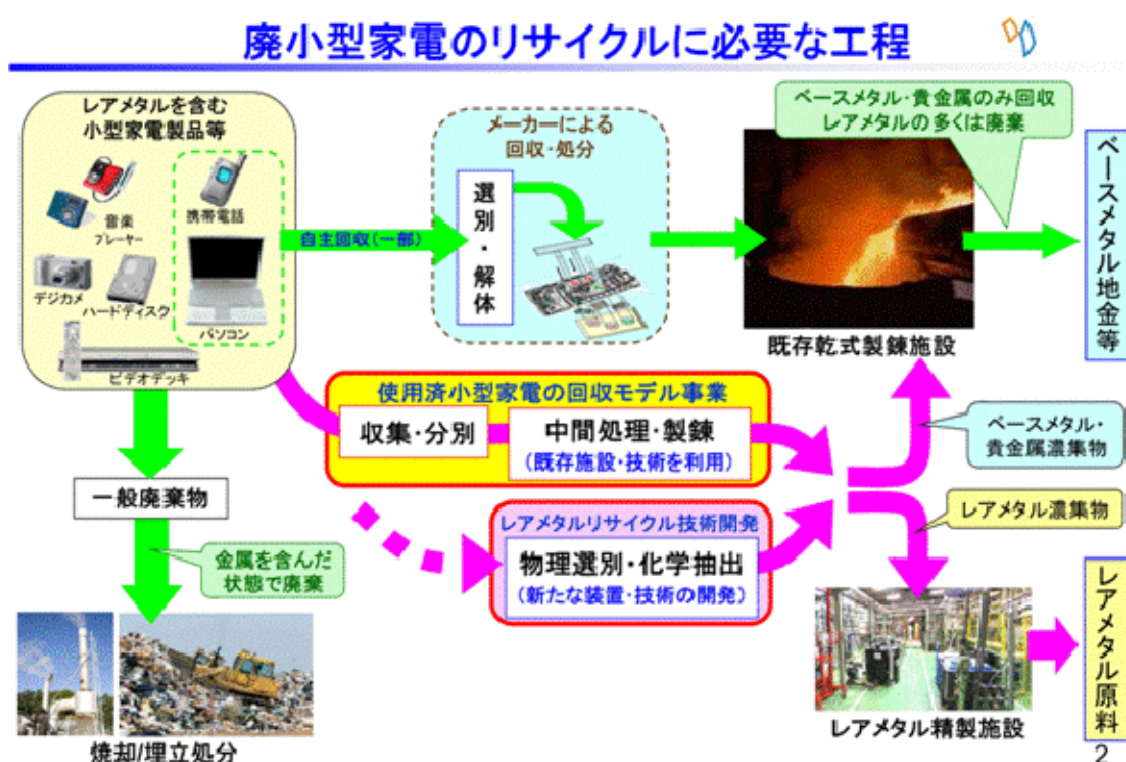


## 第4章 小型家電からの有用金属の分離・回収技術に係る情報整理

小型家電からの有用金属の分離・回収技術は、1)ベースメタル・貴金属の分離・回収技術、2)レアメタルの分離・回収技術に大別される。

ベースメタル・貴金属の分離技術やレアメタルの分離技術については、文献調査を通じて全体像を概観し、現地調査を通じて把握した具体例をあわせて示すこととした。

有用金属の回収技術は、製錬技術で共通しているので、製錬技術についても整理を行った。(以下の図ではレアメタル精製施設が存在するが、関東圏域で、現在レアメタル精製施設は存在しない。)



(資料) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構「廃小型家電からのレアメタルリサイクルに関する技術開発と調査」(平成22年8月)

### 1. ベースメタル・貴金属の分離技術

#### (1) 破碎技術

ベースメタル・貴金属の分離技術として、第一に破碎技術が挙げられる。現状、破碎に用いられている粉碎機の種類を次ページに示した。破碎プロセスにおいて単体分離が重要であることは言うまでもないが、破碎対象となる廃棄物に関する単体分離の現象解明が不十分であることもあり、単体分離を促進させる粉碎機の開発は途上段階にある。

表 4-1 主な粉砕機の種類

大分類	小分類	処理量			粉砕域				粉砕力				粉砕システム			
		大容量	中容量	小容量	粗碎	中碎	微粉砕	超微粉砕	衝撃	圧縮	剪断	磨砕	乾式	湿式	連続	回分
	ジョークラッシャー	○			○				○	○			○			
	ジャイレトリークラッシャー	○			○				○	○			○			
	コーンクラッシャー	○			○				○	○			○			
	ハンマークラッシャー	○			○	○			○				○			
	自生粉砕機	○	○			○			○				○			
ボールミル	転動ボールミル	○	○	○		○	○	△	○				○	○	○	○
	振動ミル		○	○			○	△	○		○	○	○	○	○	○
	遊星ミル			○			○	△			○	○	○	○	○	○
	タワーミル		○	○			○				○	○	○	○	○	○
媒体攪拌ミル	攪拌槽ミル			○			○	○				○	○	○		○
	アニュラーミル			○			○	○			○	○		○		○
ローラーミル	遠心式		○				○		○	○			○			○
	油圧式	○					○			○	○	○	○			○
高速回転ミル	ハンマーミル			○					○		○		○			○
	ケージミル		○	○					○		○		○			○
	軸流型ミル		○	○			○		○		○	○	○	○	○	○
	アニュラー型ミル			○			○			○	○	○	○			○
	剪断型ミル			○			○	○		○	○	○				○
	ジェットミル		△	○			○	△	○			○	○			○

(資料) 環境資源工学会「粉体精製と湿式処理－基礎と応用」

現時点では万能な選択粉砕機なるものは存在しないが、限定的ながら単体分離を促進する粉砕機の検討がなされている。以下、環境資源工学会「粉体精製と湿式処理－基礎と応用」を引用し、小型電子機器のリサイクルに応用可能な技術を紹介する。

### ① 衝撃力による破砕

電子素子が実装されたプリント基板を、ドラム型の衝撃式破砕機内でドラム内装などに強打させると、電子素子があまり破壊されずに剥離されることがある。また、銀がドラム下部で回転するチェーンミルも廃製品の解体などに有効である。このように人工物の場合、衝撃力によって天然鉱石より単体分離が促進されるケースが多々見られる。例えば、ある種のプリント基板のボードはガラスエポキシ樹脂と銅の複合物であるが、銅はその延性、展性のため、衝撃によって丸まってゆくのに対し、ガラスエポキシ樹脂は脆性的に破壊されやすい。このような差別的粉砕を効率的に実施するため、ハンマーミルを連続回分式に運用し、数 10 秒からなる 1 サイクルを、対象物の単体分離過程、粒度調整過程、破砕物排出過程に分割して、微小時間ごとに最適条件に制御をする方法が検討されている。アクティブ粉砕と名付けられたこの方法は研究開発段階ではあるが、将来の高度な粉砕制御の先駆けと呼べる技術である。

## ②固体認識を伴う局所破壊

回収したい部分をセンサーにより検出し、その部分をピンポイントに打ち抜く方法が近年開発された。ハードディスクドライブ・カッティングセパレーター（HDD-C S）は、廃HDDから、ネオジム焼結磁石を含有するボイスコイルモータ部を打ち抜く専用の破碎・選別機である。磁石の機械的な回収には、通常、事前の脱磁が不可欠であるが、HDD表面の漏洩磁束密度により磁石部を検出し、非磁性鋼性の刃で打ち抜くことにより、脱磁せずに磁石部を回収することができる。一連の操作はすべて自動で15～20秒/台で処理可能であり、打ち抜かれた部分は磁石が10倍～20倍に濃縮される。センシングを伴う選択破碎はHDD以外にも広く応用が可能であり、特に類似した構造を有する人工物に対する有価物の破碎・回収に効果的である。

## ③電氣的な破碎

現状において破碎は機械的方法が主流であるが、破碎に消費するエネルギーや、破碎の選択性などの点で、電氣的な破碎方法が注目されている。これには2つの方法がある。ED（electrical disintegration）法は、液体中で高電圧電極を粒子に接近（接触）させ、粒子下方に接地電極を配置して大電流を流す方法である。数十 $\mu$ sという微小時間に数十kVの電気パルス照射することで位相境界面に大電流が流れ、選択的な破壊を起こす方法である。一方、EHD（electro-hydraulic disintegration）法は、ED法と同様に、液体中で高電圧電極を粒子に接近（接触）させるが、大電流が流れることによる液相の衝撃波を利用する方法である。大電流の代わりに爆薬を爆破させる方法もある。いずれの場合にも、衝撃波は位相境界面に引っ張り応力を発生させ、境界面での破壊を促進する。電氣的破碎法を廃製品の単体分離促進に利用する試みは未だ研究段階にある。

### （2）ふるい分け、分級技術

ベースメタル・貴金属の分離技術の第二にふるい分け、分級技術が挙げられる。粉碎産物を次の処理工程に送る前に、多くの場合で粒子のサイズ分離が行われる。物理処理プロセスでは、粒子サイズ毎にその後の選別プロセスが異なることがその理由となる。また、粉碎産物の組成にサイズ依存性があれば、これにより着目成分の回収や異物の除去が実現する。サイズ分離の方法は、網を通過するか否かで選別する「ふるい分け」と、気相あるいは液相中で粒子運動の違いによって選別する「分級」に大別できる。

#### ①ふるい分け

次ページに主なふるい分け装置の形式と適用範囲を示す。実際には、いくつ

かの装置に絞ってサンプルテストを行い、目的に応じたふるい分けが可能であるかを検証することが望ましい。

表 4-2 主なふるい分け装置の形式と適用範囲

形式		適用粒度 mm		
		下限	適用範囲	上限
振動ふるい	リップルフロー型	1	5~50	200
	トップマウント型	1	3~30	50
	ローヘッド型	1	5~50	200
	エリブティックス型	1	5~50	200
	共振式	1	3~30	50
	振動モータ式	0.3	0.5~10	30
	電磁式	0.1	0.3~5	10
	円形ふるい	0.05	0.1~5	10
面内ふるい		0.05	0.1~5	10
その他	可動網式	3	5~30	50
	強制攪拌式	0.05	0.1~5	10
	風力ふるい	0.03	0.07~1	5
	音波ふるい	0.03	0.07~1	5

(資料) 環境資源工学会「粉体精製と湿式処理－基礎と応用」

## ②分級

分級は、広義には粒子を性質ごとにクラス分けすることであるが、通常は、液体媒体中を移動する粒子の速度に基づき、粒子をサイズの異なる2つもしくはそれ以上の産物に分離することを指す。分級機は、利用する産業分野や開発の経緯から独自の発展を遂げてきたが、粒子サイズで分ける分級機と、粒子密度で分ける比重選別機は基本的には同じ構造を持つ装置である。比重選別機は、後述することとし、ここでは、代表的な乾式分級機と湿式分級機を以下に示した。

表 4-3 代表的な乾式分級機の種類

分類	分級原理	一般的な特徴	代表的な機種
重力分級	粒子の落下速度、落下位置の違いにより分級（重力：空気抗力）	<ul style="list-style-type: none"> <li>構造が簡単</li> <li>粒径の粗いところでの分級（200~2000 <math>\mu\text{m}</math>）</li> <li>あまり高粉体濃度が期待できない</li> <li>精密分級に適さない</li> </ul>	水平流型 垂直流型 ジグザグ型
慣性分級	粒子の慣性力を利用して分級（慣性力：空気抗力）	<ul style="list-style-type: none"> <li>構造が簡単</li> <li>比較的粒径の粗いところでの分級（10~250 <math>\mu\text{m}</math>）</li> <li>高粉体濃度が可能、比較的大容量が可能</li> </ul>	直線型 曲線型 ルーバー型

		<ul style="list-style-type: none"> <li>・精密分級に不適</li> <li>・細かい分級範囲 (0.5~50 <math>\mu\text{m}</math>)</li> <li>・精密分級も可能</li> </ul>	エルボージェット バリアブルインパクト
遠心分離 (自由渦、半自由渦)	自由渦、半自由渦による遠心力と空気抗力のつりあいで分級	<ul style="list-style-type: none"> <li>・構造が比較的簡単</li> <li>・比較的細かいところでの分級 (1~20 <math>\mu\text{m}</math>)</li> <li>・サイクロンなどではあまり高粉体濃度、精密分級は望めない</li> </ul>	サイクロン ファントンゲレン クラシクロン ディスパーション セパレータ マイクロプレックス
遠心分離 (回転羽根付)	回転する分級羽根によってつくられる回転流によって生じる遠心力と空気による抗力のつりあいで分級 (遠心力：空気抗力)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・比較的構造が複雑で動力もかかる</li> <li>・微粉領域まで分級可能、分級範囲広い (0.5~100 <math>\mu\text{m}</math>)</li> <li>・高粉体濃度、精密分級が可能</li> </ul>	エアセパレータ ミクロンセパレータ マイクロプレックス アキュカット ターボクラシファイ アー等

