

家電製品の廃棄に伴うレアメタルの潜在的拡散量評価*

山末英嗣¹ 中島謙一² 醍醐市朗³ 松八重(横山)一代⁴
橋本征二² 奥村英之¹ 石原慶一¹

¹京都大学

²国立環境研究所

³東京大学

⁴東北大学

J. Japan Inst. Metals, Vol. 72, No. 8 (2008), pp. 587-592

© 2008 The Japan Institute of Metals

Evaluation of the Potential Amount of Dissipated Rare Metals from WEEE in Japan

Eiji Yamasue¹, Kenichi Nakajima², Ichiro Daigo³, Kazuyo Matsubae (Yokoyama)⁴,
Seiji Hashimoto², Hideyuki Okumura¹ and Keiichi Ishihara¹

¹Kyoto University, Kyoto 606-8501

²National Institute for Environmental, Tsukuba 305-8506

³The University of Tokyo, Tokyo 113-8656

⁴Tohoku University, Sendai 980-8579

The dissipated amounts of rare metals (Au, Ag, B, Ba, Cr, In, Ni, Pb, Sb, Sn, Sr, Ta, Zn and Zr) in WEEE (Cathode Ray Tube TV, liquid-crystal display TV, plasma display panel TV, refrigerator, air conditioner, washing machine, microwave oven and cleaner) have been estimated. For the estimation, the number of WEEE was also estimated using the population balance model. The composition of the WEEE were examined by interviews and the measurement using energy dispersive X-ray diffractometer. The estimated amounts of the dissipation were evaluated by both the ratio of the dissipation to domestic demand and the weight amount of the dissipation by "total materials requirement" (TMR).

(Received March 18, 2008; Accepted April 30, 2008)

Keywords: rare metal, dissipation, evaluation, recycle, population balance model, waste electrical and electronic equipment, total materials requirement

1. 緒 言

我が国では「特定家庭用機器再商品化法」(家電リサイクル法)が2001年4月1日に施行され、家電製品のリサイクルが本格的に始まった¹⁾。この法律に対応するため、家電メーカーは家電リサイクル工場を建設し、またそれに伴うリサイクル技術を向上させることで、高いリサイクル率の達成に至っている。例えば、家電リサイクル法施行3年後の2003年、約1050万台の廃家電製品(テレビ、冷蔵庫、エアコン、洗濯機)が380カ所の指定取引所で回収され、その99.8%がベースメタルにリサイクルされている。さらに、リサイクル率はテレビで78%、冷蔵庫で63%、エアコンで81%、洗濯機で65%が達成されており、それらは法で定められた値よりも高い値となっている²⁾。

しかしながら、現在のシュレッダーを用いたリサイクル法ではほとんどのレアメタルはリサイクルされたベースメタル中に消失(拡散)するという問題が起きている。例えば、Cr

を含むフェライト系ステンレス鋼は、磁性を有するために他の鉄基材料と磁選によって選別することができず、最終的には大量の純鉄で希釈されて普通鋼として利用される。このことは、ステンレス鋼のダウングレードリサイクルだけでなく、Crの普通鋼中への「拡散」を意味している。同様のダウングレードリサイクルや拡散は他の材料や元素種、特にレアメタルについても発生しているのが現状である。

一般的に、レアメタルは希薄に存在しており、そのため精製にはベースメタルと高いコスト、エネルギー、材料を必要とする。さらに、それらは偏在していることが多いために、供給不足が起りやすく、レアメタル市場は世界的規模で変動しやすい。そのためこれらの金属の管理は、資源サイクルと戦略的資源利用の観点から、特に資源に乏しい日本にとっては重要である。事実、いくつかのレアメタルについては、安定供給を確保するため独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)により国家備蓄が進められている。しかし、そこで対象となっているレアメタルは7種類(Ni, Cr, W, Co, Mo, Mn, V)に過ぎないのが現状である。

