特集論文

# 最先端の家電リサイクル技術

井関康人*
筒井一就*

*Most-advanced Recycling Technologies for Home Electrical Appliances*

*Yasuto Iseki, Kazunari Tsutsui*

**要　旨**

2001年４月から施行された家電リサイクル法によって使用済みの家電製品（エアコン，テレビ，冷蔵庫・冷凍庫，洗濯機・衣類乾燥機の４品目）から鉄，銅，アルミ，プラスチック等，様々な資源が回収されリサイクルされている。回収素材の品位は様々であるが，単一で純度の高いものに分離するほどリサイクル用途の選択肢が増え，また経済的な価値も高くなる。しかしながら，単一素材に分離するのはコストがかかるため，一部の複合素材は人件費の安い中国などの近隣諸国へ輸出され，手作業で単一素材に分離されリサイクルされている。アジア各国の経済成長は著しく資源需要は今後も高まるばかりである。天然資源に乏しい日本にとって，回収素材をできる限り単一素材へ分離し付加価値を高め国内産業で再利用することは極めて重要な課題である。

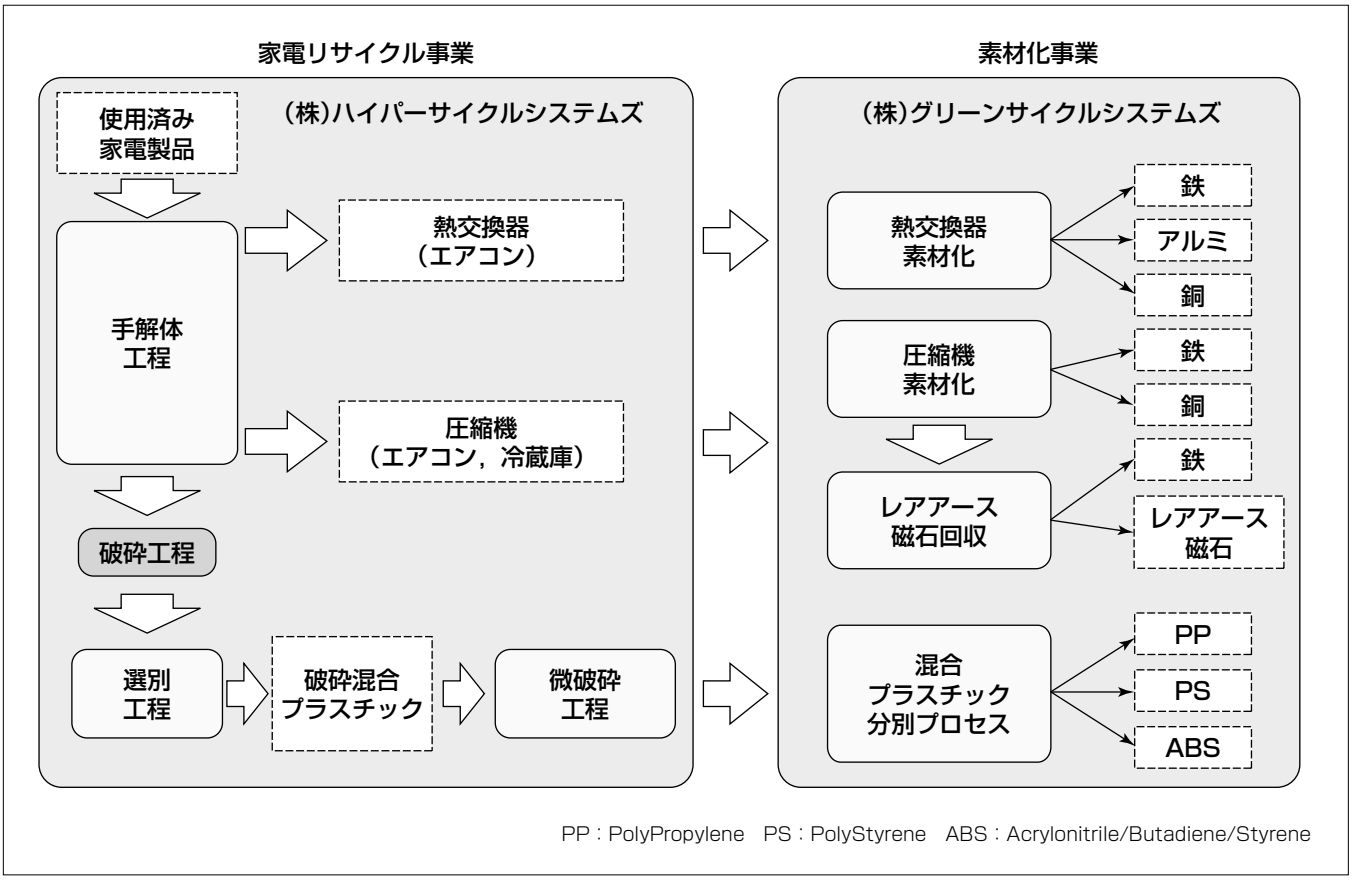
三菱電機は家電業界初(注1)の家電リサイクル工場を1999年４月に稼働させて以来，付加価値の低い複合素材から付加価値の高い単一素材を分離する数々の最先端リサイクル技術を開発，実用化してきた。

