセスが取り得た選別条件は約 4 兆通り存在したが、先に取得した粒子群情報の活用により、ごく短期間に最適選別条件を突き止めることができた¹¹⁾。

現在、素子選別データベースに基づく自動選別制御が

可能な、気流選別機のパイロット機を試作中である。また、筆者らが持つこの素子群の物性・選別データベースを利用し、任意の電子素子の選別判定が可能なソフトウェア「AIST 素子選別シミュレータ（仮称）」を開発中である。将来的にはこれらを応用し、希少金属を含有する製品や部品を自動的に認識しつつ、自律的な選別制御が可能な装置へと発展させる予定である。

4. 物理選別技術の将来展望

4.1 技術開発の展開

既述のように、廃製品は粗粒段階で単体分離を達成させることが理想である。しかし、粉碎をすれば少なからず細粒子が発生する。そして、製品によっては希少金属がこの細粒群に濃集する傾向を持つ場合もある。また、電極材や製造工程の研磨屑など、その機能や発生要因から必然的に細粒子として回収されるものもある。多成分が混在する成分分離、特に $50\ \mu\text{m}$ 以下の粒子を対象とした場合、旧来は浮選に代表される表面性質利用の湿式選別法しか選択肢がなかった。しかしながら、1980 年以降、強い遠心場を利用した比重選別機の開発が盛んになり、 $10\ \mu\text{m}$ 程度の粒子までケミカルフリーの比重選別が適用できる可能性が出てきている^{7,12)}。これらの新型比重選別機は強力な遠心場で細粒子を速やかに選別できるが、基本的な選別原理は従来機と変わりなく、選別精度が向上しているわけではない。そこで、筆者らは未利用の作用力であるコリオリの力を使った全く新しい原理の比重選別・分級装置を開発中である^{13,14)}。コリオリセパレータと名付けた本装置では、 $10\ \mu\text{m}$ 以上の金属粒子に対して極めてシャープな選別を、多成分同時に達成することが可能である。現在、さらに、シングルミクロン、サブミクロンを対象とした選別装置についても開発中である。

このような選別装置を駆使した場合、単に選別して特定成分を濃縮するだけでなく、特定サイズを有する粒子だけを取り出すことで、再生資源に付加価値を与えることも可能である。また、電球形蛍光灯からの希土類蛍光体の回収、希土類蛍光体を色別に選別したり¹⁵⁾、洗浄により再利用する技術など、細粒子に対する再利用、再資源化技術についても、研究を展開しているところである。

一方、物理選別においてはこのような要素技術の開発のみならず、膨大な選別パターンの組み合わせから最適パターンをシステムティックに選出する技術も重要である。さらに、選別プロセスの設備導入後も、入荷した廃製品に応じた操業条件の最適化も必要となる。筆者らでは、将来の物理選別技術に必要な開発要素として「革新的粉碎・選別装置開発」「最適選別プロセスの導入技術」

Fig. 5 Role of physical separation in the interface of resources recycling

「自動・自律的選別オペレーション」の3つの構築を重要課題として掲げており、これらを柱にした技術開発の展開を図っていく予定である。

4.2 物理選別技術が担う役割

金属資源の循環は、製品の製造、販売、消費、廃棄、収集、原料化に至る一連の工程で滞りなく流通することが重要となる。生産サイド、消費サイドの両者でリサイクルが促されても、この両者が上手く橋渡しできなければ、効率的な循環は実現しない。筆者らはそれを実現する技術が選別技術、備蓄技術及び易リサイクル設計であろうと考えており、この3つの技術を「資源循環インターフェース」と名付けた (Fig. 5 参照)^{8,16}。

将来、理想的な物理選別技術が開発されたとしても、製品の多様性から選別技術だけで全ての問題が解決するわけではない。どうしても効率的な選別ができない物については、製品段階から易リサイクル設計を盛り込むことで補ってもらうしかない。この際、過度に易リサイクル設計を取り込むことは、製品の価格や性能、利便性を損ない、消費者の購入意欲の低下、延いては我が国工業製品の国際競争力の低下に繋がりがかねない。筆者らは、易リサイクル設計に盛り込むべき必要最低限度の箇所は、選別技術の限界とリンクさせることが合理的であると考えている。選別技術側からこれらの情報を提供することにより、易リサイクル設計の導入が強く期待される箇所や思想を伝えることができ、製品本来の機能や魅力を極力損なうことなしに、効果的なリサイクルの促進がなされると期待される。一方、易リサイクル設計が導入され、また、選別技術を高度化しても、その時点では流通性に乏しい、種々のグレードの中間産物が少なからず発生する。有価か無価かという現在のデジタルな評価では、これらはほとんど無価になってしまうかもしれない。しかし、これらを再資源化可能な形で保管・備蓄しておく制度や技術が確立されれば、その存在自体が生み出す

