

材料系資源循環に向けた 日立グループの取り組み

Hitachi Group's Activity for Material Resource Recycling

馬場 研二

Baba Kenji

根本 武

Nemoto Takeshi

丸山 晴子

Maruyama Haruko

竹谷 則明

Taketani Noriaki

板谷越 勝久

Itayagoshi Katsuhisa

廣瀬 祐子

Hirose Yuko

低炭素社会を実現するための社会イノベーション事業には、省エネルギー・省資源を支える革新的な材料が不可欠である。これらの材料をリサイクルする技術とスキームの確立は、材料の安定確保、製造コスト節減、環境負荷低減に貢献できる。

日立グループは、材料系資源循環の観点から希土類磁石、銅線、アモルファス変圧器、繊維強化プラスチック（FRP）のリサイクルに関する取り組みを推進している。

1. はじめに

日立グループは、エネルギー・情報・交通・公共・産業にかかわる機器・システム、家庭用機器など多岐にわたる社会イノベーション事業を展開している。低炭素社会実現に向けて高いレベルの省エネルギー・省資源を実現するために、基盤となる材料の開発と革新を進めている（図1参照）。

地球環境問題を解決していくためには、低炭素社会と循環型社会の実現が重要であるとの認識の下、日立グループ

は環境ビジョンとして「地球温暖化の防止」、「資源の循環的な利用」、「生態系の保全」を掲げている。「資源の循環的な利用」については、家電リサイクルなどに積極的に取り組んできた。

資源問題については、鉄、銅、アルミニウムなどのベースメタル、希土類磁石（ネオジウム、ジスプロシウム使用）、リチウムなどのレアメタルのリサイクルが注目されている。いずれもハイテク情報機器、省エネルギー家電・機器、エコカーなどの製造に不可欠であり、これらの材料なしには低炭素社会の実現は困難である。材料資源は急速に枯渇するわけではないが、グローバルには新興国の経済発展と連動して需要は中長期に拡大し、資源ナショナリズムと投機的な動きによる変動はあるものの、価格は上昇基調に推移すると見込まれる。

日立グループは、金属やプラスチック類など材料事業を推進する中で、これらの資源循環に関する活動を行っている。

ここでは、希土類磁石、銅線、アモルファス変圧器、FRP（Fiber Reinforced Plastics：繊維強化プラスチック）のリサイクル技術・スキームについて述べる。

2. 金属資源の偏在と枯渇

2.1 レアアースの中国偏在リスク

レアアース（希土類）は、原子番号57番のランタン（La）から71番のルテチウム（Lu）までの15元素のグループ（ランタノイド系）に21番スカンジウム（Sc）と39番イットリウム（Y）を加えた17元素の総称である。「高融点で高い熱伝導性」¹⁾という特性からハイテク・省エネルギー機器に広く使用され、2009年の世界生産量は1990年比約2倍の約12万4,000 tまで拡大した²⁾。特にネオジウム（Nd）やジスプロシウム（Dy）は、ハイブリッド車の永久磁石モータ

