

# JFE スチールの高けい素電磁鋼板の最近の進歩

## Recent Progress of High-Silicon Electrical Steel Sheets in JFE Steel

財前 善彰 ZAIZEN Yoshiaki JFE スチール 電磁鋼板研究部 主任研究員 (課長)  
大久保智幸 OKUBO Tomoyuki JFE スチール 電磁鋼板研究部 主任研究員 (副部長)  
笠井 勝司 KASAI Shoji JFE スチール 東日本製鉄所 (京浜地区) 商品技術部長

### 要旨

近年、電気機器の小型化・高効率化の観点から、鉄心材料には高周波での鉄損低減が強く求められている。JFE スチールは化学気相蒸着 (Chemical Vapor Deposition, CVD) による連続浸珪法を開発し、1993 年に 6.5%けい素鋼板 JNEX<sup>®</sup> の工業生産を世界で初めて実現した。また 1998 年には、連続浸珪法を用いて板厚方向の Si 濃度分布を制御する技術を確認し、Si 傾斜磁性材料 JNHF<sup>®</sup> を開発した。さらに近年では、用途・周波数に合わせて Si 濃度分布を最適化した新しい Si 傾斜磁性材料 JNSF<sup>®</sup>、JNRF<sup>®</sup> を開発した。これらの高けい素鋼板 (スーパーコア<sup>®</sup>) は高周波リアクトルや高速モータ等の鉄心材料として広く利用されている。本論文では、JFE スチールが製造するスーパーコアの特徴と用途について紹介する。

### Abstract:

In recent years, iron loss reduction at high frequencies has been strongly required for core materials to increase efficiency and downsize electrical equipment. JFE Steel developed the continuous siliconizing process using chemical vapor deposition (CVD) and started manufacturing 6.5% Si steel sheet JNEX<sup>TM</sup> in 1993, and also developed a new technology to control the Si concentration distribution in the thickness direction using the CVD process and Si gradient steel sheet JNHF<sup>TM</sup> in 1998. Further in recent years, new Si gradient steel sheets JNSF<sup>TM</sup> and JNRF<sup>TM</sup> have been developed, in which the Si concentration distribution is optimized for different applications and frequencies. These high-silicon electrical steel sheets (Super Core<sup>TM</sup>) are widely used as core materials including high-frequency reactors and high-speed motors. This paper introduces the characteristics and applications of the Super Core.

## 1. はじめに

一般に、電気機器の鉄心材料には、高効率化のために鉄損が低いこと、また小型化のために飽和磁化が高いことが要求される。Fe に 3 mass% の Si を添加した電磁鋼板 (3% けい素鋼板) は鉄損、飽和磁化、加工性などのバランスに優れた軟磁性材料であり、モータ、リアクトル、トランスなどさまざまな電気機器の鉄心材料として利用されている。以下、本稿では mass% を単に % と表記する。

近年、パワーエレクトロニクス技術の進歩を背景として、電気機器の小型化・高効率化の観点からインバータやスイッチング電源等の高周波化やモータの高速回転化が進展し、鉄心材料には高周波での鉄損低減が強く求められている<sup>1)</sup>。高周波鉄損の低減には高 Si 化、板厚の低減が有効であるが、硬く脆い高けい素鋼板を冷間圧延で製造することは困難であり、市販の電磁鋼板の Si 含有量は約 3% が上限と考えられてきた。

この課題を克服するため、JFE スチールは化学気相蒸着

(Chemical Vapor Deposition, CVD) による連続浸珪法を開発し、1993 年に 6.5%けい素鋼板 JNEX<sup>®</sup> の工業生産を世界で初めて実現した<sup>2)</sup>。一方で、電気機器のさらなる小型化・高効率化のために、6.5%けい素鋼板 JNEX をしのぐ高特性材も要求されはじめた。1998 年、JFE スチールは連続浸珪法を用いて板厚方向の Si 濃度分布を制御し、高周波鉄損をさらに低減した Si 傾斜磁性材料 JNHF<sup>®</sup> を開発した<sup>3)</sup>。さらに近年、用途・周波数に合わせて Si 濃度分布を最適化した新しい Si 傾斜磁性材料 JNSF<sup>®</sup>、JNRF<sup>®</sup> を開発した<sup>4,5)</sup>。これらの高けい素電磁鋼板 (スーパーコア<sup>®</sup>) は高周波リアクトルやトランス、高速モータ等の鉄心材料として広く利用されており、電気機器の小型化・高効率化に貢献を続けている。本稿では、JFE スチールが製造する高けい素電磁鋼板の特徴と用途について紹介する。

