

平成 21 年 5 月 28 日現在

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19760588  
 研究課題名 (和文) 資源有効利用促進のためのレアメタル資源循環分析モデルの開発  
 研究課題名 (英文) Rare metal flow analysis for promotion of effective utilization of resources  
 研究代表者：  
 中島 謙一 (NAKAJIMA KENICHI)  
 独立行政法人国立環境研究所・循環型社会・廃棄物研究センター・NIES 特別研究員  
 研究者番号：90400457

研究成果の概要：本研究では、マンガン、モリブデンなどのレアメタルを取り上げてマテリアルフローに関するデータ整備および分析を実施すると共に、WIO-MFA モデルを発展させることにより、資源循環分析モデルの開発を目指した。また、副産物・廃棄物などの人工資源からの金属資源の回収可能性を検討する為に、乾式製錬プロセスにおける元素の分配傾向を熱力学的に明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,600,000	0	1,600,000
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	450,000	3,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・リサイクル工学

キーワード：有価物回収、資源有効利用、マテリアルフロー分析、製錬、熱力学解析

## 1. 研究開始当初の背景

BRICs 諸国の経済発展や資源メジャーによる資源の寡占化等、レアメタル・貴金属を含めた枯渇性資源の需給環境は大きく変化しています。日本は、高品質・高機能な電気電子機器や自動車を基幹産業としており、それを支える電子材料、鉄鋼材料など高付加価値な材料素材製造には、希少金属等の枯渇性資源の確保が必須であり、そのための資源・廃棄物を含めた物質管理が緊要とされている。上記の物質管理の観点において、特定の物質が「どこに?」「どのくらい?」「どのような形態で?」存在しているかを把握することは極めて重要である。このうち、従来の

MFA (マテリアルフロー分析) は、特定の物質が「どこに?」「どのくらい?」存在するかの把握に応じて来た。MFA とは、国、地域、産業部門などを単位として、物質収支を定量化して体系的に把握する手法である。MFA 研究は、国内外において積極的に実施されているものの明確な勘定体系や解析方法は確立されていない。しかしながら、一方で、「どのような形態で?」という問題については、明確な答えを示してこなかった。「どのような形態で」とは「何と一緒に」ということでもあり、これは、製品組成に関わる。従来の MFA は、主に個別の物質それぞれについて別個にそのフローを追跡することに専



った。また、製鋼プロセスでは、製鋼スラグとして、 $530.7 \times 10^3$  t-Mnが排出されると共に、合金成分を添加するために、二次精錬工程において、フェロマンガン、シリコンマンガンおよび金属マンガンとして、 $577.6 \times 10^3$  t-Mnのマンガンが投入されている事が明らかとなった。なお、これらの成果は、Materials Transactions、ISIJ International等に論文として掲載されている。

また、平成20年度は、WIO-MFAモデルに製錬技術モデルを組み込むことにより、銅製錬・鉛製錬・亜鉛製錬といった非鉄金属製錬の副産物から回収される貴金属などの元素を含めたマテリアルフロー分析を可能とした。また、これにより、約400品目の製品の構成素材を推計する事が可能となった。なお、この成果は、ES&Tに論文として掲載されている。

また、副産物や使用済み製品等の人工資源からの金属の回収可能性を検討する為に、熱力学解析を応用する事により、乾式製錬プロセス(鉄鋼転炉、銅転炉、鉛溶鋳炉、ISP)における元素のメタル相、スラグ相、ガス相への分配傾向を明らかにした。具体的には、金属相とガス相の分配傾向を表す指標として、(a)各元素と溶媒の蒸気圧の比を、金属相とスラグ相の分配傾向を表す指標として、(b)溶媒とスラグへの元素の熱力学的な分配率を取り上げた。Fig.3は、銅の乾式製錬における転炉を想定し、銅を溶媒とし e-waste 等に含まれる金属を溶質として 1mol%含有した場合の 1500K における上記の関連図である。横軸は各金属と銅の蒸気圧比、 $p_i/p_{Cu}$ を示し、縦軸は銅と酸化スラグ間の各金属の分配比を示す。また、Fig.4は、鉄を溶媒とし各元素を溶質として 1mol%含有した際の 1873K における関連図である。同様の解析を、鉛溶鋳炉、ISP においても適用した。これらの解析結果より作成した、乾式製錬プロセスにおける元素の分配傾向を Fig.4 に示した。

解析の結果、以下の分配傾向が得られた。  
 a) 銅の乾式製錬プロセスとして転炉を想定した場合、金属相として Cu や貴金属 (Ag, Au, Pt, Pd) や Bi が分配され、ガス相には Hg が分配されると得られた。また、Fe や Cr, Al 等の元素はスラグ相へと分配されることが明らかとなった。  
 b) 製鋼プロセスとして転炉を想定した場合、金属相として、Fe と Cu, Sn, Ni, Co, Mo, W が分配され、ガス相として Zn, Pb, Ag が分配されると得られた。また、その他の元素はスラグ相へと分配されることが明らかとなった。  
 c) 鉛製錬プロセスとして溶鋳炉を、鉛・亜鉛製錬プロセスとして ISP を想定した場合、貴金属や Cu, Sn, Bi 等が金属相として回収可能性があることが得られた。この成果は、Materials Transactions に論文

