

【産業競争力懇談会2011年度 プロジェクト 最終報告】

【希少金属の安定確保に向けた  
資源循環システム】

2012年3月6日

産業競争力懇談会 **COCN**

## 【エクゼクティブサマリ】

### 【提言の骨子】

我が国は、高い技術力を背景に世界に先駆けて省エネルギーに資する製品の開発・販売に注力してきた。これらの製品は、近年の全世界的な低炭素社会の実現を目指したグリーンイノベーションを加速させる機器として国内外から期待されている。しかし、アジアを中心とする各国の工業化政策の推進により、これらの機器の性能を決める高性能部材の構成元素である希少金属（レアメタル）の安定供給に不安が生じ始めている。本プロジェクトでは、我が国の基礎技術の高さや将来にわたる市場の広がりを考慮し、希土類高性能磁石を構成するレアアース（ジスプロシウム Dy）とリチウム 2 次電池におけるリチウム（Li）に絞り、さらに産業界と大学・研究機関が相互連携して、将来にわたる資源の安定確保を実現するための新たな資源循環システムについて検討を行った。本検討においてレアメタル特有の分散・少量利用に起因する従来の鉄やアルミ等のベースメタルの資源循環システムでは対応できない諸課題を洗い出し精査した結果、低環境負荷・低コストで資源を再生利用するための技術開発課題が抽出された。本技術課題について産学官が連携したオープンイノベーションにて課題解決の新技术を開発し、早期に実証試験することが重要である。将来的にはこれらの技術を組み込んだ新たな資源回収システムを検証する『資源循環システム準備組合（仮称）』へと発展させ、資源確保を確実に図る必要がある。

### 【検討の対象】

検討対象である**希土類高性能磁石 Nd-Fe-B** は、エネルギー変換効率が高く、製品の省エネルギーに直結するため、近年その適用分野が急増している。一方、耐熱性改善のために添加する Dy は将来にわたる安定確保が困難であり、使用量の低減とともに回収機器からの資源活用が不可欠である。ただ、足下の資源価格が高騰していても磁石の回収ルートは確立しておらず、未だに廃製品からの回収はほとんど実施されていない。

一方、二次電池として利用されている**リチウム電池**は軽量で高性能であることから、携帯性を要求される電子機器等のバッテリーとして急速に需要が増加し、今後は車載用としても需要が急速に拡大する見込みである。リチウムは資源として比較的豊富であるが、電池用途向けは高純度のリチウムが要求され、資源・産業統計データから得られる埋蔵量と供給量から真の需給バランスを判定することは難しい。さらに、廃棄されたリチウムは活性であり、安全な処理が望まれていることから、安全性を考慮した資源循環システムが求められる。

**ジスプロシウムもリチウムも**これまでは電気・電子機器用途が中心で少量利用であったが、今後のグリーンイノベーションの中核となる次世代自動車の普及を契機に、これらの資源循環問題が我が国のみならず、世界的に表面化することは自明である。遅くとも 2020 年までには、使用済機器を確保する**社会システム**、構成元素の**識別技術**、環境へ配慮した**低コスト資源回収・再資源化技術**を確立し、我が国をモデルとした**実証試験**を行う必要がある。

### 【オープンイノベーションで取り組む技術課題】

希少金属の資源循環システムを実現するためには、新たな革新的技術を従来のリサイクル

システムと融合させながら、オープンイノベーションのもと産学官が連携した体制にて取り組む必要がある。革新的な技術についてはリスクが高い反面、実用化することで希少金属の資源循環システムの切り札となるものであり、国の積極的な支援が必要である。

① 希少金属の冶金学的な特性を利用した革新的分離・精製技術

既存のベースメタル精錬技術と融合した希少金属の濃縮・分離プロセスの開発 等（パイロリサイクル技術の応用等）

② 回収すべきターゲットを識別し、取り出す技術（リサイクル技術とIT技術の融合）

構成元素を簡便かつ秘匿しながら識別・認識する技術、資源循環のための材料データ管理技術 等（ゲノムや創薬の管理・探索技術の応用、簡便な分析装置の開発等）

③ 低コストで再生化する技術の開発（材料技術とリサイクル技術の融合）

必須資源を優先的に抽出する技術、特性に与える混入元素の影響評価、代替材料が共存できる技術、既存リサイクルシステムへ落とし込む中間処理技術、構造材料用途の開発 等

④ 易分解を実現する組立技術（材料技術と機械設計技術の融合）

中間処理に要する労力、エネルギーを最小化する技術、分解の自動化技術、分離の必要ない部材の接合・表面処理技術 等

さらに、将来の資源循環システム準備組合に向けて、下記の課題への対応が必要である。

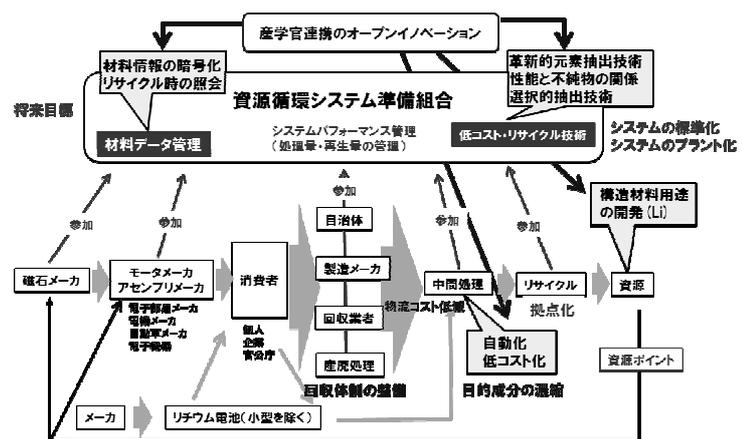
⑤ 回収・再生拠点の特定化も視野に入れた回収フローの設計・構築

既存の廃棄物回収システム（一般廃棄物、小型家電、産業廃棄物、家電4品目等）を活用した高性能磁石の国内循環フロー 等

⑥ 資源循環システムの実証プラントにおけるバランスシートの調査

産学官ステークホルダーの管理・運営下における資源循環システムの経済性・事業性評価とリサイクル価格、及びエネルギー消費量低減に向けた実証モデル提案 等

この資源循環システム準備組合のもと、材料メーカ、アセンブリメーカ、自治体、中間処理業者、リサイクル業者等が参画することで、再生資源の配分権を付与した新たな資源循環システムを構築する。資源循環システム準備組合は、回収される製品、得られる資源等を統計的に解析するとともに、実業に向けた問題点の提起と産学官連携による対策方法を考案する。



資源循環システム準備組合イメージと技術課題

資源循環システム準備組合において、システムのパフォーマンスが確認されれば、消費国連携によるさらなる資源循環システムの効率的運用を実現することが可能となる。

## 【目次】

【はじめに】	… 1
【プロジェクトメンバー】	… 2
【本文】	
1. 資源循環システムを必要とする希少金属	
(1) 本プロジェクトの目的と対象希少金属の選定	… 3
(2) 希少金属に対する政府・関係機関の動向	… 4
(3) 磁石におけるレアアースの動向と対策	… 7
2. 使用済み機器から資源を確保するためのビジネスモデル	
(1) リチウム電池にみるこれからの資源循環	… 9
(2) リサイクルシステムのパターン	… 11
(3) 環境リサイクル事業としてみた資源循環システムに向けた課題	… 13
3. 課題解決のための提言	
(1) 資源循環システム準備組合の設置	… 15
(2) 資源循環システム準備組合の構成	… 16
(3) 資源準備システム準備組合の課題	… 17
(4) 課題解決に向けた技術開発	… 17
4. 社会的効果	… 24
5. 今後の活動	… 25
6. 政策への展開案と要望	… 26
7. 提言のまとめ	… 26

## 【はじめに】

我が国の素材産業や部品産業の高い技術力を支えている資源、特に希少金属（レアメタル）は、微量の添加によって機能性材料の特性を飛躍的に向上させることができることから、産業のビタミンとも呼ばれ、今後の低炭素社会実現には必要不可欠な物質である。

しかし、世界的な工業化の進展に伴って、その需要が飛躍的に増大しており、将来にわたる安定確保が困難となりつつある。このような状況に鑑み、政府は我が国の先端産業に必要なレアメタルに対して、これまで省使用化技術や代替材料開発、リサイクル技術開発、新規な資源探索等のプロジェクトを進め、国および民間でのこれらレアメタル資源の備蓄も進められているが、まだ次のような課題・問題点があると考えます。

- ①レアメタル資源の中には世界的な需要が急伸し、追加施策の必要な元素が存在する。
- ②近年飛躍的に特性が向上した機能性材料・部品において、十分な資源確保ができず、国内産業活動が著しい阻害や、産業の海外流出による空洞化が顕著化している。
- ③小型家電に代表される希少金属を含む廃棄製品からの資源確保とその資源循環システム構築が遅れており、国内有効資源の海外流出が加速している。
- ④枯渇危機が明確となった希少金属もあり、国内外との相互連携や新たな規則・規格化が必要となりつつある。

今回、「希少金属の安定確保に向けた資源循環システム」を具現化していくため、「希少金属をリサイクルしやすい部材構造設計」、「リサイクルしやすいマテリアル組成」、「材料・部材化技術とリサイクル技術のIT技術による融合」等について、産学官が一体となった体制で提言を取り纏める。

「希少金属の安定確保に向けた資源循環システム」の実現は、希少金属資源（天然資源）の依存度を低減させた新しいマテリアル社会の構築につながり、資源価格の影響を抑えた高機能材料の継続的な提供は勿論のこと、オールジャパンの体制による低コスト回収技術開発への足がかりとなり、資源を有しない我が国の産業競争力強化と、分別・回収に関する新規雇用の創出に資するものと考えられる。今回の研究成果を契機として、産学官の垣根を越え、リサイクルしやすい素材（マテリアル）、リサイクルしやすい構造を提案、規格化が進み、今後の希少金属政策に反映され、産業界の発展ひいては我が国のマテリアル立国の基礎となることを願うものである。

産業競争力懇談会  
会長（代表幹事）  
榊原 定征

## 【プロジェクトメンバー】

リーダー 小林 慶三 独立行政法人産業技術総合研究所  
サブリーダー 裏田 勝淑 JX ホールディングス株式会社

### メンバー

森川 明彦 JSR 株式会社  
小久保 輝一 JSR 株式会社  
荒木 健 三菱電機株式会社  
藤本 克彦 株式会社東芝  
小林 英樹 株式会社東芝  
前田 貴雄 住友電気工業株式会社  
薄井 徹太郎 株式会社住友商事総合研究所  
駒村 和彦 株式会社野村総合研究所  
平尾 一之 京都大学  
山本 高郁 大阪大学  
田中 幹也 独立行政法人産業技術総合研究所  
大木 達也 独立行政法人産業技術総合研究所  
森本 慎一郎 独立行政法人産業技術総合研究所

