

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*1

中島 謙^{1,*2} 横山 一代¹ 中野加都子² 長坂 徹也¹

¹東北大学大学院環境科学研究科

²関西大学先端科学技術推進機構

J. Japan Inst. Metals, Vol. 72, No. 2 (2008), pp. 99-104

© 2008 The Japan Institute of Metals

Substance Flow Analysis of Indium for Flat Panel Displays in Japan

Kenichi Nakajima^{1,*2}, Kazuyo Yokoyama¹, Kazuko Nakano² and Tetsuya Nagasaka¹

¹Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University, Sendai 980-8579

²Organization for Research and Development of Innovative Science and Technology (ORDIST), Kansai University, Suita 564-8680

Substance flow analysis (SFA) of indium has been conducted in this study. The purpose of this study is to identify the relevant issues for the development of an efficient indium recycling system by performing SFA of indium supplied for ITO processing as transparent electrodes, which accounts for 86.9% of the total indium demand. In this study, as part of the development of substance and material flow data, (1) data on the flow of indium was collected and reviewed, (2) the amount of dissipated indium associated with the production of flat-panel displays (FPDs) were estimated and (3) its environmental impact was also assessed.

The major conclusions are (a) 470 t-In is used in ITO for transparent electrodes, out of which 220 t-In is dissipated or potentially dissipated in Japan, and (b) 220 t-In of dissipated indium is equivalent to 11.4 TJ of energy consumption, 0.5×10^3 t of CO₂ emissions, and 1.0×10^6 t of Total Materials Requirement (TMR).

(Received September 11, 2007; Accepted November 19, 2007)

Keywords: material flow analysis, substance flow analysis, indium, indium tin oxide, recycle

1. 緒 言

日本は、レアメタル資源の大部分を海外に依存している。高品位・高付加価値製品を製造している日本の『もの作り産業』において、このレアメタル資源は必須の原料である。日本の産業を発展させていくためにも、レアメタル資源の安定供給は最重要課題である。日本では、これらの背景を受けて、レアメタル7鉱種(Ni, Cr, W, Co, Mo, Mn, V)の国家備蓄¹⁾が実施されている。また、現在、将来の国家備蓄の検討対象として、インジウム(In)を含めた7鉱種(Pt, Nb, Sr, RE(希土類), Ta, Ga, In)が注視7鉱種として取り上げられている。

しかしながら、物質循環や資源戦略を考える上で必要不可欠なレアメタルの需給およびマテリアルフローは、国家統計では、経済産業省の鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計年報²⁾に僅かに記されているのみで、十分な情報は得られない。これらを補完するため(株)石油天然ガス・金属鉱物機構(Japan Oil, Gas and Metals National Corporation: JOGMEC)、(株)特殊金属備蓄協会(Rare Metal Association: RMA)および大学・研

究機関において積極的な物質フロー分析(Material flow analysis: MFA/Substance flow analysis: SFA)³⁻⁵⁾が実施されている。MFA/SFAは、物質フローの把握と管理のための手法として、国際的に注目を浴びている手法である。世界的には、BrunnerはMFAの歴史と展望を解説⁶⁾している。また、Gradelらは新たなMFA手法^{7,8)}を提案しており、Wuppertal研究所では、材料の使用に伴う資源フローの推計⁹⁾を実施している。本研究では、物質・材料フローデータ整備の一環として、インジウムを取り上げ、マテリアルフローデータの整備および解析を実施する。

インジウムは、地殻濃度0.049 ppmの金属であり、亜鉛・鉛鉱石、錫鉱石などの副産物として生産されている。このインジウムの生産プロセスに関しては、Alfantazi and Moskalyk¹⁰⁾がまとめている。インジウムは、主に透明電極用ITO(Indium Tin Oxide)膜に利用されている機能材料であり、近年、需要が急速に増加している。インジウムの地殻における元素存在度順位は66位であり、超希少元素に分類¹¹⁾されている。効率的な資源利用が求められる元素の1つである。インジウムを産出する世界最大級の鉱山は、日本の豊羽鉱山(約70 t/year)であったが、2006年3月末をもって採掘を停止した。これにより、国内鉱からのインジウム生産はなくなり、全量を輸入亜鉛鉱の副産物からの生産に切り替わる事となった。なお、USGS(U.S. Geological Survey)