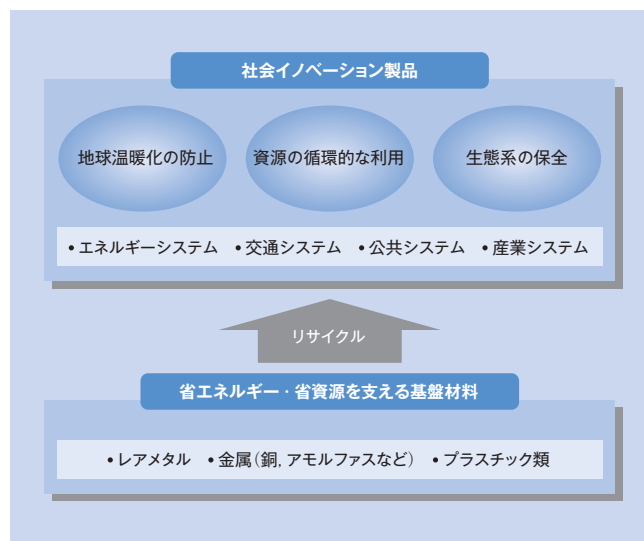


図1 | 社会イノベーションを支える基礎材料

日立グループは、省エネルギー・省資源材料の循環的な利用をめざしている。

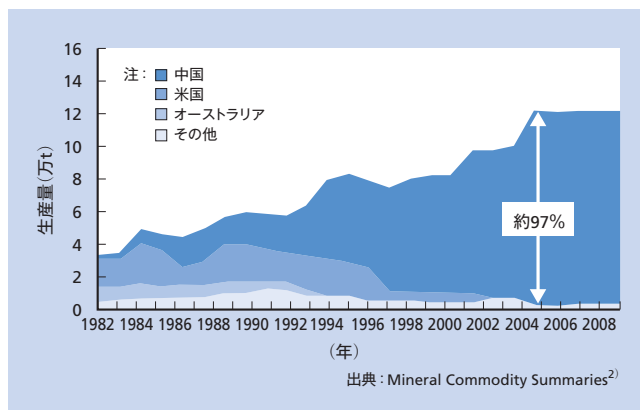


図2 | レアアースの国別生産量推移

レアアースの主要生産国は、1990年代半ばに欧米から中国へシフトした。

に使われるキー材料である。また、パソコンのHDD (Hard Disk Drive) や高効率コンパクトモータ、MRI (Magnetic Resonance Imaging: 磁気共鳴画像装置) などに必要不可欠であり、低炭素型社会の実現に向けてさらなる需要拡大が見込まれる。

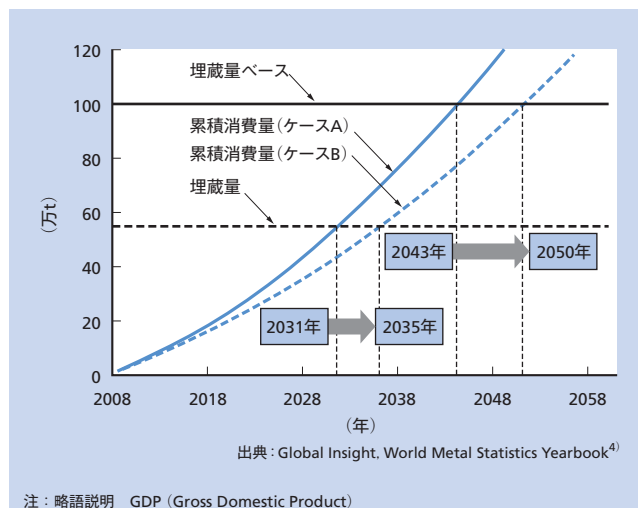
レアアース生産は大半を欧米諸国が占めていたが、1990年代にフランスのRhodia社が環境問題によって原料生産を豪州から中国へシフト、また米国Molycorp Minerals社が中国の低価格に追従できず大型鉱山 (Mt. Pass) を閉鎖した (2009年8月に採掘再開発表) ことで、中国の生産規模は急拡大している。2005年以降の生産シェアは中国が約97%を占めている (図2参照)²⁾。今後、レアアースの調達・確保がますます重要になる。

2.2 銅の資源枯渇リスク

銅を事例に資源枯渇リスクについて以下に述べる。ベースメタルである銅は、電気・機械・通信・電力分野など多岐にわたり使用され、社会インフラ事業の基盤となる資源である。また、資源枯渇性の観点では、レアメタルと同様に注目すべき鉱物資源である。

世界の電気銅生産の約2割は、生産工程や使用済み製品から回収できる銅スクラップが原料としてリサイクルされているが³⁾、一般的に銅の可採年数は34年程度と試算されている。この試算方法は、ある年の埋蔵量を「年間生産量」で割った値であり、将来の生産量の増減を加味していない。近年の中国の盛んな銅消費量 (2008年の銅消費量は1990年比約10倍に拡大)²⁾を加味すると、今後はさらに加速度的に銅が消費されるものと見込まれる。

そこで、将来の銅消費量を実質GDP (Gross Domestic Product) と連動させて両者の回帰式から予測した。需要量については2008年以降の累積消費量を推定し、供給量については2008年現在の「埋蔵量」(埋蔵量ベースの中で経済的採算性のある部分) と「埋蔵量ベース」(既知鉱物資



