

## 人手をかけずに使用済電子機器から「都市鉱石」を製造

ー発想の転換で小型分散処理に適する簡便なリサイクル手法を開発ー

平成20年11月26日

独立行政法人物質・材料研究機構

### 概要

1. 独立行政法人物質・材料研究機構（理事長：岸 輝雄）、元素戦略クラスター長の原田幸明材料ラボ長は、「都市鉱山」と呼ばれる使用済製品からの希少金属回収を促進する小型分散処理に応用可能な簡便な手法を見出した。
2. この方式は、ボールミルの粉砕能力と粉砕特性を活用したもので、数 cm 角程度に粗く破砕した電子機器を分別することなくボールミルに装入・処理ことにより基板上の素子やメッキを優先的に剥離・粉化するものである。これにより希少金属成分が濃縮された 1mm 以下の粉末が生成され、その後工程の浮選や溶解などの処理にかけやすい「都市鉱石」を粉鉱状態で得ることができる。また残った非粉化物もプラスチック、アルミ、含銅基板がそれぞれ板状で残されるため、以降のプロセスでの選別も容易になる。
3. これまでの我が国のリサイクルプロセスでは、まず解体・選別を行ってから粉砕などの処理にかけるケースがほとんどであり、いかに有効に人手をかけずに解体・選別を行うかに多くの努力がはらわれていた。それに対し、この技術は、本来製品製造側でなすべき解体設計の努力が不十分な製品群を無理して解体してやるために技術や人手を投入することを避け、混合物は混合物と割り切って一括してプロセスに投入したのち、むしろ物質自体や接合部分の物性を生かして分離させようという発想の転換を行っている。
4. またボールミルはこれまで粉末製造技術としてよく用いられる手段であるが、これまでの常識を超えて粉砕限界を超える大きな処理物を挿入することで、逆に、粉砕されにくいプラスチック、アルミなどの構造材分は残しつつ、接合部やセラミックス、メッキなどの部分を優先的に離脱させ、さらにはそれら離脱物に対してボールミル本来の効果である微粉化を行っている。
5. この方式はボールミルという簡単な装置を用いて出来るだけでなく、基本的に熱も水も必要としないために環境立地的制約が少なく、小型分散型で希少金属が濃縮された「都市鉱石」づくりに適している。さらに効果的実用化に向け、処理規模に応じたボールや回転の条件などの検討を民間企業と共同して進めている。
6. この成果は、物材機構単願特許「電子機器粉砕物」およびリーテム社との複願特許「電子機器の粉砕方法」として申請され、12月1日にエコマテリアル・フォーラム主催、物材機構元素戦略クラスター共催で行われる「都市鉱山研究会Ⅱ」でも発表される。

## 研究の背景

資源リスクの増大の中で、我が国の「都市鉱山」蓄積ポテンシャルの活用の重要性の認識は広まってきている。しかし、「都市鉱山」の可能性はあるものの、われわれはまだその「鉱脈」を見出しておらず、今も多くの使用済製品がリサイクルされことなく回収困難な散逸ストックとして散らばっている。

製品からの希少金属リサイクルの取り組みは、国、自治体、企業レベルさらには個人レベルを含めて強められているものの、資源リサイクルとして連結したチェーン状態を形成するにはなかなか至っていない。

この困難さの一因は、製品からの希少金属リサイクルはそれにより得られる希少金属の量よりはるかに大量の処理すべき廃棄物をとまなっており、その処理コストを捻出しつつ希少金属の回収で得られる利得をリサイクルチェーンを形成する経済主体で分割できるビジネスモデルを作るには、相当に安価なプロセスの連結でリサイクルチェーン形成する必要があることがあげられる。

表1に参考のために、使用済電子機器基盤の含有希少金属分を地金価格にした場合の概算例を示す。これは経済産業省の「3Rシステム化可能性調査事業」報告書集の希少金属成分%の分析データをもとに、一般的製品サイズから基盤面積を割り出し、物材機構で以前行った各種電子基板の分析から得られた平均的な基盤の面積あたりの金属量の値を使って金属分量の推定値とし、それに2005年の地金価格をかけたものであるが、このような粗い概算からも一台当たりの希少金属回収による利得は一般に期待されているものよりはるかに小さく、プロセスコストを低く抑えることの重要性がわかる。

