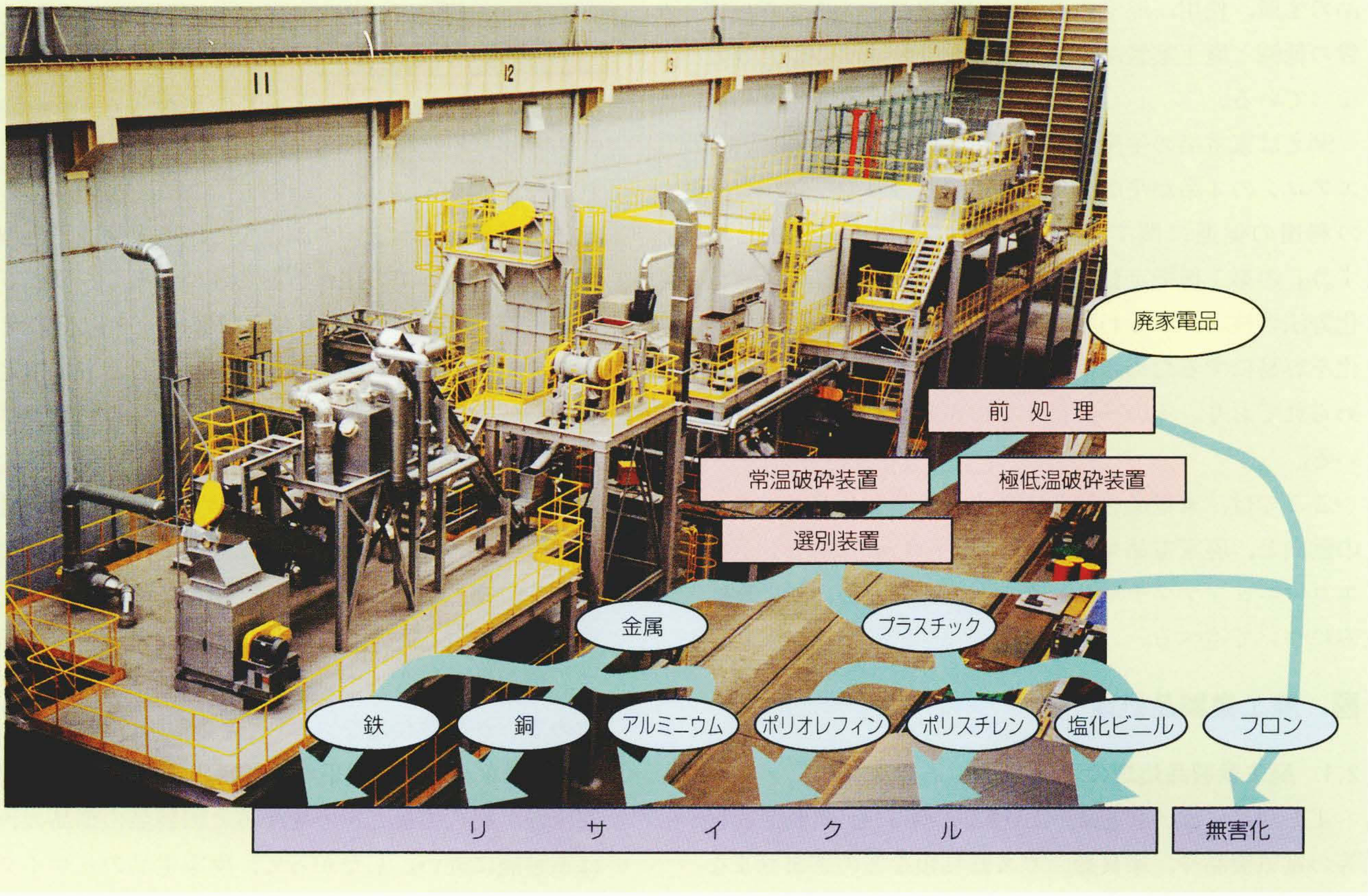
廃工業製品リサイクルとエコマニュファクチャリング

Recycling System and Ecological Manufacturing for Waste Industrial Products

長谷川勉*　*Tsutomu Hasegawa*　高村義之***　*Yoshiyuki Takamura*
林　政克**　*Masakatsu Hayashi*　小関康雄****　*Yasuo Koseki*



廃家電品リサイクルプラント

平成７年３月に竣(しゅん)工したパイロットプラントは，廃家電品などから金属，プラスチックなどを素材ごとに回収・再資源化するものである。廃工業製品処理の適用拡大によって環境調和・資源循環型社会構築への寄与を目指している。

地球環境保全の観点から家電品などの工業製品の生産，使用，廃棄にかかわる資源，エネルギーの有効活用について大きな関心が持たれている。廃家電品では，冷蔵庫，テレビ，洗濯機，エアコンの４品が自動車とともに再生資源の利用の促進に関する法律の第１種指定製品に指定され，また廃棄物の埋め立て基準も強化されつつあるため，リサイクル率を向上させるための設計および生産技術，さらに廃棄製品再資源化技術の確立が急務となっている。