注: 略語説明 GDP (Gross Domestic Product)

図3 | 銅の資源枯渇年のシミュレーション

将来の実質GDP成長を踏まえると、一般的な試算よりも早く銅資源は消費される。ただし、リサイクルが進展すれば、枯渇年は延命する。

源量の中で技術的に採掘可能な部分) の2ケースを試算した。この際、新規鉱山開発による増加分は考慮しないものとした。

電気銅生産に占める銅スクラップ比率を現状の20%に維持した場合 (ケースA) と、2020年に2倍の40%に上昇させた場合 (ケースB) の二つのケースで資源枯渇年のシミュレーションを実施した (図3参照)。その結果、銅スクラップ比率が現状の20%であれば、埋蔵量で2031年 (可採年数: 24年) に、埋蔵量ベースで2043年 (可採年数: 36年) に2008年現在の埋蔵量 (ベース) を使い切る。実際には、採掘コストは上昇していくため、資源価格も上昇していくものと見られる。そのため製造業では製造原価に占める原料コストが増加する。リサイクルを進展させて、銅スクラップ比率が40%に上昇すれば、埋蔵量で4年、埋蔵量ベースで7年の延命効果が見込まれる。

製造業としては、資源安定確保という観点から銅スクラップ資源を重要な原料供給源として戦略的に活用していくことがますます重要となる。

3. 希土類磁石のリサイクル

現在、経済産業省の推進事業 (新資源循環推進事業費補助金) でネオジム磁石 (Nd-Fe-B系焼結磁石) のリサイクル技術開発を進めている。

日立グループは、医療機器のMRIやHDD、エアコンや冷蔵庫など冷媒圧縮循環用コンプレッサ (以下、コンプレッサと記す) など、ネオジム磁石を使用した数多くの製品を扱っている。ここでは将来に懸念されるネオジムなど、レアアースの国内調達不足を補う手段の一つとして、HDDとエアコンのコンプレッサを対象としたリサイクル装置 (構成素材・部品に分離させる機能) の開発状況、磁

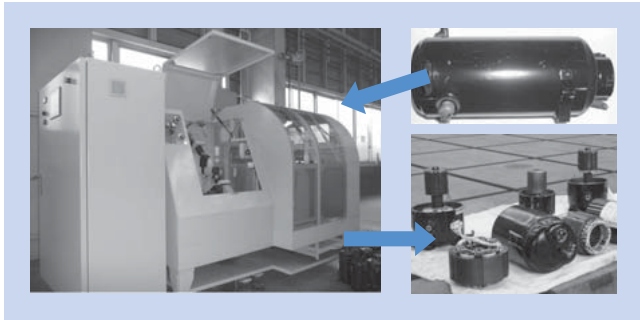


図4 | コンプレッサ分解装置
銅鉄製のシェルを自動的に切断する装置である。

石再生技術について述べる。

(1) コンプレッサ分解装置

コンプレッサの構成素材（鉄や銅など）は比較的にリサイクルしやすい資源とされているが、コンプレッサのシェルが鋼製で溶接構造のため、内部部品を取り出す方法として主にプラズマ（ガス）を利用した溶融切断が用いられていた。しかし、コンプレッサ内部の残留油に引火・発煙しやすいという課題があった。そこで、この課題を解決し、かつ、ネオジム磁石回収も考慮したコンプレッサ分解プロセスを開発中である（図4参照）。

コンプレッサは年式やメーカーの違いによって、型式がさまざまであり切断する位置や内部構造に違いがあるため、作業性および安全性の向上には作業者の熟練が必要である。また、コンプレッサにはレシプロとロータリの2タイプがあり、切断動作も異なるため両方に対応できる装置が求められていた。これらの問題を解決し、切断位置を作業者が指定するだけで、自動的に切断するのがこの装置の特徴である。コンプレッサの内部構造を図5に示す。