*1 Mater. Trans. 48(2007) 2365-2369 に掲載

*2 現在: (株)国立環境研究所(Present address: National Institute for Environmental Studies)

によると、インジウムの可採埋蔵量は 2,800 t-In であり、確認埋蔵量は 6,000 t-In であった¹²⁾。

これらの問題を受けて、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構 (New Energy and Industrial Technology Development Organization: NEDO) は、インジウムの資源需給量の将来予測を実施¹³⁾している。報告書によると、シナリオ分析の結果、可採埋蔵量(2,800 t-In)ベースでは 2011 年~2013 年に、確認埋蔵量(6,000 t-In)ベースでは、2019 年にインジウム資源の枯渇の恐れがある事が示されている。

本研究では、インジウム需要の 86.9% を占める透明電極用 ITO に利用されるインジウムの SFA の実施により、インジウムの効率的な物質循環システムの構築のための課題抽出を目的とする。本研究では、物質・材料フローデータ整備の一環として、(1)インジウムフローデータの作成、および、(2) FPD (Flat panel display) 製造に関わるインジウム拡散量の推計、および、(3)その環境影響の評価を実施した。

2. インジウム需給に関する既存データの検証

ここでは、(a)インジウムの需給データ、および、(b)既存の材料フローデータを検証することにより、それらの課題抽出を行う。日本におけるインジウムの需給量については工業レアメタル¹⁴⁾から、インジウムの国別輸入量については JOGMEC の報告書¹⁵⁾から得られる。また、日本におけるインジウムの材料フローに関しては、同じく JOGMEC の報告書¹⁶⁾から得られる。

Fig. 1 に、日本におけるインジウムの部門別需要量を示した。2004 年において、国内におけるインジウム需要の 86.9% が、透明電極用 ITO 向けであった。ITO 膜は、LCD (Liquid crystal display)-TV および PDP (Plasma display panel)-TV などの FPD 製品に利用されている。

Fig. 2 に、日本のインジウム需給の変移と輸入インジウム資源率 (= インジウム輸入量/インジウム供給量) の変移を示

した。Fig. 2 において、輸入鉱石(亜鉛鉱石、鉛鉱石、錫鉱石)から生産されるインジウムは、国内インジウム生産量に計上されている。近年、上記の FPD 製品の普及により、日本におけるインジウム需給量の急速な増加が見られる。これに伴い、中国からのインジウム輸入量が増加しており、2004 年には輸入インジウム資源の約 7 割が中国からの輸入であった。また、2006 年の豊羽鉱山の閉山に伴い、国内生産量の大幅減少が予想される。このことより、リサイクルの促進などによる国内インジウム資源の確保が課題であると考えられる。なお、Fig. 2 において、需要と供給の差が増加している。これは、ターゲット材メーカーにおける在庫の増加を示しているものと思われる。

Fig. 3 に JOGMEC の報告書¹⁶⁾を参考に作成したインジウムの材料フロー図を示した。JOGMEC では、インジウムの在庫変化量 (Δ stock) を、需要量と供給量の差より求め示している。JOGMEC の材料フロー図より、インジウム資源の供給量および部門別需要量が得られる。しかし

