上 野 潔

(財)家電製品協会

吉 田 卓 弥

(株)日立製作所

キーワード

リサイクル, 廃家電製品, 環境負荷, ライフサイクルアセスメント

1. はじめに

1998年5月末に「特定家庭用機器再商品化法」(家電リサイクル法)が成立した。本稿では家電リサイクルの現状と課題から、現在実証中のリサイクルプラントの設計思想と、これによる環境負荷低減の予測、今後の持続的な開発の展望を述べる。

2. 家電製品のリサイクルの現状

2.1 回収システムの実態

1年間に家庭から排出される使用済み家電製品(廃家電品)は、推計で約65万トン(約1,800万台)と言われている。その内約8割を家電販売店、約2割を自治体が回収し、最終的には約6割を民間の処理業者が、約4割を自治体が処理している⁽¹⁾。収集された使用済み家電製品は一般にシュレッダーと呼ばれる破砕機で細かく砕かれ、鉄等の金属を有価物として回収後、残ったシュレッダーダストを廃棄物最終処分場に埋め立てられている。しかし有価物を回収せずに埋立てられることも多く、現在の処理水準は十分高いとはいえない⁽²⁾。

2.2 特定家庭用機器再商品化法(家電リサイクル法)

厚生省および通商産業省、環境庁により国会に上程されていた「特定家庭用機器再商品化法」(家電リサイクル法)

が1998年5月29日に可決され成立した。本法は使用済み家電製品の処理責任と費用をメーカーと消費者で次のように分担するもので、使用済み家電製品重量のおよそ8割を占める冷蔵庫、洗濯機、エアコン、テレビの大型4品目を当面の対象品目に、2001年から施行される見込みである。

- 1) 使用済み製品の引取り義務(メーカー)
- 2) 引取った製品のリサイクル義務(メーカー)
- 3) 処理コストの負担(消費者)

3. 家電リサイクルの技術的課題

リサイクル技術からみた家電製品は、構成部材の面から次のような特徴をもつ。第一はテレビのブラウン管、冷蔵庫のフロン使用コンプレッサのような環境影響物質を含有するパーツの存在である。第二はプラスチックの使用比率が高いことで、これは電気絶縁性などの安全性や、高機能化、軽量化などの目的によるものである。第三は容積が嵩張ることである。家電主要4品目ごとのこれらの特徴と、そこから求められるリサイクル技術のポイントをまとめて表1に示す。テレビは、鉛ガラスを含むブラウン管と、はんだづけ部分を含む大型プリント基板、プラスチック製筐体などが存在するため、リサイクルに際しては、本体を解体してこれらの主要パーツに分離後、それぞれを処理することが有効である。冷蔵庫は、製品重量の約6割を占める

表1 リサイクル技術からみた家電製品の特徴の一例

	構成部材上の特徴	リサイクルのポイント
テレビ 平均重量: 25kg 平均使用年数: 9.2年	鉛ガラス含有ブラウン管(57%) * 大型のプリント基板とはんだ * プラスチック、木材構成部(23%) 鉄(10%), 銅・アルミ(5%)	テレビの解体 ブラウン管の取り外し ブラウン管ガラスの分割とカレット化 大型基板の処理
冷蔵庫 平均重量: 60kg 平均使用年数: 11.6年	フロン、断熱材ウレタン、コンプレッサ プラスチック構成部(40%) * 鉄(50%), 銅・アルミ(7%)	冷媒フロン・オイルの回収 断熱材ウレタンの処理 コンプレッサの処理
洗濯機 平均重量: 25kg	モータ、鉄(53%) * プラスチック構成部(36%)	モータ部の処理 バルンサー(塩水)の処理
エアコン 平均重量: 51kg 平均使用年数: 8.3年	フロン、ファンモータ、コンプレッサ プラスチック構成部(11%) * 鉄(55%), 銅(17%)アルミ(7%)	冷媒フロン・オイルの回収 コンプレッサの処理 銅・アルミの分離

*括弧内数値は、素材別重量比率で1982年製品の事例。 *経済企画庁「消費動向調査」(平成9年1～3月期)による。

Improving Environmental Performance through Recycling Electric Home Appliances.

By Kiyoshi Ueno (Association for Electric Home Appliances) & Takuya Yoshida (Hitachi Ltd.).

