

産業用モータのレアアース磁石リサイクル技術

Recycling Technologies for Rare-Earth Magnet Materials in Industrial Motors

清水 敏夫 水口 浩司 水野 末良

■ SHIMIZU Toshio ■ MIZUGUCHI Koji ■ MIZUNO Sueyoshi

ネオジム (Nd) 磁石に代表されるレアアース (RE) 磁石を内蔵したモータは、家電製品や、自動車、産業機器などの高機能・高性能化に貢献している。しかし RE は、高性能磁石に不可欠と言えるほどの素材であるものの、資源の偏在や採掘・製錬時の環境破壊といった問題がある。

そこで東芝は、メカトロニクス技術と核燃料再処理技術を応用し、低コストでリサイクル時の廃液発生量がゼロとなる、産業用モータからの RE 磁石リサイクル技術を開発した。独自のモータ分解システムと RE 分離精製技術を用いており、産業用モータに適用した結果、構成材の 99% 以上をリサイクルできることを確認した。

Rare-earth (RE) magnet materials such as neodymium (Nd) are widely used in motors of home appliances, electric vehicles, and industrial equipment, and are contributing to advancements in the performance and sophistication of these products. However, serious issues exist in terms of supply risk due to the uneven distribution of RE materials and the environmental destruction that accompanies the mining and refining processes.

In order to rectify this situation, Toshiba has developed recycling technologies for RE magnet materials in industrial motors by making full use of both mechatronics and nuclear fuel reprocessing technologies, thereby achieving low-cost recycling without the generation of waste liquid. Through the application of our proprietary motor disassembly and RE materials separation and refining technologies to demonstration tests using a traction machine for elevators, we have confirmed that 99% or more of RE magnet materials can be recycled.

1 まえがき

近年、家電や、自動車、産業機器をはじめとする様々な用途で高機能と高効率を実現するため、高性能 RE 磁石を内蔵したモータが多く利用されている⁽¹⁾。一方、RE は、採掘・精錬時に大量の廃液 (酸や、アルカリ、油など) を排出したり採掘時に二次廃棄物を多く排出したりして水質を汚染し、更に採掘にあたっては森林が伐採されるといった環境破壊が問題として挙げられる。

これらの環境破壊を低減させるため、わが国では製品に内蔵される RE 磁石をリサイクルする技術は不可欠である。RE 磁石の代表といえる Nd 磁石には主に Nd やジスプロシウム (Dy) が用いられており、これらの RE の国内需要は拡大を続けている。現在、わが国では Nd や Dy の入手は限られた産出国からの輸入に依存しており、Nd、Dy ともに 2011 年に急激な価格高騰が起こった。産出国国内での需要減少や産出国国外での採掘計画など様々な要因から、現在、価格は沈静化してきているが、当面、RE 資源が限られた産出国に偏在する状態が続くことから価格が高止まりする可能性が高い。わが国はこのような状況にあるため、拡大する RE 需要に対して安定した供給を維持することが困難になる可能性がある。このため、Nd 磁石をリサイクルすることで、他国の影響力の及ばない供給フローを構築することが求められている。これまで、各社

が Nd 磁石リサイクル技術に注力しており、家電や自動車に関しては既に開発が進められている。

しかし、社会インフラを支える代表的な産業機器の一つである産業用モータから Nd 磁石をリサイクルする技術の開発は進んでいない。この理由としては、産業用モータは堅ろうで構造が複雑であることから分解が難しいことや、産業用モータに使われる Nd 磁石は高性能にするため製法が複雑であり、廃磁石をそのままリサイクルすることはできず主元素の RE を分離精製する必要があることなどが挙げられる。このため、産業用モータは鉄材として廃棄物処理されているのが現状である。国内の廃磁石発生量は、一般社団法人 廃棄物資源循環学会の試算値では、2015 年以降、1 年当たり家電 180 t、自動車 110 t、産業用モータ 220 t が推定されている。