表1 電子機器基板に含有される希少金属の地金相当価格概算値

	ビデオカメラ	オーディオ	デジタルカメラ	ポータブルMDプレーヤー	ポータブルCDプレーヤー	液晶テレビ	DVDプレーヤー	電話機	カーナビ	ゲーム機	フラッシュメモリーオーディオ(A)	携帯電話
¥/台	150	372	110	108	67	70	32	10	21	66	43	119
Co	0.04	0.16	0.04	0.04	0.02			0.01	0.02	0.04	0.01	0.45
Ni	1.90	6.99	2.86	1.54	1.15	0.60	0.43	0.18	0.79	2.80	0.38	2.34
Cu	4.21	28.97	12.75	6.15	3.74	10.88	4.17	0.71	6.90	8.32	1.50	5.01
Zn	0.07	0.52	0.25	0.06	0.10	0.48	0.04	0.03	0.08	0.13	0.01	0.09
Mo		0.12		0.01							0.01	0.04
Pd	40.07		12.33	3.08							1.23	4.31
Ag	7.12	32.74	10.61	6.21	6.37	3.18	2.43	1.58	3.18	2.73	1.70	5.62
Sn	1.27	8.47	2.11	2.01	2.32	3.16	0.85	0.51	0.95	2.12	0.28	0.93
Ta	2.82	6.26	0.94	0.31	0.63						0.06	
W	0.01	0.07		0.01							0.00	0.05
Au	77.32	274.90	51.54	85.91	51.54	25.77	17.18	3.44	8.59	34.36	37.80	96.21
Pb	14.87	7.48	16.24	1.97	0.79	23.48	5.91	3.47	0.25	14.87	0.08	3.96
Bi	0.08	0.04	0.04	0.01	0.01	0.02		0.01		0.04		0.00

現行のリサイクルシステム開発では、このプロセスコスト全体の低減を考えるよりは、有価なものを優先的に取り出していくピンポイント型の選別・摘出技術開発が数多く進められてきた。この技術開発も重要であるが、同時に、選別・摘出においては「安価な労働力による手選別」というオプションに勝するには高いハードルがあることも事実であった。

原田はこの「安価な労働力による手選別」に勝つには、最終的に機械解体をも可能とする解体指向設計が製品設計で行われそれがサプライチェーンのようにリサイクルチェーンとして管理されること以外にないとの発想から、それが不完全な現在の日本の使用済製品リサイクルでは、選別・摘出型にかわる混在物として処理するプロセスを準備しておく必要があると着想した。

混在物として処理するプロセスの参考になったのは天然の鉱石の処理であり、天然の鉱石には目的元素以外に多数の副産物となる元素を含有している。現在の製錬技術はそれらを元素レベルで分離して取り出すことは得意であり、特に日本の技術はその世界の最先端にある。そこで、そのような製錬処理にかけやすいような希少金属を多く含有した原料、いわゆる「都市鉱石(Urban concentrates)」、を製造できる低コストのプロセスを対象とした技術開発を行うこととした。

すなわち、

- 1) ヒトの認識能力、分離操作能力を極力使用しないこと
- 2) 回収のままの状態からの処理が容易なこと
- 3) 運転コストが小さく、都市立地も可能とする環境コストが小さいこと
- 4) 生成物の次段階での処理が容易なこと