以上のような状況から、従来、廃家電製品中に拡散していたレアメタルをリサイクルもしくはリユースすることは効果

* Mater. Trans. 48(2007) 2353-2357 に掲載

的な解決策の一つとなりうる。そのため、その拡散量を把握することは重要である。さらに、その拡散によるインパクトを国内需要や資源消費などの観点から評価することは、効果的なりサイクル計画を構築する上で重要なものとなりうる。しかし、我々が調べる限り、家電製品の廃棄に伴い拡散するレアメタルを評価している研究はわずかであるのが現状^{3,4)}である。以上より、本研究の目的は国内の家電製品の廃棄に伴うレアメタルの潜在的な拡散量を見積もり、それが国内需要や環境に与えるインパクトを評価することとする。

2. 研究方法

2.1 対象とするレアメタルと廃家電製品

本研究では、分析対象として Au, Ag, B, Ba, Cr, In, Ni, Pb, Sb, Sn, Sr, Ta, Zn, Zr のレアメタルおよび Fe, Al, Cu のベースメタルを選択した。また、CRT テレビ(9 種)、液晶テレビ(4 種)、プラズマテレビ(5 種)、冷蔵庫(7 種)、エアコン(9 種)、洗濯機(6 種)、電子レンジ(6 種)、掃除機(6 種)を家電製品として選択した。家電製品の廃棄台数推定については、著者⁵⁾が田崎ら⁶⁾による方法を基に報告している。以下では、推定法の要点について簡単に説明する。

廃棄台数推定はポピュレーションバランスモデル⁷⁾を用いて行った。すなわち、ある製品のある年度 t における国内出荷量(P_t)と国内廃棄台数(W_t)の差は、($t-1$)年度から t 年度における国内保有台数の増加に等しい。

$$P_t - W_t = N_t - N_{(t-1)} \quad (1)$$

ここで、 $N_{(t-1)}$ と N_t はそれぞれ ($t-1$) 年度、 t 年度における国内保有台数を意味している。 N_t は国内世帯数⁸⁾と世帯あたりの保有台数⁹⁾の積から決定でき、また将来値についてはロジスティック近似を用いて推定した。廃棄台数については、この製品の寿命関数より推測した。また、CRT テレビについては、新製品(液晶テレビとプラズマテレビ)への代替を考慮した。

2.2 家電製品の組成分析

1997 年と 2002 年における家電製品の平均重量と構成材料については、家電製品協会へのヒアリング調査によって得ることができた。本研究では、前者を 2001 年以前の家電製品の代表組成とし、後者を 2002 年以降の代表組成とした。得られたデータは大まかな構成材料を基に大きく 9 つに分類されており、それを Table 1 に示す。

レアメタルのほとんどは合金または複合材料として使用されているため、含有量の推定はそれらの組成を考慮して行った。CRT ガラス(ネック、パネル、ファンネル)の組成は稲野らの報告値¹⁰⁾を用いた。ボンドマグネットはエネルギー分散型 X 線分析装置(EDX)を用いて分析し、Ba, Fe, B について濃度を得た。タンタルコンデンサ中の Ta 濃度については、国内における全コンデンサ中のタンタルコンデンサの割合¹¹⁾、タンタルコンデンサ中の平均 Ta 濃度¹²⁾、実測したプリント基板中の平均コンデンサ個数から決定した。基板中の Au, Ag, Pd の量については、日本金属経済研究所の分析値を用いた¹³⁾。ただし Pd は家電製品には含まれていないこ

Table 1 The classification of the components for the home electric appliances.

Matrix	Details
Iron	Pure iron, coated steel, plated steel, PVC* steel, etc.
Copper	Pure copper, brass, bronze, Cu-Be-Co, conducting wire, etc.
Aluminium	Pure aluminium, Al-Cu, Mn, Mg, Sn, Zn alloys, conducting wire, etc.
Other alloys	Mg alloys, Pb alloys (excluding PCB**), Zn alloys, magnets, bond magnets, etc.
Glass	Electric glass (CRT panel), lead glass (CRT funnel and CRT neck), LCD glass, PDP glass, etc.
Plastic	Polyethylene, polypropylene, poly-styrene and foamed polyurethane, etc.
PCB**	Surface mounted components, lead-free solder, solder, paper/phenol, paper/epoxy, etc.
Gas	Chlorofluorocarbon, etc.
Others	Rubber, ceramics, fibre, grease, etc.

