鉱石から始まるインジウムの世界における物質フローの構築

吉村 彰大^{1,*} 醍醐 市朗² 松野 泰也²

¹東京大学工学部マテリアル工学科

²東京大学大学院工学系研究科

J. Japan Inst. Metals, Vol. 75, No. 9 (2011), pp. 493-501

© 2011 The Japan Institute of Metals

Construction of Global Scale Substance Flow of Indium from Mining

Akihiro Yoshimura^{1,*}, Ichiro Daigo² and Yasunari Matsuno²

¹Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, The University of Tokyo, Tokyo 113-8656

²Department of Materials Engineering, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, Tokyo 113-8656

Recently, recycling of rare metals has been of great interest because of the rapid growth in their demands and maldistribution of the natural resources. Substance flow analysis (SFA) is a useful tool to figure out the flow of substance in specific regions. However, few SFA has so far been conducted for rare metals. In this paper, we focused on indium and conducted SFA of indium in Japan and global scale. The most of indium is used as Indium Tin Oxide (ITO). The end use of ITO was categorized into 2 groups; Liquid Crystal Display modules and Plasma Display Panel modules, which were further assembled to final end-use products. Quantified was the flow of indium during its lifecycle; mining and smelting, manufacturing, use and waste management. In mining and smelting, the data about the indium content in ore and production of primary metal of indium during 1999-2008 were collected. In manufacturing, we estimated the content of indium of final end-use products, and estimated the input of indium for producing ITO in Japan. Then, we extrapolated the results to SFA in global scale. In-use stock and discard of indium were estimated by dynamic SFA, in which the time-series data about the input of indium in final end-use products and their lifetime distribution were used. In this study, we estimated the loss of indium in each process as recovery potential. It was found that the extraction rate of indium in mining and smelting process was 8-11%, and the loss of indium in the process was 4,826 t in 2004. The amount of loss in manufacturing process was 310 t, in-use stock of indium was 115 t, and the discarded indium in end-of-life products was 5 t in global scale in 2004. Therefore, it was concluded the biggest recovery potential of indium was in mining and smelting.

(Received April 1, 2011; Accepted May 30, 2011)

Keywords: substance flow analysis, indium, liquid crystal display, plasma display panel, recycle potential, in-use stock

1. 緒 言

近年、液晶パネルを用いるデバイスが急速に普及している。その種類は、携帯電話から大型液晶テレビまで多岐にわたる。液晶パネルには、透明でありながら導電性を有する透明電極が必要となる。その材料には酸化インジウムスズ (Indium Tin Oxide: ITO) が用いられ、近年その需要は増大を続けている。亜鉛¹⁾や高分子²⁾を用いた代替材料はまだ開発途上にあり、今後も In の需要は増大すると考えられる。従って、In の効率的な生産や回収の促進が望まれるが、国内外における In のフローや蓄積量は、詳細には把握されていないのが現状である。

社会における物質のフローと蓄積量の把握には、物質フロー分析 (Substance Flow Analysis: SFA) が有効である。In の SFA を実施した研究は、これまでに 3 件報告されてい

る。上木ら³⁾は、1990 年から 2007 年にかけての日本国内における In の生産状況、供給、および需要を分析した。そして、その結果に基づき、2007 年に日本国内で ITO 向けに投入された In のフローを分析し、LCD パネルの製造プロセスにおけるロスを分析した。しかし、ライフサイクルに基づいた In の物質フローの解析には至っていない。また中島ら⁴⁾は、2004 年に製造されたフラットパネルディスプレイ (Flat Panel Display: FPD) に着目し、これらの製品生産時のフローを明らかにしている。しかし、分析対象としたフローは日本における単年のデータであり、最終製品へと加工されたあとのフロー分析を行っていない。一方、遠藤ら⁵⁾は、採掘・製錬フローの分析結果や、製品の需要予測などを元に、In 資源の枯渇に関して予測を行った。これは、液晶を使用している製品を 4 種類に限定し、それらの用途別に ITO 膜の厚さを一律としている。また、将来予測を主な目的としていたため、現状の把握に対しては粗い推計となっている。

従って、In のリサイクル可能性を評価するには、採掘・製錬段階から、製品での使用および廃棄に至るまでの物質フ

* 東京大学学生 (Undergraduate Student, The University of Tokyo)

Fig. 1 System boundary of this study.