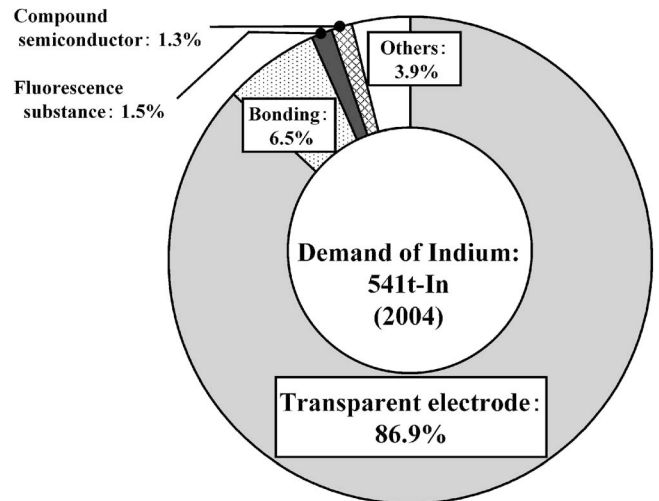


Fig. 1 Demand of indium in Japan (2004).

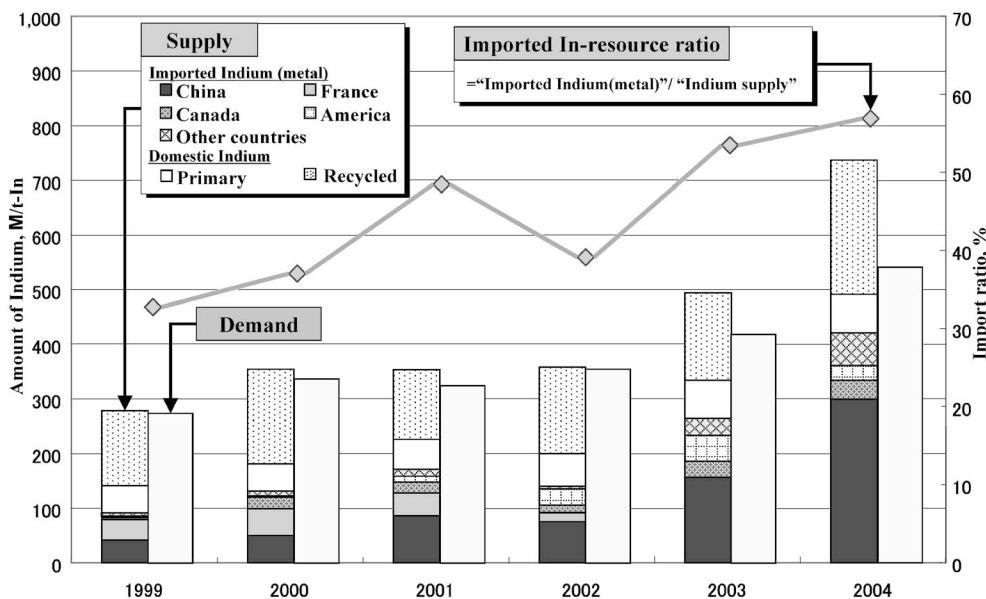


Fig. 2 Supply and demand balance of indium in Japan.

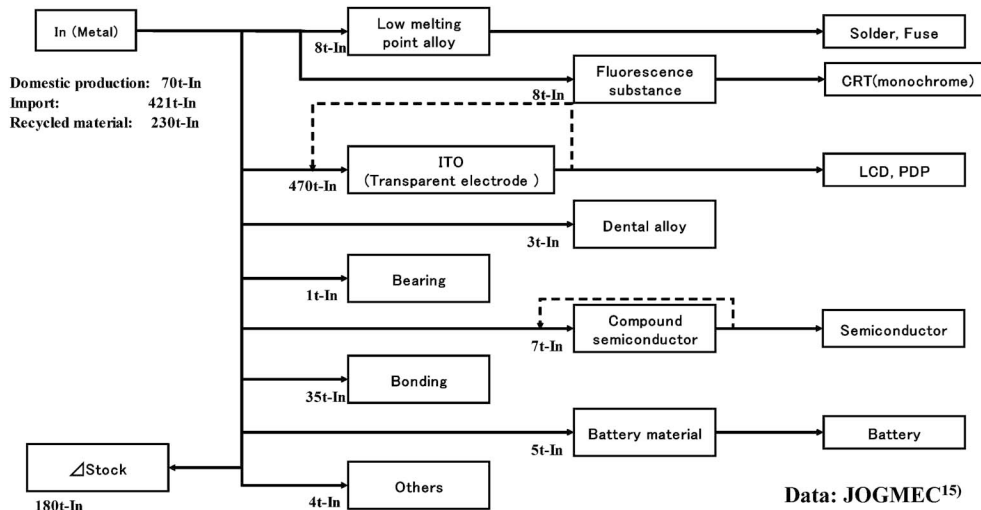


Fig. 3 Indium flow chart in Japan by JOGMEC (2004).

