廃家電品のリサイクル

林 政 克*

* 株式会社日立製作所機械研究所

Recycling of Waste Home Appliances

Masakatsu Hayashi*

* Mechanical Engineering Research Laboratory

From the standpoint of environmental preservation, considerable interest has been generated by the recycling of manufactured goods such as home appliances. In terms of waste home appliances, there is an urgent need for an improvement in recycling rates, and laws pertaining to waste disposal have become even stricter, as well as calls for four items—refrigerators, air-conditioners, washing machines and televisions—to be designated as primary specified goods under those laws that encourage the use of recycled materials. On this background, strong calls are made for products to be developed in a way that facilitates recycling activities, as well as for the development of waste disposal techniques. In this paper, the development of products to facilitate recycling and treatment technology for waste home appliances are mentioned.

Key words : recycle system, waste home appliance, cryogenic crushing, LCA

1. はじめに

近年、廃棄物の排出量は大幅に増加し、その処理および最終処分地の不足が社会問題化している。また、近年の環境問題への関心の高まりにより、廃工業製品の適正処理・リサイクルへの要請が強まってきている。このような状況のもと、わが国においてもリサイクル社会の実現に向けて、平成3年の「リサイクル法」の制定、「廃棄物処理法」の改正、平成5年の「環境基本法」、平成7年の「容器包装リサイクル法」などの法律の整備が行われて来た。これにより、家電品の冷蔵庫、エアコン、洗濯機、テレビの4品は「リサイクル法」の第1種指定製品に指定されるとともに、「廃棄物処理法」では家電品や自動車の中間処理において発生するシュレグダーストの埋立ても従来の安定型から管理型へ移行されるなど法制も日増しに強化されており、廃棄物のリサイクルの促進が重要かつ緊急課題となっている。

このため、産業界においては廃棄物のリサイクル化に向けた取組みとして新しい処理技術の開発と共に製品の生産時から廃棄時の処理を考えた製品の開発が行われる

ようになった。ここでは、家電品を対象にこれら処理技術の開発の一例について述べる。

2. 環境配慮型製品の開発

環境配慮型製品の開発には、従来の製品開発の方法に加え、以下の点を留意して行われている。

- 1) 使用材料の見直しによるリサイクルの容易な材料への変換
- 2) 処理時に分解しやすい構造の検討
- 3) 製造から廃棄までの製品のライフサイクルを通した環境への影響

これらを実行するためには、その効果を明らかにする基準及びこれらの作業を支援するシステムにより誰もが容易に行えるようにすることが重要である。このために、材料変更にはエコマテリアル選定指針、構造検討には分解性評価法、環境への影響には環境影響性評価法が開発され、実用化されはじめた。

2.1 エコマテリアル選定指針^{1), 2)}

図1にエコマテリアル選定指針の一例を示す。これは処理・回収したプラスチック材料をマテリアルリサイクルすることを基本として作成されたものではあるが、これらの材料も最後の処理はサーマルリサイクルになるこ

* 〒300-0013 土浦市神立町 502 番地 (502, Kandatsu, Tsuchiura, 300-0013 Japan)

材料名	評価	エネルギー			材料物性
		製造	再生	...	
PP	A	94.7	0.7	...	...
PS	A	149.5	0.4	...	...
AS	B	149.4	42.6	...	...
PVC	C	91.7	25.1	...	...

(評価基準) A: 積極使用 B: 使用可
C: 改善要 D: 使用不可

図1 エコマテリアル選定指針

図3 分解性の評価手順

基本要素の例			補正要素の例		
分類	名称	記号	分類	名称	記号
移動	上移動	↑	大きさ	部品質量	—
	横移動	→		部品最大寸法	—
工具使用	ネジ回転	⌚	位置	高/低位置	H/L
	切断	U	幾何	ネジ回転数	z :

図2 分解性評価の要素例

とを考慮した評価となっている。したがって、再生エネルギーが小さく、かつ、燃やしても有毒なガスの発生が無い物を評価Aとし、燃やすと有毒ガスの発生があるものを評価Dとし、この間をさらに2段階に分けて評価を決めている。設計時の材料選択を評価AまたはBにし、評価C, Dは材料変更を行うようにしている。

