

グリーンナノ企画特集<第17回>

都市鉱山から都市鉱石へ、そして更に実用化に向けて

独立行政法人 物質・材料研究機構 元素戦略センター
原田幸明センター長に聞く



1. はじめに

「石油危機」に匹敵する「元素危機」に我が国は直面している。BRICs 諸国による希少金属使用量の急増や、産出国による資源の囲い込み、各種産業構造の変化等がこれまでの需給関係を大きく変化させているからである。このような状況下において、資源制約をいかに打破して持続可能な社会を目指すかは、我が国にとって必須の解決すべき課題である。原田幸明（はらだこうめい）センター長は、このような時代の資源マネジメントの観点から、解決策を都市鉱山およびその都市鉱石化に求めて研究を推進し、それらの研究成果を通して我々に多くの貴重な情報を発しておられる。晩秋の一日、つくば市の独立行

政法人物質・材料研究機構（NIMS：National Institute for Material Science）の研究室を訪問した。

原田幸明氏は、①世界的に見て金属資源制約の壁があることを定量的に示し、②持続可能な資源利用のためには資源使用総量を1/8にする必要があることを説き、③一方でわが国の都市鉱山は世界有数の資源国に匹敵することを示し、④都市鉱山を有効に活用するには、リサイクルの流れの中に濃縮工程を入れて都市鉱石化することが重要であることを提唱し、⑤その具体的手法として人手をかけずに使用済み電子機器から「都市鉱石」を製造するプロセスを開発し、この分野の研究開発を牽引しておられる。この流れに沿ってお話を伺い、次いで実用化に向けての課題について語って頂いた。