## 2. 高けい素電磁鋼板の特徴と用途

### 2.1 6.5%けい素鋼板 JNEX<sup>®</sup>

Fe に Si を添加すると固有抵抗が増加し鉄損が低下する。特に Si 含有量が 6.5% の組成は磁歪がゼロとなるため、極め

2023 年 3 月 22 日受付

て優れた軟磁気特性を示すことが 1930 年代から知られていた。しかし Si 含有量の増加は変形抵抗の増加や脆性延性遷移温度の上昇を招くため、6.5%けい素鋼板を冷間圧延で製造することは困難であった。その製造に関しては温間圧延法、急冷凝固法、浸珪法などが検討されてきたが、現在では CVD を用いた気相浸珪法による工業生産手法が確立されている<sup>2)</sup>。

図 1 に CVD を用いた連続浸珪ラインの模式図を示す。本手法では、まず比較的加工が容易な低けい素鋼板を冷間圧延で薄手化する。その後、SiCl<sub>4</sub> ガスを含む雰囲気中で連続焼鈍することで、鋼板中の Fe と SiCl<sub>4</sub> ガス中の Si の置換反応を起こし、Si を鋼板の中へ浸透させる。この反応により鋼板表層には Si 濃化層が形成される。その後、高温で拡散処理することで、板厚方向に均一な Si 濃度を有する 6.5%けい素鋼板 JNEX が得られる。なお、この浸珪処理の雰囲気を適切に制御することで粒界脆化を抑制できるため、JNEX は常温でのスリット加工、せん断および打抜き加工によるコアの作製が可能となっている<sup>6)</sup>。

JFE スチールは板厚 0.1 mm の JNEX (10JNEX900) を量産している。磁束密度 1.0 T、周波数 1 kHz における鉄損  $W_{10/1k}$  は約 19 W/kg であり、板厚 0.2 mm~0.35 mm の 3%けい素鋼板の鉄損値 40~60 W/kg 程度に対して 50%以上鉄損を低減できる。JNEX は高効率化が要求される高周波リアクトル、トランス等の鉄心材料に適しており、磁歪がほぼゼロのため電気機器の低騒音化にも寄与できる。また、応力や加工によって磁気特性が変化しにくいという興味深い特長も有している<sup>7)</sup>。

## 2.2 Si 傾斜磁性材料 JNHF<sup>®</sup>

CVD による連続浸珪法は鋼板表面から Si を浸透させる手法であり、その後の拡散処理を意図的に停止することで、表層は高 Si、板厚中心部は低 Si となる不均一な材料を作製できる。JFE スチールはこの材料が特異な磁気特性を示すことを見出し、従来の電磁鋼板では実現できなかった磁気特性

を有する新材料、Si 傾斜磁性材料 JNHF の開発に成功した<sup>3)</sup>。

図 2 に JNHF の板厚方向の Si 濃度分布の模式図を示す。JNHF の Si 含有量は板厚表層で 6.5%、板厚中心部では低 Si となっており、その平均 Si 含有量は 6.5%けい素鋼板 JNEX よりも少なくなっている。平均 Si 含有量が少ないにもかかわらず、JNHF は 6.5%けい素鋼板 JNEX よりも渦電流損が低いという特長を有する。図 3 に板厚 0.1 mm の 6.5%けい素鋼板 10JNEX900 と Si 傾斜磁性材料 10JNHF600 の鉄損の比較を示す。渦電流損が支配的になる 10 kHz 以上の領域において、JNHF は 6.5%けい素鋼板 JNEX をしのぐ低鉄損を示す。

図 4 に Si 濃度勾配による渦電流損低減メカニズムを示す。Si 傾斜磁性材料を交流励磁する場合、磁束は Si が高く透磁率の高い表層部に集中し、誘導起電力とこれに伴う渦電流も表層に集中する<sup>8)</sup>。これは Si 濃度勾配によって誘導される一種の表皮効果であり、この効果によって JNHF は低い渦電流損を示すと考えられる。