無形の価値を含め、長期的に見れば我が国にとって重要な資源となるに違いない。そして、この保管・備蓄すべき金属の形態や発生量も、どのような中間産物が発生するかという、選別技術の発展に左右されることとなる。

このように、物理選別技術は、単にそれ自身の発展によって希少金属リサイクルを促進させるだけでなく、易リサイクル設計や備蓄技術導入の指針を示す、いわば資源循環インターフェースの司令塔として機能することが期待される。

5. 結 言

希少金属リサイクルのための選別技術は、希少金属資源循環の成否を左右する重要な技術として位置づけることができる。その個別の技術開発はまだ始まったばかりであり、筆者らは、まずは、物理選別の技術的な可能性を拡大するため、手選代替個別破碎・選別技術や集合破碎・選別技術といった、要素技術開発を進めてゆきたいと考えている。一方、現状においてその技術は、必ずしも系統的、組織的發展をするに至っておらず、このことが、選別技術の合理的導入や、資源循環インターフェースの司令塔として、その機能が十分に発揮できないことの要因となることが懸念される。このことから筆者らは、要素技術開発のみならず、情報整理による技術の大系化を進めることにより、物理選別技術の機能を最大化することで、我が国における希少金属資源循環の促進に貢献してゆきたいと考えている。

謝 辞

本稿で紹介した3次元レーザーセンシング技術はNEDO「マグネシウム鍛造部材技術開発プロジェクト」(H18-H22)、希土類蛍光体を色別に選別する技術はNEDO「高速合成、評価法による蛍光ランプ用蛍光体向け Tb, Eu 低減技術」(H21-H23)にて開発したものである。タンタルコンデンサの選別プロセスは「廃小型電子・電気機器からの希少金属等の回収—粉碎基板の物理選別」(H19-H22)、電球形蛍光ランプからの希土類蛍光体の回収は「廃蛍光ランプからのテルビウム等希土類金属抽出回収技術開発」(H21-H22)の各JOGMECとの共同研究により検討した技術である。また、アクティブ粉碎—エアテーブルによる基板からの銅濃縮技術は、韓国資源地質研究院(KIGAM)との共同研究「Development of Total Recycling Technologies for Wasted Electric and Electronic Appliances」(H18-H21)によって、資源循環インターフェースの概念構築は、環境省廃棄物等科研費「循環型社会ビジョン実現に向けた技術システムの評価モデ

ル構築と資源効率・環境効率の予測評価 (K2155)」(H20-H22)にて検討したものである。また、当研究グループの研究開発にご協力頂いた研究機関、自治体、民間企業の皆様に対しまして、深く感謝の意を表します。

References

1. MOE and METI: Shiyouzumi kogatakaden karano rare-metal kaisyu oyobi tekisei syori ni kansuru kenkyukai torimatome (2011)
2. S. Koyanaka and K. Kobayashi: RESOURCES, CONSERVATION & RECYCLING, **55**, pp. 515-523 (2011)
3. S. Koyanaka: Kankyo shigen kogakukai symposium 18th shiryousyu, pp. 19-26 (2009)
4. T. Oki: RARE EARTH, **56**, pp. 198-199 (2010)
5. T. Oki, N. Wada, M. Matsumoto: RARE EARTH, **58**, pp. 34-35 (2011)
6. T. Oki: Kinzoku, **81**, 2, pp. 37-40 (2011)
7. T. Oki: Funtai Gijutsu, **1**, 5, pp. 39-48 (2009)
8. T. Oki: Materia Japan, **50**, 2, pp. 51-55 (2011)
9. S. Koyanaka, S. Endoh, H. Ohya: REVIEW OF AUTOMOTIVE ENGINEERING, **27**, 2, pp. 353-355 (2006)
10. S. Koyanaka and K. Kobayashi: Resources Processing, **58**, 1, pp. 22-27 (2011)
11. T. Oki, Y. Naito, T. Kamiya, K. Kawakita, T. Shiratori: Proceedings of IMPC 2010, pp. 3839-3844 (2010)
12. T. Oki: Kankyo shigen kogakukai symposium 16th shiryousyu, pp. 24-30 (2008)
13. T. Oki, T. Hazumi, Y. Umemiya: MMIJ Syunki Taikai Koensyu, pp. 171-172 (2009)
14. T. Oki, T. Hazumi, Y. Umemiya: MMIJ Syunki Taikai Koensyu, pp. 167-168 (2010)
15. T. Akai, M. Yamashita, T. Oki: RARE EARTH, **58**, pp. 14-15 (2011)
16. T. Oki and N. Yamaguchi: Junkangata-Syakai Vision Jitsugen ni Muketa Gijutsu System no Hyoka Model Kochiku to Shigen-Koritsu-Kankyo-Koritsu no Yosoku Hyouka (K2155), pp. 122-152 (2010)