受賞記念講演：平成 27 年度技術進歩賞

新絶縁付与潤滑剤を用いたネットシェイプリアクトルコア

稲垣 孝^{1*}, 石原 千生¹, 中山 紀行²¹日立化成（株）開発統括本部 粉末冶金開発設計部, 〒 270-2295 松戸市稔台 5-2-1.²日立化成（株）開発統括本部 分析技術開発室, 〒 308-0861 筑西市森添島 1919.

Net Shape Reactor Core with Developed Insulating-Lubricant

Takashi INAGAKI^{1*}, Chio ISHIHARA¹ and Noriyuki NAKAYAMA²¹Powder Metal Development & Design Dept., R&D Headquarters, Hitachi Chemical Co., Ltd., 5-2-1, Minoridai, Matsudo 270-2295, Japan.²Analytical Technology Development Dept., R&D Headquarters, Hitachi Chemical Co., Ltd., 1919, Morisoejima, Chikusei 308-0861, Japan.

Received December 27, 2016; Revised January 10, 2017; Accepted January 10, 2017

ABSTRACT

This products are pure iron Soft Magnetic Composite (SMC) reactor cores for voltage boosting and rectification inside of inverter of photovoltaic system.

The hardness of pure iron SMC itself is soft, so in compaction process, pure iron powders tend to plastic flow and destroy insulation films. Then, the original characteristics are unavailable because of the drastic increase in eddy current loss. So, we developed new lubricant for SMC which can prevent from plastic flow at the sliding surface as well as improving the insulation properties.

One of lubricant elements slides between metal powders and dies, protecting the metal particle shapes and preventing from plastic flow. Whereas, one of insulation elements combines with insulation films preferentially and improves insulation properties of sliding surface.

Not only is the specific resistivity of sliding surface and compression surface equivalent, the core loss is maintained low. Finally, with developed lubricant, we achieved the net-shape manufacturing of reactor core without surface finishing and restriction of assembling directions.

KEY WORDS

SMC reactor core, plastic flow, lubricant, insulation film, net-shape

1 はじめに

リアクトルコアはインバータ内の昇圧、又は整流を担うための中核部品である。従来は珪素鋼板が一般的であったが、近年の高周波帯化、低コスト化、小型化等のニーズに伴い、圧粉磁心が注目されている。

純鉄系圧粉磁心は珪素鋼板や高合金系ダストコア等に対し低コストで、かつ高インダクタンスを得られるため小型化が容易等の利点がある。更に、絶縁被膜を高耐熱化し、合金系ダストコアと同等の鉄損が得られる高性能圧粉磁心粉を開発している。しかしながら、純鉄系圧粉磁心材は高密度化し易い反面、金属粉自体が柔軟であり、金型摺動面の塑性流動が発生し易く、絶縁被膜が破壊されてしまう。特に、圧粉磁心は他の粉末冶金製品に比べ高压成形を必要とするため、塑性

流動発生リスクが非常に高い。その結果、表層の渦電流が著しく増加するため、純鉄系本来の特性を発揮できない。リアクトルなど高周波領域で駆動する磁気部品にとって、渦電流増加は致命的であり、この課題が純鉄系圧粉磁心のリアクトル市場への参入、拡大への障壁であった。

しかしながら、一般的な内部潤滑成形や金型潤滑成形の場合、摺動部の塑性流動を完全に抑制することは難しく、磁気特性維持に焦点を絞った潤滑剤の開発は今までに無かった。一方で、塑性流動層の除去法も考案されているが、後加工の追加になるためコスト増加になる。また、成形方向を工夫し渦電流損を抑制する手法も考案されているが、成形方向が一方方向に限定されてしまうため、形状自由度という粉末冶金の特長を十分に活かさない等の制約もあった。コスト、形状自由度、磁気特性の全てにおいて純鉄系圧粉磁心本来のメリットを発揮するためには、成形方向に制約のないネットシェイ