本稿では，このリサイクル技術の中から次の技術について述べる。

(1)　混合プラスチック分別技術
(2)　圧縮機素材化技術（レアアース磁石回収技術を含む）
(3)　熱交換器素材化技術

また，この技術を適用した大規模素材化事業についても述べる。

（注１）　1999年，当社調べ




**家電リサイクル事業と素材化事業**

従来の家電リサイクル事業で回収した複合素材（圧縮機，熱交換器，破砕混合プラスチック）から，高品位の単一素材を回収する独自のリサイクル技術を開発実用化し新たな素材化事業を立ち上げた。

*リビングデジタルメディア技術部

## 1. まえがき

2001年4月から施行された家電リサイクル法によって使用済みの家電製品(エアコン，テレビ，冷蔵庫・冷凍庫，洗濯機・衣類乾燥機の4品目)から鉄，銅，アルミ，プラスチック等，様々な資源が回収されリサイクルされている。回収素材の品位は様々であるが，単一で純度の高いものに分離するほどリサイクル用途の選択肢が増え，また経済的な価値も高くなる。しかしながら，単一素材に分離するコストが素材の経済的価値を超えると，リサイクルを続けることが困難となる。そのため，回収素材の一部は，付加価値の低いまま，人件費の安い中国などの近隣諸国へ輸出され，手作業で単一素材に分離されリサイクルされている。アジア各国の経済成長は著しく資源需要は今後も高まるばかりである。天然資源に乏しい日本にとって，回収素材をできる限り単一素材へ分離し付加価値を高め国内産業で再利用することは極めて重要な課題と言える。

当社は，家電業界初の家電リサイクル工場である㈱ハイパーサイクルシステムズを1999年4月に稼働させて以来，付加価値の低い複合素材から付加価値の高い単一素材を分離する数々の最先端のリサイクル技術を開発，実用化してきた。

本稿では，このリサイクル技術の中から次の技術について述べる。

(1) 混合プラスチック分別技術
(2) 圧縮機素材化技術
(3) 熱交換器素材化技術

## 2. 家電リサイクルの現状

家電リサイクルの概略フローを**図1**に示す。手解体工程では，手作業で容易に取り外せる有価部品(圧縮機，熱交換器，野菜ケース等)や有害物を含む部品(プリント基板，ブラウン管ガラス等)を取り外す。次の破砕選別工程では，手解体工程で回収しなかった残りを大型破砕機で粗破砕(50～200mm程度)する。そして風力，磁力などの選別機で主として，鉄，銅，アルミ等の金属素材を回収する。最後に破砕混合プラスチックが残る。

手解体工程で回収された主たる金属部品や破砕選別工程後に回収される混合プラスチックは複合素材であるため，単一素材へ分離しなければ直接的な再利用が難しい。そのため，これらの複合素材から高品位かつ低コストで単一素材を回収する技術が必要とされていた。

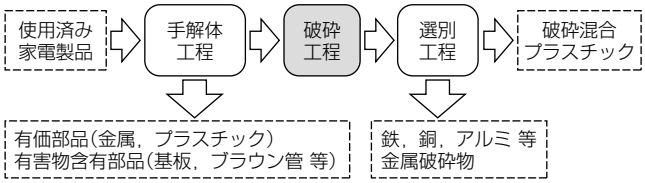



**図1．家電リサイクルフロー**

## 3. 混合プラスチック分別技術

### 3.1 微破砕選別工程

破砕選別後に回収される混合プラスチックを**図2**に示す。多種のプラスチックの混合物であり，被覆電線など破砕選別工程で分離できなかった金属を含有する。これらのプラスチックの大半は熱可塑性樹脂であるため，理論的には加熱して成形することで任意の形状に加工することが可能ではあるが，多種プラスチックや金属等の異物の混入などによって強度が確保できない可能性が高く，この状態ではプラスチック材料としての再生利用は困難である。