### オブザーバー

粟津 友之 住友電気工業株式会社  
中塚 雅教 株式会社三徳  
伊藤 庸一郎 大阪大学  
牧野 智成 大阪大学  
尾崎 公洋 独立行政法人産業技術総合研究所  
多井 豊 独立行政法人産業技術総合研究所  
清水 佳奈 独立行政法人産業技術総合研究所

## 【本 文】

### 1. 資源循環システムを必要とする希少金属

#### (1) 本プロジェクトの目的と対象希少金属の選定

本プロジェクトは“直接的な資源確保とその有効性を高めるルール作り”を主目的とし、近年の希少金属（レアメタルおよびレアアース）の資源問題を背景として、「使用済製品からいかに有効な資源を確保するか」をテーマとする。

希少金属は産業のビタミンとも呼ばれ、高性能部材を生産する上では不可欠な資源である。また、資源を輸入に頼る我が国では、新興国を中心とする世界的な工業化進展により資源の安定確保がかなり厳しくなっている。産業競争力懇談会（COCON）では、これまでにいくつかのレアメタル関係のプロジェクトが実施されており、その結果として2007年度以降、代替材料開発などの国家レベルのプロジェクトが推進されている。しかしながら、代替材料の実用化までには相当な時間を必要とし、すべての利用領域を代替材料でカバーできるかどうかについては疑問が残る。したがって、資源の供給不安がひとたび生じると、現在の我が国の国際的な優位性を有する機能性部材、省エネ部材を継続して生産することが急速に難しくなると予想される。

資源循環においては、レアメタルを用いた新たな機能性材料が世に知られると、資源獲得要求がさらに高まり、需要量が増加するため、資源の探査や備蓄を進めることになる。その後、初期の製品寿命に近づき始めると、リサイクル技術の必要性が注目され、他方、代替材料開発が大学や研究機関で盛んになり始めるとともに、省使用化技術が実用化され始める。さらに一段と社会的な需要が増加すると、リサイクルや省使用化、代替材料がうまく絡み合い、レアメタルの安定供給が実現されることになる。これら一連の資源循環の変遷において、タイミングよく様々な施策を講じることによって、資源の安定供給に向けたシステムを実現することができる（図1参照）。これら資源循環に向けた対策は、どれか一つを重点化して対策すれば資源の安定供給につながるというものではなく、社会の情勢やその後の産業の発展を予想しながら、すべての対策技術をベストミックスさせて実施することが肝要である。

現状、小型家電からのリサイクルは資源が高価な貴金属を中心に全国各地で実証試験が進められており、元素を抽出して既存のプロセスへ戻す技術として事業化が検討されている。一方、資源価格の安い元素は残渣として産業廃棄物の形で処理されているのが現状である。

現状、小型家電からのリサイクルは資源が高価な貴金属を中心に全国各地で実証試験が進められており、元素を抽出して既存のプロセスへ戻す技術として事業化が検討されている。一方、資源価格の安い元素は残渣として産業廃棄物の形で処理されているのが現状である。

我が国の電気・電子などの産業で利用されているレアメタルのうち、現時点でリサイクルがうまく機能していない元素としては、リチウムやレアアースがあげられている（図2）。特

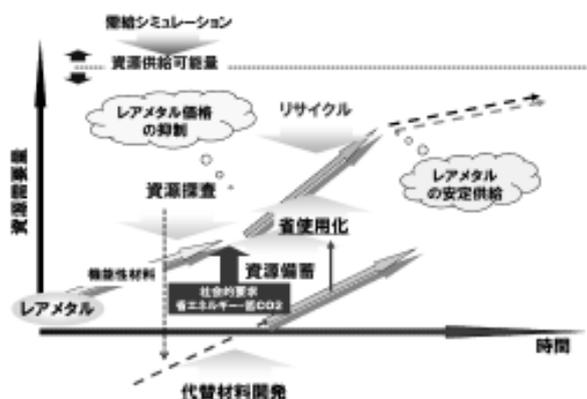


図1 レアメタル資源確保のための技術

に、モーターや蓄電池は現在我が国が国際的な優位性を有しているが、資源がボトルネックとなる可能性が極めて高い。しかし、資源を確保するためのリサイクルについては、このような部材に対してほとんど実施されていない。これは、まだ**廃棄製品として戻る量が少ないことと、それぞれの部材が小さく分散配置されている**ため、効率的に回収できないことに起因している。

このような我が国の資源循環の現状を背景に、本プロジェクトでは、緊急に取り組むべきレアメタルとして**高性能磁石のレアアース（ジスプロシウム Dy）と、二次電池としてのリチウム**を選定し、特に磁石をモデルケースとして、①使用済製品の確保と使用済み機器から資源を確保するためのビジネスモデル、②使用済機器からの資源回収の促進、易リサイクルを実現する部材構造、③既存リサイクル技術と連携した低コストリサイクル技術について討論した。なお、COCN ではこれまでに応用製品（業界）ごとにリサイクルを促進する検討がなされているが、本プロジェクトでは、レアメタルやレアアースの使用環境の特殊性を考慮して、応用製品の分野を超えた社会システムを含めた垂直連携による資源の循環による資源確保の観点から議論した。

ただ、レアメタルを利用した高性能部材は必ずしもすべてを資源に戻さなくても、ダウングレード利用なども考えられるため、将来の社会像を見据えながら、それぞれの用途に応じた最適な資源循環を考える必要がある。本プロジェクトではそれらの状況も活発に意見交換を行い、将来像についても議論した。

## （2）希少金属に対する政府・関係機関の動向

国の取り組みとしては、経済産業省におけるレアメタル確保戦略が実施されている。様々な種類が存在し、様々な用途があるレアメタルに対して、集中的、戦略的な取り組みが必要であり、優先度を見極めた取り組みや今後の需要増大が見込まれる新エネあるいは省エネ製品の動向などからの評価が重要とされている。

また、レアメタル確保に向けた4つの柱として、**①海外資源確保、②リサイクル、③代替材料開発、④備蓄**があげられている。さらに、共通的な基盤整備として、資源人材の育成、技術力強化、ユー

元素	電気電子関連	その他用途
ニッケル	家電など：一部回収	ステンレス鋼・特殊鋼：ほぼ全量リサイクル
コバルト	電池：Li電池(58%)、ニッケル水素(77%)	特殊鋼：鋼屑として回収
タングステン	—	切削・研磨屑・スクラップ(リサイクル 40%)
モリブデン	—	特殊鋼：鋼屑として回収
タンタル	コンデンサ・光学レンズ・電子機器フィルタ等： <b>リサイクル無</b>	その他： <b>リサイクル無</b>
プラチナ	電気電子用部品：貴金属として回収あり	触媒：リサイクルあり(70%以上)
パラジウム	電気電子用部品：貴金属として回収あり	触媒：リサイクルあり(60%以上)
リチウム	電気電子用部品、二次電池： <b>リサイクル無</b>	耐熱ガラス： <b>リサイクル無</b>
インジウム	使用済み製品： <b>リサイクル無</b>	ITOターゲット：リサイクルあり
レアアース	光学レンズ： <b>リサイクル無</b>	磁石： <b>リサイクル無</b>
アンチモン	テレビブラウン管： <b>リサイクル無</b>	合成樹脂： <b>リサイクル無</b>

図2 レアメタルのリサイクルの現状

((独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構「鉱物資源マテリアルフロー(2007)報告書」より作成)

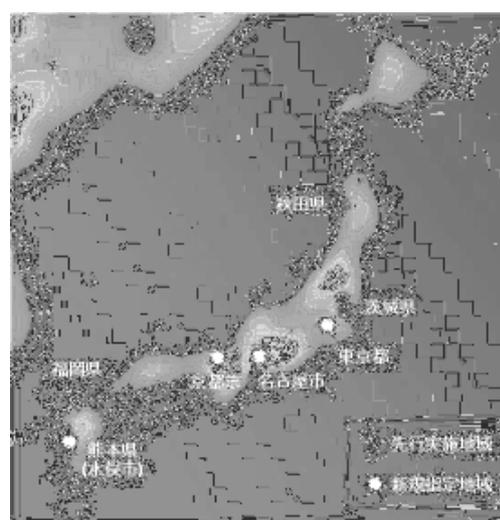


図3 使用済み小型家電からレアメタル回収モデル事業

ザーを含むサプライチェーンを構成する産業の一体的取り組みの強化が示唆されている。

経済産業省及び環境省では使用済小型家電からのレアメタルの回収及び適正処理に関する研究会が2008年から2010年まで開催され、レアメタルWG（資源回収：東北大 中村教授）、環境管理WG（ハザード：京大 酒井教授）、リサイクルシステムWG（法律・社会システム：慶大 細田教授）にて詳細な

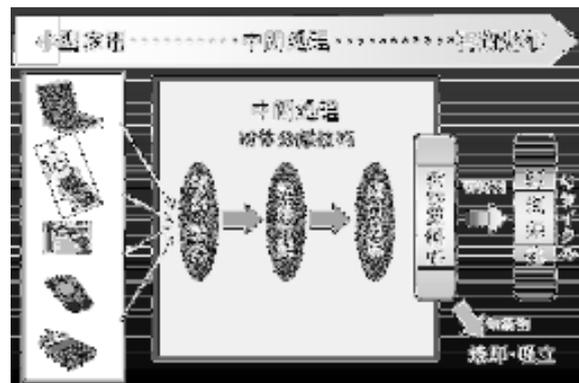


図4 小型家電からのレアメタル回収

る検討が行われた。また、小型家電からレアメタルを回収するモデル地域として、国内7か所（図3参照）にて回収対象製品を決めて実際の社会実験が行われた。

独立行政法人産業技術総合研究所（以下、産総研）では、希少金属の資源循環を目指して、リサイクルのための中間処理技術の開発に取り組んでおり、様々な小型電気・電子機器を中間処理し、粉砕や選別の条件に関する選択肢を種々検討しながら回収産物・中間産物の回収に取り組んでいる（図4参照）。資源回収においては、回収されたものすべてが再度資源になるものではなく、途中の処理方法によってその再資源化率は変化する。