2.2 分解性評価法³⁾

これは設計段階で製品の分解の難易度を評価するもので、図面情報を図2に示す記号などで分析し、分解時間や分解コストを推定するものである。

本評価法を使って、図3に示す手順で設計、改良を行

うことにより、処理のときに分解のしやすい製品の開発が可能となる。その一例が図4に示すものである。この結果、部品数削減、部品のユニット化などで分解時間をほぼ半減することに成功している。

2.3 環境影響性評価法⁴⁾

環境影響性評価法は、LCA(Life Cycle Assessment)と略称され、製品に付随する環境面への影響を評価する技法である。すなわち、図5に示すように製品の原材料の採取から製造、使用および廃棄、埋立てまでの製品の一生において、その製品がどれだけ大気や水などの環境へ影響を与えたかを定量的に評価するものである。その一例が図6である。これは全自動洗濯機で洗濯槽の材質をプラスチックからステンレスに変えた場合を評価したものである。ステンレス槽にしたことにより脱水性能が向上し、乾燥に要するエネルギーが減少したことが大気汚染負荷量の減少に大きく寄与している。この図に示すように、環境への影響はユーザがその製品を使用しているときに最も大きくなっており、LCAの評価においても製品の基本性能の向上が重要であることがわかる。一

大型テレビ

	従来機種 (C28-WE40)	新機種 (C28-WE50)
構造		
部品数	149(100%)	93(62%)
分解推定時間	45.6分(100分)	25.2分(55%)
部品平均評点	28	38

図4 分解性評価法適用例

図5 環境影響性評価 (LCA)

図6 環境影響性評価の例

方、製造段階においては、原材料を生産するエネルギー消費が小さく、かつリサイクル性の良い材料の選択が重要となる。

3. 廃家電品リサイクルプラントの開発

3.1 廃家電品処理の現状

現在廃棄されている冷蔵庫、エアコン、洗濯機、テレビなどの大型廃家電品の排出量は、4品目合計で1988

図7 廃家電品の回収及び処理状況

年の1357万台から1993年の1495万台へと6年間で約10%増加しており、総排出量も62万トンと一般廃棄物総量の1%に達している⁵⁾。この増加傾向は今後も続くと考えられる。

現在の廃家電品は、粗大ゴミあるいは不燃ゴミとして扱われ、小型製品は主として自治体の収集ルートにより回収処理されるが、大型製品は自治体ルートと販売店ルートの2つの流れにより回収されている(図7参照)。

廃家電品の処理プロセスは自治体および処理業者の設備状況によって異なるが、図7に示すように鉄はある程度リサイクルされているが、他の材料はシュレッダダストとして埋め立てられており、廃家電品のリサイクル率は30%程度であるといわれている⁶⁾。

一方、家電品は表1に示すように、主に鉄、銅、アルミなどの金属、プラスチック、ガラスから構成されているが、特に、鉄とプラスチックが重量割合でそれぞれ

表1 家電製品材料構成の推移(推計)

単位: % (重量比率)

機種	年度	鉄	銅	アルミ	プラスチック	ガラス	木	その他
冷蔵庫	1977年廃品	69	4	5	12	5	1	4
	1981年廃品	65	3	4	19	4	1	4
	1977年製品	63	3	2	26	2	1	3
	1982年製品	50	4	3	40	-	-	3
洗濯機	1977年廃品	69	3	8	12	3	-	5
	1981年廃品	68	3	5	20	-	-	4
	1977年製品	65	3	2	28	-	-	2
	1982年製品	53	4	3	36	-	-	4
テレビ	1977年廃品	27	6	4	8	36	16	3
	1981年廃品	23	5	3	12	35	15	7
	1977年製品	19	5	3	17	37	14	6
	1982年製品	10	3	2	23	57	-	5

50～60%，30～40%を占めており、この2つの材料が主要材料となっている⁷⁾。したがって、鉄を回収した後のシュレッダダストは主としてプラスチックからなるが、この嵩比重は0.2～0.3と小さく、鉄を回収してもほとんど減容されない従来の処理法では最終処分としての埋立地不足の解消には不十分であった。