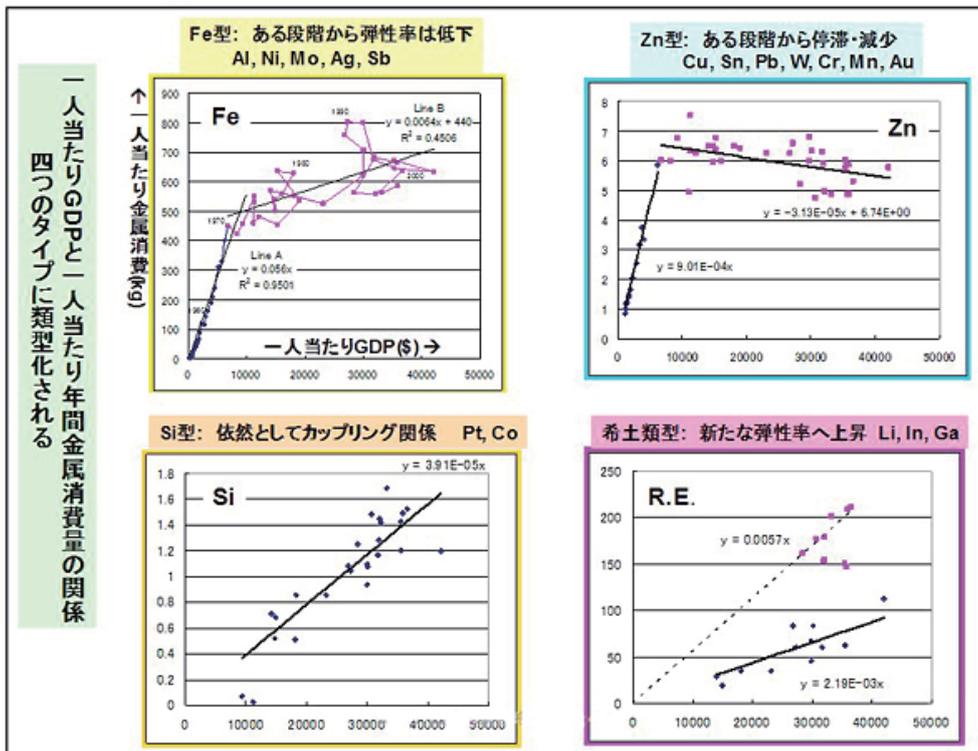


図1 金属消費とGDPとの関係：4つのパターン（提供：NIMS 原田センター長）

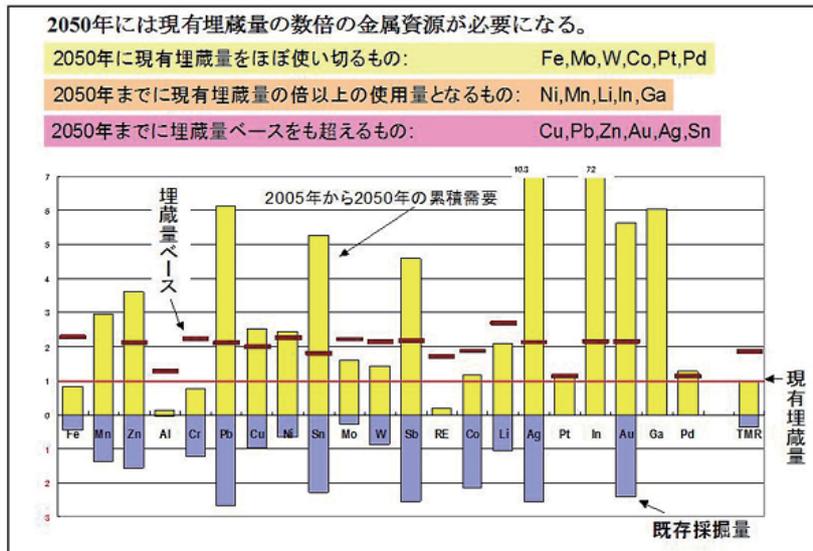


図2 現有埋蔵量に対する2050年までの累積需要量 (提供: NIMS 原田センター長)

2. 2050年までに世界的な資源制約の壁

原田幸明センター長は、過去の金属の使用量と経済成長の関連の解析をもとに、成長過程にありこれから大幅な金属の使用増が予想される BRICs 諸国及び G6 諸国(日, 英, 独, 仏, 伊, 米)を中心に2005年から2050年までの累積金属使用量の予測を行った [1][2].

一人当たりの金属使用量を一人当たりのGDPに対してプロットすると、図1のように金属の種類によって4つのパターンに分けられる [3]. Fe や Zn 型金属は、GDPの低い段階では勾配の大きい正の相関関係が得られ、ある段階から勾配が小さくもしくは負の勾配になってくる。これは、これ等の金属が社会のインフラになるにつれてその使用量の伸びが減少するからである。一方、Si 型金属はまだ社会インフラ素材として発展過程なので使用量は伸び続けている。希土類(RE)型は新しい機能開発によって突然飛躍した使用量に移る。

このような関係を、各国の2005年から2050年までの経済成長モデルに当てはめて、金属消費量を予測した。2050年での状態をわかりやすく見るために、現有埋蔵量^{*1}を1としてそれぞれの金属の累積使用量を表すと図2のようになる。Znの場合、2.2の位置に茶色のバーがあり、黄色の棒は3.6まで延びている。これはZnの埋蔵量ベース^{*2}は埋蔵量の2.2倍であるが、2050年までの累積需要は埋蔵量ベースの量も超えて、埋蔵量の3.6倍に達することを意味している。図2の上部にまとめて示したように、世界的な資源制約は予測されていた以上に深刻である。

* 1) 埋蔵量: 探索などで知られた鉱物資源量で、現時点で経済的に採掘が成り立つものの量。

* 2) 埋蔵量ベース: 現時点では採掘困難なものや、経済限界下のものまで含めた資源量。

3. 持続可能な資源利用には資源総使用量の1/8化が必要

上記のように危惧されている金属資源の利用増に対して、原田氏はこれまでの金属の使用量と経済成長の関連の解析をもとに、持続可能な資源の使用量レベルを推定した [4][5][6].

3.1 資源使用総量の把握

ある金属元素を1トン得るために、土石・岩石などを何トン採掘しなければならないかを表す量として関与物質総量係数(TMR係数: Total Material Requirement 係数, エコロジカル・リュックサックとも云う)がある(表1, 例: Au1トンを得るには110万トンの土石・岩石を採掘しなければならない)。この値を第二次世界大戦後から現在に至るそれぞれの金属の年間使用量に掛けて、その年での各金属の和を取ったものが年間資源総使用量で、その推移を示したのが図3である。年間使用増は、ローマクラブの「成長の限界」で騒がれた1960-70年頃が3.8億トン/年であったのに対して、現在はそれをも凌ぐ5.6億トン/年に増大している。

3.2 2050年までの予測

図1に示したように、資源需要はある程度社会が成熟すれば伸び率が鈍化してくる。開発途上の国々が日本と同じ程度の省資源化を進めることができると仮定して2050年までの関与物質総量の増大を見積もった。即ち、日本の一人当たりの年間関与物質総量を次の3本の直線で近似し、

成長期: $(GDP/人) < 8,000$ ドル:
 $(年間関与物質総量/人) = 1,400 \times (GDP/人)$ (1)

表1 各種金属のTMR係数 (提供: NIMS 原田センター長)