(資料) 環境資源工学会「粉体精製と湿式処理－基礎と応用」

表 4-4 代表的な湿式分級機の種類

分類	分級原理	一般的な特徴	代表的な機種
重力分級	スラリー中における粒子の沈降速度差を利用 (重力：液体抗力)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・構造が簡単</li> <li>・大型機種</li> <li>・粗いところでの分級 (40~200 <math>\mu\text{m}</math>)</li> <li>・精密分級に適さない (多段型にて対応可能)</li> </ul>	ハイドロセパレータ スパイラル分級機 レーキ分級機 ボール分級機 ドラム分級機 ジェットサイザ クラシファイイングサイザ
遠心分離 (自由渦、半自由渦)	自由渦あるいは強制渦による遠心力と流体流による抗力の釣り合いで分級 (遠心力：液体抗力)	[自由渦] <ul style="list-style-type: none"> <li>・構造が簡単</li> <li>・細かい分岐点が取れる装置は小さい</li> <li>・分級可能範囲 (5~150 <math>\mu\text{m}</math>)</li> </ul>	液体サイクロン
		[強制渦] <ul style="list-style-type: none"> <li>・構造が複雑</li> <li>・分級範囲が広い (1~800 <math>\mu\text{m}</math>)</li> <li>・主として固液分離に利用</li> </ul>	分離板 (ドラバル) 型 円筒 (スクリュード カンタ) 型

(資料) 環境資源工学会「粉体精製と湿式処理－基礎と応用」

### (3) 比重分離

比重分離は、分離回収対象の物質の比重（密度）が他の物質のそれと異なる場合に可能な分離法である。主な比重分離法を乾式と湿式に分類すると以下のようになる。

表 4-5 比重分離法の分類

		長所	短所
乾式比重分離	風力分離 流動層分離 振動テーブル等	<ul style="list-style-type: none"> <li>・装置が比較的簡単である。</li> <li>・処理後の乾燥工程が不要である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・騒音や粉じんを発生することがある。</li> <li>・試料の付着水分を制御する必要がある。</li> <li>・液体中に比較して、空気中の粒子の運動速度（主に落下速度）が速いため、湿式法に比較して分離精度が劣る。</li> </ul>
湿式比重分離	重液選別 薄流選別 ジグ選別等	<p>(重液選別)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・選別効率が高く、選別が鋭敏である。</li> <li>・重液の比重が一定であれば、選別は安定して進行する</li> </ul> <p>(薄流選別)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・処理能力が高い</li> </ul>	<p>(重液選別)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・粒径が小さい試料には適用できない。</li> <li>・重液の比重が限られている</li> </ul> <p>(薄流選別)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・選別精度があまり鋭敏でない</li> </ul>

(資料) 環境資源工学会「粉体精製と湿式処理－基礎と応用」

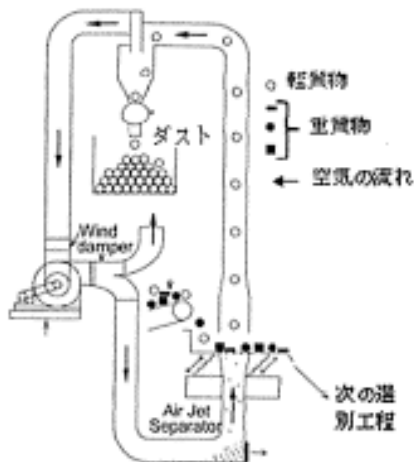
#### ①乾式比重分離

風力分離装置には、縦型風力選別機、ジグザグ選別機等がある。

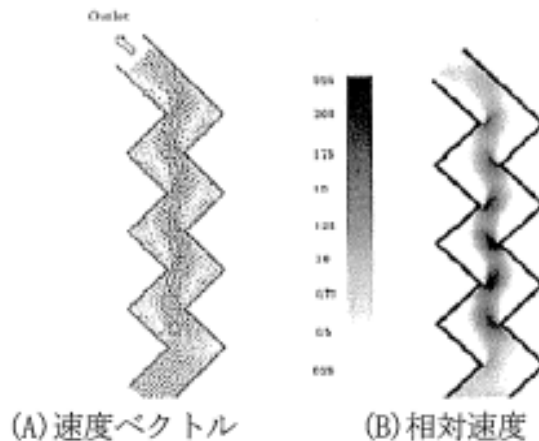
縦型風力選別機は、縦型のカラムに上向流を供給し、風量を調整することにより、低比重物をカラム上部、高比重物を下部から回収する装置である。九州メタル産業（株）では、廃自動車の破碎産物から磁気分離により鉄等を回収した後、縦型風力選別機で軽量物（綿・スポンジ類・軽質プラスチック類等）と重量物（非鉄金属類、ガラス類）を分離している。

ジグザグ風力選別機は、上昇する気流の通路がジグザグになっており、選別機内壁への粒子の衝突や渦流による粒子の再分散と上昇流による分級が繰り返し行われるように構成されている。ジグザグ選別機は、廃タイヤ、廃配線コード、ビル廃材の各種廃棄物や都市ごみからの資源回収プロセスに活用されている。

### 縦型風力選別機



### ジグザグ風力選別機の空気の流れ



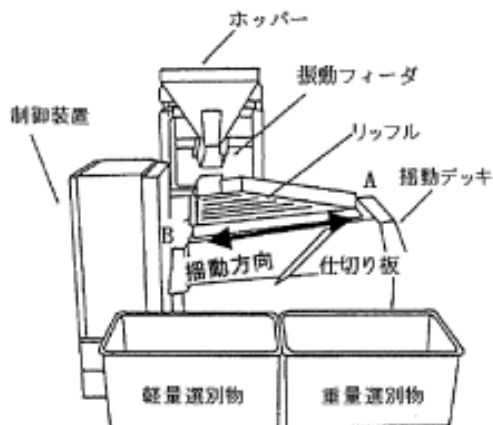
(資料) 環境資源工学会「粉体精製と湿式処理－基礎と応用」

振動テーブルには、エアテーブルや乾式振動テーブルがある。

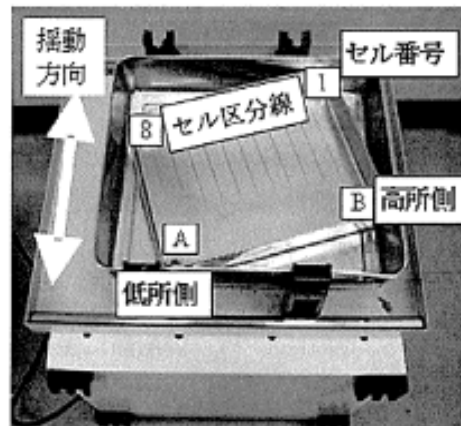
エアテーブルは、エア・フロート・テーブル (air float table) と呼ばれ、近年は、廃棄物からの有価物の分離・回収に用いられている。

振動テーブルは湿式で行われるが、乾式の振動テーブルが試作され、検討が行われている。水平に対して傾度をもつパッドを短辺方向に振動させるものである。

### エアテーブル



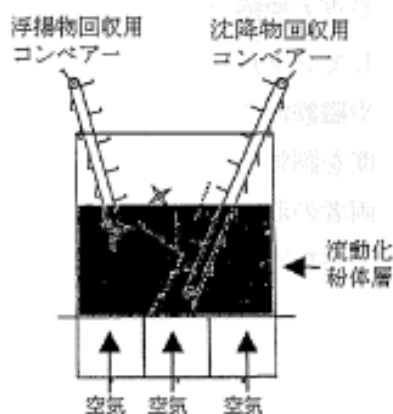
### 乾式揺動テーブル



(資料) 環境資源工学会「粉体精製と湿式処理－基礎と応用」

流動層分離装置は固気層分離装置とも呼ばれている。下部からの送風により粉体を流動化させた固気流動層は、液体に類似した性質を有し、用いる粉体により固有の見かけ比重を持つ。層内に試料を供給すると流動化粉体の見かけ比重よりも小さい比重の粒子は固気流動層を浮揚し、大きな比重の粒子は沈降する原理である。アルミニウムと重金属（銅、亜鉛等）の分離やプラスチック類の分離のための装置が製造されている。

### 連続式流動層分離装置



(資料) 環境資源工学会「粉体精製と湿式処理－基礎と応用」

## ②湿式比重分離

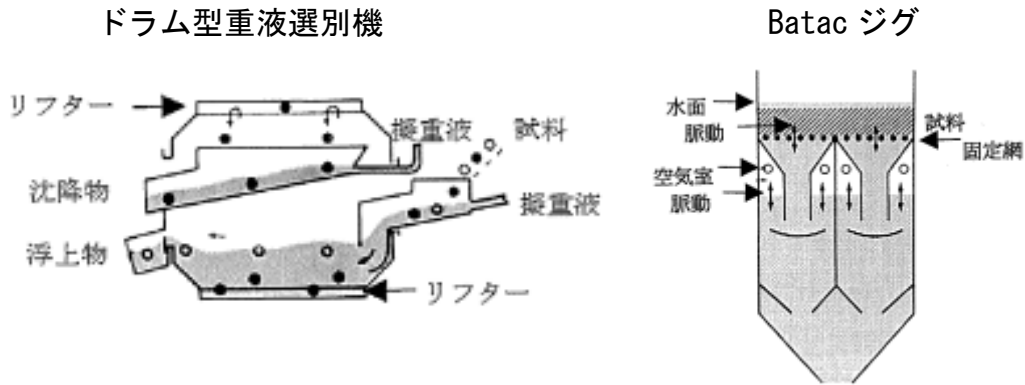
湿式比重分離は粒子の比重差を利用して水中あるいは懸濁中で分離するもので、重液選別、ジグ選別、薄流選別といった方式がある。

重液選別機には、ドラム型とコーン型がある。ドラム型重液選別機では、試料は擬重液とともに回転するドラム装置に供給され、比重の小さい粒子は浮上物として排出される。比重の高い粒子は沈降し、ドラム内部に設置されているリフター（かさ上げ板）により上部に運ばれ、沈降物回収トレーに落下しドラム外に排出される。排出された産物（浮遊物、沈降物）はそれぞれ一次スクリーニングにより擬重液が回収され再利用される。更に二次スクリーニングにおいて散水により産物に付着している擬重液粒子（重液材）が分離され、磁気分離により固液分離され重液材として利用される。

ジグ選別は、水中に固定した網上に試料粒子をおき、上下に脈動する水流を発生させ、固定網上で試料粒子の上下運動を繰り返すことにより、高比重の粒子を下層部に沈積させてその上部に低比重の粒子を成層させて、それぞれの層を別々に取り出す技術である。近年は、プラスチック類等の廃棄物のリサイクル・資源化のための分離に用いられている。一般の適用粒度範囲は 200～0.5mm



である。これよりも粗粒子を対象とした ROMJIG（適用粒度 350～40mm）や微粒子用のジグ（Altair ジグ、Kelsey ジグ、Packed Column ジグ等）が開発されている。



（資料）環境資源工学会「粉体精製と湿式処理－基礎と応用」

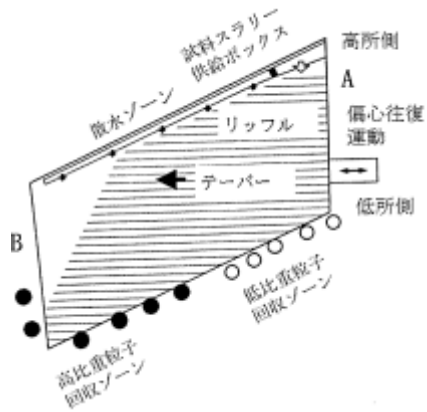
薄流選別は、比重による粒子運動の差を利用して選別する方法である。傾斜している盤（デッキ）の上に、比重の異なる2種の粒子をおいて水を流せば（遠心力を作用させる場合もある）、粒子の運動に違いが生ずる。比重の小さい粒子は水の力や遠心力により大きく移動する原理を利用した装置として、振動テーブル、スパイラル選別、Multi-gravity separator 等がある。

