特集「第12回日本LCA学会研究発表会からの投稿」

[研究論文]

東南アジアにおける家電製品の素材リサイクルによる
TMR削減ポテンシャル評価山末 英嗣^{1,*}, 安永 玲華², ジョルディ クラビオット¹, トラン デュック フィ³, デュック クワン グエン³

1 立命館大学, 2 京都大学, 3 ハノイ工科大学

*連絡先: yamasue@fc.ritsumeai.ac.jp

概要: 本研究は、タイ、ベトナム、日本で家電製品4品目（エアコン・洗濯機・冷蔵庫・テレビ）の素材リサイクルによる TMR（関与物質総量: Total Material Requirement）削減ポテンシャル量を推算し、その潜在的効果を評価した。TMR 削減量は、製品を1次資源から生産した場合と、2次資源で生産した場合の TMR の差分を意味し、これを推算することで、素材リサイクルの有効性を定量的に示すことができる。分析の結果、各国の年間家電需要量を全て再生資源由来にした場合、タイで 8.5×10^6 t-TMR、ベトナムで 10.6×10^6 t-TMR、日本で 43×10^6 t-TMR の TMR 削減ポテンシャル量があることが示された。また、3カ国とも、エアコンのリサイクル、銅のリサイクルによる TMR 削減効果が高いことが示唆された。これらの結果から、タイ・ベトナムで家電リサイクルの向上を図ること、特に、エアコンと銅の適切な回収・処理が喫緊の課題であることがわかった

キーワード: 関与物質総量、東南アジア、TMR 削減量、リサイクル効果、金属リサイクル、環境影響評価

1. はじめに

アジア諸国において、使用済み家電製品の発生量が急増している。特に、ベトナム・インドネシア・フィリピン・タイのような東南アジアで顕著であり、2010年から2015年の使用済み家電製品の増加率が60%を超えている^{1,2)}。その要因として、普及率の拡大や製品の使用年数の短縮化が考えられる。筆者らがベトナムを対象に2007年と2013年の使用年数分布の推定を行った結果、主要家電4品目で平均使用年数が短くなっていることが示された³⁾。同国においては、2006年は使用済み家電製品のおよそ50%が中古品であったが、2013年の調査では10%以下にまで減少している³⁾。これは同国においてリユース市場の縮小化が起きていることを示唆している。さらに各国の家電製品の使用年数に関わる文献調査を行い、使用年数と一人当たりのGDPとの関係を調べた結果、エアコン・冷蔵庫・洗濯機のような生活に必要な白物家電の平均使用年数は、経済発展の初期段階においてGDPの増加とともに短縮化されていく傾向があることがわかった⁴⁾。東南アジアのような経済成長が著しい新興国で、GDPの増加とともに家電製品の使用年数が短縮化していく場合、使用済み家電の発生量は更に増大していくことが予想できる。

使用済み家電は、基板などに鉛といった有害元素が使用されている場合があり、不適切な処理によって環境汚染を引き起こす恐れがある一方、貴金属やレアメタルなど希少性の高い素材を含んでいるため、安全かつ適正にリサイクルを行えば「資源」としての有効活用を図ることができる。

このような観点から、使用済み家電の集まりはひとつの大きな鉱山と考えられ、いわゆる「都市鉱山」の代表例と考えることができる。筆者らはそれらに含まれる個々の使用済み製品を「都市鉱石」と呼んでいる⁵⁾。その「都市鉱石」の有効性を資源の観点から評価する指標としてTMR（関与物質総量: Total Material Requirement）に注目している。筆者らは、日本における携帯電話やノートパソコン、家電製品を対象に都市鉱石と自然鉱石から資源を得る場合のTMRを比較し、都市鉱石の有用性について論じてきた^{5,6)}。

今後、さらに家電製品の需要が増加し、使用年数の短縮化が進んでいくことが想定できる東南アジアにおいて、その「都市鉱石」の有効性を評価し、それらを適切な処理またはリサイクルできるシステムや政策を計画的に検討していくことは至要たる課題である。