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		

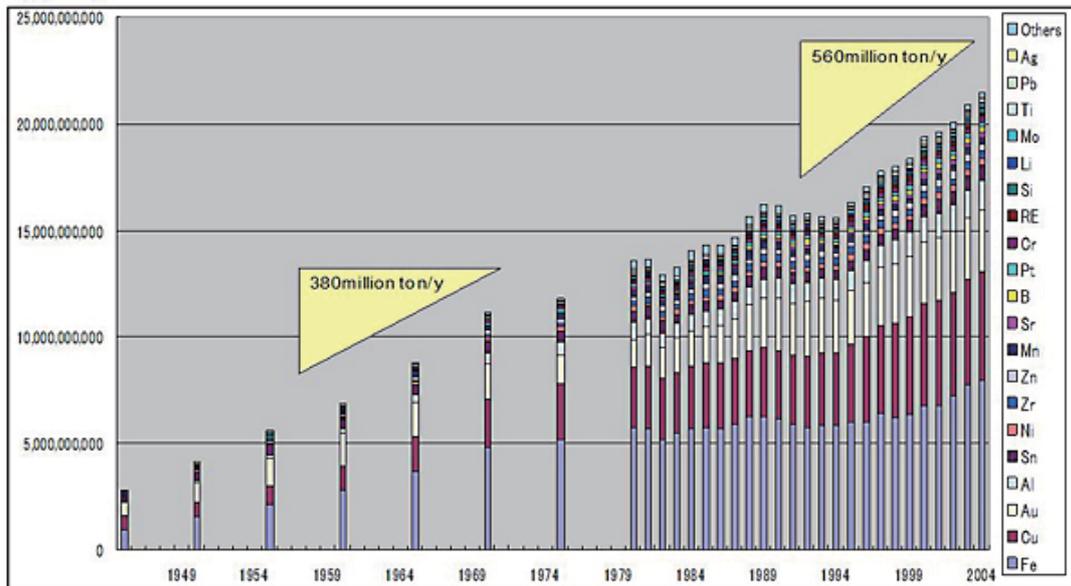


図3 資源利用総量の推移 (提供: NIMS 原田センター長)

遷移期: $8,000 \text{ ドル} < (\text{GDP}/\text{人}) < 25,000 \text{ ドル}$:
 $(\text{年間関与物質総量}/\text{人}) = 450 \times (\text{GDP}/\text{人}) + 7,000,000$ (2)
 安定期: $25,000 \text{ ドル} < (\text{GDP}/\text{人})$:
 $(\text{年間関与物質総量}/\text{人}) = 18,000,000$ (3)
 BRICs 諸国他がこれと同様の関係で経済発展していくと仮定して, 世界の年間関与物質総量を求めその累積したものが図4である. 図からわかるように, このままでは2050年には資源は完全に枯渇してしまう.

3.3 ファクター8の提案

このような資源リスクを低減するには, 世界全体での資源利用の効率を上げる必要がある. そこで, 安定期における一人当たりの年間関与物質総量は現在18トンで

あるが, これを何処まで引き下げなければならないかを検討した. この場合, GDPを維持したまま関与物質総量が1/2になると資源の生産性が2倍となることからファクター2という. 図5は, ファクター2, 4, 8, 16それぞれの結果を示したものである. ファクター4でも2050年の年間消費は現在よりも高いレベルでかつ累積の増加も鈍化しない. ファクター8で累積の鈍化が認められ2050年における年間消費も現在と同じレベルになる(現状が良いかは別として, 現状を維持できる). ファクター16は8と殆ど変わらない. これより, 原田氏は, 安定期における資源利用の目安として, 年間関与物質総量を現在の一人当たり18トンから2.25トンへと1/8に設定することを提言した.

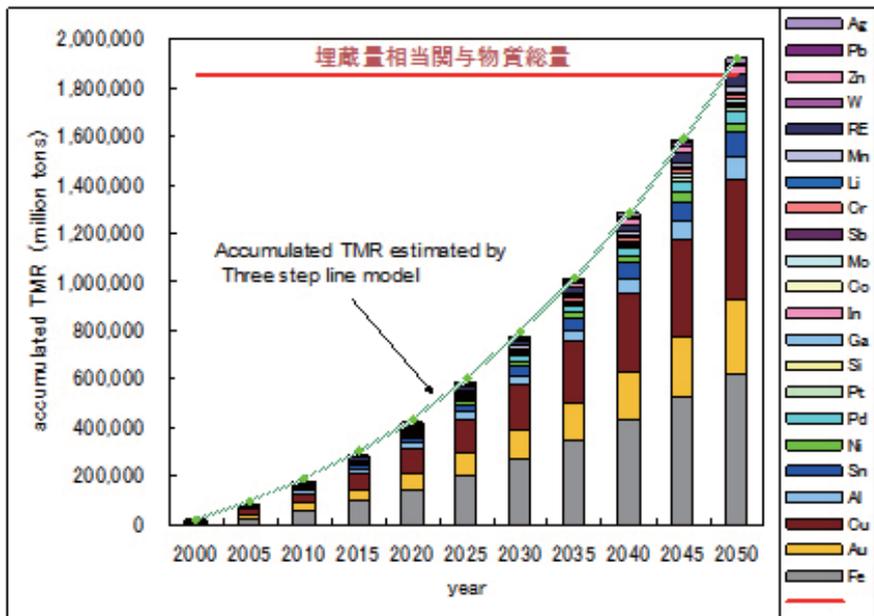


図4 世界の累積関与物質総量の経時変化 (提供：NIMS 原田センター長)

