

JFE スチールにおける方向性電磁鋼板の最近の進歩

Recent Development of Grain-Oriented Electrical Steel in JFE Steel

高宮 俊人 TAKAMIYA Toshito JFE スチール スチール研究所 電磁鋼板研究部 主任研究員 (部長)
花澤 和浩 HANAZAWA Kazuhiro JFE スチール スチール研究所 電磁鋼板研究部長・工博
鈴木 毅浩 SUZUKI Takehiro JFE スチール 西日本製鉄所 薄板商品技術部電磁室 主任部員 (副部長)

要旨

JFE スチールは、1959 年に方向性電磁鋼板の製造を開始して以来、一貫して方向性電磁鋼板の低鉄損化技術を追求してきた。1994 年に低鉄損方向性電磁鋼板「JGSD[®]」を開発し、さらに 2014 年には、積鉄心型変圧器に適する低鉄損方向性電磁鋼板「JGSE[®]」の開発に成功した。これらの製品は、変圧器の高効率化による省エネルギー・CO₂ 削減を通じ、社会に大きく貢献すると期待される。

Abstract:

JFE Steel has been seeking for low iron loss technologies of grain oriented electrical steels since starting the production of grain oriented electrical steels in 1959. A low iron loss grain oriented electrical steel “JGSD[®]” was developed in 1994, and then a low iron loss grain oriented electrical steel for stacked core transformers “JGSE[®]” has been recently developed. These materials are making a substantial contribution to global society through energy conservation of transformers.

1. はじめに

方向性電磁鋼板は、主に変圧器の鉄心材料として利用されており、その鉄損特性は変圧器のエネルギー効率に大きな影響を及ぼす。そのため、JFE スチールでは、方向性電磁鋼板の低鉄損化技術に関する技術開発を強力に推し進めてきた。

本論文では、当社における方向性電磁鋼板の開発の歴史と製品ラインアップについて述べる。また、最新の最高級製品での到達磁気特性レベルを紹介するとともに、それを用いた変圧器の特性について紹介する。

2. 方向性電磁鋼板の開発の歴史

2.1 省エネルギーの時代要請

変圧器の省エネルギーに対する社会的ニーズの高まりは、1973 年の第一次石油ショックに始まる。近年では、地球温暖化抑止の観点から、日本ではトッランナー制度、米国では Department of Energy (DOE) 規制、欧州では Ecodesign Directive といった厳しい変圧器効率規制が行なわれるようになってきた。

日本のエネルギーの使用の合理化等に関する法律 (省エネ法) では、エネルギーの消費効率の向上が必要とされる機器が「特定機器」に指定され、規制開始年度の「目標年度

と、達成すべき基準値である「エネルギー消費効率」を「特定機器の性能の向上に関する製造事業者等の判断の基準等」で規定し、当該特定機器のメーカーと輸入業者に基準達成を課している。2002 年 12 月に告示された「第一次判断基準」では、2006 年度から油入変圧器、2007 年度からモールド変圧器が規制対象となった。この規制により「第一次判断基準」準拠の変圧器 (トッランナー変圧器) は、旧製品に対し「エネルギー消費効率 (変圧器の場合、全損失。単位: W (ワット))」で 32.8% の省エネルギーを実現した。変圧器の高効率化には、方向性電磁鋼板の低鉄損化が不可欠であり、トッランナー変圧器では、方向性電磁鋼板の改良が大きく貢献した。「第一次判断基準」に続き、さらなる鉄心および巻線材料の高性能化と加工技術の改良が検討され、2012 年 3 月には、「第二次判断基準」が告示された。「第二次判断基準」準拠の変圧器 (トッランナー変圧器 2014) の全損失は、「第一次判断基準」準拠の変圧器に対し 12.5% 改善、現在稼働中の大半を占める「第一次判断基準」以前の旧製品に対し 39.4% 改善し、地球環境保全と省エネルギーに大きな貢献を果たすことになった。トッランナー変圧器 2014 においても、さらに改善された電磁鋼板が採用され、省エネルギー化とともに、機器外形・質量の増加抑制の実現に寄与している。