そこで本研究では、ベトナム、タイ、日本における家電製品の鉄・銅・アルミニウム・プラスチックの素材リサイクルがどの程度資源削減に貢献するのかをTMRの視点から推算し、その潜在的効果について評価することを目的とする。ベトナムは発展途上国、タイは新興国、日本は先進国の代表と考えられ、これらを比較することは興味深い。鉄、銅、アルミニウム、プラスチックは家電製品の主要な構成素材であり、それぞれの素材リサイクルは重要な課題である。本研究では、使用済み家電から回収した素材が、再び家電製品の素材として利用される、自己循環型マテリアルリサイクルを仮定とした削減ポテンシャル量を推算する。

2. 研究方法

2.1 対象製品

本研究の分析対象は主要四家電と考えられる液晶テレビ (TV)、エアコン (AC)、冷蔵庫 (Refrigerator)、洗濯機 (WM) とする。括弧内の表記は各製品の略称で以降使用するグラフで主に使用した。

2.2 TMR削減量の定義

ある素材を自然鉱山から得る際のTMR係数 (単位: kg-TMR/kg) を自然鉱石TMR (NO-TMR)、都市鉱山からリサイクルして得る際のTMR係数 (単位: kg-TMR/kg) を都市鉱石TMR (UO-TMR) と定義する^{5,6)}。ここで、ある製品に n 個の素材が使用されており、 i ($= 1, 2, 3 \dots n$) 番目の素材の重量を m_i とする。 $t_{N,i}$ を素材 i の自然鉱石TMRとすると、その製品をすべて自然鉱山から生産した場合に必要なTMR ($= T_N$) は

$$T_N = \sum_{i=1}^n m_i \times t_{N,i} \quad (1)$$

と表すことができる。同様に、 $t_{U,i}$ を素材 i の都市鉱石TMRとすると、その製品をすべて都市鉱山から生産した場合、言い換えれば全てリサイクル材で生産された場合、その製品の生産に必要なTMR ($= T_U$) は

$$T_U = \sum_{i=1}^n m_i \times t_{U,i} \quad (2)$$

と表すことができる。これらの差分はある製品を全てリサイクル材で使用した際に削減できるTMRの究極値、すなわちポテンシャル量と考えることができる。これを T_{R-P} とすると、以下のように表すことができる。

$$T_{R-P} = T_N - T_U = \sum_{i=1}^n m_i (t_{N,i} - t_{U,i}) \quad (3)$$

本研究ではこの T_{R-P} をTMR削減ポテンシャル量と定義する。

ただし、実際の製品では全ての素材をリサイクル材から生産することは困難であり、一部の素材が自然鉱山由来となる。この場合、式 (3) の最終項を修正することで

$$T_R = T_N - T_U = \sum_{i=1}^n m_i (t_{N,i} - t_i) \quad (4)$$

と表せる。 t_i は素材の由来によって以下のように変化する。

$$\begin{cases} t_i = t_{N,i} : \text{素材 } i \text{ が自然鉱山由来の場合} \\ t_i = t_{U,i} : \text{素材 } i \text{ が都市鉱山由来の場合} \end{cases} \quad (5)$$

このようにして得られた T_R ($0 \leq T_R \leq T_{R-P}$) を本研究ではTMR削減量と定義する。

TMR削減ポテンシャル量とTMR削減量を推算することで、素材リサイクルにより製品ごとにどれだけTMRを削減できるのかを定量的に示すことができる。なお国ごとに対象製品の需要量は異なるため、製品のある年 y における国内需要量を D_y とし、それにTMR削減ポテンシャル量あるいはTMR削減量を乗じることで、その製品の y 年における「年間のTMR削減ポテンシャル量, $A_{R-P,y}$ 」あるいは「年間のTMR削減量, $A_{R,y}$ 」を定義した。

$$A_{R-P,y} = D_y \times T_{R-P} \quad (6)$$

$$A_{R,y} = D_y \times T_R \quad (7)$$

これらにより素材リサイクルの国全体としての効果をTMRの視点から評価できる。

2.3 システム境界

本評価における都市鉱石TMRのシステム境界を図1に示す。システム境界はどの国においても使用済み家電が発生した段階から、素材としてリサイクルされるまでとした。都市鉱石の起源は使用済み製品の発生段階であるため、家電の使用段階におけるエネルギーや物質投入については