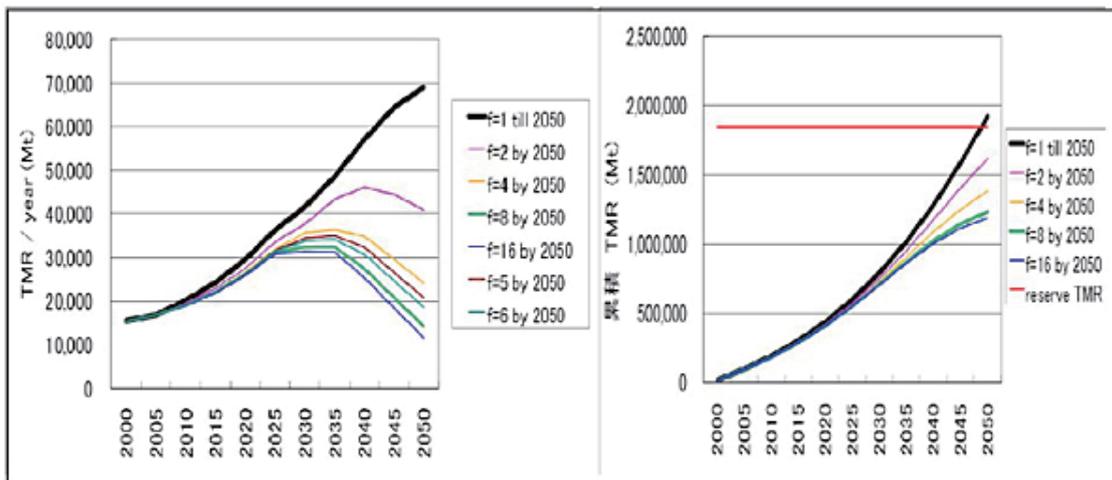


図5 ファクター1からファクター16のシナリオ設定と関与物質総量 (提供：NIMS 原田センター長)

3.4 ファクター8を達成するに

ファクター8を達成するには、物質の利用のあり方自体を大きく変えていく必要がある。原田氏は、「持続可能なエネルギー・材料国際会議 2007」開催にキーパーソンの一人として関与し、資源利用の4つの実践項目を「石垣島宣言」に纏めた [7]。即ち、下記の「4つの努力」があらゆるところで進められていく必要があるというものである。

- 1) 使わずにすむものは使わない： Reduce
- 2) 丁寧に使う： Reuse
- 3) 何度も使う： Recycle
- 4) ありふれたものを使う： Replace

原田氏はこれ等について、特に次のことを強調された。『Recycleに関して、サービスサイジングという言葉がある。消費者が欲しているのは、”ものではなくそのもの

が持つ機能・サービスである” という考えである。良い例は、使い捨てカメラ “写るんです!” だ。消費者はリサイクルを意識しないのにリサイクルが完全に行われている。このカメラをよく見ると意味のわからない穴がある。カメラで一番価値があるのはレンズだから、レンズの取外しが容易に出来るように工夫されているのである。リサイクルの究極の答えは、この使い捨てカメラのように消費者にもものを与えないこと、即ちサービスサイジングである。携帯電話もパソコンも日々機能が向上し世代交代も激しいのであるから、回収したメーカーだけにわかる “分解容易設計” にしサービスサイジング商品にすべきである。しかし現状は、携帯電話もパソコンもメーカーはユーザの予期せぬ使い方による事故防止のため、分解難易設計にしている』『Replaceの考えの中には、”資源枯渇に対処するには、ありふれたものを使えるようにするのが究極の姿であり材料科学はこれを可能にすべ

表2 蓄積量としてのわが国の都市鉱山規模 (提供: NIMS 原田センター長)

