



金属資源のリサイクル技術 — 廃電子基板からのタンタル回収に適した単体分離法の検討 —

Recycling Technology for Metal Resources: Investigation of Liberation Technology for Tantalum Recovery from Spent Printed Circuit Board

所 千晴

Chiharu TOKORO

早稲田大学理工学術院 教授

Professor, Faculty of Science and Engineering, Waseda University, JAPAN

抄 録

近年、2次資源から有用金属を回収するための分離技術開発の重要性が増しているが、リサイクルプロセスの最前段に位置する破碎・粉砕技術は、目的成分を単体分離させ、リサイクルプロセス全体を省エネルギーかつ高精度化するための重要な技術である。廃電子基板中のタンタルはある特定の部品に集中して使用されていることから、タンタル回収には部品をできるだけ粉化させずに基板から剥離させ、物理選別にてタンタルが使用されている部品を濃縮させるような「部品剥離選別」が有効である。このような部品剥離には、ドラム型衝撃式破碎機が有効であるが、攪拌体形状は攪拌翼型よりもチェーン型の方が、より部品剥離に適していることがわかった。粉砕機内の部品剥離挙動を詳細に検討するために、粒子ベース剛体モデルを組み込んだDEMシミュレーションを行ったところ、チェーンのたわみがより大きな衝突エネルギーの伝達につながっていることが確認された。

ABSTRACT

An appropriate comminution for liberation of target materials from secondary resources is very important to achieve an energy saving recycling system with high separation efficiency. For tantalum (Ta) recovery from printed circuit boards (PCBs) in waste electric and electronic equipments (WEEEs), parts detachment from PCBs, which means disintegration of parts from the board without pulverization of them, is effective because Ta is generally used in a specific part on the board, that is, “tantalum capacitor”. High Ta concentrate was achieved by comminution using drum-typed agitation mill and chain-type agitator was better than rigid-type agitator. To reveal the mechanism of breakage phenomena in comminution/detachment process of PCBs, computer simulation using discrete element method (DEM) was carried out. Comminution test was conducted using simulant PCBs with solder-mounted capacitors and compared to simulation results in which the shape of simulant PCBs and chain of the agitator was represented using particle-based rigid body model. Simulation results suggested that chain-typed agitator mill promotes inter-action between a board and another board which is most important mechanism for parts detachment from the boards, because the chain could give wide variety of energy to boards due to their deformation.

1 はじめに

現在、都市鉱山とよばれる2次資源は、その経済的価値に加えて、最終処分場の逼迫や、環境規制物質の管理、資源セキュリティなど、その多種多様な側面から、金属回収に対する多方面からの社会的要請が高まっている。特にEUではかねてより「Resource Efficiency」という概念を打ち出し、既存の廃棄物管理の取り込みを超えた価値観で、資源効率の向上により経済と社会の持続的成長を図る政策の重要性を提唱していたが（喜多川和典，2016）、2015年12月に「Circular Economy」政策パッケージとして、サプライチェーン全体で幾重もの循環の輪を作り、消費スタイルそのものを変化させるような政策を発表している（EC，2016）。これは資源循環を政策の中心に据えた経済政策であり、今後、この分野に大きな投資がもたらされ、新たな価値観が創出される可能性があり、日本を含め世界が動向を注視している。この資源循環を中心とした取り組みには、EU内の資源、製錬、リサイクラー、ならびに電気メーカーなど、一部業種にとどまらず多業界にわたる企業が支援し、関与している点は注目に値する。

