

アモルファス鉄心変圧器の実用化

解 説

八木 澤 猛*

Developments of Amorphous Core Power Transformers

Takeshi YAGISAWA

1. 鉄心材料への期待

電力機器はエネルギーの形態を変換する装置であり、機械的エネルギーを電気的エネルギーに変換する発電機、その逆の変換を行う電動機、そして同じ電気エネルギーではあるが異なった電圧に変換する変圧器が主要な機器としてあげられる。このようなエネルギーの変換において磁気が応用されるが、これは小さな体積の機器に大きなエネルギーを詰めこむことができるのがその理由となっている。すなわち、鉄などの強磁性体にわずかな磁化力を与えるだけで容易に高い磁束密度を得ることができ、したがってこれを用いることで機器を小形に製作することが可能となる。

電力機器に入るエネルギーのほとんどは出力として取り出すことができるが、その内の一部は損失として失われる。このとき損失となるエネルギーは極力少なくしなければならない。過去の、エネルギー源が安価にいくらでも入手可能と思われていた時代の損失に対する考え方は、それがもたらす温度上昇が絶縁物を劣化させることのないように考慮すれば十分とされていた。しかし省エネルギーが重視されている現在は、少しでも損失の低い機器が要求されている。損失評価制度は、損失値を機器の価格に換算するものであり、例えば損失の1Wだけ少ない機器はその価格が5\$高くてもよいというように評価される。このような損失評価制度は、その換算率がユーザーによつて、機器ごとによつて、あるいは鉄損と銅損とで大きな差があるものの、海外では広く採用されている^{1)~3)}。このような社会的要求から電力機器は、その製造者にとつて、効率競争の時代にあるといえよう。

変圧器の場合、その損失は、表1に示す4種類からなる。これらの損失のうち重要なものは鉄損と銅損である。設計者はこれらを小さくすることに努力するが、困つた

ことに両者は互いに相反する性質をもっている。例えば鉄心の磁束密度を低く設計すれば鉄損は低減されるが、コイルの巻回数を増すことが必要となつて銅損が増す。一方コイル導体の断面積を大きくして銅損を減らそうとすれば、コイルの体積にともなつて鉄心の寸法も大きくしなければならず、このため鉄損は増加する。

このような難点を解決するために、他方の損失に影響を与えないような損失低減方法が望まれる。材料特性の向上は、最も有効な手段である。導体材料については、超電導を除けば、純銅以上の実用材料が考えられないために、鉄心材料に対する期待は大きい。

電力用変圧器の鉄心材料に対する要求は、1) 鉄損が低いこと、2) 磁束密度を高く設計できること、の二つにまとめられる。前者は直接変圧器鉄損を低くし、後者は鉄心の小形化とこれにともなう銅損の低減を可能とする。

表1 変圧器の損失

損 失	概 要
無負荷損 鉄 損	強磁性体である鉄心が磁化を繰り返すときに発生する損失。定性的には、ヒステリシス損とわず電流損とからなるとして説明される。鉄損は磁束密度によつて変化する。変圧器の場合は負荷によらず電圧は一定であり、したがって磁束密度も一定である。そのため鉄損は電力の使用量にかかわらず常に一定の割合で失われている。
負 荷 損 銅 損	コイルに流れる電流による抵抗損。電流を I 、コイルの抵抗を R とするとき I^2R であらわされる。電力を多量に使用すれば変圧器負荷電流は大となり、銅損も大となるが、低負荷では小さい。
漂遊損	大きな負荷電流がコイルに流れることによつて鉄心以外の空間にも磁束が生じ、この磁束が漏れてタンク壁やクランプ等の鋼部に流れたときに生ずるわず電流損で、大容量器の場合にのみ問題とされる。対策としては磁気シールドを設置し、磁束の鋼部材への侵入を防止する方法がとられる。
補 機 損	冷却ファン、ポンプ等の電動機に消費されるエネルギー。通常これらの電動機を必要とするのは大容量器のみである。変圧器損失に含めず別に扱うこともある。

昭和63年3月31日受付 (Received Mar. 31, 1988) (依頼解説)

* (株)東芝重電技術研究所 主査 (Heavy Apparatus Engineering Laboratory, Toshiba Corp., 2-4 Suehiro-cho Tsurumi-ku Yokohama 230)

Key words : amorphous magnetic material ; iron base alloy ; transformer ; magnet core ; iron loss ; resistance loss ; ferromagnet ; electrical resistivity ; magnetic property ; economy.

