

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20310051

研究課題名(和文) 環境材料設計基準に資するマテリアルリスク指標

研究課題名(英文) Index of material risk for the environmental benign design of material

研究代表者

原田 幸明 (HALADA KOHMEI)

独立行政法人物質・材料研究機構・環境・エネルギー材料萌芽ラボ・ラボ長

研究者番号：70354131

研究成果の概要(和文)：

地球環境問題に対応するサステイナブルな物質・材料の設計・選択・評価に資するための、物質・材料のマテリアル・リスク指標を、“持続的供給リスク”、“環境変動リスク”、“および”毒性リスク”としてとらえ、それぞれに対する指標を数値化した。この数値化において、元素ごとに共通の手法を用いることで横断的な比較を可能とし、材料や部材の設計に用いることができるようにした。さらに、これらの指標の適用方法を”持続的供給リスク”を表す関与物質総量を中心に例示した。とくに、リサイクルの適用に関して実際のリサイクル技術の開発と合わせて都市鉱石化の評価に関与物質総量を用いるという新しい適用方法も明らかにした。

研究成果の概要(英文)：

The indices of material risk are developed and numerically expressed for almost all the metal elements. The indices are index for materials sustainability, index for the effect on the global warming, and the index for toxicity of material. The normalization is subjected to give the value with the same procedure to be compared among them in the products, parts and materials. The application of indices are also developed mainly that of the index of sustainable material use, namely TMR (Total Materials Requirements) are exemplified. Especially, the application of the evaluation of a midterm recycled material named urban concentrates is newly developed with the development of new technology of recycling.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2009年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
2010年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学 ・ 環境技術・環境材料B

キーワード：循環再生材料設計、マテリアルリスク

1. 研究開始当初の背景

地球環境を考慮した持続可能な物質・材料の設計、選択を推し進めるためには、その判断基準となる地球環境問題に対するそれぞ

れの物質・材料のインパクトの指標化が必要である。LCAはそのインパクトを製品システムのライフサイクルにわたって評価する手法として期待され、わが国でも2004年にLCA学会を創設するに至った(提案者は副会

長である)が、資源採取・抽出・精製段階に偏寄して環境インパクトを持ち、かつ、リサイクル等で多重の製品ライフサイクルを経ることの出来る材料の環境影響評価を LCA にのみ期待することは LCA にとって過重な課題であり、また設計などに使用する立場としても煩雑でかつフィードバックの得にくい行為である。これから、様々な材料やプロセスに地球環境改善への貢献が求められるようになると、材料や製品の設計者が、設計の現場で使用できる簡明な指標と、その社会的共有が必要である。

その一方で、地球温暖化問題の深刻度は日々増加しており、その解決のために様々な技術の革新・集約が期待されている。そのためには、触媒用物質、磁石用物質、電池用物質など様々な領域で、比較的希少な物質に対して新たに大規模な需要の増大が予想され、中国等の発展過程の国々での基礎素材の需要の急増とあいまって、あらたな資源リスクを生み出す恐れも強まっている。また、ナノマテリアル等の新規物質の登場に対して毒性リスクをどのように材料設計時に判断するかという問題も強まっており、この問題も温暖化対策の技術イノベーションと裏腹な側面を持つ課題となる可能性が高い。このような中で、物質・材料の設計・選択においてあるリスクを他のリスクに転嫁することの無いよう、“持続的供給リスク”、“環境変動リスク”、“および”毒性リスク”の三者を、材料に即して指標化し、設計・選択に組み込めるようにしておく必要がある。

2. 研究の目的

本研究の対象は、マテリアル・リスクに係る 3 つのリスク、すなわち、“持続的供給リスク”、“環境変動リスク”、“および”毒性リスク”の指標化である。また、それらの指標について、“科学的で普遍性のある算定手法の確立”、“製品、システムへの評価方法の検討”、“共有性の高いデータベース化”の 3 段階の視点から検討を加え、それぞれの指標の完成度に合わせたステップアップを行うと共に、「加算性」「属性値化」を意識した材料設計、製品設計への知的基盤化のための課題を明確にする。

3. 研究の方法

この 3 つのマテリアル・リスクに関しては、これまでもそれぞれの専門領域があり、それなりの成果が挙げられてきた。しかし、これらが指標化され現実の物質生産や製品生産に組み込まれた例はほとんど無い。これは、リスクの客体の視点からの分析がほとんど