ローを把握することが望まれる。また、資源は世界的に取引されていることから、日本国内の評価のみならず世界全体でのフローを評価する必要がある。そこで本論文では、日本および世界における、採掘・製錬から廃棄に至るまでの In の物質フローと蓄積量を解析し、In のリサイクル可能性を評価することを目的とした。

2. 研究方法

2.1 In の物質フロー

本論文のシステム境界(解析の対象とした工程)を Fig. 1 に示す。

Fig. 1 に示すように、In は、採掘、製錬され一次地金へと加工された後、各種用途に用いられる。本論文では、In の用途には、ITO 膜とその他の製品に分け、ITO 膜以外の用途に関しては、需要量は把握するものの、その後のフローは考慮しなかった。ITO 膜向けに投入された In は、スパッタリングプロセスを経て ITO 膜へと加工される。このプロセスにおいて発生するスクラップは一部が回収され、二次地金としてリサイクルされる。生産された ITO 膜は、液晶素子、プラズマディスプレイモジュール(Plasma Display Panel Module: PDP モジュール)として加工され、最終製品に使用される。最終製品は、使用段階では社会中に蓄積され、寿命を迎えると廃棄される。

各工程での In フローの解析方法について、次節より詳述する。

2.2 In の採掘・製錬工程におけるフロー推計

In は Zn の副産物として産出されるため、Zn 鉱石の採掘量、および鉱石の In 含有濃度を考えることで、鉱石中の In 重量を推計した。

Zn 鉱石の採掘量は、そのものを示す統計値が得られなかった。そこで、鉱石の Zn 含有濃度の平均値⁶⁾、金属 Zn の総生産量⁶⁾、Zn の一次地金生産時の歩留まり⁷⁾から Zn 鉱石の総生産量を推計した。次に、Zn 鉱石中の In 当量を推計するため、世界での Zn 鉱石の平均 In 含有濃度を求めた。In 含有濃度は鉱山により異なるため、世界中の 27 か所の鉱山での埋蔵量、および In 含有濃度⁸⁾を加重平均した。

In の一次地金の生産量は、統計より 1999 年以降のデータが得られた。これらより、採掘・製錬段階のフローについて、採掘量と一次地金生産量を推計した。そのため、採掘時の尾鉱(鉱石から有用な物質を抽出した後の鉱石)への損失量

あるいは製錬時の残渣への損失量が区別できなかった。

2.3 In の需要、消費段階におけるフロー推計

2.3.1 In の需要先

In の用途には、ITO 透明電極、化合物半導体、蛍光体、低融点合金などが挙げられる。世界での用途別需要量に関するデータは得られなかったが、日本では透明電極の材料である ITO 向け需要量が最も多くを占め、2003 年以降は 85% 以上の割合を占めている⁹⁾。ITO 以外の用途は、ITO よりも多岐にわたる最終製品に用いられるため、使用後の物質フローの推計が困難である。それゆえ、本論文においては、ITO 以外の用途に関しては、需要量は把握するものの、その後のフローは考慮しなかった。

2.3.2 世界における最終製品別 In 含有量の推計

世界の ITO 向け In 需要量は、世界における In 地金生産量に、日本における ITO 向け需要割合を乗じて 1999 年から 2008 年まで推計した。

製品中の素材(物質)含有量を推計する手法としては、トップダウン手法とボトムアップ手法の 2 つが知られている¹⁰⁾。トップダウン手法は、対象とする物質の各製品への投入量を多年度にわたり把握することで、各年次における社会中の蓄積量、および廃棄量を推計する手法である。一方、ボトムアップ手法は、対象物質を含有する製品の社会中の存在数およびその製品の物質含有原単位を元に、社会中の蓄積量を推計する手法である。

ITO 電極は、消費量に対し製造プロセスにおける歩留りが小さいことが知られている⁴⁾。そのため、ITO 向け In 需要量から、トップダウン手法により製品中の In 含有量を推計することはできない。そこで本論文では、ボトムアップ手法を用いて最終製品中の In 含有量を推計した。

ITO を透明電極として用いる製品は、液晶ディスプレイ(Liquid Crystal Display: LCD)用モジュール(液晶素子)、およびプラズマディスプレイパネル(Plasma Display Panel: PDP)モジュールであり⁹⁾、ともに中間製品である。日本に関しては、これら中間製品の生産数量(個数)を入手できた¹¹⁾。一方、世界に関しては、LCD モジュールおよび PDP モジュールの生産数量、生産額ともに入手できなかった。そこで、詳細なデータのある日本での最終製品別の In 含有量を推計し、In 含有量と最終製品生産額が比例すると仮定し、同じ製品の日本と世界の生産額により、世界の最終製品別の In 含有量を推計した。ここで、ITO 電極が使われる最終製品で、世界と日本で生産額を入手できた製品を Table 1

Table 1 Specified end-use products of ITO in the world and Japan.