2. アモルファス磁性材料の登場

鉄損の少ない材料としての条件は、次のようである。

①磁化しやすいこと。このときにはヒステリシス損が小さくなる。

②うず電流損が少ないこと。そのためには、形状を薄板とし、これを積層して鉄心を構成する。また電気抵抗率の高いことが望ましい。

磁化しやすい材料を得るためには、これをさまたげる要因を除去してやる必要がある。磁化をさまたげる要因としては、次のような項目があげられる。

①結晶磁気異方性：異方性エネルギーが大きい場合、磁化ベクトルが向きを変えようとするとき高いポテンシャルエネルギーの山を越えることが必要で、そのため磁化しにくくなる。

②ひずみあるいは応力と磁気ひずみとの組合せ：磁化することによつて寸法の変化する現象を磁気ひずみという。材料の磁気ひずみが0でない限り、磁気特性は応力の影響を受けるが、多くの場合磁化がさまたげられる効果だけがあらわれる。

③析出物、結晶粒界など：強磁性体は磁区とよばれる多くのセルで構成されており、各磁区の内部では同じ方向の磁化ベクトルをもっている。外部から磁場を与えて磁化するとき、外部磁場の方向と同じ方向、あるいは近い方向の磁化ベクトルを持つ磁区が大きくなるが、この変化は、磁区間の境界である磁壁が移動することによつてなされる。析出物や結晶粒界は、この磁壁の移動をさまたげて磁化をしにくくしている。

アモルファスの特徴は結晶構造を持たないことである。ただし、原子2~3個程度の短範囲の規則性が存在するといわれており、詳細な点では完全な無秩序配列とはいえないが、X線に対しても規則性はあられず、大まかには無秩序とみなしてよい。図1に、アモルファスと結晶の原子配列を模型的に示す⁴⁾。

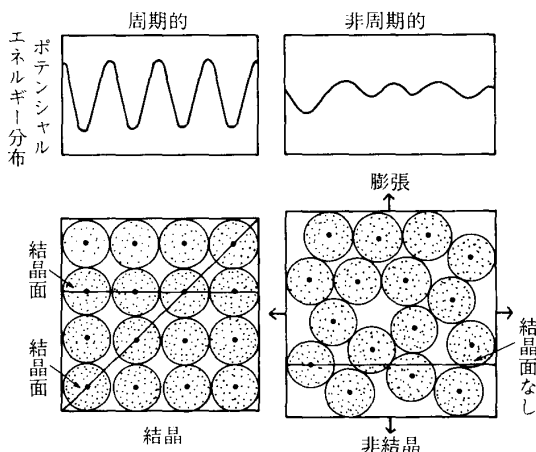


図 1 結晶とアモルファスの原子配列モデル⁴⁾

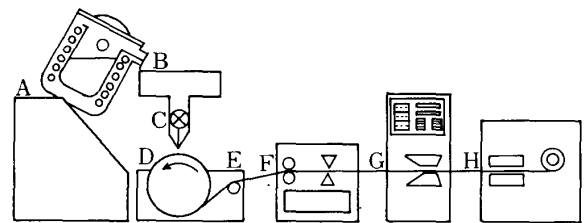
このようなアモルファスの構造は、当然のことながら結晶磁気異方性を持たない。また結晶粒界も存在しない。したがって強磁性体をアモルファス化することができれば、きわめて磁化しやすい材料の得られることが期待される。

さらにアモルファスのどのような切断面においても、周期的なポテンシャル分布とはならない。このため結晶に比較して電気抵抗率が高くなる。またアモルファス磁性材料の製造上の制約から、その形状がきわめて薄いリボン状となつているために、うず電流損は非常に小さい。

このようにアモルファスの構造上の特徴がもたらす結果として、アモルファス磁性材料はすぐれた軟磁気特性を示す。すなわち、透磁率が高く、鉄損がきわめて少ないという特性が得られる^{4)~6)}。

GE社のLUBORSKYらはアモルファス磁性合金の低鉄損特性に着目し、変圧器鉄心としてすぐれた材料であることを指摘した⁷⁾⁸⁾。アモルファス磁性合金の鉄損は、現用材料である方向性けい素鋼に比べてきわめて少ないことから、これを鉄心材料に用いるメリットを試算し、アモルファス磁性材料の有用性を強調した。