金属	世界の年間消費 (t)	世界の埋蔵量 (t)	わが国の都市鉱山蓄積 (t)	世界の埋蔵量に対するわが 国の都市鉱山の比率 (%)	世界の年間消費 量との比	埋蔵量に 対する順位
Al	177,000,000	25,000,000,000	60,000,000	0.24	0.3	12
Sb	11,200	1,800,000	340,000	19.13	30.7	3
Cr	20,000,000	810,000,000	16,000,000	2.08	0.8	4
Co	57,500	7,000,000	130,000	1.876	2.3	6
Cu	15,300,000	480,000,000	38,000,000	8.06	2.5	2
Au	2,500	42,000	6,800	16.36	2.7	①
In	450	11,000	1,700	15.5	3.8	2
Fe	858,000,000	79,000,000,000	1,200,000,000	1.62	1.5	11
Pb	3,300,000	57,000,000	5,600,000	9.85	1.7	4
Li	21,100	4,100,000	150,000	3.83	7.4	6
Mo	179,000	8,600,000	230,000	2.69	1.3	6
Ni	1,550,000	64,000,000	1,700,000	2.70	1.1	9
PGM	445	71,000	2,500	3.59	5.7	3
RE	123,000	88,000,000	300,000	0.35	2.5	6
Ag	19,500	270,000	60,000	22.42	3.1	①
Ta	1,290	43,000	4,400	10.41	3.5	3
Sn	273,000	6,100,000	660,000	10.85	2.4	5
W	73,300	2,900,000	57,000	1.97	0.8	5
V	62,400	13,000,000	140,000	1.08	2.2	4
Zn	10,000,000	220,000,000	13,000,000	6.36	1.4	6

きである”との要請がある。その元素でなければ必要な機能が得られないのは希土類位であるが、しかし希土類がその特徴を発揮するのは電子軌道の構成にあるのだから、同等の電子軌道利用が出来ればFeなどのありふれた材料が使えることになる。ありふれた材料を使って電子軌道をコントロールする。今後、ナノテクノロジーを活用してその機能がどこから来ているのかを調べ、従来の分子・原子レベルでのコントロールから電子レベルのコントロールへ移らねばならない。それを可能にしようとするのがナノ・アルケミー*3)の考えである [8][9][10]

4. わが国の都市鉱山は世界有数の資源国に匹敵

原田氏は、「都市鉱山」*4)と呼ばれるこれまでわが国に蓄積されリサイクルの対象となる金属の量を産業連関表*5)を用いて算定し、その量が世界有数の資源国に匹敵する規模になっていることを明らかにした [11][12]。

計算結果を表2に示す。左から2列目、3列目の世界の年間消費量と埋蔵量は、現時点で最も権威あるとされている米国鉱山局の2006年のデータによる。この計算結果から以下の4つのことが云える：

- ① わが国の都市鉱山蓄積量*6)は、Fe:12億トン、Al:6,000万トン、Cu:3,800万トン、その他の金属も多数大量に存在する(表2の第4列)。
- ② 世界の埋蔵量に対するわが国の都市鉱山の比率は、

Ag:22%, Sb:19%, Au:16%, In:16%であり、世界の現有埋蔵量に比べても大きな影響を与える規模の都市鉱山が国内に存在していることがわかる(表2の第5列)。

③ 多くの金属について、世界の2~3年分の消費量に匹敵する蓄積がわが国の都市鉱山にはある。Li:7.4, Pt(PGM):5.7, Ta:3.5, In:3.8, Ag:3.1, Au:2.7年分等々

*3) ナノ・アルケミー: ナノテクノロジーのナノと錬金術を意味するアルケミーとの合成造語。元素の役割をナノテクノロジーの成果を使ってもう一度とらえ直そうというアプローチ。これまでの元素に注目した物質設計から、元素の配置や組み合わせを制御することで、従来ある機能を引き出すことは困難と考えられていた物質群からもその機能を引き出そうとするもの。この技術を発展させるならば電子の状態も元素の制約から解放され、より多様な展開が可能となり、持続可能な資源利用の道を開こうとするもの。

*4) 都市鉱山: 東北大学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りサイクル概念。家電製品など都市で大量に廃棄される使用済み製品の中に有用な資源が存在しておりそれを一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。

*5) 産業連関表: 計量経済学で用いられる各産業部門の産出と投入の経済的相互関係をマトリックスとして与えた表。ある需要に対する個々の産業部門への波及を算出することができる。

*6) 蓄積量: 都市鉱山はその元素が存在していても使えるとは限らない。したがって、都市鉱山には蓄積量という言葉を用い埋蔵量と区別する。

である(表2の第6列)。

④ わが国の都市鉱山規模を各国の資源埋蔵量と並べて見た場合、Au、Agは世界最大の資源国となり、Cu、Pt、Ta、Sb、Inも3位までに入る資源国にランクされる(表2の第7列)。

原田氏は『しかし、これは“蓄積量=資源”としての計算であり、鉱山は開発されねば資源を供給することは出来ない。国内に眠るこれ等の蓄積物をいかに資源として取り出していくかという研究開発へ発展させていく必要がある』と強調された。