Si は非磁性元素であるため、平均 Si 含有量が少ない JNHF は、6.5%けい素鋼板 JNEX に比べて高い飽和磁化を示すという特長もある。また、Si 含有量の低減は加工性の改善にも寄与しており、JNHF はモータコアの打抜き加工にも対応しやすくなっている。JNHF は高周波機器の高効率化・小型化に適した材料であり、高周波リアクトルや超高速

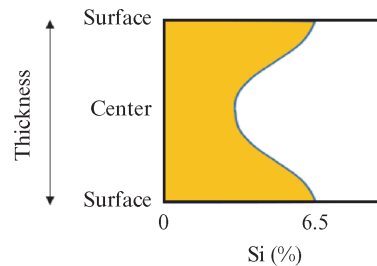


図 2 JNHF<sup>®</sup>の板厚方向 Si 濃度分布の模式図

Fig. 2 Schematic diagram of Si concentration distribution of JNHF<sup>TM</sup> in thickness direction

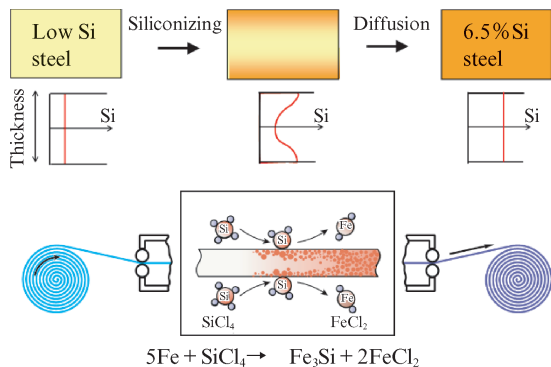


図 1 連続浸珪ラインの模式図

Fig. 1 Schematic diagram of continuous siliconizing line

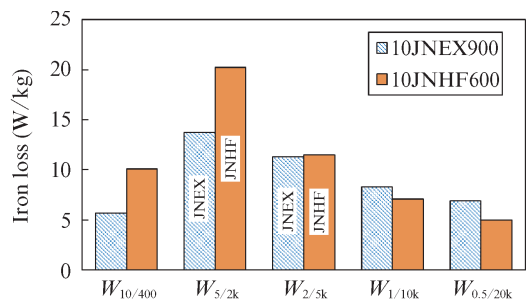


図 3 板厚 0.1 mm の JNEX<sup>®</sup> と JNHF<sup>®</sup> の鉄損

Fig. 3 Iron losses of JNEX<sup>TM</sup> and JNHF<sup>TM</sup> with 0.1 mm thickness