* Corresponding author, E-mail: t-inagaki@hitachi-chem.co.jp

ブでの製品化が理想的である。そのためには、既存の潤滑剤としての機能向上だけでなく、成形時にダメージを受ける被膜の絶縁性の保護、改善も可能となる多機能潤滑剤の開発が必須と考えた。

そこで、当社では表層の塑性流動を抑え、かつ摺動部の絶縁性を向上できる絶縁付与潤滑剤の開発に着手し、ネットシェイプでの製品化を目指した。

2 新規圧粉磁心粉の開発 1 磁気特性向上

これまで、粉末冶金法を用いた多くの軟磁性部品が工業化されている。近年では、家電機器や一般産業用だけでなく、車載用部品としても粉末冶金法で製造される軟質磁性材料・部品の検討及び適用が拡大している。Fig. 1は焼結磁心及び圧粉磁心を適用周波数ごとに示したマップである。従来各種電装部品として純鉄系、電磁ステンレス系、珪素鋼系焼結磁心が、ヨーク、プランジャ、アーマチャとして適用されてきた。一方モータ^{1,2)}、アクチュエータ、リアクトル³⁾といった高周波領域で使用される各種部品では圧粉磁心の適用事例が近年増加傾向にある。

この背景としては粉末冶金法による軟質磁性材料の磁気特性が大幅に向上したことが考えられる。通常、粉末冶金材料には気孔が存在する。このため同一組成の溶製鋼と比較して磁束密度やインダクタンスは必ず低くなっていた。ところが、高圧縮成形技術等の製法の進歩や、粉末の高純度化、微粉化技術等の進歩により、高密度の軟磁性部品が製造できるようになり、溶製鋼と同等の磁気特性を得られるようになってきた。また、基粉表面の絶縁処理技術も進化し、交流磁場中で使用されるモータコアやリアクトルコア等への適用が可能となってきた。

Fig. 2は駆動周波数に対する圧粉磁心部品の得意領域を示す。圧粉磁心は磁性粉末粒子の一つ一つを絶縁処理し、鉄損、特に渦電流損の低減を図った材料である。このため圧粉磁心は電磁鋼板に対して高周波領域での使用が可能である。またフェライトコアに対して圧粉磁心は磁束密度が高く、小型化し易いといったメリットがある。

一般的に、鉄損は下記(1)式に示すヒステリシス損と渦電流損の和で構成される。

$$W = W_h + W_e = k_1 \cdot B_m^{1.6} \cdot f + \frac{k_2 \cdot B_m^2 \cdot t^2 \cdot f^2}{\rho} \quad (1)$$

ここで、 W_h はヒステリシス損、 W_e は渦電流損、 k_1 、 k_2 は係数、 f は周波数、 B_m は励磁磁束密度、 ρ は固有抵抗、 t は材

料の厚みを示す。鉄損は第一項で示されるヒステリシス損と第二項で示される渦電流損の和となり、特に渦電流損は周波数の二乗に比例して増加する。リアクトルのような高周波で使用される製品の場合、鉄損の低減は必須であり、渦電流損はもとより、ヒステリシス損の低減⁴⁾も重要となる。そこで著者等はまず鉄損低減を図るべく、鉄粉の開発を行った。主な検討項目は鉄粉の粉末形状制御、最適粒度分布及び高温熱処理に耐える複合絶縁被膜化である。

Fig. 3は鉄損に及ぼす粉末形状、及び粒度分布⁵⁾の影響を示す。Fig. 3-a)は各粉末のSEM像を示す。従来の鉄粉は表面が異形状であったのに対し、開発材は丸みを呈しており、粉末を単純形状化している。これは主にヒステリシス損の低減に有効である。一方、Fig. 3-b)は各粉末の粒度分布のイメージを示す。従来材に対し、開発材は全体的に微粉側にシフトしており、特に粗粉を著しく低減しているのが特徴である。これにより粒内渦電流損を低減することができる。

Fig. 4は圧粉磁心及びダスト系コア材の鉄損を示す。従来の圧粉磁心材に対し開発材(EU-71)はいずれの周波数領域

Fig. 1 Product lineup of Soft Magnetic Composite (SMC).

