

環境を考慮した資源循環システムの構築に向けて

Toward constructing an environmentally-friendly system for recycling of resources

藤田豊久

Toyohisa Fujita

東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻

Department of Systems Innovation, The University of Tokyo

Abstract: New technologies are put forward in order to be included in an environmentally-friendly system for recycling of resources. These technologies are effective in recovering resources from wastes or low-grade ores. This paper also points out and discussed several problems of current available methods, indicating environmentally-friendly solutions for the future. The ultimate aim is to contribute in creating a society with a sustainable development for current and future generations.

1. はじめに

21世紀になり各分野において個々の技術は従来技術が改良され少しずつ発展するとともに、新技術も各種考案されている。持続可能性をできるだけ目指し、多くの新技術を全体のシステムに組み込むためには、比較が必要で、環境面を含むコスト(エネルギーを含む)および資源の枯渇とリサイクル性から比較する必要がある。さらに、エネルギー削減および限られた資源の消費量を減らすためには全く新しい技術のイノベーションとシステムへの組み込みが必要である。俯瞰的、グローバルな観点からのシステム創成が望まれる。ここでは、技術のイノベーションの提案とそのいくつかを紹介する。

2. 循環型社会における技術とシステムの課題

2.1 資源の重要性と環境負荷

すでにピークオイルという世界の石油生産量がピークを迎えその後減少していくことが良く知られているが、ピークメタルも話題になっている¹⁾。地球の人口減少は欧米、日本のほか、2050年になると中国、インドも減少との予想があるが、30年後にはメタル消費量は現在の2倍になると予測されている。例えば銅では、地中の銅品位は1%以下でますます減少しており、品位と指数関数的に採取に必要なエネルギーは増大するとともに環境負荷が増大する。低品位化に伴い地中からの資源採取がますます困難となり、資源の有効利用、リサイクル回収が重要となる。

Fig.1 に資源循環システムの研究課題を示すが、その中でも分離技術の役割は重要である。

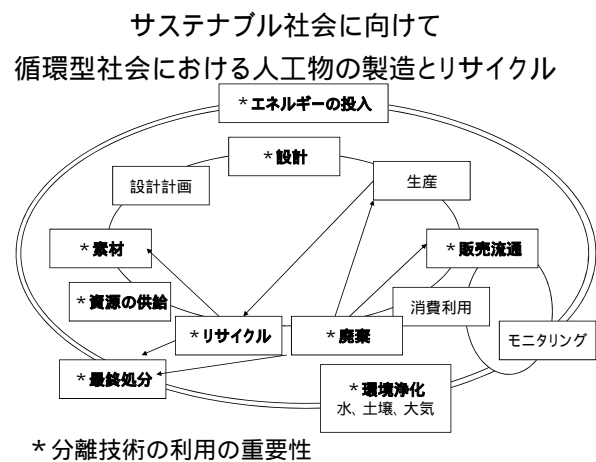


Fig.1 Concept of resources recycling system

まず、原料となる資源に関しては、偏在しているレアメタルをどのようにこの循環に組み入れ使用するか、巨大資源メジャーとの取引、中国資源政策との対応など多くの課題が挙げられる。近年、元素戦略プロジェクトとして In, W, Dy, Ce, Pt 属、Tb, Eu などの代替材料開発が行われているが、その開発と利用に要するエネルギーと地中の低品位鉱物からの採取とリサイクルの両面から資源利用システムを考える必要がある。Fig.2 に天然資源採取から製品の製造その消費および廃棄、リサイクルにおける環境負荷を示す。鉄はリサイクルして不純物が入った状態で利用する

カスケード利用のエネルギーが天然鉱石から作るよりも低く、高純度素材までリサイクルするには、よりエネルギーを要する。一方、アルミは天然素材から製錬して高純度素材にする場合に比べて、リサイクルから高純度素材にするエネルギーは極めて小さく、リサイクルの重要性が伺える。このように元素によってリサイクルの状況は変化するので、どの元素を使用するか、リサイクルを考慮した設計、製品製造の発展が期待される。