中心のロータという回転体の中に磁石が埋め込まれているため、最終的にこのロータを分離し、磁石を回収する動作機能が必要となる。ロータの断面を図6に示す。ロータの磁石の挿入パターンにはバリエーションがあるため、磁

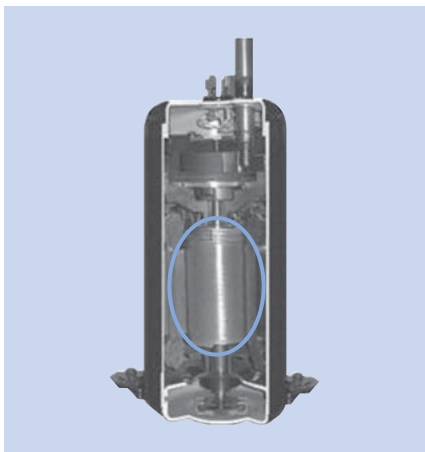


図5 | コンプレッサの内部構造
中心の色線で囲んだ部分がロータである。

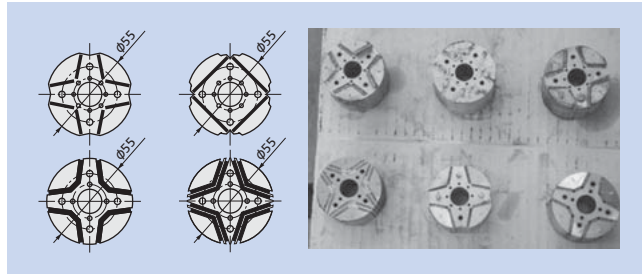


図6 | ロータの断面図
左図の線が濃い部分に磁石が挿入されており、形状はさまざまである。

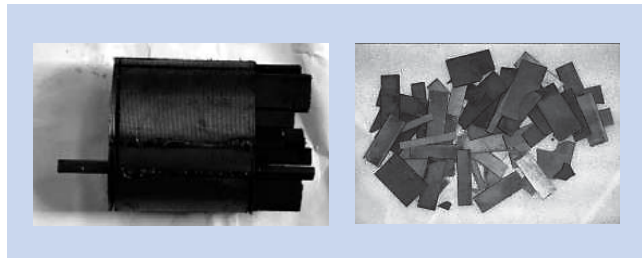
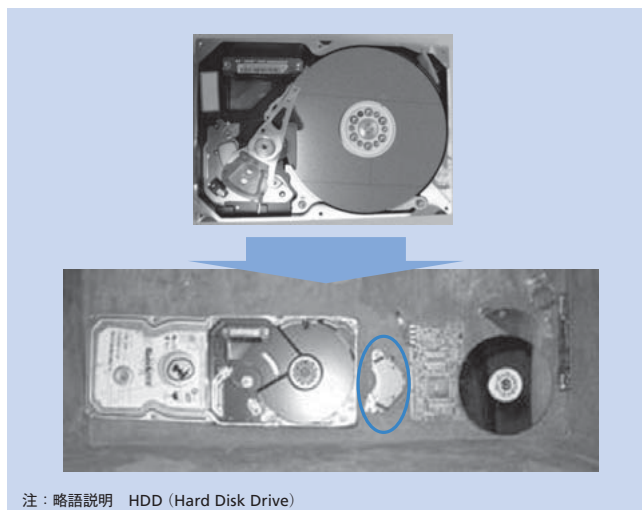


図7 | ロータからの磁石回収
左がロータから磁石を抜き取る状態である。着磁（磁力を保持している状態）してあるものを安全に取り出すために独自の方法で脱磁してから取り出す工夫を施している。

石を経済的に抜き取る方法を検討している。抜き取り前後の様子を図7に示す。

(2) HDD 分解装置

HDDの構成素材（アルミニウムや鉄など）はリサイクルしやすい資源ではあるが、一つ一つのパーツが細かいねじで接合されており、取り外すのに手間もかかるうえ、プラスでもマイナスでもない特殊形状のビット（ドライバーの先端）も必要になる。手分解では採算性が悪く、これを高めるために、HDD1台当たりの解体時間を平均で1分以内にすることを目標にした。ねじ止めされている位置や員数はメーカーや年式によっても異なることから、ねじを一つ一つ緩める方法ではなく、HDD自体に振動や衝撃を