東芝はこのような状況の下、産業用モータから Nd 磁石をリサイクルする技術を開発した。このリサイクル技術は、産業用モータを分解し Nd 磁石を取り出す技術、及び取り出した Nd 磁石から RE 合金を分離精製する溶融塩電解技術から成る。

Nd 磁石取出し技術としては、モータ設計・製造技術で培った知見を基に構造的・機械的特徴を生かした分解プロセスを構築した。このプロセスでは解体方法として一般的な切断及び破碎といった工程をなくすことで、粉じんや切りくずを排出することなくモータを分解する技術を開発した。

溶融塩電解技術としては、核燃料再処理技術の一つである

乾式再処理技術⁽²⁾⁻⁽⁵⁾を適用した。多数の元素を含む使用済み核燃料から溶融塩電解を用いてウランなどを選択する乾式再処理技術を、10種類以上の成分を含むNd磁石からNdとDyの選択回収に応用した。分離精製プロセスは、磁石からREだけを選択的に溶融塩中に溶解させる“抽出工程”と、抽出後のREが溶解している溶融塩中から電解でREを回収する“電解工程”から構成される。

2 Nd磁石取出し

2.1 対象機器

産業用モータの中でもNd磁石の使用量が比較的多いエレベーター巻上機を対象機器とした。対象となるエレベーター巻上機を図1に示す。Nd磁石は巻上機のロータ鉄心内部に組み込まれている。

2.2 巻上機分解プロセス

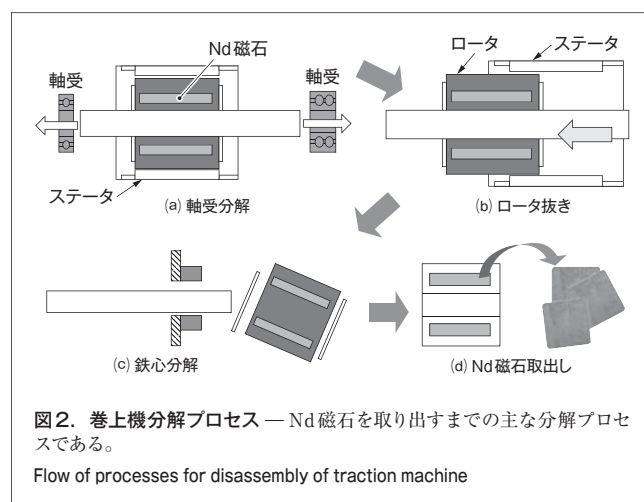
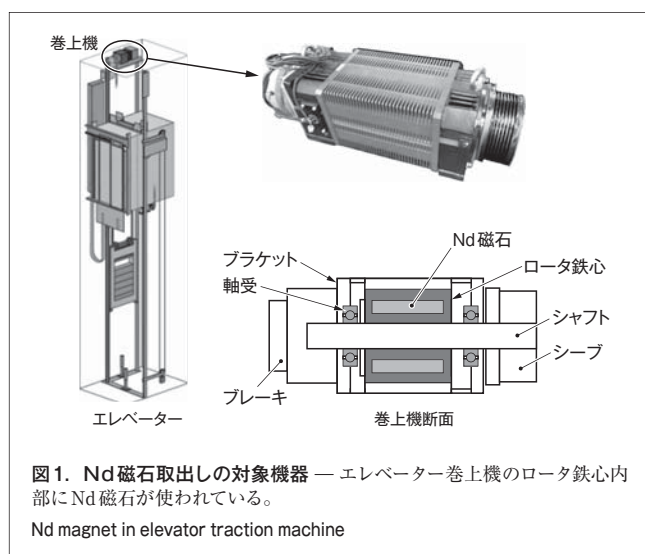
巻上機の分解手順を以下に示し、その概要を図2に示す。