表 4-6 薄流選別の種類

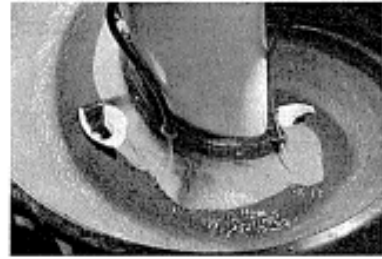
振動テーブル	代表的な振動テーブルである Wilfley Table は、石炭のスクリーニングや比重の高い非硫化鉱物の選鉱に用いられている。近年は重金属に汚染された土壌の浄化への活用が研究されている。
スパイラル選別	断面が円弧状の樋を垂直軸のまわりに螺旋形に設置したもので、樋の上部から水と共に試料を落下させると遠心力と水の作用で、比重の小さい粒子は樋の外周側に移動して落下し、高比重の粒子は樋の内周側に集まって流れる。
Multi-gravity separator	微粒子用に開発された比重分離装置で、湿式振動テーブルの分離機構に遠心力を付加して分離を行うもの。装置は両端が開口したドラムで、このドラムを適切な角度に傾け、緩やかに回転させると共に前後に振動させる。振動ふるい、ハイドロサイクロンを組み合わせた湿式選別プロセスによる、下水汚泥嫌気性消化処理施設からのリン（リン酸マグネシウムアンモニウム）の回収の検討も行われている。

（資料）環境資源工学会「粉体精製と湿式処理－基礎と応用」

## Wilfley テーブル

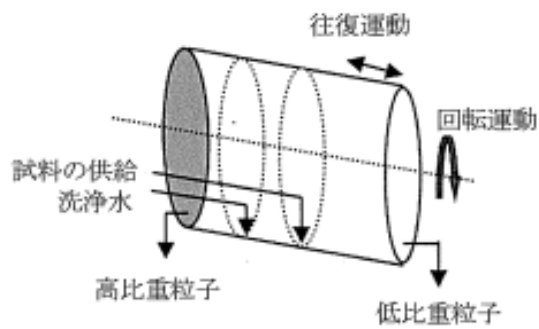


## スパイラル選別機



(資料) 環境資源工学会「粉体精製と湿式処理－基礎と応用」

## Multi-gravity separator



(資料) 環境資源工学会「粉体精製と湿式処理－基礎と応用」

#### (4) 磁選

ベースメタル・貴金属の分離技術として、第四に磁選技術が挙げられる。磁選は、磁石に物体が吸引されて、吸引されにくい物体とを分ける技術で、古くから鉱物の分離および鉄のリサイクルに使用されてきた。

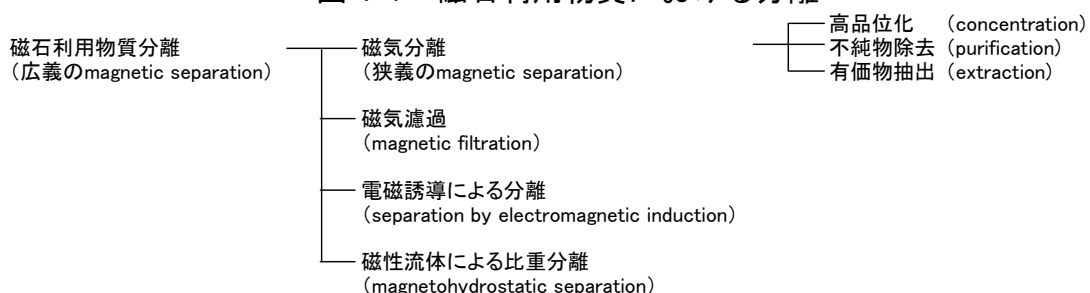
産業廃棄物のリサイクルの流れでは、廃棄物収集→解体・選別→破碎→篩い分け→細粒と粗粒に応じた各種分離が行われる。約 0.05mm 以上の粗粒は水を用いない乾式で大きいものほど分離しやすい。磁選、密度差を用いた風力選別、渦電流選別、各種ソーターが使用され、乾燥していれば静電選別も使用できる。大きい粒子でも重液を用いた比重選別が使用されているが、約 0.05mm 以下になると粒子どうしが水分付着による凝集のために単体分離できないので、乾式ではなく水などを用いた湿式分離が必要になり、浮選や磁選、遠心式比重選別が使用される。以下に、磁選機の種類を示した。

表 4-7 磁選機の種類

	磁界方式	供給方式	供給場所	強磁性マトリックス	乾式／湿式
静磁界型	弱磁界型	ベルト型	上部供給	有り	乾式
			下部供給	有り	湿式
		ドラム型	上部供給	無し	
			下部供給	無し	湿式
	中磁界型	ベルト型	上部供給	無し	乾式
		ドラム型	上部供給	無し	乾式
		吊り下げ型	下部供給	無し	乾式
	強磁界型		上部供給	有り	湿式
		ドラム型	上部供給	無し	乾式
	交流磁界型	移動磁界型			有り
振動磁界型					乾式
電磁誘導型					

(資料) 環境資源工学会「粉体精製と湿式処理－基礎と応用」

図 4-1 磁石利用物質における分離



(資料) 環境資源工学会「粉体精製と湿式処理－基礎と応用」

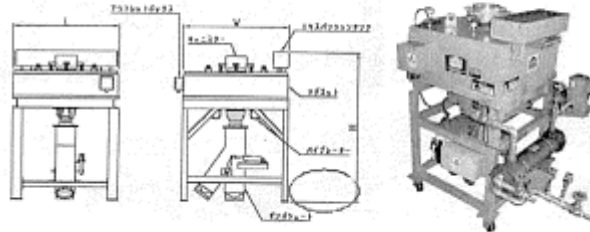
## 吊り下げ型磁石



← 1m →

## 乾式電磁フィルター

0.2T, 0.5Tの空芯磁場にマトリックスが入り、パイプレーターで振動させ非磁着物を落下させる。



(日本エリーズマグネチックス株)

(資料) 環境資源工学会「粉体精製と湿式処理－基礎と応用」

## (5) 電氣的選別 (渦電流選別と静電選別)

電氣的な選別の手法は、渦電流選別と静電選別に大別される。前者では物質のバルク特性としての電気伝導性が、後者では表面物性としての電気伝導性が選別挙動を主に支配している。

### ① 渦電流選別

導体に変化磁界を作用させると、電磁誘導によりその物質中に渦電流が発生し、作用させた変化磁界との間に反発力を生ずる。この渦電流の大きさはその物質の電気伝導性によって決まるため、それによって異なる物質同士の相互分離を達成することができる。プラスチック、ガラス等はこの値がほぼ0であるから、これらと各種金属との分離あるいは基本的には金属同士の相互分離も可能である。

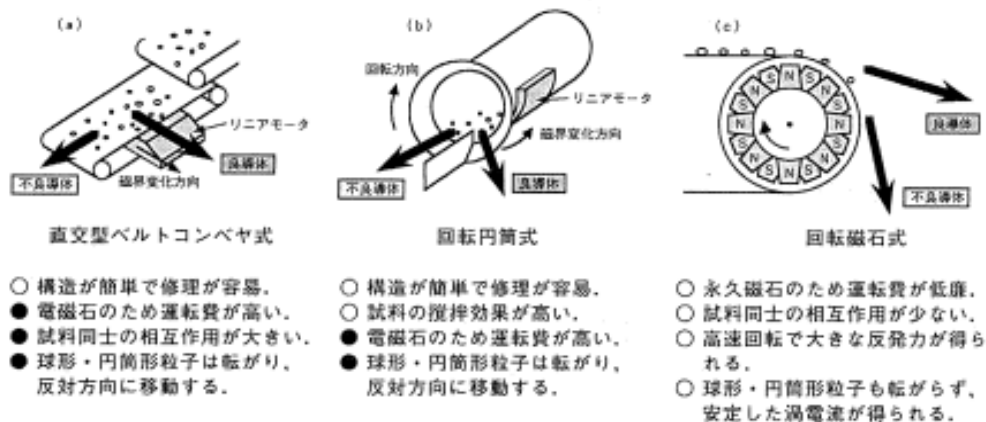
渦電流を発生させるには、基本的には磁界、対象物の位置のどちらかが時間的、空間的に変化すればよく、それに応じて様々の選別方式がある。現在、最も一般的に使用されている方式は、回転磁石式の装置である。

表 4-8 各種渦電流選別機の概要

傾斜板式	(メリット) ・原理が簡単で運転費が低廉 (デメリット) ・粒子の移動速度に限界があるので、発生する反発力が小さく、処理量も限定される。 ・アルミ缶のような円筒形の場合は、事前に圧縮等の処理が必要
直交型ベルトコンベヤ式	(メリット) ・構造が簡単で修理が容易 (デメリット) ・電磁石のため運転費が高い ・試料同士の相互作用が大きい ・球形・円筒形粒子は転がり、反対方向に移動する
回転円筒式	(メリット) ・構造が簡単で修理が容易 ・試料の攪拌効果が高い (デメリット) ・電磁石のため運転費が高い ・球形・円筒形粒子は転がり、反対方向に移動する
回転磁石式	(メリット) ・永久磁石のため運転費が低減 ・試料同士の相互作用が小さい ・高速回転で大きな反発力が得られる ・球形・円筒型粒子も転がらず、安定した渦電流が得られる

(資料) 環境資源工学会「粉体精製と湿式処理－基礎と応用」

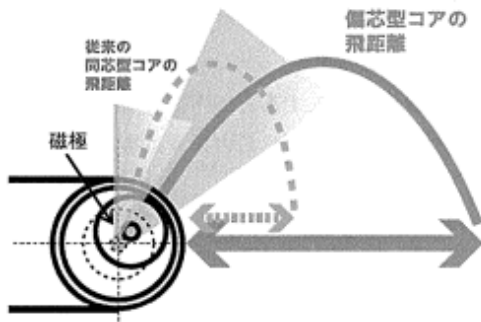
各種渦電流選別機の変遷と比較



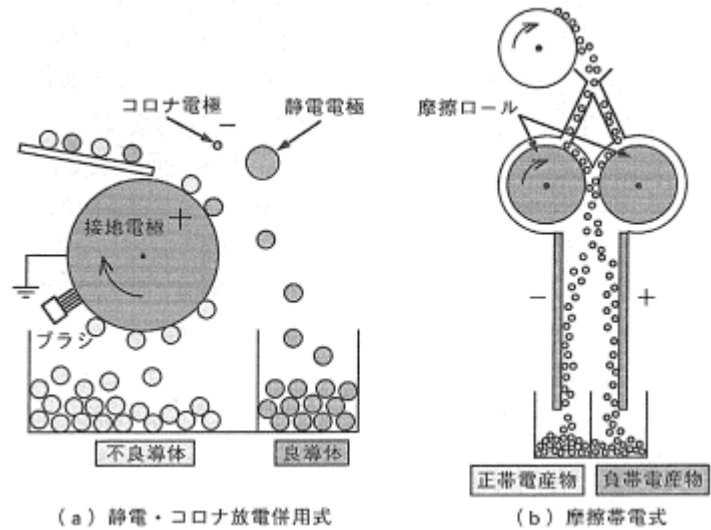
(資料) 環境資源工学会「粉体精製と湿式処理－基礎と応用」

最近では、磁極偏芯方の渦電流選別機も開発されており、対象物素材に合わせて磁極位置を変化させることが可能となっている。

### 磁極偏芯型渦電流選別機



### 各種静電選別機の概要



(資料) 環境資源工学会「粉体精製と湿式処理－基礎と応用」

## ②静電選別

粒子を静電界内に置いたとき、その粒子に働く電気的な力は粒子の帯電量と電界強度の積で与えられる。静電選別の基本はこの力の違いを利用することである。実用化されている主な静電選別機は、粒子の帯電方法により、静電・コロナ放電併用式及び摩擦帯電式の2つに分類される。

表 4-9 静電選別機の概要

静電・コロナ放電併用式	ロール型の選別機では、回転するシリンダー状の接地ロール（接地電極）と平行に丸い棒状の静電電極と細線状あるいは針状のコロナ電極がセットされ、この両者の間に静電場およびコロナ放電場が形成される。良導体粒子は接地ロールから静電電極側に飛び出し、不良導体粒子は接地ロールに付着してブラシで掻き落とされるまで落下しない。
摩擦帯電式	粒子の摩擦帯電を利用する方式である。投入された粒子は適当な（2種分離対象物質の中間の仕事関数を持つ）材質の摩擦ロールを通過する際に物質により異なった符号に帯電し、下方の電界内にてそれぞれ異符号の電極側に吸引されて分離される。