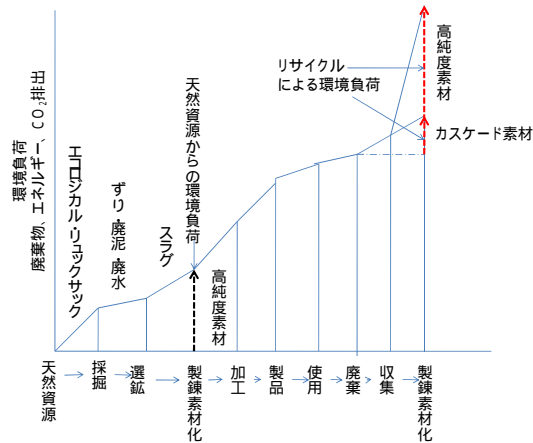


Fig.2 Environmental burden by utilization of resources

2.2 廃棄電子機器収集と材料の剥離粉碎イノベーション

近年の電子機器は各種レアメタルが多層薄膜、ナノ構造を利用しており、わずかな量の多種のレアメタルが使用されている。特に、小型家電機器の収集は、法律によるインセンティブが必要で、貴重でわずかなレアメタルを含み不純物を一定の個所に一定となるようにかつ多量に集める試みが人工鉱床構想として実施されている²⁾。多くの人工物が集まった場合、鉄、銅、アルミなどのベースメタルとプラスチックをレアメタルを含む部品から分離するには従来の機械粉碎ではエネルギーを多く必要とする。ここでは大量に各種の密度差のある物質を剥離分解する、火薬による低エネルギー型分解法を筆者らは提案している。大量に保管する前に、プラスチックや筐体を分けてリサイクルし、その後の部品等は分離してリサイクルし、残ったわずかなレアメタルを含有する部分は一定量集積してから処理する方式が望ましい。Photo 1 に池の底部に破碎対象物を沈め、水面下数十 cm に火薬を配置し、水中爆砕している写真を示す。水中爆砕はコンクリート容器やステンレス容器中に水を満たして火薬を起爆することも可能で、対象物としては、電子機器や機械類の分解を容易にする前処理としての破碎、硬度がある WC などの破碎、通常の機械粉碎では危険なものの破碎、完全な情報消去を目的とした情報機器の破碎が挙げられる。リサイクルのための 1 例としてリチウムイオン電池の破碎例を photo2 に示すが、プラスチックと金属部分に分離されている。クラッシャー

などの機械的粉碎では破裂の危険、ガス発生の問題があったが、これらを解決し、金属以外にもプラスチックのリサイクルが可能となる。低エネルギー型の新方式の水中爆砕の実用化には、設置場所、破碎対象物の選択、扱うことによる法律の問題など、実用化へ向けてのシステムづくりが課題である。また、破碎分離後、集収分別後、多量に集積した廃棄物中のわずかなレアメタルを回収するために、ゆっくりと時間をかけても浸出できる安価な薬剤やバイオ浸出の利用、および希薄水溶液系からの選択的吸着材の開発が期待される。

水中爆砕の写真



池の直径約 5 m

Photo 1 Under water explosion in pond for the separation.



Photo 2 Separated lithium ion battery by underwater explosion.

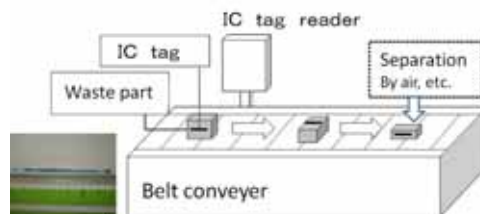


Fig.3 Utilization of IC tag for recycling

2.3 資源リサイクルのための分離技術のイノベーション

リサイクルしたいものがあれば、あるボックスに入れてそれぞれ、素材が分離して出てくる装置が理想であるが、その前処理として、各部品に IC タグをつけて、分離する IC タグ利用方式が Fig.3 のように考えられる。一方、電