World	Japan
Digital TV	LCD TV, PDP TV
Laptop PC	Laptop PC
LCD monitor	PC display
Digital camcorder	Digital camcorder
Digital still camera	Digital still camera
Mobile phone	Mobile phone, PHS
Electric equipment for cars	Navigation system

に示す¹²⁾．日本では 9 種の最終製品，世界では 7 種の最終製品となった．他の投入先としては，医療機器や分析機器などが考えられるが，これらの最終製品に投入された LCD モジュール，および PDP モジュールについては，モジュール生産以降の物質フローは考慮しなかった．

世界での最終製品別生産額は，2003 年，2004 年における，日本，北米，欧州，その他の地域の区分での生産額，および 2005 年から 2008 年にかけての生産額の 2005 年時点での予測値が得られた¹²⁾．そのため，最新の統計値がある 2004 年の In の物質フローを推計した．また，2002 年以前については，2003 年における地金生産量と各最終製品中の In 含有量の比率を，1999 年から 2002 年までに適用し，各最終製品中の In 量を推計した．

なお，中間製品 (LCD モジュールおよび PDP モジュール) のうちで，最終製品が特定されなかった分 (前述した医療機器や分析機器など) については，日本における対象製品への投入割合を用いて推計した．また，日本における投入割合は，産業連関表から得た LCD モジュールの各最終製品への投入額と，LCD モジュールの総生産額を用いて算出した．

2.3.3 日本における最終製品別 In 含有量の推計

ボトムアップ手法を用いるにあたり，2.3.2 で示した対象製品に用いられる液晶の表示部面積，電極膜厚，ITO 単位体積当たりの In 含有量が必要である．ITO 単位体積当たりの In の含有量については，文献 13) より ITO の密度を 7.10 g/cm³，In₂O₃ の含有率を 90 mass% として計算した．

電極膜厚は LCD と PDP により異なる．また LCD の中でもアクティブ型 (active-matrix liquid crystal display (LCD)) とパッシブ型 (passive-matrix LCD) により異なる¹⁴⁾ ため，それぞれ区分した．さらに，それぞれの分類において表示部面積の異なる製品があるため，生産数量を表示部面積の別に分類した．Table 2 に本論文で区分した 6 分類を示す．

機械統計¹¹⁾ における LCD 生産量は，1997 年以降，アクティブ型とパッシブ型それぞれの分類の中に，細分類が整備されている．アクティブ型液晶素子は，1997 年から以降は 7.7 型未満と 7.7 型以上に，2007 年以降はさらに 3.0 型未満，3.0 型以上 7.7 型未満，7.7 型以上に分類されている．本論文では，3.0 型未満を小型液晶素子 (Small LCD)，3.0 型以上 7.7 型未満を中型液晶素子 (Medium LCD)，7.7 型以上を大型液晶素子 (Large LCD) と呼ぶこととした．小型液晶素子，中型液晶素子の分類がされていない 2006 年以前のデー

Table 2 Types of modules using ITO, specified end-use products and film thickness corresponding to the types.

Type of module			End-use product	Film thickness
Tech.	Matrix	Size		
LCD	Active matrix	Large	TV, PC display, Laptop PC	300 nm ²¹⁾
		Medium	Mobile phone, PHS, Digital still camera, Digital camcorder, Navigation system	100–120 nm ¹⁴⁾
		Small	Mobile phone, PHS, Digital still camera, Digital camcorder, Projector	
	Passive matrix	Medium	Mobile phone, PHS, Digital still camera, Digital camcorder, Navigation system	400–500 nm ¹⁴⁾
		Small	Mobile phone, PHS, Digital still camera, Digital camcorder, Projector	
	PDP		TV	300 nm ²¹⁾

タは，2007 年における中型，小型の生産数比率を，2006 年以前も適用するものとした．パッシブ型液晶素子は，1997 年から液晶モジュールと液晶パネルに分類されている．パッシブ型液晶素子は，その構造上大型には向いていない¹⁵⁾ ため，アクティブ型液晶素子の中型および小型液晶素子の表示部面積に相当するとした．そのため，当該年のアクティブ型液晶素子の中型，小型の生産数比率を適用した．なお，液晶モジュールとは，液晶パネルに回路基板などを追加したものであり，表示部面積は液晶パネルと同様と考えた．

アクティブ型大型液晶素子の表示部面積は 7.7 型以上ではあるものの，実際の表示部面積に関する情報はない．そこで，2.3.2 で対象とした最終製品のうち，大型液晶素子を用いる製品を Table 2 のように同定し，別途^{16,17)} から製品の表示部面積を得た．なお，各最終製品の生産数は機械統計¹¹⁾ より入手した．

