

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：82101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26281059

研究課題名(和文) サプライチェーンを通じた資源利用と環境影響の解析と資源利用の高度化・高効率化研究

研究課題名(英文) Detection of resource consumption and its environmental impacts, and system design to increase resource efficiency through the supply chain

研究代表者

中島 謙一 (NAKAJIMA, Kenichi)

国立研究開発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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、資源消費がサプライチェーンを通じて誘引する影響を捉えるための計測・解析手法の開発に取り組み、鉄・銅・ニッケルを対象事例としてグローバルマテリアルフローとサプライチェーンに内在する諸問題(土地改変、サプライチェーンリスクなど)の把握と改善策の提言を行った。また、改善策の1つとして、更なるリサイクルの推進の重要性を示し、プロセスの化学熱力学解析などの観点から課題と有効利用の可能性を論じると共に、特に、劣質・未利用な静脈資源に着目しての有効利用を促進するための方策を論じた。得られた成果については、インフォグラフィックスの技法などを活用して、論文誌や学会発表での発信に取り組んだ。

研究成果の概要(英文)：This study revealed the linkages between national resource consumption (Fe, Cu, Ni) and global impacts by using a global link input-output model (GLIO) and knowledge to increase the resource efficiency in metal recycling based on metallurgical thermodynamic approach. This study also revealed the fundamental importance of metal recovery from waste to avoid dissipations of resources. Possible options include the development of a sorting process for metal scrap aimed at alloy-to-alloy recycling. We also discussed measures for ameliorating or relaxing the differences between the grades of secondary materials and grade of raw material in metallurgical industry; measures such as a) upgrading the quality of pre-consumer materials by removing impurities, b) adjusting the quality of secondary materials by mixing and diluting, and c) relaxing the limits on impurities by refineries can be considered to close the loop for metal cycle.

研究分野：産業エコロジー

キーワード：物質フロー分析 化学熱力学解析 サプライチェーン リサイクル 金属 資源

### 1. 研究開始当初の背景

新興国の経済成長や世界人口の急増が予想されるなか、資源利用に伴う環境影響の拡大を阻止するためには、安易な天然資源への依存からの脱却、更には、都市鉱山の有効利用を含めた資源利用の高度化・効率化を進める必要がある。事実、国連環境計画(UNEP)のResource Panelでは、経済成長に伴う世界的な資源利用と環境劣化の拡大を背景に、持続可能な資源管理の科学的推進力として、資源採掘や金属製造に伴う環境影響<sup>1)</sup>、金属リサイクルの未成熟度<sup>2)</sup>とリサイクルの高度化への期待<sup>3)</sup>等を発信している。更なる資源利用の高度化・効率化を促進するためには、経済活動に伴う物質収支の定量化が重要であり、2000年頃から欧米・日本を中心に、物質フロー分析(MFA/SFA)による物質のフロー・ストック量の解析が精力的に実施されており、MFA/SFAは上述のUNEPでの議論においても物質の需給構造に関する重要な知見<sup>1-3)</sup>を提供してきた。

しかし、従来型のMFA/SFAの多くは、物質のフロー・ストック量の同定に主眼が置かれており、物質の質(品位・組成、資源性・有害性など)と資源利用に伴う環境影響を捉える枠組みが欠落しており、サプライチェーンを通じた資源利用と環境影響に関する国際的議論を牽引するための計測・解析手法としては、十分には機能してこなかった。唯一、Lenzenら<sup>4)</sup>の先鋭的な研究があげられるが、金属種ごとの解析や資源利用や環境影響の具体的な改善策などは示されていない。