* Polyvinyl chloride, ** Printed Circuit Board

Table 2 Average composition for each element.

Elements	Containing materials (mass%)
Ag	Brazing alloy (3%*), lead-free solder (3%*)
B	Bond magnets (1%*, **)
Ba	CRT panel (3.8%*), CRT funnel (0.12%*), CRT neck (0.12%*), PDP glass (3.8%***), bond magnet (3.7%***)
Cr	Stainless steel (18%*)
In	Transparent electrode (1 g per 15 inch*)
Ni	Stainless steel (8%)
Pb	CRT panel (0.28%*), CRT funnel (14.7%*), CRT neck (14.7%*), PDP glass (0.28%***), solder (40%*)
Sb	CRT panel (0.33%*)
Sn	Solder (60%*) and lead-free solder (96%*)
Sr	Ferrite magnet (8.3%*, **), CRT panel (5.5%*), CRT funnel (0.29%*), CRT neck (0.29%*)
Ta	Capacitor*, **
Zn	Plated steel (20 g/m ² ***), Zn-Al-Cu alloy (94%*)
Zr	CRT panel (1.4%*), PDP glass (1.4%***)

* : based on literatures^{9,10,13)}, interview or familiar composition, ** : based on measured value

とが分かった。他の構成材料の組成については、ヒアリング調査や合金の代表組成から決定した。例えば、2002 年の家電データで見られた鉛フリーはんだについては、Sn-3.0 mass%Ag-0.5 mass%Cu と仮定した。Sb といったプラスチックに含まれる難燃材料は本研究では無視した。上記のように推測した組成を Table 2 に示す。

3. 結 果

Fig. 1 に既報⁵⁾において推定した家電製品の廃棄台数を示す。エアコン、掃除機、冷蔵庫、洗濯機および電子レンジの廃棄台数はほぼ一定値、もしくは微増を示している。これはそれらの機器の保有台数がほぼ飽和に近い状態にあるためと考えられる。また、CRT テレビの廃棄台数は減少するもの

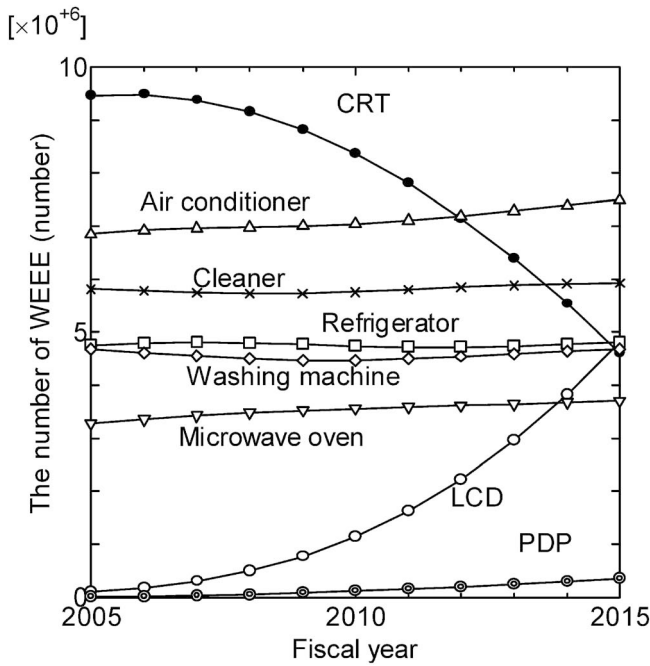


Fig. 1 The estimated number of WEEE⁵⁾.

