

廃製品の金属リサイクルにおける 中間処理技術への期待

大木 達也*

1. 緒 言

貴金属，レアメタルなどの希少金属あるいは枯渇性の高いベースメタルの国内供給源として，廃小型電気・電子機器などの廃製品からのリサイクルが注目されている．これらの廃製品は都市鉱山とも称されるが，国内に広く分散して眠っているため，合理的に収集できる社会基盤が整わなければ，資源化への道には繋がらない．これについては，現在，経済産業省と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，社会システム構築に向けて着実に前進している⁽¹⁾．

一方，廃製品の大量かつ継続的な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，貴金属等は，相応の効率で回収することが可能であるが，他の金属についてはそれが保証されているわけではない．特に多くのレアメタル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，多くのレアメタルはスラグ側に配分されるため，その回収は技術的に困難となる．

このようなレアメタルを含む廃製品中のより多くの金属に対して，資源価値を付与する1つの方法が中間処理による金属の1次濃縮である．中間処理とは廃製品を最初に解体，粉碎，選別し，粉体原料化する選別プロセスであり，廃製品中の各種金属，樹脂，ガラス等を再資源化できるかの鍵を握る重要な技術である．本報では，金属リサイクルにおいて，中間処理技術の展望と課題およびその期待される役割について概説する．

2. 選別技術の課題と展望

(1) 解体・粉碎と単体分離

白物家電やコピー機など，比較的大型の廃製品については，我が国においても手解体が多用される．はめ込み部分やビスなどを外すことにより，本体から外されたボディなどの塊(粒子)は，単一の組成を有する場合が多い．1つの塊(粒子)が単一の組成で構成されている状態を単体分離した状態と呼ぶ．中間処理における選別は，粒子分離操作であるから，粒子が単体分離した状態でなければ，高度な選別は達成されない．廃製品中の金属の場合，アルミや銅など，1粒子が1元素で構成される状態となれば単体分離していると言い，複数の成分から成る状態であれば片刃と呼ぶ．ただし，物理的に分離が困難な状態で多元素が共存している場合，例えば合金などにおいては，単一の合金からなる粒子は単体分離していると呼べる．また，着目粒子が複数の成分から構成された単位製品，例えば電子素子などの場合，それが単一粒子として存在していれば，たとえ更なる物理的分離が可能であったとしても，単体分離していると呼んで差し支えない．手解体が可能であれば，比較的容易に単体分離粒子を得ることができる．しかし，小型電気・電子機器などの小型製品やプリント基板に実装している各素子などをすべて手解体で処理することは経済的に限界があり，これらを機械的な粉碎に置き換える必要がある．

このように中間処理による粉碎は，粒子を均一化したり，流動化したりという目的よりも，単体分離を促進させ，後段の選別工程を効率的に作用させることの方が重要となる．この目的を達成させるためには，異相境界面に応力を集中させ，手解体のような単体分離を達成させることが理想である．しかし，天然鉱石を例にとれば，綺麗に異相境界面で破壊される選択粉碎が起きることは希で，むしろランダムに粉碎されてしまうことの方が多い．図1は着目成分のドメイン

* 産業技術総合研究所 研究グループ長(〒305-8569 つくば市小野川16-1)
The Role of a Physical Separation Technology on a Metal Recycling for Waste Products; Tatsuya Oki*(Advanced Recycling Technology Research Group, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba)
Keywords: metal recycling, E-scrap, physical separation, grinding, urban mining
2010年11月4日受理