図1 都市鉱石TMRのシステム境界

考慮しない。鉄・銅・アルミニウムは解体・分解・破碎・選別・製錬の工程を経てリサイクルされ、混合プラスチックは、解体後、破碎・比重選別を経て、再生ペレットにリサイクルされることを想定した。各プロセスには物質やエネルギーが投入されるが、それらの生産必要な間接投入、その背後にある隠れたフローを可能な限り考慮した。リサイクルされない部分は「都市鉱石ずり」と定義し、都市鉱石ずりの処理はシステム境界外とする。鉄・銅・アルミニウムのリサイクル工程で、素材リサイクルに必要なレベルで不純物等は除去されるが、さらなる不純物除去や成分調整等は行われないと仮定した。実際にはバージン材による成分調整の可能性もあるが、これらの影響は後述する再生資源利用率を変化させることで表現できる。また、日本において混合プラスチックの素材別回収は、比重選別に加え、X線分析選別や静電選別を経て高純度な素材別再生ペレットにリサイクルされる場合もあるが、本分析では全ての国に共通して比重選別までを考慮した。

2.4 使用データ

自然鉱石TMRは原田・中島らが算定したデータ⁷⁾から、都市鉱石TMRの算出に必要な各工程の投入物質・エネルギー量はJAMAILCA⁸⁾から入手した。ただし、ベトナムとタイでは、解体・分解の工程を手解体で、日本は解体機を使用した分解を行う⁵⁾と仮定した。各国の家電需要のデータは、日本は経済産業省の生産動態統計⁹⁾、ベトナムはGENERAL STATISTICS OFFICE of VIET NAM¹⁰⁾、Euromonitor Internationalの報告書¹¹⁾、URENCO (ハノイ都市環境公社: HANOI URBAN ENVIRONMENT Co., Ltd.)の報告書¹²⁾、タイは文献¹³⁾の値を使用した。また、家電製品の素材構成比(図2)は筆者らの以前の調査データを使用した¹⁴⁾。

図2 各家電の素材組成

2.5 分析手法

2.5.1 家電処理のシナリオ

日本の場合、2001年に施行された家電リサイクル法によって使用済み家電の処理体制は整えられている。そこで使用済み家電は指定取引所に運ばれ、その後リサイクル工場まで輸送され、リサイクルされると仮定した⁵⁾。タイ、ベトナムに関しては、使用済み家電の処理システムの法制化が日本ほど進んでおらず、また、国内で素材リサイクルを一貫して行える施設は存在しない。使用済み家電は解体事業者によって回収され、手作業によって解体される。その後、国内のリサイクル工場に運ばれ、選別・破碎によって素材ごとに分けられた後、周辺アジア諸国に輸出され、素材化プロセスを経る^{15, 16)}。本研究では、著者らのヒアリング調査を基に、使用済みとなった家電は国内で破碎までのプロセスを経た後、中国に輸出され、素材化されると仮定して分析を行った。本研究では各プロセスにおける歩留まり落ち等はなく、全てが素材としてリサイクルされると仮定した。また、製品の加工・組立工程については考慮しなかった。

2.5.2 輸送距離の計算

使用済み家電製品の全輸送道路距離は、日本の場合、消費者から指定取引所までの輸送道路距離+指定取引所からリサイクル工場までの輸送道路距離、タイ・ベトナムの場合、消費者から解体業者までの輸送道路距離+解体業者からリサイクル工場までの輸送道路距離+リサイクル工場から港までの道路輸送距離+港から中国広東港までの海上輸送距離、さらに中国でリサイクルした素材が再びタイ・ベトナムに戻ってくるまでを考慮し、中国広東港から港までの海上輸送距離も加算した。道路輸送距離の推計は、著者らの既存論文と同様の推計手法でおこなった⁵⁾。すなわち、各国の面積を指定取引所、解体事業者、リサイクル工場の数で除することで各施設のカバーする平均的な面積を見積もり、さらに各施設が円状にカバーすると仮定して得られた半径を使用済み家電製品の平均直線距離とした。さらに同報告より、道路輸送距離は平均直線距離の1.37倍になることが分かっており、その関係を用いて道路輸送距離を決定した。計算に必要な各国の指定取引所数、解体業者数、リサイクル工場数は文献調査^{5, 14, 17-19)}によって得た(表1)。

