

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

High Silicon Steel Sheet

Realizing Excellent High Frequency Reactor Performance

浪川 操 NAMIKAWA Misao JFE スチール スチール研究所 電磁鋼板研究部 主任研究員(副課長)
二宮 弘憲 NINOMIYA Hironori JFE スチール 電磁鋼板セクター部 主任部員(課長)
山路 常弘 YAMAJI Tsunehiro JFE スチール 東日本製鉄所 薄板部薄板技術室 主任部員(課長)

要旨

JFE スチールは、高周波用途に適した高 Si 電磁鋼板 JFE スーパーコア「JNEX コア」、 「JNHF コア」の 2 商品を開発した。本稿では JNEX、JNHF および代表的な高周波用材料である極薄方向性電磁鋼板、鉄系アモルファスの材料基本特性を比較評価するとともに、各材料を用いて高周波リアクトルを作製してリアクトルとしての性能評価を実施した。その結果、JNHF は鉄心製造にともなう特性劣化が少なく低損失でかつ直流重畳特性に優れ、JNEX は磁歪特性に優れるため高周波リアクトルの大幅な低騒音化を実現できることが分かった。

Abstract:

JFE Steel has developed two types of high silicon steel sheet, “JFE Super Core JNEX” and “JFE Super Core JNHF,” for high frequency applications. In this paper, the magnetic properties of JNEX and JNHF were compared with those of thin-gage grain-oriented electrical steel sheet and iron-based amorphous. In addition, reactor performance was measured by high frequency reactors made of those materials. JNHF shows little deterioration of core loss through the manufacturing of iron core, low loss performance, and the improvement of DC bias characteristics. Significant noise reduction can be realized by applying JNEX for high frequency reactors, because of its excellent magnetostriction characteristics.

1. はじめに

地球環境問題への社会的関心は年々高まりを見せている。このため環境負荷物質排出量の削減との関連も含めエネルギー消費量の低減、すなわち省エネルギー問題とその関連技術が近年再び大きな関心を集めている。ハイブリッド自動車への関心の高まりなどはその好例である。

本稿では、電力機器の省エネのための重要部品となっている高周波リアクトルに好適な材料である、JFE スチール高 Si 電磁鋼板スーパーコアの材料基本特性と、リアクトル鉄心に用いたときのリアクトル性能について述べる。

2. インバータ・コンバータ技術と高周波リアクトル

パワーエレクトロニクス分野において、省エネルギーのキーテクノロジーとなっているものに、インバータ・コンバータ技術がある¹⁾。この技術は、半導体パワーデバイススイッチング動作を通じて電力の変換と制御を高効率か

つ高速・高精度で行う技術である。

このインバータ・コンバータ技術の実現に、半導体素子と並んで欠くことのできない重要電子部品に高周波リアクトルがある。この高周波リアクトルは、スイッチング動作をともなう回路中において、電気エネルギーの蓄積・放出を繰り返し行うことによって、回路の電圧電流調整を行う働きを担う部品である。このリアクトルを含む部品の小型化や機器の制御性の向上は、スイッチング速度の高速化によって達成できることから、スイッチング周波数の高周波化が常に志向されている。

インバータ・コンバータ機器のスイッチング周波数は、およそ機器の容量に依存しており、数百 kVA 以上の大容量機では数百～数千 kHz、数百 VA～数百 kVA の中容量機で数千 kHz～数十 kHz、数百 VA 以下の小容量機では数十 kHz～数百 kHz のスイッチング周波数がおおむね採用されている。

