

## 論文

# 冷蔵庫を事例とした日中間のグローバルリサイクルシステムの環境影響評価

小泉 國茂・周 瑋生

### 要旨

アジアの経済発展と共に貿易構造の多角化が進み、消費国と生産国間の資源循環量が激増している。生産国で生産され、消費国で廃棄物となった資源が、生産国に循環することによって新たな枯渇性資源採掘が抑制され、資源問題と環境問題が緩和される。枯渇性資源の最大活用を目指して、輸入廃棄物を手作業により分解・分別し、資源生産性を高めている国が中国である。この資源生産性の高さを利用して、EU、アメリカ、日本の資源廃棄物が、中国に大量に輸出されている。資源生産性を極大化し、その他の環境影響を最小化するには、環境影響を定量的に評価することが重要である。本論文では、資源生産性評価として素材別の再資源化率を用い、環境影響を大気限定ではあるが、新たに素材を製造する際に排出されるCO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>などの大気汚染物質削減量を評価基準とし、LCA（ライフサイクルアセスメント）によって評価する方法を提案した。日本に輸入された中国製廃冷蔵庫重量相当分を中国へ資源循環し、再資源化した場合を想定し、貿易形態別のモデルにより評価した結果、再資源化率は冷蔵庫1台当たり23%上昇し、大気汚染物質排出量も2倍～10倍以上削減できることが明らかになった。また、貿易形態によっては大気汚染物質削減量が低くなるモデルがあることも明らかにすることができた。

### 研究の背景と目的

本来、廃棄物処理は発生した国で処理するのが大原則であるが、枯渇性資源の有効利用面から、環境汚染防止を配慮した再資源化目的の国際間廃棄物循環システムを構築する必要性が認識され、2002年から経済産業省はアジアにおける再生資源循環システム実態把握の調査<sup>1)</sup>を開始した。G8サミットでは「3R行動計画および実施の進捗」が採択され、環境省主催の3Rイニシアティブが2005年4月末に日本で開催された<sup>2)</sup>。3Rの国際的な普及をめざし、「資源の有効利用と国際流通に起因する環境汚染の防止を両立させるためには、今後どのような社会システムの構築が必要と考えるか？」が議題の一つとなり、課題解決に向けた政策立案が望まれている。先の論文<sup>3)4)</sup>で、廃棄物輸出国、輸入国の経済面、環境面、社会倫理面、法律面について廃棄物貿易の是非についての検討を行ってきた。グローバルリサイクルシステムの是非判定評価項目の重要度に関するアンケート結果<sup>5)</sup>では、地球温暖化防止が家電リサイクル工場従事者は1位、環境専門家は2位を占めるなど大気汚染への関心度が高い。しかし、定性評価にとどまっており、政策立案に当たっては、環境影響を定量評価する必要がある。本研究では、枯渇性資源の資源生産性評価に再資源化率を用い、大気への環境影響をLCAで定量評価することを試みた。

LCA（ライフサイクルアセスメント）とは資源の採掘から、素材製造、製品の生産、使用、廃棄段階までの製品の生涯に発生する環境影響を定量的に評価する技法である。

本研究は、輸入冷蔵庫重量相当分の廃冷蔵庫部品を中国に輸出し、中国の手分解・分別を活用した場合、日本と中国の再資源化率の違いによる大気汚染排出物質（CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>）を、貿易形態別に定量評価することを目的としている。

再資源化率の向上が必要な理由を、事例を挙げて説明する。現在、世界の銅の再資源化率は20%（日本は8%）であるが、世界の人口増加、工業化の進展などによる銅の需要と、銅の静態的耐用年数（27年）とを考慮すると、概ね50年後を目指して90%にしなければならないことを示したシミュレーション結果が報告されている<sup>6)</sup>。これに

表1 冷蔵庫の再資源化率日中比較 %

素材	再資源化率		
	日本		中国
	公表値	厳格運用	
鉄	91	91	95
銅	18	18	90
ミックスメタル	19	0	0
アルミニウム	19	19	90
プラスチック	14	14	30
合計	63	45	75

対し、手作業による再資源化率を90%にすることが、特殊なケースではあるが日本でも現実に実施されている<sup>7)</sup>。

表1の再資源化率は家電製品協会の公表値は63.3%であるが、有価物のミックスメタル18.7%を再商品化率に算入している(表3参照)。ミックスメタルは鉄を主成分とし、銅などの不純物を含むため、構造材としては利用できず、重機の錘などに利用される<sup>8)</sup>。錘はセメントからも作ることができるので、枯渇性資源の有効利用の面から問題があり、銅の再資源化率の向上が望まれる。(本論文では、再商品化率、リサイクル率などの用語を引用文献に関わらず、再資源化率に統一する。)

環境影響の定量評価を試みた先行研究として、パソコンを事例としてリサイクル場所(中国と日本)と日中資源移動量の均衡モデルを織り込んだ研究<sup>9)</sup>(評価ソフトはE2-PAを使用)がある。モデル別の定量評価は本研究と同じアプローチである。資源強度を資源の可採年数で評価しているが、日中の再資源化率を同等としたこと、日中の大気排出物評価基準としてエネルギー消費効率<sup>10)</sup>を用いたことなどにより、モデル別の環境負荷に大きな差がつかず、モデル別の比較評価による優劣の判定がつけにくい結果となっている。本研究では、資源生産性に日中の再資源化率を、大気排出物評価に排出原単位を用いた結果、モデルによる環境影響差が大きくなり、比較評価がしやすいことに特徴がある。なお、今回の研究では、先に行った環境専門家、家電リサイクル工場従事者へのアンケート結果<sup>5)</sup>により、両者とも経済性を目的とした中国への廃棄物輸出は避けるべきであるとの見解を得ているので、経済性評価はしていない。