で、リスクを管理していく視点からの指標設定が行われてこなかったためであることが大きな要因と考えられる。

本提案は、この”持続的供給リスク”、“環境変動リスク”、“および”毒性リスク”の 3 つのマテリアルリスクの個々の細部に立ち入るのではなく、それらのこれまでの成果やデータベースを活かしながら、材料技術の特徴にあった視点で、三者並存のリスク表記を可能とし材料設計等に資することを意図している。その「材料技術の特徴にあった視点」として、本提案が注目しているのは、複数の要素が組み合わさった場合にもその指標を上位の製品に適用できる「加算性」であり、サプライチェーンの上流に遡及したデータリンクやプロセス条件などの環境変数に依存しない「属性値化」の二つの視点である。

これらは、3 つのリスクに関するこれまでの知識を、物質と材料技術の研究開発の視点で進めている物質・材料研究機構に集約して検討することにより始めて可能とする。数値化された指標は、時としてミスディレクションをもたらすケースがある。そのため毒性学の専門家、リスクコミュニケーションの専門家等による検討委員会を組織し、指標化方法の妥当性、および指標化によって単純化された情報がミスディレクションを起こす危険性が無いかを検討し、数値化手法へのフィードバックを図る。

4. 研究成果

I 三つのサステイナブル指標

まずサステイナビリティに対する物質利用のリスクを、図のように、持続可能リスク、気候変動リスク、毒性リスクの三軸でとらえた。そのそれぞれに対して、資源の状況、プロセスの実態、生物影響などの情報を総合し、持続可能リスクについては TMR(関与物質総量、もしくは資源端量)、気候変動リスクに関しては単位金属製造あたりの CO₂ 発生量、毒性リスクについては細胞毒性の観点からデータを整理し、従来のデータを見直しながら、元素ごとに使用成分に合わせて製品や素材の設計時に活用できるように、元素間の横並びでデータを整理し、それをまとめて表のかたちで表した。その結果が次の表である。CO₂ は金属 1t 製造時にライフサイクルで発生する CO₂ 量であり、TMR は同じく 1t の金属を得るために必要な採掘時からの全物質量である。細胞毒性は鉄を基準としその何倍の濃度で細胞がダメージを受けるかを表している。

この結果を図で表すと、図 1 のようになる。

	CO2 tCO2/tMetal	TMR coeff. -/-	cell toxicity compared with Fe
3 Li	1.9E+01	1.5E+03	7.8E-01
4 Be	7.4E+01	2.5E+03	5.6E+02
5 B	6.0E+01	1.4E+02	
12 Mg	7.2E+00	7.1E+01	
13 Al	9.2E+00	4.8E+01	7.9E-01
14 Si	7.2E+00	3.4E+01	
20 Ca	4.8E+01	9.0E+01	
21 Sc	2.3E+01	2.0E+03	
22 Ti	6.9E+00	3.6E+01	1.6E+00
23 V	2.5E+01	1.5E+03	5.8E+02
24 Cr	7.9E+00	2.6E+01	3.7E+02
25 Mn	2.8E+00	1.4E+01	3.2E+01
26 Fe	8.4E-01	8.2E+00	1.0E+00
27 Co	1.5E+01	6.1E+02	4.2E+01
28 Ni	8.2E+00	2.6E+02	1.7E+01
29 Cu	3.5E+00	3.6E+02	4.6E+01
30 Zn	2.8E+00	3.6E+01	1.2E+01
31 Ga	2.6E+01	7.3E+03	3.5E+01
32 Ge	3.7E+00	3.2E+04	
33 As		2.9E+01	
34 Se	2.3E+00	4.5E+02	
37 Rb	1.9E+00	1.3E+02	2.5E-01
38 Sr	7.9E+00	5.1E+02	2.4E-01
39 Y	1.1E+01	2.7E+03	1.4E+01
40 Zr	2.5E+00	5.5E+02	3.8E-01
41 Nb	2.4E+01	6.4E+02	3.5E-01
42 Mo	1.5E+01	7.5E+02	3.8E-01
44 Ru	1.6E+02	7.9E+04	3.0E-01
45 Rh	1.1E+03	2.3E+06	3.0E+01
46 Pd	3.3E+02	8.1E+05	2.2E+00
47 Ag	4.5E+00	4.8E+03	2.0E+02
48 Cd	4.1E+00	6.8E+01	3.6E+02
49 In	2.3E+00	1.2E+04	3.7E+02