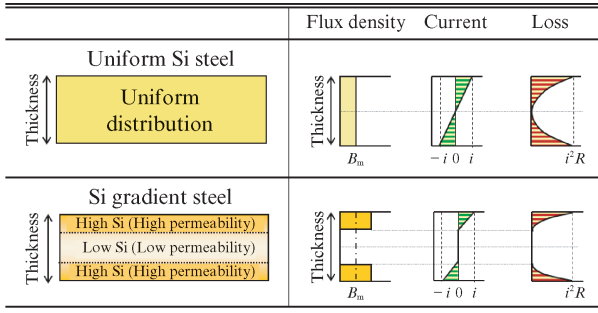


図4 Si 濃度勾配による渦電流損低減

Fig. 4 Reduction of eddy current loss by Si concentration gradient

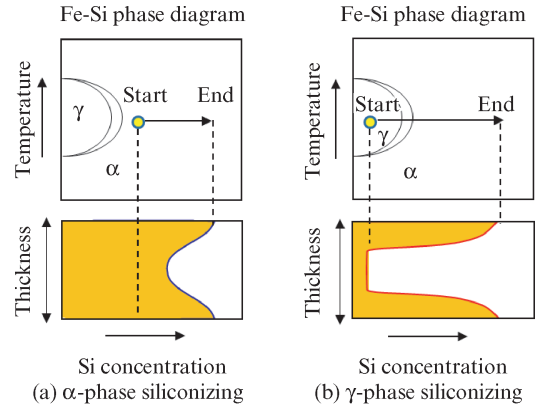


図5  $\alpha$  域浸珪と  $\gamma$  域浸珪の模式図

Fig. 5 Schematic diagram of  $\alpha$ -phase and  $\gamma$ -phase silicizing

モータに適用されている。

### 2.3 Si 局在化材料 JNSF<sup>®</sup>

前述のとおり、Si 傾斜磁性材料は板厚方向の Si 濃度勾配により渦電流損を低減している。仮にこの Si 濃度勾配をさらに急峻化し、Si を表面近傍のみに局在化させることができれば、渦電流損をさらに低減できると考えられる。また、Si 濃度勾配の急峻化によって板厚中心部の Si 量を少なくできるため、平均 Si 量の低減による飽和磁化の向上も期待できる。しかし、CVD による連続浸珪法は非常に高い温度で実施されるため、従来手法では表層から板厚中心部への Si の拡散を抑制することは難しいという課題があった。

この課題を克服するため、JFE スチールは連続浸珪処理における鋼板の結晶構造を制御することにより、Si の拡散を抑制する新しい浸珪技術 ( $\gamma$  域浸珪) を開発した<sup>4)</sup>。図 5 に従来浸珪法と  $\gamma$  域浸珪法の模式図を示す。図 5 (a) の従来浸珪法では鋼板の結晶構造は  $\alpha$  相 (fcc) であり、Si の拡散が速いため板厚中心層の Si 濃度を低くすることは困難であった。これに対して、図 5 (b) の  $\gamma$  域浸珪では素材の合金設計と浸珪条件の最適化により、浸珪開始時の鋼板の結晶構造を  $\gamma$  相 (bcc) に制御した。 $\gamma$  相は最密充填構造であり Si の拡散が遅いため、浸珪処理中の Si の拡散が著しく抑制され、表層近傍への Si 局在化が実現した。

この  $\gamma$  域浸珪によって製造される Si 局在化材料 JNSF は高 Si 領域が表層付近に局在化しており、従来の Si 傾斜磁性材料と比較して極めて急峻な Si 濃度勾配を有することが特徴である。これにより板厚中心部の低 Si 化が可能となり、渦電流損低減と飽和磁化向上が達成された。図 6 に JNSF の磁気特性を示す。板厚 0.15 mm の JNSF は、板厚が厚いにもかかわらず板厚 0.1 mm の 6.5% けい素鋼板と同等の高周波鉄損を示している。これに加えて、JNSF は約 2.0 T という高い飽和磁化を示しており、6.5% けい素鋼板に対して約 10% 向上している。以上のことから、JNSF は高周波リアクトル等の高効率化と小型化に適した材料であるといえる。

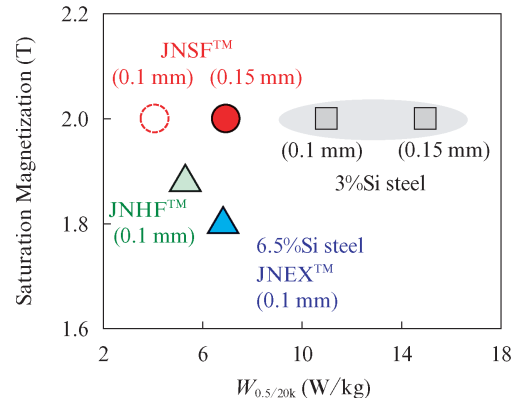


図6 JNSF<sup>®</sup>の磁気特性

Fig. 6 Magnetic properties of JNSF<sup>TM</sup>

### 2.4 高磁束密度 Si 傾斜磁性材料 JNRF<sup>®</sup>

近年、地球温暖化防止の観点から CO<sub>2</sub> 排出量削減と省エネルギー化への関心が高まり、モータの高効率化の要求が高まっている。モータで消費される電力は国内の電力消費量の約 6 割を占めており、仮に国内のモータの効率を 1% 向上できた場合、50 万 kW クラスの原発 1 基分の省エネルギー化に繋がるなどの試算もある<sup>9)</sup>。また自動車分野ではパワートレインの電動化が進んでおり、ハイブリッド自動車 (HEV)、電気自動車 (EV) の駆動モータには高効率化が強く求められている。モータの鉄心材料には、50 Hz~1 kHz での低鉄損に加えて、高い飽和磁化が要求される。