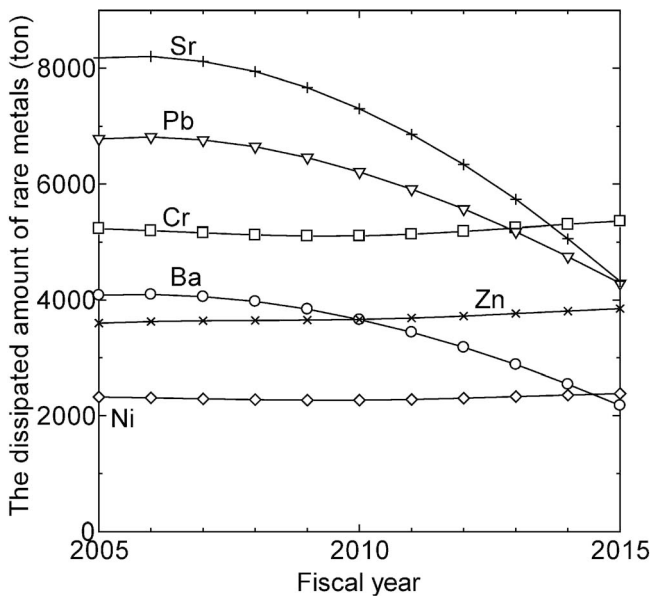


Fig. 2 The dissipated amounts of Ba, Cr Ni, Pb, Sr and Zn from WEEE.

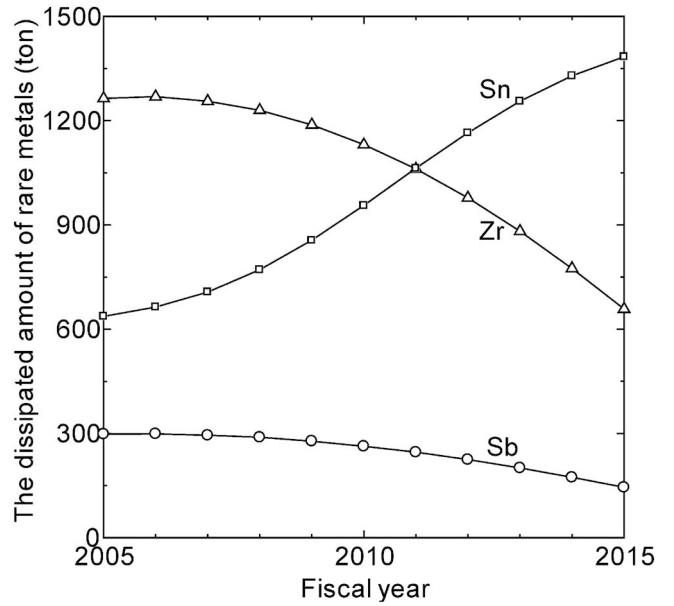


Fig. 3 The dissipated amounts of Sn, Zr and Sb from WEEE.

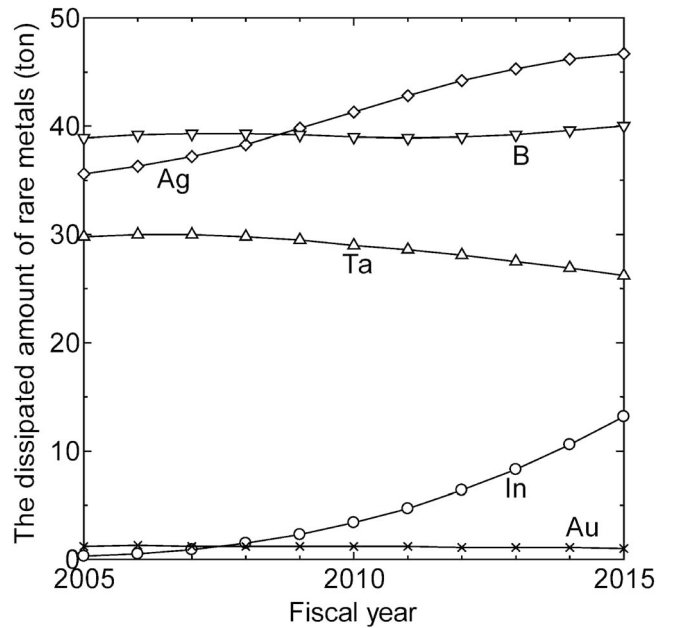


Fig. 4 The dissipated amounts of P, Ag, B, Ta and In from WEEE.