(資料) 環境資源工学会「粉体精製と湿式処理－基礎と応用」

## (6) ソーター選別

ベースメタル・貴金属の分離技術として、ソーター選別技術も挙げられる。

ソーター選別とは、搬送コンベア上などを移動する物体に対して、各種センサーで検知した情報をコンピュータで解析することによって、その種類を識別し、その結果に基づいて圧縮空気の噴射やバドルを動作させることで種類ごとに異なる回収ボックスに搬送して選別する技術である。

選別の対象となるのは数 mm～300mm 程度の比較的大きな固体粒子であり、鉱石、非鉄金属・合金、プラスチック、ガラス、木材、食品など、使用するセンサーの特性に応じて多様な物体に適用できる。

ソーター選別は、磁力選別機、風力選別機、渦電流選別機などの選別装置では正確な分離が困難な混合物を対象として、これらの選別装置の後段で行われることが多い。

### ①近赤外線ソーター (NIR)

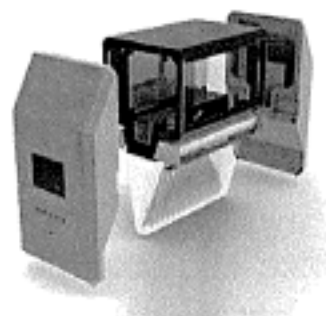
近赤外線 (Near-infrared light、波長 1,100nm～2,500nm) を物体に照射すると物体を構成する分子構造に依存して特定の波長の光が吸収される。近赤外線選別は、近赤外線の吸収スペクトルの違いを利用して物体の種類を識別して選別する技術である。未知試料の光吸収スペクトルデータと事前に取得している既知試料の光吸収スペクトルデータとを照合することにより識別が行われる。

近赤外線選別は主に有機物を対象としており、リサイクルを目的とする廃プラスチックの選別において特に重要である。このほかにも古紙のリサイクルにおける紙の選別や廃木材に含まれるプラスチックなどの不純物除去にも用いられる。

#### 近赤外線ソーター



本体



光照射・検出部

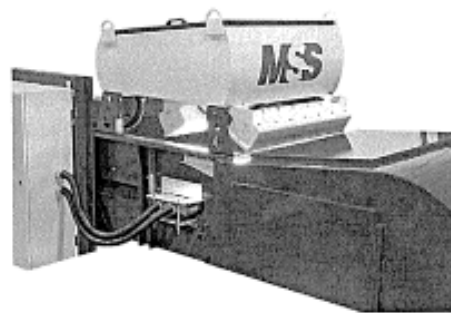
(資料) 環境資源工学会「粉体精製と湿式処理－基礎と応用」

### ②光学ソーター

光学選別は、物体からの可視光 (Visible light、波長 400nm～700nm) の反射光あるいは透過光を、OCD などのイメージセンサーで検知して物体の明度、

彩度、色相、サイズ、幾何学的形状などの違いを識別して選別する、もしくは分光器によって検知してスペクトルや透過率の違いを識別して選別する技術である。色彩の違いを検知するものはカラーソーターと呼ばれ、可視光分光（Visible Spectroscopy）に基づくものはVISソーターと呼ばれる。カラーソーターは、ガラス瓶やカレットの選別（無色、茶、緑、青）、廃自動車や廃家電を破砕処理したリサイクル原料に含まれる銅系金属（銅、真鍮などの色物金属）とその他金属（鉛、亜鉛などの灰色金属）の選別、色彩の異なる鉱物（石灰石、石英など）の選別などに用いられる。

### 光学ソーター



（資料）環境資源工学会「粉体精製と湿式処理－基礎と応用」

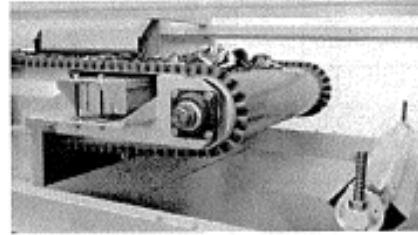
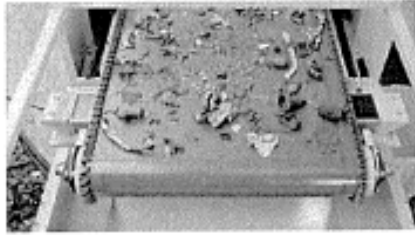
### ③電磁誘導ソーター（ISS）

物体が磁界を通過する際には電磁誘導により渦電流が発生し、流れる電流値は物体の導電性に依存する特性がある。電磁誘導選別（Induction sorting system）は、磁界センサーを利用してこの渦電流（誘導起電力）を検知し、その特性の違いをコンピュータで解析して物体の種類を識別して選別する技術である。（交流磁界が渦電流による磁界に及ぼす力学的作用によって物体の運動方向を変化させ選別を行う渦電流選別機とは原理的に異なる。）

電磁誘導選別は、導電性の違いに基づいた選別方法であるので金属と非金属の分離に利用でき、シュレッダーダストからの非鉄金属の回収や、食品などに混入する金属異物を除去する手段として用いられる。また、廃自動車や廃家電などの破砕・選別処理で発生する非鉄金属混合物（ミックスメタル）に含まれるステンレス（導電性小）を銅やアルミニウム（導電性大）から分離する際に利用される。また、印加する交流磁界の周波数を最適制御すれば、銅とアルミニウムの選別にも利用できる。



## 電磁誘導ソーター



(資料) 環境資源工学会「粉体精製と湿式処理－基礎と応用」

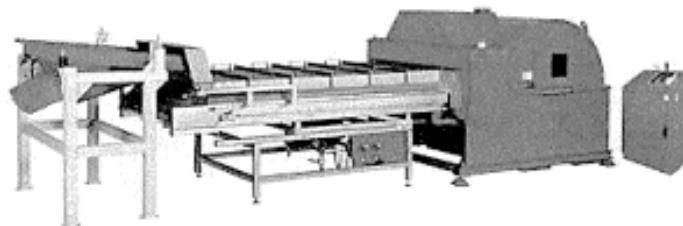
### ④透過 X 線ソーター (XRT)

X 線 (波長  $0.001\text{nm} \sim 80\text{nm}$ ) を物体に照射した際の透過率 (X-ray transmittance) は、物質の密度によって異なるので、X 線透過率の違いを検知すれば、物体の素材や厚さ、内部構造などを分析できる。透過 X 線選別法は、物体表面の汚れや塗装の影響をほとんど受けずに選別が可能である。また、鉄製ボルトが付随したアルミニウム片のような単体に分離していない物体の検知が可能であることや、最大  $3\text{ m/s}$  程度のベルトスピードで高速処理が可能といった優れた点がある。しかし、不定形の形状を持つ物体に対しては、事前に厚さを測定したり揃えたりするなどの対策が必要になる場合がある。

透過 X 線ソーターは、ミックスメタルの選別の他にも各種非金属製品に投入する金属異物の除去、リサイクル原料としての混合プラスチックに含まれる PVC や臭素系プラスチックの除去、鉛ガラスや耐熱ガラスなどのガラス選別などにも利用されている。

最新の透過 X 線ソーターでは、デュアル X 線検知センサーを備えており、異なるエネルギーを持つ 2 波長の X 線の透過率を測定することで識別精度を g 高めている。20~150mm の大きさの非鉄ミックスメタル (銅、真鍮、ステンレス、アルミニウム、マグネシウム) に対して、重金属グループ (銅、真鍮、ステンレス) と軽金属グループ (アルミニウム、マグネシウム) に良好に選別可能であることが、軽金属グループに含まれるアルミニウムとマグネシウムの選別が可能であることが報告されている。

## 透過 X 線ソーター



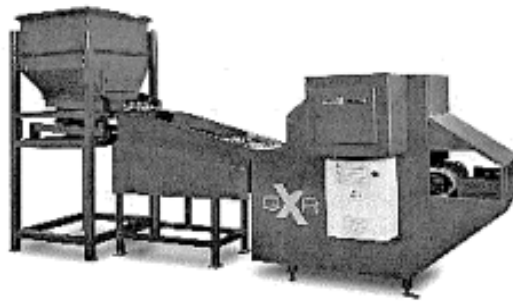
(資料) 環境資源工学会「粉体精製と湿式処理－基礎と応用」

### ⑤ 蛍光 X 線ソーター (XRF)

X線を物体に照射した際に発生する蛍光X線 (X-ray fluorescence) を分光して物体表面近傍に存在する元素の定性・定量を行うのが蛍光X線分析である。透過X線ソーターと比べて、使用するX線源の出力が小さくて済むので装置動力は少ないが、スペクトルの測定に時間を要するために処理速度はやや遅く、通常は1 m/s程度のベルトスピードで処理が行われる。また、表面分析であるために物体の汚れや塗装の影響を受けるが、後述のLIBSと比較するとその影響の度合いは小さい。

蛍光X線ソーターは、元素分析に基づく識別であるので、ミックスメタルの選別が可能である。さらに、微量に含まれる添加元素の含有量を検知することで銅合金やアルミ合金同士の選別が可能となる。この他にも、蛍光X線ソーターは、着色ガラスの選別や防腐処理木材の選別などにも利用されており、今後様々な用途が見出されているものと考えられる。

#### 蛍光 X 線ソーター



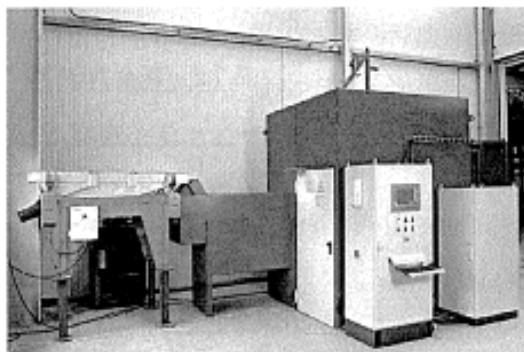
(資料) 環境資源工学会「粉体精製と湿式処理－基礎と応用」

### ⑥ レーザー誘起プラズマ分光分析法 (LIBS)

レーザー誘起プラズマ分光分析法 (Laser induced breakdown spectroscopy) は、対象物に高出力パルスレーザーを集光照射して (ピーク出力  $100\text{GW}/\text{cm}^2$  程度)、物体表面の微細な集光スポット近傍に瞬間的にプラズマを発生させ、その発光スペクトルを検知することで、元素の定性・定量を行う分析法である。本分析法は蛍光X線分析と比較して検出元素範囲が広く精度も高い。また、瞬時に測定が行われるために高速処理が可能である。しかし、測定領域 (集光スポット) が極めて小さいため、物体表面の汚れや塗装などの影響を受けやすいという問題がある。

現在、レーザー誘起プラズマ分光分析法をソーターに応用する研究開発が欧州の研究機関を中心に進んでいる。近い将来、LIBSソーターがミックスメタルや合金選別などの目的で利用されるものと考えられる。

## 欧州研究機関で開発中の LIBS ソーター



(資料) 環境資源工学会「粉体精製と湿式処理－基礎と応用」

### ⑦レーザー 3D 解析

レーザー 3D 解析 (laser 3D analysis) は、ベルトコンベア上を移動する物体の表面を線状のレーザー光でスキャンし、レーザー光のラインの高さ方向への動きを CCD カメラで検知して物体の 3 次元形状をデジタルデータとして計測する方法であり、光切断法とも呼ばれる。計測したデータから物体のサイズや形状を算出することで、これらの違いに基づいた選別が可能である。レーザー 3D 解析による選別は、安価、高解像度、高速処理といった光学ソーターと同様の利点を有しており、他のセンサーと組み合わせることも多い。LIBS ソーターでは、レーザー 3D 解析を対象物の位置と大きさを検知する手段として用いている他、「レーザー 3D 解析とカラーカメラとの組み合わせ」によるプリント基板片の部品搭載の有無による選別などが行われている。

### ⑧その他のソーティング技術

現在は研究段階にあるが、将来のソーター選別機として実現の可能性がある技術として、以下が挙げられる。

表 4-10 その他のソーティング技術

ラマン分析による方法	物体にレーザー光を照射した際に観測されるラマン散乱光（照射光と異なる振動数を有する光）を検知し物体を識別する方法である。近赤外線ソーターでは不可能な黒色プラスチックの選別やプラスチックに含有する難燃剤の識別などへの応用が考えられている。
温度差を検知する方法	物体をマイクロ波で急速加熱し、昇温、降温過程の温度変化特性の違いから物体を識別する方法であり、廃プラスチックの選別法としての研究が行われている。
中性子線の利用	物体に中性子線を照射して内部の原子核を放射化し (neutron activation)、同時に発生する即発 $\gamma$ 線 (prompt gamma ray) が原子核に固有のエネルギー