図1 家電リサイクル実証プラントの外観図

金属類の中に強固で破碎困難なコンプレッサが存在し、この中に冷媒フロンが使用されている。また筐体の断熱材であるウレタン中に発泡材フロンが使用されている。このため、はじめに冷媒フロンを抜き取るとともに、コンプレッサを筐体から解体分離し、残りの筐体に対して、発泡材フロンを回収すると同時に鉄・非鉄金属類も分離回収できるよう処理することがポイントとなる。洗濯機は、破碎機を傷めやすいモータの他に、バランサーとして塩水などを含んでいる。したがってこれらを解体分離したのちそれぞれ処理するのが合理的となる。エアコンは、強固なコンプレッサおよび冷媒フロンを用いるとともに、熱交換部に高品位の銅・アルミを使用している。このため、冷蔵庫と同様に冷媒フロンを回収してコンプレッサを分離し、熱交換器の銅・アルミを高効率に分離することが望まれる。リサイクルプラントの開発では以上のポイントを踏まえて処理技術を展開し、システムを構築することになる。

4. 家電リサイクル実証プラントの構想と設計

4.1 実証プラントの概要

(財)家電製品協会は1995年度より4年計画で通商産業省国庫補助事業「廃家電品一貫処理リサイクルシステム開発」を進めており、1998年4月に「家電リサイクル実証プラント」を茨城県那珂郡那珂町向山に建設した(図1)。実証プラントは表2に概要を示すように大型4品目(テレビ、冷蔵庫、洗濯機、エアコン)を対象に年間約15万台(240日、6時間稼働)を処理する公称能力をもち、1998年4月から1年間の実証試験を実施中である。

実証プラントの開発目的は、マテリアルリサイクル理念の実証研究を通じて、使用済み家電品の受入から有価物回収までの一貫処理システムを構築するとともに、省力的で

表2 家電リサイクル実証プラントの概要

項目	仕様概略
敷地面積	18,000平方メートル
建物総面積	6,000平方メートル
受変電設備	1,800kVA
処理対象品目	大型4家電製品
処理能力	テレビ 35台/h 洗濯機 27台/h 冷蔵庫 25台/h エアコン 17台/h
従業員	定常運転時: 40名

安全かつ効率的なリサイクルを実現することにある。設計に際しては、実験設備として多様な実験目的に応じられるよう各ラインをフレキシブルかつコンパクトに仕ただけでなく、公害防止及び実験従事者のアメニティー面も十分に配慮し防音・防塵・防臭など徹底的に対策を施した。また普及啓発のための見学者用通路等の設備も充実させている。

4.2 処理工程と技術開発

一貫処理実証プラントの全体プロセスフローを図2に示す。プロセスの構成は、前述のリサイクルの課題とポイント(表1)にもとづいて、必要となる技術を各家電製品に個別または共通的に適用してプラントレベルに展開したものとなっている。要素技術にはAI利用システムや、低温破碎工程、ブラウン管処理技術などの新技術を適用する一方で、破碎や磁力選別、風力選別などの既存技術も研究により改良を加えて活用している。各技術の概要と開発委託先を表3に示す。

5. 実証試験から得られる環境影響評価予測

一貫処理システム開発プロジェクトでは、開発と並行して廃棄物循環システムのライフサイクルアセスメント(LCA: Life Cycle Assessment)を実施し、その定量評価結

図2 一貫処理実証プラントの全体プロセスフロー

表3 処理工程と開発委託先

処理工程・技術	概 要	開発委託先
(1)荷さばき・一次分解工程	家電主要4品目を搬入・識別し、それぞれの製品を分解して特定部品を取り外し。	三菱電機(株)
(2)AI利用システム	AI機能を利用して、作業や全体システム管理を省力化、自動化。	
(3)冷蔵庫処理工程	冷蔵庫筐体を破碎した後、断熱材ウレタンからフロンを回収。	日立製作所(株)
(4)低温破碎工程	非常に固い金属部品を極低温に冷却して、効率的に破碎・分離し、回収。	
(5)常温破碎工程	洗濯機やエアコンの筐体などを破碎し、材料ごとに選別・回収。	
(6)銅・アルミニウム分離工程	エアコンの熱交換器に圧延・衝撃を加え、高純度の銅とアルミニウムを選別・回収。	三菱マテリアル(株)
(7)ブラウン管処理工程	ブラウン管を分割した後、破碎・クリーニング・選別し、ブラウン管ガラスの材料として回収。	松下精工エンジニアリング(株) ソニー(株)
(8)基板はんだ回収装置	テレビのプリント基板を加熱後、ブラッシングして、はんだを回収。	ソニー(株)
(9)金属・樹脂混合物燃料 燃料化工程	前の工程で回収したプラスチックやダストを熱処理して油を回収し、この工程の燃料として再利用。	三菱マテリアル(株)
(10)全体システム評価	システム全体の有効性・経済性を評価し、システムの普及、実用化に向けての検討を行う。	日立製作所(株) 三菱マテリアル(株)