インバータ・コンバータ機器に用いられる高周波リアクトルには、大きく分けて AC リアクトルと DC リアクトルとが存在する。

たとえば、インバータの出力段にはスイッチング周波数

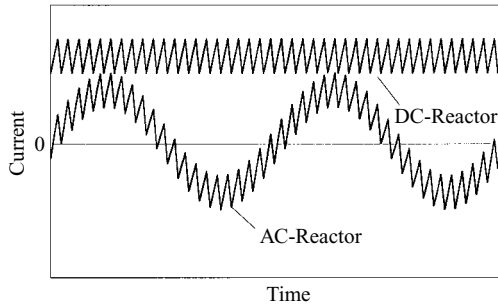


Fig.1 Reactor current wave

を含む高周波成分をカットするために、通常 LC フィルタが設置される。この回路構成で L 成分(インダクタンス成分)を担うものが高周波リアクトルである。このリアクトルに流れる電流波形は、Fig. 1 に示すように低周波交流に高周波リップルが重畳した波形となっているため、このリアクトルは特に AC リアクトルと呼ばれている。

また、たとえば、インバータ・コンバータ機器内部では頻繁に電圧変換がなされているが、その大半はチョップ型 DC-DC コンバータ回路によってなされており、この回路構成にも高周波リアクトルによるインダクタンス成分が必須である。この場合リアクトルに流れる電流波形は、Fig. 1 に示すように直流電流に高周波リップルが重畳した波形となっているため、このリアクトルは特に DC リアクトルと呼ばれている。

この他、電源高調波問題の解決と効率向上を同時に達成することを目的に設置される、力率調整回路(アクティブフィルタ)²⁾ やスイッチングトランス 2 次側フィルタなどの例も含め、高周波リアクトルはインバータ・コンバータ機器に必須の部品となっている。

AC リアクトル、DC リアクトルいずれの場合も電流波形にスイッチングに起因する高周波成分を含む。このため高周波リアクトル用の鉄心材料には優れた高周波磁気特性が必要であり、特に低リアクトル損失のために高周波低鉄損、リアクトル小型化のために高飽和磁束密度、リアクトル騒音低減のための低磁歪といった特性を備えた新たな軟磁性材料の出現が強く求められていた。

JFE スチールでは、上記高周波リアクトル用鉄心材料に対するニーズに好適の材料として、高 Si 電磁鋼板(商品名:「JFE スーパーコア」)を世界に先駆け開発した。

3. 高 Si 電磁鋼板 JFE スーパーコア 「JNEX」, 「JNHF」

3.1 6.5% Si 鋼板 JNEX コア

電磁鋼板には固有抵抗を高めるために Si が添加されており、特に鉄心の渦電流損失は周波数の上昇とともに急激に上昇するので、電磁鋼板の高周波磁気特性を改善するには Si の添加は極めて有効である。また、鉄への Si 添加

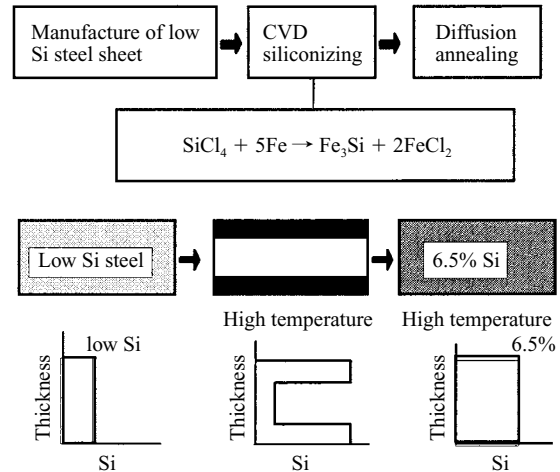


Fig.2 Manufacturing process of 6.5% Si steel

により鋼板の磁歪が変化し、Si 量が 6.5 mass% で磁歪がゼロになる³⁾ ことも知られている。

このように高 Si 電磁鋼板、特に 6.5% Si 鋼板は極めて優れた高周波磁気特性を示す。しかし、Si 添加量の増加にともない鋼板の延性が低下し、3.5 mass% を越えると材質が著しく脆化して冷間圧延は困難となる。このため Si 添加量 3.5 mass% を越える高 Si 電磁鋼板の工業レベルでの製造は困難であった。