- (1) 巻上機端部のシープ及びブレーキ分解
- (2) 巻上機端部のブラケット分解
- (3) 軸受分解 (図2(a))
- (4) ロータ抜き (図2(b))
- (5) 鉄心分解 (図2(c))
- (6) Nd磁石取出し (図2(d))

巻上機の分解により、Nd磁石を取り出すことが可能になる。

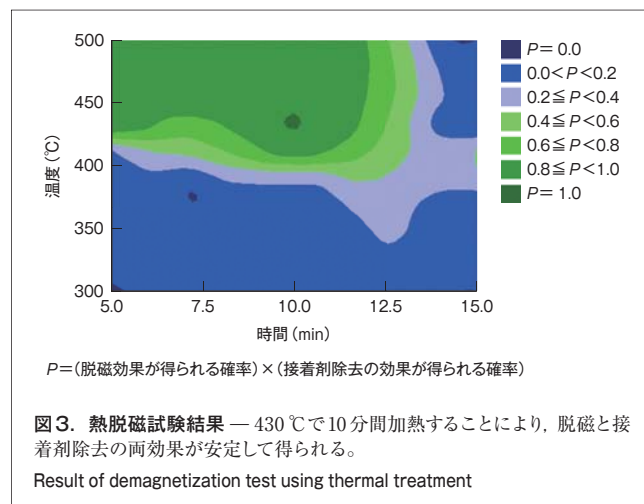
(6)でNd磁石を鉄心から取り出すには、強力な磁力を消失させる必要がある。このために、巻上機に使用しているNd磁石の特性を考慮し、一定時間高温状態を維持することで脱磁させる方法⁽¹⁾を採用した。この方法では、脱磁に加えて、鉄心に磁石を固定している接着剤の除去も可能である。

これらの効果は加熱時間と温度の影響を受けるとともに、効果の表れ方に鉄心の個体差が生じるため、安定して効果が



得られる条件を調査した。脱磁については残留磁束密度が5 mT (T: テスラ) 以下の場合を効果あり、接着剤除去については工具なしで磁石を抜きとれる場合を効果ありとし、各効果が得られる確率の積を求めた。この結果を図3に示す。確率の積の値が大きい(濃い緑色)ほど、確実に磁石を取り出せることを意味する。この結果から、対象とする巻上機では430℃で10分間の加熱により、安定した脱磁及び接着剤除去が可能であることがわかった。これにより、鉄心からNd磁石を容易に取り出せることになる。

次に、取り出したNd磁石の表面処理を行う。これは、ブラスト処理を行うことでNd磁石表面を10 μm除去する工程である。加熱処理を行ったNd磁石は、表面にめっき処理が施されているため、酸化被膜を形成している。酸素は、次工程である溶融塩電解で得られる合金に不純物として混入する可能性があり、リサイクル磁石の性能に対して阻害要因となる。熱処理後のNd磁石は表面から深さ10 μmまで高濃度(5,000 ppm以上)の酸素が含有する領域が存在する可能性がある。リサイクル磁石の性能に影響を及ぼさないためには、酸素含有率



を5,000 ppm以下にする必要があり、ブラスト処理の粒径、吹付け圧力、及び吹付け時間をパラメータとしてNd磁石の表面除去条件を調査した。粒径が20～100 μm、吹付け圧力が0.2～0.4 MPa、及び吹付け時間が30～150 sの範囲で調査した結果、粒径20 μm、吹付け圧力0.4 MPa、及び吹付け時間150 sの条件において、磁石表面の酸素含有量が4,500 ppmとなることを明らかにした。