微破砕選別工程では，混合プラスチックから金属を取り除き，後の工程で単一のプラスチックを精度良く分別するために，平均粒度8mm程度に破砕し大きさをそろえ，風力選別や比重選別によって金属を高精度で除去する。微破砕された混合プラスチックを**図3**に示す。

### 3.2 高純度プラスチック分別技術

原料となる微破砕混合プラスチックは種々のプラスチックの破砕片(フレーク)の混合物である。代表的な混合組成を比重で整理すると，比重が水より軽い非難燃のPPが約35%(比重<1.0)，水よりやや重い非難燃のPS，ABSが合計で約30%(1.0≦比重<1.1)，更に重い重比重物が約35%(比重≧1.1)である。ここで重比重物とは，難燃剤，ガラス繊維等の添加物を含むプラスチック，微量のエンジニアリングプラスチック，塩化ビニル等である。このプロセスの回収対象は，家電製品で多用され，添加剤を含まない非難燃のPP，PS，ABSフレーク(原料の約65%)である。

微破砕混合プラスチックから非難燃のPP，PS，ABSを分離回収するプロセスフローを**図4**に示す。まず湿式比重選別によって比重が1.0以下のPP，比重が1.0～1.1のABS／PS混合プラスチックを選別回収し，難燃プラスチックなど比重1.1以上の重比重プラスチックを除去する。比重差では除去できないゴムなどの異物は異物除去装置で除去する。同じく比重差が小さく比重選別が困難なPS／ABS混合物は，静電選別装置[1]で分離回収する。また，回収プラスチックを家電製品へ適用する際には，“電気・電子機器に含まれる特定有害物質の使用制限に関する欧州議会及び

**図2．混合プラスチック**

**図3．微破砕混合プラスチック**

理事会指令”（以下“RoHS指令”という。）への対応が必須である。RoHS（Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electronic equipment）指令に適合した非難燃PP，PS，ABSフレークを回収するため透過X線を利用した選別装置を用いて臭素含有プラスチックを除去する[2]。このようにしてRoHS指令に適合した99%以上の高純度PP，PS，ABSフレークを回収することができる。

### 3.3　自己循環リサイクル

このようにして高純度で分別回収したPP，PS，ABSフレークを所定のスクリーンメッシュで押出加工（リペレット）して再生プラスチックペレットを得る。物性的には，元の素材の特性を一定レベル保持しており，再度家電製品へ適用することができる。またリペレットの過程で，種々の改質を施すことによって，難燃化など多様なグレードに展開することが可能である。実際の製品適用事例を**図5**，**図6**，**図7**に示す。

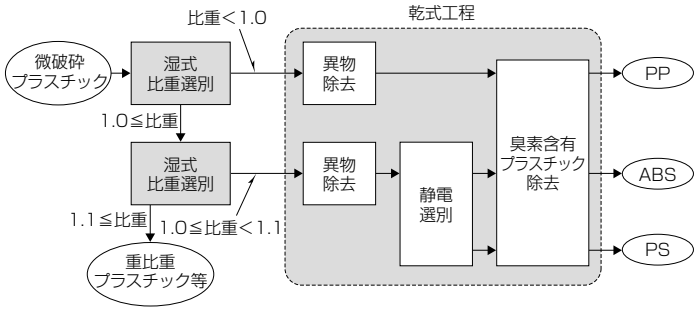



**図4．プラスチック分別フロー**

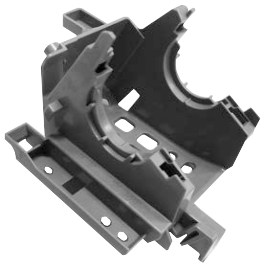


**図5．エアコン適用事例（PS）**

**図6．エアコン適用事例（ABS）**

**図7．冷蔵庫適用事例（PP）**

## 4.　冷蔵庫・エアコンの圧縮機素材化技術

### 4.1　圧縮機素材化技術

冷蔵庫・エアコンの圧縮機素材化工程を**図8**に示す。冷蔵庫とエアコンの圧縮機は，解体手順が異なり，また季節による入荷割合変動が大きい。これらにフレキシブルに対応可能な2ライン構成とした。シェル（外殻の鋼板）を切断する工程は対向する2組4枚の回転刃押し切り方式，コイル銅を切断する工程は回転刃送り方式を採用し，火花や騒音の発生しない作業安全と環境に配慮したラインとした。