ながら、このフロー図の最大の問題点は、リサイクルの課題を明確にするために必要不可欠である(i)スクラップフロー、(ii)最終製品中のインジウム量が不明な点である。

3. 日本におけるインジウムのサブスタンスフロー分析インジウムフローの推計

ITO 膜用のインジウムは、スパッタ工程を経て ITO 膜として、各種製品に利用されている。スパッタ工程における歩留りについては、西田¹⁷⁾の報告より得られる。文献を参考に、インジウムフローの推計を行った。Table 1 にインジウムフローの推計根拠を示した。また、Fig. 4 にインジウムのマテリアルフローを示した。なお、図中には、JOGMEC の推計と同じく、在庫変化量を需要量と供給量の差より求め示した。

西田¹⁷⁾によると、スパッタ工程に投入されたインジウムの製品化率は 3%程度であり、70%はターゲット残材として回収されて金属 In に還元・再利用(収率は約 70%)、残りの 20%は治具・装置付着、5%はフォトリソの工程ロス、2%が不良パネルとなる。透明電極用 ITO 向けインジウム需要量が、470 t-In であることから、FPD 製品中に含まれるインジウム量は、僅かに 14(±2)t-In であると得られた。したがって、ITO 膜製造工程に投入されたインジウムの大部分が工程ロスとして排出されている事がわかる。このことから、現在、再生地金として、リサイクルされているインジウムは、品位の高い工程ロスからの回収であると推測できる。なお、本研究における推計値は、有効数字(JIS K 0211)に基づき最終桁に誤差を含んでいる。なお、以下の文章においては、誤差の表記は割愛して、中央値のみを示した。

3.1 インジウム拡散量の推計

現在、白金族金属などの一部の金属を除き、使用済み製品に含まれている大部分のレアメタルは回収されていない。これらの金属は、廃棄物処理およびリサイクル工程において拡散もしくは希釈されているのが現状である¹⁸⁾。典型的な元

Table 1 Remarks for estimation of indium flow chart.

	Remarks
[1] Indium in target material	Ref. 14)
[2] Recycled material	Ref. 14)
[3] Reminder material	“[1] Indium in target material”×70 (%) /100
[4] Loss in sputtering process	“[1] Indium in target material”×20 (%) /100
[5] Loss in etching process	“[1] Indium in target material”×5 (%) /100
[6] Loss in assembling process	“[1] Indium in target material”×2 (%) /100
[7] Display panel	“[1] Indium in target material”×3 (%) /100
[8] Loss in recycling process	“[3] Reminder material”-“[2] Recycled material”

素が、モリブデン¹⁹⁾やニオブ等の鉄鋼用合金成分である。ここでは、インジウムスクラップの未回収による資源拡散量の推計を行うと共に、それによる環境影響を評価する。

推計により、加工工程で発生するインジウムスクラップのうち 206 t-In(スパッタリング工程ロス：94 t-In, エッチング工程ロス：23 t-In, 組立工程ロス：9 t-In, 再資源化工程ロス：80 t-In)が、有効利用されていない事が明らかとなった。また、現状では、使用済み製品となった FPD 中のインジウムも一部分を除いては、再資源化されていない。これにより、2004 年に透明電極用 ITO 向けに投入された 470 t-In のインジウムのうちで 220 t-In のインジウムが拡散(もしくは潜在的拡散)している事が明らかとなった。

