

# 都市鉱山の戦略的な開発を支える物理選別技術

## — 未利用・難処理資源の開発と我が国の資源ビジョン —

大木 達也

我が国ではものづくりを支える天然金属資源のほとんどを海外からの輸入に依存しており、近年、価格の急騰や輸出規制等によりその安定供給が危ぶまれる事態が続いた。都市鉱山はこのようなリスクに対応し得る有望な自国資源であるが、レアメタル等の金属集積度は必ずしも高くなく、省コストに1次濃縮できる物理選別技術の適用が欠かせない。廃製品からレアメタルを元素ごとに取り出す行為はまだ誰も経験したことがなく、新しい思想の選別技術が必要となる。本報では、物理選別の技術革新によるレアメタルリサイクルの実現から、物理選別を核に金属資源の国内循環を図る「戦略的都市鉱山」を目指した将来構想について紹介する。

キーワード: 都市鉱山、リサイクル、レアメタル、物理選別、タンタル、戦略的都市鉱山

## Physical separation technology to support the strategic development of urban mining

– Development of unused/hard-to-use resources and a future vision of resources for Japan –

Tatsuya OKI

Most of the natural metal resources supporting manufacturing in Japan are imported from foreign countries. In recent years, the need for a stable supply is an ongoing serious issue in the face of sudden price rises or export regulations. Urban mining is a promising way of using domestic resources to minimize this risk. However, because the degree of integration of metals, including rare metals, in products is not necessarily high, the use of a physical separation technology that can concentrate such metals and save costs is indispensable. Moreover, because we lack experience in recovering some types of individual rare metal elements from waste products, innovative separation technologies are needed. In this report, I introduce ways of achieving rare metal recycling through innovations in physical separation. I also present a plan for “strategic urban mining” that has physical separation technology at its core and is aimed at domestic circulation of metal resources.

Keywords: Urban mine, recycling, rare-metal, physical separation, tantalum, strategic urban mining

### 1 はじめに

我が国では、ものづくりを支える金属資源のほとんどを海外からの輸入に依存している。近年、レアメタル価格の急騰や輸出規制等によりその安定供給が危ぶまれる事態が続いた。金属資源は元素（鉱種）ごとに特徴的な機能を有するため、エネルギー資源とは異なって他の金属資源で置き換えることが難しい。したがって、使用量はごく僅かであっても、特定の金属の供給が滞ると、それを使用する製品が国内で生産できなくなる恐れがある。長期的に見れば、技術立国日本の根幹を揺るがす事態に発展することも懸念される。また、製品自体に寿命が来ても、金属は製造時とおよそ同様の状態にあり、理論的には完全に元の原料に戻すことができる。すなわち、循環使用が可能である。我が国には多くの廃製品が

残されており、有望な資源として期待できることから、1980年代に南条道夫氏（東北大）が命名した「都市鉱山」という言葉が再び使用されることが多くなった。しかし、廃製品は国土に散在しており、天然鉱山に比べて必ずしも金属集積度は高くない。このような難処理資源を開発する上では、金属を省コストに1次濃縮できる物理選別技術の適用が欠かせない。特に、廃製品からレアメタルを元素ごとに取り出す行為は、まだ誰も経験したことがなく、新しい思想の物理選別技術が必要となる。本報では、物理選別の技術革新によるレアメタルリサイクルの実現から、これまで脇役であった物理選別を核にして金属資源の国内循環を促進する、「戦略的都市鉱山」の構築を目指した取り組みを紹介する。

産業技術総合研究所 環境管理技術研究部門 〒305-8569 つくば市小野川 16-1 つくば西  
Research Institute for Environmental Management Technology, AIST Tsukuba West, 16-1 Onogawa, Tsukuba 305-8569, Japan E-mail: t-oki@aist.go.jp

Original manuscript received January 20, 2013, Revisions received July 9, 2013, Accepted July 9, 2013

## 2 難処理資源開発を実現する物理選別技術

### 2.1 都市鉱山開発における物理選別技術の重要性

我が国には現在稼働している金属鉱山はほとんどないが、輸入した金属原料が製品や廃製品の形で国土のどこかに存在する。国土に眠る廃製品は「都市鉱山 (urban mine)」と呼ばれることが多くなった。しかし、鉱山と称するには、一定の経済性をもって資源を取り出すことができなければならない。したがって、国土のどこかにあるという段階では、鉱山とは呼べない。天然鉱山は地球がとてつもなく長い時間をかけて資源を濃縮したものであり、金属集積度の高い大量の廃製品が自然に集まるわけではない。すなわち、「都市鉱山 (urban mine)」がどこかに存在するのではなく、人類が意図的に「都市鉱山開発 (urban mining)」して初めてその存在が具現化する。都市鉱山開発とは、人工的に集積するためのエネルギーを最小限化する技術といえる。