日立製作所は平成４年度から通商産業省補助事業として新エネルギー・産業技術総合開発機構およびエンジニアリング振興協会との共同研究を開始し，平成７年３月に廃家電品リサイクル パイロット プラントを建設した。実証試験の結果，金属やプラスチックなどの有価物分別回収率90%以上，ダスト率10%以下を得た。これらの廃家電品を対象としたリサイクル技術を，OA機器などを含む廃工業製品へ適用拡大するとともに，リサイクル社会の実現に不可欠な環境調和型「生産―再生」システム(エコマニュファクチャリング)実現に向けての研究を進めている。

* 日立製作所 機電事業部　** 日立製作所 機械研究所　*** 日立製作所 笠戸工場　****日立製作所 日立研究所 工学博士

1 はじめに

家電品，OA機器などの工業製品の生産量は，経済の発展と生活レベルの向上とともに増加を続けている。しかし，近年の環境問題への関心の高まりに伴って，工業製品の生産，使用，廃棄の各過程での資源・エネルギー消費の低減と廃工業製品の適正処理・リサイクルが急務となっている。

例えば家電品の生産分野では冷蔵庫，テレビ，洗濯機，エアコンの4品が平成3年10月に制定された「再生資源の利用の促進に関する法律(以下，リサイクル法と略す。)」の第1種指定製品に指定され，廃棄製品の再資源化方法の検討，すなわち廃棄物となった時点での再資源化を容易にするための構造や材質などの設計見直しが進められており，その一部はすでに市販製品に反映されている。

ここでは，家電品をはじめとする工業製品リサイクルの動向と，廃家電品リサイクル パイロット プラント，エコマニュファクチャリングなどへの日立製作所の取組みについて述べる。

2 廃工業製品処理

2.1 廃工業製品処理の現況

工業製品には，家電品，OA機器，複写機，自動販売機等の電気製品や，家具類，ガス器具類などのさまざまな種類の製品がある。これらのわが国での廃棄量は，生産量からの推定で年間約200万tと考えられ，その中で家電品は62万tと3割を占めている。

現状では廃家電品のリサイクルシステムが確立していないので，前述の第1種指定製品のような大型家電品については，18%が自治体，82%が販売店などによって回収され，また，34%が自治体の粗大ごみ処理場等で，66%が民間の処理業者などで処理されている(**図1**参照)。

その過程で，鉄はある程度回収・再利用されているものの，鉄分比率の低下やスクラップ鉄市場の低迷のために採算性は悪く，最終的に焼却や埋め立て処分されることも多い。しかし，シュレッダダストの埋め立て基準強化(平成8年4月施行)やフロンの回収・無害化処理に対する社会の要求が強くなりつつあり，適正処理・リサイクルのための社会システムの確立が不可欠である。