さらに、これらインジウムの資源拡散による環境影響を評価した。評価項目としては、エネルギー消費量、CO₂ 排出量、そして、関与物質総量(TMR：Total Materials Requirement)を取り上げた。TMR は、経済活動に伴う物質投入量(直接投入量と間接投入量)、および、隠れたフローを含めた指標である。ここで、前者は、経済フローとも呼ばれ、さまざまな経済統計資料などで入手可能な量である。一方、

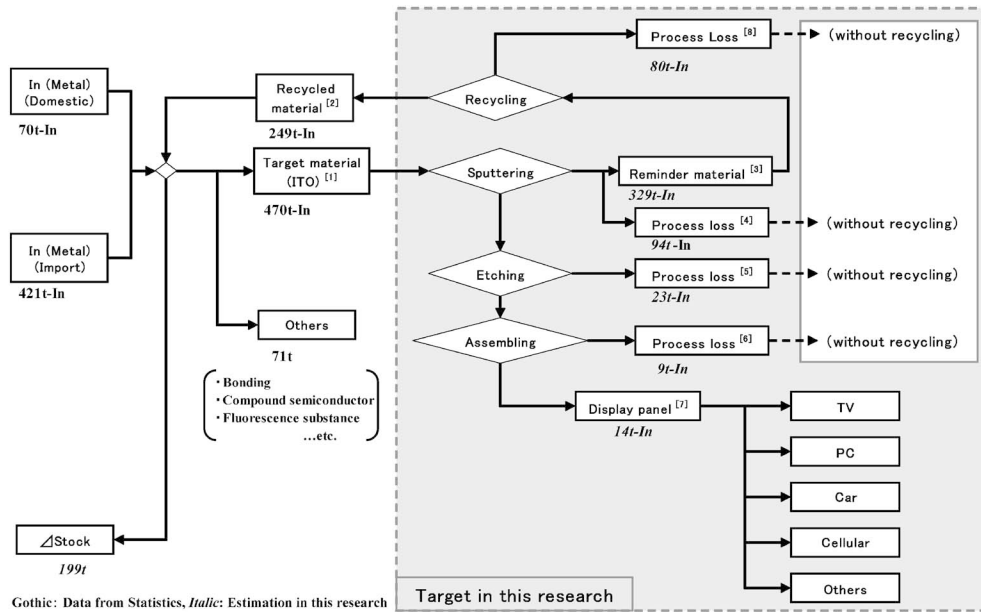


Fig. 4 Estimated Indium flow chart in Japan (2004).

Table 2 Estimated amount of scattered indium.

(a) Amount of scattered indium		
Disipated indium		units
indium scrap from sputtering	94	t-In
indium scrap from etching	23	t-In
indium scrap from assembling	9	t-In
indium scrap from recycling	80	t-In
Potentially disipated indium		units
indium in FPDs	14	t-In
Total	220	t-In

(b) Environmental impacts of indium-scatter		
Environmental impacts of scatter		units
Energy consumption	11.4	TJ/t-In
CO ₂ emission	0.5	10 ³ t/t-In
TMR	1.0	10 ⁶ t/t-In

後者は、経済行為に伴う物質以外にその行為に伴って起こる物質の移動量であり、採掘時の土砂等を含める。金属インジウム 1 t あたり製造に必要となるエネルギー消費量(51.5 GJ/t-In)および CO₂ 排出量(2.3 t-CO₂/t-In)は、NIMS の報告書²⁰⁾を、TMR(4.5 × 10³ t-TMR/t-In)は原田の論文²¹⁾を参考にした。

Table 2 に FPD に関わるインジウムの拡散量と拡散に伴う環境影響を示した。解析の結果、220 t-In のインジウムの拡散は、エネルギー消費量で 11.4 TJ の損失相当、CO₂ 排出量で 0.5 × 10³ t-CO₂ の損失相当、そして、TMR で 1.0 × 10⁶ t-TMR の損失相当であると得られた。