電力用変圧器の鉄心には、幅の広い鋼帯を多量に必要とする。アモルファス鉄心変圧器は、Allied社が鉄系のアモルファス合金を市販したことによつて可能となり、日米の多くの変圧器メーカーが試作を行うこととなつた。図2に、Allied社によるアモルファスリボン製造装置の構成を示す⁴⁾。これによりアモルファス磁性材



A 原料配合・溶解 B 溶湯投入 C フォード制御 D 铸造
E 冷却固化 F 肉厚測定 G リボンフィーダー H 巻上げスプール

図 2 Allied社のアモルファスリボン製造装置の構成⁴⁾

表 2 アモルファス磁性材料とけい素鋼の特性比較⁹⁾

材 料		Metglas 2605SC	Metglas 2605S2	けい素鋼 G-6H
組 成		Fe-B-Si-C	Fe-B-Si	Fe-Si
磁気的 特性 (25°C)	飽和磁束密度 (T)	1.61	1.56	2.03
	鉄損 W14/60	0.32	0.22	0.88
	励磁 VA 1.4T, 60Hz	0.37	0.28	0.95
物理的 機械的 特性	比重	7.32	7.18	7.65
	占積率 (%)	>75	>75	>94
	結晶化温度 (°C)	480	550	—
	キュリー点 (°C)	370	415	745
	硬さ HV	1050	900	170
	電気抵抗率 (μΩ·cm)	125	130	45

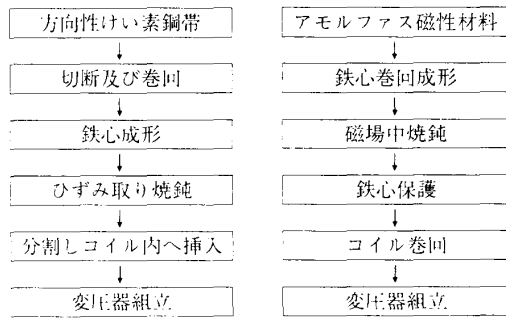


図3 けい素鋼及びアモルファス磁性材料を用いた変圧器の代表的製造手順

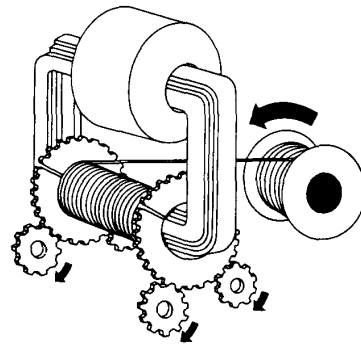


図4 鉄心へのコイル巻回方法¹⁰⁾

料が連続的に製造できるようになった。

表2に、Allied社製アモルファス磁性材料 Metglas 2605 SC 及び 2605 S-2 の特性を、方向性けい素鋼と比較して示す⁹⁾。アモルファス磁性材料の最大の、そして唯一ともいえる長所は、鉄損が非常に少ないことであり、方向性けい素鋼の 1/3~1/4 となっている。

3. アモルファス鉄心変圧器の試作と実用化

3.1 変圧器の製造工程

アモルファス磁性材料はその厚さがけい素鋼の約 1/10 しかなく、また非常に硬いために、従来の鉄心のように材料の鋼帯を1枚ずつ切断して構成することは困難である。そのためアモルファス鉄心変圧器は従来とは異なった手順で製造される。配電用変圧器の製造手順の例を、図3に示す。

アモルファス磁性材料を用いる場合、巻回により鉄心を成形した後に熱処理を行う。アモルファス磁性材料は溶湯からの急冷により製造されるが、このときの残留応力と巻回による応力は、この熱処理で除去される。またこの処理を磁場中で行うことで、鉄損の少ない、そして騒音の低い鉄心を得ることができる。熱処理後のアモルファス鉄心はもろくなり、またひずみを与えられると特性がいちじるしく劣化することから、鉄心の保護が行われる。

アモルファス磁性材料の切断工程を無くしたとき、鉄心は接合部を持たない。そのため、あらかじめ単独で製作しておいたコイルに鉄心を挿入する方法を採用できず、まず鉄心を完成させ、次にこの鉄心にコイルを巻回する方法がとられる。コイル巻回方法の例を図4に示す¹⁰⁾。

3.2 試作変圧器の特性

アモルファス磁性材料が市販されるようになって、多くのプロトタイプ変圧器の試作が行われた。代表的なものを表3に示す¹¹⁾。この後にも最大 300 kVA までの変圧器が試作され、また積鉄心方式により 500 kVA までの変圧器が試作されている。