## ・グローバルリサイクルシステムの環境影響評価

### 1. グローバルリサイクルシステムの環境影響評価のステップ

- (1) 資源生産性として再資源化率を用い、中国での再資源化後の残渣発生量が最も少ない部品を選定し、素材別の再資源化重量を求める。
- (2) 貿易の多様化による環境影響を比較検討するために、4つのマテリアルフローモデルを設定する。
- (3) 日中両国のエネルギー構成の違い、公害防止設備設置率の違いによる大気汚染物質の排出原単位を算出するインベントリー分析を行う。

(4) LCAによりモデル別の環境影響のインパクト評価をする。評価に当たっては廃棄物貿易に伴う輸送による大気汚染物質排出などのマイナス評価も行う。なお、LCA評価は産業環境管理協会の評価ソフト「JEMAI-LCA」を用いた。

### 2. 対象製品の選定

表2 4家電製品の再資源化率(単位:%)

	エアコン	テレビ	冷蔵庫	洗濯機
家電製品協会 a	81(43)	78(78)	63(45)	65(53)
日本:手分解実績(本榊共進) b	93	99	75	90
差 c = b - a	12	21	12	25
中国:手分解実績(メタル経研) d	85	20	75	90
差 e = d - a	4	-58	12	25

表2の は家電リサイクル工場が2003年に再資源化した率をあらわしている<sup>11)</sup>。 は一般廃棄物業者の(株)本榊共進が、特定非営利法人“仕事悠々”の協力と東京大学生産技術研究所との共同研究で測定した手分解による再資源化率<sup>7)</sup>である。また に(社)日本メタル経済研究所の中国での調査に基づく中国家電製品の再資源化実験による再資源化率<sup>12)</sup>も併記した。( )内数値は、ミックスメタルを再資源化率に算入しない場合のデータ(計算値)である。

廃電子機器と部品の輸入を中国は、パーゼル条約で有害物質として禁止している(2001.11)。理由は、中国国内のリサイクル工場の作業環境の未整備による環境汚染予防策と言われている。日本も国内リサイクルを前提とした家電リサイクル法施行により、対象廃家電製品は輸出しにくい状況にある(2001.4)。

今回の研究では、家電リサイクル法対象の4家電製品の内、日中間の再資源化率の差が大きく、中国が輸入禁止措置をとるまで、中国で部品の一部が再資源化されていた実績もあり、実現性が高いこと、LCA計算のベースとなる信頼できる公表データが多いことから冷蔵庫を取り上げた。冷蔵庫の場合は、日中共に手分解比率は同じ結果になっているが、輸出可能な部品と素材を次に明らかにする。

ちなみに、日本では冷蔵庫の2003年総販売台数の44%は輸入品であり、内32%が中国製でその比率が高まっている<sup>13)</sup>。

表3 廃冷蔵庫の素材別再資源化率（2003年実績） 太枠内の数値は公表数値であり、他は計算値である

素材	処理重量 (計算値)	1993年 構成比	再資源化 実績重量	構成比 bの比率	再資源化率 計算値	推定手分解時 再資源化率	再資源化 可能重量
	a(トン)	(%)	b(トン)	(%)	c=b/a(%)	d(%)	e=a×d(トン)
鉄	75,279	49	68,417	70.4	90.9	95	71,515
銅	6,145	4	1,113	1.1	18.1	90	5,531
アルミニウム	1,536	1	293	0.3	19.1	90	1,382
非鉄・鉄など混合物			18,179 (イ)	18.7		90 (ロ)	16,361 (ハ)=イ×ロ
プラスチック	66,061	43	9,115	9.4	13.8	30	19,818
その他	4,609	3			0	0	0
合計	153,531	100	97,119	100	63.3	75	114,607

出典：処理重量の合計および素材別再資源化実績重量：「家電産業ハンドブックH16」家電製品協会<sup>(1)</sup>、その他、回収冷媒286.6トンがある。

### 3. 分解可能な部品の特定と素材別再資源化可能重量の算出

日本の家電リサイクル工場では再資源化率の向上が困難な部品を特定し、部品の素材別重量を試算する。結果は表4のように400L冷蔵庫（廃棄重量78.99Kg）の内、輸出可能な部品20.03Kg、再資源化可能重量17.91Kgとなった。計算のステップを示す。

家電リサイクル工場の再資源化実績から素材別の再資源化率を求める（表3・c）。

手分解時の素材別再資源化率を推定し、中国の手分解による再資源化率75%になるかを逆算により検証し、再資源化率を決定する（表3・d）。

400L冷蔵庫の取り外し可能部品別重量を求める。（表4・f）

手分解された素材別の再資源化増加重量を求める（表4・g）

以下、具体的なプロセスを説明する。表3・bは2003年に廃冷蔵庫を家電リサイクル工場が再資源化した素材別の再資源化重量である。処理重量合計（153,531トン）は公表されているが、素材別の処理重量は実測されていないので、別の公表データを用いて試算した。これらの廃冷蔵庫が10年前の1993年に生産されたものと仮定し、文献<sup>(14)</sup>付表3（1993年値）の素材別構成比を用いて素材別の処理重量を計算したものが表3のaである。aを用いて再資源化率を計算した結果の数値（63.3%）は、cのように公表値と一致することから、aの素材別処理重量が正しいことがわかる。表3の左が公表値a,bによる再資源化率cからの計算値、右が手分解時の推定再資源化率dに基づく計算値eである。推定再資源化率dが正しいことを以下検証する。