トッランナー変圧器導入による CO₂ 削減効果は非常に大きい。2012 年度末時点の日本電機工業会 (JEMA) 会員変圧器事業者のトッランナー変圧器の累計出荷は、53.5 万台、総容量は 116 GVA となっている。この出荷実績から

算定した環境に対するエネルギー消費量の削減効果は1800百万キロワット時/年、CO₂削減効果は100万トン/年に及ぶ^{1,2)}。

JFE スチールでは、上述のような変圧器の省エネルギー・CO₂排出量削減の社会的要請に応えるため、一貫して方向性電磁鋼板の低鉄損化技術を追求してきた。

2.2 方向性電磁鋼板の特徴と鉄損改善の原理

方向性電磁鋼板の特徴を図1に模式的に示す。方向性電磁鋼板は、約3%のSiを含有する板厚0.20~0.35mmの鋼板である。ゴス方位と呼ばれる{110}<001>方位近傍の結晶粒から構成され、圧延方向に磁化容易軸(<001>方向)が高度に配向している。そのため、方向性電磁鋼板は、圧延方向に極めて優れた磁気特性を有している。

また、方向性電磁鋼板の表面には、絶縁被膜と呼ばれる電気絶縁性を有する被膜が施されている。この絶縁被膜は、鋼板に張力を付与する作用も有し、鉄損特性の改善に寄与している。

磁気の観点から見た方向性電磁鋼板の特徴を図2に模式的に示す。方向性電磁鋼板は、磁区と呼ばれる同一方向の自発磁化を有する微小な領域から構成されており、磁区と磁区の境界は、磁壁と呼ばれる。

方向性電磁鋼板の鉄損の構成の例を図3に示す。方向性電磁鋼板の鉄損は履歴損(W_h)と渦電流損(W_e)から成り、さらに、渦電流損は古典的渦電流損(W_{ce})と異常渦電流損(W_{ae})から構成されている。

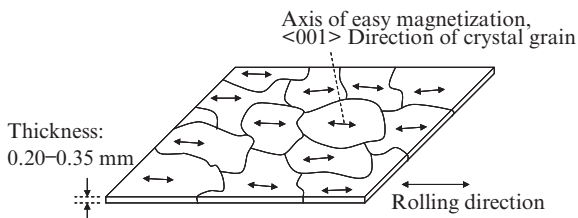


図1 方向性電磁鋼板の結晶学的特徴

Fig. 1 Schematic diagram of crystallographic features of grain oriented electrical steel sheet

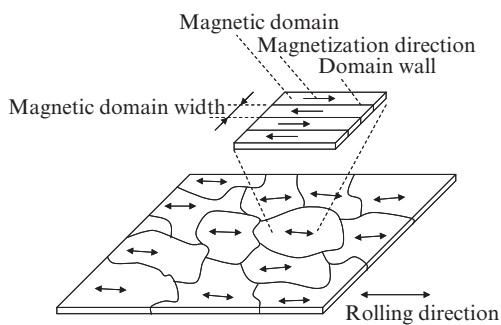


図2 方向性電磁鋼板の磁気的特徴

Fig. 2 Schematic diagram of magnetic features of grain oriented electrical steel sheet

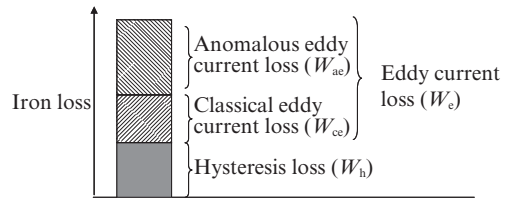


図3 方向性電磁鋼板の鉄損構成の模式図

Fig. 3 Schematic diagram of iron loss of grain oriented electrical steel sheet

履歴損(W_h)は、磁壁移動の不可逆性により生じるエネルギー損失である。鋼板内部の微小な析出物・介在物は、磁壁移動の障害となり、磁壁移動の不可逆性を増して履歴損を増大させる。そのため、析出物・介在物の原因となるC, N, O, Sなどの元素は、極限まで低減されている。一方、鉄結晶は、磁化容易方向(<001>方向)に最も磁化されやすい特徴があり、磁化方向と<001>方向の成す角が小さいほど、履歴損は小さくなる。そのため、履歴損の減少には、結晶方位の配向性を高めることが有効である。