Fig. 2 Application and required properties of SMC.

Fig. 3 SEM photograph of each particle and particle size distribution of each material.: a) SEM photograph of each particle and b) Particle size distribution of each material.

Fig. 4 Core loss of each material in each frequency.

Fig. 5 Conventional manufacturing process of SMC.

においても低鉄損を示す。また 50 kHz 程度までは合金系ダストコアと同等の鉄損を示す。

3 新規圧粉磁心粉の開発 2 機械的強度向上

Fig. 5 は圧粉磁心の一般的な製造工程を示す。圧粉磁心には絶縁処理した鉄粉を用い、金型に充填した後に圧縮成形する。その後、成形時の歪を除去する目的で 673-873 K 程度で磁気焼鈍する。このため圧粉磁心は金属結合しておらず、低強度であることが課題であった。

なお、圧粉磁心の強度は一般的に抗折強度 30-50 MPa 程度である。一般的な強度向上策としては樹脂添加による硬化やスチーム処理による酸化膜の形成等が挙げられるが、樹脂を添加すると磁性粉の占積率が低下し磁束密度が低下する。またスチーム処理を施すと強度は向上するものの、絶縁被膜の一部が破壊し、鉄損が増加する等の問題が生じていた。これらの課題を解決すべく、著者等は絶縁被膜の有機成分による熱硬化特性に着目し、圧粉磁心の高強度化を検討した。

Fig. 6 は圧粉磁心の抗折強度に及ぼす熱処理温度の影響を示す。本圧粉磁心材に内部潤滑剤を添加した場合、473-573 K 領域、すなわち脱ワックス温度領域で強度が一旦低下し、その後熱処理温度の上昇に伴い強度は増加するが、最終的な抗折強度は 40 MPa 程度を示す。一方内部潤滑剤を添加しない場合、脱ワックス温度領域での強度低下は見られず、最終的な抗折強度は 80 MPa を示す。

これらの強度の差異の原因を把握すべく、コアの断面の SEM 観察を実施した。Fig. 7 は鉄粉粒子界面の SEM 像を示す。内部潤滑剤添加無しのコアは被膜間の空隙が少なく、鉄粉の有機被膜同士が硬化時に結着し、良好な界面を呈していることがわかる。一方で潤滑剤を添加したコアは被膜間の空隙が多い。これは鉄粉粒子間に介在していた内部潤滑剤が脱ワックス時に抜け、被膜同士の結着を阻害したためと推測できる。

Fig. 6 Influence of annealing temperature on transverse rupture strength.

Fig. 7 Cross-sectional SEM photograph of each material.

Fig. 8 Transverse rupture strength of each material.

以上の結果より強度向上には、潤滑剤を添加しない金型潤滑⁶⁾が有効であると考えた。Fig. 8 は圧粉磁心及びダストコアの抗折強度を示す。従来の圧粉磁心材及びダストコアに対し開発材 (EU-71) は 80 MPa と良好な抗折強度を示す。

4 製品化に向けた開発課題

4.1 製品仕様

Fig. 9 は今回製品化を検討したリアクトルコアの概略図を示す。リアクトルコア A は 5 kW クラス、リアクトルコア B は更に出力の大きな 10 kW クラスの仕様となり、本仕様での製品化検討を実施した。以下、本報ではリアクトルコア A に関する検討結果について報告する。

4.2 成形検討

本製品の初期成形検討において、金型潤滑方式は静電塗布法を用いた。Fig. 10 は静電塗布法の概略図を示す。本手法は

Fig. 9 Schematic of 2-type reactor core for photovoltaic system.

Fig. 10 Schematic of electrostatic coating method.

Fig. 11 Appearance of sliding surface after compaction by electrostatic coating method.