を開発の目標とし、今回は、まず実験室レベルで、そのような可能性のあることを示すことで、「都市鉱石」製造の技術開発のひとつの例を提供することとした。

## 成果の内容

### 1. ボールミル法による都市鉱石粉の分離・製造

本成果の概略を図1に示す。

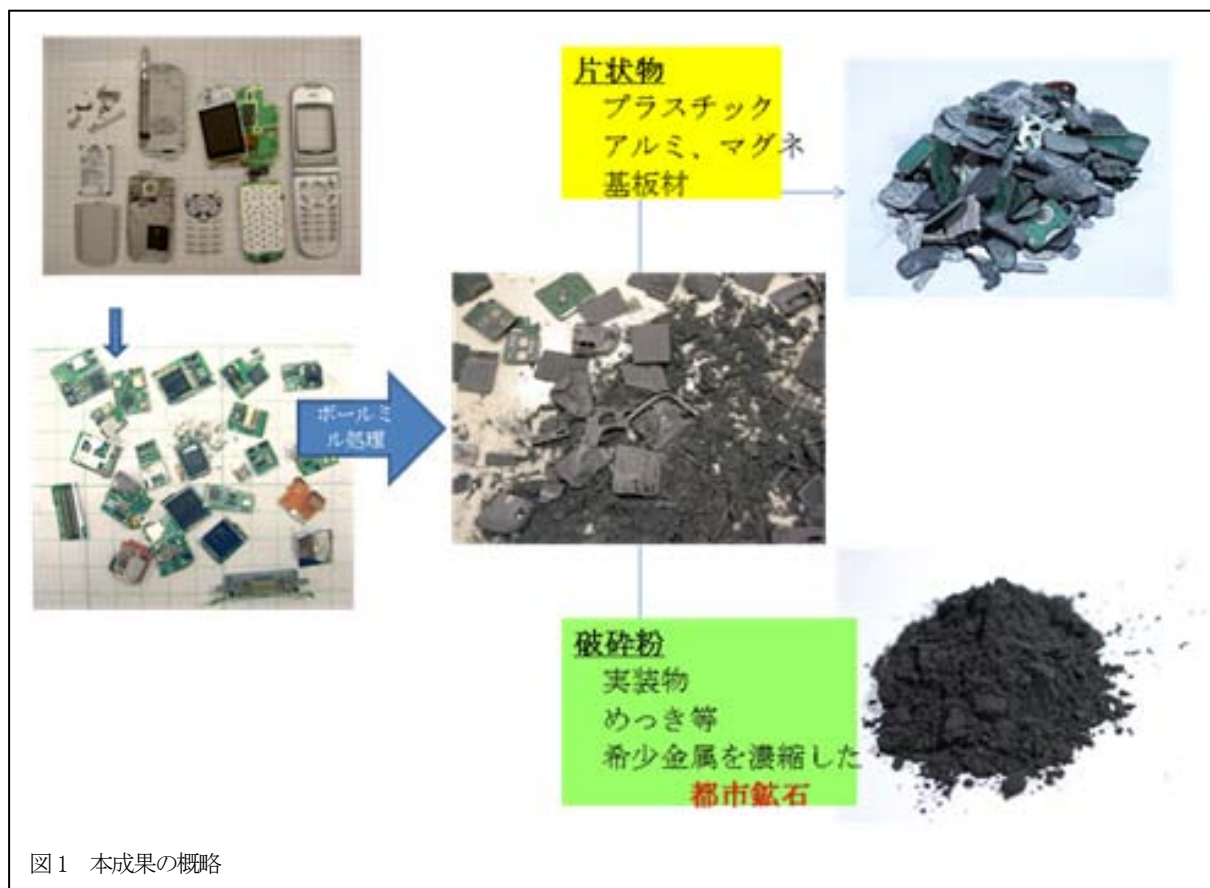


図1 本成果の概略

使用済み携帯電話を粗く切断し、ボールミル処理を行う。それにより、基板上に実装されたICチップやめっきなどは優先的に離脱せしめられ、破碎されて粉化する。他方で、プラスチック、ゴム、アルミや基板材などの構造的強度を持つ部分は、ボールミルで粉碎されること無く周囲が一部削られた程度で片状物のまま残留する。

ICチップやめっきなどの成分の多くが粉化された部分に入るため、この破碎粉は希少金属の濃度が高くなり、希少金属を濃縮した「都市鉱石」が粉鉱の状態で見られる。

使用する機材はボールミルである。検証実験の多くは遊星ボールを用いて行ったが、単純な構造でかつ低エネルギーの回転ボールミルでもその可能性は確認している。

携帯電話一台全量をボールミルに装入できる大きさに切断し、ボールミルに装入する。粉砕用のボールは、大、小、および帯状の突起の付いた異型球の3種を用いる。

ボール大の径は切断片のサイズより小さいものとする。

ボール小の径はボール大に対して最低一割程度の重量比をもちつつ、ボール大の運動を損なうほどのボール数にならない程度の球径をもつものとした。

異型ボールは、ボール小より少し大きな径とした。



ボールミル処理後の片状物を図3に示す。電子基板からは実装されたICなどの電子部品は離脱し、めっき部分も磨耗している。一方で、基板材そのものやプラスチック部分、アルミなどの金属構造材部分は周辺部が磨耗しているもののほぼそのままの形状であり、これらの構造材的部分と、実装された電子部品は基本的に分離される。