注：略語説明 HDD (Hard Disk Drive)

図8 | HDD分解状況（分解結果を示すイメージ）
HDDを構成しているそれぞれのパーツに分離・回収する。中心のマーク部分がネオジム磁石である。

与え、すべてのねじを緩ませ、離脱（パーツごとに分離・分解）させる方式を編み出した。原理的実験では図8のようにHDDを構成するパーツの蓋（ふた）、筐（きょう）体、ディスク（プラッタ）、磁石、磁気ヘッド、プリント基盤など、主要部品を分離させることに成功した。今後、操作性、実用性を高めていく。

(3) 磁石再生技術

コンプレッサやHDDから磁石を取り出し、回収する装置開発と平行して、磁石の再生技術を検討中である。従来の湿式法（硝酸などを用いた溶媒抽出法）では廃液などが発生するため、環境負荷とコストをともに低減する必要がある。そこで、ネオジムやジスプロシウムなどの希土類を選択的に効率よく、分離・回収できる環境調和型のプロセスを開発中である。ビーカーレベルの実験では、磁石スクラップからこれらの希土類を約95%回収することができた。

将来的にはこのプロセスによって、大がかりな精錬所や大規模プラントを必要としない、都市型の小規模装置でスクラップ由来の磁石から貴重な希土類を回収することを想定している。

4. 銅線のリサイクル

4.1 国内の銅リサイクル状況⁵⁾

2007年の世界の銅消費量は年間約1,817万tで、そのうち日本は、約125万tを消費した。日本は、銅鉱石の大半をチリなどの海外から輸入し、約150万tの電気銅を生産している。銅および銅合金は、価値が高く再生利用が進んでいる。日本では、電線約86万t、伸銅品（合金を含む）約104万t、銅鋳物約10万t、電解銅箔（はく）約2万tが生産され、その原料としては電気銅と銅スクラップが使用

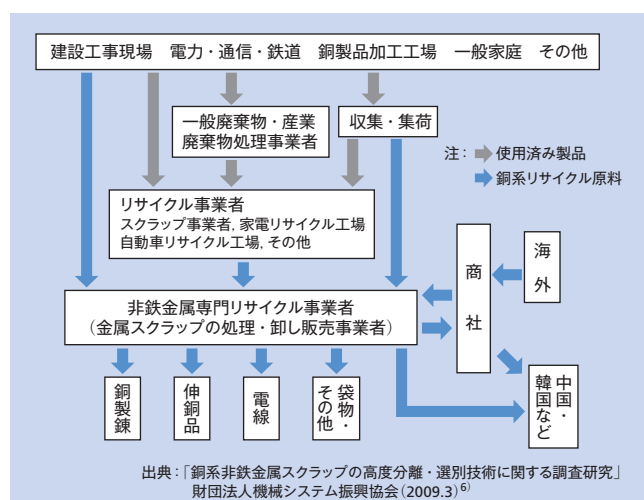


図9 銅系リサイクル原料の再資源化の流れ

銅スクラップは建設物からの電線屑（くず）や銅管、電力・通信・鉄道での電線屑、工場で削り粉などとして排出されるものや、一般家庭・事業者から使用済みの設備・機器に含まれるものがあり、それらを収集し再生資源として再利用されるまでの流れを示す。

されている。電線は、原料全体の17%相当で純銅スクラップを使用しているが、電気特性の要求から他製品に比べてその比率は低い。一方、伸銅品では50%以上の割合でリサイクル銅が使用されている。

4.2 電線リサイクルの取り組み

社団法人電線総合技術センター（JECTEC）の調査では、国内の電線リサイクル事業者が取り扱った2007年の廃電線量は約13万tであり、年々減少している⁷⁾。理由は廃電線がスクラップとして海外へ輸出される量が増加したためと考えられている。リサイクルした材料のうち導体の銅材料は、従来から100%再利用されている。被覆材は近年の資源価格の高騰により、年々再利用率が向上している。銅線を含む銅材料のフローを図9に示す。使用済みの銅および銅合金は産業廃棄物処理事業者などを経てリサイクル事業者が選別する。金属の種類が明確で、量が多い場合は、電線や伸銅品の原料として再利用される割合が高い。