子および機械製品に貼れば、その中に含有されている素材を瞬時に識別することが期待される。識別はリサイクルにおける部品の保管場所の選択にも貢献すると考えられ、自動車の部品などの管理をはじめ、どのリサイクルシステムに取り入れるかが課題である。

2.4 リサイクルのクリティカルポイントへのLCA利用

プラスチックをリサイクルすべきか焼却すべきかの仮題がある。一般廃棄物では、PETやビン、缶類の分別後、生ゴミ、紙やプラスチックなどの分解しないゴミが混合して廃棄されているが、そのまま混合して焼却すべきか、生ゴミの微生物分解、分別して紙やプラスチックのRPFとして利用するかは、都市と農村で異なることが考えられる。このような場合、LCAにより環境負荷を比較することができる。例えば、汚染されていないプラスチックの場合として10年使用後のテレビに使用されていたプラスチックのリサイクルを考えてみる。境界条件の設定がLCAでは重要であるが、Fig.4に示すようにテレビで使用されたプラスチックはマテリアルリサイクルのほうが環境負荷が低いことが示されている。LCA評価もリサイクルシステムに組み入れ、2種の技術がある場合、その選択のための手法に有効であり、今後も多くの評価するためのLCA用データの蓄積が重要である。

テレビ由来の廃プラスチック処理手法のLCA評価：結果の報告

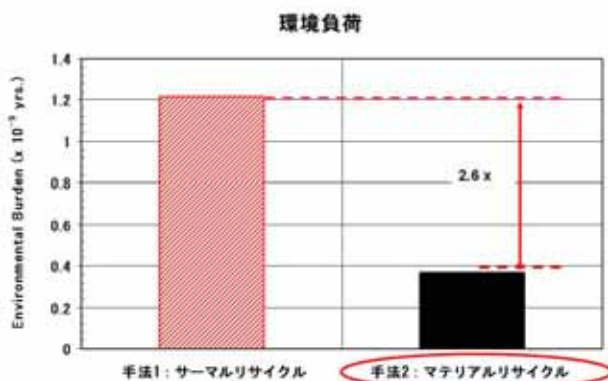


Fig.4 Comparison of thermal and material recycle of plastics in used TV.

3. 資源開発のイノベーション

3.1 資源の重要性

電子機器、機械製品、建造物を含めて人工物はできるだけ長く使用できるようにメンテナンスが行われ、省エネルギーや性能改良のためにアップグレードされる。リユースも行われたのち、優れた省エネ製品が出現した場合には、最終的には廃棄されリサイクルされる。このとき、製品からの素材の回収率および品位の関係を Fig.5 に示す。現状は、製品に使用された素材は 100%回収されず、例えば

80%あるいは 90%回収され、その品位も 100%の純度には至らない。これを回収率も純度も 100%に近づけて上昇させようとする、集収、分離機器、製錬において多くのコスト、エネルギーを必要とし環境への負荷が増大する。人工物が廃棄されると必ず、ある程度は素材が地球に拡散して回収困難になる。リサイクルの回転をゆっくりする必要があるので知られており、長寿命設計が考案されている。この減少した資源、素材を補給するためには、新たな未利用資源を開発採取する必要があり、環境保全を考慮しなければならない。