	を持つことを利用した元素分析法（PGNAA 法）を利用すれば、非破壊で対象物の内部に存在する元素の定性・定量分析が可能になる。最近になり、低コストかつ比較的安全な中性子線源が開発されたこととγ線検出器が高機能化したことにより、ソーター選別への応用が検討されている。
テラヘルツ波の利用	テラヘルツ波とは、波長 3 μm～3 mm、周波数 0.1～10THz の電磁波のことである。テラヘルツ波は、電波のように紙、プラスチック、繊維などを透過し、光波のようにレンズやミラーで空間を取り回すことができる。テラヘルツ波をソーター選別に応用する研究が行われている。

（資料）環境資源工学会「粉体精製と湿式処理－基礎と応用」

### （7）形状選別

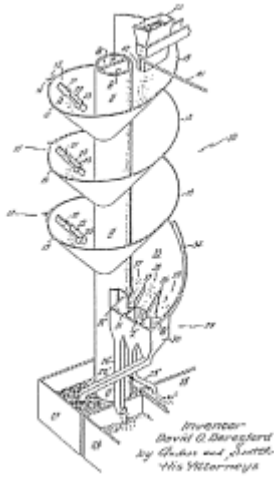
形状選別とは、形状の異なる粒子、例えば球形粒子と非球形粒子を、形状の差異に起因する物理特性の違いを利用して分離する技術である。最近では廃棄物の選別においてもしばしば利用されている。空気分級のように微粒子を精度よく分離することはできないが、その装置構造が簡単であり必要とする動力も比較的少ないことから、粗粒子の低コストな選別法として、資源リサイクル分野で重要な選別技術の一つとなっている。固体粒子の形状分離技術は次のように分類される。

表 4-11 形状分離技術の分類

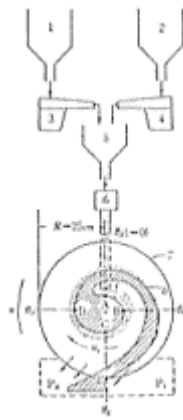
原理	形状分離法	
滑り・転がり速度の差を利用	可動部なし	<ul style="list-style-type: none"> <li>・らせん勾配法</li> <li>・傾斜管法</li> </ul>
	可動部有り	<ul style="list-style-type: none"> <li>・傾斜回転円板法</li> <li>・傘型回転円板法</li> <li>・傾斜回転円筒法</li> <li>・傾斜振動板法</li> <li>・傾斜コンベア法</li> <li>・水平円運動板法</li> </ul>
空隙の通過速度の差を利用		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ふるい法</li> <li>・振動ふるい法</li> <li>・回転円筒ふるい法</li> </ul>
その他、研究段階の技術		<ul style="list-style-type: none"> <li>・付着ドラム法</li> <li>・吸引ドラム法</li> <li>・流体抵抗法</li> </ul>

（資料）環境資源工学会「粉体精製と湿式処理－基礎と応用」

らせん勾配法

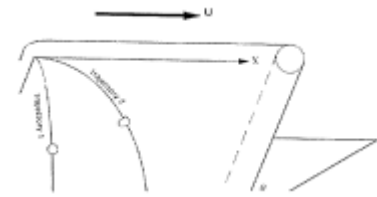


傾斜回転円板法

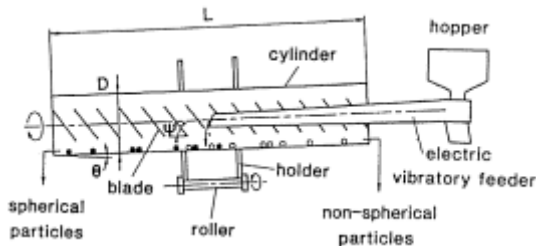


- 1 Hopper for spherical particles
- 2 Hopper for non-spherical particles
- 3,4 Electric vibratory feeder
- 5 Collecting vessel
- 6 Electric vibratory conveyor
- 7 Inclined rotating disc
- 8 Stationary spiral scraper
- 9 Spherical particle products
- 10 Non-spherical particle products

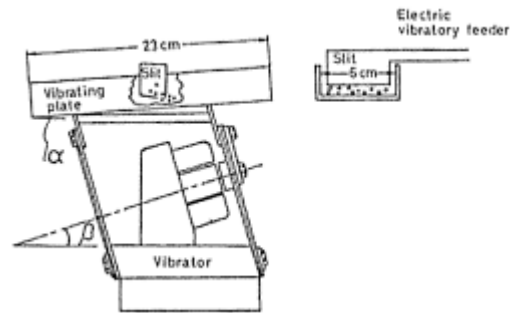
傾斜コンベア法



傾斜回転円筒法



傾斜振動板法



(資料) 環境資源工学会「粉体精製と湿式処理－基礎と応用」

傾斜振動板法と傾斜コンベア法は、構造が極めて簡単で連続処理が可能であり、摩擦係数の違う種々の粒子の分離が可能であることから、形状分離技術の中では汎用性の高い方法であり、様々な応用が試みられている。

### 形状分離技術の小型電子機器等への応用例

- ・プリント基板を衝撃粉砕した際に、傾斜コンベア法を用いて銅成分を分離
- ・傾斜振動板によってプリント基板廃材を形状分離
- ・静電選別と傾斜振動法の組み合わせによる廃プラスチック粒子の選別
- ・弱い磁力選別と傾斜コンベア法の組み合わせによる小型電子部品の選別

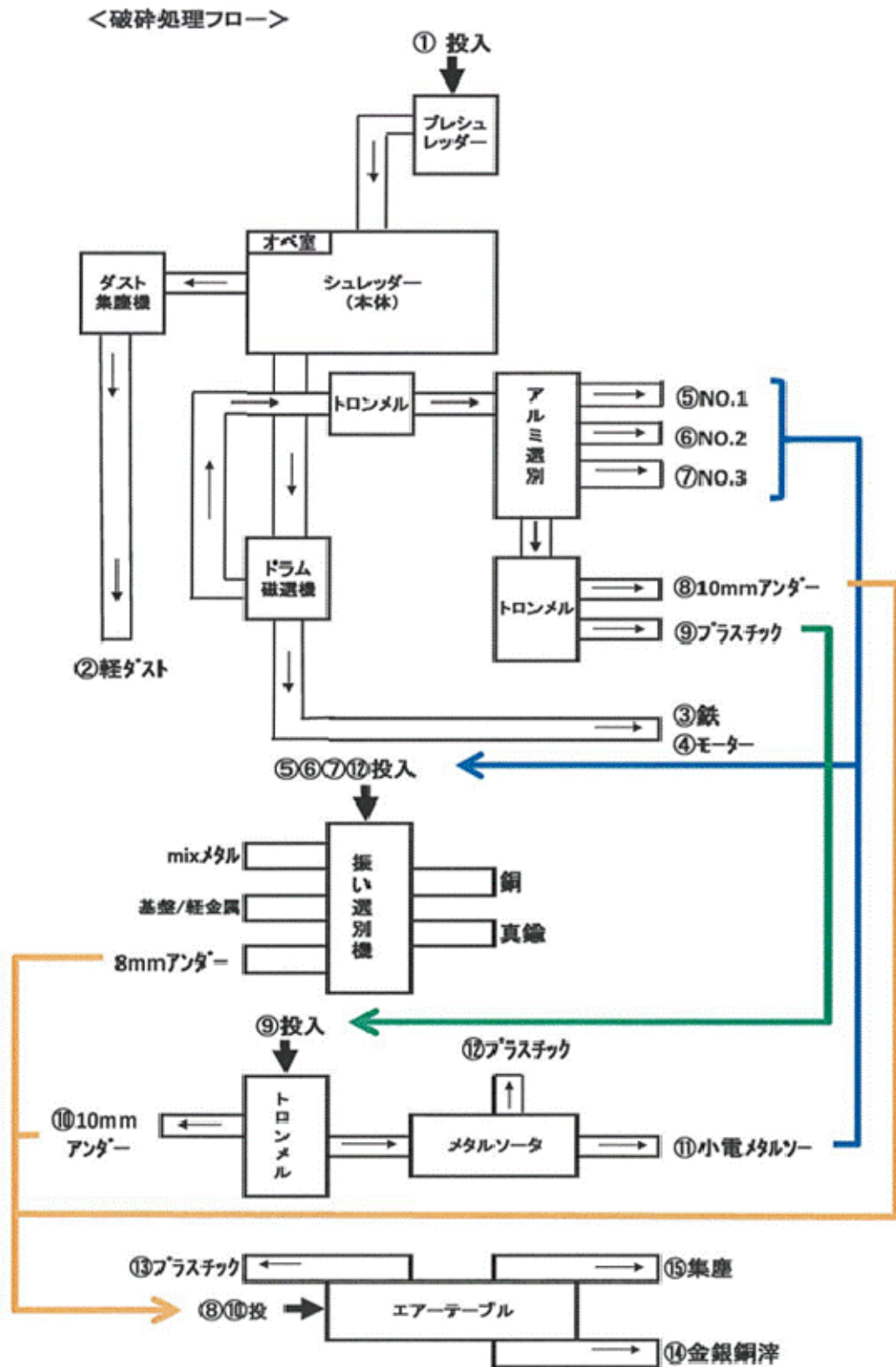
(資料) 環境資源工学会「粉体精製と湿式処理－基礎と応用」

### (8) 実際の現場でのベースメタル・貴金属の分離技術活用状況

ここでは、現地調査で訪問した鈴徳児玉営業所におけるベースメタル・貴金属の分離技術について概観した。

ベースメタル・貴金属の分離技術は、プレシュレッダー、シュレッダー、ギロチンシャーによる破碎技術、トロンメル、ドラム磁選機、振り選別機、メタルソータ、エアテーブル（風力選別機）等の選別技術から構成される。