表3の素材別再資源化率をdの様に推定する。分離が容易な鉄はほぼ95%回収可能とする。プラスチックの再資源化率30%は文献<sup>(15)</sup>による。ミックスメタル18,179トン（イ）が再資源化率90%に向上したとすると、16,361トン（ハ）となる。この結果、再資源化可能重量合計は114,607トンとなるので、推定手分解再資源化率は75%（114,607/153,531）となり、実績再資源化率75%と等しくなり、素材別推定再資源化率dは正確であることがわかる。この推定再資源化率を元に分解可能な部品を特定する。

コンプレッサー（圧縮機）を手分解で分離することにより、非鉄・鉄混合物は減少し、50%の再利用率が90%に向上したとの実験結果が出ている<sup>(16)</sup>。分離可能な再資源化対象部品は、コンプレッサー、熱交換器、ファンモーター、放熱パイプ、プラスチック部品である。

表4は手分解で取り外し可能な部品の再資源化重量の計算結果である。再資源化率は表3に基づく。例えば、銅の再資源化率は表3・cでは18.1%であり、表4の400L冷蔵庫では3.18Kg×18.1%=0.58Kgが銅に再資源化され、残りの2.47Kgはミックスメタルに含まれることになる。表4は分解可能な放熱パイプ0.6Kg（銅製品）が再資源化されたとして、残りの銅が手分解で最大限の再資源化ができていないかを検証するために、素材別に割り付け試算した表である。信頼度は、文献<sup>(17)(18)(19)</sup>に正確に重量が記載されたものを大とし、研究者が文献の値を推定で按分したものを小とした。文献による冷蔵庫本体重量は梱包部品を含め85.86Kgであるが、廃棄時は梱包用の紙、木材は含まないので、400L廃冷蔵庫重量は、78.99Kgである。樹脂部品重量は、文献<sup>(15)</sup>の測定冷蔵庫重量が45Kg（手分解可能な部品重量3.5Kg）と比

表4 冷蔵庫コンプレッサー、熱交換器など、手分解で取り外し可能な樹脂部品などの素材別重量(400L冷蔵庫)

部 品	素 材	重量 (Kg) f	信頼度		備 考	再資源化 増加率 (%)	増加率 差	再資源化 増加重量 g (Kg)
			大	小				
コンプレッサー	メッキ鋼板	1.24				0⇒90	90	1.12
	その他鉄鋼	3.59			鋳鉄	0⇒90	90	3.23
	電磁鋼板	2.2			ファンモータと合計で2.96Kg(信頼度大)	0⇒90	90	1.98
	銅線(1)	0.55			銅線(1)~(4)合計1.38Kg(信頼度大)	0⇒100	100	0.55
	アルミ(1)	0.21			アルミ(1)(2)合計0.98Kgかつ明記	0⇒90	90	0.19
	樹脂	0.2				0⇒90	90	0.18
熱交換器	アルミ(2)	0.77				19⇒90	61	0.47
	銅製品(1)	0.6			銅(1)~(3)合計1.8Kg(信頼度大)	0⇒100	100	0.60
放熱パイプ	銅製品(2)	0.6			断熱材内に埋設の分解困難な放熱パイプ	0⇒0	0	0.00
	銅製品(3)	0.6			露出している分離可能な放熱パイプ	0⇒100	100	0.60
ファンモータ	銅線(2)	0.15			5~6個のファンモータ合計	0⇒100	100	0.15
	電磁鋼板	0.76			5~6個のファンモータ合計	0⇒90	90	0.68
	樹脂	0.2			その他熱可塑性樹脂1.38Kgの内数	0⇒0	0	0.00
コード	銅線(3)	0.48			露出している電源コードなど	0⇒100	100	0.48
	銅線(4)	0.2			断熱材内に埋設の分解困難な信号コード	0⇒0	0	0.00
ガスケット	PVC	1			ガスケットは本体重量の2%*	0⇒100	100	1.00
	合成ゴム(PE)	0.58				0⇒100	100	0.58
樹脂部品	PP	3.05			野菜ケース(PP合計8.55Kgの一部)**	0⇒100	100	3.05
	PS/AS	3.05			透明トレイ、透明ケース(PS合計8.71Kgの一部)	0⇒100	100	3.05
	総重量	20.03						17.91

出典：樹脂部品の使用部品名、再資源化率は「廃家電製品から解体された破砕前の成形プラスチックの材料リサイクルシステム技術の開発」<sup>15)</sup>を引用。コンプレッサーの再資源化率(50⇒90)は文献「冷蔵庫使用済コンプレッサーのリサイクル技術開発」<sup>16)</sup>の再利用率を引用。\*：ガスケット重量構成比2%は、塩化ビニル環境対策協議会HP、PVCニュース、2004.3。\*\*：プラスチック総重量34.7Kgの14%(表1参照)相当の4.78Kgはすでに再資源化されており、その他の新規部品として扱う。

較的小型な200Lクラスの冷蔵庫であり、400L冷蔵庫重量の78.99Kgから比例計算して算出した。素材別重量は文献<sup>15)</sup>の重量を基にPP、PSはほぼ同一重量とした。コンプレッサー重量は1999年データ<sup>19)</sup>を引用した。以上計算の結果、日本の家電リサイクル工場に取り外し可能な部品重量は、表4・f欄下の20.03Kgとなり重量比率は25%(=20.03/78.99)となる。再資源化重量は17.91Kg(23%)(表4・g欄下)となる。

#### 4. LCAの手順

LCAは環境影響の定量化をはかり、その大小を比較し、解釈し、報告書としてまとめる技法である。ISO14040で規格化されており、一定の手順がある。以下、手順に従い進める。

##### (1) LCAの目的

日本で発生した廃冷蔵庫を中国で再資源化する場合に、実現性のある輸出廃棄物の材質別の重量を求め、大気汚染原因物質(地球温暖化：CO<sub>2</sub>、酸性雨：SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、