また、廃車や廃家電品のシュレッダダストから有害物が流出しているといわれており、埋立てもこれまでの安定型処分場から管理型処分場に変更するように「廃棄物処理法」が改正された。

このように、廃棄物処理に対する規制が厳しくなってきたことから、鉄だけを回収し、残りをシュレッダダストとして埋立処分する従来の処理方法を根本的に見直す時期になったと言える。これに対する新しい方法としてリサイクル化が叫ばれており、このため、廃工業製品の処理には鉄のみのリサイクルにとどまらず、銅、アルミ、

プラスチック、ガラスなどを出来る限り高純度で元の素材に戻す高度なリサイクル技術の開発が必要となって来た。

3.2 廃家電品リサイクルプラント

上記観点にたって開発した廃家電品のリサイクルプラントを図8に示す。このプラントは「リサイクル法」で指定された比較的大型の廃家電品である冷蔵庫、洗濯機、エアコン、テレビを対象に、後工程の選別に最適な破碎を施して、鉄だけでなく銅、アルミニウム、各種プラスチックなどの構成材料を高純度で回収し、埋立てに回すダスト量を10%以下と極力少なくなるようにしたものである。さらに、本プラントではオゾン層破壊などで有害とされ、現在使用、大気放出が規制されている冷媒フロンや断熱材に使われている発泡用フロンも高い収率で回収するようにした。

本プラントのシステムフローは図9に示すもので、そ

図8 廃家電品リサイクルプラント

図9 廃家電品リサイクルプラントシステムフロー

の工程はおおむね前処理、破碎、ウレタン処理、金属選別、プラスチック選別の5工程から構成されている。本プラントに投入された廃家電品のうち、冷蔵庫やエアコンのように冷媒フロンが使われているものは、まず前処理工程で冷媒フロンと圧縮機内の潤滑油を抜き取った後、圧縮機と箱体を分離する。各種金属の複合体である圧縮機は、後工程での各種金属の選別が容易になるように破碎工程のうちの極低温破碎装置で金属複合体の芯となっている鉄を鉄の低温脆性を利用して破碎し、絡まった金属を分離する。また箱体は常温破碎装置で一定の大きさに破碎する。この極低温破碎、常温破碎装置で破碎された破碎物は、まずウレタン処理工程の風力選別機で断熱材ウレタンを選別し、さらにウレタンを微粉碎してウレタン気泡内に閉じこめられている発泡フロンを液化回収する。ウレタン以外の破碎物は金属選別工程で磁力、渦電流および風力選別の各装置によって鉄、銅、アルミニウムを分別回収する。この金属選別装置で金属を回収した残りの破碎片はプラスチック選別工程に送られる。プラスチック選別工程では極低温破碎の廃冷熱を利用したプラスチック低温破碎および比重選別装置によって、ポリプロピレン（PP）とポリエチレン（PE）のポリオレフィン系プラスチックとポリスチレン（PS）とABS（Acrylonitrile-Butadiene-Styrene）樹脂のポリスチレン系プラスチックを高純度で回収し、残った塩化ビニル（PVC）系プラスチックとその他の破碎片だけがシュレッダダストとして埋立てに回される。

洗濯機、テレビについても前処理工程でモータ、ブラウン管などを取り外した後、冷蔵庫やエアコンの場合と同様に破碎、分別する。

このパイロットプラントでは、表2に示すように、廃家電品の構成材料のうち、90%以上が再利用可能となり、埋立てに回されるシュレッダダストは9%と大幅に低減された。特に、埋立ては重量よりも容積が影響する

ので、シュレッダダストの量を容積比率でみると3%以下となり、埋立地不足の解消には大きな効果が期待できる。

4. 廃家電品リサイクルの新しい要素技術

4.1 金属複合物の極低温破碎

冷蔵庫やエアコンのコンプレッサ、洗濯機のモータのような材料が複合した金属複合物を常温で破碎するには大きな破碎エネルギーを必要とするとともに、複合材料の剥離が不十分で、この後工程での選別が難しい。廃棄物のリサイクルには、廃棄物から有用物を各材質別に出来るだけ高純度で分離することが必要であり、金属複合物では極低温破碎が有効である。