図4は 処理の中間段階で取り出した基板の粗切断片のひとつである。

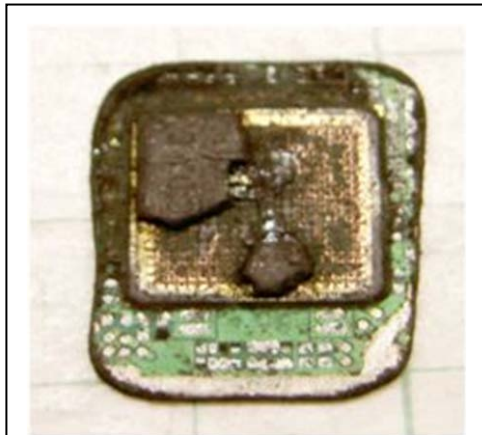
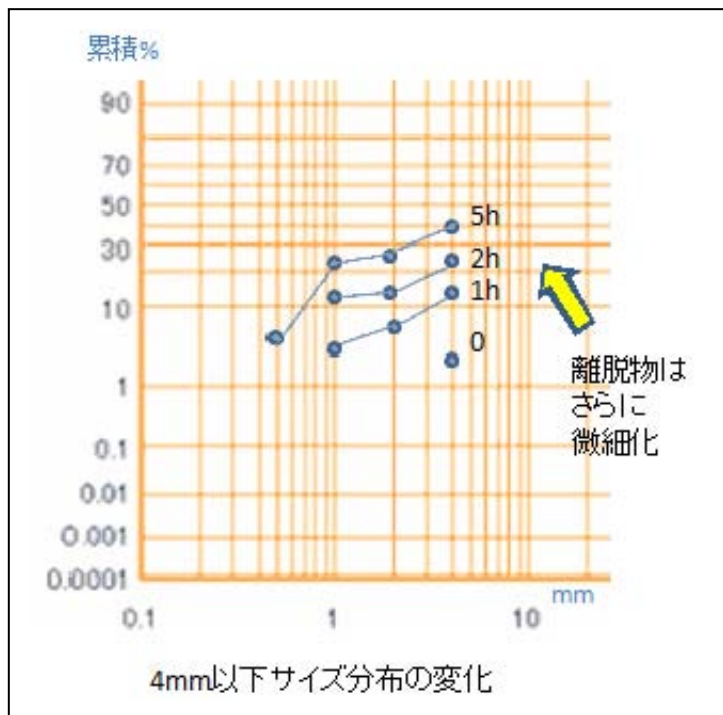


図4 中間段階の電子部品の実装された基板

実装されたLSIの封止材が破壊され欠落しながら離脱して行っている様子を表している。また、図3のa)では接合部から部品ごと剥がされた様子を示しており、機能材やその接合部は変形や衝撃に対して構造材の部分と比べて相対的に弱いため、その部分から優先的に離脱が進んでいくことを示している。

図5は 対数正規分布上にプロットした粒度分布の径時変化の一例である。時間が経過



するほど微細に粉化されたものの量が増加し、5時間後には4mm以下のものが40%、1mm以下のものが20%を超えており、離脱した部品が、ボールミルの本来の効果で微粉化されていることがわかる。

図6は、確認のために、単一のLSIチップを実装した基板だけを装入した実験を行ったもので、1時間にはチップは離脱しており、その後チップが優先的に破碎されていき、最終には5時間でチップは粉碎され基板部だけが残存する。