レアメタルのような使用量が少なく、局所的に利用されている元素は、中間処理が一つのボトルネックとなり、従来のリサイクルシステムとは異なる課題が散見されている。小型家電は製品が小さく、従来型の手分解・手選別には処理能力と経済性において限度があり、選別方法の再検討とともに、どのようなものが入っているのかをモニタリングする必要もでてきた。なお、小型家電から回収すべき元素としては、電池や磁石などが入っている使用済み製品が対象となる。製品を製造する際には、いろいろなラインを作って製造されているが、廃棄物をまとめて既存の一括のプロセスで処理することは難しく、中間処理をどのように進めるかが喫緊の最重要課題である。そのために、産総研では、例えば、プリント基板に対する電子素子選別シミュレータを開発中であり、電子素子物性・個別情報に基づく選別方法について情報提供できるシステムを構築している。

しかしながら、このような技術・システムが完成しても、回収が困難な部位については、製品段階での易リサイクル設計が必要である。また、中間処理では少なからず中間副産物が発生するため、将来の新分離精製技術開発後の資源利用に備えたこれら副産物の備蓄も検討しなければならない。このようにレアメタルリサイクルの促進には、中間処理技術・易リサイクル設計・備蓄技術の連携（産総研では、これらは資源循環インターフェイスと命名）を図り、ベストミックスしていくことが重要である。

また産総研では、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構と共同で、湿式製錬技術を適用した廃Nd-Fe-B磁石からの、ジスプロシウムとネオジムの分離回収法について、2008年度から2010年度まで基礎研究を行った。Nd-Fe-B磁石では、60%以上が鉄で構成されており、鉱酸による全溶解は、酸消費量、水溶液からの分離工程の負荷増大、廃液処理における

中和に要するアルカリ量の増大を考えると不利である。そこで、廃磁石を脱磁・粉碎し、酸化焙焼によってレアアースおよび鉄を酸化物とした後、希塩酸でレアアースのみを選択溶解する方法を提案した。また溶解液から、溶媒抽出法によってまずジスプロシウムのみを選択抽出し、次いでネオジムを抽出するプロセスを提案した。

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、NEDO）では、対策の必要なレアメタルに関する調査、検討が行われている。特に、埋蔵量だけでなく、カンントリーリスクや今後の需要量などを総合的に判断して、対策の必要な鉱種の選定が行われてきた。これまでに、経済産業省と連携しながら、タングステン W（超硬工具）、インジウム In（透明電極）、ジスプロシウム Dy（磁石）、白金族（触媒）、セリウム Ce（研磨剤）、テルビウム Tb（蛍光体）などの鉱種を選定し、すでに国家プロジェクトとして取り組まれている。研究開発では、代替技術の開発とともに、省使用化につながる技術開発も行われている。なお、これらの鉱種は、地域偏在性の高い元素となっており、「資源価格の人為的高騰の防止」も、もうひとつの目的とされているように見受けられる。

さらに、産総研ではレアメタルの定義に基づき、基礎研究の実用化や産業需要急増の可能性なども考慮したレアメタル対策技術を検討している。また、資源調達する際の副産物などの状況を踏まえ、流通する資源量低下が予期される資源についても検討されている。資源に対する施策を考える上では、現時点での流通量のみを判断基準とせず、将来的な産業の発展、あるいは主たる産出資源の変更に伴う副産物の種類や量の動向などについても各分野の専門家の意見も十分に考慮し、システム全体の最適解を検討すべきことが明確になった。

例えば、低融点材料として知られるビスマスは、一般的に鉛の副産物として知られているが、毒性のある鉛の代替材料として近年用途が増加している。そのため、今後の鉛採掘量の低下により、その副産物であるビスマスの産出量も当然低下が予想される。このような材料に対しては、他の産出元素の副産物からビスマスが採取できるかをあらかじめ調査しなければならない。また、レアメタル対策技術は資源だけの問題としてとらえるのではなく、資源探査、リサイクル、代替・省使用等を相互連携させて最適解を追求した総合的対策技術として取り組むべきである。具体的には、対象となる鉱種によっては、これらの技術要素のバランスを調整（ベストミックス）して対応することが経済的であり、かつ実践的でもある。

エネルギーの有効活用に資する機能性材料（グリーンイノベーションに資する材料）を構成し、資源供給に対する不安が大きく、リサイクルが社会的に普及していない元素を本プロジェクトではまず取り上げるべきと考える。現状のリサイクルにおいては、部材が小さいあるいは薄膜として使用しているなどの元素については、その状態に合わせた新しい取り組みが必要である。もちろん、どの程度の大きさの部材までリサイクルにかけるのかという経済性も考慮した議論は別途必要である。一方、その素材の素性がわからないということがリサイクルの阻害要因となることも考慮しなければならない。

これらを総合的に整理すると、すでに代替材料開発などが国で進められてはいるが、元素を確保するという観点から、先に述べたモーター用磁石に使用されるジスプロシウム (Dy) や電池のリチウム (Li) に対して、資源循環システムを議論することが、産業的に最も短期間

で効果が得られ、今後の資源循環モデルを検討する上でも最適であると考えられる。また、我が国の基幹産業である自動車は今後 EV や HEV などの次世代自動車への進化するためにも、この 2 元素の担う役割は大きい。

### (3) 磁石におけるレアアースの動向と対策

磁石に使われている Dy の需給に関しては、産総研の調査結果によると、「悲観モデルあるいは楽観モデルを用いても、近々に需給の逼迫する時期が到達する」と推測される。これまでは、Dy の主たる産出国である中国の施策や社会状況による不確定因子が多く、さらに企業データについても正確さに欠ける部分が多いため、これまで需給バランスを予測することは無意味ではないかとの議論もあった。しかし、公的な産総研の立場で企業からの情報を収集し、産総研の地質調査の資料などから、シナリオプランニング手法によって需給予測を実施してきた結果、元素の使用用途ごとにシナリオを作成することで、用途別（図 5 参照）の対策技術の有効性を探ることがわかった。

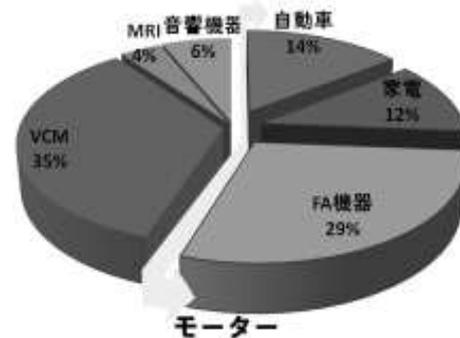


図 5 Nd-Fe-B 磁石の用途(2008 年)

ハイブリッド用の駆動モーターについては、Dy を代替できる有効な手段はこれまで見出されておらず、冷却方法の改善や省 Dy 磁石の特性向上が期待されている。また、洗濯機などは、フェライトやサマリウム系磁石などを今後利用することが予想され、用途ごとに環境温度から磁石の多様化が進むものと考えられる。さらに、ハードディスクのボイスコイルモーター (VCM) については、Dy 使用量の動向は読み切れていないが、ほぼ横ばいと予測される（図 6 参照）。産総研の手法では、マテリアルバランスを考慮し、将来シナリオを予測することで、需給バランスにおけるギャップを探ることができている（図 7 参照）。

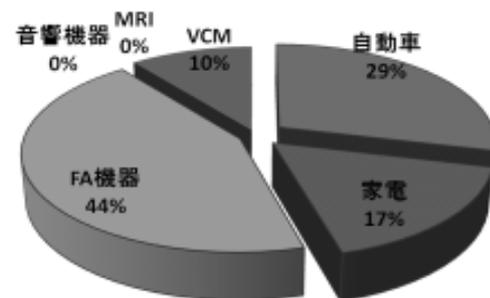


図 6 Nd-Fe-B の用途別 Dy 使用(2008 年)

需給バランスの予測における今後の不確定因子として、グリーンランド等、中国

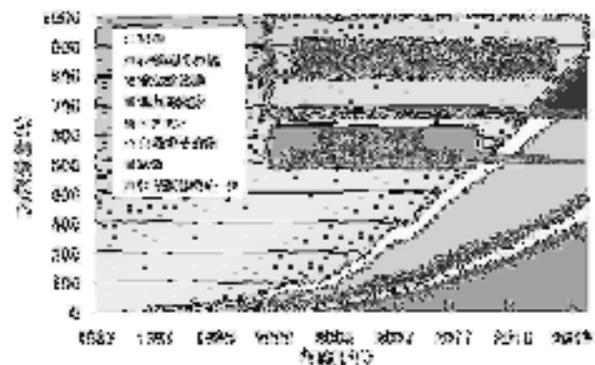


図 7 悲観的シナリオに基づく Dy 生産量予測

以外のレアアース生産国における重希土類の開発動向と中国の内需拡大による影響が存在するものの、**2016年から2020年の間には需給ギャップが拡大するものと予測される**。もし、ハイブリッド（計算上のリユース率 100%）と家電（計算上のリサイクル率 30%）のリサイクルが実施できれば、かなりの Dy 資源をカバーすることができる。また、FA については用途が広く、製品寿命も様々であるため、現時点ではその有効性を議論できていないため、今後の継続した調査・検討が必要である。

なお、産総研で提案されている需給ギャップの予測は、世界的に報告されている需給バランス（米国や欧州、中国など）ともほぼ一致している。さらに、風力発電が本格的に導入されると Dy の使用量は、今後一段と増加することが懸念される。もし、新たな天然資源としての Dy が確保できず、使用用途だけが拡大してくると、資源確保については使用済機器からの元素抽出（リサイクル）のみに頼らざるをえない状況になる。このような現状を鑑み、マテリアルフローを精査し、磁石の先進開発国として使用済機器からの元素確保にも早期（2015年まで）に産学官をあげて取り組む必要がある。

磁石における材料開発はこれまで我が国が先導してきた。特に、我が国で開発された Nd-Fe-B は高い特性(BHmax)を有することから、従来のモーターに適用するだけでエネルギー変換効率の大幅な改善が行われ、それまでの最高性能であった Sm-Co 磁石の2倍近くまで性能が向上している。