一般に、物質を低温に冷却していくと、延性が高く、破碎エネルギーの大きな状態から急激に脆く、破碎エネルギーの小さな状態に変わる現象を示す（図10参照）。この現象を低温脆性という。この延性破壊から脆性破壊へ変わる温度を脆化温度といい、材料の化学成分（図11参照）、組織、結晶粒度などの材料的因子のほか、応力状態、ひずみ速度などの力学的因子などによっても変わる⁸⁾。

低温脆性は結晶構造が面心立方格子に属する銅、アルミなどの金属ではほとんど生じないが、鉄のような体心立方格子に属する金属において生ずるといわれている⁹⁾。低温破碎技術はこの材料の低温脆性を利用したもので、破壊強度の大きな物質を脆化させて小さな力で破碎したり、脆化温度の差を利用して複合物を選択的に破碎・選別する技術である。

図12に金属複合物の極低温破碎装置を示す。本装置は、金属複合物を予冷ダクトおよび冷却槽で液体窒素および窒素ガスにより鉄の脆化温度（図11参照）である-100℃程度まで冷却して鉄を脆化させ、回転衝撃破碎機により衝撃破碎することにより、低温脆化した鉄を細かく破碎して鉄、銅、アルミなどを剥離させるようにしたものである。

表2 廃家電品リサイクルプラントの性能

項 目		性 能	
システム	ダスト率	9%	
	液体窒素消費量	0.56kg/(kg:処理物)*	
		回収率	純 度
金 属	鉄	99%	99%
	銅	97%	92%
	アルミ	95%	90%
プラスチック	PE系	99%	99%
	PS系	85%	97%
	PVC混入率	1%	
断熱材フロン	回収率	90%	

注) *：実用規模(3t/h)を想定（家電4品平均）
%は重量比率を示す

図10 材料の温度特性

図11 鉄の脆化温度例（化学成分の影響）⁸⁾

図13は冷凍機用圧縮機の極低温破碎と常温破碎を比較したものである。この破碎例に示すように、常温破碎では、金属複合物である圧縮機はまだ十分に破碎・剝離

図12 金属複合物極低温破碎装置

図14 冷蔵庫圧縮機の破碎動力

されているとは言えないが、低温破碎では銅やアルミを複合させる芯となっている鉄が細かく破碎され、銅、アルミが鉄から分離させることが出来、図に示すように磁力選別機で簡単に選別が可能となる。このときの金属材料の剝離の割合も98～99%とほぼ完全に剝離が行われている。これにより、後工程の選別を容易にし、高純度で金属類が回収可能となった。また、この極低温破碎では、破碎エネルギーは図14に示すように常温破碎の24W・h/kgから6W・h/kgへと約1/4に低下させることが出来た。

4.2 プラスチックの低温破碎・分別

従来、プラスチックはシュレダダストとして埋め立てられていたが、プラスチックは高比重も小さく容積的には大きな割合を占めるため、埋立地不足の大きな原因となっていた。また、プラスチックは石油から作られた有用な資源であり、プラスチックの回収・リサイクルは天然資源の枯渇防止の観点からも重要な課題である。

プラスチックは種々の材料が開発、使用されているが、家電品で使用されているプラスチックは主としてポリエチレン、ポリプロピレン、ポリスチレン、ABS樹脂、塩化ビニールの5種類である。これらのプラスチックのうち、塩化ビニール系のプラスチックはリサイクル後の最終段階で熱回収の燃料として使用するとダイオキシンなどの有害ガスを発生する。したがって、塩化ビニール系のプラスチックの除去が重要であり、低温破碎技術を利用して塩化ビニール系プラスチックの選別を行うようにした。

図13 常温破碎と極低温破碎の比較

表3 廃家電品に使用されているプラスチックの脆化温度測定例

プラスチックの脆化温度測定例	
材 料 名	脆化温度
ポリプロピレン (PP)	-50℃
ポリスチレン (PS)	-40~-50℃
ABS樹脂 (ABS)	-30℃
塩化ビニール (PVC)	-20℃
ポリエチレン (PE)	-100℃