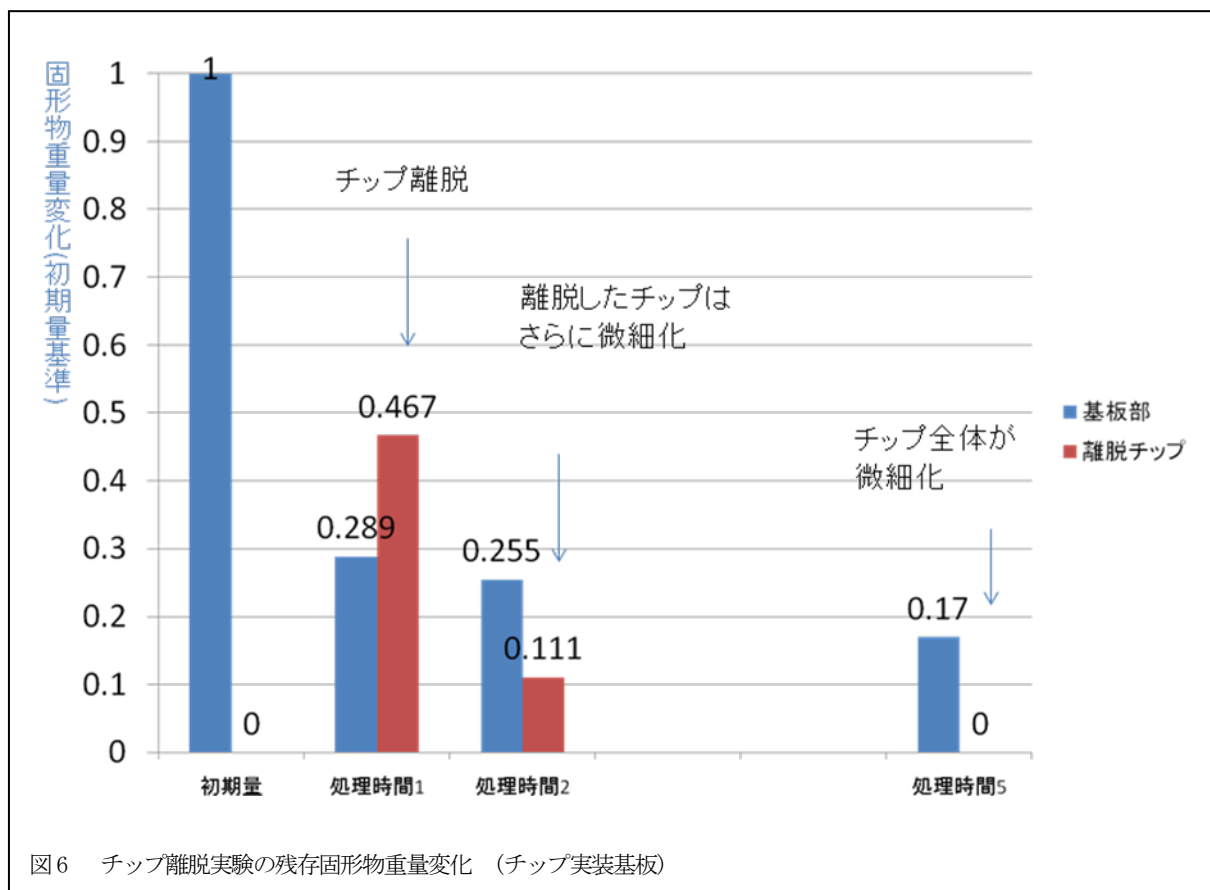


図7は、ラボスケールから実用規模への大型化が比較的容易な転動ボールミルで、同様な都市鉱石の製造が可能か確認するために、USBメモリをそのまま転動ボールミルに12時間かけたものである。

筐体カバー部分は外れ、電子実装基板が露出し、さらにその基板上に実装されていた電子部品は離脱し、遊星ボールミルの場合と同様に粉化されていることが確認された。



比較的大型化がしやすく、操作も簡便な転動ボールミルでも「都市鉱石」化が可能であることは、実験室規模から実用規模への道が近いことを意味している。

現在、民間企業と共同研究で、実用規模の装置とするための、ボールの形状やサイズ、回転条件などの最適化研究を進めている。



## 2. 都市鉱石成分の評価

都市鉱石(urban concentrates)に対する一般的な金属濃度基準などはまだ定まっていないが、含有する金属成分の化学分析値とそれぞれの金属の希少度を表す TMR 係数を用いると数値的に表わすことができる。