渦電流損(W_e)は、鋼板を交流で磁化した際に電磁誘導作用により鋼板内に発生する渦電流により生ずるジュール熱である。

古典的渦電流損(W_{ce})は、材料の中で磁化が一様に変化すると仮定した場合の渦電流損であり、(1)式で与えられる。

$$W_{ce} = K_1 B_m^2 d^2 f^2 / \rho \dots\dots\dots (1)$$

ここで、K₁:定数、B_m:最大磁束密度、d:板厚、
f:周波数、ρ:鋼板の電気抵抗

この式より、板厚を薄くし、鋼板の電気抵抗を高くすることが古典的渦電流損を下げるために有効であることがわかる。電磁鋼板に添加されるSiは、鋼板の電気抵抗を高め、古典的渦電流損を低減する働きがある。

一方、異常渦電流損(W_{ae})は、磁壁の移動に起因するもので、(2)式によって表される。

$$W_{ae} = K_2 B_s^2 V^2 d / \rho \dots\dots\dots (2)$$

ここで、K₂:定数、B_s:飽和磁束密度、
V:磁壁の移動速度

異常渦電流損(W_{ae})を小さくするためには、磁区幅を小さくすることが有効である。磁区幅を小さくすること、すなわち磁壁の数を増やすことにより、交流磁化過程における磁壁の移動速度が小さくなり、異常渦電流損は減少する。磁区幅を小さくするためには、結晶粒径の微細化や絶縁被膜が鋼板に付与する引張応力の向上が有効であることが知られている。また、物理的に磁区幅を減少させる磁区細分化

法として、鋼板に局所ひずみを導入する方法と鋼板表面に溝を形成する方法が知られている。鋼板に局所ひずみを導入する方法は、500℃以上の焼鈍によりひずみが回復し、磁区細分化効果が失われるため、非耐熱型磁区細分化と呼ばれる。一方、焼鈍によっても磁区細分化効果が失われない鋼板表面に溝を形成する方法は、耐熱型磁区細分化と呼ばれる。変圧器には、製造工程で歪取り焼鈍が必要な巻鉄心型変圧器と、歪取り焼鈍が不要な積鉄心型変圧器があるが、非耐熱型磁区細分化は、上述の理由から積鉄心型変圧器に用いられる。

2.3 JFE スチールにおける鉄損改善の歴史

2.3.1 「JGH®」の開発

JFE スチールにおける方向性電磁鋼板の鉄損改善の歴史を図4に示す。JFE スチールでの方向性電磁鋼板の開発は、その前身の川崎重工業(株)時代の1948年から始まり、1959年に方向性電磁鋼板(「RG」: 現商品名「JG」)の製造販売を開始した。そして、1973年には、商品名「RGH®」(現商品名:「JGH®」)の販売を開始した。

方向性電磁鋼板では、結晶方位の配向性を高めるために、二次再結晶という冶金現象を用いる。二次再結晶は、10 μm程度の大きさの一次再結晶粒の中からゴス方位近傍の結晶粒のみが5 mm以上に成長する現象である。特に、磁化容易方向である<001>方向の圧延方向への配向を高めるためには、ゴス方位以外の結晶粒の成長を抑制するインヒビターの存在が重要である。「RGH®」では、インヒビターとして、微細析出物に加え、偏析元素を用いることにより抑制力を強化させた結果、結晶方位の配向性が高まり、履歴損が減少、従来の鋼板より約10%の鉄損低減が可能になった。

結晶方位の配向性が向上し、履歴損の低減が一定レベルまで到達したため、その後の研究の主眼は渦電流損の低減に移行した。1973年に「RGH」が商品化された後、1973年と1979年に石油ショックが相次いで起こった。石油ショックによるエネルギー価格の高騰、世界的な省エネルギー機運の高まりの中で、「RGH」はさらに進化をとげることとなる。渦電流損を低減させる手段として、鋼板を薄くすること、Si含有量を高めること、結晶粒径を微細化することが検討された。二次再結晶中、鋼板表層からインヒビターが分解消