の、代替効果により液晶テレビとプラズマテレビの廃棄台数が増加していることが分かる。

廃家電製品に含まれるレアメタルの推算値を Fig. 2 (Ba, Cr, Ni, Pb, Sr, Zn), Fig. 3 (Sb, Sn, Zr) および Fig. 4 (Ag, B, In, Ta) に示す。ここで、同様にして推算した Fe, Cu および Al の含有量はそれぞれ年間 550000, 90000 および 50000 トンで、これらのほとんどはベースメタルとしてリサイクルされていると考えられる。一方、上記のレアメタルは Cr, Ni, Zn など一部の金属を除いてほとんどが家電製品のリサイクルに伴い拡散していると考えられる。Cr, Ni は洗濯機のステンレス槽については手解体などで回収され、Zn はメッキ鋼

板をリサイクルする際のダストから一部回収されているため、本研究の「拡散」の定義には当てはまらないが、図や以下の説明では便宜上拡散と呼称する。

2005 年から 2015 年にかけて、In, Sn, Ag の廃棄量は増加傾向を示している。In 廃棄量の増加は液晶テレビやプラズマテレビ用透明電極の需要増加によるものであり、Sn や Ag の廃棄量増加は鉛フリーはんだの使用量増加が原因と考えられる。一方、Pb, Sb, Zr, Ba, および Sr の廃棄量は減少傾向を示している。これは CRT ガラスの減少が原因と考えることができる。

Cr, Ni, Zn の拡散量がほぼ一定値であるのは、Cr や Ni のステンレス鋼への添加、また Zn の真鍮や亜鉛メッキ鋼板と

しての利用は確立された方法で他に変わる材料がないため供給量が一定で、それに伴い廃棄量も一定になっていると考えられる。しかし、上述のように Ni, Cr および Zn のリサイクルシステムは部分的に確立されており¹⁴⁾、図中の値全てが拡散しているわけではないことに注意しなければならない。一方、それら以外の B, Ba, In, Pb, Sb, Sn, Sr, Ta, Zr のリサイクルはほとんど実行されていないのが現状である。

Ag や Sn の拡散量に関して、RoHS 指令などの対策のため近年鉛フリーはんだの使用量は増加傾向にあるため、2002 年の組成に基づいて得られた値は過小評価されている可能性がある。現在、日本においては従来の鉛含有はんだのほとんどはコストの問題からリサイクルされていないが、近い将来、高価な Ag が含まれていることから鉛フリーはんだの回収が促進される可能性がある。

In については、すでに述べたように、液晶テレビやプラズマテレビの普及に伴い拡散量は年を追うごとに増加することがわかる。図には 2015 年までの推計値しか示していないが、さらなる計算により 2025 年にその拡散量は年間 35 トンに達することがわかった。さらに、液晶テレビやプラズマテレビの画面サイズは年々向上しているため、実際には推計値より大きな拡散量になるものと考えられる。現在、透明電極からの In をリサイクルする技術は開発中であり、大規模リサイクル工場に適応できる技術の開発が望まれている。

4. 考 察

4.1 国内需要を基準とした拡散量評価

本節では、ある年度における拡散量を国内需要量で除して百分率で表すことで、「国内需要比拡散率」(the ratio of the Dissipation to Domestic Demand, DDD)を定義した。本研究では、2004 年度における国内需要量を基準とした¹⁵⁾。ただし、Sn に関しては 2001 年度の値を用いた。国内需要比拡散率が大きくなるほど資源効率が低いと見なすことができ、対象とする元素のリサイクルの重要性が高くなる。