光化学オキシダント：NO<sub>x</sub>)による環境影響を定量評価し、グローバルリサイクルシステムの是非判定評価に用いることである。

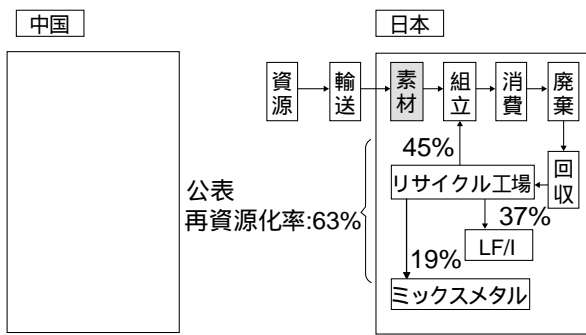
##### (2) 貿易相手国

中国に限定する。理由は日本との家電製品貿易量が最も多いこと<sup>20)</sup>、資源需要が旺盛で、日本からアジアへの鉄、銅、アルミニウムくず、廃プラ輸出の50%以上を占めていること<sup>21)</sup>、手分解によるリサイクルが産業化されていること<sup>12)</sup>などである。

##### (3) 冷蔵庫生産と貿易および再生用資源の移動形態

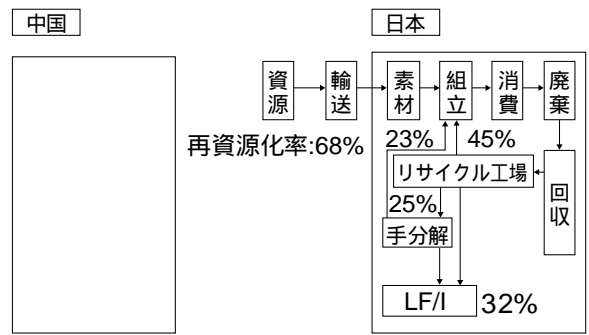
図1は2003年の家電リサイクルの実態を示したもので、45%が材料リサイクルされるが、19%はミックスメタルとして低グレードの用途にしか利用されていないことを示している。

図2の日本手分解モデルは、日本の家電リサイクル工場、冷蔵庫本体を再資源化し(45%)機械による



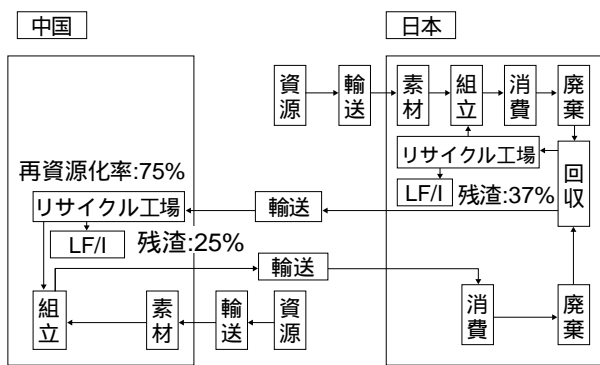
LF/I:埋め立て、焼却

図1 現状リサイクルモデル



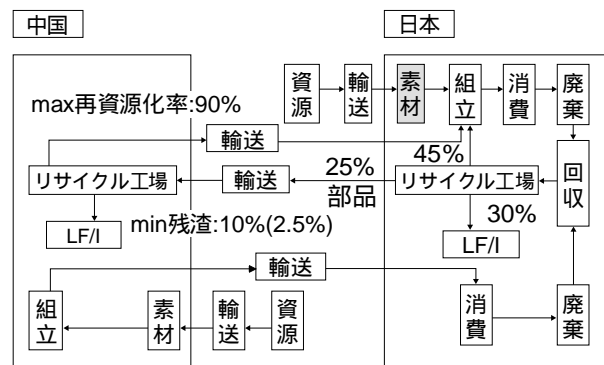
LF/I:埋め立て、焼却

図2 日本手分解モデル



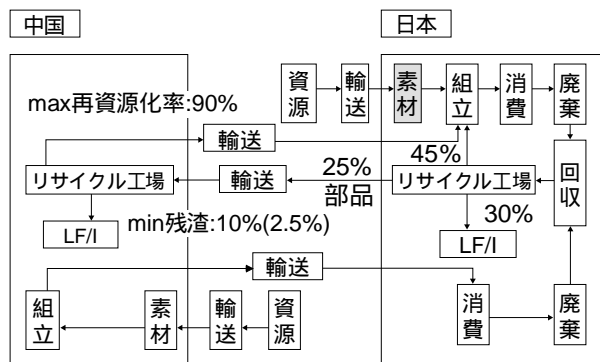
LF/I:埋め立て、焼却

図3 グローバルRS 廃家電本体輸出モデル



LF/I:埋め立て、焼却

図4 グローバルRS 中国部品輸出モデル



LF/I:埋め立て、焼却

図5 グローバルRS 再生資源逆輸入モデル

分解では、再資源化が困難な部品だけを日本の手分解再資源化工程で再資源化（23%）した時のマテリアルフローである。文献<sup>7)</sup>で紹介した“仕事悠々”は知的障害者の雇用の場を提供するNPO法人であり、一般廃棄物業者の（株）本埜共進という協力者があって再資源化率75%を実現している。日本の家電リサイクル工場に同じ機能を持った工程ができたと仮定したときのマテリアルフローモデルである。これによって再資源化率は68%に高まる。図3は、廃家電製品本体を中国に輸出