中型および小型液晶素子についても，Table 2 のようにそれぞれを用いる製品を同定した．中型液晶素子の平均表示部面積は 5 型，小型液晶素子の平均表示部面積は 2.5 型とした．各最終製品の年次生産数は，アクティブ型とパッシブ型の区別なく機械統計¹¹⁾ より入手した．ここで，携帯電話に用いられている液晶素子のアクティブ型/パッシブ型の比率¹⁸⁾ が得られたことから，他の製品についても同じ比率とし，アクティブ型およびパッシブ型を用いている最終製品の生産台数を推計した．ただし，カーナビゲーションシステム (以降，カーナビ) は中型液晶素子のみを用い¹⁹⁾，プロジェクターは小型液晶素子のみを用いている²⁰⁾ とした．

PDP モジュールについては，2004 年以降で生産数量の統計が入手できるが，表示部面積による分類は行われていない．PDP モジュールを用いる最終製品は，表示部面積別の構成比率を入手できたテレビのみを対象製品とした．そこで，アクティブ型大型液晶素子と同様に，別途文献 21) から製品の表示部面積を得た．

最後に，需要先製品の特定されなかった LCD モジュールおよび PDP モジュールに対して，2.3.2 で記したように，生産額を基準として推計した．一方，日本では，LCD モジュールおよび PDP モジュールについて，その表示面積区分

Table 3 Parameters of lifetime distribution function and the average lifetime of end use products.

End use	Parameters in Weibull distribution function		Average lifespan (year)	Reference
	Shape parameter	Scale parameter		
LCD TV/PDP TV	3.1	13	12	23)
PC monitor	4.8	8.4	6.7	23)
Laptop PC	2.2	7.4	7.4	23)
Mobile phone/PHS	3.1	4.8	4.3	23)
Digital camcorder	3.1	7.5	6.7	24)
Digital still camera	3.1	4.0	3.6	24)
Navigation system	4.0	11	9.9	23)

別の生産個数があるため、生産個数を基準として推計することでもできた。このようにして得られた製品中含含有量と、ITO 向けに投入された In 量から、生産プロセスにおける歩留まりを推計することで、既存研究³⁾の結果と比較した。

2.4 製品の寿命分布設定

使用中の製品に含まれる物質ストック量および使用済み製品に含まれて排出される In 量をポピュレーションバランスモデル (Population balance Model: PBM) により分析するために、各最終製品の使用年数分布を設定した。各製品の使用年数分布は、日本以外の地域のデータが入手困難であった²²⁾ため、Table 3 に示した日本のデータを用いた。なお、分布形状はワイブル分布である。

液晶テレビ・プラズマテレビは CRT テレビの使用年数分布を、液晶ディスプレイは CRT モニタの使用年数分布を用いた。また、カーナビは自動車と不可分の製品であるため、自動車の使用年数分布を用いた。ビデオカメラ、デジタルカメラについては、平均使用年数は得られたが、分布を決定する形状母数が得られなかった。そこでこれらの製品については、他の製品群の中で使用傾向が類似していると考えられる携帯電話の値を転用した。なお、プロジェクターについては、平均使用年数に関するデータが入手できなかったこと、および他の製品に比べて生産数、出荷数ならびに In 使用量が十分に少ないことから、PBM による分析対象から除外した。

2.5 世界の In の物質フローの構築

2.2 で得られた採掘・製錬段階でのフローと、2.3 で得られた製品製造段階でのフロー、および使用、廃棄段階での物質ストック量および廃棄フローを元に、世界の In の物質フローを構築した。なお、現状の廃棄状況から、使用済み製品に含まれて排出される In は、すべて廃棄されるものとした。最後に、各段階における拡散・散逸としてのフロー量から、In のリサイクル可能量を評価した。

Fig. 2 The amounts of indium contained in annual production of Zn ore and annual production of primary In metal.

3. 結 果

3.1 採掘・製錬時のフロー分析

文献値⁶⁾を元に In の Zn 鉱石中の平均含有濃度を求めたところ、39 ppm と推計された。同様にして Zn の平均含有濃度を求めたところ、8.7% と推計された。また、Zn の一次地金生産時の歩留まりが 80%⁷⁾と得られたので、以上の数値に経年変化がないと仮定して、各年における鉱石中の In 当量、In 一次地金生産量を推計した。その結果を Fig. 2 に示す。

これらの結果から、1999 年以降、鉱石からの採掘・製錬時における、拡散・散逸による損失分が 9 割程度を占めていることが分かった。これら損失分は、採掘時の尾鉱、製錬時のスラッジに含まれていると考えられる。