この技術的課題に対し、JFE スチールでは、世界に先駆けて化学気相蒸着法(CVD 法)を用いた 6.5% Si 鋼板の連続製造技術を確立した⁴⁾。Fig. 2 に CVD 法による 6.5% Si 鋼板の製造原理を示す。まず冷間圧延可能な低 Si 鋼板を薄板としておき、無酸化雰囲気中で高温に加熱する。この高温鋼板表面に SiCl₄ を供給すると鋼板中の Fe と SiCl₄ ガス中の Si が置換して、Si が鋼板中へ浸透する。この化学反応によって鋼板表層に Si 濃化層が形成される。その後無酸化雰囲気中で高温均熱することにより Si は鋼板内部へ拡散し、最終的に均一な 6.5% Si 鋼板となる。

本材料は商品名「JNEX コア」として販売されている。

3.2 傾斜高 Si 鋼板 JNHF コア

組成を厚さ方向に連続的に変化させることを特徴とする傾斜機能材料は、主に耐熱、熱電材料などの分野で開発が進められてきた。一方、JFE スチールは板厚方向に Si 量の分布を有する電磁鋼板が特異な磁気特性を示すことを発見し、これに着目した研究開発を進めた。その結果、板厚方向の濃度分布形態を制御することにより、従来の電磁鋼板では実現することのできなかった新しい磁気特性、特に高周波域では 6.5% Si 鋼板をも上回る低鉄損特性を有する傾斜高 Si 鋼板の開発に成功した。

傾斜高 Si 鋼板は 6.5% Si 鋼板の製造と同様に連続浸けいラインを用い、CVD による浸けいおよびそれに引き続く拡散処理のプロセスで製造される。特に傾斜高 Si 鋼板の製造においては鋼板表層に Si 濃化層が形成される際の浸けい量

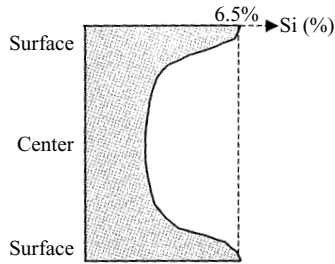


Fig. 3 JNHF Si profile

と浸けい速度を制御し、さらにその後無酸化雰囲気中で高温均熱する際の温度と処理時間を制御することにより、最終的に所望のSi濃度分布を有する傾斜高Si鋼板を得る。このようにして得られた傾斜高Si鋼板は、Fig. 3に示すように鋼板中心部から表層に向かってほぼ連続的にSi濃度が高くなるという濃度分布形態を有しており、特に鋼板表層は極めて透磁率が高いSi量6.5 mass%の組成となっている。本材料は商品名「JNHF コア」として販売されている⁵⁾。

3.3 JNEX, JNHFの素材基本特性

Table 1にJFEスーパーコアJNEX, JNHFの代表特性例を示す。表には代表的な高周波用材料である極薄方向性電磁鋼板、鉄系アモルファスの代表特性例も示す。

鉄系アモルファスは、板厚が極めて薄く固有抵抗も高いことから全周波数領域で低い鉄損を示すものの、飽和磁化が低く磁歪が大きいことからリアクトル用途では小型化や騒音で難点が指摘されている。極薄方向性電磁鋼板は、飽和磁化が高いものの鉄損が大きいことからリアクトルの発