一方、提案者は、H19-20年度の期間、科研費若手(B)「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構築」を実施し、産業連関分析に基づくMFAモデル(WIO-MFA)<sup>5)</sup>を開発して、多元的な物質フローとサプライチェーン構造の解析、製品・廃棄物等の組成解析を実施してきた。更に、H22-H24年度の期間では、科研費基盤(B)「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」を実施し、MFAによる潜在的な二次資源量の解析と熱力学解析による元素の分配挙動解析を組み合わせる事で、二次資源としての資源回収の可能性と限界を明らかにした<sup>6)</sup>。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、サプライチェーンを通じた資源利用と環境影響の計測・解析方法の枠組み設計、更には、事例研究を通じて、サプライチェーンを通じた資源利用と環境影響の計量化・可視化である。これを基に資源利用の高度化・高効率化の効果を明らかにして、持続可能な資源管理のための技術開発課題・システム開発課題を抽出する。事例研究では、鉄や銅などの基盤的資源に加えて、ニッケル、更には、それら随伴元素を取り上げる。これらは、エネルギー利用と関連する資

源であり、新興国の経済発展に伴う需要拡大の他、先進国における低炭素技術への転換においても重要な資源である。また、具体的な技術・システムとして、低品位鉱石(Ni酸化鉱など)・めっき廃液(Niめっき)、電池(Ni-MH電池、Li-ion電池、太陽電池)・基板などの劣質・未利用資源の有効利用と高度利用化、更には、金属スクラップ(特殊鋼、Ni基超合金など)の随伴元素の有効活用などを取り上げて改善効果の算定・可視化を実施する。

本研究の特色は、物質フロー・サプライチェーン分析による俯瞰的な特性情報と物質の資源性・有害性および個別のプロセスでの物質の分配挙動等の解析により得られる微視的な特性情報をもとに、日本の産業構造と国際サプライチェーン、更には、資源利用に伴う環境影響情報を統合して記述・解析する事であり、完成により、科学技術政策や環境技術政策等の幅広い分野への情報還元が期待できる。

優れた研究成果であっても、情報の受け取り手の関心や理解度によって伝え方を適切に設計しなければ、研究成果が確実に社会に還元される事はない。そこで、情報伝達のためにインフォグラフィックスの技法を取り入れて、効率的なグラフィックデザインの作成に努めた。

### 3. 研究の方法

サプライチェーンを通じた資源利用と環境影響の計測・解析方法の枠組み設計に加えて、事例研究を通じて以下の3つの特性情報を明らかにした上で、持続可能な資源管理に資する技術・システムの提言を目指した。

- (1) 物質フロー・サプライチェーン特性：対象元素のサプライチェーンの俯瞰的把握と共に、サプライチェーンを通じた資源利用に伴う環境影響を同定する。更に、下記(2)と(3)から得られるプロセス特性と資源性・有害性特性、更には、文献調査等に基づく先行研究・事例の調査をもとに選定した持続可能な資源管理に資する資源利用の高度化・効率化技術(含むシステム)を想定して、技術導入による改善効果の計量分析(シナリオ分析)を実施する。解析の基盤となるWIO-MFAは、金属元素(20種)と樹脂(8種)を対象とした精緻な物質フロー・サプライチェーン構造の解析を可能とする。また、GLIO(Global Link Input-Output Model)<sup>7)</sup>は、この詳細性を犠牲にすることなく、日本の産業構造(約500部門)と230カ国の国際サプライチェーン構造の接続を可能とする。
- (2) 物質の分配挙動等のプロセス特性：資源性物質の有効利用と有害性物質の拡散の防止のために、化学熱力学解析や実験的アプローチにより製錬、廃棄物処理およびそれらの中間処理(分離・選別・濃縮)の各プロセスにおける元素の分配

挙動、更には、元素の回収可能性および不純物の除去可能性・除去限界を明らかにする。

- (3) 物質の資源性・有害性特性： 静脈資源等の化学分析と共に、サプライチェーンを通じた物質の『化学状態フロー』を作成すると共に化学物質の生成メカニズムを解析する。具体的には、物質のライフサイクルの各プロセスにおけるサンプル(鉱石、製品、廃棄物など)中の元素の化学状態および物質の生成メカニズムを実験的・文献学的アプローチにより解析・抽出する。