同様の歩留まりを他の金属に関して推計を行ったところ、銅²⁵⁾が 86%、銀²⁶⁾が 73%、クロム²⁷⁾が 73%、Zn⁷⁾が 82%、ニッケル²⁸⁾が 87% となった。これらの金属に比べて、In の歩留まりは著しく低いことが明らかになった。

要因として、これらの金属に比べて In の抽出の難しさが挙げられる。Zn 鉱石の残渣中に含まれる In を、酸などの液体を用いて抽出した上で、最終的に電解製錬を行って純度を上げる²⁹⁾。一方で、現状の需要量に対して一次地金、および二次地金で十分対応できているために、鉱石からの抽出効率を向上させる必要がないと考えられる。

3.2 需要段階のフロー分析

3.2.1 日本国内における分析結果

(1) 最終製品中の In 含有量

本論文にて評価対象とした 9 種の最終製品中の In 含有量を推計した結果を Fig. 3 に示す。生産量が多く、また面積の大きい液晶テレビが大半を占めると推計された。また、生産数は少ないものの、他の製品よりも平均表示部面積が大きいプラズマテレビが占める割合も大きかった。一方で、PC モニタは、平均表示部面積は大きいものの、占める割合は小さかった。これは、日本における生産量が少ないことに起因すると考えられる。中型および小型液晶素子を用いた最終製品については、全体に占める割合が小さいことが分かった。

Fig. 3 The amount of indium contained in annual production of the specified end-use products in the form of ITO in Japan.

Fig. 4 The amount of indium contained in the all ITO products in Japan extrapolated by two different methods; based on number of products and production value.

(2) 素子(中間製品)中の In 含有量

2004 年から 2008 年にかけて液晶素子および PDP モジュールに関して、生産個数および生産額を基準にして In 含有量を推計した結果を Fig. 4 に示す。

生産個数を基準にして推計を行った場合、最終製品へ投入された大型液晶素子のうち、本論文にて把握できた割合は約 5 割となった。同様に、中小型液晶素子、PDP モジュールは、それぞれ 2 割、3 割であった。一方、生産額を基準にして全液晶素子の対象製品への投入割合を推計した結果は、約 4 割となった。

2 つの手法による結果を比較すると、生産額を基準に推計したよりも生産個数を基準にした推計の方が、In の含有量

が大きく推計されたものの、すべての年で約 110% と、大きな差がないことが確認された。物量に関しては、生産個数を基準にし、大型、中型、小型の LCD モジュール、PDP モジュールの別に推計した方が妥当な推計手法であると考えられたが、生産額を基準にした推計によっても、大きな差はないと言える。これから、世界においては 7 種の最終製品について表示部面積別のデータがないため、日本の生産額を基にした拡大比率を用いて推計したが、日本と世界で生産する最終製品構成の違いがない前提においては、妥当な推計である。

さらに、素子中の In 含有量を地金生産量で除し、生産プロセスにおける歩留まりを推計した結果、2% 前後となった。既存研究⁴⁾では、ITO ターゲットの消費量から各過程で

Fig. 5 The amount of indium contained in annual production of the specified end-uses in the world.

の歩留りをヒアリングにより得て、歩留りを3%と推計した。既存研究は、いわゆるトップダウン手法が用いられていたのに対し、本論文は各最終製品の生産台数とIn使用原単位を元に、Inの使用量を推計するボトムアップ手法を用いた。異なる手法によって、近い結果が得られたことを確認した。

3.2.2 世界のIn需要量

日本の9種の最終製品別In含有量をもとに、世界のIn需要量を推計した結果をFig. 5に示す。1999年以降、Inの需要量は増加を続け、2004年には3倍以上になっていた。特に、携帯電話が全体に占める割合が大きく、In需要量の増加に大きな影響を与えていることが分かった。また、2002年以降は、デジタルテレビ、ノートPC、PCモニタの表示部の大きな製品による寄与も大きいことが分かった。日本と同様に、特定した7種の最終製品以外にITOとして使用されたIn量を推計した結果、2004年で合計82tと推計された。

3.3 使用・廃棄段階のフロー分析

7種の製品について、世界におけるInの物質ストック量、および使用済み製品としての廃棄量を推計した。1999年以降の需要量しか推計に用いていないため、物質ストック量、廃棄量ともに携帯電話の平均使用年数を過ぎた2003年と2004年の値だけをFig. 6, Fig. 7に示す。1998年以前の需要量による影響は反映されていないものの、年を経るに伴って増加していることは分かった。製品の内訳をみると、物質ストック量では、携帯電話・PHSが最も大きな割合を占め、廃棄量ではその使用年数の短さもあり8割程度を占めることが分かった。物質ストック量が携帯電話・PHSに次いで多かったPCモニタは、表示部面積が比較的大きいため全体に占める割合が大きいと考えられた。また、物質ストック量では比較的大きな割合を占めるデジタルテレビは、廃棄量では著しく小さく推計された。これは、他の製品と比べて寿命が長いことに起因すると考えられる。

3.4 Inの物質フローのまとめ

直近のデータを用いて解析できた、2008年の日本にお

Fig. 6 In-use stock of indium in the specified product end-uses in the world.