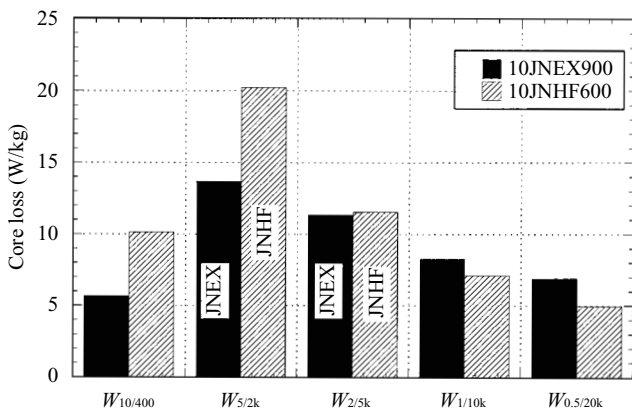


Fig. 4 Core losses of JNEX and JNHF

Table 1 Typical magnetic properties

Material	Thickness (mm)	Specific resistance ($\mu\Omega \cdot m$)	Saturation magnetization (T)	Core loss (W/kg)				Magnetostriction at 400 Hz, 1.0 T ($\times 10^{-6}$)
				50 Hz, 1.0 T	400 Hz, 1.0 T	5 kHz, 0.2 T	20 kHz, 0.05 T	
10JNEX900	0.1	0.82	1.8	0.5	5.7	11.3	6.9	0.1
10JNHF600	0.1	-	1.9	1.1	10.1	11.2	5.0	-
Grain oriented Si steel	0.1	0.48	2.0	0.7	6.4	20.0	14.0	-0.8
Fe base amorphous	0.025	1.30	1.5	0.1	1.5	8.1	3.3	27.0

熱、効率で難点が指摘されている。これら材料と比較するとJFEスーパーコアJNEX, JNHFは高周波リアクトル用途を考慮した場合の鉄損、飽和磁化の特性バランスがともに優れていることが分かる。また、板厚0.1 mmでJNEX, JNHF両材料を比較すると、Fig. 4に示すように5 kHzを境にそれ以下ではJNEX、それ以上ではJNHFが鉄損特性が優れている。

このため現在、高周波リアクトル用途ではスイッチング周波数が数kHz以下では主にJNEXが、10 kHz以上ではJNHFがおおむね使用されている。ただし、昨今では高周波リアクトルに低騒音特性を要求する案件が急速に増えてきており、当該案件ではJNEXが使用されるケースが大半となっている。

4. JNHFコアを用いた高周波リアクトル性能

4.1 リアクトルの低損失化に適した材料 JNHF コア

JNHF コアは従来Fe-Si合金系では磁気特性が最も優れるとされていた6.5% Si鋼板よりも、周波数5 kHzを上回る高周波域では低鉄損を示す。このため、リアクトルの鉄損が大きな問題となるスイッチング周波数10 kHz以上の高周波リアクトル用鉄心材料として好適な材料である。

4.2 実験方法

高周波リアクトルの鉄心構造には、大別して積層鉄心と巻鉄心とがある。極薄方向性電磁鋼板が使用される場合には、磁気特性の優れる方向(圧延方向)のみを磁化方向とするために巻コアが最適である。アモルファスが使用される場合も、板厚が0.025 mmと極めて薄く積層鉄心とするには加工コストがかさむこと、およびせん断・積層で作製してもギャップの管理が困難であるため、やはり巻コアが最適である。

一方、JNHF コアは無方向性であること、および巻コア製造工程中の熱処理で磁気特性が変化することが懸念されることから、通常打ち抜積層コアとなる。

このため、今回、JNHF コアは積層コア(block type)、極薄方向性電磁鋼板と鉄系アモルファスは巻コア(C-type)として、Fig. 5に示すように同一寸法の鉄心を作製し、それ

