

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 10 日現在

機関番号：82101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22360387

研究課題名（和文）

熱力学解析と MFA の融合による都市鉱山からの金属資源の回収可能性評価手法の開発

研究課題名（英文）

Combined tool of thermodynamic analysis and MFA to evaluate metal resource recyclability from urban mines

研究代表者

中島 謙一 (NAKAJIMA Kenichi)

独立行政法人 国立環境研究所・資源循環・廃棄物研究センター・主任研究員

研究者番号：90400457

研究成果の概要（和文）：

新興国の経済発展等に伴う金属資源の需要拡大を背景に、持続可能な資源利用・管理の必要性が世界的に高まっている。社会における物質収支を計量する物質フロー分析(MFA)は、物質循環の可視化・最適化において重要な役割を担ってきた。しかしながら、MFAは、二次資源からの物質の回収可能性や不純物の除去可能性等の技術的な課題・限界についての情報を与えてこなかった。これに対して、本研究では、MFA と熱力学解析の複合的な利用を提案すると共に、ニッケル、クロム、モリブデン等の金属資源の MFA を通じて持続可能な資源利用への提言を行った。

研究成果の概要（英文）：

The global demand for metal resources has been sharply increasing by economic growth, and the issue of sustainable resource management has also been increasingly recognized. In order to optimize the material cycles and increase resource efficiency, material flow analysis (MFA) is a powerful tool to understand the resource consumption and material cycle in the national economy. However, MFA cannot provide technological information on the recoverability and/or removability of elements from secondary resources. This study proposed a combined application of MFA with thermodynamic analysis for sustainable resource use, and conducted detailed MFAs of metals, such as nickel, chromium and molybdenum, that were concerned with thermodynamic properties of elements.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	3,300,000	990,000	4,290,000
2011年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2012年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
年度			
年度			
総計	13,000,000	3,900,000	6,370,000

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・レアメタル・熱力学解析・物質フロー分析(MFA)

1. 研究開始当初の背景

本研究に関連する世界的な動向としては、

UNEP が、『持続可能な資源管理に関する国際パネル(International Resource Panel)』を

設立(2007年)した。Resource Panel では、天然資源の利用並びに環境影響等に関する最新の情報収集・知識基盤の構築、選定された資源/製品の環境影響の科学的評価の提供などを任務として、資源管理や物質フロー等の関連分野の著名な科学者及び専門家により議論が重ねられている。一方、国内においては、内閣府など4省府などが連携する「元素戦略/希少金属代替材料開発合同戦略会議」が設立されて、レアメタルやクリティカルメタルを対象とした議論が重ねられており、資源探査、代替材料の開発と共に、リサイクルによる資源確保の重要性が明確に示されている。

マテリアルフロー分析(MFA)は、物質収支を定量化して環境負荷や資源消費を体系的に把握する手法として、欧州・米国・日本を中心に研究が進められており、MFA 研究の成果は、Resource panel の議論においても有用な情報を提供している。国内においては、原田ら³⁾が元素別の社会蓄積量を都市鉱山蓄積ポテンシャル量として算定しており、都市鉱山についての社会的な議論を巻き起こした事は記憶に新しいが、申請者は、産業連関表を利用したトップダウン型の多元他部門 MFA 手法として、WIO-MFA(Waste Input-Output Material Flow Analysis)モデルを開発・提案してきた。一方で、既存のMFA/MSA は、使用済み製品等の都市鉱山からの金属の回収可能性や不純物の除去限界について、有益な情報を何ら提供できてこなかった。これに対して、申請者らは、熱力学解析に基づいて、乾式製錬プロセス(鉄鋼、銅など)における元素の分配傾向を示してきた。

2. 研究の目的

経済産業省・環境省の連携の下、又、各分野において、都市鉱山からの有価金属のリサイクルに着目した事業や取り組みが数多く実施されている。その多くは、回収システムや回収技術などの実践的・実用的な課題に焦点をあてたものであり、学術的な基礎研究は少ない。これに対して、本研究の主たる目的は、都市鉱山からの金属資源のリサイクル可能性の評価手法の確立及び定量化である。研究は、熱力学解析に基づく都市鉱山からの金属資源の回収可能性の評価と、物質フロー・ストック分析(MFA/MSA)に基づく都市鉱山としての資源量及び回収可能量の評価を核として、材料科学及び社会科学の両側面から実施する。