Nd-Fe-B 磁石を構成する Nd は近年価格が上昇している（図 8 参照）が、軽希土類と呼ばれる資源であり、世界的に広く埋蔵されており、安定的に産出することが可能である。しかし、Dy は重希土類と呼ばれる元素であり、現在は大部分が中国のイオン吸着型鉱床から産出されている。資源的にはイオン吸着型鉱床以外にも含有されているが、そのほとんどは放射性元素（トリウムなど）を高濃度で含有しており、世界的にみても商業ベースにつながる生産体制の確立は容易ではない。また、最近日本近海海底資源に重希土類に富む海域があることが報告されたが、その埋蔵量や産出法方法についてさらに詳細検討が必要であり、実用化には数十年の時間が必要と考えられる。そのため、Dy の需給バランスが崩れると想定される期間までに、新たな安定的な資源供給源を見出すことは難しいと考えられる。

一方、Nd-Fe-B 磁石は 1990 年頃から実用化されてきた比較的新しい材料であり、これまで廃製品からのリサイクルは実施されていない。また、使用部位も局所的で分散しており、経済的に分離して取り出すことが困難であったため、**現状は鉄スクラップの中に不純物として含有されたままになっている**。ただ、今後大量の Nd-Fe-B 磁石が廃材として排出されると、

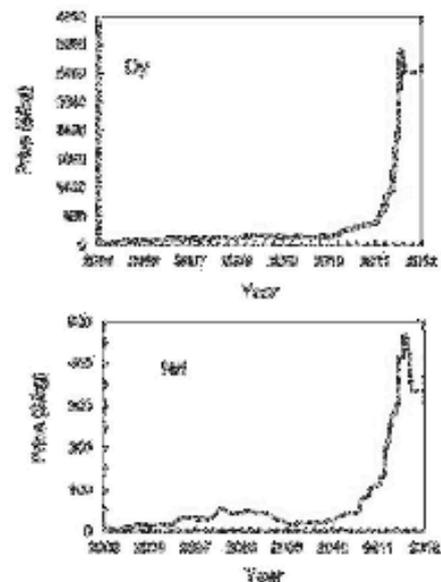


図 8 Dy および Nd の価格推移

**鉄スクラップの品位も低下し、鉄スクラップの再利用という点で問題が出る可能性がある。**一方、最近の省エネルギーの観点で導入されているモーターの磁石は大型化しており、モーターからの磁石分離が容易となりつつある。

これらの状況を踏まえると、今後我が国で高性能磁石を製造しつづけるためには、資源を確保する方法として、使用済機器からの磁石分離による再資源化が最も有効である。ただ、磁石には古くから知られるフェライトや Sm-Co が流通しているため、磁石を一括して回収しただけでは資源にはならない。さらに Nd-Fe-B 磁石の元素抽出の際に、特性の近い希土類が含有されると分離が難しくなる。特に、Sm の存在はリサイクルプロセスのコスト上昇につながる。よって、**目的の Nd-Fe-B のみを識別して回収するための技術**が不可欠である。これにより、すでに国で取り組まれている代替材料の識別も可能となり、目的に応じた特性の異なる磁石を併用使用することが可能になる。さらに、これまでのベースメタルのリサイクルプロセスとは異なり、**中間処理により目的元素の濃度を高める技術開発**も必要である。

磁石の用途としては、今後ハイブリッド自動車や電気自動車などの次世代自動車と、従来の家電や FA 機器の省エネ対策を施した製品が考えられる。次世代自動車では、従来のエンジンに代わる部分がモーターであり、その詳細を公開することは難しいものと思われる。また、これらの次世代自動車にはリチウム電池などユーザサイドでは処理することが難しい危険な部品も含まれており、自動車メーカーでの独自回収が想定される。次世代自動車用の磁石はメーカー毎に規格化され、ほぼ同じような材料であり、現時点では次世代自動車のみで資源循環をクローズした方が管理は容易であろうと考える。

一方、家電や FA ではそのまま廃棄されることが想定され、廃棄製品に目的の磁石が入っていることを識別させてから、比較的小さな局所的に存在する磁石を取り出さなければならない。さらに、この中間処理の品質が、その後の元素抽出に必要なコストを決定するため、中間処理技術開発はきわめて重要である。また、同じ Nd-Fe-B 磁石であっても必ずしも Dy は含有されておらず、さらなる細分化による分類も必要であろう。リサイクルプロセスはすでに鉱石からの精錬で利用されている設備が利用できる可能性が高く、その低コスト化にむけた技術開発が新たな資源循環には不可欠である。また、トヨタ製のハイブリッド自動車であるプリウスの第一世代（1997 年）がそろそろ廃車されはじめるため、磁石をいかに回収するかを早急に決める必要がある。

なお、都市鉱山が提案されて久しいが、希少金属であるレアメタルやレアアースについて採算性のあるリサイクルは未だ実現されていない。後述するように、現在のリサイクルにおける問題点を整理して、体制を提案することが肝要である。

## 2. 使用済み機器から資源を確保するためのビジネスモデル

### (1) リチウム電池にみるこれからの資源循環

自動車メーカーの中には、電気自動車のリチウムイオン電池を 4R 事業として、ダウングレードして再利用しようとする資源循環モデルが検討されている。4R とはリユース、リセル、リファブリケート、リサイクルを意味する造語である。

リチウムイオン電池は、使っているうちに充放電性能が低下する。しかし、自動車用に使えなくなっても、まだ70-80%の充電能力があるので、別用途にリユースすることが可能である。モジュール構成にばらして、他の目的（急速充放電がいらぬ用途）にリファブルケーシングし、リセルすることができる。リセルする先は家庭用あるいは事業用の太陽電池の蓄電池などが産業界で検討されている。リセルする先の用途としては、そのほかにバックアップ電源、UPS（無停電電源）、電力グリッドの負荷平準化、風力・太陽光発電の出力変動平滑化なども想定されており、価格が安ければ利用できる用途も今後さらに拡大するものと期待されている。ただ、リチウム電池をリユースやりセルするには、再販売価格の基準となる電池の残存価値の指標が重要となることが予想され、その一般的な価値基準が明確になれば、電池のリユースやりセルが一層促進されることが期待される。

5~7年程度後には大量のバッテリーがでてくると考えられ、バッテリーを再利用するためにこのような試みが検討されている。例えば電気自動車の販売時にバッテリー1分の価格を減じて販売することで、購入者の初期コストを低減するとともに、廃棄時に販売会社へ戻すことを約束することができる。また、リースやレンタルを行う際にもかなり安く電気自動車を手に入れることもできる。まだ、調査段階であり、このような形でビジネスモデルが組めるかどうかを現在検証している。なお、この検証については、リチウムイオン電池を管理しながら運用する必要があり、リースやレンタルが多い外国の方が実施しやすいため、北米で先行実施されているようである。ただ、現在のビジネスモデルでは最高性能の電池を自動車に利用し、その後性能が低下した時点で家庭用や事業用に再利用するが、その際に同じ性能で安価な電池が供給できる市場が形成されていれば、このリユースモデル実現は難しくなる。また、再利用に際してはセルの形状などの制約もあるため、標準化が必要である。さらに、用途を変えたリチウム電池の製品保証、性能保証を誰が行うのかという点も市場形成には大きな影響を与えるものと考えられる。リチウムについては、我が国において、リチウム電池を管理しながら運用すべきか、客観的な残存価値評価指標を設けてリユース・リセルを促進すべきかは、今後の社会情勢をみながら継続的な議論が必要であろうと考えられる。

リチウム電池が用途を変えながら使用されたとしても、いずれは廃棄物となる。小型のリチウム電池は、従来LCO系（コバルトベース）が多く、一部の元素が再資源化されているが、リチウムに関しては再資源化までにはいたっておらず、リチウムの資源循環システムを構築するためにはまだ解決しなければならない問題が多く存在している（例えば、再生されたりリチウムの用途開発や低コスト・高純度化技術開発などを含めて）。

一方、家電のリサイクルについては、中国（天津市など）のエコタウン構想のもと、日本企業の検討が始まっている。検討されているエコタウンは、1200万人の人口を抱える大都市であり、今後大量の家電廃材が排出され、将来の社会問題になることが予想される。そのため、我が国のリサイクルメーカーや商社を中心として家電リサイクルに取り組んでいる。また、電機メーカーとリサイクルメーカー、商社が連携した同様の取り組みが、杭州市でも実施されている。いずれの検討も今後の市場展開を考えたものであり、現在の資源産出国にリサイクルビジネスを根付かせることにより、新たな資源循環をもたらそうとしているものと考えられ

る。中国では、エコタウン構想に準じている地域では比較的導入がしやすく、モデルケースとして取り組むことが可能である。残念ながらまだレアメタルやレアアースを回収するまでには至っていないが、将来を見据えた事業展開と考えられる。

ただ、このようなビジネス展開を考える上では、当事者として結果的に中国への技術流出のみの結果とならないように細心の注意を払う必要がある。家電においても、レアメタルやレアアースの完全循環モデルができれば、資源価格を除いた製品販売も可能であり、国際協調がとれれば、今後さらに大きなビジネスチャンスにつながることを期待できる。中国でのこのような事業展開は、安いリサイクル人材を確保できるメリットはあるが、技術流出が懸念される上、将来にわたる安い労働力の確保には不安がある。今後、恒久的な資源不足が懸念される中、我が国で拠点を形成し、コスト低減につながる新たな技術開発や実証評価を検討することは重要である。本当に世界に通用する資源循環システムを構築するためには、環境に配慮した新しい技術開発が不可欠である。

## (2) リサイクルシステムのパターン

リサイクルビジネスとは、「新品の市場価格ないしは、中古品部材のマイナス $\alpha$ の価格を制約条件として行うコスト削減ビジネスであり、効率的に集める、それを分別する・分離する（分ける）、再利用・再資源化する

（再生化）の仕組みをどのように確立するかを考えるビジネス」と言える。したがって、リサイクルのシステムとしてどういう仕組みを構築するかが喫緊の課題で、技術的な観点と制度的な観点で課題を整理しなければならない。

リサイクルを要素技術に分解して考える（図9参照）と、「集める」では、回収備蓄情報の管理（技術）と政策的インセンティブの付与や回収責任や義務化（制度）がある。「分ける」では、自動識別や自動選別（技術）と再利用か再生化の判断基準、処理方法の判断基準（制度）がある。「再生する」では、易リユース設計や生産技術、再資源化技術（技術）と仕様設計基準やリユース可否の判断基準など（制度）がある。これらについて、技術的な観点と制度的な観点で判断し、我が国に必要な要素を洗い出すことが重要である。

現状のリサイクル法は廃棄物処理施策であり、効率的な再生・再利用は意識されていない。そのため、リサイクルは廃棄者負担が前提であり、義務・責任をつけた仕組みである。また、希少金属であるレアアースやレアメタルでは、情報管理（輸出された中古車の情報も管理が必要）の仕組みも必要である。CO2Nの活動としては、効率的な再生・再利用を実現するための仕組みとしての回収・選別を逆アプローチとして考える必要がある。