図8がその概略である。

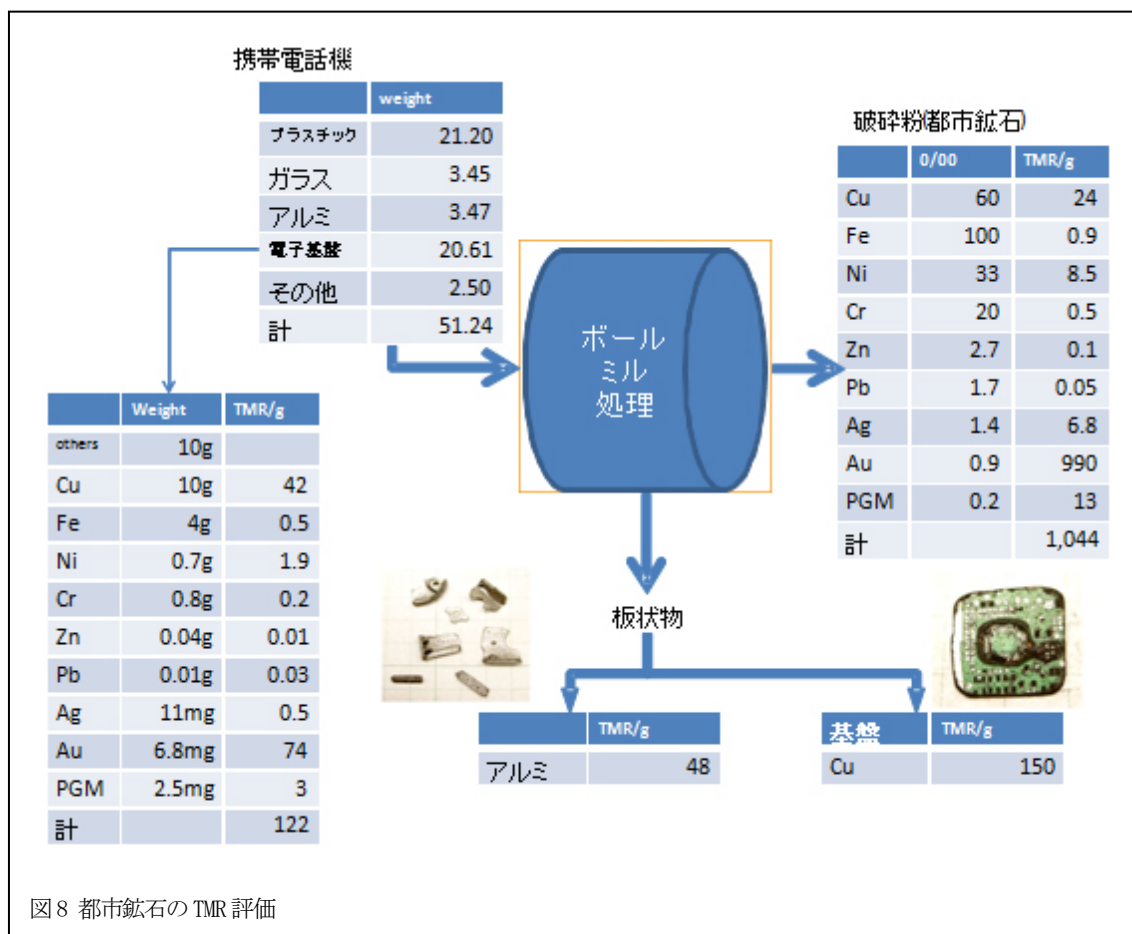


図8 都市鉱石の TMR 評価

図8の左側に記したものが文献から得た携帯電話機の成分であり、右上に示したものが今回得られた破碎粉の成分である。

破碎粉の‰はパーミルであり、1‰は1g中1mgに相当する。Au(金)の分析値だけを見ても、携帯の電子基板だけを採ってその中の金で21g中6.8mg、すなわち、0.33%のものが、破碎粉では1.4‰と数倍も濃縮されているのがわかる。

しかし、電子機器廃棄物では対象となる金属が金のように特定の金属に限定されることはなく、タンタル、コバルト、白金族金属などが対象となる場合もあり、そのような際に金のような特定の金属の含有率で濃縮度を評価することは不十分である。

TMR(Total Material Requirement)係数はエコロジカル・リユクサックとも呼ばれ金属を1kg得るために何kgの天然資源が必要だったかを示す量であり、それぞれの金属の希少度を反映してる。このTMRで含有金属の成分量の重みづけすることで特定の金属にとらわれず希少度の高い金属の濃縮度を判定することができる。

それを用いると、図8で処理をほどこさない廃棄物のままの携帯電話機では、TMR指数が122であるのに対して、実施例の破碎粉は1044となっており希少金属の高い濃縮度が得られていることがわかる。

なお、表2に示すように、天然鉱石の採掘下限濃度をもつ仮想的な天然鉱石を想定してみる。この仮想天然鉱石の成分をTMR係数で重みづけしたTMR指数の値は1g当たり69であるから、TMR指数が1g当たり500を超えれば、天然鉱石の高品位のものも超えた「都市鉱石(urban concentrates)」にまで濃縮されていると十分にみなしてもよいであろう。

さらに、このTMR係数による重み付けを用いることで、それぞれの金属ごとの指数をみることでリサイクル対象の中のどの金属を優先的に取り出すのが効果的かの判断の助けにもなる。たとえば、図8の場合、金が優先され、続いて銅、PGMといった優先度で後段の選別や抽出のプロセスを組んでいけばよいという指針にもなる。