間欠的に一定量の粉末潤滑剤を摩擦帯電方式で帯電させることで金型へ噴霧し成形する方法であり、粉末冶金の金型潤滑方法としても一般的な手法である。

4.3 初期検討結果

Fig. 11 は静電塗布法で成形したコアの外観を示す。塗布条件の最適化により、連続成形は可能となるものの、摺動部は塑性流動が発生しやすい。この塑性流動の発生には材料面と製法面の大きく二つの要因がある。

まず、材料面としての塑性流動発生要因は高純度純鉄粉を使用しているため非常に展延性が高い点、一定以上の機械的強度を達成するために内部潤滑レス仕様としている点等が挙げられる。

一方製法面では潤滑剤をダイス壁面に静電塗布した後、粉末を充填するが、この際、本圧粉磁心材に見掛密度の低い微粉末を用いているため、成形後の抜き出し時の摺動距離が長くなる。このため潤滑剤の油膜切れが発生し易い点等が挙げられる。いずれにしても静電塗布による金型潤滑は連続成形が可能なものの、摺動面にキズ、かじり等の塑性流動層が発生してしまう。

Fig. 12 は鉄損に及ぼすコアの表面状態の影響を示す。実機形状での EU-71 の理想値に対し、表面に塑性流動層が発生

Fig. 12 Core loss of the prototype reactor core.

Fig. 13 Electric resistivity of each surface and cross-sectional structure of prototype reactor core.: a) Electric resistivity of each surface b) Cross-sectional structure.

Fig. 14 Concern by destruction of the insulation film.

した場合、鉄損は大幅に増加する。

Fig. 13 は初期検討品各表面の電気抵抗値及びコアの断面写真を示す。Fig. 13-a) は各コアの部位ごとの電気抵抗を示す。加圧面すなわちパンチ面のコアの電気抵抗は $10^3 \Omega$ 以上の高比抵抗を示す。一方、ダイス側との摺動面のコアの電気抵抗は 30Ω 程度と著しく低下している。Fig. 13-b) はコアの断面写真を示す。摺動部の断面写真からわかるように、コアの摺動部がダレており、表面一層が塑性流動を起こしていることがわかる。

5 新規潤滑剤の開発

ここで現有潤滑剤及び現有金型潤滑法での問題点について考察する。Fig. 14 は塑性流動の発生による電気抵抗劣化が及ぼす懸念事項を示す。リアクトル用圧粉磁心は全長 20 mm 以上の長尺製品である。また、前述したとおり、本検討では磁気特性及び強度向上の目的から、展延性に優れた高純度鉄粉を選定しているため、内部潤滑剤レスでの高圧成形が必須となる。

このような厳しい条件の中、成形後ダイスから抜き出すと

Table 1 Characteristics of conventional surface finishing method.

	Wet type processing	Dry type processing
Method	Eddy current Wet type processing	Eddy current Dry type processing
	Whole surface treatment	Partial area treatment
Merit	Provide the original core loss stably	Cut off the circuit eddy current
Demerit	Environmental burden	Restriction of assembling directions Manufacturing cost increasing

表層部が塑性流動を起こしカジリが発生する。また、被膜の一部にダメージを受けた部位があると、リアクトルとして使用している間の経時変化や過負荷が原因となり、被膜劣化部が拡大し、コアの異常発熱や、最悪の場合焼損を引き起こす恐れがある。

これらを防止するため、一般的にはダメージを受けた部位を除去する手法が検討されている。Table 1は圧粉磁心のコア表層部の各種除去方法を示す。主に湿式及び乾式処理の二つの手法がある。

湿式処理はいわゆるエッチングによる表面処理法である。圧粉磁心をエッチング層に一定時間浸漬すると表層部のダメージを受けた部位が除去され、電気抵抗が回復し安定した鉄損を得ることができる。ただし、廃液等の環境への負荷、また追加工程となるためコスト増加の要因になる。

一方、乾式処理はいわゆるレーザ等を用いたドライエッチングである。本手法は廃液も出ず環境へも配慮した手法として大変有効である。ただし、レーザを一方方向で照射していくため、部分的な除去法であり、周方向に発生する渦電流経路の分断となり、組み付け方向に制約が生じる。いずれにおいても両手法は後加工となり、製品化する際のコスト増加に繋がる。