#### 4. 研究成果

物質フロー・サプライチェーン分析の結果、いずれの物質(鉄・銅・ニッケル)についても1995年から2010年にかけて、鉱石の採掘量、貿易を介した物質の移動量(取引量)、そして、見掛け消費量が顕著に増加(世界全体で約2倍程度)していること、更には、需要の偏在化と集中化が進んでいることが明らかとなった。

以下では、特徴的な研究成果として、ニッケルとその随伴元素を対象とした解析事例を中心に結果を示した。ニッケルを含む素材は、材料物性・特性等の観点から有用性が高まっている素材であるが、他の金属資源と同様に急速な需要拡大に伴って、採掘や製錬に伴う地球環境問題等が懸念されている。

はじめに、既存論文や各種の報告書などをもとに資源利用が抱える課題として、サプライチェーンに内在する各種のリスク要因を抽出した。その結果、環境問題としては、採掘や製錬に伴う動植物の生息域の損失や生物多様性への影響、自然保護区との重複や近接、採掘に伴う土地改変、更には、生産施設における不適切な環境管理に伴う周辺環境の重金属汚染、動植物等への重金属の蓄積、硫酸化物・鉱業廃棄物等の排出に関する事例などがニッケル鉱石の産出国やフェロニッケル・金属ニッケル等の生産国において報告されていることが明らかとなった(雑誌論文を参照)。更には、その他のサプライチェーンに内在するリスク要因として、資源産出国における輸出規制、資源価格の変動、労働者によるストライキによる資源供給への影響が確認できた(雑誌論文を参照)。無論、これらの報告事例のなかには、既に対策が導入されたことにより、地球環境への排出等が改善した事例ども認められるが、資源利用に関わるサプライチェーンリスクを管理するためには、国際的に広がり複雑な繋がりを有するサプライチェーンに内在する多様なリスク情報の収集と体系的な整理が必要不可欠であると考えられる。

次に、ニッケルの国際的な需給構造に着目すると国際貿易を介して複雑な需給構造を有している事が示された(雑誌論文を参照)。図1は、ニッケルのグローバルマテリ

アルフローの概略である。2005年のニッケル鉱石の採掘量は、 $1.5 \times 10^6$  t-Ni、国際貿易を介した世界全体の総ニッケル移動量は、 $2.7 \times 10^6$  t-Niであり、ニッケルを含む製品の取引は、特定の国・地域間の移動に集中している事が明らかとなった。具体的には、インドネシア、オーストラリア、ロシア、カナダ等の資源産出国から日本、アメリカ、そして北米への移動量が多く、231の国・地域間のニッケルの移動量のうち上位の10位までの移動量占める割合は約21%に達し、上位の50位までの移動量が占める割合は約47%に達すると得られた。また、得られた結果にGLIOを適用することにより、2005年の日本の経済活動に伴うニッケルの誘発採掘量は、 $0.25 \times 10^6$  t-Niであり、資源採掘国ごとには、インドネシア(40%)において誘発される採掘量が大きく、次いで、ニューカレドニア(14%)、オーストラリア(8%)、カナダ(8%)、ロシア(7%)と得られた。なお、ニッケル鉱石の採掘に伴う土地改变量(図2)は、世界全体で $1.9 \text{ km}^2$ (オーストラリア: 13.7%, ロシア: 12.9%, インドネシア: 12.5%など)であり、約2割の $0.38 \text{ km}^2$ (インドネシア: 47.0%, ニューカレドニア: 16.0%, オーストラリア: 7.7%など)が日本の経済活動に起因すると得られた。