	CO2 tCO2/tMetal	TMR coeff. -/-	cell toxicity compared with Fe
50 Sn	5.1E+00	2.5E+03	1.1E+01
51 Sb	5.2E-01	5.6E+01	9.5E+01
52 Te	2.9E-01	1.0E+04	
55 Cs		1.1E+01	4.6E-01
56 Ba	4.6E+00	5.1E+02	3.3E-01
57 La	2.6E+02	8.2E+03	
58 Ce	5.7E+02	1.8E+04	
59 Pr	2.5E+02	7.9E+03	
60 Nd	3.8E+02	1.2E+04	
62 Sm	4.9E+02	1.6E+04	
63 Eu	1.1E+03	3.3E+04	
64 Gd	5.3E+02	1.7E+04	
65 Tb	1.7E+03	5.5E+04	
66 Dy	5.1E+02	1.6E+04	
67 Ho	9.4E+02	3.0E+04	
68 Er	1.0E+03	1.2E+04	
69 Tm	1.0E+03	3.2E+04	
70 Yb	1.0E+03	3.2E+04	
71 Lu	1.0E+03	3.2E+04	
72 Hf	1.3E+01	1.0E+04	3.4E-01
73 Ta	1.6E+01	6.8E+03	2.1E-01
74 W	1.9E+00	1.9E+02	8.8E-01
75 Re	2.0E+00	1.8E+04	
76 Os	9.5E+02	5.4E+05	
77 Ir	3.9E+02	4.0E+05	2.2E+01
78 Pt	9.0E+02	5.3E+05	
79 Au	5.1E+02	1.1E+06	
80 Hg		2.0E+03	4.5E+01
81 Tl	1.3E+01	4.3E+02	1.3E+01
82 Pb	3.4E+00	2.8E+01	2.8E+00
83 Bi	5.3E-01	2.2E+02	3.8E+00
92 U	2.0E+00	2.2E+04	

横軸は 1 トンの金属を得る過程で発生する

CO2 であり、縦軸は TMR である。これらほとんどもに対数軸で表示されており、金属の種類で

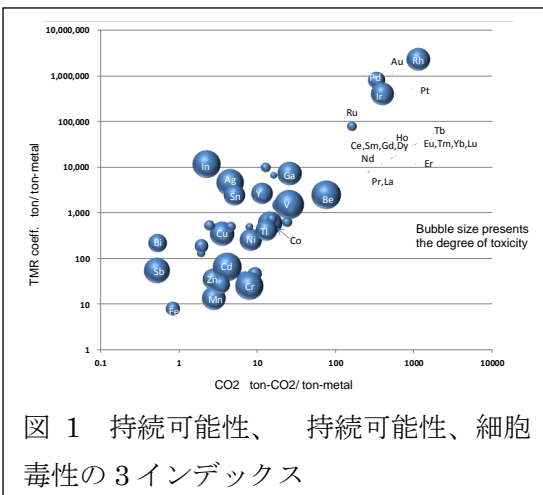


図 1 持続可能性、 持続可能性、細胞毒性の 3 インデックス
大きく桁数が変化する。またバブルの大きさは、それぞれの金属イオンの細胞に対する毒性を鉄基準に表している。

この中で CO2 についてはすでに多くのところで論じられており、TMR については、後で「資源端重量」として詳しく記す。毒性についてここで述べておくと、データとしては物材機構の山本らによる金属元素の細胞毒性実験のデータを採用した。これは細胞を各種の金属塩の濃度を变化させた溶液に触れさせ、その生存率を比較することで細胞への毒性の程度を知るものである。このデータをもとに、金属元素の中で最もポピュラーな鉄イオンを基準として、50%細胞がダメージを受け濃度が鉄イオンの何倍に相当するかの係数を得、大きいものほど毒性が強く表せるようにその逆数をとったものである。