サイズ分布に対する、粉碎サイズと単体分離度の関係を概念的に示したものである⁽²⁾。天然鉱石の場合、着目している特定の鉱物は広いドメインサイズ分布を有しているのが普通である。このとき完全にランダムな粉碎がなされると(図1(a)ランダム粉碎)、最大ドメインサイズと同じサイズの粉碎物中には、単体分離した粒子は1つも存在せず、最大ドメインサイズよりも小さな粒子から少しずつ単体分離し始める⁽³⁾。また、より選択的な粉碎がなされたとしても(図1(a)選択粉碎)、広いドメインサイズ分布を持つ天然鉱石では、単体分離開始のサイズが幾分粗粒側にシフトするだけで、粗粒段階で高い単体分離を達成することは希である。一方、プリント基板から素子を剥離するような場合、各素子が単一粒子として存在する状態を作れば、単体分離した粒子と見なすことができる(図1(b)選択粉碎)。ここで、プリント基板上の電子素子と、天然鉱石中の特定鉱物を比較してみる。3次元的な結合を持ち、空間に閉じこめられた鉱物ドメインに比べると、電子素子は基板と2次元的な結合しか持たず、結合面以外は開放されているため、これらを選択粉碎できる可能性は非常に高い。さらに、電子素子は人工物故、特定のサイズを有しており、言うなれば、極めて狭いドメインサイズ分布を持っていることになる。これらの特性を有効に利用すれば、すなわち、過粉碎せず、粉碎サイズを素子のドメインサイズに合わせて選択粉碎すれば、粗粒段階で単体分離が達成できる可能性がある。例えば、ドラム型衝撃式破砕機を用いた場合には、携帯電話やプリント基板上の素子が、ほぼ素子の原形を留めた状態で単体分離されることが確認されている⁽⁴⁾。しかしながら、このような成功例はまだ少なく、多種多様な製品に対し、効率的な選択粉碎が実施できる粉砕機、粉砕方法選定の検討は始まったばかりである⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾。

(2) ソーティングと選別

選択粉碎によって、粗粒段階で単体分離が達成されたとしても、まだ、粒子は混合された段階にある。例えば、着目する金属の含有率 100 ppm の金属粒子群の選別は、1万粒の中から1粒を選ぶ操作に相当する。センチオーダーの粒子の場合、丁寧に手選をすれば、高い精度で選別、濃縮できる

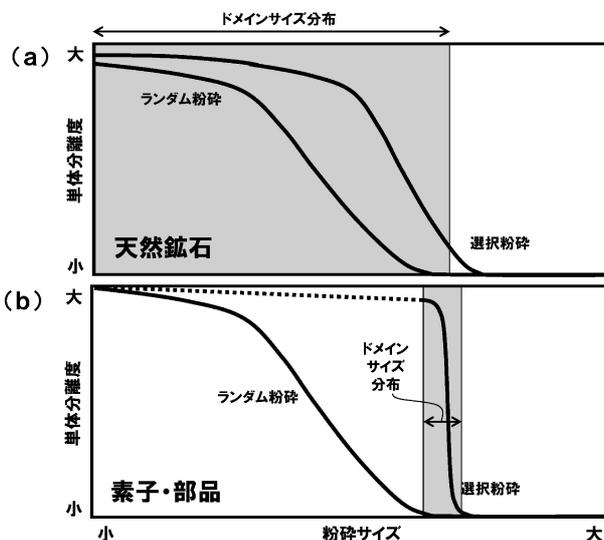
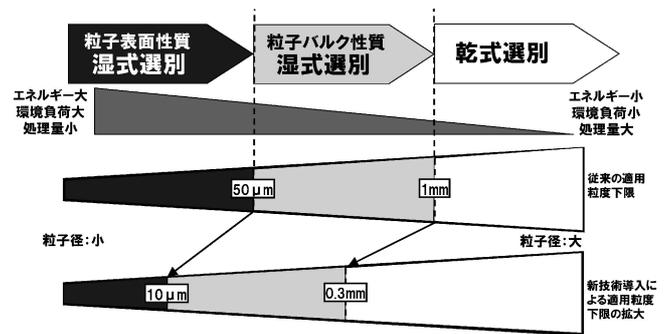


図1 素子・部品に対する粉砕方法と単体分離の関係。

が、手解体と同様に、全て粒子をこの方法で対応させるのは経済的に困難である。手選に代わり、コンベア上を移動する粒子の性質を何らかのセンサーで認識し、その情報に基づいて1粒子ずつ機械的に選り分けるのがソーティングである。1粒子ずつ分けるので個別選別と呼んでもよいであろう。圧縮空気などを使用することにより、ソーティング自体は数mm~300mm程度の粒子まで対応できる⁽⁹⁾。また、対象物の認識も、色や画像、透過X線や蛍光X線など、多様なセンシング方法が利用可能であり⁽⁴⁾、これらは、特に種類が限定された粒子群の選別には効果を発揮する。しかし、多種多様な粒子を対象とした場合には、精度良いセンシングができない場合が少なくない。また、一般に装置が高額になりがちでもあるが、近年、レーザー計測とニューラルネットワークの組み合わせによる安価なソーティング技術の検討もなされている⁽¹⁰⁾。