表3 試作アモルファス鉄心変圧器の特性¹¹⁾

製造者	容量 (kVA)	相	鉄心損失 (W) (%)	コイル損失 (W) (%)	騒音 dB(A) (%)
ダイヘン	10	1	11.8 30	172 101	33.6 97
ダイヘン	10	1	8.6 22	173 102	35.3 102
高岳	20	1	18.9 24	348 94	— —
GE	25	1	28.0 33	— —	40.0 87
ダイヘン	30	1	30.0 32	390 107	38.5 100
三菱	35	3	49.0 21	980 107	58.0 97
Allied*	50	1	28.0 20	422 50	— —
東芝	100	3	85.0 30	1780 110	— —

* トロイダルコア

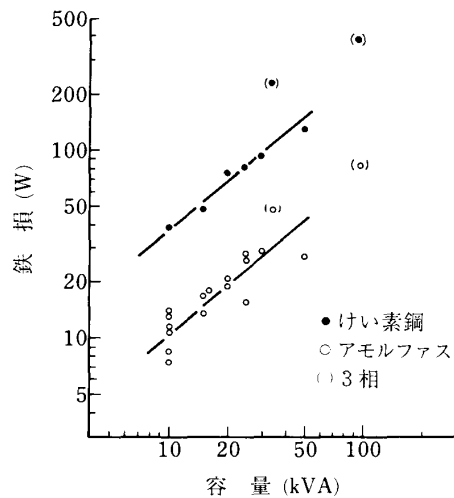
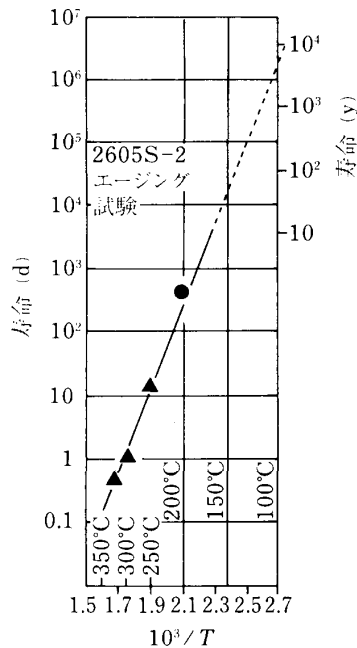


図5 アモルファス鉄心変圧器とけい素鋼鉄心変圧器の鉄損の比較

試作変圧器の鉄損を、従来形の変圧器と比較して図5に示す。試作変圧器の鉄損は従来形の 1/3~1/4 であり、材料特性の向上がそのまま変圧器特性に生かされている。これらの試作結果によつて、アモルファス鉄心変圧器の低鉄損特性が確認された。

3.3 アモルファス鉄心の信頼性

アモルファス磁性材料を電力用変圧器に用いるにあたり、確認が必要な項目は、長期使用に対する安定性である。アモルファスは準安定状態にあり、温度が高くなれば活性化エネルギーを超えて原子が移動し、結晶化し



▲は A. DATTA らによる¹³⁾
鉄損が 25% 増加するまでの時間を示す

図 6 アモルファスコアのエージング試験結果¹²⁾

てそのすぐれた特性は失われてしまう。しかし変圧器鉄心用として開発され市販されている Fe-Si-B あるいは Fe-Si-B-C 系合金はかなり高い結晶化温度を有しており、実用上結晶化は考えなくてよい。

長期安定性に関するもう一つの確認事項は、エージングによる磁気特性劣化である。エージング加速試験結果の一例を図 6 に示す¹²⁾¹³⁾。エージングにより鉄損特性は劣化するが、このデータを延長すれば、通常の変圧器の温度条件では数百年経過したとしても鉄損増加は少ない。データを延長することで誤差が出るとしても、実用上問題が生じることはないであろう。

米国においては、25 kVA 配電用試作変圧器について、電力会社 25 社の協力のもとにフィールドテストが行われた¹⁴⁾。2 年間の連続使用に対し、磁気特性は変化していないと判定されている。