し全量を中国で再資源化するモデルである。再資源化されない残渣が25%も発生し、中国で埋め立てや焼却による環境汚染の可能性が高く、倫理面から許されるものではなく、実現性のあるモデルではないので評価対象からは外す。図4は、日本の家電リサイクル工場で45%相当分を再資源化し、前節で求めた分解可能な部品（25%相当）だけを中国で再資源化するモデルである。残渣は図3モデルに比べ、2.5%に大幅に減少するので実現性の高いモデルである。

台州市への現地調査で、廃金属の事例であるが、再資源化したアルミを中国で利用するのではなく、日本に輸出している例を見かけた。経済的原理で廃棄物の再資源化を中国に委ねた形になっている。図5の再生資源逆輸入モデルも環境影響を評価する価値がある。計算では輸出した全素材を100%逆輸入したものと計算している。

#### （4）グローバルリサイクルシステムのLCAによる環境影響評価

##### 1) グローバルリサイクルシステムモデルの設定

図1から図5までの4モデルの内、現実のビジネスと

して実現可能性の高い3モデルを取り上げ、現行の家電リサイクル工場が実施している基準モデルと合わせ、表5にまとめた。

## 2) 手分解により再商品化率が向上したときのインベントリー分析とインパクト評価

輸送距離、積載率など

システム境界を図6に示す。輸送経路と距離は、文献<sup>9)</sup>を引用し図7を設定した。海上輸送経路は東京 - 中国(2,500Km)とした。帰り便は、別の用途に使われるので、片道の距離とした(台州市でのヒアリング調査に基づく)。日本の東北のリサイクル工場から東京港へ500Km、中国から - 製鉄・精練工場へ500Kmとする。廃製品輸送には軽、4t,10t,20tトラックが使用されているが、もっとも距離の長い区間に使用される10tトラックを代表値とした。積載効率は表6を用いた。廃冷蔵庫78.99Kg × 50台 = 合計4t/10tトラックなので積載率を40%とした。PS,PP成型品はかさばるのでリサイクル工場で粉碎しフレークにした後で輸送する。粉碎に要するエネルギー消費は無視するものとした。

10tトラック軽油からのCO<sub>2</sub>排出は0.742Kg-CO<sub>2</sub>/Km<sup>17)</sup>、

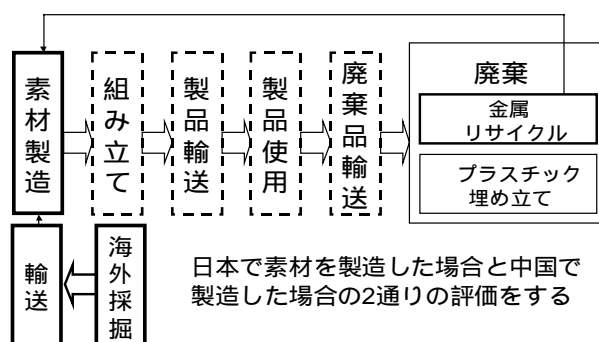


図6 冷蔵庫素材製造工程システム境界

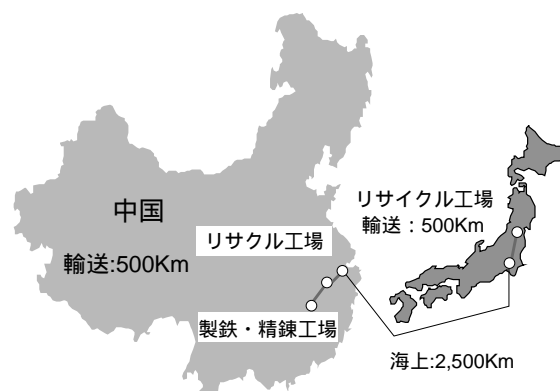


図7 輸送距離

表6 冷蔵庫の輸送に関するデータ(1台当たりの換算値)

	製品の同一地域内輸送	廃製品の同一地域内輸送
輸送手段	10tトラック	10tトラック
積載率	40%	40%
輸送距離	500Km	7.2Km

出典: 「電気冷蔵庫のLCIデータの概要」<sup>19)</sup>(社)日本電機工業会

外航バルクキャリア・C重油は0.00676Kg-CO<sub>2</sub>/t・kmである<sup>22)</sup>。なお、中国で再資源化後の残渣が発生し、残渣処分のための輸送工程、最終処分工程で大気汚染排出物が発生するが、陸上輸送、最終処分工程は日本、中国で同一と仮定すると、相対比較をしているので最後は相殺されるため、排出量のLCA評価はしていない。厳密には日本での再資源化は中国より残渣量が多くなるので差は発生する。

粗鋼と発電のSO<sub>2</sub>とNO<sub>x</sub>の排出原単位は、文献<sup>23)</sup><sup>24)</sup>などを参考にした。その他参考した文献を表7の注記に記載している。日本の樹脂生産工場のエネルギー源の80%は電力<sup>25)</sup>であることから、排出原単位を火力発電所の日中比較値(Kg/kwh)を代用し、素材別のSO<sub>2</sub>排

表5 日本で発生した中国製廃冷蔵庫の再資源化・LCA評価モデル一覧

モデル	図1		図2		図4		図5	
特徴	基準モデル(現行)		日本手分解モデル		部品輸出モデル 高実現性		再生資源逆輸入 モデル	
大気への排出原単位	日本		日本		中国		中国	
条約の抵触	合法		合法		違法		違法	
再資源化の拠点	日本	中国	日本	中国	日本	中国	日本	中国
再資源化処理比率(%)	100	0	100	0	77	23	77	23
再資源材料利用国	100	0	100	0	77	23	100	0
再資源化率(%)	45	0	68	0	45	90	45	90