Fig. 5 に推算した国内需要比拡散率を示す。図における、“average”, “maximum”, “minimum” はそれぞれ 2005 年から 2015 年における国内需要比拡散率の平均値、最大値、最小値を意味する。図から、Ag, B, Cr, Ni, Pb, Zn の国内需要比拡散率はたかだか 2%程度である一方、Ba, Sr および Zr の国内需要比拡散率は 15~25%という高い値を示していることが分かる。このことは、Ba, Sr, Zr のリサイクルの優先順位が高いことを示唆している。ただし、Ba, Sr, Zr については、CRT テレビの需要減少により過大評価されている可能性がある。しかし、例えば、Sr について 2000 年の需要量 (2004 年の 152%)¹⁵⁾を用いて国内需要比拡散率を再計算しても、最初の結果と同様に対象とした元素の中で最大値を示した。Ba や Zr についても同様の結果となった。

また、これら 3 つのレアメタルに関しては最大値と最小値の差が大きいことが分かる。これは CRT テレビの廃棄台数が減少していることが反映されているためである。以前の日本では、CRT テレビは水平リサイクルされており、そこに含まれるレアメタルの拡散量はそれほど大きなものでな

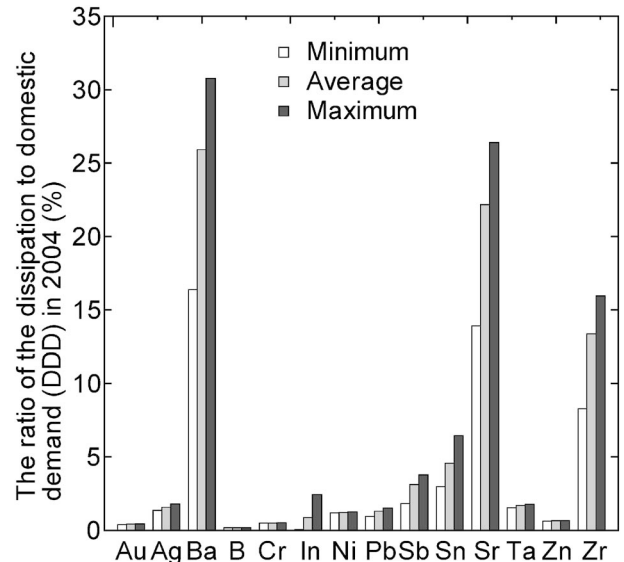


Fig. 5 The ratio of the dissipation to domestic demand (DDD) in 2004¹⁵⁾.

った。しかし、現在、CRT テレビの国内需要は大幅に減少しており(既報⁵⁾によると 2011 年に需要はほぼ 0 台と推算される)、将来、国内で水平リサイクルすることは困難となる。2004 年 5 月以降、リン化合物を取り除いたものに限るという条件の下、CRT ガラスの輸出はバーゼル国内法の規制から解かれ、海外における水平リサイクルの可能性の道が開けた。しかし、これは海外への資源の流出を意味しており、日本における資源リスクという観点から考えると、最高の解決策とは言い難い。以上より、CRT ガラスからのレアメタル、特に Sr, Ba, Zr のリサイクル技術の喫緊な開発が重要になると考えられる。

さらに、フェライト磁石の成分としての Sr と Ba についても、現在リサイクルされていないことに注意すべきである。CRT ガラスを除き、Sr 約 700 トン、Ba 150 トンが年間拡散している。ここで、前者の Sr の値は 2004 年の Sr 系フェライト磁石需要の約 15%にもなる。したがって、フェライト磁石の回収、リユース、リサイクルもまた望ましいと考えられる。