3.4 アモルファス鉄心変圧器の実用化

1982 年 EPRI (Electric Power Research Institute) は、3 年間に 600 万 \$ をかけてアモルファス鉄心変圧器の量産技術の確立に着手し、契約した GE 社は、25 kVA 変圧器 1000 台の設計・製造を行なった¹⁵⁾。鉄心の構造は再度見直しが行われてジョイント付鉄心が採用された。新技術の採用によつて、価格的にけい素鋼鉄心変圧器と大差ないものを目ざしている。

アモルファス鉄心変圧器の実用化は、GE 社だけでなく、Westinghouse 社、McGraw-Edison 社、Kuhlman 社などにおいても進められて、すでに市販が開始された。

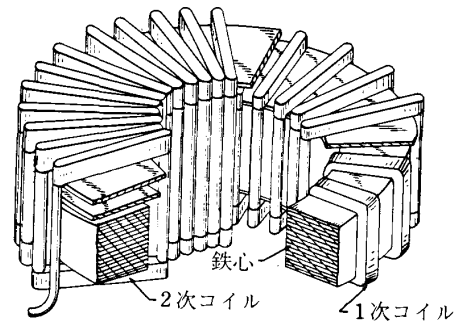


図 7 円形巻鉄心（トロイダルコア）変圧器¹⁶⁾

米国の場合我が国とは事情が異なつて、非常に多くの電力会社があり事業内容にも差がある。その中で、経済計算の結果有利と判定した電力会社、すなわち損失評価額の高いユーザーはアモルファス鉄心変圧器の採用に踏み切った。全体に占める割合はまだまだ小さいものの、GE 社だけでもすでに 1 万台を超えるアモルファス鉄心変圧器を供給したと見られる。

一方我が国においても多くの変圧器メーカーが単独で、あるいは電力会社と共同で、アモルファス鉄心変圧器の試作と実用化研究を行い、その低鉄損特性と信頼性の確認がなされている。アモルファス鉄心変圧器が低価格となり、一方エネルギー価格が更に上昇して経済上のメリットが認められれば、いつでも採用され得る段階にあるといえよう。

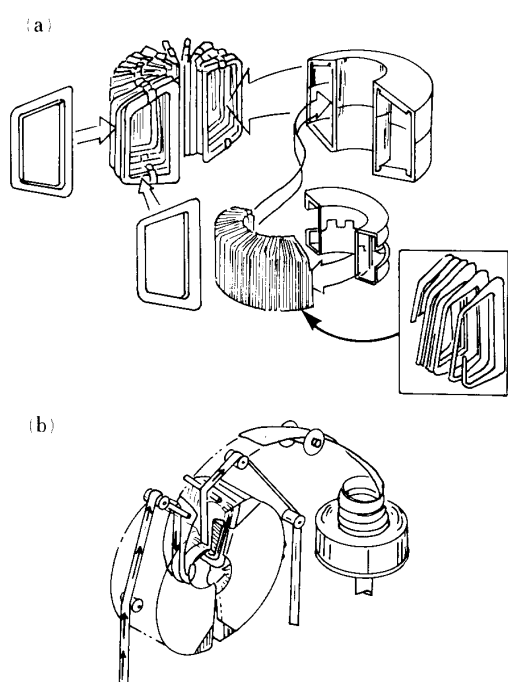
3.5 新構造変圧器

アモルファス磁性材料の特性を最大に生かそうという研究の中から、新しい構造を持つ変圧器が開発された。アモルファス鉄心の磁気特性から見た場合、最適鉄心形状はジョイント部を持たない円形巻鉄心（トロイダルコア）である。特性を第一に考えて円形巻鉄心を採用した場合、変圧器の構造と製造方法は従来と大きく変わったものとなる。

図 7 は、Allied 社の試作した円形巻鉄心変圧器¹⁶⁾、鉄心を熱処理した後、その周囲にコイルを組み立てて製造される。

図 8 は、Kuhlman 社のトロフォームとよばれる変圧器である¹⁰⁾。あらかじめ組み立てられたコイルの中に、熱処理された円形巻鉄心をいつたんほどきながら挿入し、再度円形に構成するものである。

図 9 は、カナダの IREQ (Institut de recherche d'Hydro-Quebec) において試作された変圧器であり¹⁷⁾、従来形の試作変圧器（例えば図 4）とは鉄心とコイルの関係が逆の、外鉄心構造になつている。モールドされたコイルの直線部にアモルファス鉄心を巻回することによつて変圧器が完成する。このような円形巻鉄心構造のアモルファス鉄心変圧器は、一段とすぐれた鉄損特性を示