本研究の実施により、都市鉱山からのリサイクルを議論する上で必要となる回収可能性や資源量等の学術的情報の整備が期待できる。

3. 研究の方法

本研究では、熱力学解析に基づく都市鉱山からの金属資源の回収可能性の評価と、MFA に基づく都市鉱山としての資源量及び回収可能量の評価を核として、LCA や産業連関分析を組み合わせる事により、リサイクルの効果を環境側面などの社会的効果を含めて明らかにする。

- (1) 熱力学解析に基づく金属資源の回収可能性と不純物の除去限界の解析：都市鉱山からのリサイクルでは、不特定多様な元素の混入が予想される。そこで、アルミニウムやマグネシウムの再溶解プロセスを含めた製錬・再溶解プロセスにおける元素の分配傾向の網羅的な把握を目指す。その上で、溶媒抽出など後段のプロセスの有無、技術情報をもとに、資源の回収可能性を明らかにすると共に、不純物の除去限界を明らかにする。特に、一部のステンレス等を除いては、有効なリサイクルがほとんど実施されてこなかった鉄鋼用合金元素のニッケル、クロム、マンガン、タングステン、アルミ用合金元素のマンガン、マグネシウム、チタン、マグネシウム用合金元素のジルコン、希土類元素などについては、詳細な解析を行うと共に、循環利用への活路を見出す。
- (2) MFA/MSA に基づく資源量及び回収可能量の評価：社会蓄積量には、自動車や住居のように使用中の製品も含まれるため回収可能量はそれと等しくはない。また、製錬プロセスや再溶解プロセスにおける金属の回収可能性も元素ごとに大きく異なる(社会蓄積量≠回収可能量)。そこで、上記①で得られた回収可能性や廃棄物としての発生時期などを加味した上で、都市鉱山からの金属資源の回収可能量を明らかにする。
- (3) 解体処理方法の設計ツールの開発：都市鉱山に含まれるレアメタル等の有価金属の多くは、ステンレスのニッケル、クロム、超硬工具のタングステン、液晶パネルのIインジウムなど特定製品の特定部位に偏在している。そこで、効率的な有価金属の回収の為に、上記②から得られる資源量(特に製品別部位別の情報)、及び、上記①から得られる回収可能性の情報を組み合わせる事により、易解体設計(Design for Disassembly, DfD)の為に偏在部位の特定及び解体処理方法の設計ツールの開発を行う。
- (4) LCA 的評価に基づく回収効果の評価：鉄鋼業において、年間100万トン以上が消費されているCr, Mnなどのレアメタルは、資源として希少なだけでなく、製造時における環境負荷がきわめて大きい元素である(フェロクロム:3.4~8.0、フェ

ロニッケル:36、フェロマンガン:2.9~4.0、単位は t-CO2/ t-ferroalloy)。都市鉱山からの金属資源の回収により、温室効果ガス削減など環境的側面からも効果が期待できる。そこで、スクラップソーティング(分別回収と最適配合)などのリサイクルの導入による社会的効果を定量的に明らかにする。

4. 研究成果

本研究では、熱力学解析の手法を用いることにより、鉄鋼製錬(Fe-X系)、銅転炉(Cu-X系)、鉛溶鋳炉(Pb-X系)、ISP(Zn-X系)、各種軽金属(アルミニウム(Al-X系)、マグネシウム(Mg-X系)、チタン(Ti-X系))の再溶解プロセスにおける各元素の金属相、スラグ相、ガス相への分配挙動の解析を行うと共に、混入元素の回収可能性・除去可能性を推計した。更に、解析結果をもとに、資源回収のポテンシャルの可視化のために各系の分配挙動図およびエレメントレーダーチャートの作成を行った。

また、物質フロー分析(MFA)の手法を用いることにより、物質フロー・ストック量の同定、更には、二次資源の類型化手法等の確立を行った。物質フロー・ストック量の推計に関しては、鉄鋼材料およびその合金元素の解析の他、家庭用および業務用電気電子製品の組成(金属含有量)データの整備および組成データと出荷量と寿命モデルに基づいた排出量推計と各品目の金属資源賦存量を類型化、次世代自動車やリサイクル技術などの新規技術の導入を考慮したマテリアルフロー分析とピンチ解析による循環利用可能性評価等を実施した。更には、製造産業にとって都市鉱山からの金属資源回収がどの程度の重要性を占めうるかを検討するために、各金属の需要量、蓄積量、廃棄量などを国ごとに整理し、各国の都市鉱山の資源供給ポテンシャル比較を実施した。