表1 各国の廃家電処理施設数

	日本	タイ	ベトナム
指定取引所	380箇所		
回収・解体事業者		約2000箇所	約3000箇所
リサイクル工場	38箇所	35箇所	41箇所

海上輸送距離は、タイはレムチャバン港から広東港まで、ベトナムは、ハイフォン港から広東港までとし、距離はSEADISTANCES²⁰⁾から求めた。その結果、素材がリサイクルされて戻ってくるまでの全輸送距離（道路輸送距離＋海上輸送距離）は、日本が140 km、タイが3,082 km、ベトナムが1,404 kmとなった。タイとベトナムは、海上輸送距離が3,009 km、1,333 kmであるため全輸送距離が大きくなった。しかし、タイやベトナムのような使用済み家電製品の処理方法が制度化されていない新興国では、解体業者→リサイクル工場といった単純化された処理ルートではなく、自治体等に登録されていないインフォーマルセクターの仲介によりそのルートが複雑化し、実際の輸送距離は推算値より長くなる可能性があることに注意しなければならない。

2.5.3 各国の年間家電需要量

本研究では、家電素材の自己循環マテリアルリサイクル（家電製品から回収された素材を家電製品に使用）を仮定し、各国の年間家電需要と合わせて、その国のTMR削減量を推算する。各国の2010年の家電需要量を図3に示す。また、タイと日本の家電輸出入量は文献・統計データから得られた。ベトナムにおいては2010年の需要データはあったが、輸出入量の内訳に関する情報がなかった。そのため、2006年の輸出入量の比率を2010年にそのまま適用できると仮定して推算した。

2.5.4 再生資源使用率のシナリオ設定

TMR削減量を求める上で、再生資源使用率を変えたシナリオを3つ設定し、それを表2に示す。再生資源使用率とは、ある製品からリサイクルされた素材のうち、同一製品に再利用された割合を意味する。シナリオ1では各国の家電重要な全てを、家電の素材リサイクルによって得られた再生資源を使用した場合、つまり、家電素材のリサイクルによるTMR削減量の最大値（TMR削減ポテンシャル量）を想定する。シナリオ2では、経済産業省が報告している日本における各素材の再生資源使用率²¹⁾がタイやベトナムでも達成されているとしたシナリオを立てた。このシナリオは、日本の生産製品だけでなく、日本が輸入しているタイ・ベトナム製製品、タイやベトナムの生産、輸入製品の再生資源使用率が現在の日本程度に向上した場合を想定している。シナリオ3では、現状値として、日本の国内生産製品およびタイ・ベトナムの日本からの輸入製品に再生資源使用率の日本国内報告値、そして日本の（タイ・ベトナムからの）輸入製品およびタイ・ベトナムの国内製品の素材は自然鉱石由来と仮定した。タイやベトナムにおいて、再生資源を使用して家電を生産している可能性は否定できないが、そのデータの入手が困難であったため、シナリオ3では0%と考え分析を行った。

図3 2010年のタイ・ベトナム・日本の家電需要

表2 再生資源使用率(%)のシナリオ

シナリオ1

	日本		タイ		ベトナム	
	生産製品	輸入製品	生産製品	輸入製品	生産製品	輸入製品
鉄	100%	100%	100%	100%	100%	100%
銅	100%	100%	100%	100%	100%	100%
アルミニウム	100%	100%	100%	100%	100%	100%
プラスチック	100%	100%	100%	100%	100%	100%

シナリオ2

	日本		タイ		ベトナム	
	生産製品	輸入製品	生産製品	輸入製品	生産製品	輸入製品
鉄	25%	25%	25%	25%	25%	25%
銅	24%	24%	24%	24%	24%	24%
アルミニウム	29%	29%	29%	29%	29%	29%
プラスチック	2.6%	2.6%	2.6%	2.6%	2.6%	2.6%

シナリオ3

	日本		タイ		ベトナム	
	生産製品	輸入製品	生産製品	輸入製品	生産製品	輸入製品
鉄	25%	0%	0%	25%	0%	25%
銅	24%	0%	0%	24%	0%	24%
アルミニウム	29%	0%	0%	29%	0%	29%
プラスチック	2.6%	0%	0%	2.6%	0%	2.6%