Si 傾斜磁性材料 JNHF, JNSF は 6.5% Si けい素鋼板 JNEX よりも高い飽和磁化を持つという特長がある。しかし、これらは高周波リアクトルで重視される 10 kHz 以上での鉄損低減を図った材料であり、必ずしもモータ用途に最適化された材料ではない。一般的なモータの駆動周波数である 50 Hz~1 kHz の領域では鉄損に占めるヒステリシス損の比率が高くなるため、材料設計をヒステリシス損低減に適した形に変更する必要があった。

このような背景のもと、JFE スチールは高磁束密度 Si 傾斜磁性材料 JNRF を開発した<sup>5)</sup>。本材料の開発においては、飽和磁化向上の観点から平均 Si 含有量を低減し、50 Hz～1 kHz の鉄損低減の観点から板厚方向の Si 濃度分布を見直した。これに加えて、高磁場域の磁束密度向上とヒステリシス損低減の観点から集合組織（結晶方位）も改善した。開発にあたっては製造条件を最適化し、磁気特性に有害な {111} 方位粒を低減し、{100}、{110} 方位粒を増加させる集合組織改善技術を適用した。

図 7 に 1.0 T、400 Hz の鉄損  $W_{10/400}$  と磁界の強さ 5 000 A/m の磁束密度  $B_{50}$  で整理した JNRF の磁気特性を示す。JNRF は既存の Si 傾斜磁性材料 JNHF をしのぐ低鉄損に加え、3% けい素鋼板並みの高い磁束密度を示している。

図 8 に板厚 0.1 mm の JNRF を用い、打抜きとカシメで作製した小型モータコアの外観を示す<sup>10)</sup>。JNRF は平均 Si 含有量を減らしたことで加工性がさらに改善しており、複雑な形状のモータコアの打抜き加工やカシメにも対応が可能である。

JNRF は 50 Hz～1 kHz の低鉄損特性に加え、3% けい素鋼板並みの飽和磁化と優れた加工性を有する材料である。本材料は高効率化、小型化の要求が強いモータの鉄心材料に好適と考えられ、HEV、EV、ドローン、航空機分野など周波数が高いモータへの適用が検討されている。

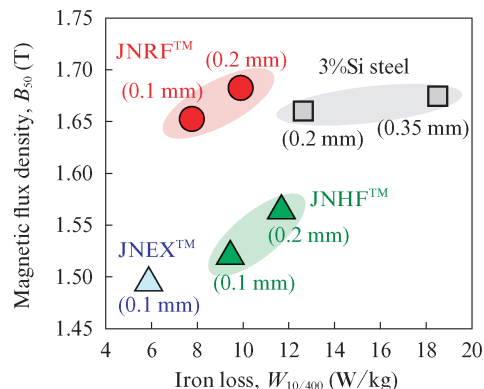


図 7 JNRF<sup>®</sup>の磁気特性

Fig. 7 Magnetic properties of JNRF<sup>TM</sup>

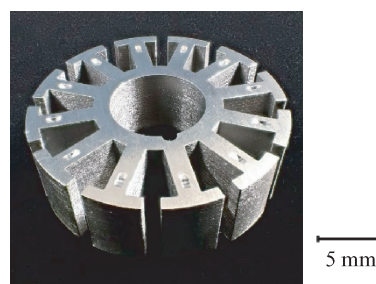


図 8 板厚 0.1 mm の JNRF<sup>®</sup>を用いて作製したモータコア

Fig. 8 Motor core made of JNRF<sup>TM</sup> with 0.1 mm thickness

### 3. 高い素電磁鋼板の特性比較

表 1 に高い素電磁鋼板（スーパーコア）の磁気特性を示す<sup>3)</sup>。比較材として、代表的な高周波用軟磁性材料である極薄方向性電磁鋼板と鉄系アモルファスの特性例も併せて示した。アモルファスは広い周波数領域で低い鉄損を示すが、磁歪が大きく飽和磁化が低いいため、電気機器の騒音が大きくなることや、コアが大型化するという課題がある。また、板厚が極めて薄かつ硬い材料であるため、打抜き加工でモータコアを製造することは難しい。極薄方向性電磁鋼板は、飽和磁化は高いものの高周波鉄損が高いため、電