5. 都市鉱山から人工鉱石へ

都市鉱山の蓄積推定量の利用可能な部分を有効資源に変えていくには、新たな視点からの取組みが必要である。原田氏は産業技術総合研究所の小林幹男氏と共同で検討し、国内に眠る蓄積物を資源として取り出すには、リサイクルの中間工程に濃縮工程を入れて都市鉱山を人工鉱石(都市鉱石)にすることが重要であることを提唱した[13][14]。

図6に、提案するマテリアル・チェーン「発生端分散型資源濃縮システム」を示す。現在の金属リサイクルの多くは、「回収・粗分離(切断)」という前段階と、それを直接溶解原料とするか又は粗分離後の不要物を多く含んだパーツから「抽出」する後段階の二段階構成となっている。即ち、これまでのリサイクルは主として大量に発生する直接溶解可能な鉄、アルミニウムなどのベースメタルに対応するものであった。微量でパーツ中に分散して存在するレアメタル等の金属は、パーツのまま直接「抽出」工程に持ち込むと、「抽出」工程が発生廃棄物の処理も受け持ちその負担が大きくなっていく。

例えば、120gの携帯電話に6.0mgの金が入っているとして、直接「抽出」工程に携帯電話が持ち込まれたと

すると、1kgの金を回収する際に20トンもの廃棄物が発生する。これは、天然鉱石の場合の1kgの金に対し約1,100トンの廃石より少ないものの、「抽出」プロセスではかなりの負担となる。

そこで、「回収・粗分離」と「抽出」との間に「濃縮」工程を置くことで、直接溶解原料とすることの出来ない微量のパーツ中に分散して存在する金属も、ある程度濃度を濃くしかつ抽出時に廃棄物の発生も少ない抽出用原料とすることが出来る。これにより、「抽出」の負担が軽くなるだけでなく、この「濃縮」により得られる抽出原材料は、廃棄物よりも有価性が高くなり、輸出などの国際商品性も高まることが期待出来る。

6. 人手をかけずに使用済電子機器から「都市鉱石」を製造

原田氏は、上述の都市鉱山から都市鉱石を得る簡便な手法を開発した。ボールミルによる都市鉱石粉の分離製造である[15][16]。

6.1 ボールミルによる都市鉱石粉の分離・製造

具体例を図7に示す。使用済み携帯電話をボールミルに入る大きさ粗く切断(またはクラッシュ)し、ボールミル処理を行う。基板上に実装されたICチップやメッキなどは優先的に離脱・粉碎されて粉化する。他方で、プラスチック、ゴム、アルミニウムや基板材などの構造的強度を持つ部品は、ボールミルで粉碎されることなく周囲が一部削られた程度で片状物のまま残留する。ICチップやメッキなどの成分の多くが粉化された部分に入るため、この粉碎物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」”が粉鉱の状態を得られる。

原田氏が『ボールミルを使おうということになったのは次の2つの発想からである。①解体容易設計になっているのであれば、こちらも苦勞をいとわず部品を細かく



図6 発生端分散型資源濃縮システム
(提供: NIMS 原田センター長)



図7 ボールミルによる都市鉱石粉の分離・製造
(提供: NIMS 原田センター長)



図8 装置と粉碎子（ボール）（提供：NIMS 原田センター長）

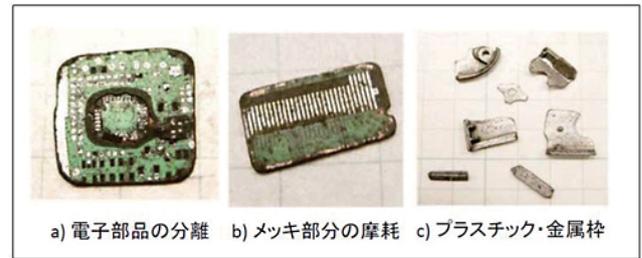


図9 ボールミル処理後の片状物の状況
（提供：NIMS 原田センター長）

分解してリサイクルするが、先述のように分解難易設計になっている。ならば、こちらも荒っぽくやろうということでボールミルを思いついた。ボールミルならば第一に無選別投入出来る。②但し、ボールミルの難点は、AIやプラスチックのような構造体の処理である。いろいろと調べた。AIは酸化も炭化も窒化もしないし、繰返し疲労を与えたら壊れるけれども粉にはならない。プラスチックも同じ。それならばしっかりしているこれ等のもを無理して粉にすることない。そのままの形で残せばよいではないか。実際にやってみると大変上手く行った。

この実験で使用したボールミルは遊星ボールミルであるが、大型化が比較的容易な転動ボールミルでも同様の効果が確認されている。粉碎用のボールは、大、小、および帯状の突起の付いた異型球の3種を用いる（図8）。