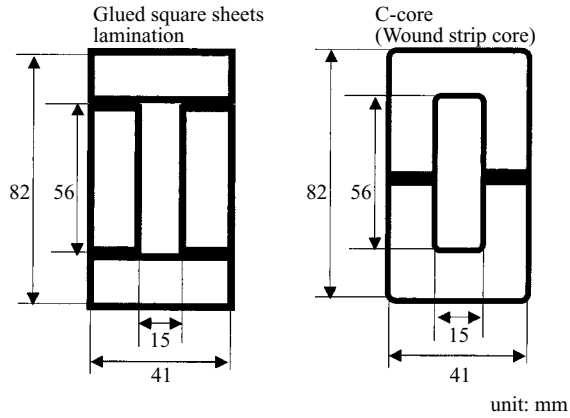


Fig. 5 Dimensions of iron cores

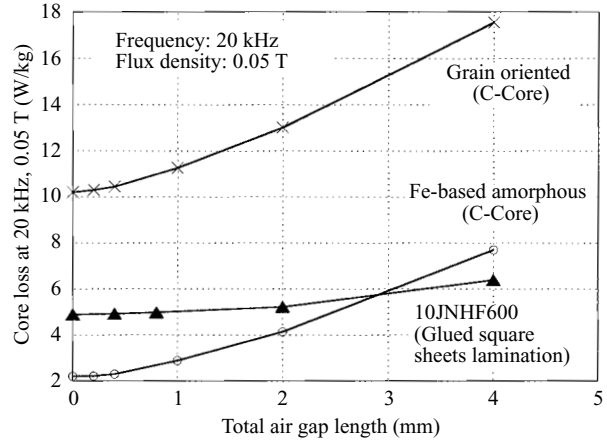


Fig. 6 Core loss dependence on gap length

それぞれの各素材に最も適した鉄心構造での高周波リアクトル性能を比較評価することとした。

一般にリアクトル鉄心は、磁気飽和を防止するため磁路中にエアギャップを設ける必要がある。JFE スチールは、このエアギャップの大きさがリアクトル鉄心の鉄損特性に影響を及ぼすことを見出した。このため周波数 20 kHz、磁束密度 0.05 T での鉄損のエアギャップ長依存性を調べた。

また、高周波リアクトルの性能として鉄損特性と並んで直流重畳特性が極めて重要となるので、周波数 20 kHz、磁束密度 0.01 T に対するインダクタンス値の直流オフセット電流依存性を調べた。

4.3 実験結果

Table 2 に鉄心製造に使用した材料の素材鉄損と製造された鉄心のエアギャップがゼロの場合の鉄損および鉄心製造にともなう鉄損劣化率を示す。極薄方向性電磁鋼板と鉄系アモルファスの場合は、巻コアであり製造過程で歪取焼鈍が施されているものの、鉄損特性は劣化していた。鉄系アモルファスの場合、特に劣化率が大きかった。一方、JNHF コアの場合鉄損劣化は見られず、鉄心でも素材とほぼ同一の鉄損特性が得られることが確かめられた。

Fig. 6 は周波数 20 kHz、磁束密度 0.05 T での鉄損のエアギャップ長依存性である。極薄方向性電磁鋼板と鉄系アモルファスでは、全エアギャップ長の増大にともない鉄損が急激に上昇する。一方、JNHF コアでは全エアギャップ長の増大にともなう鉄損の上昇率は他の 2 材料と比較して著しく小さい。

この原因はいわゆるギャップ分散効果にあると考えられる。すなわち、ギャップ長増大にともないギャップ部近傍で漏れ磁束が急激に増大するので、この漏れ磁束による鉄損も大幅に増大する。しかし、JNHF コアの鉄心は Fig. 5 から分かるようにエアギャップの数が多く、全エアギャップ長同一で比較するとギャップ 1ヶ所あたりのギャップ長は小さい。その結果、漏れ磁束も少なくなり鉄損の増加が抑えられているものと考えられる。