果を開発にフィードバックすることによりプロセスの環境負荷の低減を図っている。本章では、プラントの設計段階において開発プロセスの妥当性を検討するために行った環境負荷解析の結果を紹介する⁽³⁾⁽⁴⁾。

5.1 廃棄・リサイクルのライフサイクルアセスメント

ライフサイクルアセスメントは、製品等の製造から使用・廃棄に至るライフサイクルで投入された原料やエネルギーおよび環境へ排出された物質の全体を集計して環境負荷を評価する手法である。手順としては、はじめに評価目的と対象範囲を設定し、つづいてインベントリー分析およびインパクト評価と呼ばれる2つのステップで評価・解析する。従来の環境アセスメント手法では環境負荷の高い工程が目的プロセスの外部に移転されて「外部化」された場合に評価できなかったのに対して、LCAは目的プロセスに関連する外部のプロセスまで評価範囲が遡及するため、これらを取りこぼすことなく環境負荷を扱える。

本解析ではとくに、対象ライフサイクルを廃棄段階以後に絞るWMLCA (Waste-management LCA) の手法により使

用済み家電品の処理・処分・リサイクルを評価した。このようなライフサイクルを本稿では廃棄物ライフサイクルと呼ぶ。家電品の製造や使用の段階を評価範囲から除いたのは、使用済み家電品処理の視点からはこれらの段階は条件が共通で環境負荷が等しいためである。

5.2 ライフサイクルアセスメントの方法

(1)評価目的と対象範囲

開発プロセスの妥当性を検討することを目的として、一貫処理型リサイクルシステムの環境負荷を従来型の処理方式と比較した。従来型の処理方式としては典型的なものとして、破碎して鉄のみ回収する方式(シュレッダー型)と、そのまま埋立処分する方式(埋立型)を想定した。処理方式による有価物回収率やフロン分解率などの試算条件は表4の通りである。

評価対象範囲は図3に示すように使用済み家電品を処理して回収した有価物を再生し、残渣を埋立処分するまでを基本として、これに再生されなかった有価物分についてのバージン原料からの製造工程を加えた。再生されなかった

図3 廃棄物ライフサイクルと評価範囲

有価物分のバージン原料からの製造を評価に含めるのは、リサイクル率の異なるシステムの比較をする際に、その差は目的の材料を新たにバージン原料から製造するか、廃棄物からスクラップを選別回収して再生するかによって異なるためである。

表4 処理方式による有価物回収率等の試算条件

	処理方式		
	埋立型	シュレッダー型	一貫処理型
物質回収率(%)			
鉄	0	99	99
銅	0	0	95
アルミ	0	0	95
ガラス	0	0	97
CFC-11	0	0	90
CFC-12	90	90	90
フロン分解率(%)			
CFC-11	-	-	99.99
CFC-12	99.99	99.99	99.99
全体回収率(%)	0	48	90

(2) インベントリー分析の方法

図3に示したライフサイクルでの投入資源や環境排出物の各項目を集計した。用いたデータのうち、一貫処理プラントについては設計値や先行パイロットプラントのデータ等に基づいて仮定し、シュレッダープラントについては一貫処理プラントとの機器構成の比較にもとづいて設定、また埋立については文献値によった⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾。この他、資源の製造データなどは主として日本の公表値によった⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

(3) インパクト評価の方法

インベントリー分析で集計した投入・排出項目を資源枯渇や温暖化などの環境影響カテゴリーに分類して所定の影響ファクターで重み付けて合計した。用いた環境影響カテゴリーと重みづけ係数を表5に示す。エネルギー枯渇と資

源枯渇の重みづけ係数は、それぞれ化石燃料と鉱物資源の埋蔵量の逆数にもとづいており、これにより希少資源を高く重み付けるようになっている。オゾン層破壊と地球温暖化、酸性化はそれぞれ表に示すような所定の指数値を用いた⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。大気汚染の重みづけ係数は日本の環境基準値の逆数をとっている。