粒径が小さくなると、1粒子ずつ選り分けるのでは処理量に限界がある。この場合、粒子を集合体として選別した方が効率が良い。このような選別(バルク選別あるいは集合選別と呼んでも良いであろう)では、粒子物性による運動の差を直接的に利用して分離が行われる。よく利用される物性には粒子のバルク性質である密度(比重)、磁性や、粒子の表面性質である色、ぬれ性などがある。また、選別時の媒体により、気相(空気)中で行われる乾式選別と、液相(通常は水)中で行われる湿式選別に分類される。乾式選別法は大量処理が可能で、選別後の産物の回収も容易である。一方、バルク性質を利用した湿式選別法は、乾式法に比べて選別精度の向上が期待できるが、水循環の動力や回収産物の脱水、乾燥など、エネルギーやコストの面でやや不利となる。さらに表面性質を利用した湿式選別法では、界面活性剤等が利用されることが多く、上記に加えて廃水処理の負荷が大きくなる。導入の容易さだけを考えれば、乾式選別が有利であるが、これらの技術には、それぞれ適用粒径があるため、対象粒径に応じた選択が余儀なくされる。各選別技術の適用下限粒径について概念的にまとめたものを図2に示す。図中の下限粒径は便宜的に筆者の主観で記載したものである。その厳密な線引きは難しいが、ある程度信頼をもって適用できる下限粒径としては、例えば、乾式選別で1mm、バルク性質利用の湿式選別で50 μ mという数字があげられる。前述の素子のように、粗粒段階で単体分離がなされれば、乾式選別が適用でき、経済的かつ精度の良い選別が達成できる。一方、粉碎をすれば



*選別技術全体を概念的にとらえたものであり、個々の技術が全てこれに該当するわけではない

図2 選別技術の分類と適用粒度下限の概念。

少なからず 1 mm 以下の細粒子が発生する。そして、製品によっては一部の希少金属がこの粒径に濃集する傾向を持つため、将来的にはこれらの選別・回収も視野に入ってくる⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。特に 50 μm 以下の粒子となると、従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、近年、強い遠心場を利用した比重選別機の開発が盛んに行われており、10 μm 程度の粒子まで比重選別できる可能性が出てきている⁽³⁾。遠心場を利用した微粒子用比重選別機は、我が国ではほとんど普及しておらず、これを解説した文献もごく限られたものしかない⁽³⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。特に希少金属のリサイクルに対する適用可能性の検討⁽¹¹⁾はほとんど行われておらず、今後の展開が期待される。

