

乾式法による電動車モータからのレアアースの回収

山口 勉功^{1*}・荒井 誠也²・小川 和宏²

¹ 早稲田大学

² 日産自動車 (株)

Recovery of Rare Earth Elements from Electric Vehicle Motors by Pyrometallurgical Processing

Katsunori YAMAGUCHI^{1*}, Masaya ARAI² and Kazuhiro OGAWA²

¹Waseda University

²Nissan Motor Co. Ltd.

1. 緒 言

脱炭素化社会の流れが世界中で加速しているなかで、電気自動車やプラグイン形式を含むハイブリッド車などの環境対応の電動車の急速な普及が予測される。これらの電動車の駆動と発電のモータにはネオジム磁石が使用されている。ネオジム磁石には産出の国や地域が限定されているネオジム、プラセオジム、ジスプロシウム、テルビウムなどのレアアース (rare-earth element, REE) が含まれており、電動車一台にはネオジム磁石が 1.25 kg 程度使用されている。2030 年には 102.5 万台/年の廃車が出るのが予測されており、年間 1,280 ton の廃ネオジム磁石量が発生する¹⁾。

現在の電動車用モータ磁石のリサイクルは、製造工程内で発生する不良品モータはほぼ 100% リサイクルされているが、市中からの使用済みモータからのレアアースのリサイクルは、回収と輸送のシステムが確立できていない、回収と分別のコストが高く、レアアース市況とのバランスから採算がとれないなどの理由により、実現できていない。電動車の普及が予測される中で、電動車用のモータで使用されるレアアース需要も増加することが予想され、大量に処理が可能な電動車用モータからのレアアースリサイクル技術の開発が望まれている。

ネオジム磁石と鉄が混在するような廃棄物を、大量に迅速に処理できる可能性を有する方法として、フラックスを用いて磁石中の希土類を熔融酸化物 (スラグ) として回収する乾式法がある。希土類酸化物のフラックスと

しては、 B_2O_3 ²⁻⁵⁾、 $CaO-B_2O_3$ 系⁶⁾、ケイ酸塩⁷⁾、酸化鉄⁸⁾などが、ネオジム磁石や模擬磁石合金、ネオジム磁石のスラッジに対して検討が行われている。本稿では、著者らが $Na_2B_4O_7$ 系フラックスを用いた乾式法によって電動車のロータからレアアースを回収した事例⁹⁾を紹介する。

2. 電動車のモータ

電動車のモータはハウジング、ロータ (回転子)、ステータ (固定子) から構成される。一例として電動車の駆動用モータのハウジングとステータを Fig. 1 に示す。ハウジングはアルミニウム系の材料が使用され、ステータは鉄系材料と銅線から構成されている。また、Fig. 2 には例として駆動用モータのロータを示す。ロータは電磁鋼板などの鉄系材料と 1.75 kg のネオジム磁石から構成さ



Fig. 1 Housings and stator for the drive motor of an electric vehicle.

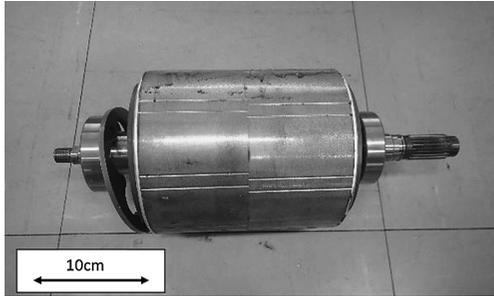


Fig. 2 Rotor for the drive motor of an electric vehicle.

れている。磁石中のネオジウム、プラセオジウム、ジスプロシウム、テルビウムの濃度は、それぞれ 21.0、5.0、2.5、0.4 mass% であり、レアース濃度の合計は 28.9 mass% である。残りは鉄とボロンとなる⁹⁾。ロータは強い磁力を有するため、モータの解体やネオジウム磁石の回収には熱消磁が必要となっている。また、モータは駆動時に発生する力や振動に耐えられるように堅牢に製造されており、解体が難しい部品である。

3. 電動車ロータからのレアース回収

電動車用モータからのレアースのリサイクルプロセスを Fig. 3 に示す。この方法は電動車用モータから回収されたロータを熱消磁や分解すること無く、磁石中のレアースを $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ フラックスによりスラグとして回収する方法である。

はじめに、熱消磁を行っていないネオジウム磁石を含有するロータを加炭材とともに $1,400^\circ\text{C}$ 程度で溶融する。

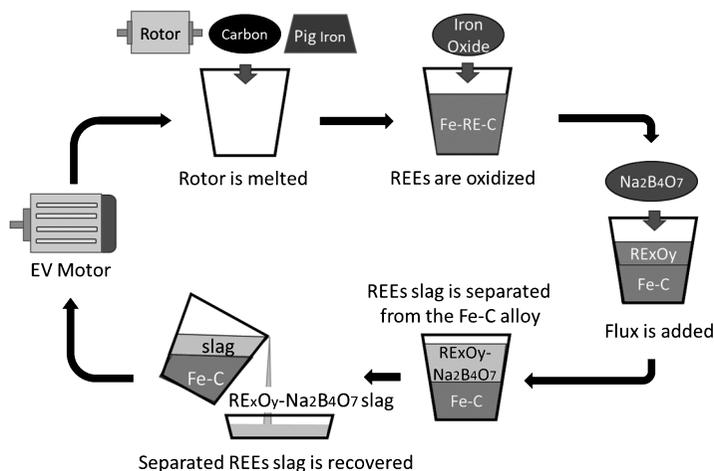


Fig. 3 REE recycling process for motor magnets from electric vehicles.