圧縮機1個の質量は8～10kgであり，約10%（0.8～1kg）のコイル銅を回収する。残りの90%は主として鉄で構成される機構部品である。

### 4.2　レアアース磁石回収技術

2000年以降に生産されたエアコン圧縮機のロータ（回転子）には一部レアアース磁石（ネオジム磁石）が使用されている。圧縮機素材化工程から排出される機構部品の一部であるロータを，形状に関わらずレアアース磁石を単体分離できる状態にまで解体する自動解体装置を開発した。

**図9**に示すように，ロータ分離，常温脱磁，バランサ分離の3つの工程で構成し，各工程間の搬送を1つの装置内に集約・自動化した。タクトタイム30秒で，圧縮機素材化工程に連動して効率よくレアアース磁石を回収することができる。

ロータ分離工程では，ロータに焼きばめ接合されたシャフトを，押し棒を介した油圧プレスによって押し抜き，ロータ単体とする。

常温脱磁工程では，ロータ内の磁石の磁界と垂直方向に減衰磁界を印加し，100ガウス以下まで脱磁し，後の磁石回収を容易にする。脱磁にかかる時間は，脱磁電源への充電時間を含めても10秒以内である。

ロータは回転時のバランスを取るための黄銅製のバランサと電磁鋼板と磁石で構成され，数本のリベットで強固に固定されている。バランサ分離工程では，ロータの高さを自動計測し，2枚の刃物押し込み位置を自動調整してバラ