として掲載されている。

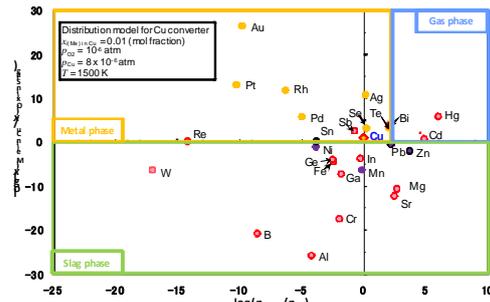


Fig.3 銅転炉における元素の分配傾向

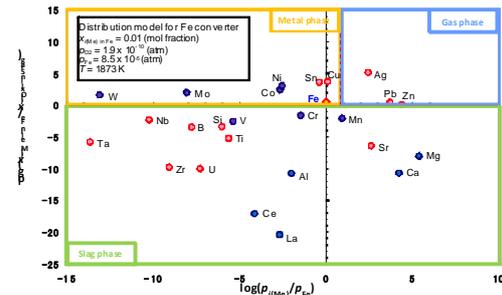


Fig.4 鉄鋼転炉における元素の分配傾向

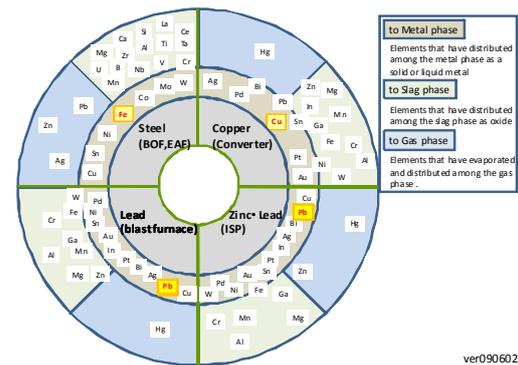


Fig.5 乾式製錬プロセスにおける元素の分配傾向

更に、プラチナ、パラジウム等の貴金属に加えて、希土類(ネオジウム、ディスプロシウム)、コバルト、カドミウムなどの金属部門を含めたレアメタル資源循環分析モデルのプロトタイプモデルの開発を行った。これらの結果については、データの精緻化を実施するとともに、現在、欧文誌(JIE や ES&T)への投稿準備を進めている。

### 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5件)

- ① K. Nakajima, O. Takeda, T. Miki and Tetsuya Nagasaka: “Evaluation Method of Metal Resource Recyclability Based on Thermodynamic Analysis”, Materials

- transactions, Vol. 50, No. 3, (2009), pp. 453-460
- ② S. Nakamura, S. Murakami, K. Nakajima and T. Nagasaka: “Hybrid Input-Output Approach to Metal Production and Its Application to the Introduction of Lead-Free Solders”, Environmental Science & Technology, Vol. 42, No. 10, (2008), pp. 3843-3848
- ③ K. Nakajima, K. Yokoyama and T. Nagasaka: “Substance flow analysis of manganese associated with iron and steel flow in Japanese economy”, ISIJ International, Vol. 48 No. 4, (2008), pp. 549-553
- ④ 中島 謙一, 横山 一代, 中野 加都子, 長坂 徹也: “日本におけるフラットパネルディスプレイ用途のインジウムの物質フロー分析”, 日本金属学会誌, 第72巻, 第2号, (2008), pp. 99-104
- ⑤ 中島 謙一, 大菅 広岳, 横山 一代, 長坂 徹也: “アルミドロスのマテリアルフロー分析および再利用技術の環境負荷評価”, 日本金属学会誌, 第72巻, 第1号, (2008), pp. 1-7

[学会発表] (計7件)

- ① 中島 謙一, 竹田 修, 三木 隆博, 松八重 一代, 長坂 徹也: “素材戦略のための熱力学解析に基づく金属資源の回収可能性の評価手法”, 第157回日本鉄鋼協会春季大会, (2009/03/28-30 東京工業大学)
- ② K. Nakajima, O. Takeda, T. Miki, K. Matsubae-Yokoyama and T. Nagasaka: “Evaluation Method of Metal Resources Recyclability based on Thermodynamic analysis for Material Flow and Stock Accounting ~ Metallic Element Distribution among the Gas, Slag and Metal in Metallurgical Process ~”, 8th international conference on ecobalance, Tokyo, Japan, (2008/12/10-12 Tokyo), pp. 760-763
- ③ K. Matsubae-Yokoyama, K. Ono, K. Nakajima, E. Yamasue and T. Nagasaka: “WIO analysis on Steel Recycling Considering Accompanying Substances”, 8th international conference on ecobalance, Tokyo, Japan, (2008/12/10-12 Tokyo), pp. 196-197
- ④ 中島 謙一, 竹田 修, 三木 隆博: “熱力学解析にもとづいた資源回収ポテンシャル量の推計手法”, 日本金属学会春季大会, (2008/09/23-25 熊本大学)
- ⑤ 中島 謙一, 横山 一代, 伊藤 聡, 長坂

徹也: “鉄鋼業を介した亜鉛の物質フロー分析”, 日本鉄鋼協会春季大会, (2008/3/27-29 武蔵工大)

- ⑥ 中島 謙一, 横山 一代, 長坂 徹也: “日本における鉄鋼フローに随伴するマンガンの物質フロー解析”, 第3回日本LCA学会研究発表会, (2008/2/28-3/1 名古屋大学) (2008/2/28)
- ⑦ 中島 謙一, 横山 一代, 林 誠一, 長坂 徹也: “日本における鉄鋼フローに随伴するマンガンの物質フロー分析”, 日本鉄鋼協会秋季大会, (2007/9/19-21 岐阜大学)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中島 謙一 (NAKAJIMA KENICHI)

独立行政法人国立環境研究所・循環型社会・廃棄物研究センター・NIES 特別研究員  
研究者番号: 90400457

### (2) 研究分担者

該当なし

### (3) 連携研究者

該当なし