(a) コイルの組立 (b) 鉄心挿入方法

図 8 Kuhlman 社の Toroform 形変圧器¹⁰⁾

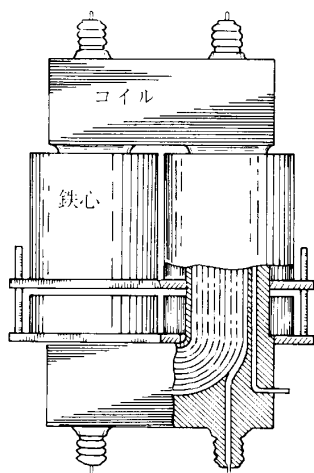


図 9 円形巻鉄心による外鉄形変圧器¹⁷⁾

している。

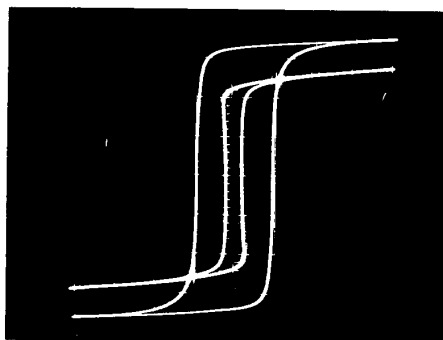
4. アモルファスけい素鋼か

4.1 経済性の検討

図 10 は、けい素鋼鉄心による 25 kVA 従来形変圧器と、同容量のアモルファス鉄心変圧器の経済性比較の一例であり、ここで損失評価額は鉄損について 5 \$/W、銅損について 1 \$/W として計算している¹⁵⁾。アモルファス鉄心変圧器は低損失のため、損失の換算値については 185 \$ だけ差があつて、この分だけ購入価格が高くと

	鉄心	
	従来形	アモルファス
損失の価格		
無負荷損	48 W	18 W
	× \$5/W	× \$5/W
	\$ 240	\$ 90
負荷損	284 W	249 W
	× \$1/W	× \$1/W
	\$ 284	\$ 249
合計	\$ 524	\$ 339
購入価格	\$ 510	\$ 695
総合価格	\$1 034	\$1 034

図 10 変圧器損失評価の一例



$f=50 \text{ Hz}$ $H_{\max}=100 \text{ A/m}$
アモルファス磁性材料は鉄損（ループのかこむ面積に比例）は少ないが、磁束密度（y 軸）は低い

図 11 方向性けい素鋼 G-6H とアモルファス磁性材料 2605S2 のヒステリシスループ

経済的に等価であるとみなされる。もし損失がより高く評価されればアモルファス鉄心変圧器が有利となり、逆の場合には従来形変圧器が有利となる。

アモルファス鉄心変圧器の全体に占める割合はまだわずかである。米国における鉄損の評価額は平均すれば約 3 \$/W であつて、アモルファス鉄心変圧器がそのシェアを伸ばすためには、更に安価に製造することが必要とされている。

4.2 アモルファスとけい素鋼の長所と短所

図 11 に、方向性けい素鋼とアモルファス磁性材料のヒステリシス特性を比較して示す。先に述べたようにアモルファス磁性材料は鉄損がきわめて少ない。しかし長所はこの 1 点のみであつて、他の特性についてはけい素鋼がすぐれている。とくにアモルファス磁性材料は飽和磁束密度の低いのが弱点であり、鉄心は磁束密度を低く設計しなければならない。けい素鋼鉄心変圧器においても鉄損の評価額が高い場合には、磁束密度を低く設計し

て鉄損低減をはかるが、アモルファス鉄心の場合には更に低磁束密度で設計される。その結果として鉄心寸法は大きくなり、またこれにともなつてコイル重量も大となる。したがつてたとえアモルファスの材料価格がけい素鋼と同じにまで低下したとしても、アモルファス鉄心変圧器は高価にならざるを得ない。

アモルファス鉄心変圧器が採用されるためには、鉄損の評価額が高いことが条件となる。柱上変圧器などの配電用変圧器は時間によつて負荷の量が変わり、とくに夜間の電力はわずかである。すなわち 100% の負荷で運転される時間は短く平均の負荷率は低い。このような使用条件では銅損は少ないが鉄損は常に一定量が発生していることから、鉄損を低減することは経済的効果が大きい。したがつて銅損の評価額は低い鉄損の評価額は高い。アモルファス鉄心変圧器に最適の用途といえる。