このため著者等は後加工レスを前提とし、塑性流動抑制かつ絶縁性を維持・向上を可能とする、リアクトル圧粉磁心に適した新規潤滑剤の開発を目指した。

6 新規潤滑剤の適用検討

6.1 新規潤滑剤のコンセプト

Fig. 15は新規潤滑剤のコンセプトを示す。一つ目の狙いは成形抜き時の圧粉磁心コア表層部の塑性流動抑制である。大きな抜き力でも強固な潤滑層として存在すること、また抜き時、潤滑剤が気孔部へ積極的に充填・残留し塑性流動を抑制できることを目的とした。一般的な粉末冶金製品では焼結時の基地組織への影響を防ぐため、金属石鹸や高分子系ワックス等、脱脂し易い潤滑剤を選定する。しかしながら、本製品は圧粉磁心であり873 K程度での焼鈍となるため、潤滑成分の基地組織への影響は少ない。

そのため、金型へ塗布した際に強固な潤滑層を形成することができ、さらには抜き時撓動時に潤滑成分自体が劈開し、気孔内に充填させることができる固体潤滑剤を適用すること

Fig. 15 Concept of new lubricant for SMC.

Table 2 Experimental condition of lubricant and lubrication method.

No.	Lubricant	Lubrication method
1	Wax	Internal lubrication (0.4 mass%)
2	Metal soap	Die wall lubrication
3	Developed lubricant	Die wall lubrication

で、塑性流動を防ぐことができると考えた。

また、絶縁性を維持・向上することを二つ目の狙いとし、以下の添加助剤を開発した。すなわち絶縁性酸化粒子を潤滑剤中に分散させたのである。本微粒子は成形時に鉄粉の被膜表面に選択的に結着し被膜を保護する役割をする。以上の結果より、潤滑剤自体による塑性流動防止と被膜の絶縁性維持向上の両機能を有する、新規圧粉磁心用絶縁付与潤滑剤を開発した。

なお、本報では割愛するが、本潤滑剤は液体で供給することを前提としたため、ダイスの充填位置移動を利用し潤滑膜をダイス表面に形成する液体潤滑法を適用した。

6.2 評価方法

Table 2は新規潤滑剤の評価方法について示す。材料は開発材 (EU-71) とし、成形は密度 7.35 Mg/m^3 一定の条件とした。潤滑剤は本新規開発潤滑剤とした。また比較のため、既存の高分子系ワックス、金属石鹸系潤滑剤も用いた。

なお、評価は電気抵抗及び鉄損を測定した。電気抵抗は $10 \times 30 \times 10 \text{ mm}$ の短冊状の試験片を成形、熱処理し、四探針法にて加圧面および撓動面の固有抵抗値を測定した。鉄損は $30 \times 70 \times 15 \text{ mm}$, $\phi 25 \times 30 \text{ mm}$ の2形状の試験片を成形、熱処理し、リアクトル形状に組み付け後、測定した。なお、測定条件は励磁磁束密度を 20 mT 一定とし、周波数は $5\text{--}30 \text{ kHz}$ とした。また、表面の塑性流動層を確認するため、外観、断面観察、及び撓動面の面分析を実施した。

6.3 実験結果

Fig. 16は各潤滑剤を用いたときのコア撓動面の固有抵抗値を示す。本新規開発潤滑剤を用いると撓動面の固有抵抗値は加圧面と同等の値が得られており、撓動部の絶縁性が担保できていることがわかる。

また、Fig. 17はコアの外観写真を示す。既存の潤滑剤を用いた場合、コア撓動面にカジリ、キズ等が発生するのに対し、本新規開発潤滑剤を用いた場合、撓動面は良好な表面状態を

Fig. 16 Specific resistivity of various sliding surfaces.

Fig. 17 Appearances of various sliding surfaces.