当初、都市鉱山の開発では、廃製品の収集等社会システムの整備による「量の確保」が優先された。我が国ではすでに、1990年代の法整備に伴い大型廃家電等のリサイクルインフラが整っていたため、廃製品を収集すれば容易にレアメタルが回収できるとの認識が強かった。しかし、現実には、既存のリサイクル施設で廃製品からレアメタルを取り出すことはできなかった。1990年当時は廃棄物処分場の逼迫が社会問題となっており、量の多い、鉄、アルミ、プラスチック等をリサイクルして最終処分量を減容する、環境制約に基づいた「量のリサイクル」が主体であった。一方、2008年から指定地域で実施された小型家電の回収事業では、対象はレアメタルに変わった。各種レアメタルの濃度は数百～数千 ppm 程度であり、いわば資源制約に基づく「質のリサイクル」が要求される。旧来のリサイクルインフラで小型家電からレアメタルを回収することは、鶴嘴 (ツルハシ) で外科手術を試みるようなものであった。量のリサイクルから質のリサイクルへ、技術転換の必要性が社会に認識されたのはやっと 2010 年頃のことである。

廃製品中のレアメタルは、製品内に限定的に使用されており、鉄やアルミ等の構造材に比べて含有率が低いため、そのままでは化学試薬を用いる湿式製錬での経済的回収は難しい。また、高温反応を利用する乾式製錬では、低濃度の銅や貴金属を効率的に回収できるが、多くのレアメタルは熱溶融してガラス状のスラグ内に分散してしまうため、技術的に回収は困難である。廃製品からレアメタルを回収するには、製錬前に物理選別によって、銅や貴金属と分離しておくことが不可欠となる。なお、「レアメタル」とは世界共通の用語ではない。我が国で

は 1980 年代にレアアース 17 元素を含む 47 元素がレアメタルと定められている。あるいはレアアースを 1 種として 31 鉱種と呼んだりする。「レアメタル」という用語を使わない国も多く、使っても定義が異なる。近年は、英語圏でも日本語の「Rare metal」を使用する例が見られる。しかし、貴金属のうち白金とパラジウムだけがレアメタルで、金や銀はレアメタルでないなど、一つのグループとして扱うことの合理性を疑問視する声もある。このことから、著者は個人的に、我が国にとって戦略的な金属資源を総称して「戦略メタル」という言葉を併用している。

### 2.2 物理選別の技術的課題

レアメタルを銅・貴金属と事前に物理選別するには廃製品個別の課題も多いが、ここでは、基礎的な共通課題について述べる。廃製品は多くの成分が組み合わさったいわば複合粒子であり、一般的には「粉碎」によってバラバラにすることが先決となる。多くの工業プロセスでの粉碎の効用は、流動性、加工性や反応性の向上等であり、粉碎によって粉体の「均一化」を図ることが目的である。一方、物理選別での粉碎の目的は、唯一「単体分離」の促進にあるといっても過言ではない。単体分離とは、1 粒子が 1 成分で構成された状態にすること、あるいは、なった状態を呼ぶ。この「成分」とは回収対象物であり、状況に応じて回収したい元素や合金、部品等を指す。つまり、粉碎は単体分離という粉体の「不均一化」操作をする選別前処理と位置づけられる。物理選別は固体粒子を選り分ける操作であるから、事前に粒子を単体分離しておかなければ、その後、いかなる技術を駆使しても高度な選別はできない。図 1 は粉碎による単体分離の進行と、粉体の不均一化の関係を著者の視点でまとめたものである。多成分からなる複合粒子 (出発粒子) は粉碎が進み細分化されると、次第に単成分からなる単体分離粒子の集合体となり、粒子相互の組成にムラが生じて不均一状態となる。これが、粗粒 (粒子が大きい) 段階で達成されるのが理想である (粉碎の結果としてミックスナッツのような状態となるイメージ)。しかし、ここからさらに粉碎したり、微粉碎によってようやく単体分離が達成される場合には、集合体としての均一化 (良く混ざった状態) が進行してしまい、今度は、選別によって特定粒子を回収することが困難となる (七味唐辛子のイメージ)。このように、粉碎による単体分離の促進とは、集合体としての不均一性を犠牲にしながら、個別粒子の不均一化を達成させる行為といえる。したがって、できる限り粗粒段階で単体分離を達成させることが肝要であり、決して過剰に微粉碎してはいけない。また、粉

砕しても細分化されるだけで、単体分離が全く進行しないもの（インスタントコーヒーのイメージ）は、物理選別の対象とはなり得ない。

図1の粉碎工程において、複合粒子が一様に粉碎される「ランダム粉碎」より、選択的に粉碎される方が、良好な単体分離を達成させることが可能となる。粗粒段階で単体分離を達成させる粉碎方法は「選択粉碎」と呼ばれ、最も重要な物理選別の前処理操作の一つである。しかし、多種多様な対象物の物性や構造に対応する必要があるため、選択粉碎は技術的に難易度が高く、万能な選択粉碎機なる装置は存在しない。現状では、特定の対象物に対して偶然に各種粉碎機を選択粉碎性が見いだされるのを待つしかなく、理論的・組織的なアプローチによる技術の体系化が望まれている。

都合よく単体分離されたとしても、粉碎した段階ではいまだ種々の粒子が混在した状態であり、選別操作が必要である。物理選別では、各種の粒子物性の差が利用される。気相（通常は空気）で行う乾式選別は、乾燥や水処理が不要なため省コスト、低環境負荷に選別することができる。一方、液相（通常は水）で行う湿式選別では高い分離精度が期待できる場合もあるが、水循環動力や乾燥等が必要で、エネルギーやコストの面で不利となる。また、湿式選別でも、多量の界面活性剤等を使用する粒子表面性質を利用した方法では、粒子バルク性質を利用した方法に比べて廃水処理の負荷が大きくなる。以上の理由からリサイクルでは乾式選別が好まれるが、各選別法には適用粒径の制限があり、乾式選別だけで完結