表2 主要金属の採掘下限濃度が含有された仮想鉱石のgあたりのTMR値

	計	Al	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Mo	Ag	Sn	Ta	W	Pt	Au	Hg	Pb
鉱石下限濃度		0.15	0.02	0.2	0.3	0.25	0.01	0.004	0.03	0.001	0.0001	0.002	0.0003	0.13	0.000003	0.000004	0.002	0.02
下限TMR	<b>67.9</b>	7.2	0.72	5.2	4.16	2.04	2.6	1.44	1.08	0.75	0.48	5	2.04	24.7	1.56	4.4	4	0.56

なお、各金属のTMR係数を表3に示しておく。

元素	TMR係数	元素	TMR係数	元素	TMR係数	元素	TMR係数
Li	1,500	Co	600	In	4,500	Yb	34,000
Be	2,500	Ni	260	Sn	2,500	Lu	220,000
B	140	Cu	360	Sb	42	Hf	10,000
F2	210	Zn	36	Te	270,000	Ta	6,800
Na	50	Ga	14,000	I2	45,000	W	190
Mg	70	Ge	120,000	Cs	11	Re	20,000
Al	48	As	29	Ba	510	Os	540,000
Si	34	Se	70	La	3,500	Ir	400,000
P2	220	Br2	1,500	Ce	1,700	Pt	520,000
S	520	Rb	130	Pr	12,000	Au	1,100,000
Cl2	52	Sr	500	Nd	3,000	Hg	2,000
K	54	Y	2,700	Sm	14,000	Tl	450
Ca	90	Zr	550	Eu	54,000	Pb	28
Sc	2,000	Mo	750	Gd	15,000	Bi	180
Ti	36	Ru	80,000	Tb	100,000	Ra	280,000,000
V	1,500	Rh	2,300,000	Dy	19,000	Th	9,000
Cr	26	Pd	810,000	Ho	80,000	U	22,000
Mn	14	Ag	4,800	Er	30,000		
Fe	8	Cd	7	Tm	240,000		

参考文献 原田幸明 「希少資源・元素の現状」、まてりあ、46(2007)8, p546

## 社会的影響と今後の展開

背景で述べたように、都市鉱山の可能性は認識されてきたがいまだその鉱脈を見出しておらず、まだ都市鉱山が形成されているとは言い難い。その方策のひとつとして、安価なプロセスで、希少金属成分を濃縮し、かつ、その後の溶解や選別などの処理に付しやすくする、すなわち「都市鉱石」化のためのプロセス開発が望まれていた。

今回は、その「都市鉱石」化をボールミル法という単純なプロセスで可能でもあることを示し、「都市鉱石」化のための安価なプロセス技術の開発の余地がまだまだ十二分にあることが示した。類似の従来の発想にとらわれない試みが、この成果に引き続いて材料のプロセス技術のレベルの高いわが国で多様に試みられることで、これを超越するような大胆でかつ実用性のより高い技術展開が起こることが期待される。

本方法についてだけでも、

- 1) 前段階に装入を可能なサイズとするだけの簡単な破碎工程をおけばよく、簡便に導入可能なプロセスである。
- 2) かつ、破碎粉は、その後工程として、浮選、風選などでさらに濃度をあげたり、分離することも可能な上、直接湿式の溶解に掛けることができるため、銅系レアメタル以外のレアメタルもバイプロダクトとして分離して回収することができる。
- 3) さらに、このプロセス単独では熱も、水も溶媒も不要なため、周辺の環境への配慮するコストが大幅に低減でき、かつ立地も使用済み製品の発生頻度の高い都市近郊においても可能となる。
- 4) また、ボールミルの特徴上装置規模を回収規模とあわせて設定することも可能であり、多様な地域での分散処理が可能となる。さらに、生成物は粉状の破碎粉、板状物ともにかさ密度が向上しており、輸送やそれに引き続く処理を有利にすることができる。

このようなメリットがあり、使用済み製品を対象とした「都市鉱山」の開発に有効であり、小型分散型のシステムづくりに役立つものと期待される。

今後の課題としては、実用化に必要なボールミルの規模に合わせて、より省エネルギーで、効果的に濃縮度をあげることでできる操業パラメータを明確にすることである。現在、すでに民間企業との共同研究を開始しており、近日中に新たな成果が報告できるものと希望している。