2.2 廃工業製品適正処理・リサイクルの基本的な考え方

前述のような現状を踏まえ，わが国では平成3年10月の「リサイクル法」，「廃棄物処理法」の改正，平成5年

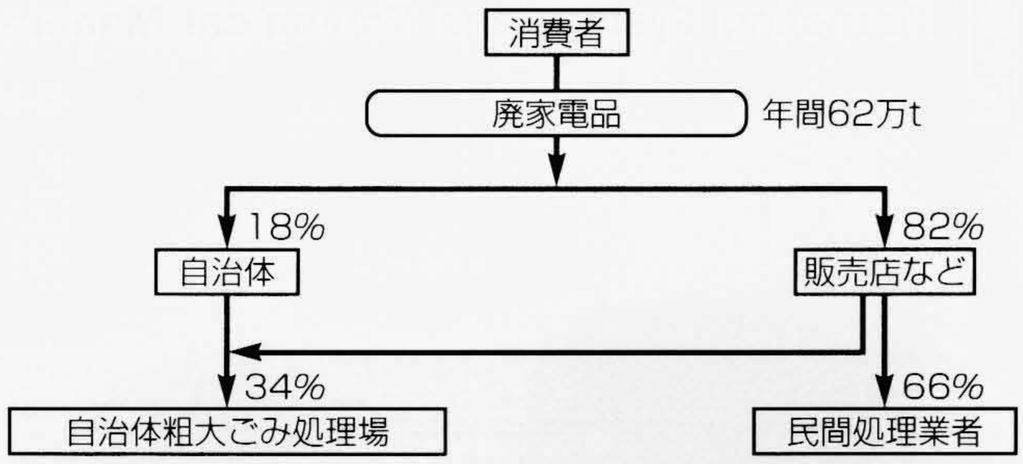


図1 廃家電製品回収ルート(出典：財団法人家電製品協会)
自治体と民間の2ルートで回収・処理されている。

11月の「環境基本法」の制定など，廃棄物適正処理・リサイクルに向けての法が整備されつつある。平成6年3月には250 L以上の冷蔵庫および25インチ以上のテレビがタイヤやスプリング入りマットレスとともに指定一般廃棄物に指定され，地方自治体ではそれらの処理について事業者(製造業者)への協力要請ができることになった。工業製品，特に家電品をはじめとする電気製品には，金属，プラスチック，ガラスなどの多種類の材料が使用されており，またフロンや重金属など適正な無害化処理が必要な物質も含まれているため，従来のように埋め立て，焼却処分するのではなく，適正処理・リサイクルを進めていかなければならない(**図2**参照)。家電品に限ると，廃棄される時期が平均して購入後10年であり，機能，安全性，耐久性などを考慮すると旧製品の部品の再利用は不可能に近い。したがって，廃家電品のリサイクルでは，構成材料を元の素材に極力戻すマテリアルリサイクルが検討対象となる。

このような状況を踏まえて日立製作所は，平成3年か

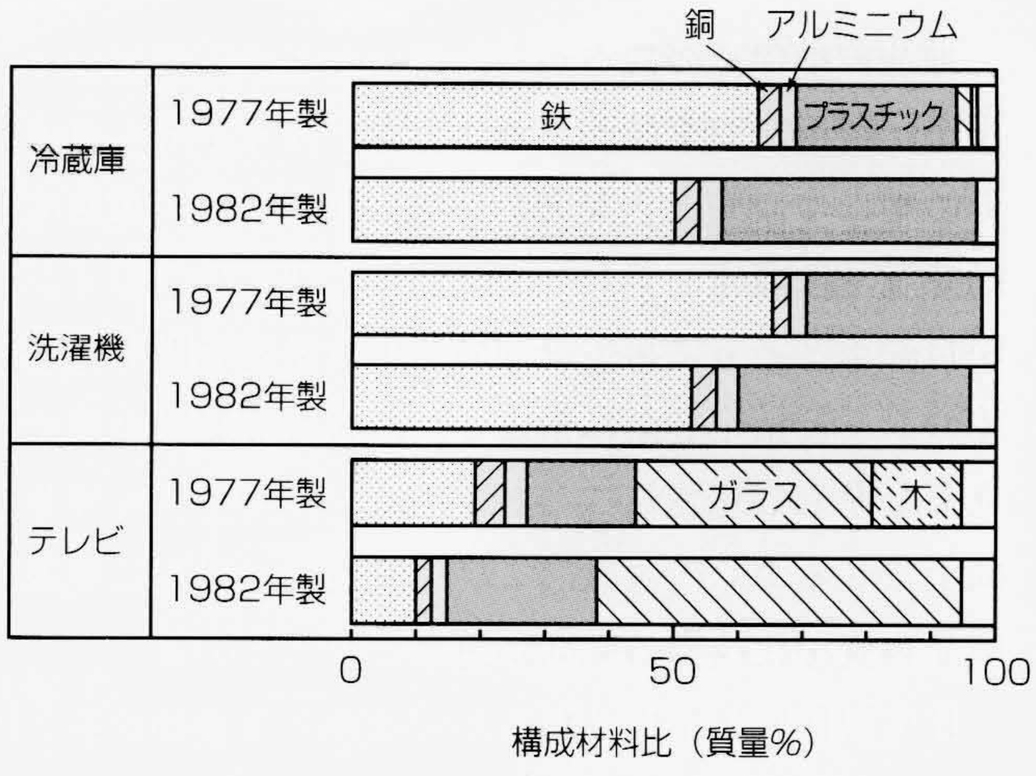


図2 家電製品材料構成の推移(出典：財団法人家電製品協会)
構成比率では鉄が減少し，プラスチックが増加傾向にある。

らマテリアルリサイクルを目標とした廃家電品リサイクルシステムの開発を始め，一部は新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)およびエンジニアリング振興協会(ENAA)との共同研究で，平成6年度に廃家電品リサイクルパイロットプラントを建設した。平成7年度には運転研究を行い，現在も引き続いて廃工業製品リサイクルの要素技術およびシステム化技術のための研究を進めている。

3　廃家電品リサイクルプラント

3.1　プラントの概要

平成7年3月に竣工した廃家電品リサイクルパイロットプラントを13ページの図に示す。

このプラントは，冷蔵庫，洗濯機，テレビなどの処理困難物をはじめとする廃家電品に，後工程での選別に最適な破砕を施して有用資源を選別・回収するシステムである。鉄だけでなく銅，アルミニウム，各種プラスチックを高純度で選別，回収して埋め立てダスト率を10%以下に大幅低減するとともに，冷蔵庫の中の冷媒フロンはもちろんのこと，断熱材として使用されている発泡ウレタンに含まれる多量のフロンも回収，無害化する。