気機器の効率が低くなるという課題がある。また、圧延方向以外の磁気特性は劣るためモータコアなどの回転機に適用することは難しい。これに対して、スーパーコアは高周波鉄損、飽和磁化、加工性のバランスに優れた材料であり、高周波リアクトルや高速モータに適用することで小型化、高効率化を図れる。

図 9 に各高い素電磁鋼板の飽和磁化と好適周波数領域を模式的に示す。6.5% けい素鋼板 JNEX はやや飽和磁化が低いものの、広い周波数領域で低鉄損を示す材料である。また、磁歪が小さいという特長を有し、リアクトルやモータ

表 1 高い素電磁鋼板「スーパーコア<sup>®</sup>」の磁気特性

Table 1 Magnetic properties of high-silicon electrical steel sheets “Super Core<sup>TM</sup>”

Material	Thickness (mm)	Saturation magnetization (T)	Iron loss (W/kg)					Magnetostriction at 1.0 T, 400 Hz ( $\times 10^{-6}$ )
			50 Hz	400 Hz	5 kHz	10 kHz	20 kHz	
			1.0 T	1.0 T	0.2 T	0.1 T	0.05 T	
10JNEX900	0.10	1.8	0.5	5.7	11.3	8.3	6.9	0.1
10JNHF600	0.10	1.9	1.1	10.1	11.2	7.1	5.4	3.1
15JNSF950	0.15	2.0	1.5	15.0	14.9	9.7	7.0	2.8
10JNRF	0.10	2.0	0.6	7.5	13.4	10.6	8.6	2.3
Grain-oriented 3%Si steel*	0.10	2.0	0.7	6.4	20	18	14	-0.8
Fe-based amorphous	0.025	1.5	0.1	1.5	8.1	3.6	3.3	27

\* Magnetic properties in the rolling direction

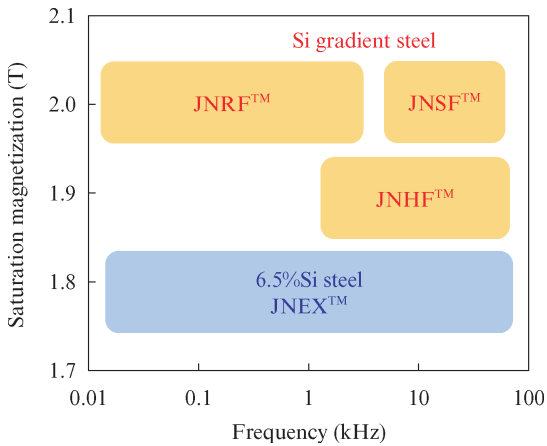


図9 各高い素電磁鋼板の飽和磁化と好適周波数領域

Fig. 9 Saturation magnetizations and suitable frequencies of high-silicon electrical steel sheets

等で騒音低減効果が報告されている<sup>3,11)</sup>。高周波用途でより高い飽和磁化が必要とされる場合は、Si 傾斜磁性材料 JNHF, JNSF が好適である。これらの材料は Si 濃度勾配の効果によって渦電流損が低くなっており、特に渦電流損が支配的となる 10 kHz~20 kHz 以上の領域では 6.5%けい素鋼板 JNEX と同等以上の低鉄損を示す。モータ用途のように、より低い周波数用途で高い飽和磁化が必要なケースでは、高磁束密度 Si 傾斜磁性材料 JNRF が好適である。本材料は 3%けい素鋼板並みの飽和磁化を有し、かつ数 kHz 以下の領域では JNHF, JNSF よりも低い鉄損を示す。これらの材料を用途・設計によって使い分けることで、電気機器の高効率化と小型化が図れる。

#### 4. Si 傾斜磁性材料のモータへの適用例

##### 4.1 モータの鉄心材料へのニーズ

モータの小型化・高効率化の進展にともない、鉄心材料には高磁束密度と低鉄損を両立した材料が求められている。2.4 節で述べた高磁束密度 Si 傾斜磁性材料 JNRF は、高磁束密度と 50 Hz~1 kHz での低鉄損を両立しており、モータ用途に適した材料だと考えられる。そこで、評価用の小型モータを作製し、材料特性がモータ特性に及ぼす影響を評価した。