図15 プラスチック低温破碎装置

プラスチック材料も金属材料と同様に低温脆性を有している。表3は家電品に使われているプラスチックの脆化温度を測定した例であるが、プラスチックの脆化温度は材質により異なり、塩化ビニールの脆化温度が約-20℃で最も高く、他のプラスチックの脆化温度はこれよりも低い。したがって、塩化ビニールだけを脆化させて破碎することが可能となる。プラスチックの低温破碎はこの性質を利用して塩化ビニールを選別するものである。

図15にプラスチックの低温破碎装置のフローを示す。本装置は、混合したプラスチックをプラスチック冷却槽で塩化ビニールの脆化温度の-20℃に冷却して破碎することにより、脆化した塩化ビニールは選択的に細かく破碎される。これをふるいにかけることにより塩化ビニールが選別される。プラスチック低温破碎で塩化ビニールを選択的に破碎した例を図16に示す。この図に示すように、常温破碎の破砕片ではどの材質もほぼ均等に破碎されているが、低温破碎では塩化ビニールが特に細く破碎されている。この後、適度なふるい目のふるいでふるうことにより塩化ビニール系プラスチックが細かく破碎されたプラスチックとして選別される。

廃家電品のプラスチックを対象にしたときのプラスチック低温破碎の性能を図17に示す。これは選別前のプラスチックに塩化ビニール系プラスチックが約25%

図16 プラスチック低温破碎（サンプル試験の結果）

図17 プラスチック低温破碎の性能

混入しているときのものであるが、プラスチック低温破碎の結果、選別前に混入していた塩化ビニールのうち90%の塩化ビニール系プラスチックを分離し（塩化ビニール分離率）、回収したPE, PP, PS, ABS内への塩化ビニール系プラスチックの混入（塩化ビニール混入率）は5%以下に低下している。

4.3 プラスチック比重選別装置

家電品に使用されているプラスチックは4.2で述べ

表4 家電品に使われているプラスチックの比重例

機 種	用 途	材 質	比 重
冷蔵庫	ファンガード	P P	0.90
冷蔵庫	蒸 発 皿	P P	0.91
冷蔵庫	野菜ケース	P P	0.92
洗濯機	上 蓋	P P	0.94
冷蔵庫	チルドケース	P S	1.02
洗濯機		P S	1.04
冷蔵庫	野菜容器カバー	P S	1.05
洗濯機	洗 濯 槽	P P	1.06
冷蔵庫	フリーザポケット	P S	1.06
冷蔵庫	枠	A B S	1.07
テレビ	バックケース	P S	1.08
冷蔵庫	内 箱	A B S	1.08
冷蔵庫	ドアハンドル	A B S	1.09
テレビ	前キャビネット	P S	1.15
冷蔵庫	ドアパッキン	P V C	1.35
冷蔵庫	ドアサッシュ	P V C	1.44

たように、ポリプロピレン、ポリエチレン、ポリスチレンABS樹脂、塩化ビニルが主である。これらプラスチックの添加剤の含まれていない純粋の物の比重は0.9～1.4程度である。家電品に使われているプラスチックは一般に添加剤が含まれているが、これらのプラスチックの比重は表4の測定例に示すように純粋なプラスチックの比重と大きく変わってる物は少ないと考えられる。

ここでの選別の目的は、これらプラスチックを燃料としたとき、有害なダイオキシンの発生の原因となる塩化ビニル系プラスチックを除去すること、マテリアルリサイクル時に混合熔融などが容易となるように、同系統の、すなわち、直鎖系のプラスチックであるオレフィン系プラスチック（PE、PP）とベンゼン環を有するスチレン系プラスチック（PS、ABS）に分けることである。

表4より廃家電品のプラスチックの比重は
オレフィン系プラスチック………0.90～0.94
スチレン系プラスチック………1.02～1.15
塩化ビニル系プラスチック………1.35～1.44
である。したがって、廃家電品のプラスチックは上記3種類に比重差があるので十分選別が可能であると考えられる。

図18にプラスチックを3種類に選別する比重選別装置を示す。本装置の選別原理は図19のモデルにより求めた各プラスチックの軌跡から明かなように、水流の中に投入したプラスチックを水との比重差による浮沈および沈降速度の差によって選別する一次選別と、沈降した物を選別槽の底からの上昇流と沈降速度の差により再度選別する二次選別によって選別するものである。