プラントのシステムフローを**図3**に示す。例えば，冷蔵庫の場合には，まず前処理工程で冷媒フロンおよびコンプレッサ油を抜き取ってコンプレッサと箱体に分離する。コンプレッサは，後工程での各種金属の選別精度向上のために極低温破砕工程で破砕し，箱体は常温破砕工程で一定の大きさに粗破砕する。破砕物では，まず風力選別機で断熱材ウレタンを分別回収し，さらに微粉砕でウレタン中の気泡内に封じ込められているフロンを回収する。ウレタン以外の破砕物では金属選別工程で，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。さらに，廃冷熱を利用した低温破砕および比重選別装置を用いてプラスチックから塩化ビニル(PVC)を選別し，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，およびポリスチレン(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する。

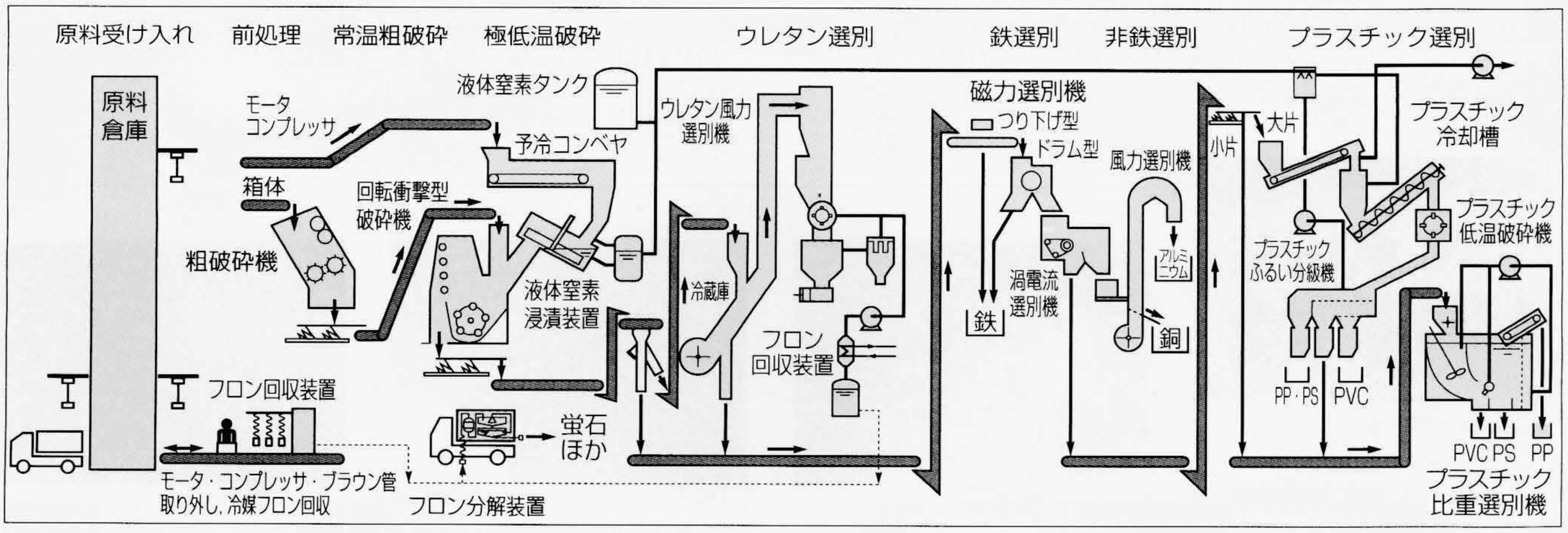
洗濯機，エアコン，テレビについても前処理工程でモータ，ブラウン管などを取り外した後，箱体は冷蔵庫と同様に破砕，分別する。

各工程の運転研究の成果をまとめたものを**表1**に示す。このプラントの処理能力は1t/h(冷蔵庫換算では毎時17台)であり，人口30万人都市の廃家電品処理能力に相当する。実用プラントの規模を3t/h，設備費14億円，設備償却10年と仮定し，1日6時間，毎月20日の運転条件を想定した場合，処理費用は約5万3,000円/t(冷蔵庫1台当たり3,100円)となる。なお，回収物の売却費は専門メーカーに確認し，鉄8円/kg，銅200円/kg，アルミニウム80円/kg，プラスチック0円/kgの値で試算した。

3.2　主な要素技術の概要

3.2.1　極低温破砕技術

冷蔵庫のコンプレッサ，洗濯機のモータなどの金属塊状物は常温下で破砕しても複合金属材料の分離が不十分であり，後工程で材料ごとに選別することが難しい。リサイクルシステムは金属の低温脆(ぜい)化特性を利用し



注：略語説明　PP(Polypropylene)，PS(Polystyrene)，PVC(Polyvinyl Chloride；ポリ塩化ビニル)