Fig. 7 The amount of indium contained in discarded end-of-life products.

るInの物質フローをFig. 8に示す。日本においては、一次地金からはITO向けに234tのInが投入されている。二次地金からの投入量517tを合わせ、合計751tがITOに投入

Fig. 8 Substance flow of indium in Japan in 2008.

Fig. 9 Substance flow of indium of the world in 2004.

されていると考えられる。この内、実際に最終製品中に含有される In 量は 7.2 t/年であり、残りの 732 t/年がプロセスロスになると推計された。二次地金の生産量が 517 t/年であることから、回収過程でのロスが 215 t/年であるという結果が得られた。中島らの既存研究³⁾では、2004 年における二次地金の製錬ロスが約 5 割とされており、近い結果を得られたことを確認した。

Fig. 9 には、2004 年の世界における In の物質フローを示す。2004 年における一次地金生産量は 518 t/年、また二次地金生産量は 402 t/年であった。鉱石中に含まれる In 当量が 5,344 t/年であることから、採掘・製錬段階における拡散・散逸量は 4,826 t/年と推計された。これらの地金の内、87%に当たる 800 t/年が ITO 膜の生産プロセスに投入され、それ以外の 120 t/年が他の用途に投入されると推計された。

ITO 向けに投入された In の内、実際に最終製品中に含有される In 量は 82 t/年であり、残りの 710 t/年がプロセスロスになると推計された。二次地金の生産量が 402 t/年であることから、回収過程でのロスは 310 t/年であるという結果が得られた。

日本におけるプロセス歩留まりは、3.2.2 で述べたとおり 1.5%から 2.5%であった。一方世界での分析結果は 10%となり、日本における推計値よりも大きくなった。この原因については、以下のようなものが考えられる。

まず、日本の結果を世界に拡大するために、単純に最終製品の生産額の比率を用いた。すなわち、最終製品中で液晶素子・PDP モジュールの表示部面積については考慮していない。そのため、この段階で誤差が発生している可能性がある。

また、2.3.2 に示したとおり、本論文で詳しく分析を行っていない機器については、金額基準で拡大し、推計した。この比率は、日本における 2005 年のデータを元としているため、実際に各地域における比率を用いていない。たとえば、分析の対象外とした中で多くを占める医療機器については、世界における日本のシェアが 10%程度であるのに対し、その他の地域は 14%程度となっている³⁰⁾。一方、分析対象の最終製品のシェアについては、それぞれ 14%、52%となるため、医療機器については 2.5 倍程度の誤差が発生していると考えられる。他の分析対象外の最終製品についても同様の誤差が考えられるため、推計値が過大になっていると考えられる。

以上 2 つの原因により、本論文における世界の物質フローにおける製品中の In 量は、過大に推計されている可能性がある。

1 年に生産される最終製品に含有される In 量 82 t/年の内、本論文で最終製品を特定した 7 種の製品に含有される In 量は 35 t/年と推計された。7 種の最終製品について、動的分析した結果、2004 年には、物質ストック量は 120 t、廃棄量は 5.2 t/年と推計された。

3.5 In のリサイクル可能量

2004 年の In の物質フローの中で、環境中への In の拡散・散逸量は、採掘・製錬時の散逸、リサイクル時のプロセスロス、使用済み製品の廃棄の 3 つがある。これらの散逸量を比較すると、採掘・製錬時が最も大きく 4,800 t/年、次いでリサイクル時のロスが 310 t/年、使用済み製品からの廃棄量はもっとも小さく 5 t/年と推計された。