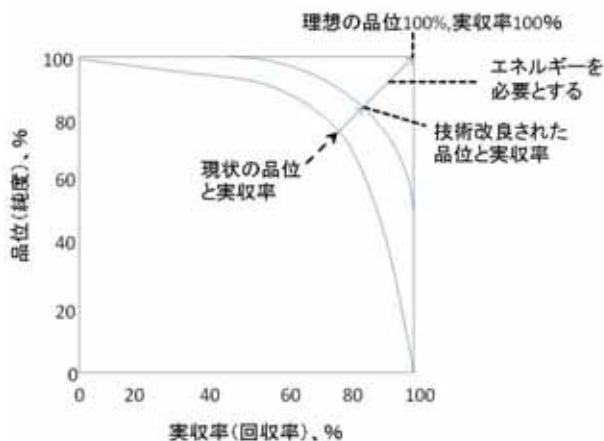


Fig.5 Recovery and grade after separation for recycling

3.2 海底資源開発の提案

海に囲まれた日本はEEZ (排他的経済水域) および大陸棚の海底資源の利用が期待される。海底資源にはメタンハイドレート、従来の天然ガス、石油石炭もあるが、金属資源では、主に海底熱水鉱床、マンガン団塊、コバルト・リッチ・クラストの3種の深海底鉱物資源がある。Table 1に南鳥島産のコバルト・リッチ・クラストの価値の試算を示すが、多種の重要なレアメタルが含有されていることがわかる。しかし、現状の金属価格ではその価値は約10万円/tである³⁾。クラストの主成分をMnO₂とし、硫酸を用いた湿式製錬で全浸出させる反応は以下ようになる。

$$\text{MnO}_2 + 2\text{FeSO}_4 + 2\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{MnSO}_4 + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 2\text{H}_2\text{O}$$
 クラストをすべてMnO₂と仮定した場合に、1t溶解するのに硫酸が2.25t必要で、硫酸第一鉄はリサイクルできる。工業用硫酸は安価に見積もってもこの反応には数十万円必要となる。次に浸出したMn²⁺イオンを電解で金属にするには、 $\text{MnSO}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mn} + \text{H}_2\text{SO}_4 + 1/2\text{O}_2$ で電解にも数千kwh/t必要となる。このほかに採鉱に使用するコストやエネルギーを含めると鉱物価値よりもかなりの費用がかかることになる。このためには、製錬所で廃棄される硫酸の使用、微生物を利用した浸出、採鉱や電解に要するエネルギーを海上風力、太陽電池などで供給するなど、できるだけコストを低減する開発方法が必要で

ある。筆者らは、クラストを基盤から剥がす分離に電気破碎や水中爆砕を提案して粉碎したクラスト破碎物を回収する方法、あるいは、より進んで海底で直接浸出した液を引き上げるなどの方法も議論し、今後の課題である。

3.3 陸域の資源開発

現状では希土類金属の生産地は中国がほとんどを占めるが、近年、海域を含めて、陸域でも希土類金属が発見されている。希土類金属を含む鉱床にはウランやトリウムが含まれていることが多く、分離抽出には、放射性元素を扱う JAEA や海外の原子力処理施設との協力システムが必要である。また、金属資源開発による環境汚染で問題となった鉱山開発には、ニューギニア島の西パプア地域、ロシアのモンタナ鉱山などの金鉱山、ニューカレドニアの Ni 鉱山などがある¹⁾。資源の利用には、環境を考慮した資源開発システムの可能性、地球全体からみた資源の供給量と開発、リサイクルをも考慮しなければならない。

Table 1 Example of calculation result of value of metals in 1 metric ton of cobalt-rich crust from Minami torishima island

コバルト・リッチ・クラスト (南鳥島産) の価値の試算

(*Sources: Alibaba.com HP, Kiteco Ltd HP, LME HP, Lynas Ltd HP)

	Price of Metal (yen/g) (2009.2)*	Mean Content in Cobalt-Rich Crust (g/ton)	Value per Metric Ton of Ore (yen)
Manganese (Mn)	0.24	193,000	46,320
Cobalt (Co)	4.89	5,800	28,362
Vanadium (V)	36.17	459.18	16,608
Nickel (Ni)	1.05	4,700	4,935
Platinum (Pt)	3,511.37	0.73	2,563
Molybdenum (Mo)	4.82	456	2,198
Zirconium (Zr)	9.5	55.49	527
Neodymium (Nd)	1.14	426	486
Cerium (Ce)	0.34	1,182.23	402
Tellurium (Te)	18.42	21.5	396
Terbium (Tb)	30.23	9.39	284
Tungsten (W)	3.08	86.67	267
Copper (Cu)	0.32	800	256
Europium (Eu)	34.01	7.21	245
Dysprosium (Dy)	7.42	20	148
Praseodymium (Pr)	1.1	76.2	84
Lanthanum (La)	0.59	116.8	69
Total	--	--	104,150