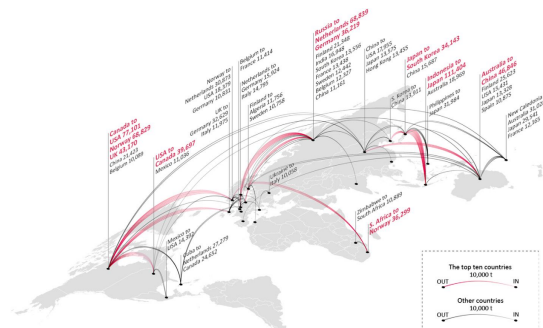


図1. ニッケルのグローバルマテリアルフローの概観(2005年, 上位50フロー) 雑誌論文



図2. 世界および日本の経済活動によるニッケル鉱石の採掘に伴う土地改変面積(2005年) 雑誌論文

インドネシアやニューカレドニアは、ニッケル酸化鉱の主要な産出国として知られると共に、植生豊かな地域としても知られており、経済活動に伴って急速に植生や動植物の生息域が失われつつある地域(生物多様性ホ

ットスポット)としても指摘されていることから、持続可能な資源の管理方策として、当該国における植生の回復等を進める政策的支援、更には、二次資源の有効利用の更なる促進(雑誌論文を参照)などが求められる。

そこで、二次資源の有効利用の為に、熱力学解析により製錬プロセス(鉄鋼製錬およびフェロニッケル製錬)における元素の散逸挙動などのプロセス特性を明らかにすると共に、化学分析等により忌避元素であるPなど含む劣質な静脈資源の物質特性を明らかにすることで、実行可能なリサイクル経路を考案した。解析対象はリサイクルの中核であるフェロニッケル製錬の電炉であり、26の元素の分配平衡を計算した。特にリサイクルの可否を決定づけるPについては、実験も行い議論の確度を高めた。解析結果として、二次資源から混入したCo、Cu、Mo、Ni、Sn、Wは金属相に分配され製品に移行すること、Al、B、Ca、Ce、Cr、La、Mg、Mn、Nb、Si、Sr、Ta、Ti、U、V、Zrはスラグ相に分配され除去されること、Ag、Pb、Znはガス相に分配され除去されることがわかった。この分配の傾向は鉄鋼製錬の電炉と本質的に同じであった。WとMoは、酸素分圧を増大させることで除去できると予測された。Pは、天然鉍石中に含まれるMgOによって、部分的に除去されることがわかった。これは、フェロニッケルスラグに脱リン能が元来備わっていることを意味する。さらに、CaOを添加することで、ほとんどのPを除去できることが、解析的、実験的に実証された。

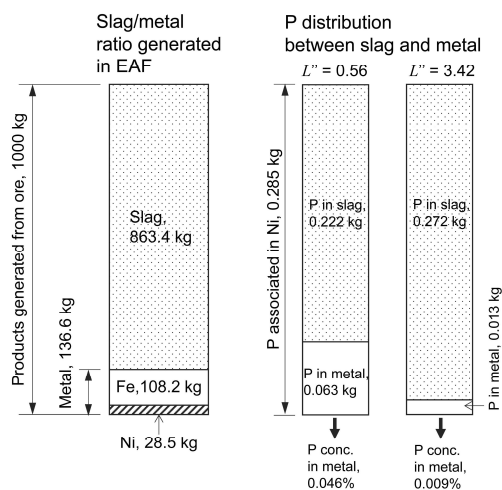


図3. フェロニッケル製錬の電炉における金属相とスラグ相へのPの分配のモデル計算。Ni重量の1/100のPが混入すると仮定(Ni/P=100重量比)

図3には、フェロニッケル製錬の電炉における金属相とスラグ相へのPの分配のモデル計算を示した。天然鉍石のみを使った場合(分配比  $L''=0.56$ )でも、フェロニッケル製品中のP濃度は0.046%となり、高炭素フェロニッケル(安価品)であれば規格に合格すること

がわかった。CaOを添加した場合(分配比  $L''=3.42$ )では、フェロニッケル製品中のP濃度は0.009%となり、低炭素フェロニッケル(高級品)でも規格に合格することがわかった。高濃度のPを含んだ二次資源であっても、鉍石とのブレンド比を調整すれば、利用は可能である。以上のことから、フェロニッケル製錬を介したリサイクル経路は、ニッケル含有廃棄物のリサイクルに有望であることがわかった。