図9は、ボールミル処理後の片状物である。実装されていたICなどの電子部品は電子基板から離脱し、メッキ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、アルミニウム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、これら構造的な部分と実装された電子部品は基本的に分離される。また、図9のa)は接合部から部品ごととはがされ

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る。

6.2 都市鉱石成分の評価

都市鉱石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示すことが出来る。図10にその概略を示す。

図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、右に示したものが今回得られた粉碎粉の成分である。携帯電話の基板だけを採ってその中のAuは21g中6.8mg、すなわち0.32%（パーミル、1%は1g中1mgに相当）のものが、粉碎粉では0.9%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Auのように特定の金属に限定されることはなく、Ta、Co、PGM（白金族金属）などが対象となる場合もあり、そのような際にはAuのような特定の金属の含有率だけで濃縮度を評価することは不十分である。そこで含有金属の成分量をTMR係数で重みづけすること

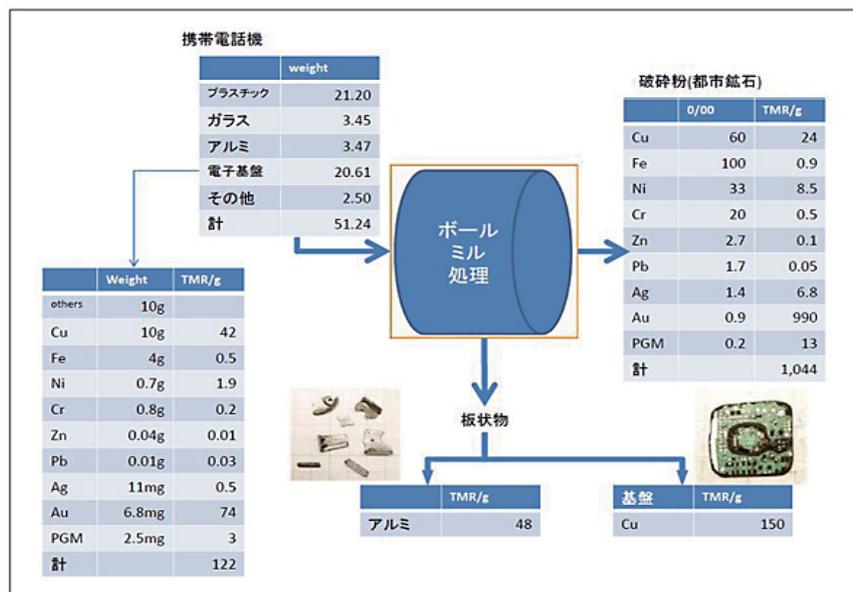


図10 都市鉱石のTMR評価（提供：NIMS 原田センター長）

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出来る。図 10 で処理を施さない廃棄物のままの携帯電話では TMR 指数（それぞれの金属成分に TMR 係数を掛けて重み付けした値）が 122 であるのに対して、粉碎粉は 1,044 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。さらに、この TMR 係数による重み付けをしたそれぞれの金属の指数を見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。例えば、図 10 の場合、Au が優先され、続いて Cu, PGM といった順位で後段の選別や抽出のプロセスを組んでおけばよいという指針にもなる（一般に TMR の対数と価格の対数をプロットとするとよい直線関係を示すと原田氏は云う）。このことより、TMR の大きいものから回収するという経済的優先順位が決まる。

以上、本方法は都市鉱山から都市鉱石を製造する一例であるが、以下のようなメリットがある：

- ① 前段階はボールミルに入る大きさに切断（又はクラッシュ）するだけでよい。人手のかかる選別作業を必要としない。
- ② 得られた粉碎粉は、その後工程として、浮選、風選などでさらに濃度を上げたり、分離することも可能である。
- ③ このプロセス単独では熱も、水も溶媒も不要なため、周辺環境へ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可能である。
- ④ また、ボールミルの特徴上装置規模を回収規模と合わせて設定することが可能であり、多様な地域での分散処理が可能である。さらに、生成物は粉状の粉碎粉、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出来る。

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作りに役立つものと期待される。

7. 実用化に向けて：ナノテクノロジー，材料科学への期待と課題

以上のように、都市鉱山から都市鉱石を簡便に得るまでになった。これを実用化するには、今後さらにそれぞれの金属を個別に取り出す精錬技術とそれによって得られた個々の金属の使用技術が開発されねばならない。

まず、リサイクルしたものの精錬およびその再利用には、第一に経済的問題がある。表 3 に示されるように、希少金属の回収は金にならない。携帯電話 1 台で Au は 96 円になるが他の金属は微々たるものである。今、リサイクルはこのようにコストの壁に直面している。