#### 問い合わせ先：

〒305-0047 茨城県つくば市千現1-2-1

独立行政法人物質・材料研究機構

広報室 TEL:029-859-2026

#### 研究内容に関すること：

独立行政法人物質・材料研究機構

材料ラボ長

原田 幸明 (はらだ こうめい)

TEL : 029-859-2602 FAX : 029-859-2601 E-mail halada@mcn.ne.jp

#### 都市鉱山開発研究会Ⅱ

日時 2008年12月1日(水) 14:00~17:00

場所 化学会館 5階 501AB会議室(東京都千代田区神田駿河台1-5)

問合せ先 社団法人 未踏科学技術協会 エコマテリアル・フォーラム

東京都港区西新橋1-5-10 新橋アマノビル6階 TEL 03-3503-4681 FAX 03-3597-0535

E-mail ecomat@sntt.or.jp

#### 研究者略歴

1951年 長崎県壱岐生まれ

1974年 東大工学部金属工学科卒

1979年 同大学院金属工学専門課程修了(非鉄製錬)

1980年 科学技術庁金属材料技術研究所入所(金属加工研究部粉末冶金研究室)

2001年 (独)物材機構 エコマテリアル研究センター長

2005年 より 同 材料ラボ長

日本LCA学会副会長、エコマテリアル・フォーラム幹事長、エコデザイン推進機構理事、  
粉体粉末冶金協会参事。

## 用語解説

### 1) 都市鉱山(Urban Mining)

東北大選鉱製錬研究所の南條道夫教授らによって1980年代にわが国で提唱されたリサイクル概念。家電製品など都市で大量に排気される使用済廃棄物の中に有用な資源が存在しておりそれをひとつの大きな鉱山と考えて資源をそこから積極的に取り出すことを提唱したもの。(たとえば、南條道夫「都市鉱山開発—包括的資源観による：リサイクルシステムの位置付け」東北大学選鉱製錬研究所彙報 Vol. 43, No. 2(19880325) pp. 239-251)

### 2) 都市鉱石(Urban Concentrates)

2008年3月26日に記者発表した、「人工鉱石化リサイクル」の人工鉱石に相当する、使用済電子機器などからレアメタル等の濃度をあげた濃縮体。ここでは、ボールミル法が比較的軽便でかつ環境負荷も相対的に小さく消費地に近く立地可能な分散型に適することから、消費者近くの処理の可能性をより強調するために「”都市” 鉱石」と呼んだ。

本成果は、上記2008年3月26日発表の「都市鉱山発掘、人工鉱石化リサイクルを提案—リサイクルの中間工程への技術投入で資源の見えるリサイクルチェーン作りを—」が、現実化できることを改めて示したといえる。

### 3) ボールミル

回転するポットの中にボールとともに被粉碎物を入れ、ボールの衝突や回転撻動などの運動で粉碎、混合する装置。食品やファインセラミックスなどで、微粉碎や混合・均一分散に用いられる粉体工学の基本装置の一つ。動力はほとんどがポットを回転させる電力のみで、ポット内に処理対象を挿入し回転させておくだけの簡単なメカニズムであるため比較的容易に導入できる利点がある。

### 4) 関与物質総量(TMR: Total Material Requirement)

ある製品や素材を作り出すために処理された物質の総量。金属では採掘段階で大量の物質を掘り出して使うため、天然資源の採掘量が大部分を占める。これらの量は、採掘地で処理され経済システムには明示的には入ってこないが環境との相互関係では無視できないため、「隠れたフロー」とも呼ばれ、採掘量という観点から「資源端重量」(製品などの実重量は「消費端重量」)とも呼ばれる。このTMRはドイツのWuppertal研究所で提唱され、ある消費財が資源採掘という環境とのやりとりで背負っているものといういみで「エコロジカル・リュックサック」とも呼ばれている。これを「環境背後量」と約す俗称もある。

関与物質総量係数は、製品の関与物質総量を計算しやすくするために用いられる、素材の1単位(kgなど)ごとの関与物質総量である。この関与物質総量係数と金属間の価格比には比較的よい相互関係があることも見出されている。(原田幸明:金属、Vol. 75(2005)9 p858など)

なお、関与物質総量は、製品や素材だけでなく、国単位でも用いられ、循環型基本計画の物質フロー指標の補助指標としても取り上げられている。