3. 結果および考察

3.1 TMR削減量の推算結果と各国の傾向

家電の素材リサイクルによるTMR削減量の推算結果を図4(製品種別で内訳を整理したもの)、図5(素材で内訳を整理したもの)、表3(図5において各素材の占める割合を示したもの)に示す。初めに、シナリオ毎の各国比較(図4・5)を行うと、各国の年間のTMR削減ポテンシャル量(シナリオ1)は、日本が 43×10^6 t-TMR、タイが 8.5×10^6 t-TMR、ベトナムが 10.6×10^6 t-TMRとなった。日本のシナリオ3におけるTMR削減量は 4.3×10^6 t-TMRであるため、TMR削減ポテンシャル量の10%を達成できていることが分かる。タイに関しては、家電製品の輸入が少ないため、シナリオ3ではTMR削減効果が 0.01×10^6 tと低い結果となった。一方、ベトナムは家電製品、特にエアコンの輸入量が多いため、シナリオ3、つまり現状のTMR削減効果は 1.8×10^6 t-TMRと、タイより大きい結果となった。また、シナリオ2の結果から、自国で生産する家電製品の再生資源使用率を日本と同程度に向上させることで、タイは 1.9×10^6 t-TMR、ベトナムは 2.4×10^6 t-TMRまでTMR削減量が増加し、それはそれぞれの最大年間TMR削減ポテンシャル量(シナリオ1)の22%、23%に相当する。

さらに、タイは、シナリオ2で見られるように自国製の家電素材の再生資源使用率を日本程度に向上させることで、TMR削減量を現状(シナリオ3)の190倍も増加できることが示唆された。

3.2 製品別のTMR削減量比較

次に、製品別(図4)にみると、3カ国とも、エアコンのリサイクルによるTMR削減効果が最も大きいことが示されたが、特に、日本においては、その比率が全体の半分以上を占めている。タイやベトナムにおいては、冷蔵庫のリサイクルによるTMR削減ポテンシャル量もエアコンと同程度に大きい結果となった。その理由として、エアコンや冷蔵庫はテレビや洗濯機と比べて銅を多く含んでいるためである。自然鉱石由来の銅のTMR(自然鉱石TMR)は360 kg-TMR/kgであるが、都市鉱石から銅を得た場合のTMR(都市鉱石TMR)は約24 kg-TMR/kgであり、その差は10倍以上である。金も自然鉱石TMRと都市鉱石TMRの差は大きい、使用量まで考慮すると銅のリサイクル効果の方が大きい。この差がエアコンのリサイクルによるTMR削減効果を大きくさせたと考えられる。

図4 年間TMR削減量の推算結果1

図5 年間TMR削減量の推算結果2

表3 ポテンシャル量における各元素の割合

	日本	タイ	ベトナム
鉄	76%	74%	73%
銅	9.1%	11.0%	11.0%
アルミニウム	7.4%	6.3%	6.1%
プラスチック	7.3%	8.2%	9.3%

3.3 素材別のTMR削減量比較

TMR削減量を素材別分析した結果（図5）および各元素が占める割合（表3）より、家電全体を通してやはり銅のリサイクルによるTMR削減効果が3ヵ国を通じて大きい事が分かる。すなわちそのポテンシャル量の7割（日本76%, タイ74%, ベトナム73%）を超えており、その影響

は支配的である。すなわち、TMRの視点からはまず銅を如何に回収し、それを元の製品に戻せるようなシステムを構築できるかについて検討することが重要である。他の素材に関しては、日本では鉄、アルミニウム、プラスチックの順にTMR削減効果が大きい、タイとベトナムでは鉄、プラスチック、アルミニウムの順となり、タイやベトナムは、日本と比較してプラスチックのリサイクルによるTMR削減効果が高いという結果になった。

3.4 TMRの視点からみた対策

筆者のフィールド調査によれば、ベトナムにおいて銅は回収されているが、品位の高いものは中国に輸出されており、高品位銅の自国内へのフローは少ない。品位の低い一部の銅は国内のリサイクル村で合法・違法にリサイクル

されているが、その技術力は低い。著者が現地で回収した低品位リサイクル銅の組成を分析したところ、銅は80～85%程度しか含まれていなかった。Daigoらの報告²²⁾にもあるように、ベトナムにおける鉄スクラップは手解体により精緻選別が行われている。このプロセスを銅にもさらに応用し、国内非鉄製錬における素材リサイクルを向上させることが重要と思われる。これは手解体に関わるTMRは一般的に機械解体よりも低く単位重量辺りのTMR削減量が多いこと、そして国内の同一製品への再利用の相乗効果が見込めるからである。