これらをもとに、携帯電話機の素材構成をそれぞれの指標で見たものが図 2 である。最下段が、一般に認識されている素材構成であるが、それぞれのインデックスによって支配的な金属成分が異なってくる。毒性で見ると Cu が圧倒的に大きく、Ag, Cr がそれに続いている。TMR では金 Pd, Rh などの白金族金属がその大部分を占めており、約 100g の携帯電話機は、資源端で見ると 100kg を超える重量となっている。CO2 発生では、Cu, Au などとともに Nd が大きな位置を占めている。このようなデータをもとに、どの金属を優先的に減量していくことが環境に適した設計になるかを知っていくことができる。

II TMR 指標の整理と、解説書の作成

三つの指標の中で TMR については、ドイツのブッパータル研究所と、本研究の担当者の

物材機構だけが世界的に数値を発信している。本研究を遂行するに当たり、その数値の見直しをすすめるとともに、TMRを指標として普及するために解説書を作成した。

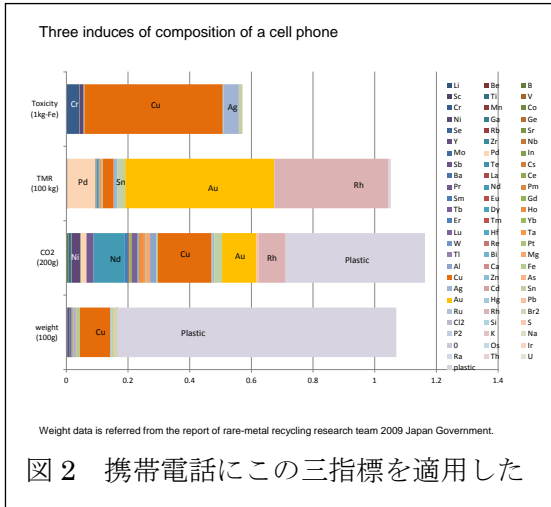


図2 携帯電話にこの三指標を適用した

特に、これまで TMR (Total Material Requirement) を直接して「関与物質総量」という表現を使ってきたが、この解説書を作成し、有識者の委員とのディスカッションを通じて、「資源端量」という表現を与えることにより意味の理解しやすい指標とすることを図った。

その目次を記した。

目次	
1. はじめに	1
2. 「資源端量」着想の背景	2
3. 資源端量 (TMR) の定義	3
4. TMR 係数とその導出	5
4. 1. 金属鉱石の TMR 係数	5
4. 1. 1. 実業データによる推定	5
4. 1. 2. 関与物質総量 (鉱石分) の推定 (粗鉱品位による推定)	7
4. 1. 3. 関与物質総量 (鉱石分) の推定 (地殻存在度による推定)	10
4. 1. 4. 金属鉱石の TMR 係数の解釈と考察	10
4. 1. 5. 本節 (金属鉱石の TMR 係数導出) の結言	14
4. 2. エネルギー資源の TMR 係数	14
4. 2. 1. 石油資源および石油火力発電の TMR 係数	14
4. 2. 2. 石炭資源および石炭火力発電の TMR 係数	15
4. 2. 3. 天然ガス資源および天然ガス発電の TMR 係数	15
4. 2. 4. 原子力発電の TMR 係数	16
4. 3. 非金属鉱物資源の TMR 係数	19
4. 4. バイオマス資源の TMR 係数	22
4. 4. 1. 農作物の TMR 係数	22
4. 4. 2. 木材の TMR 係数	23
4. 5. 金属 (インゴット) の TMR 係数の導出	24
4. 6. Wuppertal 研究所による TMR 係数との対比	26
5. TMR による解析例	29
5. 1. 他の指標との相関	29
5. 2. TMR による解析	30
5. 2. 1. 機器類の実重量と資源端量の対応	30
5. 2. 2. リサイクル関係の解析結果	31
5. 2. 3. 総資源消費	33
5. 2. 4. 一人あたりの GDP と一人あたりの TMR の関係	36
5. 2. 5. GDP の換算	37
6. 結言	38
文献一覧	

III TMR のリサイクルシステム設計への適用
三つの指標のうち TMR は、資源の持続可能性という観点から、製品設計だけでなく、リ

サイクルのシステムを設計し、その環境負荷低減効果の高いものから回収していくという戦略を立てる上でも有効である。これを実際のリサイクル技術の開発と合わせておこなった。

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る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。

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	携帯電話 (A)
W/台	150	372	110	108	67	70	32	10	21	68	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