このようにギャップ数を多くできる打ち抜積層鉄心という鉄心構造を、無方向性でありかつ歪感受性が小さいので取り得るという点も JNHF コアの優れた特徴と言える。

Fig. 7 は周波数 20 kHz、磁束密度 0.01 T に対するインダクタンス値の直流オフセット電流依存性である。

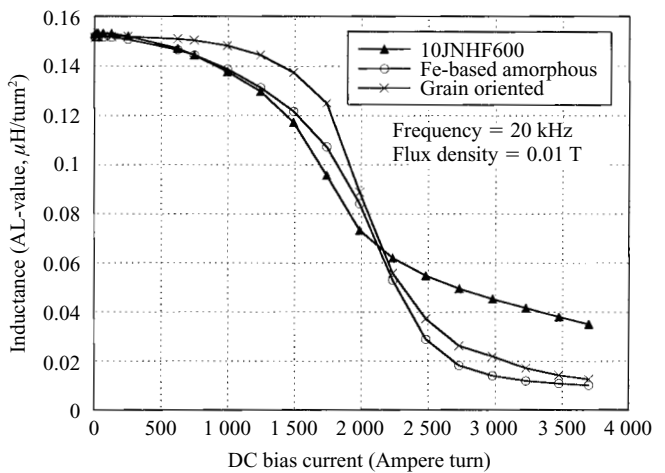


Fig. 7 Inductance dependence on DC bias current

Table 2 Core loss increase by core manufacturing

Material	Thickness (mm)	$W_{0.5/20k}$ (W/kg)		Core loss increase by core manufacturing (%)
		Raw material	Manufactured core	
10JNHF600	0.1	4.89	4.88	0
Grain oriented Si steel	0.1	9.75	10.24	5
Amorphous	0.025	1.31	2.20	68

Table 3 Magnetic permeability of raw materials

Material	Magnetic permeability (emu)	
	DC (μ_{max})	20 kHz, 0.05 T
10JNHF600	4 100	1 500
Grain oriented Si steel	37 000	1 110
Amorphous	300 000	5 450

JNHF コアは他材料と比較して、直流オフセット電流の高電流域でインダクタンス性能が大幅に優れていることが分かった。この性能はパワーリアクトルとして極めて有用な特徴である。このように JNHF コアが優れた直流重畳特性を示す理由は、Table 3 に示すように JNHF コアは直流透磁率が低いいため直流重畳電流に対して磁気飽和しにくい一方、高周波透磁率は高いので高周波インダクタンスは十分高い値が確保できるためである。このように、JNHF コアは高周波リアクトル用の鉄心材料として直流透磁率と高周波透磁率のバランスが極めて優れた材料であることが分かる。

5. JNEX コアを用いた高周波リアクトル性能

5.1 リアクトルの低騒音化に適した材料 JNEX

6.5% Si 鋼板 JNEX は、高周波リアクトルの騒音の原因である磁歪がゼロであるという他の材料にはない極めて優れた特徴があり、低騒音リアクトルの鉄心材料として好適である。

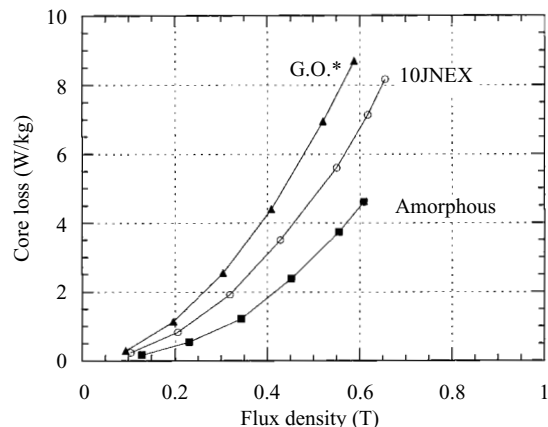
5.2 実験方法

JNEX コア(板厚 0.1 mm)、極薄方向性電磁鋼板、鉄系アモルファス(板厚 0.025 mm)の各材料を用いて Fig. 5 に示す巻コア(C-Core)と同一寸法のカットコアを作製した。コアに 0.2 mm 厚のギャップ材を 2ヶ所挿入してステンレス製バンドで固定した後、コイルを 22 ターン施して試験用リアクトルとした。これを基本周波数 50 Hz、キャリア周波数 16 kHz の PWM 波で励磁してコアから 10 cm の位置におけるリアクトルの騒音(A スケール)を測定した。