するとは限らない。適用粒径下限の線引きは難しいが、目安として、乾式選別で1 mm、バルク性質利用の湿式選別で50 μm程度であり、それ以下では表面性質利用の湿式選別に頼る必要がある。つまり、物理選別の省エネ・省コストの鍵を握るのは、前処理の粉碎工程でいかに粗粒段階で単体分離させるかに関わってくる。

図2は、1 粉碎工程-1 選別工程からなる最も単純な物理選別プロセスのモデルである。出発物質としてはさまざまな廃製品が単一種で、あるいは混合されて、あるいはプリント基板等が取り出されて投入される。粉碎機の種類も多種多様であり、そのコンディションや運転条件によっても粉碎のされ方は全く異なる。ここで最適な粉碎条件を選択し、選択粉碎により粗粒段階で単体分離できれば、後段の選別工程を極めて有利に実施できる。しかし、これらの膨大な組み合わせから、選択粉碎が達成できる条件はごく僅かであり、いまだほとんどの廃製品について選択粉碎条件は見いだされていない。レアメタルのリサイクルでは、このような状況下で得られた粉碎物に対して、単体分離不十分と認識されずに、後段の選別方法を模索している例も少なくない。物理選別プロセスの効果は、粉碎性能と選別性能の相乗作用で決まるので、後段だけに優秀な選別機を備えていても意味がなく、選択粉碎による単体分離の効率的な達成は、成功への最初の鍵となる。

一方、理想的な単体分離が達成できても、いまだ粒子は混合状態にあり、選別のためのお膳立てが整ったにすぎない。上述したように各選別法には適用粒度がある

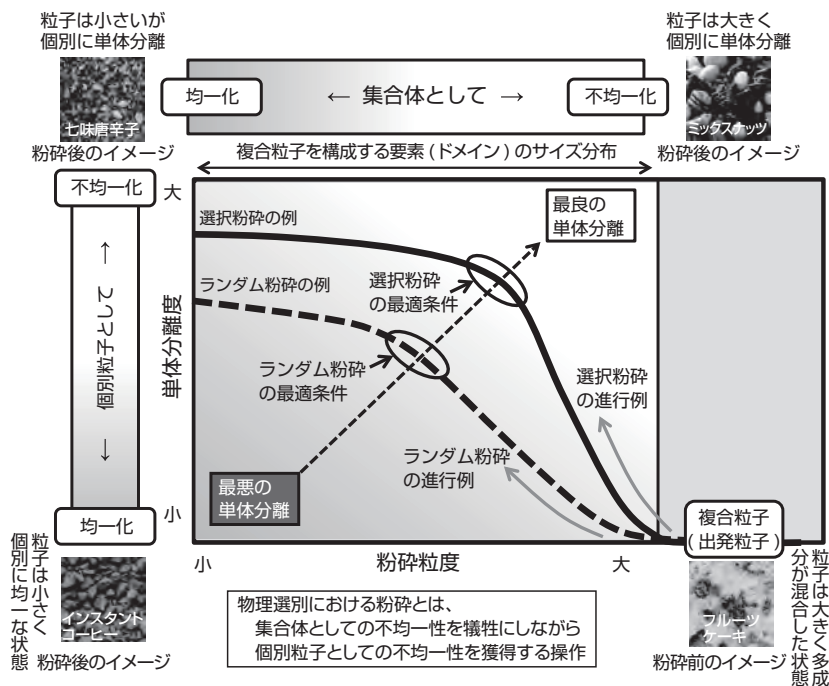


図1 粉碎による単体分離の進行と粉体の不均一化の関係



が、乾式選別が適用できたとしても、利用する粒子物性（サイズ、形状、比重、磁性、導電性、色、X線透過率等）に応じてさまざまなタイプの装置があり、一つの物性に対してもさらに多くの選別機が存在する。また、粉碎機と同様に、コンディションや運転条件によって選別のされ方は全く異なる。図2に示した1粉碎工程-1選別工程の単純なモデルでもパラメータは7種あり、それぞれ少なくとも数十の選択肢があるので、取り得るパターンは数千億通りにも及ぶ。実際には、2～3の粉碎工程と3～10程度の選別工程が実施されるので、そのパターンは天文学的な数値となる。都市鉱山のような難処理資源で理想的な物理選別を実現する条件は、このうちのごく僅かのパターンに限定される。また、同様の組成の鉱石が数十年にわたって採掘される天然鉱山と異なり、都市鉱山では製品サイクルが早く、廃製品ごとに含まれているレアメタルの種類、形態および量も異なるため、特定の対象物に対する選別パターンの有効期限が数年と短い。膨大な選択肢から僅かな時間で最適条件を導き出すことが困難なため、現状では極めて不満足な選別条件下で処理することを余儀なくされている。