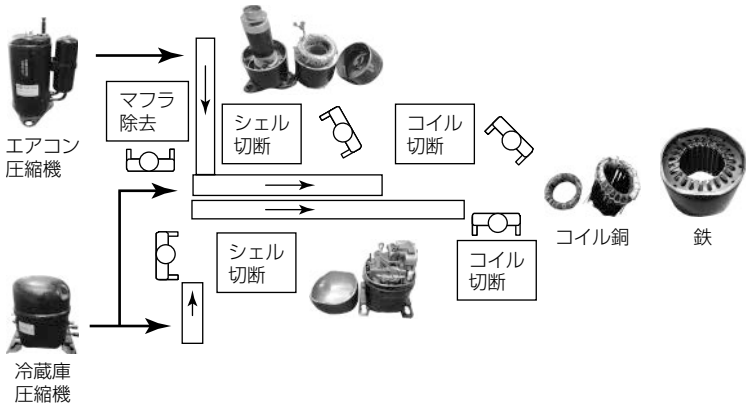



**図8．冷蔵庫・エアコンの圧縮機素材化工程**

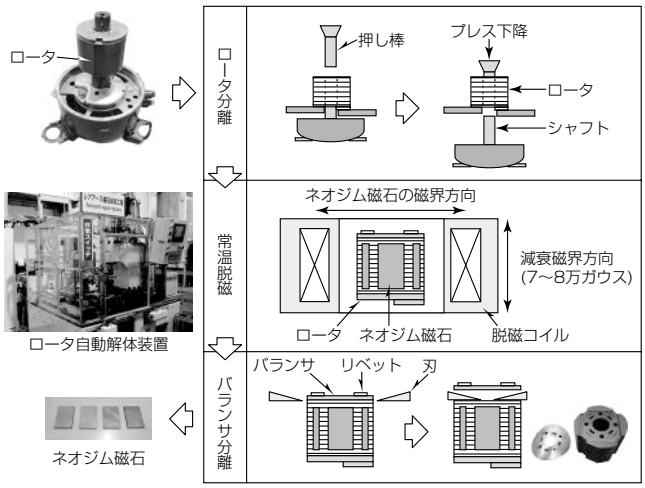



図９．レアアース磁石回収工程

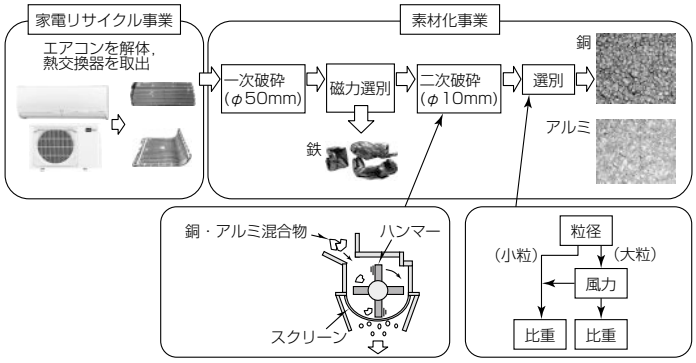



図10．熱交換器素材化工程

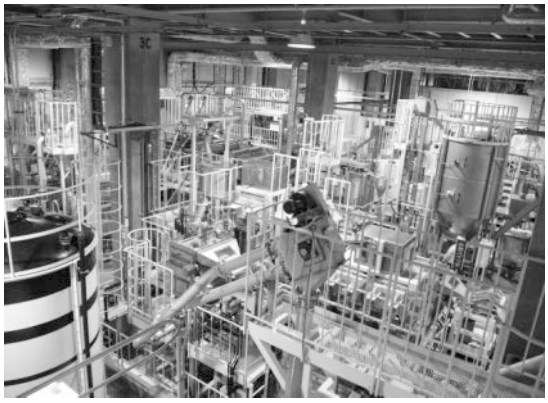


図11．プラスチック分別設備

ンサを締結するリベットをせん断する。

バランサを分離したロータに微小な振動や衝撃を与えることで，容易にレアアース磁石が分離回収できる。

従来レアアース磁石は，鉄と区分せずに売却されてきたが，単一素材として回収できることで磁石メーカーでの再生が可能になった。

## 5. エアコンの熱交換器素材化技術

エアコンの熱交換器素材化工程を**図10**に示す。

一次破砕によってφ50mmに粗く粉砕後，磁力によって鉄部品を選別回収する。二次破砕では，銅・アルミの混合物をハンマーと衝突させて銅とアルミに分離，ハンマーとスクリーンの隙間でφ10mmに造粒する。

選別工程では，造粒した銅とアルミの混合物を粒子径によって一次選別した上で，比重差を利用して単一素材に選別回収する。このように二段階破砕工程と細粒物を分離する選別工程の組合せによって，銅で99％以上，アルミで97％以上の高純度選別回収を可能にした。

また，作業負荷を大幅に軽減する全自動ラインの構築によって，作業者は熱交換器を投入するだけである。なお，エアコンの熱交換器には室内機用，室外機用があるが，いずれも同じ工程で選別回収する。

## 6. 素材化事業

当社は，2010年４月，千葉市に㈱グリーンサイクルシステムズを設立し，本稿の技術を用いた大規模素材化事業を開始した。2013年４月現在，以下の３つの事業を展開している。

(1) 混合プラスチック分別事業(2010年４月開始)
(2) 圧縮機素材化事業(2010年10月開始)
　内，レアアース磁石回収事業(2012年４月開始)
(3) 熱交換器素材化事業(2012年６月開始)

工場は，次の特長を持つ。

(1) 高度に自動化した生産性の高いライン構成
(2) 湿式選別用の水の高度循環利用(循環率99％)を実現し，下水，河川等への排水は一切なし

プラスチック分別設備の外観を**図11**に示す。

## 7. む す び

中国などアジア諸国の経済発展とともに地球温暖化，資源枯渇といった環境問題がますます深刻化することが予想される。リサイクルは，天然資源を用いるよりも小さなエネルギーで物作りができることや，価格が比較的安定している点で，今後ますます重要になる。

今後は，本稿で述べたリサイクル技術を更に進化させ，高品質のリサイクル素材を市場に提供，又は自らの製品に再利用することで，地球環境問題により大きく貢献していきたい。

## 参 考 文 献

(1) 松村光家，ほか：静電分離によるプラスチック選別の開発，廃棄物資源循環学会，リサイクルシステム技術研究部会講演会予稿集，1～6（2006）
(2) 真下麻理子，ほか：リサイクルプラスチックのRoHS適合化技術，三菱電機技報，**83**，No.8，473～476（2009）