以下に、主要成果の1つである鉄鋼合金元素を対象とした熱力学解析およびMFAの解析結果と循環利用の促進に向けた提言の概略を示した。

図1は、鉄鋼製錬(転炉・電気炉)を想定(1873K、1mol%添加)した元素の配挙動の解析結果である。縦軸には金属相とスラグ相への元素の分配傾向を表す指標として、溶媒(鉄)とスラグへの元素の熱力学的な分配率を、横軸には金属相とガス相への分配傾向を表す指標として、各元素と溶媒の蒸気圧の比を取り上げた。なお、解析手法の詳細については、既報を参照頂きたい。

解析の結果、アルミニウム、マグネシウム、マンガンなどは酸化傾向が強くスラグ相への分配傾向が強い事が分かる。また、亜鉛めっき鋼板などに含まれる亜鉛はガス相への

分配傾向が強い事が分かる。一方、鉄に対するトランプ元素として良く知られている銅や錫などの元素は金属相への分配傾向が強くこの図からも酸化除去・揮発除去による不純物除去が不可能である事が分かる。また、重要な合金元素であるニッケルおよびモリブデンも金属相への分配傾向が強く、鉄リサイクルに伴う希少な資源の散逸(Loss)の可能性を有している事が判る。

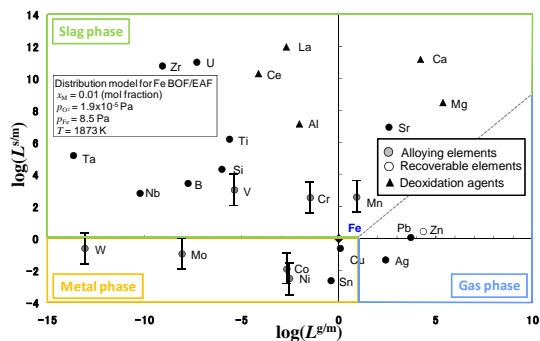


図1 鉄鋼製錬プロセスの元素の分配挙動

図2は、同様の手法を用いて主要製錬・再溶解プロセスにおける元素の分配挙動の解析結果をもとに作成した『エレメントレーダーチャート』である。図1と同様に、各プロセスにおいて円周方向は金属相およびガス相への分配傾向を表し、半径方向は金属相およびスラグ相への分配傾向を表し中心方向に向かうほどスラグ相への強い分配傾向を示す事を表している。これらの図を用いる事により、合金元素や不純物元素等、各種の元素が金属相、スラグ相、ガス相のいずれかに強く分配される傾向があるかを把握する事が可能である。

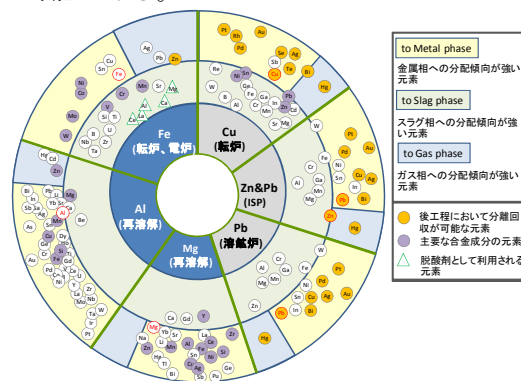


図2 エレメントレーダーチャート

また、図3は、WIO-MFAモデルによる多元素物質フロー解析により同定した自動車を介したニッケル、クロム、モリブデンのマテリアルフローである。なお、物質フローデータの整備に際しては、鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計等の国家統計の他、各種の業界統計、有識者へのヒアリング等で得られた情報を参考にした。

解析により、これらの合金元素は、自動車部品や内燃機関にステンレスや耐熱鋼として多く含有されていることが判り、鉄スクラップリサイクルに伴う合金元素の散逸を回避するためには、これらの濃化部位の分別回収が重要であることが判る。MFA と上記の熱力学解析の結果を組み合わせることで、鉄スクラップ中の合金元素に着目した Alloy to Alloy リサイクルの導入により、ニッケル、モリブデン、コバルト等の金属相への分配傾向の強い元素については、高い回収率で合金成分の添加用途のフェロアロイ等の削減が期待できる事、また、炭素鋼製造の条件下では、スラグ相への分配傾向が強いクロム、マンガン等に関する特殊鋼製造の原料として投入することにより、合金成分の添加用途のフェロアロイや脱散剤等の削減が期待できることが明らかとなった。