都市鉱山からの2次資源に対する金属濃縮技術は、鉱山からの鉱石と同様に、熱や薬剤によりイオン化させず固体のまま分離する固体分離技術と、熱や薬剤、あるいは電気によって溶かし、イオン化してさらに高度に分離濃縮する技術とに大別される。前者は選鉱や前処理、あるいは中間処理と呼ばれ、後者は製錬あるいは精錬と呼ばれることも多い。高精度、省エネルギーかつ低環境負荷な資源循環プロセスは両分離濃縮技術のベストミックスにより達成される。前者の固体分離技術は、目的成分の分離を省エネルギー型の金属回収プロセスで達成するために重要な技術であるものの、一般に分離はこれらの技術だけでは達成されず、さらに高純度化するための製錬技術の前段に位置することから、ある特定の金属のみに特化したプロセス開発は意味がなく、対象に含有されるすべての金属の最適な分配を常に考慮しながら、経済的にも環境的にも受容される技術を開発することが重要である。また、製錬プロセスにて回収目的成分以外から成る副産物をスラグと呼ぶが、スラグへ分配された金属成分は、そこから再

び分離回収することは極めて困難であるので、可能であれば製錬の前の前処理の段階で分離濃縮しておく必要がある。近年、都市鉱山からの回収の重要性が増しているレアメタルに分類される金属の多くは、ベースメタル製錬プロセスにおいてスラグに分配されることから、それらの金属に対しても固体分離技術開発の重要性が増している。

固体分離技術はその名の通り固体を固体のまま分離する技術であり、粒子径、密度、色度、磁気的特性、電気的特性、水に対するぬれ性、各種電磁波に対する応答特性など、あらゆる物理的あるいは物理化学的特性の違いを用いて分離するものであるが、その前に単体分離を促進するために実施される破碎および粉碎もまた全体の分離特性を左右する重要な技術である。いずれにしても、固体分離技術による2次資源の濃縮では、有用金属の含有濃度は鉱石に匹敵するかあるいはそれ以上であっても、その鉱物学的形態は鉱石と全く異なるため、比較的長い歴史を有する鉱石に対して培われた選鉱技術をそのまま2次資源に適用することはできず、2次資源に適した新たな前処理技術開発が必要不可欠である（所千晴，2016）。

以下では、廃小型家電からの基板回収ならびに基板からのタンタル（Ta）回収に適した破碎による単体分離法を検討した結果について紹介する。

2 部品剥離選別の重要性

使用済み電気・電子機器に含まれている廃電子基板は、国内で年間1500万 m^2 生産されており、密度換算すると年間約4万トンの生産量と推算されている（Herat S., 2007）。廃電子基板には、抵抗、コンデンサ、IC、コイルなどの様々な部品が実装されており、それらの部品に多種多様な希少金属が含有されている。しかし廃電子基板全体からすれば、希少金属の含有量はごくわずかである。例えば、廃携帯電話から回収される廃電子基板には、30%程度の銅（Cu）と0.1%程度の金（Au）が含有されているが、希少金属の使用量は全ての元素を合わせても10%以下でしかない。本研究で対象としたTaに至っては、含有量はわずか0.002%程度である。このように希少金属は少量使用されるのが常であるので、リサイクルプロセスの最前段に位置する破碎・粉碎プ

ロセスにおいて、例えば前述の廃電子基板をやみくもに細かくしてしまうと、全体で数%にも満たない希少金属が分散してしまい、それらの中から特定の希少金属を濃縮することは非常に困難となる（所千晴，2014）。

タンタルを始めとする一部の希少金属は、特定の実装部品にのみ集中して使用されていることが知られている。筆者らは、廃携帯電話から得た基板に実装されている部品を55種に分類し、それぞれの化学組成を分析することによって、各金属元素を回収するのに必要な部品種類数を求めたところ、**図1**のような結果が得られた（大和田秀二ら，2012）。すなわち、基板上のTaをはじめ、ネオジウム（Nd）、ジスプロシウム（Dy）、タングステン（W）といった希少金属は、特定の部品に集中して使用されている濃集型元素であり、それらの元素を濃縮させるためには、特定の部品を選択的に基板から剥離させ、回収するような「部品剥離選別」が有効であることが確認された。基板は一般にCu資源とみなされ、Cu製錬においてAu等の貴金属も同時に回収されるが、