5.3 実験結果と考察

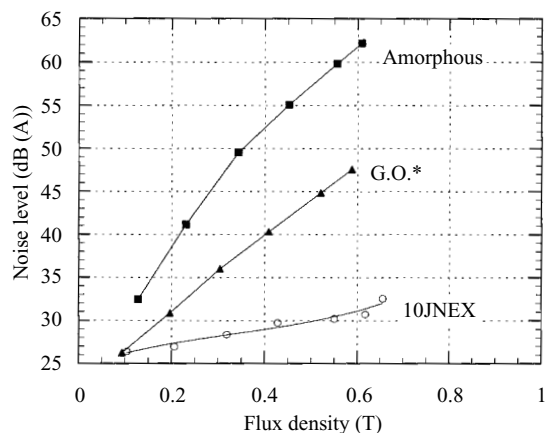
PWM 励磁されたときの鉄損の磁束密度(ピーク値)依存性を Fig. 8 に示す。鉄損の周波数解析を行った結果、基本波である 50 Hz の鉄損は極薄方向性電磁鋼板の方が JNEX よりも低い値を示した。それにもかかわらず、PWM 励磁全鉄損では JNEX の方が低鉄損を示すのは、PWM には高調波成分が多く含まれ、高調波成分の鉄損は JNEX の方が極薄方向性電磁鋼板より著しく低い^{6,7)}ためである。

Fig. 9 は PWM 励磁されたときの騒音の磁束密度依存性である。高周波リアクトルの騒音値は素材の磁歪特性を反映して JNEX が極めて低い値となっており、他材料との騒



*Grain oriented Si steel

Fig. 8 Core losses of test reactors



*Grain oriented Si steel

Fig. 9 Audible noise of test reactors

音差は磁束密度が高くなるほど大きくなる結果を示した。

このように JNEX コアを鉄心に使用すれば、高周波の損失を低く抑えかつ騒音を極めて低い値に抑えることができるので、JNEX コアは高周波リアクトルの低騒音化に好適の材料と言える。

6. おわりに

JFE スチールの高周波用電磁鋼板 JNEX、JNHF および代表的な高周波用材料である極薄方向性電磁鋼板、鉄系アモルファスを用いて高周波リアクトルを作製して特性評価を実施し、下記のことが明らかとなった。

- (1) JNHF コアは直流透磁率と高周波透磁率のバランスが優れ、高周波リアクトルとして極めて優れた損失特性、直流重畳特性を示す。
- (2) JNEX コアは磁歪特性に優れるため、高周波リアクトルの大幅な低騒音化が実現できる。

上記のように高周波リアクトル用として優れた磁気性能を有する JFE スーパーコアは、電力用スイッチング電源機器に広く使用されている他、昨今ではハイブリッド自動車

の電源部品にも採用が広まり、環境保全・省エネルギーの一端を担う材料となっている。

7) 浪川操, 高田芳一. 半導体電力変換・産業電力電気応用合同研究会資料. SPC98-117. IEA-98-62. 1998.

参考文献

- 1) 電力変換器の高性能スイッチング技術調査専門委員会編. 電気学会技術報告第 687 号. 1998-08.
- 2) アクティブフィルタ機能を有する高性能電力変換システム調査専門委員会編. 電気学会技術報告第 643 号. 1997-07.
- 3) Bozorth, R. M.; Ferromagnetism. Van Nostrand. New York. 1951.
- 4) Yamaji, T.; Abe, M.; Takada, Y.; Okada, K.; Hiratani, T. J. Magn. Magn. Mater. vol. 133, 1994, p. 187.
- 5) 浪川操, 二宮弘憲. 傾斜高けい素鋼板. NKK 技報. no. 164. 1998, p. 72.
- 6) Namikawa, M.; Ninomiya, H.; Tanaka, Y.; Takada, Y. IEEE Trans. on Mag. vol. 34, 1998, p. 1183.



浪川 操



二宮 弘憲



山路 常弘