4.2 環境への統合的な影響を考慮した拡散量評価

環境への統合的な影響を考慮した拡散量評価を行うため、関与物質総量 (Total Materials Requirement, TMR) を重みづけ因子として用いた。関与物質総量はある材料を生産するために必要な直接的および間接的なマテリアル投入量だけでなく、ズリや岩石といった隠れたマテリアルフローを含んだ指標である^{16,17)}。関与物質総量の推算は原田ら^{3,18)}により行われており、本研究で用いた値を Table 3 に示す。Ba についてはデータがなかったため、同族元素である Sr の関与物質総量 (500 ton/ton) と以下の関係式¹⁸⁾を用いて、460 (ton/ton) と仮定した。

$$\text{関与物質総量} \propto (\text{地殻中の濃度})^{-2/3} \quad (2)$$

ここで、Ba と Sr の地殻中の濃度はそれぞれ 425 ppm, 375 ppm である¹⁹⁾。

Table 3 TMR of Ag, B, Ba, Cr, In, Ni, Pb, Sb, Sn, Sr, Ta, Zn and Zr^{3,16)}.

Element	TMR (ton/ton)
Ag	4800
B	140
Ba	460
Cr	26
In	4500
Ni	260
Pb	28
Sb	42
Sn	81
Sr	500
Ta	6800
Zn	36
Zr	550

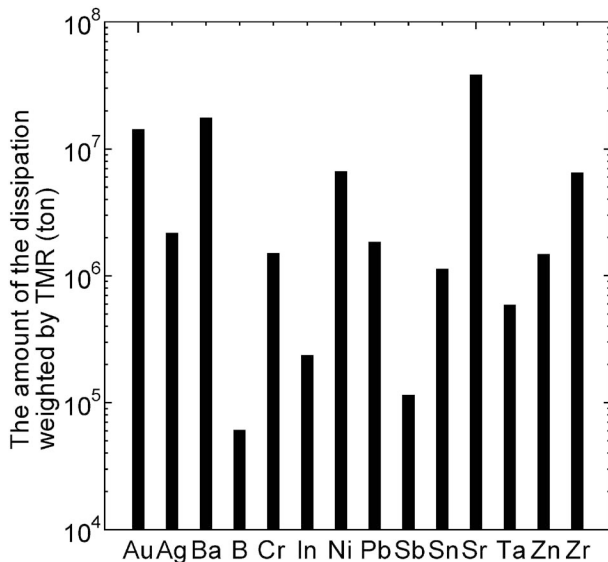


Fig. 6 The amount of the dissipation weighted by TMR.

本節では、各レアメタルの拡散量を関与物質総量によって重みづけし、それを2005年から2015年まで合計したものを「関与物質総拡散量」として定義した。関与物質総拡散量は、値が大きいほど直接的、間接的、および隠れたマテリアルフローが大きくなり、リサイクルの重要性が大きくなることを意味している。

Fig. 6に各レアメタルの関与物質総拡散量を示す。図から分かるように、Sr, Ba および Au の関与物質総拡散量はそれぞれ3800万トン、1700万トン、1400万トンと極端に大きな値を示している。Srの持つインパクトはFe(関与物質総量は8(ton/ton))480万トンがリサイクルされずに消失するときのインパクトに相当し、これは日本における年間粗鋼生産量の約4%にも値する。廃家電製品という限られた製品群から拡散するレアメタルが、環境に対して非常に大きいインパクトを持つことに注目すべきである。以上より、廃棄CRTガラス中のSrおよびBaの有効利用、および基板上の

Auの積極的な回収が促進されるべきと考えられる。一方、関与物質総量が小さいにもかかわらず、Ni, Pb, Cr, Znは比較的大きい関与物質総拡散量を示している。これは、それらのレアメタルの拡散量の絶対量が非常に大きいことが原因である。

国内需要比拡散率および関与物質総拡散量の2つの評価結果より、廃家電製品から特にSr, Ba, Auを含む構成材料を中心としてリサイクル、またはリユースするような取り組みが必要と考えられる。