### 3 物理選別の革新によるリサイクルの実現

#### 3.1 手解体・手選別代替技術～イージーセンシング～

単体分離を実現する選択粉碎条件を見いだすことは難しいが、回収物のサイズが比較的大きければ、個別に「解体」することで単体分離が図れる。実際、大型家電からモーターを取り出す工程等では、我が国でも手解体が行われ、そのまま目的部品を手選別で回収することも少な

くない。廃製品は複雑な構造をもち、日々変化することから、手解体・手選別は単体分離-回収を実現する最も確実な方法である。しかし、経済性、生産性、国際競争力といった点から、我が国でこの方法を適用するには限界があるため、その機械化を促す研究が進んでいる。完全自動の解体技術が実現した例はないが、手選別を自動化するソーティング技術は種々存在する。これらは製造工程で使用する高度なセンシング技術を転用した高価な装置が多く、均質な粒子群から不適合物を取り出すことは得意であるが、ばらつきが大きい廃製品解体物を対象とした場合には、十分な性能が得られないことも少なくない。

そこで著者は、対象物を限定した低価格の手解体・手選別代替装置を「イージーセンシング」と名付けて開発している。これは、高価なセンサーの代わりに、人の五感程度の安価なセンサーを複数組み合わせ、また、製品情報に基づいた制御により高精度な選別を達成させる技術である。例えば、著者はハードディスクドライブ（HDD）から、レアアースを含むネオジウム磁石を高純度で回収する2段階粉碎選別法を提案しているが、その中で開発した「HDD カuttingセパレータ（HDD-CS）」がその一つである。HDDを普通に粉碎すると、強力なネオジウム磁石が粉碎機内に強固に磁着し、スクリーンの閉塞等のトラブルを招く。運良く粉碎機外に排出されても、近傍の破碎鋼板と直ちに磁気凝集体を形成するため単体分離が達成できない。このようなことから、物理選別の一環として脱磁工程を取り入れるのが一般である。ネオジウム磁石はCurie温度が低いため、350℃前後

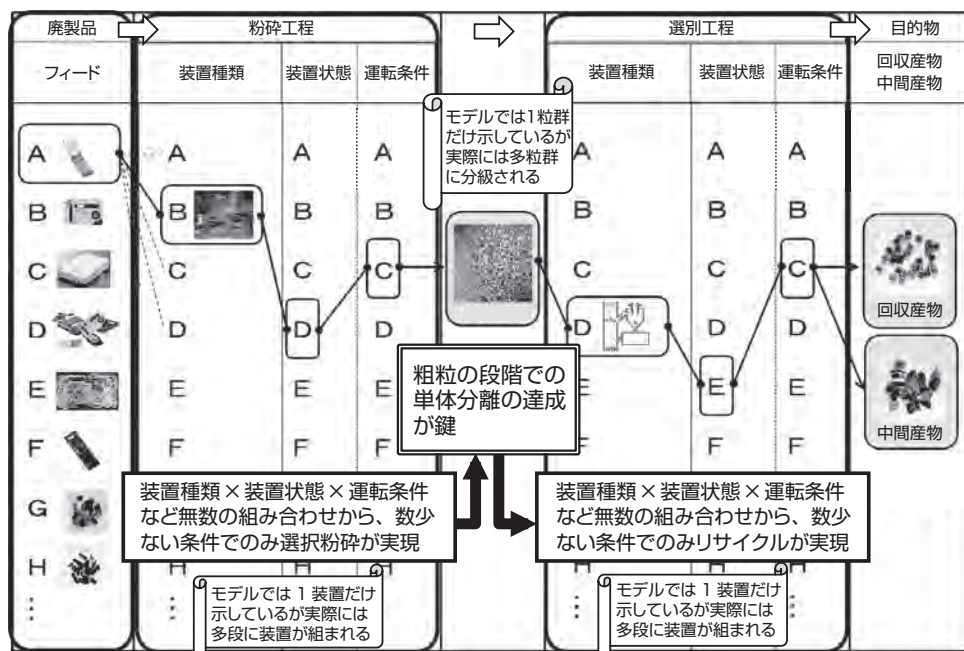
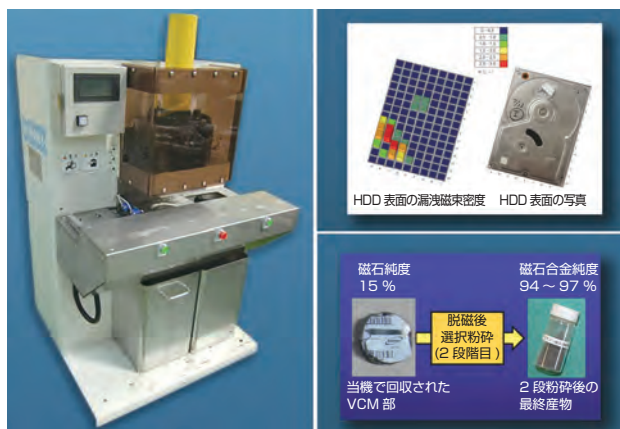