図9 リサイクルシステムの課題

最近、31品目の小型家電が黒字で金属回収できるとの試算（資源価格が2/3になっても）が環境省から出されている（図10参照）。これは、先の廃棄物に対して使用者負担を低減できる提案であるが、実際に資源を回収するプロセスまで考えるとなかなか採算ベースに乗らないのが実状である。これまでの経済産業省のレアメタル代替技術、省使用化などの設備導入への補助金などの調査をみると、実際のリサイクル現場では小型家電の回収ロットが少なすぎ、かつ処理コストが高すぎるため採算ベースにはなかなかのっていない。

実際に、鉄屑、銅屑の回収業者では、小型家電のリサイクルの実証について、手作業での分離を行っており、中間処理コストが高すぎてビジネスベースにのらないのが現状のようである。磁石を取り出すためのモーターについても手選別で行っており、どのモーターにどのような元素が使われているかを経験に頼って分類している。そのため、リサイクル品の品位を確保することが難しいのが現状である。経験に頼ることなく、精度よく、どのモーターにどのような資源がはいっているかがわかれば、リサイクルの効率化がさらに図れるものと考えられる。

海外からの回収は、現地政府・自治体との共同体制が基本である。輸出や海外生産・海外消費され、機能を失った製品などは廃棄物を輸入することになり、バーゼル条約に抵触し、現実的ではなく、現地国で回収、中間処理し、有価物として輸入するのが現実的と考えられる。多国

間での共同回収システムは、廃棄物情報や製品情報の共通化や回収施設・回収方法の共同運用が必要である。分ける仕組みとして、埋め立て量を低減する廃棄物行政と、有益な資源を回収することを目指す資源調達のリサイクルは異なるシステムとならざるをえない。

実際に、産業界を巻き込んで資源循環を効率的に実施するためには、リユースが簡単にできるように、設計、生産技術、効率的な再資源化技術、分離選別に活用できそうなマーキング技術、自動識別技術などを効率的に運用するための仕組みや法整備を新たにオールジャパンで考える必要がある（図11参照）。このような思考の変化でこれまでベースメタルにおいて別々に精錬されていた中間生成物を一か所に集約して、再生化するシステムなどが検討さ



図10 金属回収可能な小型家電品目

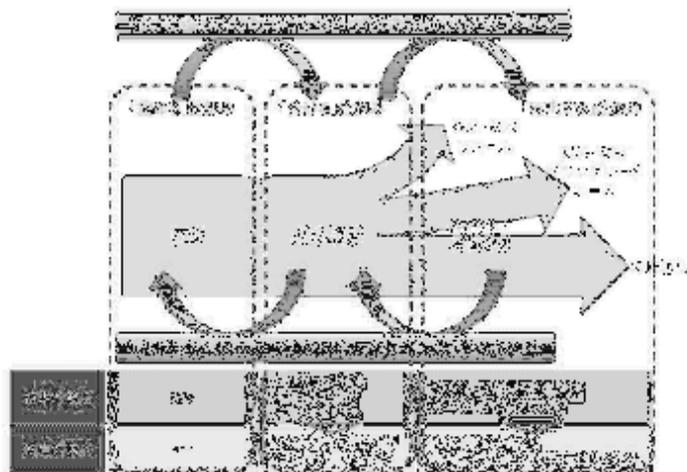


図11 廃棄物処理から資源調達のリサイクルシステムへ



リサイクルビジネスが成り立つ3条件には、**集荷、濃縮・分離、地金の適正価格**があげられるが、レアメタルはいまだにビジネス的には未成熟な状態にある(図13参照)。集荷では、リサイクルに料金がかかる(使用者負担)ため、家電リサイクルは思った以上に進んでいない。欧州では前払い制を採用することで、回収率をアップしている。日本では中古品業者がかなり高値で買い取っているため、リース製品の回収ですらあまり効率的には進んでいない。このようなルートで回収された製品は最終的に中国等の国外へ流出するケースが多く、我が国の資源確保の観点では問題がある。

現在の非鉄プロセスでは、レアアースがスラグ中に有害金属と一緒に固定化されてしまうため、先に中間処理で分離する必要がある。また、廃棄物になったらバーゼル条約の対象物となり、国際取引の配慮が必要となるため、どのタイミングで、どこで回収・分離するかが実行上の課題になる。希少金属の確保には、日本の技術革新の促進と国際周知を促す施策、需要国との連携を促進する施策、供給国(中国)への協力を促進する施策をバランスよく実施することも不可欠である。COCNの枠を超えている案件も含まれるため、我が国の産業競争力を強化するための施策として、関係省庁との協議を継続的に進めなければならない。

海外資源確保については、中国以外の重希土類については放射性物質の処理が重要課題である。実際の問題として、一度掘り出した放射性元素を含む資源については、有用元素を抽出したのち、現地で尾鉱をそのまま現地で埋め戻し対応することは、環境保護の観点から問題が生じる。放射性のトリウムを用いた新たな原子力発電技術などが一般的に定着すれば、トリウムが資源として活用される可能性がでてくるが、現時点ではかなり先のことと考えられる。一方、リサイクルは最重要課題であるが、具体策の構築が一番難しい。代替材料開発は、資源国にとっては極めて嫌がる技術(唯一のカードになる)となるため、産学官の連携に向けた展開を急ぐ必要がある。備蓄については、希少金属の回収プロセス構築ができるまでは、分離前の中間処理物として備蓄することも有効であると考えられる。

希少金属の安定確保には、レアメタル需要国との相互連携(需要国連合体の形成)を促進することが不可欠であり、米国における軍需関係の希少金属利用やEUにおける国家安全保障とグリーンイノベーションとの関係等における希少金属の国際的な重要性を周知させることも極めて重要である。米国は国防の関係で、日本の優秀な部品を多く使用しており、最近になって具体的な対策が検討されはじめている。我が国がどのような形で連携するかによって、その立ち位置が決まってくるものと考えられる。これらの国々と連携して、WTOの圧力強化と環境エネルギー技術とを連携させ、国際社会へ働きかけ、具体的には、需要国間で技術クロスライセンスに向けたコンソーシアムを構築し、もし、資源国側が参加する場合の資源供給義務量を決めるなどの施策が考えられる。しかしながら、国際協力関係も含めた提言は、COCNの活動の枠を超えていると判断しており、官僚や政治家にお願いして、政治の場でこのような議論を進めていただければと期待している。

重希土類の主要な供給国である中国への協力を促進する施策としては、エコタウンの絡みで広東省における資源循環に係る一連計画の支援・協力等があげられる。レアアースのある省に対して、今後、中国資源開発において最重要課題となる環境保全と組み合わせて、技術



した製品を販売する企業、リチウム電池製造メーカー（小型リチウム電池を除く）、リチウム電池利用機器の製造メーカー、自治体、中間処理業者、リサイクル業者、商社などで構成され、将来の資源循環システムに向けた効率的な運用構築のために、回収量、リサイクル率、再生資源の精度（純度）などに関するデータの収集と、サプライチェーン上の課題解決を行う。COCN で考えられる資源循環システム準備組合が取り上げるべき課題については、(3) 項にて示す。

資源循環システム準備組合の設置に際して、**国（政府）**にはそのリサイクル拠点の選定と自治体との交渉を検討いただきたい。リサイクル拠点については、既存のリサイクル設備が存在（初期コストの低減および早期実用化の観点から）し、日本中のリサイクル対象製品が集まりやすい低物流コストを実現できる地域を選定する必要がある。また、レアメタルのリサイクルに不可欠な電気エネルギーを安定的に供給できるとともに、安価に供給できる電気供給システムを有している地域に設定する必要がある。設定された地域では、資源循環に伴う新規の雇用創出が期待され、物流の増加に伴う新たな周辺市場の拡大が期待される。

**産業界**は、廃棄製品に含まれるレアメタルなどが有効な資源であることを再認識し、特に今回取り組もうとする磁石や電池に関しては、使われている材料が判断できるような識別コードを製品または対象部材に明記するように協力する。さらに、これらの対象部材が廃棄製品から取り出しやすくなるように、組立方法や固定方法などのガイドラインも検討する。

**大学や研究機関**は、これまでの研究を基盤として磁石や電池から有効資源を低コストで抽出するための研究開発を民間企業と一緒に開発する。特に、回収される元素の純度を向上するための技術や省力化につながる技術を開発することを目指し、早期に実用化されることを狙う。

**資源循環システム**では、再生された資源が社会へ循環されることを目指すため、天然資源の開発などに実績があり、サプライチェーン上の調整機能を有している商社等に関与してもらうことが好ましいと考えられる。天然資源との差別化（あるいは共存）や物流を考えると、製造メーカーだけでなく、商社等が存在することが不可欠であろうと考えられる。

**資源循環システム準備組合**では、磁石ならモーターを、電池なら完全に放電された電池（好ましくはセル）を受け口とし、レアメタル以外のコモンメタルのリサイクルも含めた総合的な資源循環（資源管理）を行う。希少金属およびそれ以外の資源の販売をベースとして、会員からの会費を決定することになる。ただし、希少金属の回収が法的に義務付けられた場合には、製造者責任の考えから製造メーカーへの負担が増加するものと考えられる。なお、再生資源については、資源提供者に対して“資源ポイント”などを付与し、天然資源の価格とは連動しない備蓄資源から再生資源を還付できるシステムが好ましいと考えられる。

## (2) 資源循環システム準備組合の構成

資源循環システム準備組合は、実際の資源循環システムに関係する材料メーカー、アセンブリメーカー（部品組立、機器組立）、自治体、中間処理業者、リサイクル業者、商社などと、資源循環システムを低コストで高度化する研究開発を実行する大学・研究機関、民間企業が関

係することが望ましい。また、運用に際しては準備組合の間は、公的な資金を投じながら、国の管轄のもと、法整備や規制緩和なども検討していくことが好ましいと考えられる。準備組合の活動期間は、磁石のジスプロシウムの需給バランスの逆転時期、リチウム電池の爆発的需要増加のタイミングを考えると最長でも2020年までに時限付きで運用する必要がある。