表5 環境影響カテゴリーと重み付け係数

影響カテゴリー	重み付け係数の定義
エネルギー枯渇	低位発熱量/可採年数 ^{*1}
資源枯渇 ^{*2}	1/可採年数
オゾン層破壊	ODP ^{*3} :オゾン層破壊ポテンシャル
地球温暖化	GWP ^{*4} :地球温暖化ポテンシャル
酸性雨	AP ^{*5} :酸性化ポテンシャル
大気汚染	1/日本環境基準
最終廃棄物	1(重量換算)

*1 可採年数=可採埋蔵量/年間消費量

*2 化石燃料を除く。 *3 Ozone Layer Depleting Potential

*4 Global Warming Potential *5 Acidification Potential

5.3 環境影響性の評価結果

インベントリー分析の結果として、処理方式による廃棄物ライフサイクルのエネルギー消費量の比較結果を図4に、最終廃棄物量の比較結果を図5に、また大気排出物量の比較結果を図6にそれぞれ示す。図4および図5から、一貫処理型のリサイクルを推進すれば廃棄物量が低減するだけでなく、廃棄物ライフサイクル全体としてのエネルギー消費量も大幅に減少することがわかる。また一貫処理型システムは大気汚染物質についても図6に示すように従来型の処理方式と比べて排出量が少ない。特にCFC-11について一貫処理型の排出量は他方式の約10分の1であり、これは一貫処理型では他方式では困難な断熱材ウレタン中のフロンの回収・分解が可能なことによっている。

図4 処理方式によるエネルギー消費量の比較

図6 処理方式による大気排出物量の比較

図5 処理方式による最終廃棄物量の比較

図7 一貫処理型と従来型の処理の各種環境影響比較

インパクト評価による各処理方式の環境影響の比較結果を図7に示す。全般的な傾向として一貫処理型ではすべてのカテゴリーにおいて従来型の処理よりも環境影響が低減する。このような一貫処理型による環境改善効果の特徴は主に次の2点に集約される。第一は資源枯渇影響と最終廃棄物の負荷が従来の処理型と比べて大幅に低減することである。一貫処理型の資源枯渇影響と最終廃棄物の負荷はいずれも埋立型の10分の1程度に低減しており、シュレッダー型と比較しても資源枯渇影響は約3分の1、最終廃棄物の負荷は約6分の1となっている。これは一貫処理プラントで物質回収率が高いことによるものである。第二はオゾン層破壊と地球温暖化の影響が従来型の処理と比べて大幅に小さいことである。一貫処理型は埋立型とシュレッダー型の双方の処理に対してオゾン層破壊の影響を約5分の1、地球温暖化の影響を約4分の1に低減している。これは前述のように一貫処理型では断熱材中のフロン回収・分解が可能であるためである。

以上は1996年度に実施した基礎評価結果である。今後実証試験によりデータを整備し本結果を検証する予定である。

6. リサイクルシステムの進化と持続可能性

リサイクルシステムの開発と評価では、①資源の有効活

用のためのリサイクル率向上、②社会経済的な実現可能性（コスト）、③循環社会を実現するための環境負荷低減、の3点が重要である。これらを総合的に評価する考え方は究極的には持続可能性(Sustainability)の概念に集約されよう。経済的側面については実証結果を待ち報告するとして、ここではプラントでの物質回収率と環境負荷の面からみた、これまでのリサイクルシステムの進化を俯瞰し、その中での一貫処理システムの位置づけを示す。

前章の結果から全体回収率と消費エネルギーの関係を改めて整理したのが図8である。ここで全体回収率とは、家電由来の最終廃棄物の発生率(埋立率)を100%から差し引いたものとした。全体回収率が埋立型の0%から、シュレッダー型の約48%、一貫処理型の約90%へと向上するにつれて、処理に要するエネルギー量自体は増加するが、処理・処分・再生/製造に関わる廃棄物ライフサイクル全体としてはエネルギー消費量はむしろ直線的に大幅に減少している。このことから、家電リサイクルの促進は社会全体を省資源化するだけでなく省エネ化にもつながるといえる。全体回収率のさらなる向上を目指す場合、図中の廃棄物ライフサイクルのエネルギー消費量が逆に増大に転じるようなリサイクル限界がある地点で現れると予想する。しかし現在の一貫処理システム開発は、全体回収率を向上しつつ全