図2 物理選別（1粉碎工程-1選別工程）モデルに基づくプロセス最適化のポイント

の加熱で磁力を失わせることができる。しかし、HDD重量の2%程しかないネオジウム磁石を脱磁するのに、その50倍もの金属を加熱するのは効率が悪いので、脱磁法の模索が続いている。著者は、HDDが他の小型家電と違い、メーカーや年式、機種によらず、形や構造がおおよそ同じであることに着目した。近畿工業（株）と共同開発したHDD-CS（図3）は、4つの磁気センサーと二つの位置センサーによりHDD表面の漏洩磁気を検出し、ネオジウム磁石部位を非破壊で検出する機能をもつ。その後、非磁性刃直下にHDDを搬送し、脱磁前に磁石部位を打ち抜く装置である。各種HDDの漏洩磁束密度をデータベース化し、これに基づいた装置最適化により検出精度を上げている。小型で安価な装置でありながら、年間40万～100万台のHDDを自動処理することが可能である。なお、本装置で10倍程度に濃縮された磁石部位は、脱磁後、衝撃粉碎、スクリーニングを施すことで、純度94～97%の磁石粉末を回収することに成功している。

### 3.2 選別の自動制御化～スマートオペレーション～

HDDでは、幸運にも衝撃破碎－スクリーニングで磁石のみを回収することが可能であったが、通常は、仮に単体分離が達成できても、選別の最適化が困難である場合が多い。既述のように、通常、3～10工程の選別が組み合わされるため、選別条件の組み合わせが天文学的数字になり、装置本来の限界性能を導き出す前に「この装置では分離できない」と断念するケースがほとんどである。そこで著者はデータベースとこれを用いた数値計算によって、速やかに最適条件を導き出す方法を検討した。熟練工の経験に頼らずに、最適条件で装置を自動運転するシステムを「スマートオペレーション」と名付けた。この技術をプリント基板のリサイクルに応用した結果、



筆者と近畿工業（株）で共同開発し近畿工業（株）とライセンス契約

図3 HDD カuttingセパレータ(近畿工業(株)と共同開発)によるネオジウム磁石リサイクル

世界で初めてタンタルコンデンサのリサイクルが可能な選別プロセスの開発に成功し、2012年の春に都市鉱山モデル事業を推進するリサイクルプラントへ導入した。

タンタルはレアメタルの中でも高価な金属であり、かつ、ほとんどリサイクルされていないことから、国が定めたリサイクルを優先すべき5鉱種（タングステン、タンタル、コバルト、ネオジウム、ジスプロシウム）の一つとなっている。タンタルの多くはプリント基板上のタンタルコンデンサとして使用される。開発当初は著者らも、これまでの選別セオリー（図1）に従い、単体分離種をタンタル元素(主として酸化物として存在)として、プリント基板を微粉碎して単体分離の向上を目指した。微粉碎後、タンタル酸化物の物性に基づく選別を施すと、タンタルは数倍に濃縮されたが、プリント基板に占めるタンタルの重量割合が千ppm程度であるため単独では回収できず、貴金属や他の重金属とともに重産物として回収された。既述のように、タンタルのようなレアメタルは、乾式製錬前に銅や貴金属と分離しておく必要があるが、上記の方法ではタンタルの資源化は達成できなかった。一方、この頃、共同研究先企業において、ある粉碎機でプリント基板から電子素子がおおよそ原形のまま剥離される現象が見いだされた。この時点では、種々雑多な電子素子が混在する中、特定の電子素子のみを回収することなどは困難と考えられていた。しかし、著者は、これらは一見無秩序な混合物に見えるが、各素子は人工物ゆえの固有の選別特性をもっているはずと考え、タンタルコンデンサを単体分離種として想定した最適選別パターンを抽出を目指した。従来型アプローチの選別実験データから最適条件を見いだすことは到底困難と考え、パソコン等から回収した電子素子40万個以上を1680分類し、その物性や選別特徴をデータベース化した。その後、サイズ選別、比重選別、磁選の3種の選別法について、反復使用を含めた約2000兆通りの選別パターンの結果を数値計算で予測し、タンタルコンデンサが濃縮可能な最適条件の絞り込みを行った。その結果、剥離電子素子群から6工程で、回収率（剥離素子群中のタンタルコンデンサの内、回収されたタンタルコンデンサの重量割合）80%以上、品位（回収産物のタンタルコンデンサ重量割合）80%以上の精度で回収できる選別条件を突き止めた（図4）。

最適選別パターンは明らかになったが、既存装置でこの選別条件を満たすものは存在しなかった。そこで、次にそれを実現するための装置開発を行った。傾斜弱磁力磁選機（図5（a））は補助的役割を果たす小型装置で、傾斜コンベア型形状選別部でアルミ電解コンデンサを、



弱磁力選別部で水晶振動子等を回収するハイブリッド機である。形状選別部は、円筒形のアルミ電解コンデンサを転がして回収するが、転がりを促進するための定荷重スイングピンゲート機構を新規に開発した。また、これまでの磁選機では、タンタルコンデンサの一部も磁着してしまうが、コンベア面で極めて弱い均一な磁束密度を精度良く発現する機構を開発し、鉄分の多い水晶振動子のみを磁着回収することに成功した。同装置により、鉄とアルミを個別に回収するとともに、タンタルコンデンサを含む残分を気流選別機へ供給することで、供給量を