一方逆に、負荷が常に 100% に近い用途の変圧器では、鉄損だけを下げることが無意味であつて、数値的に大きな銅損の低減が重視される。この場合アモルファス磁性材料を採用するメリットは無く、けい素鋼が有利である。

4.3 けい素鋼の巻きかえし

アモルファス磁性材料のかくれた功績は、けい素鋼に大きなインパクトを与え、その特性改善をうながしたことであろう。具体的な目標値を与えられた方向性けい素鋼は、短時間にいちじるしい特性向上を達成した。

その手段としては、高配向性材料の薄板化と磁区の細分化である¹⁸⁾¹⁹⁾。従来、板厚を薄くすることは、うず電流損を小さくする一方でヒステリシス損失が増加することから、あまり薄くしても効果がなかつたが、最近の技術の進歩はより薄い材料を可能とした。さらにレーザービーム等を用いて鋼帯表面にケガキを行うことによつて磁区が細分化された結果、異常損失の低減がなされているが、最近は熱処理に耐える材料も開発されて²⁰⁾、巻鉄心への応用も可能となつた。

このような方向性けい素鋼の改良の結果、アモルファス鉄心との鉄損の差はかなり縮められてきている。

5. む す び

アモルファス磁性材料は配電用変圧器など鉄損の重視される用途に適した鉄心材料であり、一方けい素鋼は、負荷率が高く銅損の重視される用途に適している。材料の選択は、価格と損失評価額によつてどちらか経済的な方が採用されることになる。長期的に見ればエネルギー価格は上昇し、この点からはアモルファスの採用が増すことが予想されるが、一方でけい素鋼の特性も向上しつつある。したがつてアモルファス磁性材料とけい素鋼とは、どちらかが他方を駆逐することはなく、将来も用途を分けて競合を続けていくことにならう。

文 献

- 1) H. W. BEATY: *Electrical World*, Feb. 1 (1978), p. 55
- 2) 神尾啓吉郎: *電気技術者* (1985) 11, p. 17
- 3) 田中一郎, 内藤裕宣, 金子英男, 細井智行: *富士時報*, 56 (1983), p. 546
- 4) 向井 肇: *熱処理*, 22 (1982), p. 360
- 5) 牧野好美: *固体物理*, 15 (1980), p. 519
- 6) 藤森啓安: *固体物理*, 20 (1985), p. 616
- 7) F. E. LUBORSKY: *J. Appl. Phys.*, 49 (1978), p. 1769
- 8) F. E. LUBORSKY, J. J. BECKER, F. G. FRISCHMANN and L. A. JOHNSON: *IEEE Trans. Magn.*, 14 (1978), p. 1008
- 9) 林 哲, 大村俊次: *日本電気協会第 62 回研究発表会* (1983), p. 106
- 10) G. E. FISH: *Canadian Electrical Assoc. Spring Meeting, Montreal* (1985)
- 11) G. E. FISH and C. H. SMITH: *Symp. ASM's Materials Week, Lake Buena Vista* (1986)
- 12) 川崎隆弘, 伊藤辰雄, 八木沢猛, 山田一夫: *東芝レビュー*, 41 (1986), p. 149
- 13) A. DATTA, R. J. MARTIS and S. K. DAS: *IEEE Trans. Magn.*, 18 (1982), p. 1391
- 14) D. J. BAILEY, L. A. LOWDERMILK and A. C. LEE: *J. Magn. Mater.* (1986) 54/57, p. 1618
- 15) J. DOUGLAS: *EPRI Journal* (1987) Oct./Nov., p. 23
- 16) C. H. SMITH: *IEEE Trans. Magn.*, 18 (1982), p. 1376
- 17) N. ALEXANDROV, R. SCHULTZ and R. ROBERGE: *IEEE PES Conf., Anaheim* (1986), 86 T&D 556-5
- 18) 野沢忠生, 山本孝明, 松尾征夫, 大宅良宏: *電気学会磁性材料研究会資*, MAG 78-52 (1978)
- 19) T. IUCHI, S. YAMAGUCHI, T. ICHIYAMA, M. NAKAMURA, T. ISHIMOTO and K. KUROKI: *J. Appl. Phys.*, 53 (1982), p. 2410
- 20) M. YABUMOTO, H. KOBAYASHI, T. NOZAWA, K. HIROSE and N. TAKAHASHI: *IEEE Trans. Magn.*, 23 (1987), p. 3062