図 4-2 鈴徳児玉営業所におけるベースメタル・貴金属の破碎処理・選別フロー



(資料) 鈴徳児玉営業所資料



小型家電等の荷受け、荷下しヤード



プレシュレッダーへの投入クレーン



プレシュレッダーでの受入



プレシュレッダー後の状態



1,500馬力のシュレッダー本体室



シュレッダー後の状態



ダスト集塵機通過後の軽ダスト



ドラム磁選機通過後の鉄、モーター等



アルミ選別機



3種類のアリミへの選別状況



鉄シュレッダー屑



トロンメル通過後の 10mm アンダー物





メタルソータ



メタルソータ通過後有価物



エアテーブル



エアテーブル通過後の金銀銅滓



振り選別機



振り選別機通過後の mix メタル



手選別で銅、真鍮、基板等を分離



手選別後の銅



手選別後の真鍮

使用済小型電子機器は、所沢市、秩父広域市町村圏組合など3カ所から受け入れている。受入量は100～150t/月程度とのことである。

以下、現地調査時の質疑応答の結果を示した。

Q：小型家電の場合、手選別工程はどこに入れるのか？

A：前工程に入れる必要性も感じている。現時点で理想形と想定するフローを次ページ図に示した。

Q：どのような小型家電の受入が多いか？

A：季節商品の受入が多い。冬場はストーブ、電子レンジ、電子ジャー等。これからは扇風機が多くなる。掃除機、ガステーブル等も受け入れている。

Q：自治体からの小型家電の受入単位は？

A：1回あたり大型アームロール車程度が望ましい。

Q : 小型家電のサイズも多種多様であるが、小さいものでも対応可能か。また、ボックス回収で回収した異物も受け入れてもらえるか？

A : 児玉営業所では小さいものでも対応可能。異物としてガスボンベ、乾電池、木くず、繊維くず等が混入すると困る。

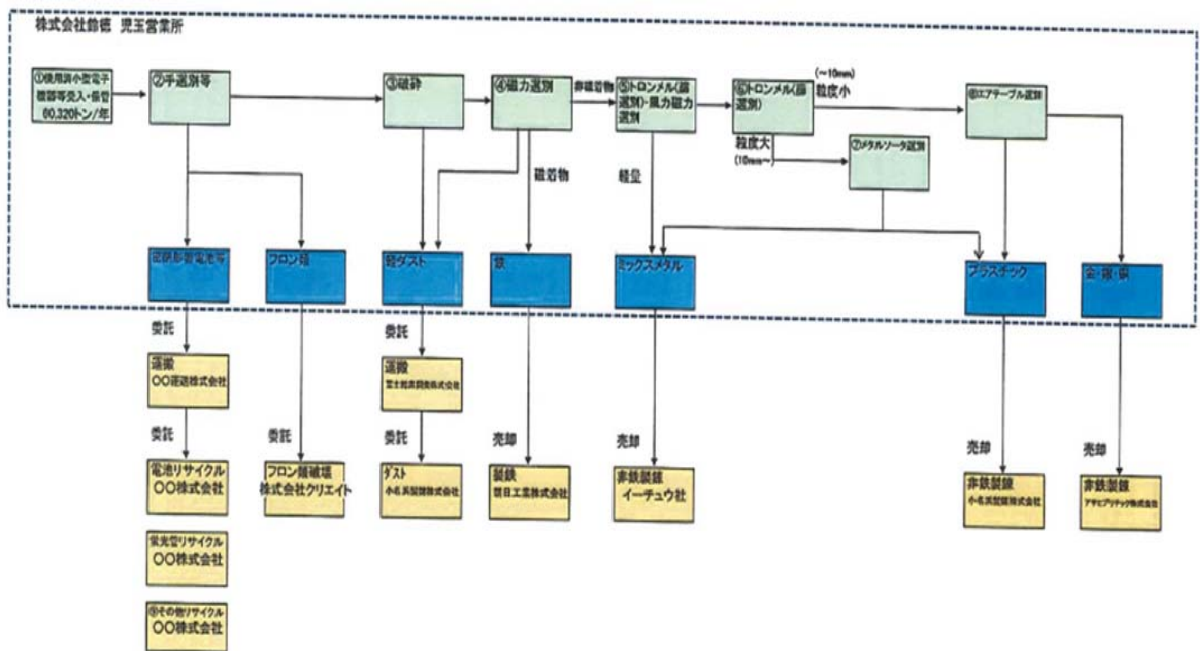
Q : 国によるリサイクル検討優先鉱種であれば売却できるのか？

A : すべて売却できる。

Q : NNY に処理委託しているものはあるのか？

A : 小型家電を処理して回収するミックスメタルは NNY に処理委託をする。それ以外の原材料を処理して回収するミックスメタルは、児玉営業所独自のルートで売却する。

図 4-3 使用済小型電子機器等の処理フロー



(資料) 鈴徳児玉営業所資料

## 2. レアメタルの分離・回収技術

大木達也「中間処理とレアメタルリサイクル技術の展開」(廃棄物資源循環学会誌 Vol.23 No.4 ,2012)によれば、“レアメタルをリサイクルするには、物理選別による中間処理を製錬工程に施し、銅や貴金属と分離しつつ、レアメタル元素を一次濃縮することが不可欠である。中間処理工程は、廃製品を解体、粉碎、選別するプロセスからなるが、レアメタルは製品中に局所的に使用されているため、現状では我が国でも手作業が多用されている。”とされている。

また、“レアメタルは製品中の含有率が鉄やアルミに比べて低いため、そのままでは湿式製錬工程での回収は経済的に難しい。また、低濃度の金属(主として銅・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、回収は技術的に困難となる。”とされている。

一方で、“経済性、持続性を維持した国際競争力あるレアメタルリサイクルを目指すには、中間処理プロセスの機械化、自動化を伴うプロセスの高度化が重要である”と指摘している。

使用済小型電子機器からのレアメタル分離・回収技術は、これからの技術開発に期待されるところが大きい。レアメタルを事前に物理選別するには克服すべき廃製品個別の課題も多いが、大木達也「中間処理とレアメタルリサイクル技術の展開」(廃棄物資源循環学会誌 Vol.23 No.4 ,2012)を引用し、ここではレアメタルの分離・回収技術に係る共通課題を示した。

### (1) 粉碎と単体分離

廃製品はレアメタルを含む複合体であるため、物理選別するには、まずは各要素に破壊をしなければならない。破壊する方法には、人手あるいは機械によって1製品ずつ解体する方法と、多数の製品をまとめて装置に投入して粉碎する方法に分かれる。自動車や白物家電、コピー機などの大きな製品は、解体によっても一定の効率を得ることができるが、小さなプリント基板等を個別に解体・破壊することは、一般には効率的とはいえない。経済性や作業効率を踏まえるならば、まとめて粉碎する方が有利である。

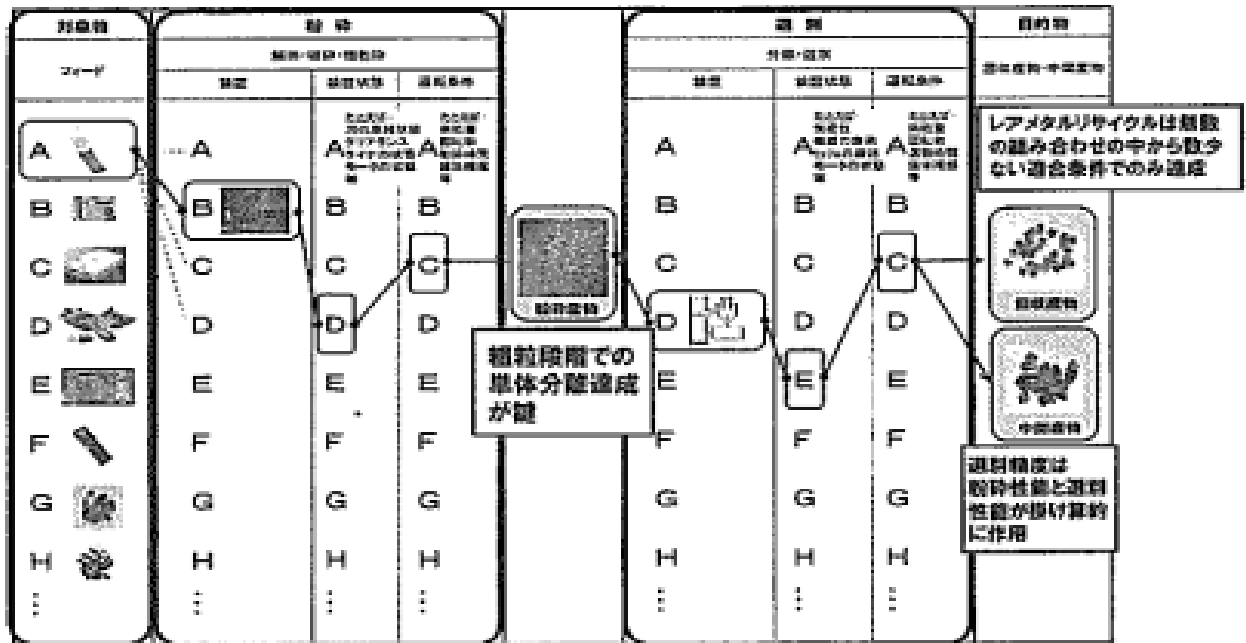
ここで、多くの工業プロセスにおける粉碎の効用は、流動性や均一性の付与、加工性や反応性の向上等であり、いいかえれば微粉碎により粉体の「均一化」を進めることが目的である。一方、物理選別における粉碎の目的は、唯一「単体分離」の促進にあるといっても過言ではない。単体分離とは、1粒子が1成分で構成された状態にすること、あるいは、なった状態をいう。この「成分」とは回収したい対象物であり、状況に応じて回収したい「元素」や「合金」や「複合物」を指す。粒子が単体分離、あるいはこれに準ずる状態になっていなければ、その後いかなる選別技術を駆使しても、回収対象を高度に濃縮することはできない。粉碎は、特定成分の高度な選別を可能にするための前処理であ

り、ここでは、粉体の「不均一化」を進めることが目的となる。粉体が進んで細分化されれば、多成分からなる複合粒子（片刃粒子という）が次第に単体分離してゆき、個々の粒子はより不均一化な状態となる。しかし、さらに粉砕が進み、極めて微細な状態（たとえば  $10\mu\text{m}$  以下）になると、マクロ的に見れば良く混ざった状態、つまり、集合体としての均一化が進行し、そこから選別によって特性成分を取り出すことが困難になる。粉砕による単体分離の促進は、集合体としての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であるため、粗粒段階で単体分離を達成させることが肝要である。決して無闇に微粉砕してはいけない。もし、各粒子が平均した成分比を維持しながら相似形に細分化され、粉砕によってまったく単体分離がなされていない著しく不適切な粉砕法の下では、その後にかなる物理選別技術を駆使しても濃縮はほとんど期待できない。

図 4-4 は、粉砕－選別からなる簡単な物理選別プロセスの例であるが、最終産物の品位（純度）と回収率（両者を合わせて Newton 分離効率で表すことも多い）は、粉砕後の粒子サイズと単体分離度に強く依存する。中間処理でレアメタルが濃縮できるか否かは、いかに粗粒段階で集合体としての不均一性を保ちつつ、単体分離、すなわち、個別粒子としての不均一化を達成させるかにかかってきている。このような不均一化を達成させる粉砕方法は「選択粉砕」と呼ばれ、中間処理プロセスにおいて最も重要な単位操作の一つである。しかし、極めて重要な位置づけにあるにもかかわらず、対象物の構造や物性に合わせた多様な粉砕形態が要求されるなど、選択粉砕の達成は技術的に難易度が高いため、万能な選択粉砕機というものは存在しない。現状では、各種の粉砕機が、特定の対象物に対して偶然にその選択粉砕性が見いだされるのを待つしかなく、理論的なアプローチ、あるいは組織的な取り組みによって技術を体系化することが望ましい。

図 4-4 中間処理プロセスで想定される選択枝の一例

物理選別はいかに不均一にするかの技術



(資料) 大木達也「中間処理とレアメタルリサイクル技術の展開」(廃棄物資源循環学会誌 Vol.23 No.4 ,2012)

## (2) 物理選別技術

粉砕した段階では、未だ種々の粒子が混在した状態であるため、次に物理選別条件を施すことが必要である。物理選別では、粒子の物性の差を利用して分離が行われる。上記の粉砕性も粒子物性の一つであるが、ここでは粒子の破壊を伴わない密度や磁性などの物性が対象となる。また、選別媒体によって、気相中（通常は空気）で行われる乾式選別と、液相中（通常は水）で行われる湿式選別に分離される。乾式選別法は乾燥や水処理を行わないため、一般的には省エネルギー、省コスト、低環境負荷に選別することが可能である。一方、湿式選別法では、乾式法に比べて分離精度の向上が期待できる場合もあるが、水循環の動力や回収産物の脱水、乾燥などが必要となり、エネルギーやコストの面でやや不利である。また、粒子物性のうち密度や磁性など粒子バルクの性質を利用した湿式選別法は、多くの場合、ケミカルフリーで選別ができるが、表面性質を利用した湿式選別法では、界面活性剤や高分子凝集剤等が利用されることが多く、排水処理の負荷も大きくなる傾向がある。

このように、エネルギーやコストの観点から見れば乾式選別が有利であるが、これらの選別には、技術を特徴付けるもう一つの因子があるため、必ずしも乾式選別だけを利用することができない。その因子とは、適用粒径としては、たとえば、乾式選別で 1 mm、バルク性質利用の湿式選別で 50 μm が目安となる。50 μm 以下、特に 10 μm 程度のサイズになると、一般的には表面性質利用の湿

式製錬に頼らざるを得なくなる。選別工程をいかに省エネ・省コストで実施できるかは、粉砕工程においていかに粗粒段階で単体分離させるかに関わってくる。すなわち、mm オーダー以上のサイズで単体分離が達成できれば、選別工程にて乾式選別法が適用できるため、中間プロセス全体を経済的に実施することができる。逆に、単体分離達成に微粒子化を余儀なくされれば、バルク性質利用の湿式選別や表面性質利用の湿式選別を適用せざるを得なくなる。これに伴って、プロセスの消費エネルギーやコストが嵩むだけでなく、分離の困難度が増すため到達できる分離効率も低下する傾向がある。

従来から行われてきた、銅、鉄、アルミにおうむなど構造材を主対象とするリサイクルでは、通常は mm オーダー以上の粒子を対象とすれば良く、乾式選別が多用されてきた。しかし、微小な形態で存在するレアメタルをリサイクルする場合には、対象製品に合わせて粉砕方法を最適化してゆかなければ、乾式選別で対応することが難しくなる。また、レアメタルの中には、蛍光体や電極材など、粉砕を施さなくとも、元から数十  $\mu\text{m}$  オーダーのサイズを有しているものも少なくない。この場合、湿式選別の適用は避けられないが、プロセスの経済性を維持するには、いかにバルク性質利用の湿式選別法で対応するかが鍵となる。