抑制することができる。複管式気流選別機は(図5(b))、この選別プロセスの主力機で、一つの送風機により二つのカラム内の風速を極めて精度良く制御することができる。第1カラムではタンタルコンデンサより重い素子を落下回収し、タンタルコンデンサとこれより軽い素子は第2カラムに送られ、ここで、タンタルコンデンサのみを落下回収する(図5(c))。数値計算に基づき、第1カラム内の風速を第2カラムより僅かに速く設定している。普通、カラム内に上昇気流を発生させると、中心部が速く、周辺部が遅くなる速度分布となる。これでは、

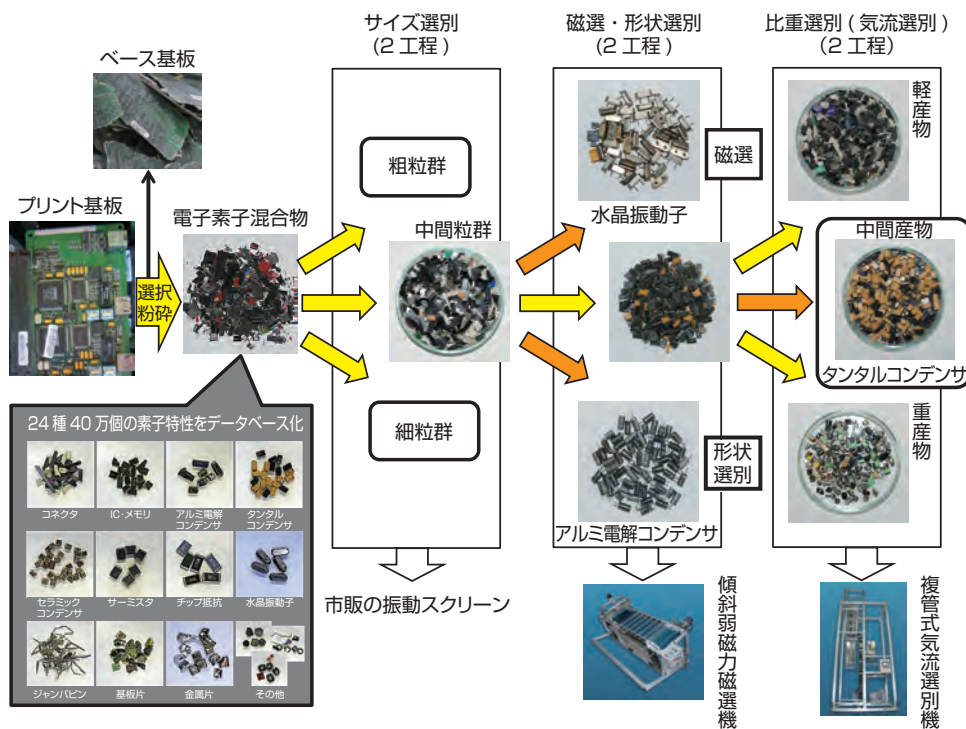


図4 データベースに基づく計算で抽出されたタンタルコンデンサ回収プロセス

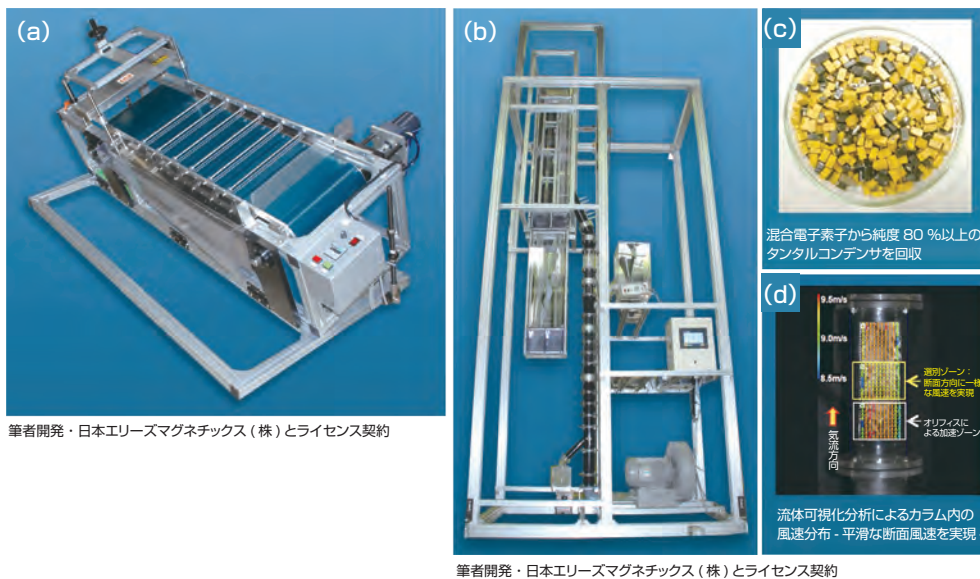


図5 傾斜弱磁力磁選機と複管式気流選別機によるタンタルコンデンサのリサイクル

同一素子でも上昇するものと落下するものが現れ、高精度な選別は望めない。そこで、著者は、カラム内の断面風速が均一になる機構を開発（図5（d））、これにより極めてシャープな選別を可能にした。また、カラム内上昇気流と近接した落下速度をもつ素子は、姿勢の変化に伴いカラム内で上下運動を繰り返し、速やかな選別を阻害する。これを回避するため、オリフィス機構を導入し選別速度が改善された。この他、二つのカラムの風速を安定させながら速やかに素子が移動するジョイント機構等、気流選別機として世界初の機構が幾つか盛り込まれている。また、素子データベースに基づく運転制御により、ディスプレイ上でタンタルコンデンサを初めとする任意の素子を選択するだけで、装置のキャリブレーションから素子の回収まで自動運転することが可能である。