失する傾向があるが、鋼板が薄くなると、その傾向がさらに強くなり、二次再結晶が不安定になったり、結晶方位の配向性が劣化したりする。そのため、1980年代に入るまでは、0.27 mm以上の厚物しか実用化されていなかった。Si量の増加もまた、二次再結晶を不安定にさせた。開発は困難を極めたが、冶金学的な新しい技術を織り込み、1981年には0.23 mm厚の薄方向性電磁鋼板「23RGH」の販売を開始した。その後、さらに薄厚化の研究を進め、1983年から0.20 mm厚の方向性電磁鋼板「20RGH」の販売を開始した。当時、米国では鉄損評価制度が導入されていたため、これら薄方向性電磁鋼板が多くの変圧器メーカーに採用され、好評を得た。

2.3.2 磁区細分化材の開発

上述の冶金学的な鉄損改善方法と異なり、物理的な手法で磁区幅を減少させ、異常渦電流損を低減させる方法が開発された。この手法は、方向性電磁鋼板の鋼板表面に局所的なひずみを導入し、磁区を細分化するもので、スクラッチや硬球によるケガキ、レーザー照射法などの方法が検討された³⁻⁶⁾。当社では、1987年にプラズマジェット照射法による磁区細分化材の工業化に成功⁷⁾し、プラズマコア「RGHPJ」の名称で販売を行なった。気体を高温に加熱すると、気体粒子間の衝突が激しく起こり、電子と正イオンに分離する。このような電子とイオンの混合状態はプラズマと呼ばれる。磁区細分化への適用手法として、気体をアーク放電でプラズマ化し、ノズルオリフィスと高速ガス流で強制的に収束させ、ノズルより噴出させる。プラズマジェット照射法では、このようにして得られた一万度以上のプラズマジェットを方向性電磁鋼板に照射することにより、磁区細分化を行なった。しかし、レーザー照射、プラズマジェット照射など局所ひずみによる磁区細分化方法は、製品を500℃以上に加熱すると鉄損改善効果が失われるため、歪取り焼鈍(約800℃)を必要とする巻鉄心型変圧器には使用できなかった。

このため、歪取り焼鈍に耐える耐熱型磁区細分化材の開発が進められ、1991年に、鋼板の表面に溝を形成し、溝側面に生成する磁極の反磁界効果を利用することで磁区細分化効果を得ることに成功した^{8,9)}。この耐熱型磁区細分化材は「RGHPD」の商品名で販売され、積鉄心、巻鉄心のいずれでも適用できる利点を有したため、その後「RGHPJ」は「RGHPD」に統合された。

2.3.3 「JGS®」の開発

磁区細分化技術の導入により、渦電流損の低減が進んだため、再び、結晶方位の配向性を高め、履歴損を低減させることが目標となった。「RGH®」の全プロセスについて、冶金学的に見直しを行ない、1994年に、「New RGH」(「RGH-N」: 現商品名「JGS®」)およびこれに耐熱型磁区細分化処理を施した「New RGHPD」(「RGHPD-N」: 現商品名「JGSD」)を開発した。一次再結晶粒の結晶方位は、二次再

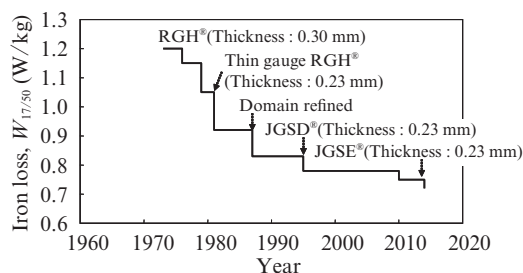


図4 JFE スチールにおける方向性電磁鋼板の鉄損改善の歴史

Fig. 4 Historical trend of iron loss improvement in JFE Steel

結晶粒の結晶方位に大きな影響を及ぼす。そこで、一次再結晶粒の結晶方位評価装置として、日本で初めてEBSD (electron back scattering diffraction) を導入、また、新規な集合組織評価モデルを構築¹⁰⁾ することにより、目指すべき一次再結晶粒の結晶方位のあり方を明らかにし、New RGH の特性はさらに進歩した。

2.3.4 さらなる鉄損の改善

「JGSD[®]」の鉄損改善を進め、現在では、板厚 0.23 mm で $W_{17/50} \leq 0.80$ W/kg の耐熱型磁区細分化材「23JGSD080」が販売されている。