##### 4.2 モータ評価

本検討では、小型化・高出力化が進展している EV, HEV 駆動モータを想定し、評価の対象を埋込磁石型 (Interior Permanent Magnet, IPM) モータとした。表 2, 図 10 に評価用モータの諸元と模式図を示す。鉄心材料として 20JNEH1500 (3%けい素鋼板), 10JNHF600, 10JNRF の 3 種類の電磁鋼板を用いた。各材料の板厚はそれぞれ 0.2 mm, 0.1 mm, 0.1 mm である。各材料を打抜いたのち、

表 2 評価モータの諸元

Table 2 Specification of test motor

Items	Specification
Rated power output	9 kW
Input voltage	400 V <sub>DC</sub>
Current limit	45 Arms
Current phase angle	0.0~65.0 deg
Number of poles/slots	8/48
Outer diameter of stator	171.2 mm
Stacking length	14 mm
Winding connection	Three phase connection, distributed

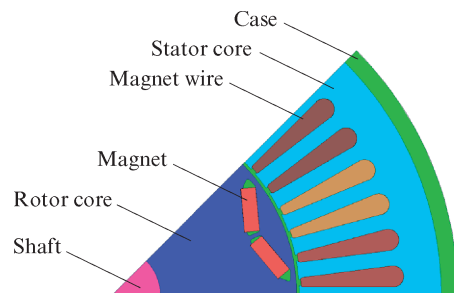


図 10 評価モータの模式図 (1/8 モデル図)

Fig. 10 Schematic diagram of test motor

カシメで固定してモータコアを作製し、巻線等を施して評価用モータとした。得られたモータを測定装置に接続し、最大効率制御を用いて各モータを評価した。

図 11 に得られたモータ効率マップを示す<sup>12)</sup>。Si 傾斜磁性材料 10JNHF600, 10JNRF を用いたモータは、3%けい素鋼板を用いたモータと比較して高いモータ効率を示した。特に、モータ損失に占める鉄損の割合が大きくなる高速回転条件において大きな効率向上が認められ、10 000 rpm 以上の領域では 95%を超える高効率を示した。

一方、10JNHF600 を用いたモータでは、最大トルクの低下が認められた。これは 3%けい素鋼板に比べて飽和磁化がやや低いことに起因すると考えられる。これに対して、飽和磁化が高い 10JNRF を用いたモータでは、3%けい素鋼板を用いたモータと同等の最大トルクが得られた。

以上の結果より、JNRF は高速モータの鉄心に適した材料であり、モータの小型化と高効率化に大きく貢献できると考えられる。

#### 5. おわりに

1993 年、JFE スチールは CVD を用いた連続浸珪ラインを建設し、世界で唯一の 6.5%けい素鋼板 JNEX の工業生産を実現した。立ち上げ当初、連続浸珪ラインは鋼板の Si 含有量を増加させる役割のみを担っていたが、Si 傾斜磁性材料の開発というイノベーションによりその位置づけは大きく拡

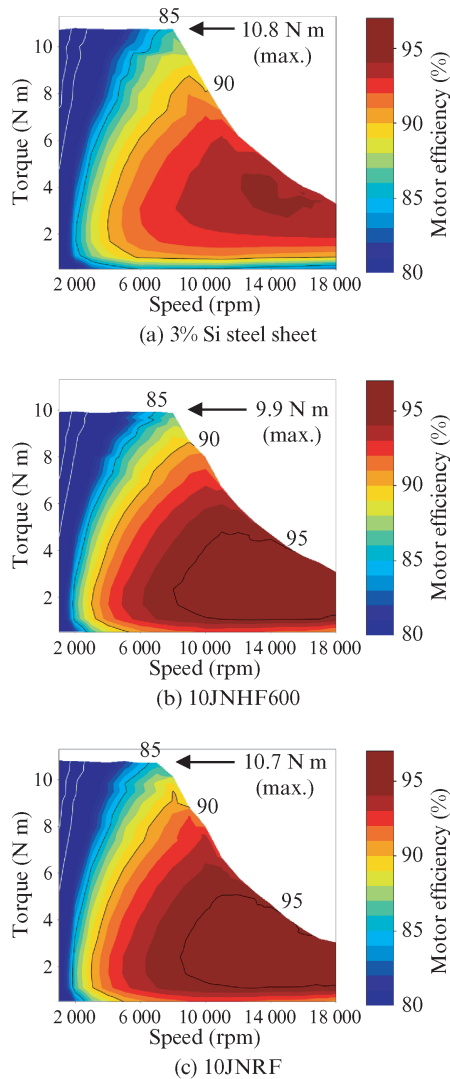


図 11 モーター効率評価結果

Fig. 11 Results of motor efficiency evaluation

大することとなった。現在の連続浸珪ラインは板厚方向の Si 濃度分布を自由にコントロールする役割も果たし、JNHF, JNSF, JNRF など従来手法では実現できなかった特異な軟