第二は技術的な問題である。今までの精錬は、大きな鉱山の品質の良い鉱石から大量の金属を抽出するものだった。図 10、表 3 からわかるように都市鉱石の量は少量である。また、ナノテクノロジーの進歩の結果電子機器の中には周期律表のほぼ全ての金属が、しかも或るものは分析限界ギリギリの低濃度で含まれており、これを都市鉱石は引き継いでいる、即ち金属成分は多種でありかつ低濃度である。これを精錬するには、従来法とは全く異なった方法を根底から検討する必要がある。

また、再使用に関しては、ナノスケールの構造の中の定められた局所に作り込むわけであるから、従来のように大量のインゴットを造るのではなく別のやり方を考えねばならない。例えば、有機物と結合したプリカーサ的なものを準備しておいて必要な所で ON DEMAND で結合させるといったような発想がないといけない。

表 3 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
(提供：NIMS 原田センター長)

	ビデオカメラ	オーディオ	デジタルカメラ	ポータブルMDプレイヤー	ポータブルCDプレイヤー	DVDプレイヤー	液晶テレビ	携帯電話	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	2.66	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	0.46	0.04	0.03	0.06	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	0.83						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	23.46	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

以上から、乱暴ではあるが一つの具体的なイメージは以下のようなものであろう：都市鉱石を溶かしたのものの中にある種の有機物を投入し、その有機物が例えば Ga だけに結合しその溶液の中から分離し別の相を形成する。キレートのようなものであってもよい。それを集めておいて、次の使用サイトでは、例えば LSI のナノプロセスの中で、その Ga を必要としているサイトで触媒反応的に Ga 有機化合物が分解し Ga を析出し、残りの有機物は反応場から出て行くというものである。このようなことを実現するには、メタラジーと有機化学とナノテクノロジーが結合していくことが求められる。

このことに関し、原田氏は具体的なアイデアをお持ちのようであるが、今回の取材はここまでということになった。このアイデアの実現を目指して材料科学ならびにナノテクノロジーを今後も大いに牽引していかれることを期待したい。

参考文献

- [1] 独立行政法人物質・材料研究機構, プレスリリース "2050 年までに世界的な資源制約の壁" (2007/02/15)
- [2] 原田幸明, 島田正典, 井島清:"2050 年の金属使用量予測", 日本金属学会誌, ol.71, No.10, pp.831-839(2007).
- [3] 原田幸明, 島田正典, 井島清:"金属消費の経済成長とのデカップリング状況の分析", 日本金属学会誌, Vol.71, No.10, pp.823-830(2007).
- [4] 独立行政法人物質・材料研究機構, プレスリリース "持続可能な資源利用には資源使用総量の 1/8 化が必要" (2007/07/06)
- [5] 原田幸明:"資源リスク軽減のためのこれからの物質利用-ファクター 8 への転換", 工業材料, Vol.56, No.3, pp.72-81(2008).
- [6] 原田幸明:"エネルギー, 資源, 環境と持続可能社会の展望 金属, 希少資源枯渇時代の見通しと課題", 電気評

論, Vol.92, No.11, pp.21-25(2007).

[7] 原田幸明:"資源不足時代における元素戦略/代替材料開発持続可能な物質利用への道と元素戦略", 金属, Vol.78, No.1, pp.39-43(2008).

[8] 原田幸明:"動きだした元素戦略 元素の代替戦略!! 希少金属からの全面代替を目指して", 化学, Vol.62, No.12, pp.21-27 (2007).

[9] 原田幸明:"元素機能代替への新たなアプローチ", 粉体および粉末冶金, Vol.56, No.4, pp.169-176(2009).

[10] 原田幸明:"元素戦略の視点 元素代替戦略としてのナノアルケミーへの道", 化学経済, Vol.55, No.3, pp.56-63(2008).

[11] 独立行政法人物質・材料研究機構, プレスリリース "わが国の都市鉱山は世界有数の資源国に匹敵" (2008/01/11)

[12] 原田幸明, 井島清, 島田正典, 片桐望:"都市鉱山蓄積ポテンシャルの推定", 日本金属学会誌, Vol.73, No.3, pp.151-160(2009).

[13] 独立行政法人物質・材料研究機構, プレスリリース "都市鉱山発掘, 人工鉱石化リサイクルを提案" (2008/03/26)

[14] 原田幸明:"最近のリサイクル処理技術 都市鉱山からの人工鉱石リサイクル", 高圧ガス, Vol.45, No.11, pp.861-866(2008).

[15] 独立行政法人物質・材料研究機構, プレスリリース "人手をかけずに使用済み電子機器から「都市鉱石」を製造" (2008/11/26)

[16] 原田幸明:"「都市鉱山」から濃縮レアメタル製造-ボールミルを使った高効率・低コストのリサイクル法", 工業材料, Vol.57, No.2, pp.1-5(2009).

(真辺俊勝)

取材日：2009年11月9日