図8 使用済み家電の処理方式の進化

体の消費エネルギー量を低減する方向に進展しており、この点で少なくとも妥当な開発路線にある。

7. 展望

家電リサイクルの取組みは、過去に製造されて現在使用期間中の製品に対するものと、今後製造される製品に対するものの二側面がある。家電品の寿命は表1に示したように概ね10年前後と長く、本稿で紹介した一貫処理実証プラントは現実には日々廃棄されるこれらの既往製品の処理を前提に開発されたものである。一方、家電製品協会では1991年から「製品アセスメントマニュアル」の形で環境に適合した設計指針やその事例集を編集してきた⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。

今後のリサイクル設計はこの両面から最適化したものへと進展しよう。そのライフサイクルシステム構築のキーとなるのが易分解性設計 (DFD: Design For Disassembly) の考え方である。DFDは廃棄時の解体分離のしやすさを指向した製品設計のことであり、その概念の構築と活用のためには実際の製品処理データの蓄積が不可欠である。本プラントの実証成果は処理技術の開発のみでなく、家電設計のDFD化に対しても新しい知見を与えるであろう⁽¹⁵⁾。

実証プラントは技術の可能性を示すための研究施設と位置づけており、竣工以来内部を関係者に公開し、既に多数の家電品の設計技術者・開発担当者にラインを視察いただいている。実験終了後は成果も公表する予定である。実用化に際してはLCAや経済的評価を通して各企業や地域の実情に合わせて技術が適用され普及すると考える。そこから家電メーカー本来の業務である、個性と創意あふれる環境適合設計(DFE: Design for Environment)への道がさらに展開することを期待する。

(平成10年8月10日受付)

文献

- (1) 厚生省, 通商産業省: 報道発表資料本文 特定家庭用機器再商品化法案について, (1998年3月)
- (2) 産業構造審議会 廃棄物処理・再資源化部会 企画小委員会「電気・電子機器リサイクル分科会」報告書, (1997年6月)
- (3) 吉田・嵐・福本・大塚・上野: 廃家電品リサイクルシステムのLCA, 日本エネルギー学会誌, (1998年11月掲載予定)
- (4) Yoshida T. et al, Waste-Life-Cycle Assessment of Used Household Appliances Recycling System, Proc. of the Third International Conference on ECOMATERIALS, September 10-12, 1997, Tsukuba, Japan
- (5) 北野・寺崎・小林・吉田: 使用済み家電製品リサイクルシステム実証試験結果, 第7回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp.404-406, (1996)
- (6) 和田・三浦・中野: リサイクル効果の定量化とその自動車リサイクルへの適用, 廃棄物学会論文誌, Vol.7, No.2, pp.49-57, (1996)
- (7) 一瀬・河田・寺岡: ごみ処理に係るエネルギーの試算, 第16回全国都市清掃研究発表会講演論文集, pp.37-39, (1995)
- (8) 未踏科学技術協会環境負担性評価調査委員会: 「環境負担性評価システム構築のための基礎調査研究」調査報告書, (1995) 等
- (9) 長井編, エコマテリアル研究会監修: 金属の資源・製錬・リサイクル, 化学工業日報社, (1996)
- (10) World Meteorological Organization : Scientific Assessment of Ozone Depletion : 1991, Global Ozone Research and Monitoring Project-Report, No.25
- (11) Houghton, J.T. , et al, Climate Change 1992, The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment, Cambridge University Press
- (12) R.Heijungs et al. : Handleiding voor Milieugeurichte Levenscyclusanalyses van Producten, Derde door de beleidscommissie geaccordeerde conceptversie, CML, TNO, B&G, (1992.5.)
- (13) 家電機器の製品アセスメント事例集, 家電製品協会, (1997年度)
- (14) 家電製品製品アセスメントマニュアル, 家電製品協会, (1994年度)
- (15) 上野: 使用済み家電製品のリサイクル処理技術, 日本機械学会誌, Vol. 101, No. 954, pp.387-389, (1998-5)

上野 潔 1944年12月25日生。1970年早稲田大学大学院機械工学専攻修士課程修了。同年三菱電機(株)入社。防衛機器, 人工衛星, 宇宙ステーション設計。1993年から環境分野に従事。環境適合設計, LCAなどを担当。1996年(財)家電製品協会に出向。リサイクルシステム開発部長(一貫処理システム開発室長併任)。

吉田卓弥 1966年4月21日生。1993年3月京都大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月(株)日立製作所入社。主として廃家電処理プラント, LCA, リサイクルシステム評価の研究開発に従事。廃棄物学会, 国際廃棄物協会(ISWA), 日本エネルギー学会の会員。