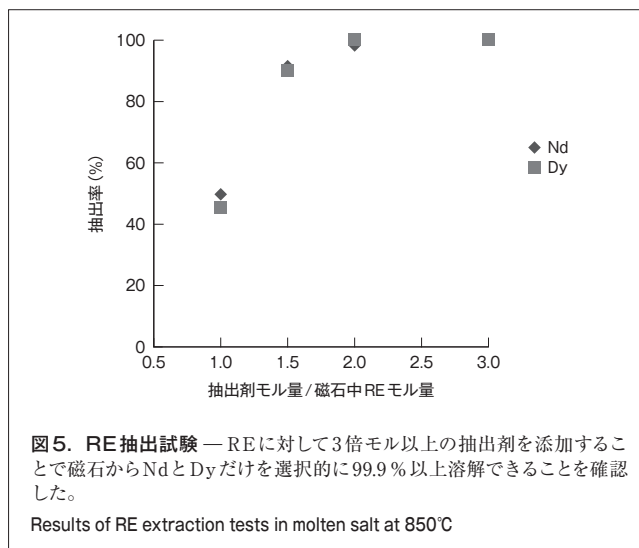
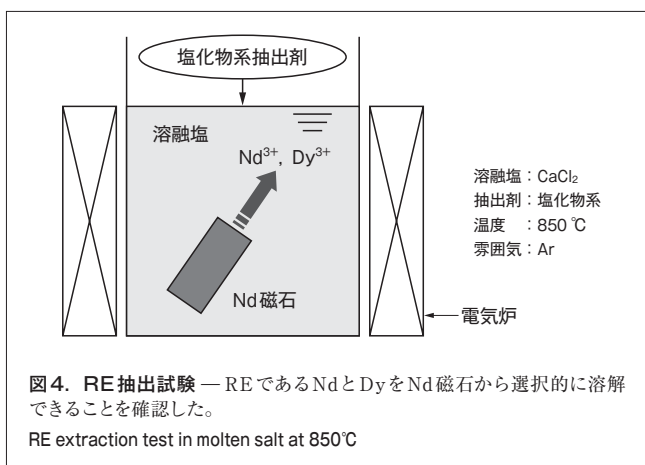
以上の工程により巻上機からNd磁石を取り出し、熔融塩電解処理へと進む。今回開発した巻上機分解プロセスにより、巻上機の構成材（鉄、銅、及びNd磁石）を99%リサイクルできるシステムを構築した。

3 熔融塩電解

3.1 抽出工程 (REの抽出)

塩化物系抽出剤を添加した熔融塩中にNd磁石を浸漬（しんせき）することで、Nd磁石からREを選択的に熔融塩中に溶解させることが可能である。この溶解反応を検証するために、850℃の温度条件下で塩化カルシウム（CaCl₂）熔融塩中でRE抽出試験を行った。磁石としてエレベーター巻上機から取り出したNd磁石を用い、アルゴン（Ar）雰囲気下でRE抽出試験（図4）を実施した。

添加した塩化物系抽出剤のモル数に対する抽出率（熔融塩中のREモル量/磁石中のREモル量）の変化を図5に示す。試験後の熔融塩中に存在する磁石起因の金属イオンは、NdとDyだけであり、NdとDy以外の元素（コバルト（Co）や、銅（Cu）、ホウ素（B）、アルミニウム（Al）など）は検出限界以下であった。NdとDyの抽出率は、塩化物系抽出剤の投入量が磁石に対して等倍モル（磁石中のREモル量に対して投入する抽出剤のモル量が等倍）の場合は約50%であるが、3倍モル以上添加することで、99.9%以上であった。これらの結果から、塩化物系抽出剤を用いることで、NdとDyをNd磁石から熔融塩中に高い選択性で溶解できることを明らかにした。