図3　廃家電品リサイクル システム フロー
廃家電品リサイクルプラントのシステム構成と廃家電品処理の流れを示す。

表1 廃家電品処理実証試験結果
人口30万人都市の処理量相当の廃家電品処理システムを運転実証した。

項目		成果	
システム	ダスト率	9%	
	金属回収率	95%	
	プラスチック回収率	85%	
	処理費	1台当たり¥1,700*	
前処理・破砕	複合部材はく離率(常温・極低温破砕)	98～99%	
	極低温破砕温度	−100℃	
	液体窒素消費量	1kgの処理物当たり0.56kg*	
金属分別回収	—	回収率(%)	純度(%)
	鉄	99	99
	銅	97	92
	アルミニウム	95	90
プラスチック分別回収	PVC分離率	92%	
	PVC混入率	1%	
	PE, PS系回収率	85%	
フロン回収・分解	フロン回収率	90%	
	フロン分解率	99.99%	

注：略語説明ほか
PE(Polyethylene), ＊実用規模(3t/h)を想定

溶存フロンも含めた，低価格かつ操作の容易な装置の開発が求められている。また，冷蔵庫の断熱材発泡ウレタン中には**図5**に示すように，多数の独立気泡があって質量比で冷媒フロンの約4倍ものフロン(CFC-11)が閉じ込められているが，有効な回収技術が確立されていなかった。

リサイクルシステムでは冷蔵庫の冷媒フロンを油ごと回収した後，油中の溶存フロンも加熱脱気回収する装置を持つ。また，断熱材中のフロンは混合粗破砕片から風力選別でウレタン片を回収後微粉砕し，独立気泡中のフロンを脱気させて凝縮，回収する。

断熱材中フロン回収システムを**図6**に示す。

また，フロンの分解技術として低エネルギー消費でコンパクトな装置が可能であり，約400℃で99.99%の分解が可能な触媒方式を開発した。実験室レベルで1,000時間の触媒耐久性を確認し，処理能力1kg/hの実証装置を運転中である。

3.2.3 プラスチック低温破砕・比重選別技術

プラスチックの混合物を廃冷熱を用いて−20℃程度に冷却し，破砕すると脆化温度の高い塩化ビニルだけが細かく破砕されるため，ふるいを通すことによって選別することができる。

また，比重液として水を使用した比重選別装置では，水より比重の大きい塩化ビニルとポリスチレン系プラスチック(PS, ABS)を，沈降速度の差を利用して選別し，水より比重の小さいポリオレフィン系プラスチック(PP, PE)も含めて高純度に選別，回収する。選別結果を**図7**に示す。特殊な比重液を使用しないため低コストであり，選別後の洗浄が不要となる利点がある。これらのプラスチック選別技術により，PP, PE, PS, ABSへのPVC混入率1%以下を達成した。

3.2.2 フロン回収・分解技術

冷蔵庫に用いられている冷媒フロンガス(CFC-12)の回収は一部の自治体で始められているが，冷凍機油中の溶存フロンも含めた，低価格かつ操作の容易な装置の開発が求められている。また，冷蔵庫の断熱材発泡ウレタン中には**図5**に示すように，多数の独立気泡があって質量比で冷媒フロンの約4倍ものフロン(CFC-11)が閉じ込められているが，有効な回収技術が確立されていなかった。

リサイクルシステムでは冷蔵庫の冷媒フロンを油ごと回収した後，油中の溶存フロンも加熱脱気回収する装置を持つ。また，断熱材中のフロンは混合粗破砕片から風力選別でウレタン片を回収後微粉砕し，独立気泡中のフロンを脱気させて凝縮，回収する。

断熱材中フロン回収システムを**図6**に示す。

また，フロンの分解技術として低エネルギー消費でコンパクトな装置が可能であり，約400℃で99.99%の分解が可能な触媒方式を開発した。実験室レベルで1,000時間の触媒耐久性を確認し，処理能力1kg/hの実証装置を運転中である。

3.2.3 プラスチック低温破砕・比重選別技術

プラスチックの混合物を廃冷熱を用いて−20℃程度に冷却し，破砕すると脆化温度の高い塩化ビニルだけが細かく破砕されるため，ふるいを通すことによって選別することができる。

また，比重液として水を使用した比重選別装置では，水より比重の大きい塩化ビニルとポリスチレン系プラスチック(PS, ABS)を，沈降速度の差を利用して選別し，水より比重の小さいポリオレフィン系プラスチック(PP, PE)も含めて高純度に選別，回収する。選別結果を**図7**に示す。特殊な比重液を使用しないため低コストであり，選別後の洗浄が不要となる利点がある。これらのプラスチック選別技術により，PP, PE, PS, ABSへのPVC混入率1%以下を達成した。