加えて、上記の特性情報をもとに、資源散逸の回避と天然資源の消費削減を進めるための課題と改善策を示した。上述のニッケルについては、1.鉄スクラップのリサイクルに伴う合金成分の散逸、2.劣質な静脈資源の廃棄物処理・リサイクルに伴う散逸(Niめっきスラッジなど)が明らかとなった。鉄スクラップのリサイクルについては、特に、低Ni含有鋼(構造用合金鋼など)のリサイクルに伴う散逸が懸念されるため、Alloy to Alloy型のリサイクルの促進の重要性を明らかにした。また、ニッケルを含有する劣質な静脈資源については、目的成分および不純物成分の含有率情報(図4)と共に、性状・化学形態等の分析を実施して、劣質な静脈資源の有効利用を進めるための方策を、a.不純物の除去などによる高品位化、b.希釈等による調合、c.許容基準の緩和の観点で整理した(雑誌発表)。その上で、現在は、関連事業者等との情報交換を進めて、これらの資源の循環利用に向けて検討を進めている。

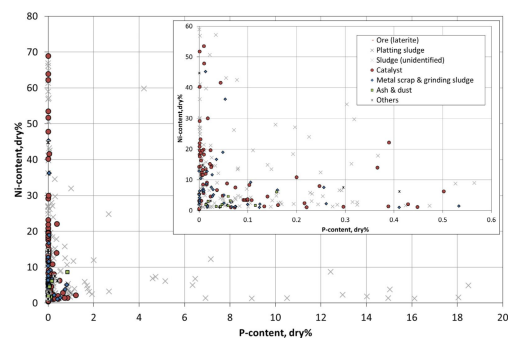


図4. 鉍石および静脈資源に含まれるNiおよびPの含有率

<引用文献>

- 1) UNEP: Environmental Risks and Challenges of Anthropogenic Metals Flows and Cycles(2013)
- 2) UNEP: Recycling Rates of Metals (2011)
- 3) UNEP: Metal Recycling (2013)
- 4) M.Lenzen et al., Nature, 486(2012)
- 5) S.Nakamura et al., Journal of Industrial Ecology, 11(2007)
- 6) K.Nakajima et al., Environ. Sci. Technol. 44(2010), 45(2011), 47(2013)
- 7) K.Nansai et al., Econ. Syst. Res. 21(2009)

## 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 13 件)

Nakajima K., Daigo I., Okada K., Koike S., Nansai K., Matsubae K., Takeda O., Miki T. (2017) Bottlenecks in material cycle of nickel, *Materiaux & Techniques* 104, - (査読有)

DOI: 10.1051/mattech/2017011

Nakajima K., Nansai K., Matsubae K., Tomita M., Takayanagi W., Nagasaka T. (2017) Global land-use change hidden behind nickel consumption. *Science of the Total Environment*, 586, 730-737 (査読有)

DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.049

佐々木翔, 松八重一代, 中島謙一, 村上進亮, 長坂徹也 (2017) 責任あるサプライチェーンの実現に向けたニッケル資源利用に関わるリスク要因の整理と解析. *日本LCA学会誌*, 13 (1), 2-11 (査読有)

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/lca/13/1/13\\_2/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/lca/13/1/13_2/_article/-char/ja/)

Tang L., Nakajima K., Murakami S., Itsubo N., Matsuda T. (2016) Estimating land transformation area caused by nickel mining considering regional variation. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21, 51-59 (査読有)

DOI: 10.1007/s11367-015-0987-3

Nakajima K., Otsuka Y., Iwatsuki Y., Nansai K., Yamano H., Matsubae K., Murakami S., Nagasaka T. (2014) Global supply chain analysis of nickel: importance and possibility of controlling the resource logistics. *Metallurgical Research and Technology*, 111, 339-346 (査読有)

DOI: 10.1051/metal/2014036

[学会発表](計 33 件)