表 1 に参考のために、使用済電子機器基板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板面積を割り出し、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板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。

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るには高いハードルがあることも事実であった。

そこではこの「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。

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として、「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。



図4 都市鉱石化

それは図4のように、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、破砕されて粉化する。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、ボールミルで粉砕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、この破砕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。

その都市鉱石 (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5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砕粉の成分である。

破砕粉の%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、破砕粉では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・リュッ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いる。このTMRで含有金属の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。

図5がその概略である。

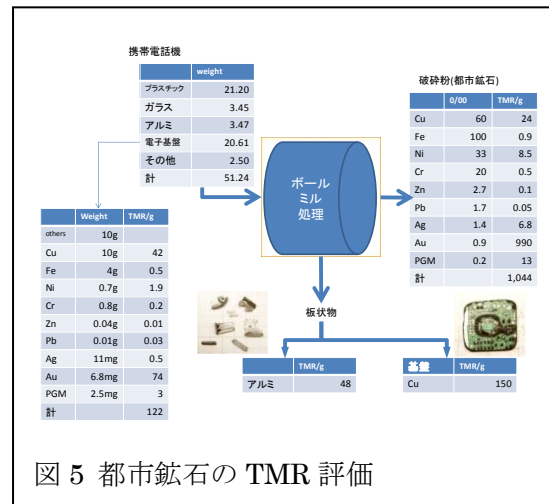


図5 都市鉱石のTMR評価

それを用いると、図5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、実施例の破砕粉は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。

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	
仮想TMR	67.9	7.2	0.72	5.2	1.6	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、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。

このように、今回開発した指標は、当初目的とした製品や材料の設計指針だけでなく、リサイクルというシステムの設計に対しても有効であるということが実践的に示された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① 原田幸明、地球環境を考慮した元素戦略と都市鉱山、応用物理、79 巻 593-598、(2010)、査読有
- ② 原田幸明、持続可能な資源利用と都市鉱山、未来材料、10 巻 14-28、(2010)、査読無

[学会発表] (計 1 件)

- ① K.Halada, N.Katagiri, Sustainable Index of Metals, EcoBalance 2010, (2010.11.12)Tokyo

[図書] (計 2 件)

- ① 原田幸明 河西純一、動き出したレアメタル代替戦略、(2010)日刊工業新聞社、326p
- ② 原田幸明 片桐望、中島謙一、資源端重量、NIMS-EMC 材料環境情報 No.18 (2009)、41p

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

名称：電子機器粉砕物

発明者：原田幸明、井島清、山口仁志、菅原直之

権利者：独立行政法人物質・材料研究機構
種類：PCT

番号：PCT/JP2009/069323

出願年月日：2009/11/13

国内外の別：国外

名称：筐体分解装置とそれを用いた分解方法

発明者：原田幸明、片桐望、井出邦和、井島清、押鐘吉男

権利者：独立行政法人物質・材料研究機構
種類 PCT

番号 PCT/JP2010/060486

出願年月日 2010/6/21

国内外の別：国外

[その他]

ホームページ等

<http://www.nims.go.jp/genso/data/index.html>

<http://www.nims.go.jp/ecomaterial/hal/MR/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

原田 幸明 (HALADA KOHMEI)

独立行政法人物質・材料研究機構・環境・エネルギー材料萌芽ラボ・ラボ長

研究者番号：70354131

(2) 研究分担者

芳須 弘 (YOSHIZU HIROSHI)

独立行政法人物質・材料研究機構・材料信頼性材料萌芽ラボ・主任研究員

研究者番号：00354142

山口 仁志 (YAMAGUCHI HITOSHI)

独立行政法人物質・材料研究機構・材料信頼性材料萌芽ラボ・主任研究員

研究者番号：10370313

井島 清 (IJIMA KIYOSHI)

独立行政法人物質・材料研究機構・材料信頼性材料萌芽ラボ・研究員

研究者番号：10354135

井出 邦和 (IDE KUNIKAZU)

独立行政法人物質・材料研究機構・材料信頼性材料萌芽ラボ・主任研究員

研究者番号：30370315

片桐 望 (KATAGIRI NOZOMU)

独立行政法人物質・材料研究機構・元素戦略センター・特別研究員

研究者番号：80557562