日本では、人力ではなく破砕機といった機械の導入により、タイやベトナムに比べ大規模に素材リサイクルが行われている⁵⁾。ただし、家電製品への再利用はそれほど進んでいない上述のように、現状のTMR削減量が10%に留まるのは、同一製品への再利用がそれほど進んでいないことに起因する。家電製品に使用しなくともリサイクルは重要であるが、水平リサイクルを行うことが重要である。近年、迅速蛍光X線装置等を用いることで高度な素材選別のための技術基盤が進みつつあり、家電 to 家電の素材リサイクルが期待される。

3.5 本研究の課題と展望

本研究では、シナリオ2や3において比較的強い仮定を用いた。実際には、現状の日本においては家電から家電への直接的な素材リサイクル（特に金属）は、シナリオ3の仮定ほどは達成されていないと想定される。また、タイやベトナムの機械を用いたりリサイクル工程については、日本における製造過程を仮定しているが、一部を除いてそこまでの技術力はないものと推察される。また、シナリオ2や3において、ベトナムやタイは日本からの輸入製品のみとしているが、実際には中国や韓国からの輸入もあり、ベトナムにおいては近年タイからの輸入が増えているという著者のヒアリング結果もある。

このような問題はあがあるが、それでも各シナリオは各国のリサイクルシステムの今後の遷移過程におけるスナップショットの一部を示していると思われる。著者は日本におけるTMR削減ポテンシャル量（シナリオ1に相当）を、携帯電話、PC、自動車、建築物、家電製品について推算しているが²³⁾、これらの中で家電製品、建築物、自動車が大きく、中でも家電製品が最も削減ポテンシャル量が高かった。同様の傾向がタイやベトナム、ひいては東南アジア諸国でも見られるかを調査することは、これらの国々のリサイクル戦略を考える上で重要な課題になると考えられる。

4. 結論

本研究では、家電製品の素材リサイクルによる年間

TMR削減ポテンシャル量の推算を行った。各国の最大TMR削減ポテンシャル量は日本で 43×10^6 t-TMR、タイで 8.5×10^6 t-TMR、ベトナムで 10.6×10^6 t-TMRとなった。更に、タイ・ベトナムにおいて、再生資源使用率を日本と同程度まで向上させることで、最大TMR削減量の22%、23%まで達成することができることが示唆された。製品別では、3ヵ国ともエアコンのリサイクルによるTMR削減量が大きかった。特に銅のTMR削減効果が大きかったため、銅の適切な回収・処理が重要であることが示唆された。

謝辞

本研究の一部は、(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費(S-16)、および科学研究費補助金基盤研究B(15H02862および15H02860)による助成の下、遂行されました。ここに謝意を表します。

(平成29年6月28日受付、平成29年10月20日採択)

参考文献

- 1) United Nations University, The Global E-waste Monitor 2014, United Nations University ホームページ, 入手先 <<https://i.unu.edu/media/unu.edu/news/52624/UNU-1stGlobal-E-Waste-Monitor-2014-small.pdf>>, (参照 2017-9-1)
- 2) United Nations University, Regional E-waste Monitor East and Southeast Asia, E-waste Monitor ホームページ, 入手先 <<http://ewastemonitor.info/pdf/Regional-E-Waste-Monitor.pdf>>, (参照 2017-9-1)
- 3) Yamasue E., Cravioto J., Quang N.D., Oguchi M., Daigo I. (2017): Procedia CIRP, (61), 152-154
- 4) Cravioto J., Yasunaga R., Yamasue E. (2017): Procedia CIRP (66), 657-662
- 5) 山末英嗣, 南埜良太, 醍醐市朗, 奥村英之, 石原慶一 (2010): 日本金属学会誌, 74(12), 811-819
- 6) 南埜良太, 山末英嗣, 中島謙一, 村上進亮, 奥村英之, 石原慶一 (2010): 日本LCA学会誌, 6(3), 251-258
- 7) 中島謙一, 井原清, 原田幸明 (2009): NIMS-EMC 材料環境情報データ資源重量, 40pp.
- 8) 独立行政法人産業技術総合研究所, 社団法人産業環境管理協会, JEMAI-LCA Pro, オプションデータパック, 東京, 社団法人 産業環境管理協会, (更新 2006-04-24)
- 9) 経済産業省, 経済産業省生産動態統計, 統計年報機械統計編, 入手先 <http://www.meti.go.jp/statistics/tyo/seidou/result/ichiran/08_seidou.html>, (参照 2017-6-14)
- 10) GENERAL STATISTICS OFFICE of VIET NAM, statistical data, 入手先 <<http://www.gso.gov.vn/>>