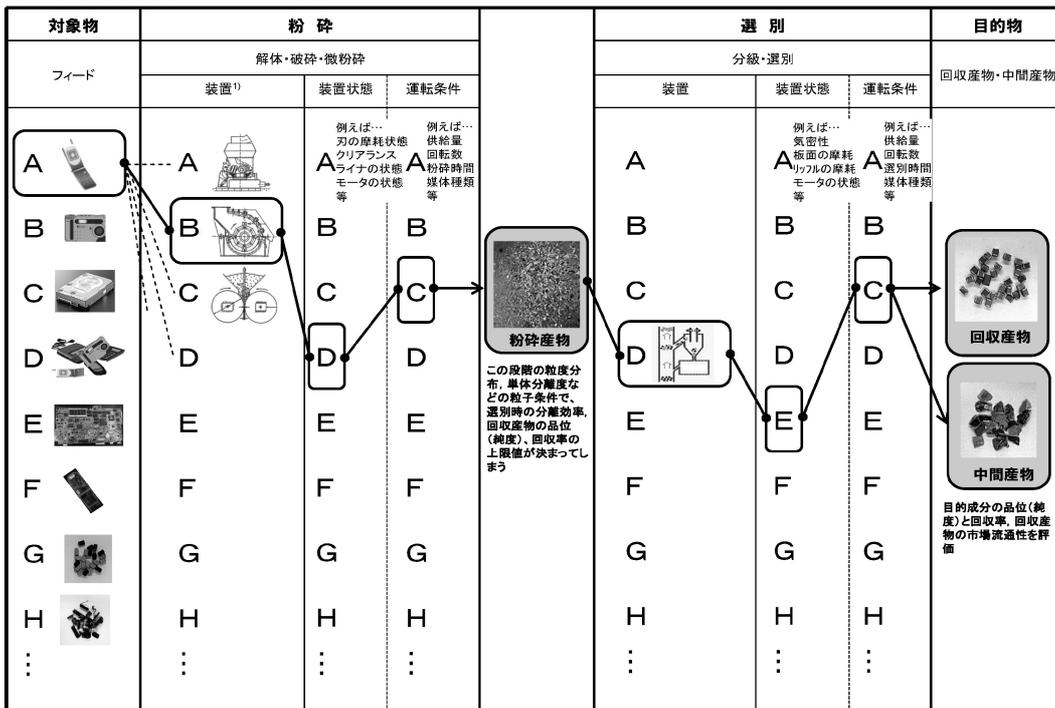
3. 選別プロセスの課題と展望

前章で記したようなリサイクルに適した個別の要素技術が開発されたとしても、これで希少金属の資源化が達成できるわけではない。製品は多種多様であり、また、新しい製品の開発に伴い廃製品の様相も時々刻々と変化してゆく。このような多様なバリエーション、あるいは時系列的変化に対応してゆくためには、柔軟な選別プロセスの構築が必要となる。しかしながら、最適選別プロセスの構築や最適選別条件の選出は、手探りで当たるしかない状態で、プロセスを合理的に構築する手法は未だ確立されていない。図3は、1 粉碎機と 1 選別機を組み合わせた、最も単純な選別プロセスのモデルを示したものである。選別プロセスに投入される対象物は、単一の製品、複数の製品あるいは基板や部品など、機種やメーカーを考慮しなくとも様々なパターンが存在する。粉碎機の種類、コンディション、選別条件も選択肢は様々である。

これによって得られた粉碎産物を選別する際にも、様々な種類の選別機、そのコンディションや選別条件など選択肢が生まれる。選択項目が7項目しかないこの単純なモデルでも、各項目にわずかに10の選択肢を想定して、選択のパターンは100万種類に、20の選択肢を想定すれば12億8000万種類のパターンが存在することになる。ここで、12億8000万分の1の最適条件が見いだせ、粉碎-選別共に100点満点の選択をすれば、100点満点の目的物が得られることになる。しかし、その絞り込みが幾分甘く、粉碎-選別共に70点の選択しかできなかった場合には、粉碎工程での単体分離の度合いが選別工程の分離効率の上限を決めてしまうため、すなわち両者は掛け算的に作用するため、例えば49点の目的物しか得られないことになる。さらに、粉碎法の選択が20点であれば、選別法の選択が100点満点であっても、20点の目的物しか得られない。このとき、目的物の品位や回収率だけを見ても、20点しか得られない原因が粉碎法にあるのか、選別法にあるのか、両者のせいなのかを判断することは難しい。つまり、選別された産物の成分分析を行っても、フィードバックにより適切なプロセスへの改善ができないという点も、その最適化を困難にしている要因である。

次に、ドラム型衝撃式破砕機を用い、プリント基板からほぼ原型を留めた状態で剥離した素子に対し、筆者が実際に、タンタルコンデンサの濃縮を試みた例を述べる。この際、はじめに剥離素子約37万個に対して、種類、サイズ、比重、磁性のキャラクタリゼーションを実施した。そして、重量割合で全体の約3%を占めるタンタルコンデンサを、スクリーニング-乾式比重選別-磁選の3段階のプロセスで85%程度まで濃縮することに成功した⁽²⁾⁽¹⁵⁾。筆者らの知る限り、廃製品から物理選別によってタンタルコンデンサを高濃縮した

小型電気・電子機器のリサイクルの中間処理プロセスで想定される選択肢の一例



経産省・環境省 平成21年度使用済小型家電からのレアメタルの回収及び適正処理に関する研究会提供資料(筆者作成)

図3 廃製品の中間処理プロセスモデルによる条件選択のイメージ。