リサイクルの促進が可能な量は、現在回収・利用されずに廃棄されている量である。本論文で推計した 3 つの散逸量は、それぞれ 1 桁以上異なった。採掘・製錬時のリサイクル可能量が最も大きく、地金生産量の 10 倍程度あることが分かった。よって、今後の需要増大などに対して安定的な供給を行うためには、採掘・製錬時の歩留まり向上、あるいは散逸フローからのリサイクルが有効であることが分かった。また、使用済み製品に含まれる In を全量リサイクルしたところで、地金生産量のうち 1% 程度にしかならないことが分かった。これは、製品に使用されるまでの工程における歩留まりが小さいことが主要な要因と考えられる。もう 1 つの要因として、数年前以前に生産された製品が主に廃棄されるため、当期の需要量と比較して、数年前の需要量が小さかったことが考えられる。そこで、推計した 2004 年以降も需要量が増加していることから、2008 年における推計も行った。ただ、世界における最終製品の生産額が 2005 年時点の見込み値であったため、スパッタリングプロセス以降のフローについて信頼性の低い推計となった。その結果、2008 年における社会中の物質ストック量は 300 t 程度、廃棄量は 20 t/年程度と推計された。2008 年に使用済み製品に含まれる In を全量リサイクルすると、2008 年の地金生産量のうち 4% 程度が賄えると推計された。一方、採掘・製錬時の拡散・散逸量は 5720 t/年、プロセスロスが 200 t/年程度となり、2004 年の結果と同様の傾向が得られた。需要が増加した 2008 年においても、採掘・製錬時の散逸フローからの回収が望まれることが分かった。

4. 結 言

本論文では、世界における In の採掘・製錬段階から In を使用した製品の廃棄に至るまでの物質フローを推計した。世界においては、物質フローを把握するための物量に関する統計は整っていなかったため、日本のデータを基にして世界のフロー量を推計する手法を構築した。

物質フロー分析の結果から、In が拡散あるいは散逸するフローとして、採掘・製錬時の散逸、リサイクル時のプロセスロス、使用済み製品の廃棄の 3 つのフロー量が把握された。これら散逸量は、今後回収促進が可能なりサイクル可能量と考えられる。約 500 t/年の地金生産量に対し、採掘・製錬時の散逸量は約 10 倍あることが分かった。一方、使用済み製品に含まれる In を全量リサイクルしても、地金生産量のうち 2004 年では 1% 程度、2008 年の参考値でも 4% 程度しか賄えず、リサイクル可能量としては小さいことが分かった。使用済み製品からのリサイクルよりも、採掘・製錬時の

散逸フローからの回収が重要であるとの示唆を得た。

本論文を進めるに当たり、東京大学 岡部徹教授、野瀬勝弘特任助教、大阪産業大学 鈴木晶雄教授、NTT 環境エネルギー研究所 高橋和枝博士に貴重なご助言を賜りましたことをここに明記し、厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) Homepage of Electron Devices Lab, Osaka Sangyo Univ., 2007 nendosei no page, Innovation Japan 2007, http://ms-lab.eic.osaka-sandai.ac.jp/electron/2007/innovation_japan.pdf, 2011/1/13.
- 2) Homepage of Shin-Etsu Polymer Co., Ltd., Investor Relations, Oshirase, <http://www.shinpoly.co.jp/ir/whatsnew/2009/PDF/20090810-SEPLEGYDA.pdf>, 2010/11/24.
- 3) R. Kamiki and A. Hosoi: *Kikinzoku Rare Metal no Recycle Gijutu Syusei*, (NTS Inc., 2007) pp. 397-420.
- 4) K. Nakajima, K. Yokoyama, K. Nakano and T. Nagasaka: *Mater. Trans.* **48** (2007) 2365-2369.
- 5) K. Endo, M. Yamashita, Y. Toba, H. Nakajo, H. Shiba, S. Okumura, Y. Miyahara and K. Takeda: *Journal of MMIJ* **123** (2007) 123-129.
- 6) Homepage of Japan Oil, Gas and Metals National Corporation: Supply Side Analysis 20103) -Lead/Zinc-, JOGMEC Virtual Mineral Resource Information Center, http://www.jogmec.go.jp/mric_web/kogyojoho/2010-11/MRv40n4-10.pdf, 2011/1/10.
- 7) T. E. Graedel, D. van Beers, M. Bertram, K. Fuse, R. B. Gordon, A. Gritsinin, E. M. Harper, A. Kapur, R. J. Klee, R. Lifset, L. Memon and S. Spataro: *J. Ind. Ecol.* **9** (2005) 67-90.
- 8) Homepage of National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Institute for Geo-Resources and Environment, Green Report 2010, <http://unit.aist.go.jp/georesenv/result/green-report/report10/p71.pdf>, 2011/3/10.
- 9) Homepage of Japan Oil, Gas and Metals National Corporation: Kobutsu shigen material flow, Heisei 21nendo chosa report, JOGMEC Virtual Mineral Resource Information Center, http://www.jogmec.go.jp/mric_web/jouhou/material/2009/In.pdf, 2010/10/13.
- 10) T. Hirado, I. Daigo, Y. Matsuno and Y. Adachi: *Tetsu to Hagane* **95** (2009) 96-101.
- 11) Ministry of Economy, and Industry, Economic and Industrial Policy Bureau, Research and Statistics Department: *Yearbook of Machinery Statistics*, (1987-2008).
- 12) Japan Electronics and Information Technology Industries Association, Handotai chosa toukei iinkai, Chuchoki shijo chosa syouiinkai: *Sekai no shuyo denshikiki kara mita handoutai shijo no chuchokitembo 2005*, (Japan Electronics and Information Technology Industries Association, 2007), pp. 32-33, pp. 36-39, pp. 46-47, pp. 50-51, pp. 84-85.
- 13) Homepage of Mitsubishi Material Electronic Chemicals Co., Ltd.: Dodensei zairyo, http://www.mmc-ec.co.jp/business/fine/e01_conductive.html#ito, 2011/1/21.
- 14) CMC Publishing Co., Ltd.: *2001 nen Ekisho Display kouseizairyo*, (2001) p. 108.
- 15) Homepage of Science Graphics Co., Ltd.: LCD no kozo, kisogenri, 2011/3/10.
- 16) Homepage of Ministry of Economy, Trade and Industry Commerce and Information Policy Bureau, Information and Communication Electronics Division: Television juzouki no genjo ni tsuite, <http://www.meti.go.jp/committee/materials2/downloadfiles/g81111a05j.pdf>, 2010/12/10.
- 17) Homepage of Japan Electronics and Information Technology Industries Association, Information Terminals and Technologies Committee, Display Senmon Committee: *Ekisho monitor oyobi Note PC you Ekisho Display no shijokibo mitoshi ni tsuite*, http://home.jeita.or.jp/is/statistics/intelterm/2009/100825-1_display.pdf, 2010/12/10.
- 18) Y. Kim: *Keiei Shirin* **41** (2004) 107-116.
- 19) Homepage of Impress Watch Corporation, Car Watch,