図4 常温および低温破砕の比較
低温破砕では複合材を良好に分離できるため，後工程で磁性物と非磁性物を容易に選別できる。

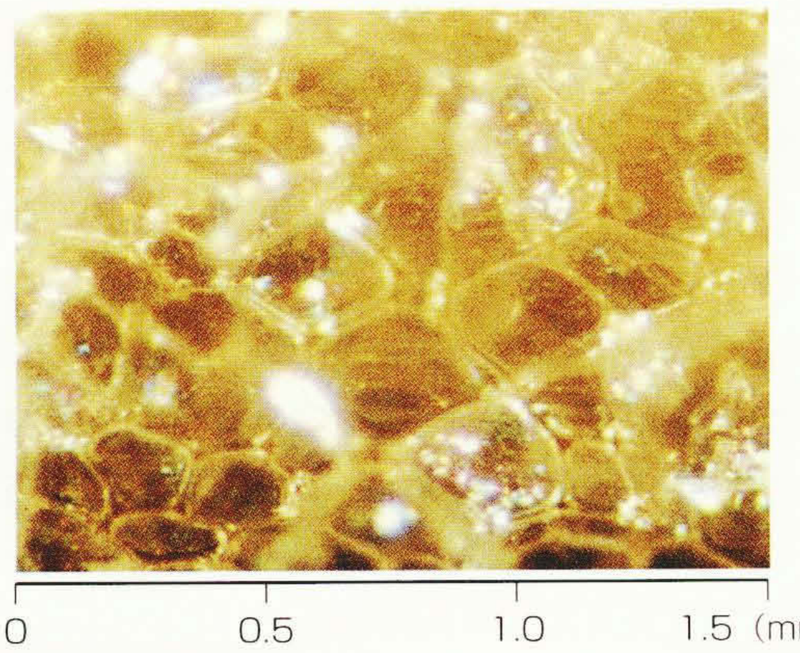


図5　発泡ウレタンの拡大図
発泡ウレタン中の独立気泡内にはフロンガスが閉じ込められている。

廃家電品から回収したプラスチックの利用先については，バージン材の添加による再利用あるいは低グレード品への再生や，油化あるいはRDF(Refuse Derived Fuel：ごみ固形燃料)化による燃料としての利用など種々の方法を開発あるいは確認中である。

3.3 財団法人家電製品協会におけるモデル事業「廃家電品一貫処理リサイクルシステム」

廃家電品のリサイクルについては，家電業界でも取組みを始めている。財団法人家電製品協会では，平成7年度から通商産業省の補助事業として廃家電品一貫処理リサイクルモデル事業を，日立製作所を幹事会社とする4社に委託して開始した。この事業では，平成10年度までに冷蔵庫，洗濯機，テレビ，エアコンの4品を，有害物の無害化も含めて一貫リサイクル処理する3t/h規模のプラントを開発，