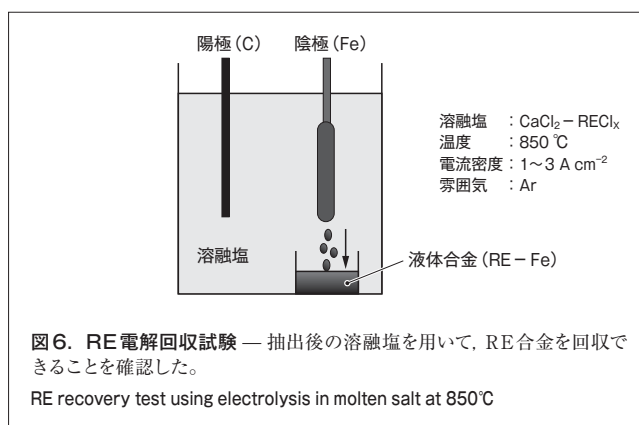


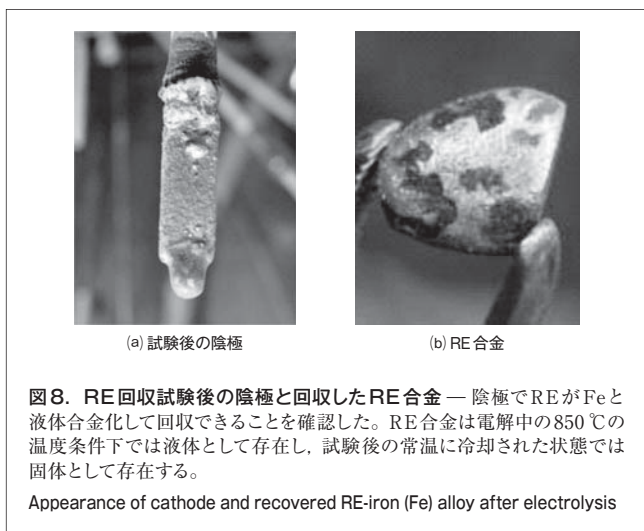
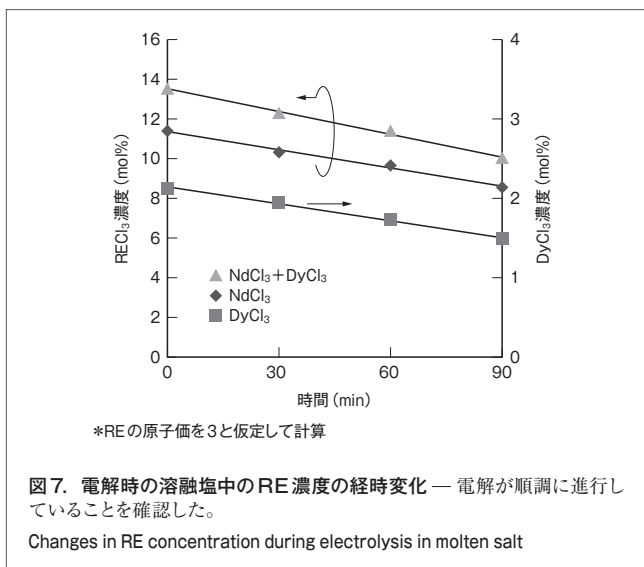
3.2 電解工程 (熔融塩電解によるREの回収)

抽出工程で、Nd磁石からREを選択的に溶解させた熔融塩中に、電極（鉄（Fe）製陰極とカーボン（C）製陽極）を挿入して電解することで、REを回収できる。このとき、陰極上ではFeとREが液体合金化する。この液体は底部にRE合金としてたまり、回収できる。この電解反応を検証するために、850℃の温度条件下で、抽出工程後のREが溶解した塩化カルシウム熔融塩（RECl_x-CaCl₂、RECl_x:REの塩化物）中でRE電解回収試験を行った（図6）。

電解時の熔融塩中のRE濃度の経時変化を図7に示す。電解が進行するに従って、熔融塩中のRE濃度（REの原子価を3価と仮定して計算）は一次線形で低下している。このことは一定電流に対して熔融塩中からREが回収され濃度が低下していることを示しており、電解が順調に進行していることを確認した。

試験後の陰極と、底部にたまったRE合金を図8に示す。陰極の肉厚は薄くなっており、またRE合金は底部から回収されたことから、陰極上でREとFeが液体合金化してRE合金として底部に落下することを確認した。