日立電線グループは、廃電線リサイクルを他社に先駆けて進め、同図と同様の流れで実施してきた。回収した導体は、ほぼ100%リサイクルしている。

一方、被覆材には絶縁体として架橋ポリエチレンが大量に使用されているが、溶融成形が困難のため、一般的にマテリアルリサイクルが難しいとされてきた。そこで、日立電線グループは、高温高压の超臨界アルコールを用いた加溶媒分解反応を利用し、熱可塑性のポリエチレンを生成する独自の技術を開発し、再度、電線の被覆材としてリサイクルすることに成功した⁸⁾。

5. アモルファス変圧器のリサイクル

アモルファス変圧器の構造を図10に示す。鉄心材料には、鉄・ボロン（ホウ素）・けい素を主原料とした合金を溶融し、これを急冷することで作られるアモルファス薄帯を使用している。アモルファスとは、金属特有の原子が周期的に配列した結晶構造を持たず、ランダムな状態のまま凝固した非結晶状態を示す（図11参照）。

アモルファス薄帯（板厚約25 μm）は軟磁性材料として

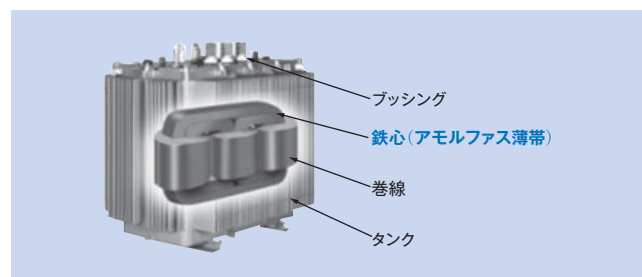


図10 アモルファス変圧器の構造

変圧器の鉄心材料に、アモルファス薄帯が使用されている。

非常に優れた性能を有している。特に高透磁率・低鉄損といった観点から静止誘導機器の鉄心材料として広く用いられるようになった。日立グループは、配電用変圧器の高効率化をめざし、アモルファス薄帯を変圧器に用いることで、負荷状態に関係なく常時発生する無負荷損失の低減を実現できるアモルファス変圧器にいち早く着目し、1980年代初頭より基礎技術の開発に着手し、顧客に納入してきた。

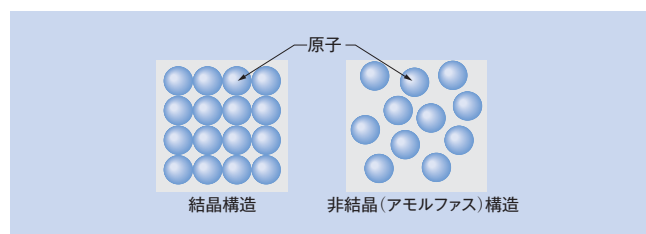


図11 アモルファス合金の概念図

アモルファス合金は、原子がランダムに配置された非結晶合金である。

しかし、アモルファス変圧器は1991年に電力機器用に導入されて以来18年が経過し、廃棄処理の時期を迎えている。そこで、2009年より、一部電力会社向けの変圧器について、アモルファス鉄心をその主原料であるフェロボロンにリサイクルする、完全クローズドのリサイクルプロセスを確立した(図12参照)。使用中の変圧器について修理の可否を判断し、修理不可能のものは解体し、鉄心の状態に応じて再利用またはリサイクルする。リサイクルルートについてはユーザー、商社、解体企業、中間処理企業、素材メーカーと協力してリサイクルする。

今後は、アモルファス合金への直接リサイクルの検討を進めるとともに、さらにはこのシステムを全電力、一般産業市場へ展開することによって、生産・運転・廃棄まで一貫して行い、環境に配慮した変圧器の実現を図っていく。