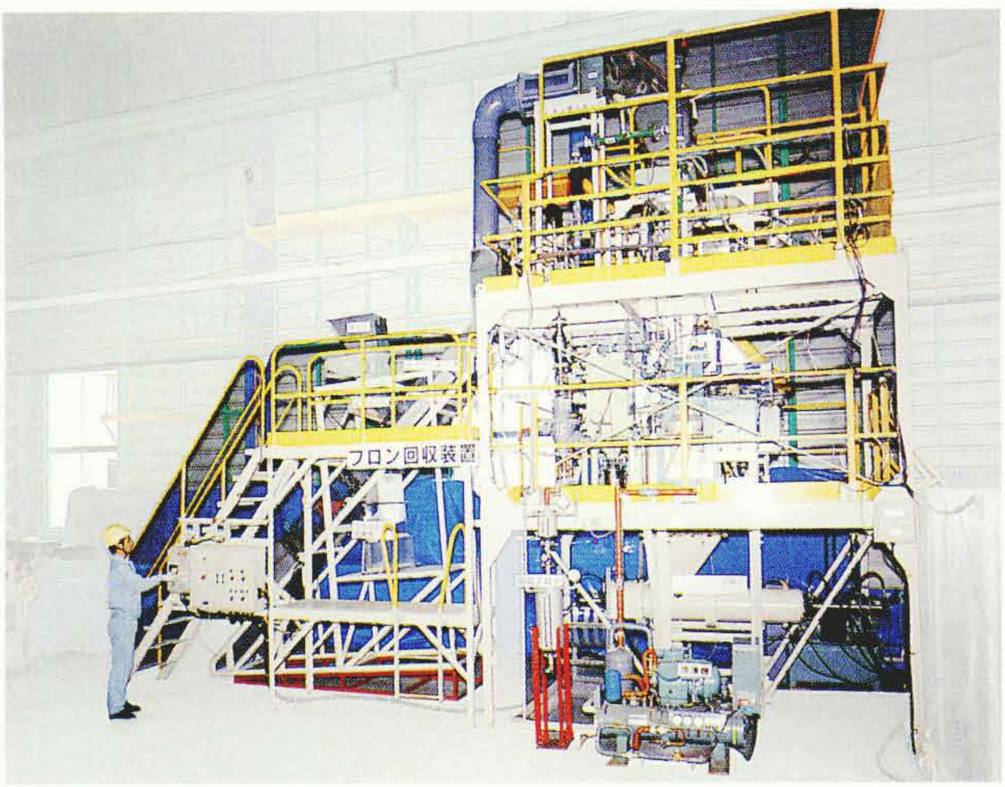
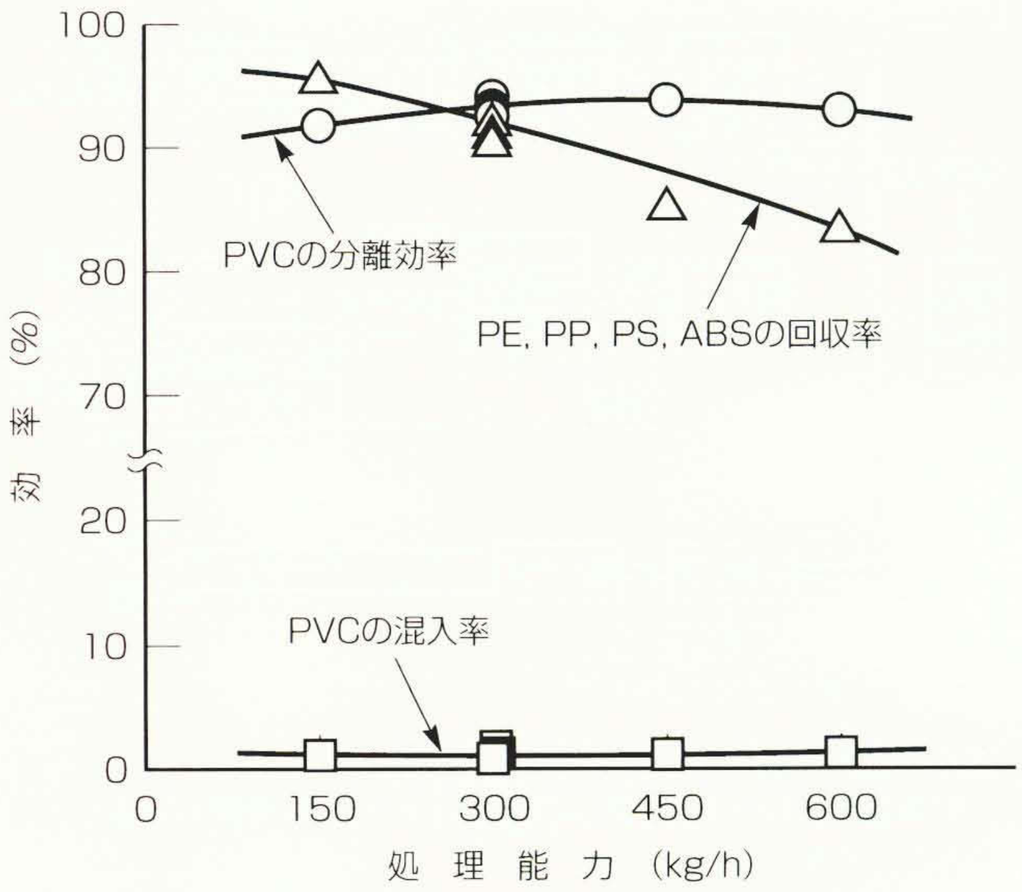


図6　断熱材フロン回収プラント
発泡ウレタンをすりつぶし，内部に封じ込められたフロンガスを取り出したあとで凝縮させて回収する。



注：記号説明
○△□(破砕サンプル)，●▲■(実破砕片)

図7　プラスチック比重選別結果
PP，PE，PS，ABSの各プラスチックへのPVCの混入率1%以下を達成した。

建設して運転実証するものである。日立製作所は，全体取りまとめおよび常温破砕選別工程，低温破砕選別工程を受託しており，前述の廃家電品リサイクルプラント開発での技術成果を踏まえて開発・設計を進めている。

4 エコマニュファクチャリング

4.1 OA機器のリサイクル

ワークステーション，パソコン，通信機器などのOA機器は年間に約60万t生産され，現在の廃棄量はその半分程度と推定されるが，平成7年度のパソコンの爆発的な販売増加によって近い将来には廃棄量の急激な増加が予想されている。廃OA機器の大部分は，現在では人手を主体とした有価物回収処理後に焼却あるいは埋め立て処理されている。しかし，プリント基板などに含まれる有害物溶出への対応のための埋め立て基準強化によって処理費の高騰が考えられ，社団法人日本電子工業振興協会では廃棄製品回収・リサイクル専門委員会を設けて将来への対応を進めつつある。

日立製作所は，将来の廃OA機器の増加に伴って必要とされる適正処理・リサイクルシステムの開発を目指して，製品の認識および分離分解技術，プリント基板の分解・無害化技術などの要素技術の開発を進めている。