以上のように、レアメタルのリサイクルを実現するには、一連の粉砕－選別工程におけるコンビネーションが極めて重要となる。なるべくサイズの大きな粒子段階で単体分離を達成させ、選別を行うために対象物に応じた最適な中間処理工程の設計が必要となってくる。

また、レアメタルのリサイクルを実現する上では、製品を消費して使用済後に回収する市民や自治体など消費地での取り組みや、再資源化されたものを原料として受け入れる生産地での取り組みが注目されがちである。しかしながら、従来のリサイクルとは異なり、レアメタルのリサイクルでは克服すべき課題が多いため、消費地と生産地を結ぶ橋渡し機能を充実させなければ、その実現は困難となる。しかし、この橋渡し機能、すなわち、廃製品を粉体原料や金属製品にする中間処理・製錬技術と、中間処理を円滑に進めるためのリサイクル設計については、相対的に担い手が少なく、必ずしもその研究開発が活発であるとはいいがたい。そのため、産業技術総合研究所の大木達也氏は、この橋渡し機能を「資源循環インターフェース」と名付け、レアメタルリサイクルの推進、ひいては戦略メタルの資源循環促進に不可欠な技術として、その開発の促進を目指している。

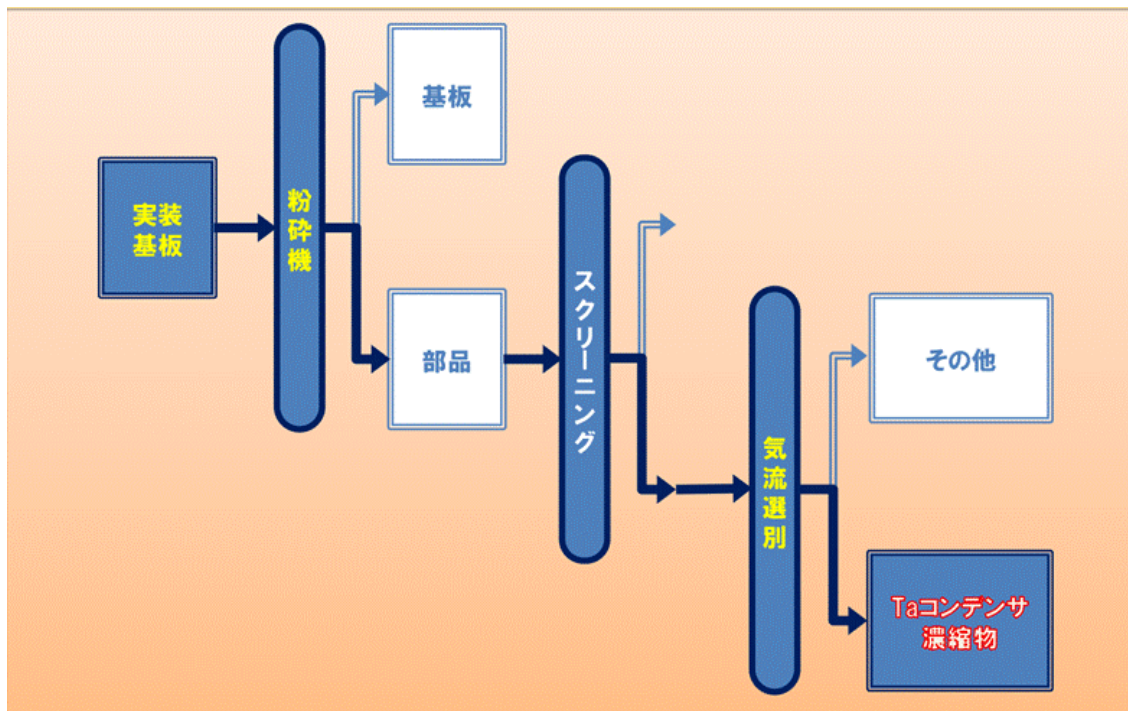
### (3) 実際の現場でのレアメタルの分離技術活用状況

以下は、現地調査で訪問したリーテムにおける廃製品からのタンタルコンデンサの分離・濃縮技術について概観した。

分離・濃縮対象としているタンタルコンデンサはPC、サーバである。

本技術は、基盤からタンタルコンデンサを剥離する剥離破碎機、タンタルコンデンサの濃縮を図る複管式気流選別機、傾斜弱磁力磁選機から構成される。

図 4-5 タンタルコンデンサの分離・濃縮プロセス



同社が、タンタルコンデンサの分離・濃縮プロセスの開発に取り組んだ経緯として、1)いばらきレアメタルリサイクルプロジェクト（平成 20～23 年）での活動、2)国によるリサイクル検討優先鉱種へのタンタルの指定、3)米国による「紛争鉱物」の指定（ドット・フランク法）、などが挙げられる。

いばらきレアメタルリサイクルプロジェクトの活動を通じ、産業技術総合研究所や物質材料研究機構、茨城県と共同研究を行う環境が整備され、NEDO の補助を受けた電子基板からのタンタル回収事業につながった経緯がある。

タンタルは同社がよく取扱う通信機器に含まれる鉱種でもあり、国による検討優先鉱種に指定されたことが取組を推進する原動力となった。

また、米国での「紛争鉱物」の指定は、タンタルの資源価値が将来的にも下がらないと判断しうるものであり、このこともタンタルコンデンサの分離・濃縮プロセスの開発の追い風となった。



## タンタルのリサイクルへの取り組み

### 廃製品からのタンタルコンデンサの 分離・濃縮プロセスの開発に取り組んだ経緯

#### ■ いばらきレアメタルリサイクルプロジェクト(H20-23)での活動

茨城県連絡会議(H20-23)  
環境省「使用済み小型家電回収モデル事業」(H20-23) など



#### ■ 国によるリサイクル検討優先鉱種(14種)の指定

タンタルは、14種の中でも「リサイクルを重点的に検討すべき5鉱種」に選定され、リサイクル技術の確立が急務とされる。当時、タンタルコンデンサを分離、濃縮する実用可能な技術がなかった。

#### ■ 米国による「紛争鉱物」の指定(ドッド・フランク法)

米国に上場している企業は、タンタル、タングステン、すず、金を製品に使用する場合、2013年より調達先を調べて開示することが求められる。ただし、リサイクル品であれば調査は不要。

(資料) リーテム資料

## タンタルリサイクル工程開発の概略

### 電子基板等からのタンタル回収の実用化に向けた研究開発

- NEDO 平成22年度「希少金属代替・削減技術実用化開発助成事業」として実施
- タンタルコンデンサのリサイクルプロセスとして、世界初の実用化

#### コンセプト

リーテムの電子部品類の剥離と濃縮工程のノウハウと、産総研のタンタルコンデンサ高濃縮可能な気流選別装置との組み合わせで、電子基板からタンタルコンデンサの濃縮物を得る工程を構築。

#### 目的

- ① タンタルコンデンサの回収を目的とした破碎・選別プロセスの構築
- ② タンタルコンデンサ回収のためのベンチスケールプラントを導入し、実用可能性について検討
- ③ ベンチプラント試験で回収したタンタルコンデンサに対して、タンタルの回収が可能であるかの総合評価

(資料) リーテム資料

開発された剥離破碎機は、既存の破碎機の中から同社の条件に最も合致するものを選定し、近畿工業に改造を委託し、共同で試験を繰り返して性能を向上させたものである。試験にあたっては、早稲田大学の和田研究室の協力も得た。改造の際には、できるだけ基板やタンタルコンデンサを壊さない形で剥離させることがポイントとなった。

## 破碎工程：剥離破碎

既存の破碎機の中から条件に最も合致するものを選定し、メーカー(近畿工業株式会社)に改造を委託、共同で試験を繰り返して性能を向上させた。



(資料) リーテム資料

## 基板剥離破碎の結果

破碎前の基板



破碎後の基板



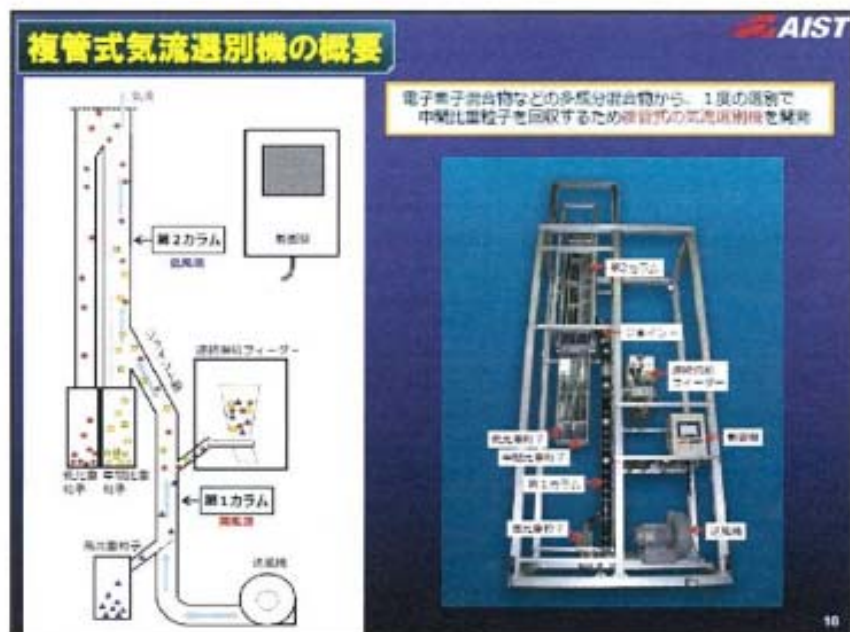
基板上的素子類が剥離

(資料) リーテム資料

この選別工程（タンタルコンデンサの濃縮工程）において使用される気流選別機は、産業技術総合研究所がベンチスケール機の設計を行い、日本エリーズマグネチックスに装置の作成を依頼したものである。複管式気流選別機は、上昇気流を2種類作れる点がポイントである。

2つのカラムを用いて、それぞれ風速の異なる上昇気流を作る。それにより、個々のカラムで投入物が比重の軽いもの、重いものに分かれるため、2つのカラムを通ると、低比重粒子、中間比重粒子、高比重粒子の3成分に分離できる。タンタルコンデンサは、このうち中間比重粒子として分離される。