- http://car.watch.impress.co.jp/docs/news/20100511_366353.html, 2011/3/10.
- 20) Homepage of Quartz Crystal Industry Association of Japan: Ekisho Projector, <http://www.qiaj.jp/pages/frame20/docs/handbook-projector-01.pdf>, 2011/3/10.
- 21) Yano Research Institute Ltd.: *Raremetal 2020 nen tenbo, Jidosha sangyo, Shoene sangyo, Electronics sangyo, Bunyabetsu juyou jittai to choki juyou yosoku*, (Yano Research Institute Ltd., 2010) p. 260.
- 22) Homepage of National Institute for Environmental Studies: Lifespan Database for Vehicles, Equipment, and Structures, <http://www.nies.go.jp/lifespan/index.html>, 2011/3/10.
- 23) M. Oguchi, T. Kameya, T. Tasaki, N. Tamai and N. Tanigawa: Waste Management Research **17**(2006) 50–60.
- 24) Cabinet Office, Economic and Society Research Institute, Department of Business Statistics: *Kakeishohi no doko, Shohi doko chousa nempou 2008*, (Toko Co., Ltd. 2008).
- 25) T. E. Graedel, D. Vanbeers, M. Bertram, K. Fuse, R. B. Gordon, A. Gritsinin, A. Kapur, R. J. Klee, R. J. Lifset, L. Memon, H. Rechberger, S. Spataro and D. Vexler: Environ. Sci. Technol. **38** (2004) 1242–1252.
- 26) J. Johnson, J. Jirikowic, Marlenbertram, D. Vanbeers, R. B. Gordon, K. Henderson, R. J. Klee, T. Lanzano, R. Lifset, L. Oetjen and T. E. Graedel: Environ. Sci. Technol. **39**(2005) 4655–4665.
- 27) J. Johnson, L. Schewel and T. E. Graedel: Environ. Sci. Technol. **40**(2006) 7060–7069.
- 28) B. K. Reck, D. B. Muller, K. Rostkowski and T. E. Graedel: Environ. Sci. Technol. **42**(2008) 3394–3400.
- 29) T. H. Okabe and K. Nose: OHM **97**(2010) 38–47.
- 30) Homepage of JMA Research Institute Inc.: Shiryous, Iryou kiki sangyou no genjou, Iryou kiki bunya heno sannyu, buzai kyokyu no kasseika ni muketa kenkyukai (dai 2 kai), haifu shiryous, <http://www.meti.go.jp/committee/materials2/downloadfiles/g90119c02j.pdf>, 2011/3/10.