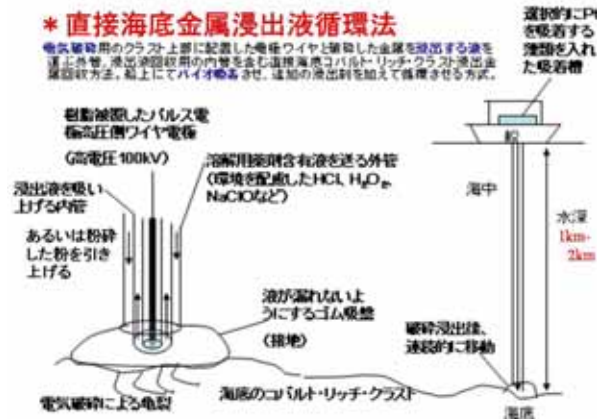


Fig.6 Direct leaching of cobalt-rich-crust after electrical disintegration

4 自然界の排水処理技術のイノベーション

4.1 水の重要性と鉱山排水処理

人間活動での人工物の循環を Fig.1 に示したが、CO₂ 排出、高温燃焼による NO_x などの大気汚染以外に水汚染（水汚染は土壤汚染にもつながる）対策も重要である。日本でもかつては多くの鉱山が開発され、鉱害廃水対策事業が各地で行われてきた。日本中の各地で対策が講じられ約 100 の地域の対策状況を Fig.7 に示す。現在も五十億円程度の税金を投入し、各種水処理が行われており、有害な As, Cd、重金属のない河川となり安全な水利用がなされている。金属含有廃水は従来、安価な石灰石および石灰中和、殿物繰り返し法、湿地の利用などが行われてきた。昔から廃水中の成分のリサイクルは提案されてきたが実用化には至らず、毎年、処理施設近辺では堆積場に殿物が積み続けられている。水中に含まれる鉄や銅などのリサイクルを目的として、ヒ素含有鉄酸性排水から、硫化物法によるヒ素の除去と鉄利用を筆者らは提案しているが、実用化のシステムは今後の課題である。

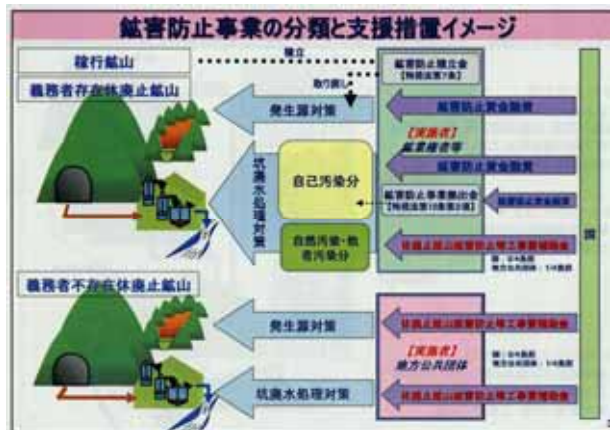


Fig.7 Water purification of waste mine drainage and natural water (from METI)

5 おわりに

エネルギーの新たな有効利用を含めたトータルな環境を考慮した資源循環システムの構築についての考察も必要で検討しているが、本文ではリサイクル、資源開発、水処理の概要におけるいくつかの新技术の提案を示した。イノベーション技術が必要であり資源循環にむけて個々の技術を実用化に結び付けるにはグローバルな観点からみた各種システムの構築が必要で、今後検討していきたい。

参考文献

- 1) 谷口正次：次に不足するのは銅だ、アスキー 新書 2008
- 2) 白鳥寿一、中村崇：人工鉱床構想 Reserve to Stock の考え方、資源と素材、2006、325-329.
- 3) 王立邦：博士論文“コバルト・リッチ・クラストからの白金の選択的回収に関する研究、2009