抽出試験に用いた使用済み磁石と回収したRE合金の組成の分析結果を表1に示す。使用済み磁石に含まれていたB, Al, Co, Cu, 及びCの成分は、回収したRE合金中では検出限界以下であった。このことから、今回適用した溶融塩電解により、使用済み磁石からFeとRE以外の元素を含まない高純度のRE合金の形態でREを回収できることを確認した。こうして回収したRE合金に様々なRE磁石の仕様に合わせて微量元素を添加することで、RE磁石を製作できる。

表1. 使用済み磁石と回収RE合金の組成
Composition of elements in spent RE magnet and recovered RE-Fe alloy

材料	Nd	Dy	B	Al	Co	Cu	C	Fe
使用済みRE磁石 (%)	24.6	5.6	1.0	0.19	2.2	0.13	0.071	bal.
回収RE合金 (%)	63	14	N.D. <0.1	N.D. <0.1	N.D. <0.1	N.D. <0.1	N.D. <0.05	bal.

N.D.: 検出限界以下 bal.: 残り

4 あとがき

堅ろうな産業用モータ(巻上機)からNd磁石を取り出し、溶融塩電解によりリサイクル磁石用の合金として精製するまでの技術を確認し、以下の結論を得た。

- (1) 巻上機の分解には、粉じんや切りくずを排出させないシステムを構築した。
- (2) Nd磁石は、430℃で10分間加熱することで脱磁でき、鉄心からNd磁石を容易に取り出せることを確認した。
- (3) 巻上機から取り出したNd磁石表面の酸素含有量を5,000 ppm以下にできるブラスト処理の条件を明らかにした。
- (4) RE抽出において、塩化物系抽出材を用いることで、NdとDyを高い抽出率で選択的に抽出できることを明らかにした。
- (5) 850℃の温度環境下で高純度のRE合金が回収できることを確認した。微量成分を添加することで様々なRE磁石の製作を可能にする。

この技術は、独立行政法人(現・国立研究開発法人)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成により開発を行った。

文献

- (1) 機械システム振興協会. 使用済製品からの希土類磁石の分離・回収技術(脱磁技術)に関する調査研究報告書. 東京, 機械システム振興協会, 2011, 22-R-1, 68p.
- (2) Mizuguchi, K. et al. Development of Hybrid Reprocessing Technology Based on Solvent Extraction and Pyrochemical Electrolysis. Journal of Nuclear Science and Technology. **48**, 4, 2011, p.597-601.
- (3) 藤田玲子 他. 電気化学的手法による核燃料サイクル施設から発生する放射性廃棄物処理に関する技術開発. 表面技術. **60**, 8, 2009, p.486-490.
- (4) Kofuji, H. et al. Effect of pulse electrolysis on morphology of co-deposited MOX granules. Journal of Nuclear Science and Technology. **45**, 9, 2008, p.942-950.
- (5) 水口浩司 他. モリブデン酸溶融塩を用いた乾式再処理プロセスに関する研究. 溶融Na₂MoO₄中における酸化ウランの化学および電気化学挙動. 日本原子力学会和文論文誌. **6**, 4, 2007, p.484-490.



清水 敏夫 SHIMIZU Toshio

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター技監。電力機器向け材料の開発評価に従事。電気学会, 高分子学会, 日本材料学会, CIGRE会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



水口 浩司 MIZUGUCHI Koji, Ph.D.

研究開発統括部 研究開発センター 研究企画部参事, 博士(工学)。原子力核燃料及びレアメタルのリサイクルに関わる研究開発を経て、現在、研究開発の企画に従事。日本原子力学会, 電気化学会会員。Research Planning Dept.



水野 末良 MIZUNO Sueyoshi

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 電機電池応用・パワエレシステム開発部主幹。社会インフラ向け機器の振動・騒音技術及びメカトロ機器の研究・開発に従事。日本機械学会, 電気学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center