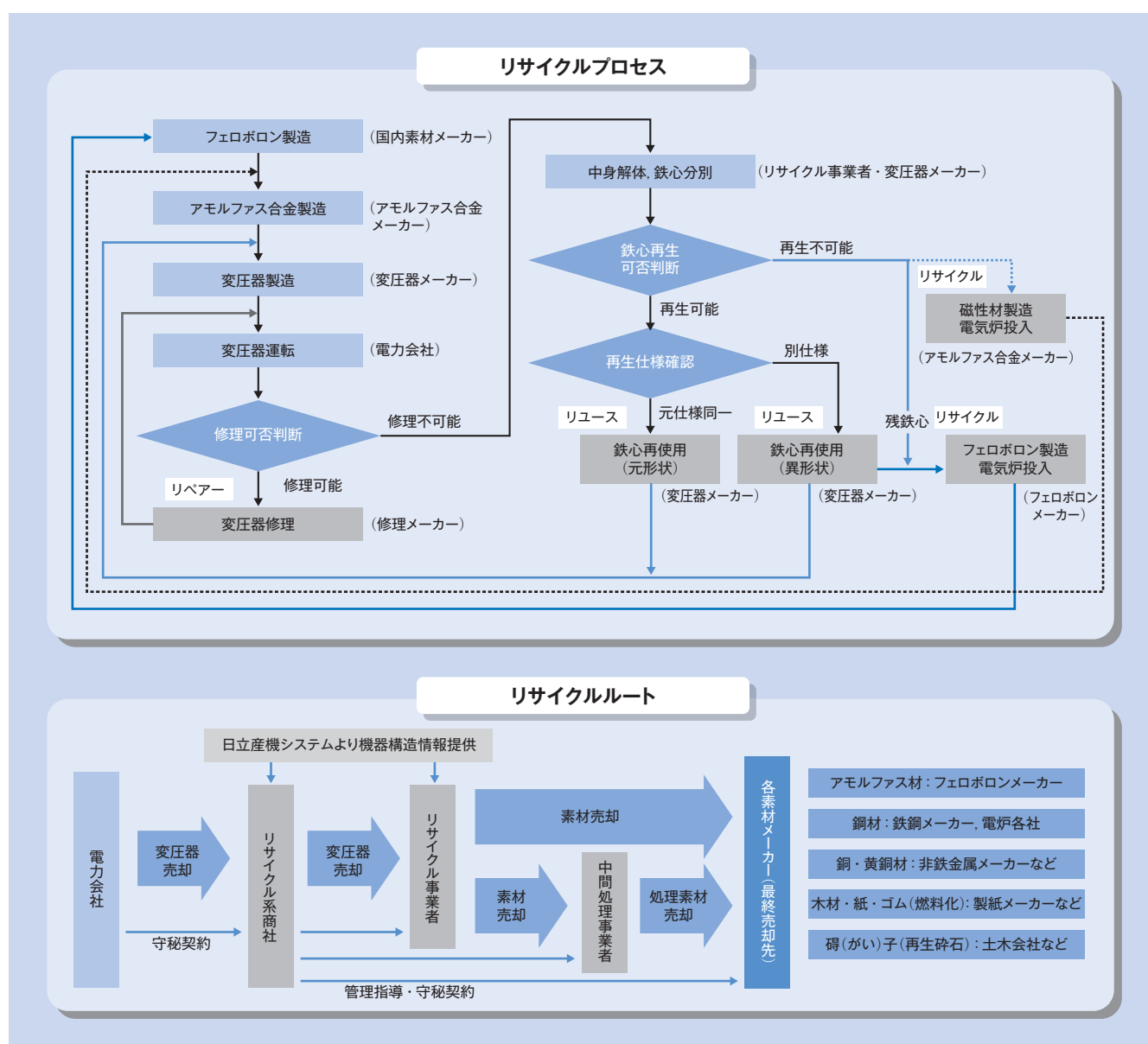


図12 アモルファス変圧器のリサイクルシステム

アモルファス鉄心をフェロボロンにリサイクルし、鉄心の原料として再利用するクローズドリサイクルシステムを構築した。各企業との連携によりリサイクルルートの中に位置づけられる。



処理前



処理後

注：略語説明 GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastics)