4. 考 察

本研究では、用途別インジウム需要量および製造歩留りを

考慮したトップダウン型手法に基づいて、FPD 製品群中のインジウム量を推計すると共に、インジウムフローを作成した。ここでは、その推計結果の妥当性を検証するべく、製品の生産台数および ITO 膜の製品組成を考慮した積み上げ型手法により、FPD 製品中のインジウム量の推計を行う。

FPD 製品中のインジウム量の推計として、(1)携帯電話のディスプレイ中のインジウム量の推計を行った。携帯電話は、インジウムをはじめ金、銀、銅などの資源として有用な物質を含む一方で、新旧機種世代交代が早いペースでなされており、それら物質の拡散の懸念から携帯電話リサイクルシステムは注目されている¹⁸⁾。また、(1)の推計結果を利用して、(2)電気電子機器(テレビ、パソコン、カーナビ)の FPD 中のインジウム量の推計を行った。

4.1 携帯電話ディスプレイに含まれるインジウム量の推計

ITO 膜は、LCD パネル中の透明電極として使用されており、典型的な携帯電話の LCD のサイズは、1.3~2.9 インチ²²⁾である。本研究では、分析対象として、2.5 インチの LCD を有する 2005 年製の携帯電話を取り上げた。LCD の場合は、透明電極用 ITO 膜は 2 枚からなっている。分析対象である LCD パネル(Size: 60.6 mm × 40.8 mm)の対向電極における 2 枚の ITO 膜の断面を電子顕微鏡にて解析して膜厚を測定した。解析の結果、ITO 膜の厚さは、150 nm と 265 nm で、合計 415 nm であった。これらのデータを用いて、本研究では、以下の式を用いて LCD パネル中のインジウム量を推計した。

$$M_{ITO}^{In} = V_{ITO} \times \alpha_1 \times \alpha_2$$

ここで、 M_{ITO}^{In} は携帯電話 1 台あたりの ITO 膜中のインジウム量を、 V_{ITO} は携帯電話 1 台あたりの ITO 膜の体積を、 α_1 (= 6.46 g/cm³) は ITO 膜単位体積あたりの In₂O₃ の割合を、 α_2 は In₂O₃ 中のインジウムの割合を示す。なお、ヒアリング調査の結果、ITO 膜の組成は、In₂O₃ : 90 mass%

SnO₂ : 10 mass% と仮定した。

推計の結果、携帯電話 1 台あたりのインジウム量は、 5.5×10^{-3} g-In と得られた。同様に、1.3 インチパネルおよび 2.9 インチパネルの場合も求めた。推計の際、ITO 膜の厚さは、同じく 415 nm とした。その結果、1.3 インチパネル(下位値)および 2.9 インチパネル(上位値)のインジウム含有量は、それぞれ、 1.2×10^{-3} g-In および 6.9×10^{-3} g-In であることが明らかとなった。

経済産業省(METI: Ministry of Economy, Trade and Industry)の機械統計²³⁾によると、2004 年の携帯電話の生産台数(PHS を含む)は、 $50,522 \times 10^3$ 台であった。したがって、2004 年度における携帯電話(PHS を含む)ITO 膜中のインジウム量は、0.3 t-In であると得られた。(下位推計値 : 0.1 t-In, 上位推計値 : 0.4 t-In)

4.2 他の FPD 製品に含まれるインジウム量の推計

上記の分析により得られた ITO 膜中のインジウム量の結果を利用して、①TV(LCD と PDP)、②PC 用 FPD、③カーナビゲーションシステム用 FPD に含まれるインジウム量を概算した。推計に際して、電子機器製品の生産台数については、経済産業省の機械統計²³⁾を参考にした。なお、FPD のサイズについては、テレビ : 15~60 インチ²⁴⁾、PC 用 LCD モニタ : 10~25 インチ²⁴⁾、カーナビゲーション(CarNavi)用 LCD モニタ : 4~10 インチと仮定した。なお、推計に際して、TV は 32 インチ、デスクトップ型 PC 用 FPD は 20 インチ、ノート型 PC 用 FPD は 15 インチ、CarNavi 用 FPD は 8 インチとした。また、ITO 膜の膜厚は、各 FPD において、携帯電話と同じく、415 nm と仮定した。