また、過去のプラズマジェットとは異なる非耐熱型磁区細分化手法を開発、2014 年、「JGSE[®]」シリーズとして販売を開始した。「JGSE[®]」シリーズの最高級グレードは、板厚 0.23 mm で $W_{17/50} \leq 0.75$ W/kg の非耐熱型磁区細分化材「23JGSE075」であり、積鉄心型変圧器用に好評を博している。

3. 製品ラインアップと変圧器特性

3.1 方向性電磁鋼板の製品ラインアップ

現在の当社の方向性電磁鋼板製品ラインアップを図 5 に示す。方向性電磁鋼板は、ローグレードから、CGO, HGO, 磁区細分化材の 3 つに分類されることが一般的であるが、当社では、お客様の多様なニーズにお応えするため、方向性電磁鋼板を「JG」, 「JGH[®]」, 「JGS[®]」, 「JGSD[®]」, 「JGSE[®]」の 5 種類にシリーズ化している。

「JG」シリーズは、板厚 0.27 mm~0.35 mm の一般的な方向性電磁鋼板であり、CGO に該当する。

「JGH[®]」シリーズは、板厚 0.20 mm~0.35 mm のハイグレード材であり、HGO に相当し、「JG」シリーズより優れた鉄損を有する。

「JGS[®]」シリーズは、板厚 0.23 mm~0.35mm のさらなるハイグレード材であり、HGO に相当し、高い磁束密度と低

鉄損特性を有する。また、結晶方位配向性に優れることから変圧器の低騒音化にも極めて有効である。

「JGSD[®]」シリーズは、鋼板表面に溝を形成した耐熱型磁区細分化材であり、歪取り焼鈍を施す巻鉄心型変圧器にも用いることができる低鉄損方向性電磁鋼板である。

「JGSE[®]」シリーズは、鋼板に局所ひずみを導入した非耐熱型磁区細分化材であり、積鉄心型変圧器用として、優れた鉄損特性を有する低鉄損方向性電磁鋼板である。

なお、図 5 には、代表的な製品のみを示しており、「35JG135」などの記号は、板厚、種類および鉄損 ($W_{17/50}$) 保証値を意味する。たとえば「35JG135」の場合には、板厚: 0.35 mm, 種類: JG, 鉄損保証値: 1.35 W/kg であることを示している。

3.2 「JGSE[®]」を用いた変圧器特性

現在の最高級グレードである非耐熱型磁区細分化材「23JGSE075」および耐熱型磁区細分化材「23JGSD080」を積鉄心型油入変圧器に適用した例を以下に示す。変圧器の定格容量 1 000 kVA で、鉄心は三相三脚の積鉄心型である。表 1 に用いた素材の磁気特性を、図 6 に励磁磁束密度と鉄損の関係を示す。「23JGSE075」, 「23JGSD080」は、「JG」, 「JGH[®]」を使用した場合に予想される変圧器鉄損特性より優れた変圧器鉄損特性を示す。さらに、「23JGSE075」は、「23JGSD080」に比べ、全励磁磁束密度領域で低鉄損を示しており、積鉄心型変圧器において最も良好な鉄損特性を示

表 1 変圧器に用いた鋼板の磁気特性

Table 1 Magnetic properties of sheets for transformers

Sheets grade	Magnetic flux density, B_8 (T)	Iron loss, $W_{17/50}$ (W/kg)
23JGSD080	1.902	0.742
23JGSE075	1.936	0.713