開発中の廃OA機器処理システムの一例を**図8**に示す。

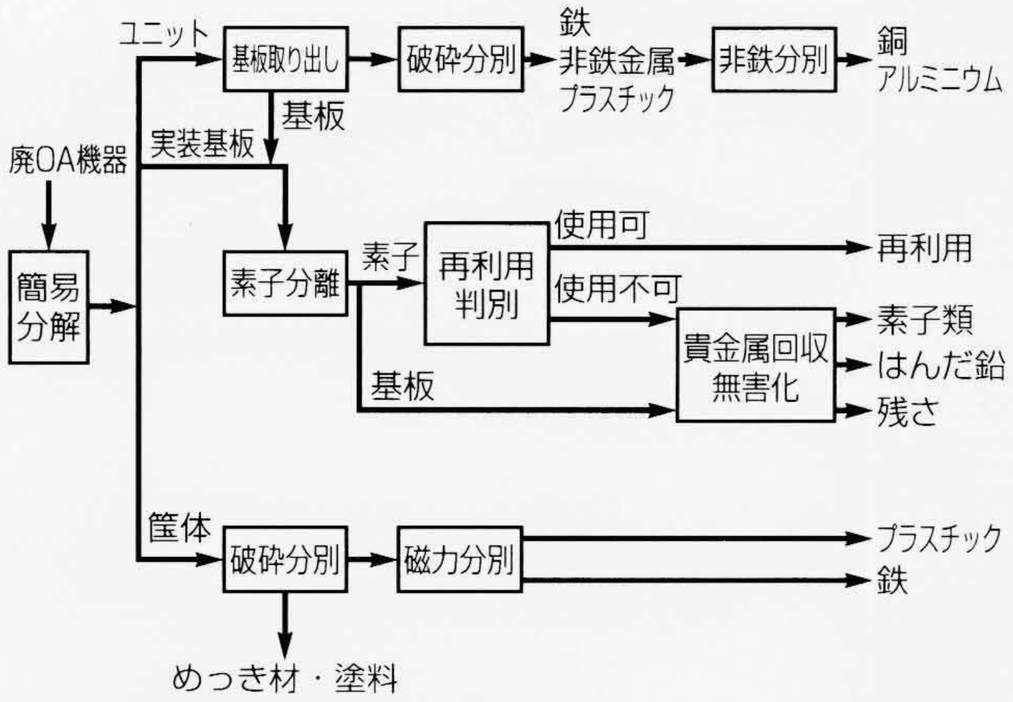


図8 OA機器リサイクルシステムの例
OA機器をユニット，実装基板，筐(きょう)体に分解したあとでリサイクルする。

4.2 工業製品のエコマニュファクチャリング

前述の廃家電品，廃OA機器リサイクル技術の応用として，工業製品の設計・生産から回収・再資源化までを，廃棄物量を最少に抑えながら行う環境調和型「生産—再生システム(エコマニュファクチャリング)」を検討中である。

例えば，通商産業省では工業製品の生産・再生をクローズド化した社会システム「インバースマニュファクチャリング(逆工場)プロジェクト」の構想を明らかにしており，工業技術院の「ニューサンシャイン計画」の一環として開始する方針である。国際ロボットFA・技術センタ(IROFA)内に，日立製作所も積極的に参画している。

日立製作所は，この分野の製品設計・分離分解・有価物回収・有害物適正処理の各工程に，前述の廃家電品，廃OA機器リサイクル技術の応用を検討中である。

一方，エコマニュファクチャリングの一環として，易分解性製品設計の検討も進めている。

廃工業製品の分解・再生を高効率で行うためには，使用後の処理技術，処理後の二次製品の再利用を効率よく進めるための社会システムの構築が必要である。同時に，製品の設計および製作段階でも，使用後の分解を容易にし，廃棄物を極力出さないようにすることが必要である。

日立製作所は，家電品・OA機器については使用後の分解・再生を容易にするために，例えば製品に使用する複合材の単一素材化，材質表示や部品点数の削減を進めており，平成4年をベースとして平成12年までに分解時間を60%削減することを目指している。その成果はすでに市販のテレビや洗濯機などの家電品に反映されている。

一方，包装材料の減容化・再資源化も廃棄物削減のための課題の一つである。例えば，梱(こん)包用発泡スチロールの使用量では，平成2年をベースとして平成12年までに60% の削減を目指している。

5 おわりに

ここでは，廃工業製品の適正処理・リサイクルおよびエコマニュファクチャリングに対する取組みについて述べた。

現在の大量消費—大量廃棄型社会は近い将来に環境調和・資源循環型社会に移行せざるをえないと考えられ，そのためにはリサイクル技術の開発および社会システム構築の両面で，いっそうのブレークスルーが必要である。

日立製作所は，廃家電品リサイクルシステムの実証を出発点に，さらに環境調和・資源循環型社会の構築に貢献してゆく考えである。

参考文献

1) 佐野，外：電気学会論文誌D，11(5)，488～492(1994)
2) 小林，外：第6回廃棄物学会研究発表会講演論文集Ⅰ，66～68(1995)
3) 釜江：廃棄物学会誌，4 (4)，295～303(1993)
4) 財団法人家電製品協会編：廃家電便覧(1991-9)