2004 年における TV(LCD と PDP)の生産台数は、 3.0×10^6 台であった。一方、32 インチ FPD 中のインジウムの体積は、約 0.1 cm³ であることから、0.8 g-In/台(下位推計値 : 0.2 g-In, 上位推計値 : 2.7 g-In)である。したがって、TV に含まれるインジウム量は、2.3 t-In(下位推計値 : 0.5 g-In, 上位推計値 : 8.2 g-In)であると得られた。同様に、PC 用 FPD および CarNavi 用 FPD に含まれるインジウム量を概算した。Fig. 5 は、FPD に含まれるインジウム量の推計結果である。概算の結果、PC 用 FPD に含まれるインジウム量は 1.5 t-In, CarNavi 用 FPD に含まれるインジウム量は 0.3 t-In であると得られた。推計の結果、電気電子機器(テレビ、パソコン、カーナビ)の FPD 中に含まれるインジウム量の合計値は、4.3 t-In(下位推計値 : 1.2 t-In, 上位推計値 : 12.4 t-In)であると得られた。この結果より、上記の電気電子機器を除いた他の製品には、10 t-In(下位推計値 : 2 t-In, 上位推計値 : 13 t-In)程度のインジウムが含まれている事が予想される。これらの製品としては、パチンコ台、デジタルビデオ・カメラ製品等の FPD が挙げられる。

本研究では、積み上げ型推計手法により、トップダウン型推計値の検証を行った。その結果、両者において近い値が得られた。今後、FPD のサイズや FPD 別の含有インジウム量などの詳細な情報により、さらに精度の高い分析が可能となると思われる。

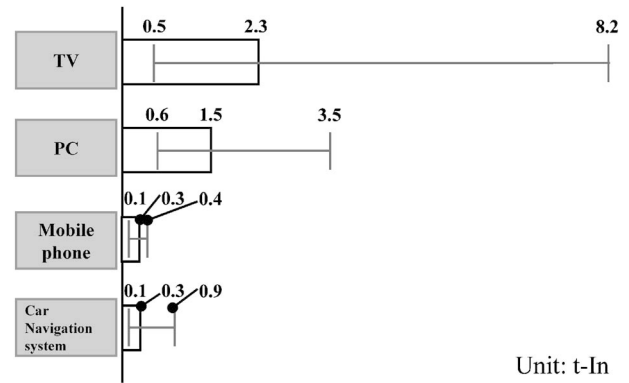


Fig. 5 Estimated result of indium in FPDs (2004).

5. 結 言

本研究では、インジウム需要の 86.9% を占める透明電極用 ITO に利用されるインジウムのマテリアルフローを明らかにした。以下に本研究の主な結論を示した。

(1) 日本において、ITO 膜用途に利用されている 470 t-In のインジウムのうちで、220 t-In が拡散もしくは潜在的に拡散している事が明らかとなった。220 t-In のインジウムの拡散は、エネルギー消費量が 11.4TJ の損失相当、CO₂ 排出量が 0.5×10^3 t-CO₂ の損失相当、そして、TMR で 1.0×10^6 t-TMR の損失相当であると得られた。

(2) FPD に含まれるインジウム量は、僅かに 14 t-In であると得られた。これは、ITO 膜用途のインジウムの約 3% である。FPD 中のインジウムの内訳は、以下であると得られた。TV(2.3 t-In)、PC(1.5 t-In)、携帯電話(0.3 t-In)、and カーナビゲーションシステム(0.3 t-In)。