図18 プラスチック比重選別装置

図19 プラスチックの選別原理

図20 比重選別装置の性能

図20は廃家電品を破砕して得られた混合プラスチックを選別したときの性能一例である。本装置の設計能力(150kg/h/m)において、回収率はオレフィン系99%、スチレン系85%、塩化ビニル系96%であり、またこのとき、オレフィン系、スチレン系への塩化ビニル系

プラスチックの混入率は1%程度である。したがって、このときの回収したオレフィン系、スチレン系プラスチックの純度はともに98%以上になる。

5. 再資源化

鉄、銅、アルミなどの金属の再資源化は従来から実施されており、再生ルートは確立している。しかし、プラスチックの再利用については、再生、油化、熱回収などの技術は開発中もしくは一部実用化されているものの、まだ再生用途が少ないなどの課題がある。本システムのごとく、プラスチックから塩ビニール系プラスチックを除去することによって、油化原料もしくはRDF(Refuse Derived Fuel: ごみ固形燃料)として熱回収などに容易に使用出来るようにすることは再資源化の第一歩と考えられる。

一方、プラスチックの再生利用(マテリアルリサイクル)は、その用途開発と一定品質のプラスチックを安定供給することが重要である。用途としては従来の製品の一部にでも再生品を利用出来るように設計段階から考慮することが望ましいが、これをすぐに実現することは難しく、今後とも生産側と一緒に努力する必要がある。これに変わるものとしては、再生プラスチックを有効に利用出来る製品の開発が考えられる。これについては、現在いろいろな検討が行われている。このような再生利用を実現するためには、用途開発と同時に一定品質の再生プラスチックの確保が必要で、このための処理技術などの開発が求められている。今回行ったオレフィン系プラスチックとスチレン系プラスチックの選別回収もこの技術の一つと位置づけられる。このような技術開発を積み重ねることにより、再生プラスチックのバージン材への添加による再利用あるいは低グレード品への再生への用途も広がると考えられる。

6. おわりに

ここでは、廃家電品の処理システムを例に、廃棄物処理の要素技術について述べたが、従来からの大量消費、大量廃棄型社会を環境に調和した資源循環型社会への変

換が望まれている現在、廃棄物を処理する技術も次第に高度なものが必要となっている。

一方、国では通商産業省が中心となりインバースフォーラムが平成8年度に設立された。このインバースフォーラムは、廃棄物処理のための技術開発だけでなく、製品の設計・生産から処理までの情報を活用して有機的に結合する社会システムを構築し、廃棄物を高度にリサイクルする真の循環型社会の確立を目指すものである。

日立製作所は、廃家電品リサイクルシステムの実証を出发点に、この循環型社会の達成に努力していく考えである。

執筆にあたり、NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)と(財)エンジニアリング振興協会が共同研究した研究開発の成果および(財)家電製品協会のフロン回収実証事業における成果の一部を使用させていただいたので、ここに深く感謝の意を表する。

(1998年2月19日受理)

参 考 文 献

- 1) 福島哲郎: 工業材料, 42, 57 (1994).
- 2) 山本良一著: 「エコマテリアル革命」, p.147, 徳間書店 (1995).
- 3) 弘重雄三, 大橋敏二郎, 有本象治: 日本機械学会第5回環境工学総合シンポジウム95講演論文集, 159 (1995).
- 4) (社) 環境情報科学センター編: 「ライフサイクルアセスメントの実践」, p.79, 化学工業日報社 (1996).
- 5) 釜江誠一: 家電製品のリサイクルと解体について, 日本ロボット学会誌, 13, 462 (1995).
- 6) (財) 資源環境センター: 平成7年度リサイクル・マイン・パークモデル事業事前調査報告書, p.36 (1996).
- 7) (財) 家電製品協会: 「廃家電品便覧」, p.33, (財) 家電製品協会, (1991).
- 8) (社) 日本金属学会: 「金属便覧」, 改訂3版, p.693, 丸善株式会社 (1971).
- 9) 越後亮三, 大橋秀雄, 竹中俊夫, 中山一雄, 米谷茂: 機械工学辞典, p.645, (株) 朝倉書店 (1988).