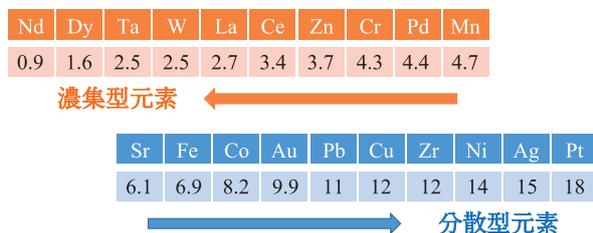


図1 各元素を90%回収するために必要な回収すべき部品種類数
Fig. 1 Necessary number of parts type for 90% recovery of each element

Taはスラグに分配し、Cu製錬における回収は困難であることから、Cu製錬の前の前処理工程にて、部品剥離によって部品と基板を単体剥離させ、さらに分級や比重選別等によってTaが集中的に使用されている部品を濃縮させることが、Ta回収には有効的である。

筆者らが各種破碎機を用いて、基板からの部品剥離に有効な破碎機を選定したところ、ドラム型衝撃式破碎機やハンマー型ミルなどの衝撃破碎が有効であることが確認された。以下では、2種類の攪拌体形状を有するドラム型衝撃式破碎機について、部品剥離性能についてDEM（Discrete Element Method）シミュレーションを用いて検討した結果を紹介する。

3 ドラム型衝撃式破碎機による部品剥離

本研究で用いた2種類のドラム型衝撃式破碎機の概要を**図2**および**3**に示す。**図2**に示したType A（パーツセパレータ，平田機工株式会社）は、攪拌翼式の破碎機であり、**図3**に示したType B（クロスフローシュレッダー S-1000，佐藤鉄工株式会社）は、攪拌体にチェーンを用いた破碎機である。Type Aのドラム直径および高さはともに0.86 mであり、ドラムは水平面に対して30°傾いている。また、底面に2個の突起を有する攪拌翼1枚とドラム壁面に2ヶ所の突起が設置されている。一方、Type Bのドラム直径および高さはともに1 mであり、ドラムは傾いていない。また、底面に攪拌体として2本のチェーンを有している。どちらの破碎機においても、ドラムそのものは回転せず、攪拌体である攪拌翼ま

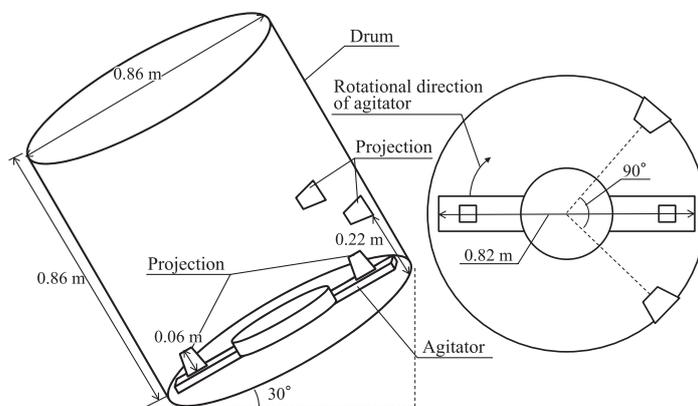


図2 攪拌翼型ミル（Type A）の概要
Fig. 2 Schematic of rigid agitator type mill (Type A)

解説

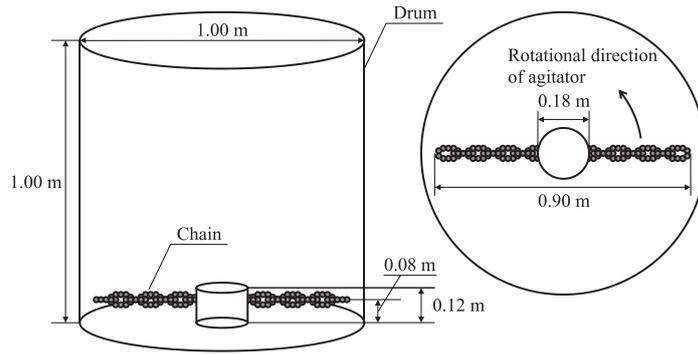


図3 チェーン型ミル (Type B) の概要
Fig. 3 Schematic of chain type mill (Type B)