本研究は、独立行政法人科学技術振興機構(JST)戦略的創造研究推進事業「サステナビリティ指標としての物質・材料フロー」(平成 15 年度採択課題)科学研究費補助金若手 B(19760588)、および、環境省廃棄物科学研究費の研究において得られた研究成果の一部である。研究を進めるにあたり、調査にご協力いただいた東海大学の吉田千里博士、および、ご支援いただいた皆様のご厚意に感謝いたします。

文 献

- 1) Japan Oil, Gas and Metals National Corporation: *Stockpiling*, <<http://www.jogmec.go.jp/english/stockpiling.html>>, (2006/12/12)
- 2) Ministry of Economy, Trade and Industry: *Yearbook of Iron and Steel, Non-Ferrous Metals, and Fabricated Metals Statistics*, (2005)
- 3) Japan Oil, Gas and Metals National Corporation: *Material Flow of Mineral Resource (in Japanese)*, (2005)
- 4) Rare Metal Association: *Rare Metals Shikihou (in Japanese)*, (2005)
- 5) M. Shimada, K. Ijima, Y. Sawatani, K. Nakajima, T. Nagasaka, T. Tsukihashi, Y. Moriguchi and K. Halada: *Proceedings of 7th International Conference on Ecomaterials* (2005) pp. 620-633.
- 6) P. H. Brunner and H. Rechberger: *Handbook of Material Flow Analysis*, (The CRC Press, Boca Raton, 2003) pp. 1-159.
- 7) M. Bertram, T. E. Graedel, H. Rechberger and S. Spataro: Eco-

- logical Economics **42**(2002) 43–57.
- 8) H. Rechberger and T. E. Graedel: Ecological Economics **42**(2002) 59–72.
 - 9) S. Bringezu, H. Schutz, S. Steger and J. Baudisch: Ecological Economics **51**(2004) 97–124.
 - 10) A. M. Alfantazi and R. R. Moskalyk: Mineral Engineering **16**(2003) 687–694.
 - 11) Rare Metal Association: *A List of Base Data for Selecting Seven Metals for National Reserves*, <<http://www.tokubikyo.or.jp/pdf/ichiran.pdf>>, (2006/12/12)
 - 12) U. S. Geological Survey: *Indium*, <<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/indium/indiumcs06.pdf>>, (2006/12/12)
 - 13) New Energy and Industrial Technology Development Organization: *An Advanced Study on Developing a Global Model for Recycling and Accumulating Waste Resources*, (2005) p. 64.
 - 14) Arumu Publishing: *Industrial Rare Metals 121 (in Japanese)*, (2005) pp. 108–109.
 - 15) Japan Oil, Gas and Metals National Corporation: *Rare Metal Stockpiling Data Book (in Japanese)*, (2006) p. 24.
 - 16) Japan Oil, Gas and Metals National Corporation: *Material Flow of Mineral Resource 2005 (in Japanese)*, (2005), pp. 145–148.
 - 17) H. Nishida: Monthly Display **2**(2002) 36–46.
 - 18) K. Nakajima, K. Yamamoto, K. Nakano, K. Kuroda, K. Halada and T. Nagasaka: Journal of Life Cycle Assessment, Japan **2**(2006) 341–346.
 - 19) K. Nakajima, K. Yokoyama, Y. Matsuno and Y. Nagaska: ISIJ Journal **47**(2007) 510–515.
 - 20) National Institute for Materials Science: *Estimation of CO₂ Emission and Energy Consumption in Extraction of Metals*, NIMS-EMC Material Data for the Environment, 1, (2004) pp. 84–87.
 - 21) K. Halada, K. Ijima, N. Katagiri and T. Okura: J. Japan Inst. Metals **65**(2001) pp. 564–57.
 - 22) Japan Patent Office, <http://www.jpo.go.jp/shiryousonota/hyoujun_gijutsu/keitai/9-5-1.pdf#page=1> (2007/2/21)
 - 23) Ministry of Economy, Trade and Industry: *Machinery Statistics*, <<http://www.meti.go.jp/statistics/data/h2d3216j.html>> (2006/12/12)
 - 24) K. Betsui: Fujitsu **52**(2001) 361–367.