Table 1 Concentration of rare earth elements, boron and carbon in the Fe-C alloy (mass%)

Nd	Pr	Dy	Tb	B	C
0.057	0.020	0.012	N.D.	0.18	6.9

Table 2 Composition of the slag (mass%)

Nd_2O_3	Pr_2O_3	Dy_2O_3	Tb_2O_3	Na_2O	B_2O_3	FeO	Al_2O_3	SiO_2
31.5	7.0	3.8	0.59	4.7	9.6	3.9	18.2	12.5

その後、酸化鉄を加え、磁石中のレアースを選択的に Nd_2O_3 などのレアース酸化物にする。 Nd_2O_3 の融点 $2,270^\circ\text{C}$ に代表されるように、レアース酸化物の融点は極めて高いため、レアース酸化物の融点を低下させる目的で $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ フラックスを添加し、 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{-RE}_x\text{O}_y$ 系 (RE: Nd, Pr, Dy, Tb) の溶融スラグとする。ロータとネオジウム磁石の主成分である鉄は加炭材と反応して溶融 Fe-C 系合金となる。溶融 Fe-C 系合金に比べてスラグは密度が小さいため、密度差で Fe-C 系合金の鉛直方向上部に分離する。溶融分離した $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{-RE}_x\text{O}_y$ 系スラグを炉から回収する。

Table 1 に示すように、ロータから分離された Fe-C 合金中のレアースは 0.1 mass% 以下であった。各レアースのスラグへの移行率は 95 ~ 99.95% 程度であり、磁石中のレアースはスラグに濃縮されていた。また、回収されたスラグの組成を Table 2 に示す。

得られた $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{-RE}_x\text{O}_y$ 系スラグを塩酸で浸出し、シュウ酸塩として沈殿させ、最終的にレアース酸化物として回収した。湿式処理により回収されたレアース酸化物の写真を図 4 に、回収されたレアース酸化物

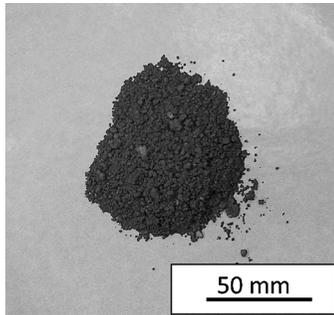


Fig. 4 Rare earth oxide recovered from an EV rotor⁹.

Table 3 Composition of the recovered rare earth oxide (mass%)

Nd ₂ O ₃	Pr ₂ O ₃	Dy ₂ O ₃	Tb ₂ O ₃	Na ₂ O	B ₂ O ₃	FeO	Al ₂ O ₃	SiO ₂
78.5	16.8	9.4	1.3	0.14	N.D.	0.071	0.46	0.09

の組成を Table 3 にそれぞれ示す。Nd, Pr, Dy, Tb 酸化物の濃度を合計した RE_xO_y の濃度は 99.3 mass% 程度を示す。

4. 結 言

本稿では電動車のロータからのレアアースリサイクルを紹介したが、モータには自動車の電動化に伴い需要が増加する銅がステータに大量に使用されており、ステータからの銅の回収も今後の課題となる。ロータとステータを一括処理し、レアアース、銅、鉄を効率よく分離する技術開発も望まれる。さらに、廃棄された自動車からモータを回収し、電動車用モータ磁石のリサイクル企業

への移送するシステムの構築や、強い磁力を有するモータを安全に大量に輸送するための方策も考えていく必要がある。

謝 辞

本研究を行うにあたり、早稲田大学大学院生の和田浩樹氏（現：住友金属鉱山（株））と福田賢人氏に支援をいただいた。ここに感謝の意を表す。

References

1. 環境省産業構造審議会産業技術分科会廃棄物・リサイクル小委員会自動車リサイクル WG 中央環境審議会循環型社会部会自動車リサイクル専門委員会第 37 回合同会議資料 (2015)
2. T. Saito, H. Sato, S. Ozawa, J. Yu, T. Motegi: *J. Alloy. Compd.*, **353**, pp. 189–193 (2003)
3. 久保貴寛, 関本英弘, 山口勉功: 資源・素材学会秋期大会講演集 B, pp. 453–454 (2012)
4. M. Nakamoto, K. Kubo, Y. Katayama, T. Tanaka, T. Yamamoto: *Metall. Mater. Trans. B*, **43**, pp. 468–476 (2012)
5. 星裕之, 宮本雄, 古澤克佳: *日本金属学会誌*, **78**, pp. 258–266 (2014)
6. 時田裕次郎, 柴田悦郎, 飯塚淳, 中村崇, 清水吉広: 資源・素材学会春期大会講演集, pp. 99–100 (2013)
7. C. Wiraseranee, R. Mirvariev, S. Okada: *Proc. EARTH 2017*, p. 3801-11-03 (2017)
8. L.K. Jakobsson, G. Tranell, In-Ho Jung: *Metall. Mater. Trans. B*, **48**, pp. 60–72 (2017)
9. 和田浩樹, 荒井誠也, 小川和宏, 山口勉功: *日本金属学会*, **85**, pp. 359–365 (2021)