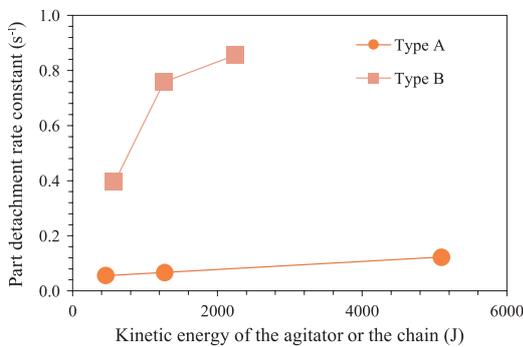


図4 部品剥離速度定数の比較
Fig. 4 Comparison of rate constant for parts detachment

たはチェーンのみが回転する。なお、Type A の攪拌翼重量は 16 kg であり、Type B のチェーン重量は 9 kg である。

これらのミルの部品剥離特性を定量的に比較するため、実装部品数と箇所を統一した模擬基板を作成し、部品剥離速度定数を計測したところ、図4に示すように、チェーン型ミルの方が攪拌翼型ミルより

も圧倒的に高い部品剥離特性を有することが確認された(綱澤有輝ら, 2014)。

チェーン型ミルが攪拌翼型ミルに比べて高い部品剥離特性を有する理由について検討するために、DEM シミュレーションによって基板と攪拌体との衝突過程を詳細に検討したところ、攪拌翼型ミルでは基板が攪拌翼の1点と1度だけ衝突するのに対して、チェーン型ミルではチェーンがたわむことによって、基板がチェーンのリング内側と衝突した後、チェーンのリング外側とも衝突していることが確認された。この現象によって、攪拌翼型に比べてチェーン型では、より大きな衝突エネルギーを基板に与えていることがわかった(図5)。

さらに詳細に部品剥離機構を解明するために、それぞれの攪拌体の有する運動エネルギーを 1270 J (攪拌翼型では 500 rpm, チェーン型では 563 rpm) に統一して、DEM シミュレーションより得られた衝突エネルギーを詳細に解析した。図6は、衝突を、基板と部品間の衝突、基板と部品以外の衝突、部品