(日本の再資源化率は2003年実績値: 出典 - 家電製品協会<sup>11)</sup>、中国の再資源化率は表2のメタル経済研究所などによる<sup>12)</sup>。日本の再資源化率は、ミックスメタルを再資源化率に算入しない場合のデータである。条約の抵触とは、パーゼル条約に対する評価である。

表7 日中産業別排出原単位比較 [発電の単位はKg-CO<sub>2</sub>/kwh]

産業	排出物質	CO <sub>2</sub> ( Kg-CO <sub>2</sub> /Kg )		SO <sub>2</sub> ( Kg-SO <sub>2</sub> /Kg )		NO <sub>x</sub> ( Kg-NO <sub>x</sub> /Kg )	
		日本	中国	日本	中国	日本	中国
粗鋼		1.76(1)	5.5(3.15)	0.6(1)	4.4(6.8)	1.0(1)	NA(4.5*)
発電(火力)		0.37(1)	0.60(1.62)	0.2(1)	4.9(21.4)	0.2(1)	3.9(14.2)
非鉄金属(銅、アルミなど)		1.8(1)	3.0(1.62)	NA(1)	NA(21.4)	NA(1)	NA(14.2)
化学工業(樹脂)		2.25(1)	3.6(1.62)	0.00(1)	NA(21.4)	0.00(1)	NA(14.2)

( )内は、日本の原単位を1としたときの中国の原単位の倍率、太字は数値が出典に示されていたものを示す。  
 出典：CO<sub>2</sub>：粗鋼及び樹脂（PSの場合）の原単位は日本はJEMAI-LCAデータベース、発電（電力端）および非鉄は経団連自主行動計画2001年実績、粗鋼、発電の中国の倍率は文献<sup>23)</sup>による。ただし中国の粗鋼のNO<sub>x</sub>はデータが無く（\*倍率）は、発電所のSO<sub>2</sub>データを利用し、6.8×14.2/21.4=4.5で計算した。SO<sub>2</sub>,NO<sub>x</sub>：非鉄金属、樹脂（PS）の原単位は日本はJEMAI-LCAデータベース。銅、アルミは品種別により異なる（表4）

表8 モデル別大気汚染物質排出削減量比較(素材製造時)/400L 廃冷蔵庫1台 単位：Kg

モデル	家電リサイクル			日本手分解			中国手分解			再生資源逆輸入		
再資源化率 %	45			68(日本45%+日本23%)			68(日本45%+中国23%)			68(日本45%+中国23%)		
再資源化国	日本			日本			中国			中国		
再生資源利用国	日本			日本			中国			日本		
排出原単位	日本			日本			中国			日本		
排出物質	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>
製造時排出削減量 a	0.000	0.000	0.000	38.140	0.061	0.055	83.385	1.115	0.698	38.140	0.061	0.055
日中間輸送時排出量 b	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.531	0.009	0.007	5.061	0.019	0.014
差し引き削減量 c=a-b	0.00	0.00	0.00	38.14	0.06	0.05	80.85	1.11	0.69	33.08	0.04	0.04

出量を日本の21.4倍、NO<sub>x</sub>排出量を14.2倍として計算した。非鉄金属業のエネルギー消費も電力に依存（電力58%、燃料42%）<sup>6)</sup>している割合が比較的高いので、電力と同じ倍率を用いた。2桁のレベル差があるのは、石炭構成が中国76.2%に対し、日本が23.1%であること、排煙脱硫装置設置率が中国2.2%に対し、日本は93.7%であること、排煙脱硝装置設置率が中国は0%、日本は79.3%であること、その他発電効率差があるためである<sup>24)</sup>。

表8に比較する4モデルの大気排出削減量の計算結果を示した。結果は最下段の数値cである。最下段は、日本から中国への廃棄物輸送による大気汚染の環境負荷bを差し引いたものである。従って、この数値cが新たに素材を採掘・輸送・製造するときに発生する400Lクラス冷蔵庫の大気汚染排出削減可能量である。

### 5. 総合評価

表8の計算結果を図8,9,10のグラフに示した。本論文では再資源化によって得られた再生資源を利用することによって、新たに資源を採取する必要が無いので、資源の採取から素材製造工程に至る大気への汚染物質排出量が削減されたものとして、削減量を比較し評価する。通常のLCA計算では、数値が高いほど環境負荷が大き

いと判定されるが、本論文では、数値の大きいほど環境負荷が低いと判定される。

#### (1) CO<sub>2</sub>排出削減量の評価

初めにCO<sub>2</sub>排出削減量についてモデル別に評価する。

図8の家電リサイクルモデルは、国内の家電リサイクル工場だけで再資源化する再資源化率45%のベースモデルである。45%以上の再資源化が可能な他モデルと比較する時の基準となるので0としている。

日本手分解モデルは、日本の家電リサイクル工場で、冷蔵庫本体を再資源化し（45%）、残りの中から分解可能な部品だけを手分解再資源化工程で再資源化（23%）した時のCO<sub>2</sub>排出削減量である。CO<sub>2</sub>排出原単位は日本の数値を利用している。家電リサイクル工場よりもCO<sub>2</sub>排出削減量は高くなる。

中国手分解モデルは、再資源化した素材重量分を中国で製造する必要がなくなり、日本の手分解モデルと同じ重量の再資源材料を得られるが、中国の排出原単位を用いたため、38 Kg-CO<sub>2</sub>が81 Kg-CO<sub>2</sub>に2.1倍に増加している。