呈しており、塑性流動を抑制していることがわかる。

Fig. 18 はコアの断面写真及び摺動面の面分析結果を示す。既存の潤滑剤を用いた場合、コア断面は表面一層がダレていることがわかる。面分析からも、圧粉磁心の主成分である Fe が全面に検出されており、粒界の判別が難しく、塑性流動していることがわかる。一方、新規開発潤滑剤を用いた場合、コア断面の表層部にはダレが観察されず、塑性流動が抑制されていることがわかる。また、面分析からも鉄粉粒子の界面が明確に示されており、粒子間には潤滑剤の成分が検出されている。更に Fe 成分と潤滑剤に添加した絶縁物は同位置に検出されており、鉄粉表層の被膜上に選択的に絶縁物

Fig. 19 Influence of lubricant on core loss.

が結着している状態であることが確認できる。以上の結果より、本新規開発潤滑剤は圧粉磁心の表面の塑性流動を抑制でき、表層部に絶縁物を残存させることができたと考える。

Fig. 19 は鉄損に及ぼす各種潤滑剤の影響を示す。本新規開発潤滑剤を用いた場合、圧粉磁心の鉄損を最も低減することができる。なお、本鉄損は圧粉磁心の想定値とほぼ同等の値を示す。

本鉄損をヒステリシス損、及び渦電流損に分離するとより一層効果が明確となる。Fig. 20 は 20 kHz での損失分離結果を示す。既存の潤滑剤を用いた場合、渦電流損が著しく増大しているのに対し、開発潤滑剤を用いた場合、渦電流損を理想値領域まで低減できていることがわかる。

7 結 言

圧粉磁心用絶縁付潤滑剤の検討により、以下の結論を得た。

- (1) 開発潤滑剤を用いることにより、摺動面の高比抵抗化が可能。
- (2) 塑性流動による渦電流損増加を抑制でき、本来の低鉄損を維持できる。
- (3) 開発潤滑剤適用品は塑性流動が無く、基粉表層に添加絶

Fig. 18 Result of cross-sectional observation and EPMA analyzing.

Fig. 20 Loss analysis of each reactor core at 20 kHz.

縁物が残存する。

- (4) 高周波用途製品のネットシェイプ化および製品化を達成した。

小型化・低廉化が要求されるリアクトル市場において、圧粉磁心に適した金型潤滑剤を開発・適用することで、小型・大容量化を可能とする純鉄系リアクトルコアとして採用された。今後、高周波化が進んでいくモータ、アクチュエータ等にも本技術は有効である。高密度が必須となる純鉄系圧粉磁心にとって、金型潤滑成形は必須技術であり、特性維持、向上が可能な本開発潤滑剤は今後の軟磁性部品の拡大に貢献できると考える。

8 謝 辞

本新規絶縁付与潤滑剤を用いたネットシェイプリアクトルコアを開発するにあたり、絶縁処理鉄粉の特性向上にご尽力いただいた、株式会社神戸製鋼所 北条啓文氏、上條友綱氏に感謝の意を表すとともに、関係者各位のご協力に心から御礼申し上げます。

文 献

- 1) M. Suzuki, T. Nakamoto: Proceedings. JSAE Annual Congress, **90** (2002) 17-20.
- 2) U. Enomoto, H. Tokoi, K. Kobayashi, H. Amano, C. Ishihara, K. Abe: The transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan. D, A publication of Industry Applications Society, **129** (2009) 1004-1010.
- 3) M. Sugiyama, T. Yamaguchi, S. Okouchi, H. Kishimoto, T. Hattori, T. Saito: SOKEIZAI, **51** (2010) 24-29.
- 4) C. Ishihara, K. Asaka, R. Urao: J. Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy, **49** (2002) 14-18.
- 5) T. Saito, Y. Fujita, S. Takemoto: Journal of the Magnetics Society of Japan, **33** (2009) 434-440.
- 6) S. Tajima, T. Hattori, S. Hotta, H. Okajima, K. Higashiyama, H. Kishimoto: J. Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy, **50** (2003) 577-583.