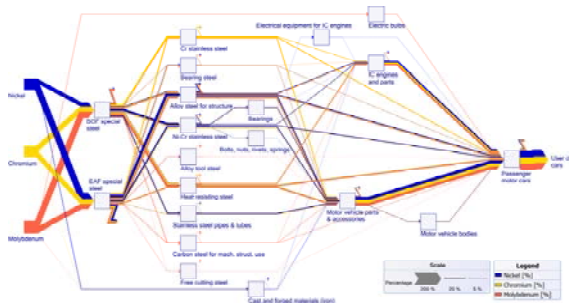


図3 自動車製造を介した Ni, Cr, Mo フロー

本研究で目指したものは、資源の質を味わい尽くすリサイクルへの転換、即ち、より高度なリサイクルシステムの構築である。鉄スクラップリサイクルを取り上げた Alloy to alloy リサイクルの重要性の提言は、その提言の一端である。なお、本研究の研究成果の一部および関連論文は、2013年に発行された UNEP Resource Panel の報告書“Metal Recycling”にも採用されるなど、国際社会に大きく貢献した。

< Metal Recycling >

<http://www.unep.org/resourcepanel/Publications/MetalRecycling/tabid/106143/Default.aspx>

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 24 件)

- ① K. Nakajima, H. Ohno, Y. Kondo, K. Matsubae, O. Takeda, T. Miki, S. Nakamura, T. Nagasaka, Simultaneous Material Flow Analysis of Nickel, Chromium, and Molybdenum Used in Alloy

Steel by Means of Input-Output Analysis, Environmental Science & Technology, 47 (2013), 4653-4660.

DOI: dx.doi.org/10.1021/es3043559

- ② K. Nakajima, O. Takeda, T. Miki, K. Matsubae, T. Nagasaka, Thermodynamic Analysis for the Controllability of Elements in the Recycling Process of Metals, Environmental Science & Technology, 45 (2011), 4929-4936.

DOI: dx.doi.org/10.1021/es104231n

- ③ K. Nakajima, O. Takeda, T. Miki, K. Matsubae, S. Nakamura, T. Nagasaka, Thermodynamic Analysis of Contamination by Alloying Elements in Aluminum Recycling, Environmental Science & Technology, 44 (2010), 5594-5600.

DOI: dx.doi.org/10.1021/es9038769

- ④ M. Oguchi, T. Tasaki, Y. Moriguchi, Decomposition analysis of material flows in a dynamic system: factors in generation of waste consumer durables, Journal of Industrial Ecology, 14 (2010), 627-640.

DOI: 10.1111/j.1530-9290.2010.00248.x

[学会発表] (計 32 件)

- ① K. Nakajima, H. Ohno, Y. Kondo, O. Takeda, T. Miki, K. Matsubae, S. Nakamura and T. Nagasaka: “Combined Application of MFA with Thermodynamic Analysis for Sustainable Resource Use”, 10th international conference on ecobalance, Tokyo, Japan, (Nov. 20-23/2012, Keio University, Yokohama, Japan), C2-08, (2012/11/22)
- ② K. Nakajima, K. Matsubae, Y. Kondo, S. Nakamura, and T. Nagasaka: “IO-MFA and Thermodynamic Approach for Metal Recycling”, REWAS2013 (March 3-7, 2013 (TMS Annual Meeting) · San Antonio, Texas · USA), (2013/3/7)

[図書] (計 1 件)

- ①原田幸明(監修)、フロンティア出版、レアメタル・希少金属リサイクル技術の最先端、2011、pp.229-238 (竹田修 分担)

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・資源循環・廃棄物研究センター・主任研究員

研究者番号：90400457

(2) 研究分担者

小口 正弘 (OGUCHI MASAHIRO)
独立行政法人国立環境研究所・資源循環・
廃棄物研究センター・研究員
研究者番号：20463630
三木 貴博 (MIKI TAKAHIRO)
東北大学大学院・工学研究科・准教授
研究者番号：30312606
竹田 修 (TAKEDA OSAMU)
東北大学大学院・工学研究科・助教
研究者番号：60447141
松八重 一代 (MATSUBAE KAZUYO)
東北大学大学院・工学研究科・准教授
研究者番号：50374997
橋本 征二 (HASHIMOTO SEIJI)
立命館大学・理工学部・教授
研究者番号：30353543
畑山 博樹 (HATAYAMA HIROKI)
独立行政法人産業技術総合研究所・安全科
学研究部門・研究員
研究者番号：30612733

(3) 連携研究者

森口 祐一 (MORIGUCHI YUICHI)
東京大学大学院・工学系研究科・教授
研究者番号：30157888
長坂 徹也 (NAGASAKA TETSUYA)
東北大学大学院・工学研究科・教授
研究者番号：30180467
醍醐 市朗 (DAIGO ICHIRO)
東京大学大学院・工学系研究科・准教授
研究者番号：20396774