磁性材料を生み出し続けている。これらの材料は高周波リアクトル、高速モータ等の鉄心材料として広く利用されており、電気機器の高効率化・小型化に寄与するとともに、世界の CO<sub>2</sub> 排出量削減と省エネルギー化に貢献を続けている。スーパーコアはさらなる進化の可能性を秘めた材料であり、JFE スチールはこれからも新たな高機能材料創出のための研究開発を継続していく。

参考文献

- 1) 吉沢克仁. 軟磁性材料の開発動向と展望. まてりあ. 2017, vol. 56, no. 3, p. 186-189.
- 2) 高田芳一, 阿部正広, 田中靖, 岡田和久, 平谷多津彦. 6.5%けい素鋼板 (スーパー E コア) の開発. まてりあ. 1994, vol. 33, p. 423-425.
- 3) 浪川操, 二宮弘憲, 山路常弘. 高周波リアクトル用として優れた磁気性能を有する高 Si 電磁鋼板. JFE 技報. 2005, no. 8, p. 11-16.
- 4) 平谷多津彦, 尾田善彦, 浪川操, 笠井勝司, 二宮弘憲. 飽和磁束密度が高く高周波鉄損の低い Si 傾斜磁性材料 JNSF の開発. まてりあ. 2014, vol. 53, no. 3, p. 110-112.
- 5) 財前善彰, 尾田善彦, 大久保智幸, 笠井勝司, 戸部輝彦. 高速モータの高効率化に寄与する Si 傾斜磁性材料 JNRF<sup>®</sup> の開発. まてりあ. 2022, vol. 61, no. 1, p. 1-3.
- 6) 平谷多津彦, 藤田耕一郎, 二宮弘憲, 笠井勝司. 6.5% Si 鋼板の加工性改善と製品の 2 次加工性. 平成 23 年電気学会産業応用部門大会講演論文集. 2011, ronbun no. 3-36, p. 215-220.
- 7) 尾田善彦, 戸田広朗, 志賀信勇, 笠井勝司, 平谷多津彦. 電磁鋼板の圧縮応力下の鉄損に及ぼす Si 量の影響. 電気学会論文誌 A. 2014, vol. 134, no. 3, p. 148-153.
- 8) Hiratani, T.; Zaizen, Y.; Oda, Y.; Senda, K. Investigation of the magnetic properties of Si-gradient steel sheet by comparison with 6.5 % Si steel sheet. AIP Advances. 2018, vol. 8, 056122.
- 9) 森本茂雄. 環境に優しいモータとそのドライブ技術. 大阪府立大多工学部大学院工学研究科ニュース. 2004, no. 34, p. 13-14.
- 10) 吉崎聡一郎, 財前善彰, 大久保智幸, 尾田善彦. 新規 Si 傾斜磁性材料を適用したドローン用モータの特性評価. 令和 4 年電気学会全国大会講演論文集. 2022, ronbun no. 5-032, p. 54-55.
- 11) Sobue, H.; Cai, Y.; Chiba, A.; Kiyota, K.; Fujii, Y.; Senda, K.; Yoshizaki, S. Analysis and Experimental Comparison of Acoustic Noise of Three Switched Reluctance Motors Made of Conventional Steel, High Silicon Steel, and Amorphous Iron. IEEE. Trans. on Ind. Appl. 2021, vol. 57, no. 6, p. 5907-5915.
- 12) 吉崎聡一郎, 財前善彰, 大久保智幸, 尾田善彦. 新規 Si 傾斜磁性材料を適用した IPM モータの効率マップ評価. 令和 5 年電気学会全国大会講演論文集. 2023, ronbun no. 5-030, p. 53-54.