以上のような開発により、これまではタンタルコンデンサの品位を10～30%程度とするのが限界であったが、両装置が導入された実証プラントでの試運転では、最大でタンタルコンデンサ品位97%を記録した。このように、製品情報を適切に利用すれば、最適選別条件を迅速に導出することができ、また、製品仕様が一部変更されても、一からやり直す必要はなく、変更情報の置換により容易に最適選別条件の再計算が行える。イーゼンセンシング、スマートオペレーションの導入は始まったばかりであるが、このような物理選別技術の革新により、多くの難処理資源の開発がいち早く実現することが期待される。

### 3.3 戦略メタル資源循環技術（都市鉱山）プロジェクト

都市鉱山開発では、資源循環ループの一部に新技術を導入しても、これを支える周辺環境が整わなければ資源

の循環は実現しない。戦略メタルの持続的な循環使用を実現するには、物理選別等の資源処理技術にとどまらず、製品設計から再生原料の供給に至る一連のシステムの構築が重要となる。著者は、現状の都市鉱山から戦略メタルを高度に回収する技術開発から、将来の戦略的な都市鉱山創生に至る「戦略メタル資源循環技術（都市鉱山）」プロジェクト（2013年に「戦略メタル国内資源循環プロジェクト」より改名）を産総研戦略予算として開始した。2012年度から3年間で、産総研型の資源循環ビジョンの提案と、我が国の戦略メタルリサイクル研究拠点の整備を目指すものである。このプロジェクトでは、7ユニットにまたがる30名以上の産総研研究者により、5つの課題の検討を行う（図6）。課題1では、次世代の戦略メタルの選定とその真のリサイクルポテンシャルを評価する。課題2は、戦略メタル回収対象となる廃製品の物性・選別データベースを構築、これに基づいて戦略メタル高含有製品の自動選別技術を開発する。課題3では、回収された廃製品群を確実に製錬原料とするための製錬前処理技術を確認する。そして、課題1～3により、現状の「無秩序都市鉱山」から戦略メタルを回収する「リサイクルビジョン」を提案する。課題4では、課題2、3の検討によっても、なお、リサイクルが困難な製品について、特に物理選別技術の視点から、これを容易にする最小限度のリサイクル設計指針を提供する。課題4の循環型「生産ビジョン」の提案により、将来の廃製品は、生産段階から日本のリサイクルインフラに適合した、いわば「戦略的都市鉱山」を構築することに繋がる。さらに、課題5では、課題1～4を融合した、産総研型「生産－リサイクル統合ビジョン」を提案する。

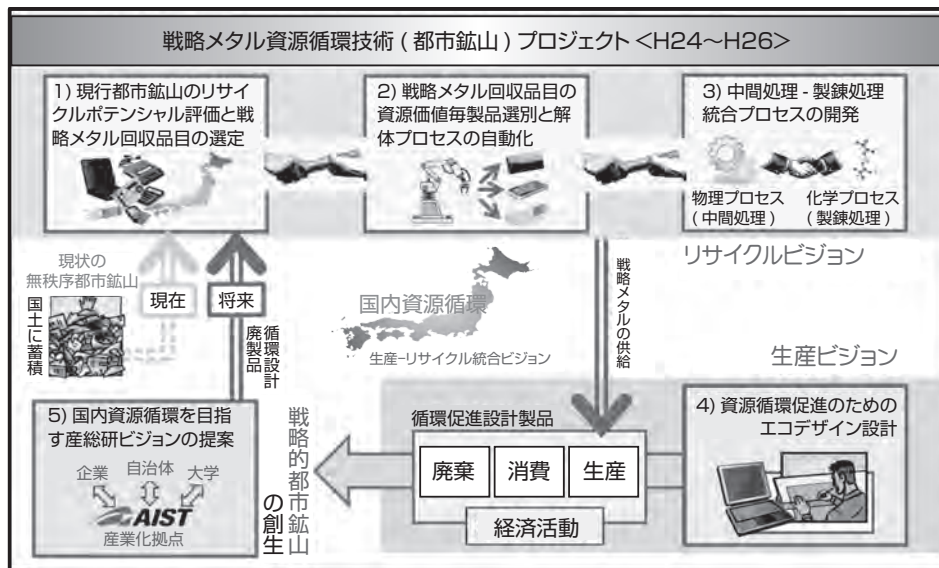


図6 戦略メタル資源循環技術（都市鉱山）プロジェクトの概要



また、その際、我が国で開発された個々のリサイクル技術がバラバラに存在したのでは、国際競争力をもつ実効性の高い資源循環を実現できない。そこで日本のリサイクル技術の産業化拠点となるべく、「戦略的都市鉱山研究拠点（SURE）」を整備し、プロジェクト終了後に本格稼働することを目指している。