## 選別工程 複管式気流選別機

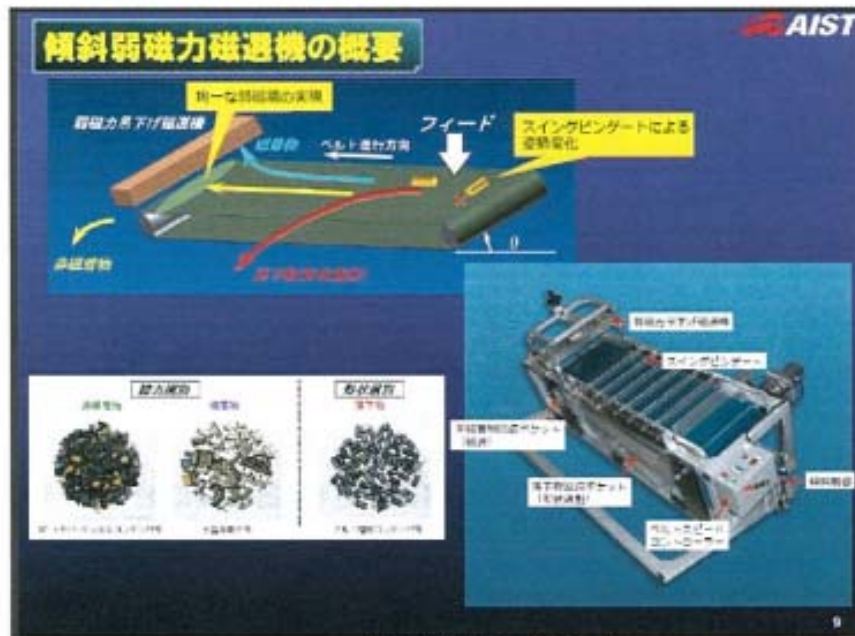


産業技術総合研究所 プレスリリース2012/5/18

(資料) リーテム資料

さらに、傾斜弱磁力磁選機を通すことで、「中間比重粒子」におけるタンタルの濃縮を図れる。

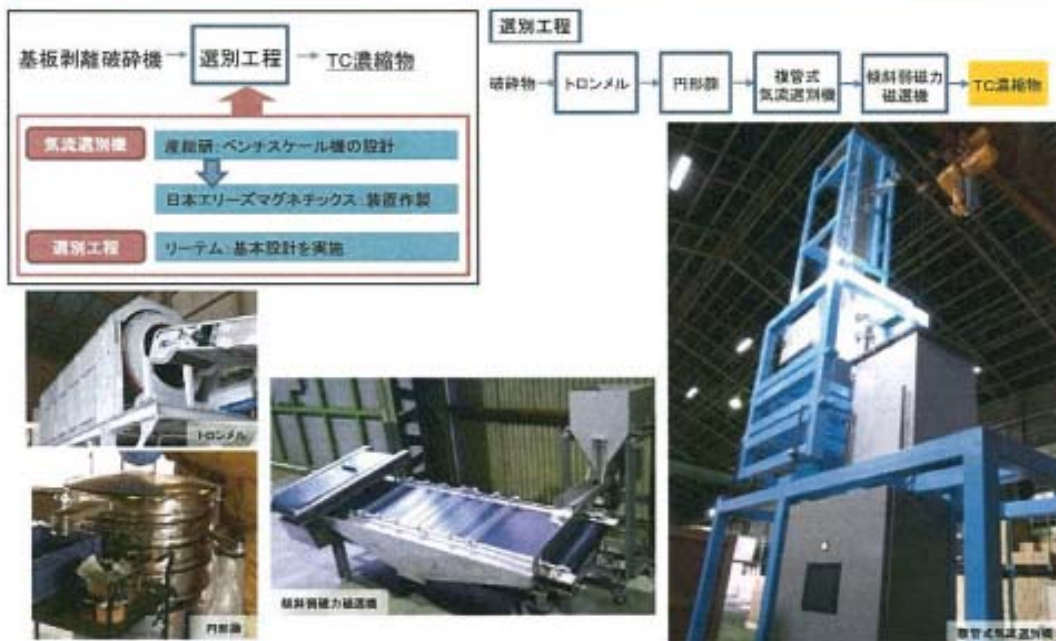
## 選別工程 傾斜弱磁力磁選機



産業技術総合研究所 プレスリリース2012/5/18

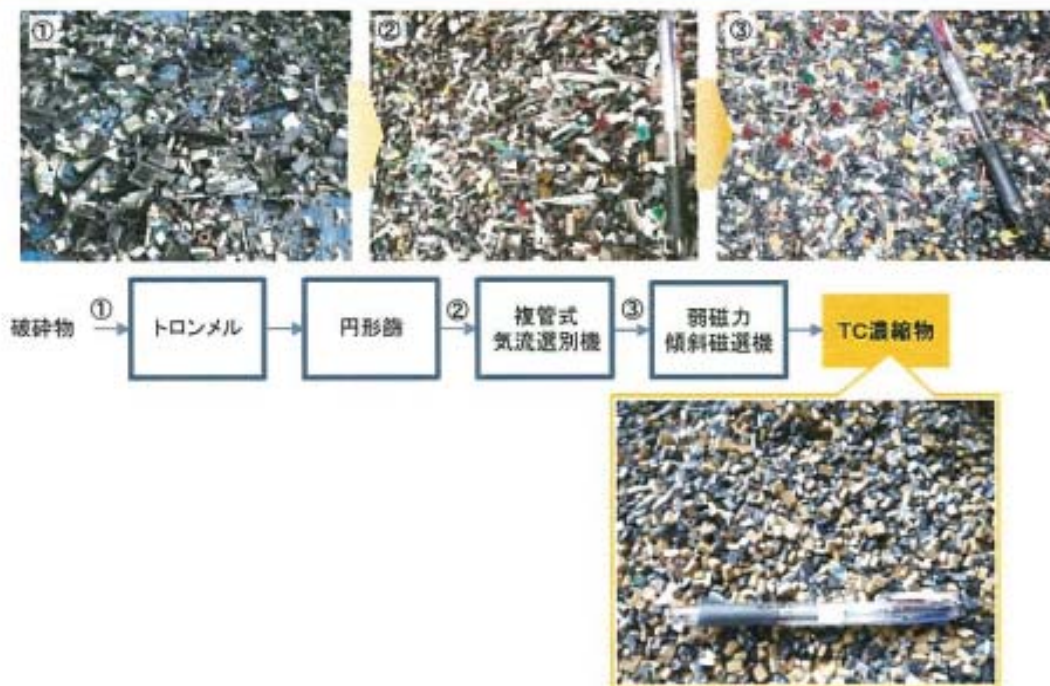
(資料) リーテム資料

## 選別工程



(資料) リーテム資料

## 選別工程の結果



(資料) リーテム資料

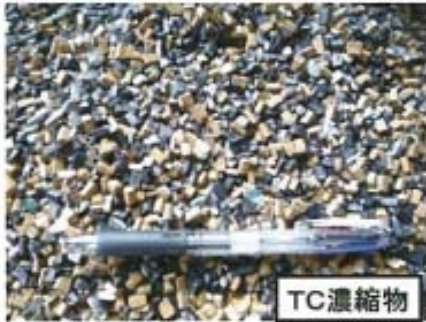
現状、タンタル製錬業者に受入可能な濃度にまでタンタル濃縮ができています。三井金属鉱業にタンタル品位を評価してもらったところ、タンタル品位が最大で40%との評価を得ています。

同社では、基板に付着しているタンタルコンデンサのうち剥離・選別し、最終産物として回収できる割合をタンタルコンデンサ回収率として把握しています。現状、タンタルコンデンサ回収率は53～67%となっています。

また、最終産物であるタンタルコンデンサ濃縮物に占めるタンタルコンデンサの割合（タンタルコンデンサ品位）は69～97%となっています。

工程のさらなる改善、効率化を通じて、品位・回収率のアップを目指しています。また、サーバ、PC以外のタンタルコンデンサ付基板についても検討しています。

## 工程全体の結果



タンタルコンデンサ濃縮物	
重量	0.9-3.5%
タンタルコンデンサ回収率	53-67%
タンタルコンデンサ濃縮比	38-57
タンタルコンデンサ品位	69-97%

H24年9月時点

- ・ 工程のさらなる改善・効率化により、品位・回収率アップを目指し、改良を加えている。
- ・ サーバー、PC以外のタンタルコンデンサ付基板についても検討している。

この成果は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成事業の結果得られたものです。

(資料) リーテム資料

なお、気流選別機でタンタルコンデンサ濃縮を行う前段階で、トロンメルと円形篩を用いて破碎物の大きさを軸に、タンタルコンデンサ濃縮物とそれ以外のもの（5種類）の選別を行っている。



円形篩



タンタルリッチな部分の選別イメージ

### 3. 製錬技術

ここでは、ベースメタルや貴金属の回収技術である製錬技術について、概観した。なお、関東管内に所在する製錬所もしくは処理工場のみを対象とすることとした。

#### (1) 湿式製錬による貴金属回収

アサヒプリテックでは、半導体・電子部品業界からの貴金属回収、リサイクル工程の機械化・オーダーメイド化を図っている。関東管内では、北関東事務所所で白金・パラジウム回収を行っている。

図 4-6 アサヒプリテックの湿式製錬技術

#### 半導体・電子部品



半導体・電子部品の製造工程から貴金属含有スクラップを回収し、リサイクルのニーズに卓越した技術で対応しています。

また、表面処理工程においては、メッキ液に含まれる貴金属を中心としたリサイクル事業に取り組んでいます。

独自開発の電解式貴金属回収装置「ZIPANG」をはじめ、ユーザーの製造ラインに対応した様々な回収システムを提案しています。金、銀、パラジウムなどの貴金属回収に加え、レアメタルの再資源化や水処理再使用など環境に配慮した回収技術を併せて提供します。

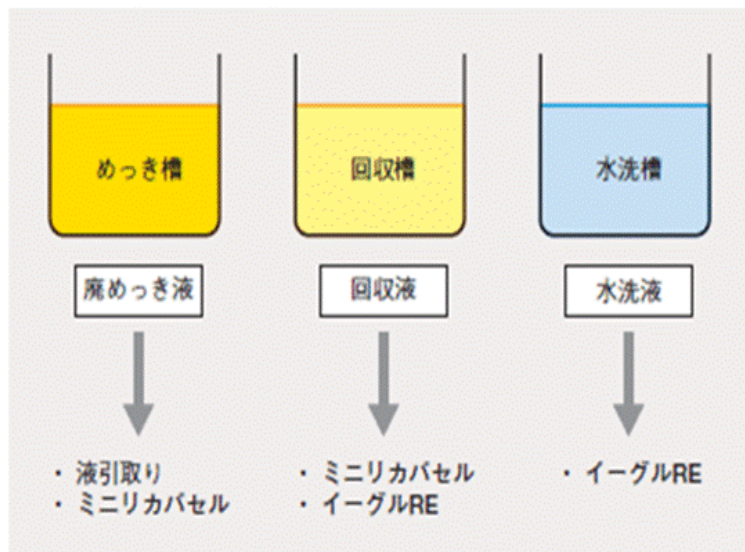


(資料) アサヒプリテックホームページ

田中貴金属は、アサヒプリテックと同様、半導体・電子部品業界からの回収・リサイクル工程の機械化・オーダーメイド化を図っている。

田中貴金属は、関東管内に市川工場（千葉県）、湘南工場（神奈川県）を有し、いずれの工場でもパラジウム、白金等貴金属の回収を行っている。

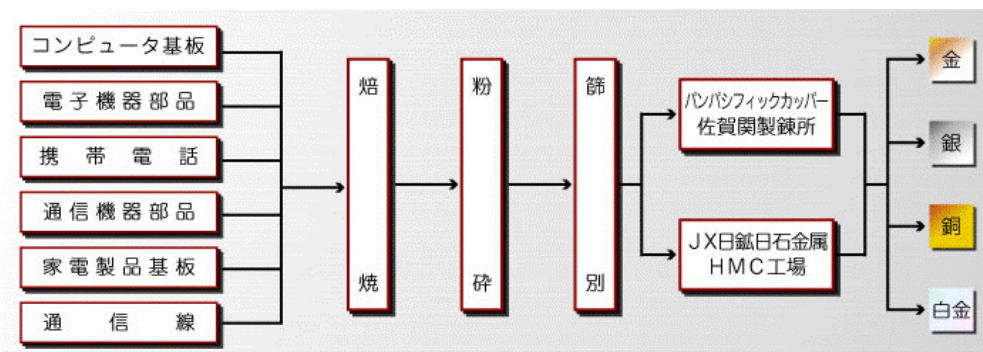
半導体・電子部品製造におけるめっき工程の廃液、回収・水洗液からの貴金属回収(金、白金およびパラジウム)



(資料) 田中貴金属ホームページ

## (2) 乾式製錬による貴金属回収

JX 日鉱日石金属の日立事業所では乾式製錬を通じた貴金属回収を実施している。



(資料) JX 日鉱日石金属ホームページ等より作成

また、レアメタルも一部回収しており、使用済電子機器からの有用金属回収のみならず、レアメタル回収の可能性もあるものと考えられる。



## HMCの特長

- 銅、鉛などの複数の乾式製錬ラインと多品種のレアメタルを分離、精製できる湿式製錬をコンパクトに組み合わせた、独自の「一貫型複合製錬・精製プロセス」です。
- リサイクル原料が大量に発生する首都圏に隣接する「大都市隣接型セカンダリー・スマルター」です。
- 回収した各種金属を、当社の電材加工事業の原材料として供給することを想定した「資源循環型製錬所」です。

## リサイクル原料からの各種金属の回収

難処理物・低品位リサイクル原料から銅・鉛・亜鉛などのベースメタルを製錬・精製します。

PGM(プラチナグループ・メタル)を含む貴金属を効率的に濃縮・精製します。

微量に含まれるレアメタルを、各乾式製錬工程で濃縮し、湿式製錬工程で効率的に分離・精製します。

## 佐賀関製錬所の中間産物からのレアメタル回収

これまで銅製錬工程では回収されていなかったレアメタルを回収します。これにより、銅製錬工程の不純物負荷を軽減し、佐賀関製錬所の安定操業および電気銅の品質向上に寄与します。

## HMCで回収される金属

	▶ 電気銅		▶ 錫		▶ 酸化アンチモン(白色粉)
	▶ ビスマス		▶ 鉛		▶ 亜鉛
	▶ 金属ニッケル		▶ インジウム		▶ プラチナ粉
	▶ パラジウム粉		▶ 金		▶ 銀
	▶ 銀粒	▶ その他 PGM (ロジウム、ルテニウム、イリジウム)			

(資料) JX 日鉱日石金属日立事業所ホームページ