- Default_en.aspx?tabid=766>, (参照 2017-6-14)
- 11) Euromonitor International, Consumer Appliances-Vietnam, Euromonitor International: Country Market Insight February 2011, BSCホームページ, 入手先 <<https://bsc.com.vn/Report/ReportFile/2224>>, (参照 2017-6-14)
 - 12) URENCO (2007): the Development of E-waste Inventory in Vietnam, 175pp.
 - 13) Mecon Project, Deliverable Report for Mecon Project Task2 Market Survey, Mecon Project ホームページ, 入手先 <[http://www.meconproject.com/wp-content/uploads/report/\[Task%20Market%20survey\]%20Cambodia%20country%20report.pdf](http://www.meconproject.com/wp-content/uploads/report/[Task%20Market%20survey]%20Cambodia%20country%20report.pdf)>, (参照 2017-6-14)
 - 14) Yamasue E., Nakajima K., Daigo I., Hashimoto S., Okumura H., Ishihara K. N. (2007): Mater. Trans., 48, 2353-2357
 - 15) 株式会社エックス都市研究所・JICA, アジア地域マレーシア及び近隣国E-waste管理に関する情報収集・確認調査 ファイナル・レポート 平成26年7月 (2014年), JICA Reportホームページ, 入手先 <<http://open-jicareport.jica.go.jp/pdf/12154571.pdf>>, (参照 2017-6-14)
 - 16) 佐々木創 (2005): 廃棄物学会研究発表会講演論文集, 16(1), 132-134
 - 17) 経済産業省, 日本磁力選鉱株式会社 (2014): ベトナムにおける電気電子機器廃棄物のリサイクル事業に関する実施可能性調査報告書 平成25年10月, 98pp.
 - 18) 経済産業省 (2013): 平成23年度インフラ・システム輸出促進調査等委託費, タイ国における電気電子機器廃棄物のリサイクル事業に関する実施可能性報告書 平成24年2月, 126pp.
 - 19) Yoshida A., Terazono A., Ballesteros Jr. F.C., Nguyen Duc-Q., Sukandar S., Kojima M., Sakata S. (2016): Resources, Conservation and Recycling, 106, 48-58
 - 20) SEA-DISTANCES.ORG, SEA-DISTANCES.ORG ホームページ, 入手先 <<http://www.sea-distances.org/>>, (参照 2017-6-14)
 - 21) 環境省, 平成26年度低炭素型3R技術・システム実証事業報告書, 参考資料4, 環境省ホームページ, 入手先 <<https://www.env.go.jp/recycle/car/material5.html>>, (参照 2017-6-14)
 - 22) Daigo I., Fujimura L., Hayashi H., Yamasue E., Ohta S., Huy T.D., Goto Y. (2017): ISIJ International, 57 (2), 388-393
 - 23) 山末英嗣, 橋本征二 (2012): 金属, 82(7), 585-588

[Research Article]

Potential Evaluation of Total Materials Requirement Reduction by Materials Recycling of Home Appliances in Southeast Asia

Eiji YAMASUE^{1,*}, Reika YASUNAGA², Jordi CRAVIOTO¹,
Tran Duc HUY³ and Duc-Quang NGUYEN³

1 Ritsumeikan University; 2 Kyoto University; 3 Hanoi University of Science and Technology

*Corresponding author: yamasue@fc.ritsumei.ac.jp

Synopsis: This study estimated potential amount of TMR (Total Materials Requirement) reduction for home appliances (Air conditioner, Washing Machine, Refrigerator, Liquid-Crystal Television) by materials recycling for Fe, Cu, Al, and plastics in Thailand, Vietnam and Japan. The amount of TMR reduction indicates the difference between the TMR of materials obtained from natural and from recycling, so that means the effectiveness of materials recycling quantitatively. The result shows that the maximum annual TMR reductions by materials recycling are 8.5×10^6 t in Thailand, 10.6×10^6 t in Vietnam, and 43×10^6 t in Japan. Especially, recycling of air conditioner, recycling for Cu significantly contributes to the TMR reduction.

Keywords: total materials requirement; home appliances; TMR reduction; Southeast Asia; environmental impact analysis