5. 結 言

本研究では、家電製品に含まれるレアメタル(Ag, B, Ba, Cr, In, Ni, Pb, Sb, Sn, Sr, Ta, Zn, Zr)の拡散量を2005年から2015年にかけて推定した。In, Sn, Agの拡散量は増加傾向を示す一方、Pb, Sb, Zr, Ba, Srは減少傾向を示した。2004年の国内需要を基準とした拡散量の比率を「国内需要比拡散率」と定義して評価したところ、Ba, Sr, およびZrは平均15~25%と高い値を示した。一方、Ag, B, Cr, Ni, Pb, Znについてはたかだか2%程度であった。関与物質総量(TMR)で重みづけすることで定義した「関与物質総拡散量」を用いて評価を行ったところ、Sr, Ba およびAuがそれぞれ3800万トン、1700万トンおよび1400万トンと高い値を示した。2つの評価手法により、廃家電製品に含まれるレアメタルの内、特にSr, Ba, Auのリサイクルに取り組むことが課題であることが分かった。

本研究は環境省による廃棄物処理等科学研究費補助金(課題番号: K1810(2007)、研究代表者: 橋本征二、研究課題名: 物質ストック勘定体系の構築とその適用による廃棄物・資源管理戦略研究)により研究を行った成果である。

文 献

- 1) Clean Japan Center: *Guidebook for Recycling-Oriented Society* (2005) 23.
- 2) Ministry of the Environment: *Kankyo-Hakusyo (in Japanese)* (White paper on sustainable society) (2004).
- 3) K. Halada: Report of Joint Symposium by The Iron and Steel Institute of Japan and The Japan Institute of Metals (2005) pp. 21-28.
- 4) K. Nakajima, K. Yamamoto, K. Nakano, K. Kuroda, K. Halada and T. Nagasaka: *J. Life Cycle Assess. Jpn.* **2**(2006) 341-346.
- 5) E. Yamasue, K. Nakajima, H. Okumura and K. N. Ishihara: *J. Jpn. Inst. Metals* **70**(2006) 611-614.
- 6) T. Tasaki, M. Oguchi, T. Kameya and K. Urano: *J. Jpn. Soc. Waste Management Experts* **12**(2001) 49-58.
- 7) K. Kakudate, Y. Adachi and T. Suzuki: *Sci. Technol. Adv. Mater.* **1**(2000) 105-116.
- 8) National Institute of Population and Social Security Research: *Nihon-no-Setaisu-no-Syoursuisuiki (in Japanese)* (2005).
- 9) Association for Electric Home Appliances: *Kaden Sangyou Handbook 2005 in Japanese* (Handbook of Electric Home Appliance Industry) (2005).
- 10) H. Inano, Y. Hashimoto and K. Kudou: *Hokkaidoritsu Kogyo Shikenjo Hokoku in Japanese* (Report by Hokkaido Industrial Research Institute) **304** (2005) 71-77.
- 11) Ministry of Economy, Trade and Industry: *Keizai Sangyo Kikai Tokei (in Japanese)* (Statistics of Equipments by Ministry of Economy, Trade and Industry) (2004).
- 12) Industrial Rare Metals: *Annual Review 2004*, (Arumu publish-

- ing **120**(2004).
- 13) Metal Economics Research Institute, JAPAN: IT kiki ni kansuru syuyou rare metal no recycle doukou, (2001) 136-142.
 - 14) N. Takada, K. Taga and D. Ueyama: Toshiba Review 59 1 (2004) 34-37.
 - 15) Japan Oil, Gas and Metals National Corporation: *Materials Flow 2005* (2005).
 - 16) A. Adriaanse, S. Bringezu, A. Hammond, Y. Moriguchi, E. Rodenburg, D. Rogich and H. Schutz: Resource Flows; The Material Basis of Industrial Economics (1997).
 - 17) European communities: *Economy-wide material flow accounts and derived indicators*, A methodological guide (2001).
 - 18) K. Halada, K. Ijima, N. Katagiri and T. Okura: J. Jpn. Inst. Metals **65**(2001) 564-570.
 - 19) National Astronomical Observatory of Japan: *Rika nenpyo (Chronological Scientific Tables)* (Maruzen Co., Ltd., 1996).