### (3) 資源循環システム準備組合の課題

資源循環システム準備組合が検討すべき課題は下記のものと考えられる。

- 回収・再生拠点の特定化も視野に入れた回収フローの設計・構築  
既存の廃棄物回収システム（一般廃棄物、小型家電、産業廃棄物、家電4品目等）を活用した高性能磁石およびリチウム電池の国内循環フローを検討する。
- 回収すべきターゲットを識別し、取り出す技術（リサイクル技術とIT技術の融合）  
構成元素を鑑別かつ秘匿しながら識別・認識する技術、分離する技術
- 易分解を実現する組立技術（材料技術と機械設計技術の融合）  
中間処理に要する労力、エネルギーを最小限にする技術、目的成分を濃縮する技術など
- 低コストで再生化する技術の開発（材料技術とリサイクル技術の融合）  
必須資源を優先的に抽出し、特性に与える混入元素の影響、代替材料との共存、既存ベースメタルリサイクルシステム活用のための中間処理技術など
- 資源循環システムの実証プラントにおけるバランスシートの調査  
産学官ステークホルダーの管理・運営下における資源循環システムの経済性・事業性評価とリサイクル価格、及びエネルギー消費量低減に向けた実証モデル提案など

### (4) 課題解決に向けた技術開発

これらの課題を解決するためには、下記のような技術シーズを活用した技術開発が必要である。目標とする「資源循環システム準備組合」を構築する前に、これらの技術課題を解決するための仕組みを実施することは有効である。いずれの課題もリスクを伴う技術開発であるが、我が国としてオープンイノベーションのもと、早期に課題解決を行う必要がある。

- 回収・再生拠点の特定化も視野に入れた回収フローの設計・構築  
レアアースの価格は高騰しているが、2011年夏以降はネオジム、ジスプロシウムなどの磁石関連のレアアースを含めて価格が下降しはじめた。理由は、消費の鈍化等にあるが、今後この傾向が継続するかについて関係企業も注目している。産総研では、レアアースの需給予測を行いながら、随時企業へのヒアリングを行い、需給予測に関するデータをアップデートしてきている。これまでのデータを整理して企業の取り組み、先行きをどのように見据えているかについて検討した。

ネオジム磁石について、工程内リサイクルはこれまでも実施されているが、廃製品のリサイクルは実施されていない。工程内リサイクルは、電解までが中国で実施されており、溶解から磁石を製造するまでが、日本および東南アジアで行われている。歩留りは、製品にもよるが7~8割程度で、中ぐりや精密加工を施す製品は、より低い傾向がある。ただ、自動車の磁石などは歩留りが高く、8割を超えるような状態にある。

リサイクルを議論する上では、リサイクルの対象物が、①どこにあるか、②どのような状態か、③どのくらいあるかを徹底的に議論する必要がある。本プロジェクトで対象とする家電メーカーとモーターメーカーの現状をもとにさらに検討してみた。

① どこにあるか：永久磁石

(Nd-Fe-B) を使っている機器がどの程度あるかを調べた(図 15 参照)。エアコンはインバータ率に比例して磁石が使用されており、日本国内はほぼ 100%であるが、海外はほとんど利用されていない。一方、冷蔵庫、洗濯機への Dy の使用はあまり

用途別	磁石の種類	磁石の含有率	搭載率	搭載率
エアコン	Nd-Fe-B	100%	100%	100%
冷蔵庫	Nd-Fe-B	100%	100%	100%
洗濯機	Nd-Fe-B	100%	100%	100%
モーター	Nd-Fe-B	100%	100%	100%
その他	Nd-Fe-B	100%	100%	100%

図 15 Nd-Fe-B 焼結磁石の用途別利用状況

高くはない。これは使用温度に依存しており、HEV や発電機は使用温度も高いので Dy の使用率も高いが、冷蔵庫や洗濯機は使用温度が低いので含有量や搭載率はやや低い。風力発電における Dy の含有率はこれまで非常に低かったが、効率を高めた PMSG 式発電機の登場により増加し始めている(現在、PMSG 式は全体の 7~8%程度)。今後、PMSG 式発電機の増加が予想されるが、この発電機には増速器があるタイプとないタイプがあり、現在主流の増速器がないタイプでは永久磁石(Dy 含む)の使用量が多くなっている。現在のレアアースの高騰から風力機メーカーは一時磁石の使用を停止しているが、今後は 1 基当たりの永久磁石使用量を抑えて、小型化できる増速器があるタイプにシフトしていくと予想されるものの、高性能永久磁石の需要は増加するものと考えられる。

さらに、リサイクルを考える場合には、時間軸も重要な因子である。例えば高性能磁石に使用されるジスプロシウムは 2015~2020 年に需給が大幅に逆転する可能性が多方面から指摘されており、それまでにはリサイクル技術の確立を目指す必要がある。一方でこれらの磁石の大口ユーザーである次世代自動車(EV や HEV など)や風力発電はまだ廃棄に回らず、リサイクルのリソースとはならない。実際の商品寿命を考え、リサイクル量をシミュレーションしてみると、リソースとなるものは家電や FA、情報機器などであり、これらの廃製品から磁石を回収することが必要となる。ただ、このリサイクルシステムは次世代自動車や風力発電に対しても利用することが可能であり、対象製品が将来増えても問題はないものと考えられる。

②、③マテリアルフロー（どのよ  
うな状態か、どのくらいあるか）：

データの算出はボトムアップでの  
アプローチを行っており、1 個当  
たりの製品の国内投入量、生産量、  
輸出入量に個別の含有量を積算し  
て、マテリアルフローを作成し、  
Dy 用途別生産量に関するトップ  
ダウンのデータと比較して調整し  
た（図 16 参照）。2008 年度では、  
ハイブリッド自動車用途の磁石が  
まだあまり廃棄されていない状態  
であるため、製品寿命を文献から  
算出して、2020 年までは廃棄  
量が少ないと見積もられるが、  
2020 年以降は、かなり廃  
棄量が多くなることわかった。  
さらに、FA モーターを追加する  
とさらに廃棄量は増加し、廃棄  
製品からのリサイクル資源の抽出  
は十分な資源としての魅力をも  
つことが判明した。

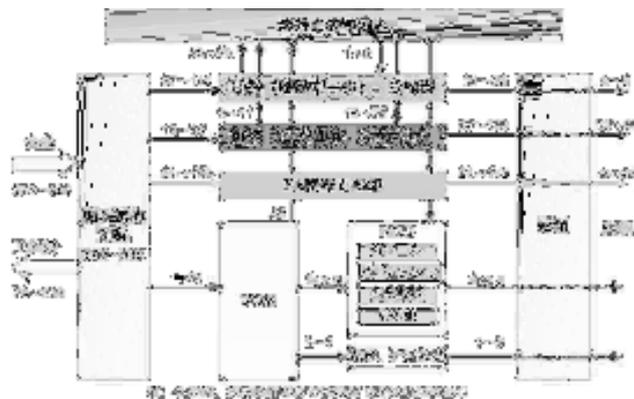


図 16 我が国におけるDyのマテリアルフロー(2008年)

製品	主要開発項目	省エネ化対策
エアリコン	<ul style="list-style-type: none"> <li>・省エネ化</li> <li>・省スペース</li> <li>・省コスト</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・省エネ化</li> <li>・省スペース</li> <li>・省コスト</li> </ul>
冷蔵庫	<ul style="list-style-type: none"> <li>・省エネ化</li> <li>・省スペース</li> <li>・省コスト</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・省エネ化</li> <li>・省スペース</li> <li>・省コスト</li> </ul>
洗濯機	<ul style="list-style-type: none"> <li>・省エネ化</li> <li>・省スペース</li> <li>・省コスト</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・省エネ化</li> <li>・省スペース</li> <li>・省コスト</li> </ul>

図 17 家電製品における主要開発項目と省エネ化対策

家電メーカーの今後の開発要素として、省エネ化は重要な課題として取り上げられており、そのためにはモーター性能の高効率化もあげられている（図 17 参照）。もちろん、その他の対策も検討されており、モーター性能の効率化のみで目標を達成することは難しい。一方、社会情勢として、レアメタル価格の高騰、中国の輸出規制、省エネ規制、震災後のエネルギー政策による電力需要削減などが顕著化し、これらも加味して、これからどうするかを考えると、目先では、リサイクルをどうするか、あるいは代替材料をどうするかという選択肢になると思われる。

レアアースのリサイクルの現状を各社にヒアリングすると、「搭載率がまだ低いので回収効率が悪いのではないか」、「海外に出回っているものが多い、国内で回収しても海外からかなり安いものが入ってくるのではないか」、「このまま Nd-Fe-B 磁石を業界が使用し続けるのか」、など懐疑的な意見もでていいる。一方、建設的な意見としては、「業界全体が統一して取り組む必要があり、今すぐリサイクルには取り組むことは難しいとしても将来的には足並みをそろえて取り組まなくてはならない」、との意見もあり短期・中期的には実施できなくても、長期的には必要なオプションであると認識されている。ただ、リサイクルは製造メーカーへの直接的なメリットが少なく、製造メーカーが直接磁石を製造している場

合も少ないので、誰かが音頭をとりながら実行ステージに移すことが不可欠である。

また、代替材料(磁石)については、新設ラインに投資する資金がないので、既存の金型などの資産を有効活用しなければならない。省エネ対策は必ずしも磁石性能だけで達成できるものではないので、今候補にあがっている代替材料については、実用化状況をみて判断しているところである。したがって、当面は、レアアースの価格高騰に対応するため、フェライトを組み込み、フェライトとNd-Fe-B磁石を製品に応じて切り分けながらの対応するのが主流になると考えている。ただ、複数の磁石が同じ部品、同じ製品に使われていると選別することが難しくなり、早期に識別技術だけは明確にする必要がある。

今後フェライトに移行していくのかについては、家電は可能性があるものの、産業用モーターについては、エネルギー需要量から考えると57.3%がモーターでしめられていることから、かなり難しいと考えられる。なかでもFA機器のモーターは製造機器に入り込んでおり、今後ますます製造機器の省エネが求められると、モーター効率の向上は絶対的に避けて通れない。その時にフェライトでは効率があがらず、Nd-Fe-B磁石は不可欠となる可能性が高い。一時期、価格が高騰して生産が低下しているが、いったん価格が安定したらまた生産が増加するはずだと磁石メーカはみており、磁石関連の資源価格が再度高騰してくるのは必至と予想される。