再生資源逆輸入モデルは、日本の原単位による恩恵しか蒙らないので、に比べて排出削減量は、33 Kg-CO<sub>2</sub>

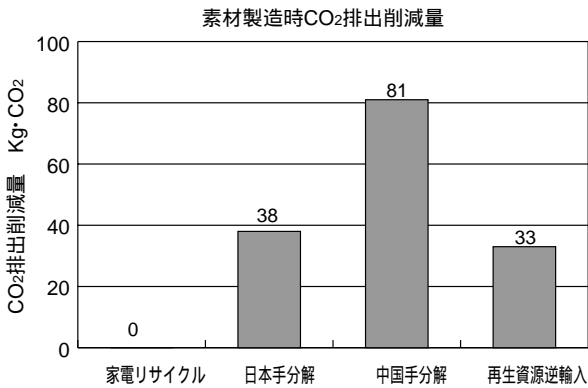


図8 モデル別大気汚染削減量 (CO<sub>2</sub>)

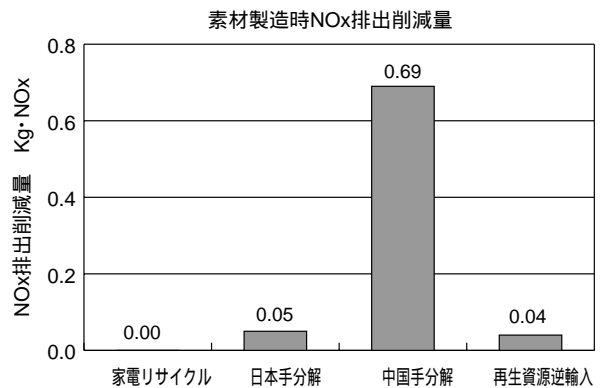


図10 モデル別大気汚染削減量 (NO<sub>x</sub>)

に低下する。中国への廃棄物、再生資源の搬送に要するエネルギー消費の分だけ、日本の手分解モデルよりも排出削減量は低下する。

(2) SO<sub>2</sub>,NO<sub>x</sub>削減量

図9、図10のように、酸性雨発生原因物質のSO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>は産業分野では、中国の電力構成が石炭中心であること、排煙脱硫装置、脱硝装置の装備率が低いこともあって、日本で再資源化するよりも中国で再資源化材料を利用することによって26倍もの大きな排出削減量が得られる。光化学オキシダント発生原因物質のNO<sub>x</sub>も同じく20倍もの大きな排出削減量となる。逆輸入モデルでは、中国で枯渇性資源から素材を製造しなければならないので、地球の大気環境への負荷削減効果が少ない。そのうえ、日中間輸送によるエネルギー消費によって日本の手分解モデルよりもSO<sub>2</sub>,NO<sub>x</sub>排出削減効果は低下する。

である。いったん日本で廃冷蔵庫部品を取りはずした後、中国へ輸出し、手分解し、得られた材料を中国で利用することが、枯渇性資源の最大活用でも、大気汚染物質発生抑制でも最も効果が高いことを明らかにすることができた。図5の中国から日本に再生資源を逆輸入するモデルは、資源生産性の面からは評価できるとしても、地球温暖化、酸性雨、光化学オキシダント原因物質排出抑制には余り貢献しないことも判明した。ドイツのBASF社は、経済性、環境性を2次元のポートフォリオで評価する試みをしている<sup>27)</sup>。今回は経済性評価はしていないが、物理的実現性のある3モデルだけを比較し、環境負荷を資源生産性、大気環境への負荷に関するポートフォリオで評価すると図11のようになる。現状家電リサイクルモデルや日本手分解モデルの大気環境への負荷が大きいのは、このモデルを中国の大気環境負荷で計算したためであって、日本の家電リサイクル工場の再資源化に要する大気環境負荷が大きい訳ではない。

4. 資源生産性とインパクト評価のまとめ

地球環境にとってメリットの大きいモデルは、図4

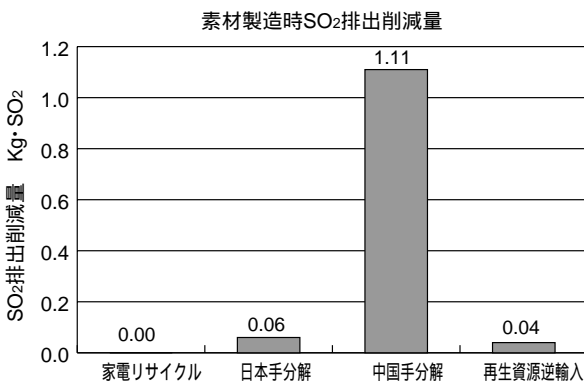


図9 モデル別大気汚染削減量 (SO<sub>2</sub>)

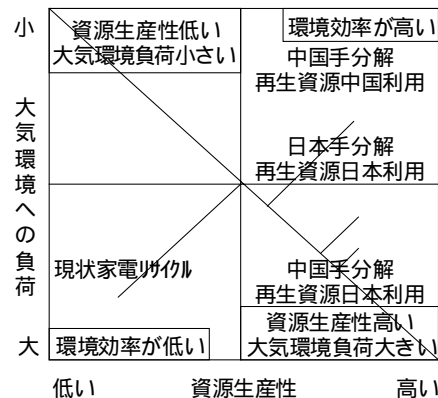


図11 廃冷蔵庫処理環境負荷効率ポートフォリオ



## ・成果のまとめと今後の課題

### 1. 研究の成果

今回の研究の成果をまとめると以下ようになる。

(1) グローバルリサイクルシステムの環境影響の定量評価として、資源生産性に再資源化率を、大気への環境影響評価にLCAを用いた評価手法が提案できた。

(2) 実際に廃冷蔵庫の再資源化に適用すると機械による分解方式と手分解方式の違い、および日中間の大気汚染物質排出削減量に関するモデル別の比較評価が可能で、この評価手法が有効であることが分かった。