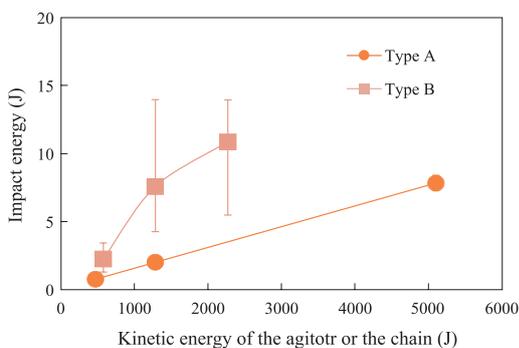


図5 基板1枚と攪拌体との衝突エネルギー
Fig. 5 Impact energy between a board and agitator

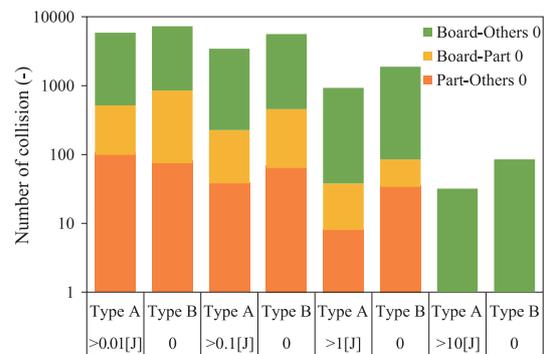


図6 各衝突エネルギーにおける衝突回数
Fig. 6 Number of collision in each impact energy

と基板以外の衝突の3つに分類し、衝突エネルギーの大きさごとに比較したものであるが、図より、どの衝突エネルギーにおいても、攪拌翼型 (Type A) よりもチェーン型 (Type B) の方が衝突回数は大きいことがわかる。衝突対象の内訳をみると、Type B では特に部品への衝突回数が Type A よりも大きい。別途行った部品剥離に要するエネルギー測定より、0.45 J 以上の衝撃エネルギーによって1回の衝突で部品が剥離し、それ未満であっても例えば0.10 J の衝撃エネルギーでは6回の衝突で部品の剥離に至ることが確認されたことから、それぞれの破砕機内で部品は剥離に至る十分なエネルギーを得ていることがわかった。

4 おわりに

本報では、タンタルなどの希少金属を廃電子基板

から回収することに焦点をあて、ドラム型衝撃式破砕機による基板からの部品剥離が有効であることを示すと共に、DEM シミュレーションを用いた考察例を紹介した。リサイクルプロセスにおいて、破砕・粉砕は最前段に位置し、プロセス全体の効率を決定する重要な単位操作である。しかし、希少金属のリサイクルにおいては、対象とする元素ごとに事情が異なる上に、廃棄物の特性も多種多様であり、さらには時代による移り変わりも激しい。したがって、対象ごとに有効な単体分離技術の検討が必要であると共に、それらを学問的に一般化するための、各種複雑体における破壊科学の確立もまた重要である。リサイクリングプロセスにおける単体分離技術およびプロセスの確立に対する重要性は国連環境計画 (UNEP) 国際資源パネルの報告書においても指摘されており (UNEP, 2013)、今後の発展が期待される。

References

- 1) EC (European Commissions), Circular Economy Strategy, (2016), <ec.europa.eu/environment/circular-economy/index_en.htm> accessed 05.09.2016.
- 2) Herat S., Sustainable Management of Electronic Waste (e-Waste), Clean, 35 (2007) 305–310.
- 3) UNEP (United Nations Environment Programme), Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure (2013) <www.unep.org/resourcepanel/AreaofResearchPublications/AssessmentAreasReports/Metals/tabid/133333/Default.aspx> accessed 05.09.2016.
- 4) 大和田 秀二, 古賀 千香子, 影山 創, 所 千晴, 白鳥 寿一, 湯本 徹也, 新規粉砕と部品・粉体選別による廃携帯電話中のレアメタル濃縮, Journal of MMIJ, 128 (2012) 626–632.
- 5) 喜多川 和典, 欧州における資源効率・循環経済政策に関する議論, エネルギー・資源, 37 (2016) 139–143.
- 6) 網澤 有輝, 田原 一輝, 細田 幸佑, 所 千晴, 大和田 秀二, 電子基板からの部品剥離に対する攪拌翼式ドラム型衝撃式破砕機の性能比較, 粉体工学会誌, 51 (2014) 19–27.
- 7) 所 千晴, 大和田 秀二, 希少金属回収のための粉砕シミュレーション, 粉砕技術, 6 (2014) 607–611.
- 8) 所 千晴, 資源循環に寄与する固体分離技術に対する社会のニーズを考える, 化学工学会第48回秋季大会 (Tokushima, Sept. 6–8, 2016), A204.

〈著者紹介〉



所 千晴 Chiharu TOKORO

〔経歴〕 2003年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了, 2004年早稲田大学理工学部助手, 2007年早稲田大学理工学術院専任講師, 2009年同准教授を経て, 2014年より教授 (現職)。

〔専門〕 資源循環工学。

最近では, 難処理鉱石の選鉱技術, 2次資源を対象とした単体分離技術, 無機元素汚染廃水処理, 等を対象とした研究に取り組んでいる。

〔連絡先〕 tokoro@waseda.jp