Nakajima K., Daigo I., Nansai K., Matsubae K., Takayanagi W., Tomita M., Matsuno Y. (2016) Global distribution of material consumption: Nickel, Copper, and Iron. The 12th Biennial International Conference on Ecobalance (Ecobalance 2016), Abstracts book, 151, 05/10/2016, Kyoto Terrsa (Kyoto, Japan)

Takeda O., Miki T., Nakajima K. (2016) Elemental distribution thermodynamically evaluated in an electric furnace for ferronickel production. The 12th Biennial International Conference on Ecobalance (Ecobalance 2016), Abstracts book, 152, 05/10/2016, Kyoto

Terrsa (Kyoto, Japan)

Nakajima K., Daigo I., Nansai K., Matsubae K., Takayanagi W., Tomita M., Matsuno Y. (2016) Recent global trends in flows and apparent consumptions of nickel copper and iron. The joint 12th International Society for Industrial Ecology (ISIE) Socio-Economic Metabolism section conference and the 5th ISIE Asia Pasific conference, Abstracts, 73, 30/09/2016, Nagoya univ. (Nagoya, Japan)

Sasaki S., Matsubae K., Nakajima K., Nagasaka T. (2016) Analysis on Risk Factors behind the International Supply Chain of Nickel. The joint 12th International Society for Industrial Ecology (ISIE) Socio-Economic Metabolism section conference and the 5th ISIE Asia Pasific conference, Abstracts, 83, 30/09/2016, Nagoya univ. (Nagoya, Japan)

Nakajima K., Nansai K., Daigo I., Murakami S., Matsubae K. (2015) Linking the local consumption of nickel to global supply Chain. The 7th International Conference on Life Cycle Management, 01/09/2015, Bordeaux Convention Centre (Bordeaux, France)

Nakajima K., Nansai K., Daigo I., Murakami S., Matsubae K. (2015) Local Consumption of Nickel Accelerates Global Land Use Change. World Resources Forum Asia Pacific 2015, 02/06/2015, Aerial UTS Centre (Sydney, Australia)

Nakajima K., Daigo I., Okada K., Koike S., Nansai K., Matsubae K., Takeda O., Miki T. Bottlenecks in material cycle of nickel, 10<sup>th</sup> International Conference on Society & Materials (SAM10), 10/05//2016, CNR National Research Council of Italy (Rome, Italy)

[図書](計 1 件)

Nakajima K., Takeda O., Miki T., Matsubae K., Nagasaka T., *Recycling and Dissipation of Metals: Distribution of Elements in the Metal, Slag, and Gas Phases During Metallurgical Processing.* In: Izatt ReeD M. (Edit), *Metal Sustainability*, WILEY, 453-466

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

中島 謙一 (NAKAJIMA, Kenichi)

国立研究開発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

三木 貴博 (MIKI, Takahiro)  
国立大学法人東北大学大学院・工学研究  
科・准教授  
研究者番号：30312606

竹田 修 (TAKEDA, Osamu)  
国立大学法人東北大学大学院・工学研究  
科・准教授  
研究者番号：60447141

松八重 一代 (MATSUBAE, Kazuyo)  
国立大学法人東北大学大学院・環境科学研  
究科・教授  
研究者番号：50374997

藤森 崇 (FUJIMORI, Takashi)  
国立大学法人京都大学・地球環境学堂・助  
教  
研究者番号：20583248

湯 龍龍 (TANG, Longlong)  
国立研究開発法人農業環境技術研究所・農  
業環境インベントリーセンター・研究員  
研究者番号：30737359  
(平成 26 年度のみ。平成 27 年度に所属機  
関の変更)

林 英男 (TANG, Longlong)  
地方独立行政法人東京都立産業技術研究  
センター・事業家支援本部地域技術支援部  
城南支所・主任研究員  
研究者番号：10385536  
(平成 27 年度より参画)

富田 誠 (TOMITA, Makoto)  
学校法人東海大学・教養学部・講師  
研究者番号：50631826  
(平成 27 年度より参画)