### 2. 今後の課題

日本の手分解モデルでも、68%の再資源化が可能である。敢えて中国で再資源化を奨めるのは、人件費の差による実現性であるが、人件費の差だけを利用した中国での再資源化は環境汚染リスクがあり実現性は少ない。中国は廃電気・電子機器の不法投棄の発覚を契機として、廃冷蔵庫を含む廃家電製品の輸入を禁じている。中国国内のリサイクル業者、廃棄物処理業者の技術レベルが低く、環境面への十分な配慮ができないためである<sup>28)</sup>。資源生産性、大気への排出物質のLCA評価は地球環境問題に関係する評価であるが、不法投棄などの環境面への配慮に関する環境影響評価は、今回の論文では明らかにしていない。現実のビジネスでは、中国製と日本製冷蔵庫部品をどのように区分管理するかなどの問題もある。地球益を考えれば、再資源化率の高さを活かして、日本製冷蔵庫も含め、部品全量を中国で再資源化するとの考え方も出てこよう。

汚染リスクの無いグローバルリサイクルシステムを構築するには、日本から輸出する廃棄物の物性、出荷状態、陸上輸送、港湾の保管、港湾の荷役、海上輸送、リサイクル工場に至るサプライチェーン全てに渡り、環境汚染リスクを排除する仕組みの構築が欠かせない。家電リサイクル法により、日本国内の廃冷蔵庫のサプライチェーンは、日本のリサイクル工場入庫段階の環境汚染性を保証する仕組みが確立されている。一方で、世界の廃機械などが中国に大量に輸入されており、廃油汚染などが懸念される。これらの廃棄物を含めた安心できるグローバルリサイクルシステムのサプライチェーン構築に関する評価研究を次の課題としたい。

謝辞：本研究は文部科学省の助成により行われたものであり、ここで記して謝辞を述べたい。

### 参考文献

- 1) 「持続可能なアジア循環型経済社会圏の実現へ向けて」経済産業省、H16.10、産業構造審議会、環境部会廃棄物・リサイクル小委員会、国際資源循環ワーキング・グループ
- 2) 3R イニシアティブ、<http://www.env.go.jp/earth/3r/>
- 3) 「廃棄物のグローバルリサイクルシステム」小泉國茂他、立命館大学・政策科学、11巻1号、P43-49、2003.9
- 4) 「古紙輸出の経済的評価と環境影響評価」小泉國茂他、立命館大学・政策科学、11巻2号、P35-44、2004.1
- 5) 「廃棄物のグローバルリサイクルシステムに関するAHP（階層分析法）による評価」小泉國茂他、政策科学、12巻2号、P23-30、2005.1
- 6) 「循環型社会に向けた銅資源リサイクル推進の必要性に関する研究」時松宏治、小杉隆信ら、環境経済・政策学会、予講集、H16。
- 7) 「本塾共進のコンセプト」パンフレット及び朝日新聞「くらし」平成15年2月3日
- 8) 重機への利用は、松下冷機株式会社へのヒアリングによる。
- 9) 「グローバル循環システムに関する調査研究」報告書、代表研究者・中村尚正、放送大学、機械システム振興協会、委託先：製造科学技術センター、P26-53、H16.3
- 10) 「中国の省エネルギー潜在力」沈 中元、(財)日本エネルギー経済研究所、IEEJ、P1-14、2003.7
- 11) 「家電産業ハンドブック・2004年版」(財)家電製品協会、P248
- 12) 「日本及び中国の含銅廃棄物にかかるリサイクルのための最適化の調査・研究」(社)メタル経済研究所、H16.3、P104
- 13) 「家電産業ハンドブック・2004年版」(財)家電製品協会、P194
- 14) 「家電リサイクル法 - 特定家庭用機器再商品化法」 - 中央法規、P93、表3、2000.3
- 15) 「廃家電製品から解体された破砕前の成形プラスチックのマテリアルリサイクルシステム技術の開発」(株)日立製作所、H14.4
- 16) 「冷蔵庫使用済コンプレッサーのリサイクル技術開発」松下冷機(株)、2002年12月(経済産業省・廃棄物等用途開発・拡大実施事業、平成14年度の1テーマ)。
- 17) 「冷蔵庫のライフサイクルインベントリー」エネルギー使用合理化手法国際調査小委員会、環境管理、Vol.31、No6 (1995) P91-97
- 18) 「家電製品のライフサイクルアセスメントの実施とその問題点」稲葉 敦、環境管理、Vol.32、No9 (1996) P68-80
- 19) 「電気冷蔵庫のLCIデータの概要」(社)日本電機工業会平成15年1月30日、「(「自主的提供データに関する報告書の作成マニュアル」(社)産業環境管理協会、2004年7月1日、

- P7-14)
- 20)「家電産業ハンドブック・2004年版」(財)家電製品協会、P196-197
- 21)「アジアリサイクル最前線」経済産業省産業技術環境局リサイクル推進課編、(財)経済産業調査会、P213-217、H17.3
- 22)「LCA実務入門」(社)産業環境管理協会、P92、表3
- 23)「日中比較から見た技術移転による省エネとCO<sub>2</sub>削減ポテンシャル」周 瑋生・立命館大学・政策科学・9巻2号、P49
- 24)「東アジア地域における環境問題、技術移転に関する調査研究報告書」(社)日本機械工業連合会、(財)国際環境技術移転研究センター、H16.3、P93～96
- 25)「三菱樹脂・2004環境報告書」地球温暖化防止、エネルギー原単位
- 26)「古河電工・環境報告書2004」古河電工の環境負荷
- 27)「Die Ökoeffizienz-Analyse der BASF」November 2000
- 28)「グローバル循環システムに関する調査研究」報告書、代表研究者・中村尚正、放送大学、機械システム振興協会、委託先：製造科学技術センター、P7、H16.3