#### 4 まとめ～研究開発の展望～

天然金属資源の乏しい我が国にとって、都市鉱山は有望な自国資源の一つである。さいわい、製品製造に多くのレアメタルを利用してきた我が国では、その供給手段としてリサイクルにいち早く着手したため、2013年現在、レアメタルリサイクル技術は欧米をしのいで世界トップの水準にある。このアドバンテージを将来にわたって維持できれば、資源大国に対抗できる資源開発ツールとすることも可能であろう。しかし、それには幾多の課題の克服が必要である。まず、将来の製品市場を予測することは困難なため、例えば30年先に必要なリサイクル技術をあらかじめ準備しておくことは難しい。また、必要な技術を準備できたとしても、製品サイクルの早さからそれが利用できる期間はそれほど長くはない。さらに、製品が新しくなるに伴って、中長期的には省資源化や安価な金属への代替が進むため、重要な金属ほど製品中の濃度は次第に低下し、より高度な回収技術が必要となる。一方、レアメタルの安定供給はものづくりに多大な影響を与えるものの、それ自身の流通量は少なく、マーケットは決して大きくない。このため、大規模なリサイクルインフラは必要でなく、我が国が開発した新技術は、他国でも比較的速やかに導入される可能性がある。我が国の技術が世界のトップを走り続けるためには、常に3年～5年の技術的アドバンテージを維持しながら、新しいリサイクル技術を迅速に導入し続けることが必要となる。

このように、物理選別を核にした都市鉱山開発には幾多の課題が待ち受けている。しかし、現状では、当該分野の研究者人口が少ないため、膨大な課題に対する網羅的取り組みや新規技術開発が緩慢であることは否めない。このため、国際競争以前に、都市鉱山開発自体が社会ニーズに立ち遅れることの方が問題かもしれない。企業連携や人材育成も含め、生産技術からリサイクル技術に至る一連の戦略的な取り組みを実施する「戦略金属資源循環技術（都市鉱山）」プロジェクト、あるいはこれに続く「戦略的都市鉱山研究拠点（SURE）」の整備は、諸外国の資源ナショナリズムに対抗し得る、我が国の資源ビジョンを牽引していくことが期待される。

#### 執筆者略歴

大木 達也(おおき たつや)

1994年早稲田大学大学院理工学研究科博士課程修了、博士(工学)。早稲田大助手を経て1995年通商産業省工業技術院資源環境技術総合研究所入所。2009年より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長。タンタルコンデンサをはじめとするレアメタルリサイクル技術開発、海底熱水鉱床の選鉱技術開発等に従事。資源処理技術に関する多数のNEDO、JOGMECプロジェクトに参画。2013年産総研内に戦略的都市鉱山研究拠点（SURE）を設立。



#### 査読者との議論

##### 議論1 全般的コメント

コメント(長谷川 裕夫:産業技術総合研究所、中村 守:産業技術総合研究所サステナブルマテリアル研究部門)

最適な物理選別によって、これまでコスト的に成立しなかった、廃家電製品からのレアメタル回収に成功した研究開発について紹介されており、論文の構成、内容ともにシンセシオロジーにふさわしい研究論文と判断します。廃棄されたいろいろな製品から有価なレアメタルを効率的に取り出し、「廃製品」を「都市鉱山」として利用できるようにするプロセス技術の設計手法の提案、試行のプロセスの紹介、は他の分野の研究者にとっても参考となる、有益なものと考えます

質問・コメント1(長谷川 裕夫、中村 守)

廃家電製品からのレアメタル回収について、これまでなぜ開発が成功しなかったのか、どこに著者のブレイクスルーがあったのかを、分かりやすく記述してください。

回答1(大木 達也)

レアメタルは、製品内に限定的に使用されており、鉄やアルミ等の構造物材に比べて含有率が低いため、そのままでは化学試薬を用いる湿式製錬や高温反応を利用する乾式製錬での経済的な回収が不可能でした。そこで、物理選別で事前に1次濃縮することが重要となりますが、その過程において、できる限り大きな粒子のまま単体分離させること、すなわち、プリント基板から、電子素子をそのままに近い形で剥離し、レアメタルを含む素子だけを選択的に回収する技術の開発が必要です。

タンタルコンデンサの例では、パソコン等から回収した電子素子40万個以上について、その物性や選別特徴をデータベース化し、サイズ選別、比重選別、磁選の3種の選別法について、反復使用を含めた約2000兆通りの選別パターンを選別結果を数値計算で予測し、剥離電子素子群から6選別工程で、純度、回収率ともに80%以上の精度でタンタルコンデンサを回収できる選別条件を突き止めました。最適選別条件を見いだすこのようなアプローチに最も大きなブレイクスルーがあったと考えており、開発の経緯を3.2にまとめました。

また、3.1で紹介した、ハードディスクドライブ(HDD)から、レアアースを含むネオジム磁石の回収技術の開発では、磁気センサーと位置センサーにより漏洩磁気からネオジム磁石部位を非破壊で検出して打ち抜くという独自の工程を開発して、磁石を10倍程度に濃縮することによって、その後の脱磁、衝撃粉碎、スクリーニングにおける大幅な省エネルギー化、経済性向上を達成しています。この技術開発においても、各種HDDの漏洩磁束密度をデータベース化し、これに基づいた装置最適化を行うことにより、小型で安価な装置でありながら、年間40万～100万台のHDDを自動処理することが可能になりました。