➤ 回収すべきターゲットを識別し、取り出す技術（リサイクル技術とIT技術の融合）

希少金属は製品の局所的な部位に利用されており、その部材を識別し、目的元素を抽出することが低コスト化につながる。また、目的元素の抽出時に阻害因子となる元素を排他することでリサイクルにおける生産効率が向上するとともに、得られた元素の純度を高めることができる。しかし、材料の組成などは企業にとって最高機密情報であり、公開することは好ましくない。また、誰にでも識別できるマーキングは、必要資源の海外流出を促進し、資源循環システム準備組合の目的の一つである資源のバランスシートを作成することができない。このデータは将来のリサイクルシステム（プラント）を販売するための基礎データとなるものであり、世界へリサイクルプラントを輸出するビジネスへつなげるものである。材料データ（組成など）を最先端のゲノム技術で暗号化し、暗号化したまま管理・高速に検索する技術（産総研など）が開発されているが、誰がデータを入力するのか、また製造現場で容易に行えるマーキング技術との連携については、課題も多く、製造メーカの同意を得ることは現時点では難しい。この材料を識別・認証・管理する技術については、引き続きCOCNなどの第3機関にて継続して検討する必要があると考える。

➤ 易分解を実現する組立技術（材料技術と機械設計技術の融合）

希少金属であるレアメタルやレアアースのリサイクルは、これまでのベースメタルのリサイクル技術とはかなり異なっている。ベースメタルの場合、回収しようとするものが主成分であることが多いが、レアメタルは製品中の存在量も少なく、分散的、また、複雑、複合的に存在するため、これらを効率的濃縮・回収する必要がある。例えば、小型家電から磁石

を回収し、リサイクルを行うためには、まず中間処理といわれる物理選別を行う。その後、製錬あるいは磁石材料業者に渡される。うまく渡されるかどうかはこの“中間処理”で決まる。レアメタルは製品中に少しずつしか入っておらず、また、どこに入っているか分かり難いため、上手く中間処理をするには、回収された廃小型家電の情報を把握しておく必要がある。

中間処理は、廃製品を粉砕して選別するプロセスであるが、それが取り得るパターンは極めて多い。廃製品が多種多様であるばかりでなく、粉砕する装置も種々のものがあり、そのコンディションや運転条件も様々である。粉砕産物を選別する工程でも、同様に様々な条件が発生する。また、一連の工程の中で、前段の粉砕は後段の選別成績の上限を制限してしまう特徴がある。粉砕と選別は掛け算的に利いてくる。例えば、70点の粉砕を行い70点の選別を行うと、得られる産物は49点の結果となる。前段の粉砕を効果的に行わなければ、選別工程の高度化だけでは理想的な中間処理は実現しない。

リサイクルにおける粉砕は少ないエネルギーでなるべくサイズを小さくせずに単成分粒子を生成（単体分離という）することだけを目的に行う。どんどん粉砕すると、膨大な粉砕エネルギーを消費するだけでなく、高度な粒子選別技術を必要とし、分離後のハンドリング性が低下する。ここで均一な粉砕（ランダム粉砕）が行われた場合には、マトリックスから着目成分を取り出すのに、着目成分のサイズ以下に粉砕しなければならなくなる（単体分離のマトリックスモデル）。

例えて言うなら、栗羊羹から単体分離した栗だけを取り出すためには、羊羹全体を栗のサイズより小さく粉砕して、初めて一部の栗だけが単体分離することになる。これでは、少ないエネルギーで、サイズを小さくせずに単体分離を達成することができない。そのため、境界面破壊や優先破壊、表面破壊など、対象物に応じた不均一な粉砕（選択粉砕）を行う必要があるが、現状では特定の廃製品のために設計された選択粉砕機というものは存在しない（図18参照）。一方、対象物の特徴に目を向けると、鉱物などの自然物は、一般に広い粒度（ドメインサイズ）分布を持つので単体分離が

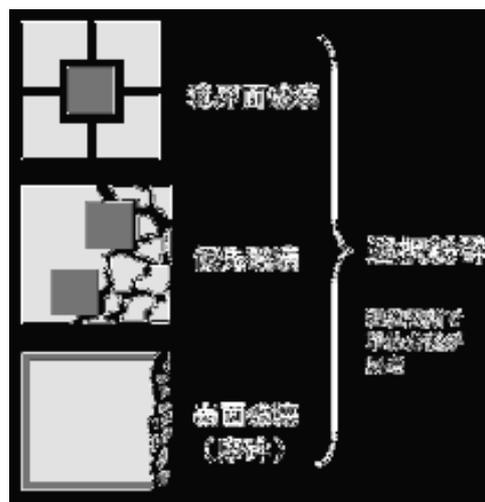


図 18 選択粉砕による単体分離

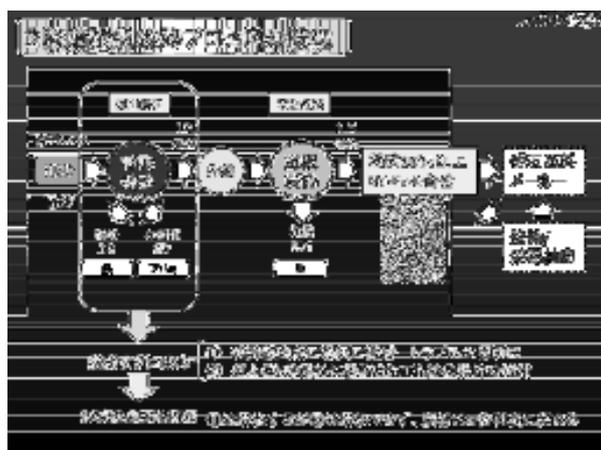


図 19 二段階選択粉砕プロセスによる磁石粉末の回収(産総研)

難しいが、都市鉱山は人工物故、対象物が特有のサイズを有していることが少なくない。前述のように中間処理における粉碎は、粉体を不均一化することが大事である。

ここでは2つの不均一化の達成が望まれる。1つは、個体としての不均一化であり、平均的複合粒子（均一）→単体分離粒子（不均一）を目指すものである。もう1つは粉体（集合体）としての不均一化であり、微細粒子群（均一）→粗大粒子群（不均一）を目指すものである。個体としての不均一化（単体分離）が達成されても、粉体として均一化（微細化）してしまつたら、単体分離した特定粒子だけを選別・回収することが困難となる。これが前述したなるべくサイズを小さくせずに単体分離を達成する理由である。

天然鉱石の場合はドメインがブロードなサイズ分布を有しているため、微粉碎により粉体としての不均一性を犠牲にしなが、個体として不均一性を向上せざるを得ない。しかし、人工物の場合にはサイズ分布に特異点があり、選択粉碎により、2つの不均一化を同時に達成できる可能性がある。例えば、プリント基板から電子素子だけを剥がし、コンデンサーをオリジナルのサイズで単体分離したケースなどはこれに該当する。

ハードディスクからのネオジム磁石回収プロセスにおいても、同様にこのような粉碎技術の導入が有効である。ハードディスクはそのまま破碎すると、内包する磁石が破碎機内に強固に磁着してしまい、トラブルの原因となる。ハードディスクを粉碎するには、破碎機内の磁着を防止すると共に、破碎物の磁気凝集を防ぎながら粉碎を行う必要がある。単に、非磁性鋼製の破碎機で機内磁着を防止するだけでは、磁石が鋼製の破碎片とヘテロ凝集するので、磁石品位は2~3倍程度しか濃縮できない。300℃程度に加熱すれば脱磁できるが、重量比で2%程度の磁石を脱磁するのに装置や処理空間全体を加熱するのでは効率が悪い。そこで産総研では、従来の手選別を代替できる2段階粉碎による新たな粉碎技法を開発した（図19参照）。

第1段階では、ハードディスク内のボイスコイルモータ（VCM）の漏洩磁場を磁気センシングすることで、内部のVCMの位置を非破壊で検出し、VCMの地位を非磁性鋼製の打ち抜き場直下に搬送して、ネオジム磁石を含むVCM部を円形に打ち抜く。残りはほとんどアルミ合金であり、別途回収することができる。これにより、ハードディスクを脱磁せずに磁石を10倍程度に濃縮可能である。この後、手動で磁石を取り出しても良いが、10倍濃縮した円形部を脱磁後、選択粉碎を行うと、脆性破壊をしやすいNd-Fe-B磁石が優先的に微粒子化する。スクリーンで微粒子だけを集めると、純度95~97%の脱磁されたNd-Fe-B合金を回収することが可能になった。また、この技術とは別に日立製作所ではハードディスクを省人力のもと、解体する方法も開発されている。これらの技術を融合することでさらに回収率や低コスト化が向上することも期待される。

また、一般産業用途では、性能が高く高価なセンサーはあるが、低コストでリサイクルを行わなければならない中小企業の現場へ適用することは難しい。そこで、産総研では、イージーセンシングという概念のもと、複数の安価なセンサーの組み合わせにより、人間の五感レベルのセンシングができる開発が進められている。我が国のリサイクル技術において、上記のような中間処理の技術の開発、自動化技術の開発が不十分である。これは、製品のモ

デルチェンジの周期が短く、中間処理業者が専用処理装置にまとまった投資がしにくいことも挙げられ、中国などと同様、人海戦術による処理が進められているためである。ただ、今後の環境性、労務費の高騰などへの対応を考え、世界的に普及させるためには、このような技術開発もしっかりしておく必要がある。

さらに、これらの物理選別（中間処理）に対応した新たな組立技術についても、アセンブリメーカーを中心として取り組む体制が必要である。

#### ➤ 低コストで再生化する技術の開発（材料技術とリサイクル技術の融合）

低コストで目的の資源を取り出すためには、いかに優先的にその資源を抽出できるかが重要である。例えば、既に述べたようにNd-Fe-B磁石において、最も多い成分は鉄であり、全体を溶解してから順番に元素を分離していくと、鉄の処理のために大量の薬品を必要とする。したがって、鉄を溶解させずにいかにレアアースのみを選択溶解するかが重要である。また、さらなる低コスト化のためには、希土類相互あるいは希土類-鉄間の分離性能に優れた新規抽出剤の開発を進める必要がある。現状、我が国が開発した酸性有機リン抽出剤であるPC-88Aが希土類の溶媒抽出に汎用されるが、すでに中国でも相当品が使用されており、より高性能の抽出剤の開発が望まれている。さらに、現状の汎用抽出装置であるミキサーセトラーは、多量の有機溶媒が必要であり、かなりの面積の設置場所も必要であることが問題となっている。これを克服するコンパクトな抽出装置の開発も必要である。加えて、現状のリサイクルシステムでは目的の元素を高純度で回収するための処理が行われているが、不純物の種類や量によっては製品の特性に影響を与えないものも存在する。このような元素に対しては、分離・抽出する必要はなく、純度が少し悪くても再生利用の上では問題がないものと考えられる。また、再生利用する製品についても必ずしも元の製品と同じ領域への再生を考える必要はなく、天然資源のコストを見据えた新たな再生資源の用途を考える必要がある。このような社会システムを構築できれば再生資源は必ず有効利用されるため、全体の処理コストをカバーすることが可能となる。