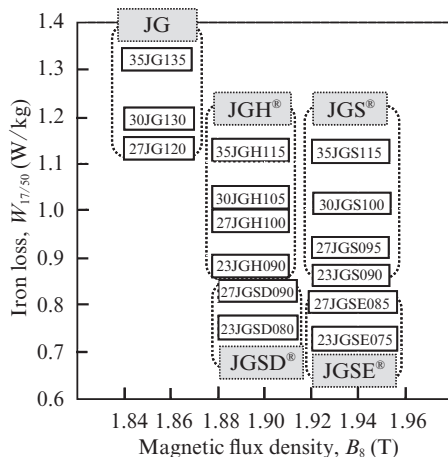


図 5 JFE の方向性電磁鋼板の製品ラインアップ

Fig. 5 Product line-up of grain oriented electrical steels of JFE Steel

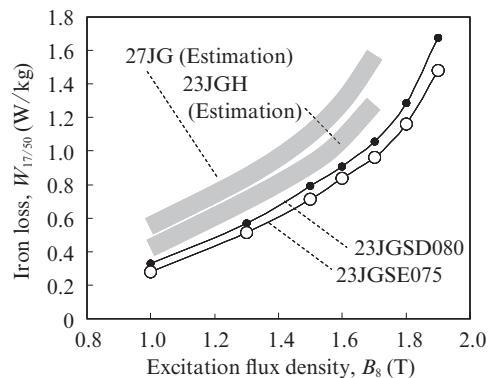


図 6 最高級グレードの磁区細分化材を用いた積鉄心型変圧器の無負荷損の例

Fig. 6 No-load losses of stacked core transformers of highest grade domain refined grain oriented electrical steels

す。

3.3 今後の展望

方向性電磁鋼板の分野において、耐熱型磁区細分化材、非耐熱型磁区細分化材などで、世界最高レベルの製品を開発し、お客様のニーズに対応してきた。しかしながら、世界的な省エネルギー化や地球温暖化対策への要請はますます高まっている。当社では、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）から委託をうけ、次世代の方向性電磁鋼板の研究開発を行なった¹¹⁾。

本研究開発では、従来の方向性電磁鋼板と異なり、CVD（化学蒸着）技術を用いTiN膜を地鉄表面に形成させた。TiN膜により、大きな張力を鋼板に付与することが可能となり、パイロットラインによる実験コイル製造において、ベース素材である23JGSD080の鉄損値 $W_{17/50}=0.75$ W/kgに対し、開発材では16%の鉄損低減に成功し0.63 W/kgという優れた鉄損値を得ることができた。さらに、この素材を用いた30 kVA巻き変圧器では、従来に比べ、定格電圧($B_m=1.7$ T)で11~12%、定格電圧110% ($B_m=1.91$ T)で21~23%の無負荷損失（鉄損）改善を達成した。

今後の技術開発として、磁区細分化技術の改良、結晶方位の配向性向上、鋼板の電気抵抗の増加、薄厚化などを推進することでさらに優れた方向性電磁鋼板を提供していく予定である。

4. おわりに

JFE スチールは、1959年に方向性電磁鋼板を製造・販売を開始して以来、一貫して低鉄損化技術を追求し、下記の

最高級グレードを提供している。

- (1) 歪取り焼鈍に耐える耐熱型磁区細分化方向性電磁鋼板「23JGSD080」($W_{17/50} \leq 0.80$ W/kg)
- (2) 積鉄心型変圧器に適する非耐熱型磁区細分化材「23JGSE075」($W_{17/50} \leq 0.75$ W/kg)

当社では、変圧器の高効率化を通じて世界的な省エネルギー化や地球温暖化対策に貢献していくため、今後とも方向性電磁鋼板のさらなる低鉄損化に取り組んでいく所存である。

参考文献

- 1) 田中剛, 東田尚, 大石政典. 電気学会マグネティックス研究会. 2014, MAG-14-11, p. 7.
- 2) 日本電機工業会. 月刊省エネルギー. 2013, vol. 65, no. 5, p. 55.
- 3) マンネスマン. 特公昭 50-35679.
- 4) Yamamoto, T.; Taguchi, S. Proc. SMM-2. Czech-Slovakia, 1975, p. 15.
- 5) 新日本製鐵. 特公昭 58-5968.
- 6) 新日本製鐵. 特公昭 57-2252.
- 7) 川崎製鉄. 特開昭 62-96617.
- 8) 川崎製鉄. 特公平 3-69968.
- 9) 佐藤圭司, 石田昌義, 日名英司. 川崎製鉄技報. 1997, vol. 29, no. 3, p. 153.
- 10) Hayakawa, Y.; Szpunar, J. A. Acta Mater. 1997, vol. 45, p. 1285.
- 11) 新エネルギー・産業技術総合開発機構研究評価委員会:「変圧器の電力損失削減のための革新的磁性材料の開発」事後評価報告書.



高宮 俊人



花澤 和浩



鈴木 毅浩