図13 | GFRP製ヘルメットのリサイクル

破断、粉碎などを行わず常圧下180℃、10時間で不飽和ポリエステル樹脂を溶解し、GFRP製ヘルメットからガラス繊維を長繊維のまま回収することができた。

6. FRPのリサイクル

FRPは、耐久性のある構造材としてさまざまな用途に利用されている。このFRPからガラス繊維、ならびに炭素繊維の製品への適用を検討している。このコア技術は、不飽和ポリエステル樹脂を用いたガラス繊維強化プラスチック (GFRP: Glass FRP) ならびにエポキシ樹脂を用いた炭素繊維強化プラスチック (CFRP: Carbon FRP) のいずれもリサイクルできる常圧溶解法である。常圧溶解法は、アルカリ金属塩触媒と高沸点溶媒を用いて、常圧下約200℃で熱硬化性樹脂を解重合して可溶化し、複合材料を構成する各種素材を分離回収する方法である。使用済み複合材料から回収した繊維と充填(てん)材については、再利用できる見通しを得た。GFRP製ヘルメットのリサイクル事例について図13に示す。

これらの分離回収方法は、環境影響評価ならびに経済性についても良好な結果を得て、実用可能と判断した。現在、回収無機材料の再利用用途として、鉄道車両部品、自動車部品、浴槽、漁船、建材などを対象に試作を重ねている。

回収樹脂に関しては、再合成技術を検討中である。回収樹脂はモノマーあるいはオリゴマーになっていることは確認済みであり、それらを原料にして複合材料に適用可能な樹脂が得られると考える。

7. おわりに

ここでは、希土類磁石、銅線、アモルファス変圧器、FRPのリサイクル技術・スキームについて述べた。

資源循環は、回収・再生・再利用を経済的に成り立たせることで成立するが、この短期的メリットだけでなく、中長期的には再生不能資源の寿命を延命化できる。また、新たな資源を地下から極力採掘しないことで、採掘時の環境負荷を低減し、輸送・製錬に伴うエネルギー消費(CO₂発生)も節減できる。材料事業も包含する日立グループとしては、今後も積極的に材料資源循環を推進していく所存である。

参考文献

- 1) 金属資源レポート、レアアース(希土類)の需要・供給・価格動向等、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構(2007.7)
- 2) Mineral Commodity Summaries (1980-2010), U.S. Geological Survey
- 3) 鉱物資源マテリアルフロー 2008, 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構(2009.8)
- 4) World Metal Statistics Yearbook (1984-2009), WORLD BUREAU OF METAL STATISTICS
- 5) 金属資源レポート、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構(2009.7)
- 6) 銅系非鉄金属スクラップの高度分離・選別技術に関する調査研究、財団法人機械システム振興協会(2009.3)
- 7) JECTEC NEWS, No.58, 社団法人電線総合技術研究センター(2009.11)
- 8) 後藤、外：超臨界アルコールによる架橋ポリエチレンリサイクル技術のEPRによる環境影響評価、日立電線、No.28(2009.1)

執筆者紹介



馬場 研二

1978年日立製作所入社、新事業開発本部 資源循環推進室 所属
現在、日立グループの資源循環企画業務に従事
工学博士
環境システム計測制御学会会員



根本 武

1992年株式会社日立システムテクノロジー入社、日立製作所
新事業開発本部 資源循環推進室 所属
現在、日立グループの資源循環技術開発と企画業務に従事



丸山 晴子

2006年日立製作所入社、株式会社日立総合計画研究所 研究
第二部 産業グループ 所属
現在、資源問題に関する社会・市場動向調査、事業戦略立案に従事



竹谷 則明

1980年日立製作所入社、日立電線株式会社 品質・環境本部 環境
センター 所属
現在、日立電線グループの環境管理に従事



板谷 勝久

2007年株式会社日立産機システム入社、事業統括本部 受配電・
環境システム事業部 企画部 所属
現在、配電用変圧器の企画・拡販に従事



廣瀬 祐子

2006年日立化成工業株式会社入社、筑波総合研究所 基盤技術開
発センタ リサイクル技術グループ 所属
現在、FRPリサイクル技術の研究開発に従事