さらに、これまで磁石などの特性を向上するための組成探索が進められ、結果として現在の磁石などが製造されている。しかし、リサイクルの観点では、入っても影響のない元素と致命的な影響を与える元素を分別し、製品などへの混入を防止した製造技術が不可欠である。さらに、リサイクルのプロセスで容易に除去できる元素はたとえ混入していても比較的プロセスコストを増加させずに除去することができる。有害な元素に関しても磁石などのプロセスを見直し、相制御や組織微細化、界面制御などによって無害化することができるかもしれない。このような元素の影響に関する基礎データについて、大学や研究機関での早期の対応が必要である。得られたデータは、資源循環システム準備組合に参加するメンバーが共有できるデータベースとして秘匿しながら公開することが望ましい。

低コストで資源を再生するためには、従来の技術を効率化するとともに、全く新しい技術を開発することも必要である。例えば、従来別々の技術として開発されてきた鉄・非鉄などのベースメタル精錬技術を融合することで新しい資源再生に向けたプロセスを提案するこ

とができる。まだ大学や研究機関での基礎研究が中心であるが、産業界と連携した実証研究を加速する必要がある。

#### ➤ 資源循環システムの実証プラントにおけるバランスシートの調査

これまで COCN の提言の中でも希少金属のリサイクルに関する提言が数回行われてきたが、未だ実効的なレベルでの資源循環やリサイクルには至っていない。これは、これまでの提言が、業界の水平連携を中心とした提言に留まり、元素まで戻して再利用する垂直連携の体制まで踏み込めなかったことが一つの要因と考えられる。また、これまでは産業界に危機感はあるものの、各社毎には実感がなく、諸施策の実施期限も明確でなかったことも要因であろうと考えられる。一方、国内外から諸施策の実施期限が迫られている今回の提言では、産業界のサプライチェーン上に位置する企業群の垂直連携を念頭に構成メンバーを参画させる「資源循環システム準備組合」に主体性を与え、英知を結集できる組織構造とすることで、我が国初の実証モデルプラントをオールジャパン体制下にて実現できるものと考えられる。その結果、これまでの机上の空論であった物流や回収割合なども実際に規模を決めて実行することで、有効性のある実証データを得ることができ、一定期間のデータをもとに事業の問題点、収益の有無などについて、詳細データの回収も期待することができる。また、量産化に基づくシステムの稼働率やメンテナンスなどの経費なども試算でき、かなり精度の高いモデルプラントの検証が可能になる。社会システム全体では、既存の設備を最大限に利用し、不足する技術を開発・導入することでシステム全体の効率を改善し、その実証データの変化を正確に把握することで、資源循環システムを構築するために必要なエリアの大きさや物流範囲などのデータも明らかにできれば、世界の各地へプラントの設置を推進することも期待できる。また、本システムにおいて最も重要な電気エネルギーの安定供給と低コスト供給についての実測値も得られ、再生可能エネルギーなどの新エネルギーの活用可能性も明らかにすることができると思われる。

我が国の産業を安定して成長させるための切り札の一つが、グリーンイノベーションといわれている中、資源価格がやや安定している今こそ、考えられるすべての戦略を駆使して、生産を国内継続できる資源の確保を優先した実施体制を組むべきである。また、将来に向けた資源蓄積のためにも、ある程度以上の大きさを有する部材については個体単位での成分、成り立ちなどを情報として持たせる必要がある。これを早期に実現することで、需要国側の資源戦略のトップランナーとして規格や標準化に大きく貢献し、発言力を獲得できるものと考えられる。

#### 4. 社会的効果

本プロジェクトでは、レアメタルに対する資源循環システムの構築を目的としてスタートしたが、参加者の意見を集約した結果、すべてのレアメタルに共通したシステムを提案することは困難であると判断した。そのため、我が国産業界にとって重要度の高い元素を中心に、モデルケースを組めるような提言を目指して活動を進めてきた。特に、今後の我が国の産業

界を牽引する次世代自動車や省エネ機器などに欠かせない磁石用の重希土類と電池用のリチウムについて、集中的に議論を行い、『資源循環システム準備組合（仮称）』という提案にいたった。まだ、検討すべき問題点は多々あるものと考えられるが、資源問題による我が国産業界への影響が表面化するデッドラインが見え始めたことから行動の迅速性も求められている。そのため、COCNの議論では、国の支援のもと資源循環システム準備組合を立ち上げることを要望したい。

資源循環システム準備組合の設立により、これまで我が国が弱かった中間処理技術が向上し、集荷量の拡大、省人力による資源の再生・利用、経済性の改善が可能になると考えられる。また、資源循環システム準備組合を設置する地域では、特区を設定し、中間処理業者の誘致、雇用の創出などを図ることも期待でき、地域活性化と新たなリサイクルの産業拠点にすることができる。

さらに、現在政府やNEDOにて研究開発が進められている“希少金属の省使用化技術”が再生資源の活用により、有効に機能するものと期待される。言い換えれば、“省使用化技術”と“資源循環システム”はレアメタル利用の両輪であり、資源の循環システムが稼働してこそ省使用化技術は最大のパフォーマンスを発揮することが可能となり、廃棄製品を資源としてその何倍もの製品を世に送り出すことができる。また、“代替材料開発”においても求められる性能による資源の分配が可能となり、代替材料を既存材料と共存させながら用途の拡大を図ることができる。その結果として、グリーンイノベーションを遂行するための高性能部材の製造を継続して我が国で行うことができる。

近年の世界的な工業化の進展を見ると、資源の供給不安が今後も継続して発生することが予測できることから、我が国でレアアースやリチウムなどで検証された資源循環システムへのアプローチが一つのスタンダードとなり、世界的な規模での資源循環につながることを期待している。そのためには、正確なデータ収集と効率的な再生プロセスを目指す技術開発は不可欠であり、資源循環システム準備組合のミッションとして実施される必要がある。これには、大学や研究機関の参画と、材料の識別を効率化するためのIT技術開発は不可欠である。したがって、資源循環システム準備組合では、単なる材料再生にとどまらず、周辺技術を含めた大きな産業プロジェクトとしての意味合いが大きいものと考えられる。

なお、当然のことであるが、資源循環に向けた周辺技術については標準化や規格化が重要であり、我が国をモデルケースとして世界に通用する標準化や規格化を資源需要国の連合体制により実現されることを期待する。

## 5. 今後の活動

COCNとしては、資源循環システム準備組合（仮称）を立ち上げ、その活動の後方支援と活動実績の精査を今後の活動とする。特に、希少金属の動向を俯瞰しながら、我が国産業界が資源の供給不安がボトルネックとなって産業活動が制約されないよう、資源の実効的な確保あるいは代替材料などの新技術との共存を最優先課題として、実行部隊である資源循環システム準備組合の舵取りにつながる助言を積極的に行う。また、独立行政法人産業技術総合研

研究所などの研究機関と連携しながら海外の機関との意見交換などを行い、国際的な動きとの協調も積極的に推進する。さらに、資源循環システムの構築に向けた技術課題に対する解決策は、常にコストを検討しながら対応する必要がある、種々の技術や業種が一体となった開発が望まれている。これまでに、産業技術総合研究所の TIA のようなオープンイノベーションの開発拠点があるが、資源循環システムについても同様の“場”の提供が求められており、早期に検討する必要がある。ただ、資源循環システムについては、最先端技術開発ではなく、既存の設備や技術をいかに有効に利用するかも課題であるため、“場”は仮想空間にて構築することも考えて対応する必要がある。

## 6. 政策への展開案と要望

資源循環システム準備組合は、これまで鉄スクラップに混入されて廃棄されているジスプロシウムと資源的な価値が乏しいリチウムに対して、①回収するための社会システム（製品回収ルートの明確化）、②回収された製品から目的の部位を取り出すための中間処理、③既存リサイクル事業者を中心とした低コスト再生処理、④目的材料の識別・認識技術、⑤実証レベルでのシステム性能評価を実施するための組織であり、その実現のためには関係機関（産学官）のご支援・ご協力をいただきたい。

- ①回収するための社会システム：磁石・リチウム電池に関する回収の義務づけ（電池は既対応）と回収ルートの整備・・・環境省、経済産業省、産業界
- ②中間処理・・・中間処理を効率化、省人化するための技術開発（易分解の組み立て技術を含む）の推進・・・経済産業省、文部科学省、大学・研究機関、産業界
- ③低コスト再生処理・・・既存設備の効率を向上するための補助、研究開発の促進、新規なプロセスによる回収率向上の技術開発の推進・・・経済産業省、文部科学省、大学・研究機関、産業界
- ④識別・認証技術・・・部材へのマーキング技術、情報の秘匿化技術、リサイクル時の認証技術の推進および標準化・・・経済産業省、文部科学省、産業界、大学・研究機関
- ⑤実証レベルでのシステム評価・・・モデル事業として、特区を指定した検証・・・経済産業省、産業界

## 7. 提言のまとめ

### ➤ 国・政府への提言

- ・資源循環システム準備組合（仮称）を設置する地域の設定
- ・時限付きの資源循環システム準備組合への資金補助（環境整備、技術開発など）
- ・廃棄物処理から資源循環へ変わるリサイクル概念の啓蒙活動の推進
- ・現行の廃棄物処理負担の分担見直し検討

### ➤ 産業界への提言

- ・磁石、電池を構成する資源の認識システム（マーキングなど）の導入

- ・ モーターおよび電池を容易に取り出せるアセンブリ技術の導入
- ・ 目的性能に応じた材料の選定の促進（資源負担の平滑化）

➤ 大学・研究機関への提言

- ・ 低コストリサイクルに向けた技術開発の促進
- ・ 磁石や電池の特性に与える不純物元素の影響解明
- ・ 代替材料開発・省使用化技術開発のさらなる促進
- ・ 資源の有効利用に向けた人材育成

➤ その他

- ・ 資源戦略の秘匿性の周知

産業競争力懇談会（COCN）

東京都千代田区丸の内一丁目6番6号 〒100-8280

日本生命丸の内ビル（株式会社日立製作所内）

Tel : 03-4564-2382 Fax : 03-4564-2159

E-mail : cocn.office.aj@hitachi.com

URL : <http://www.cocn.jp/>

事務局長 中塚隆雄