

電磁鋼板の特性向上とそれにもなう変圧器特性の推移

Development of Silicon Steel Sheet and Improvement of Transformer Characteristics

佐藤 一昭*
Kazuaki Satō

1 まえがき

現在エネルギー問題は資源の涸渇、価格の上昇、地球環境への影響などさまざまな観点から論ぜられているが、これらの諸問題に対しては省エネルギーを図ることが共通の対策となる。

電気事業においては、省エネルギー対策として送配電損失の低下が常に大きなテーマとして取り上げられてきた。日本の電力輸送部門における電力損失率は昭和26年当時は20数%と高かったが、その後年々低下し昭和57年には6%弱に収束した¹⁾。これはこの期間に大容量火力発電所の建設による送電距離の短縮化、送配電電圧の高圧化、架空送電線の太線化、変電機器の大容量高効率化などの電力技術の開発、進歩が絶え間なく続けられた結果である。これらの技術開発のうちの変電機器の大容量化、高効率化には設計上の諸進歩の外に、その主要構成材料である変圧器鉄心用電磁鋼板の特性向上が大きな役割を果たしてきた。ここでは、日本における鉄心用電磁鋼板について昭和初期の熱延電磁鋼板から最近開発された磁区制御電磁鋼板までの開発経緯と特性の向上を、これらの電磁鋼板を使った当社の変圧器特性の推移とともに概説する。

ちなみに電力輸送部分の kWh 損失率6%の3分の1が変圧器で消費され¹⁾、さらにその3分の1が変圧器の全損失中の無負荷損¹⁾と仮定すると、平成2年の九電力会社総発電量は6366億 kWh であるので約42億 kWh が鉄損として消費されたことになる。この量は大体50万 kW 発電設備の1年分の発電量に相当する。

電気機器構造用の磁気特性の良好な鋼板の名称には「電気鉄板」「けい素鋼板」などもあるが、ここでは JIS G 0203 - 1984 鉄鋼用語にしたがって「電磁鋼板」を使用する。

2 熱間圧延電磁鋼板

変圧器用鉄心材料としての電磁鋼板の歴史は1900年ハドフィールド(英国)により、当時使用されていた鉄心用薄鋼板にけい素を加えると鉄損が小さくなることが発見されたことから始まる。鉄心用電磁鋼板の鉄損は小さいことが必要であるが、この鉄損は図1²⁾に示すようにヒ

ステリシス損と古典的渦電流損及び異常渦電流損に分類される。これらの各鉄損は電磁鋼板の結晶方位やけい素含有量により変化する。図2³⁾は鉄へのけい素量と電気抵抗及び飽和磁束密度との関係を示すが、けい素量に比例して飽和磁束密度は減少し電気抵抗は増加する。ハドフィールドの発見はけい素量の増加にともなって電気抵抗が増加すると古典的渦電流損が減少することに基づいている。6%まではけい素量の増加とともに電気抵抗は増加するが、一方で飽和磁束密度も減少する。また変形抵抗及び脆性が増大して圧延加工が困難になり、切断、曲げなどの冷間加工も難しくなるためけい素添加量には限界があり、例えば現在の変圧器鉄心用電磁鋼板のけい素含有量は約3%に押さえられている。

現在の電磁鋼鉄は冷間圧延材であるが、昔は全て熱間圧延材であった。日本では熱延電磁鋼板は大正13年八幡製鉄においてドイツ人技師の指導の下にけい素量の低いB級から製造が始まった。昭和4年にはよりけい素量の多いT級の製造が始まったが、当初は圧延材の熱間変形

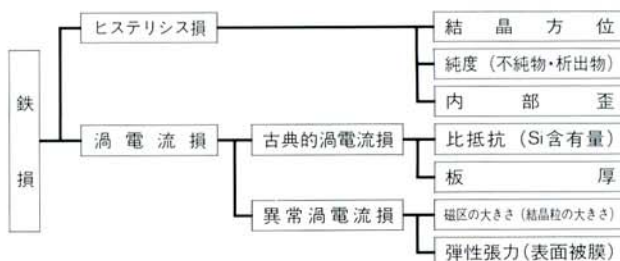


図1 / 鉄損の分類と要因²⁾

Fig. 1/Classification of core loss and its factors

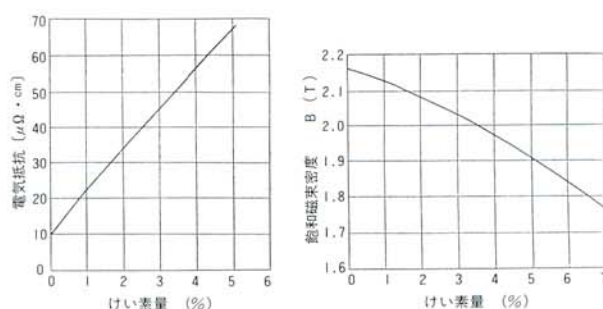


図2 / けい素量の抵抗率と飽和磁束密度におよぼす影響³⁾

Fig. 2/Effect of silicon resistivity and permeability of silicon steel

*変圧器事業部 技術部

1984	オーバーステップラップ形アモルファス変圧器製作	オーバーステップラップ形アモルファス巻鉄心完成	
1985	柱上変圧器ワニスレス化完了 柱上変圧器の低損失化が完了	柱上変圧器全機種ITC形巻鉄心に 変更完了	電着塗装採用 柱上変圧器全機種の円形タンク 化完了
1986	社名変更 愛知電機株式会社		
1990	三相共用変圧器完成		酸化亜鉛避雷器素子付高圧カッ トアウト付属, 無停電工事用端子付一次ブッシ ング付
1991	アモルファス変圧器量産開始		一部機種に粉体塗装採用
1992	一体形変圧器完成		酸化亜鉛避雷器素子付高圧カッ トアウト付属 無停電工事用端子付一次ブッシ ング

付表3 当社の柱上変圧器の変遷

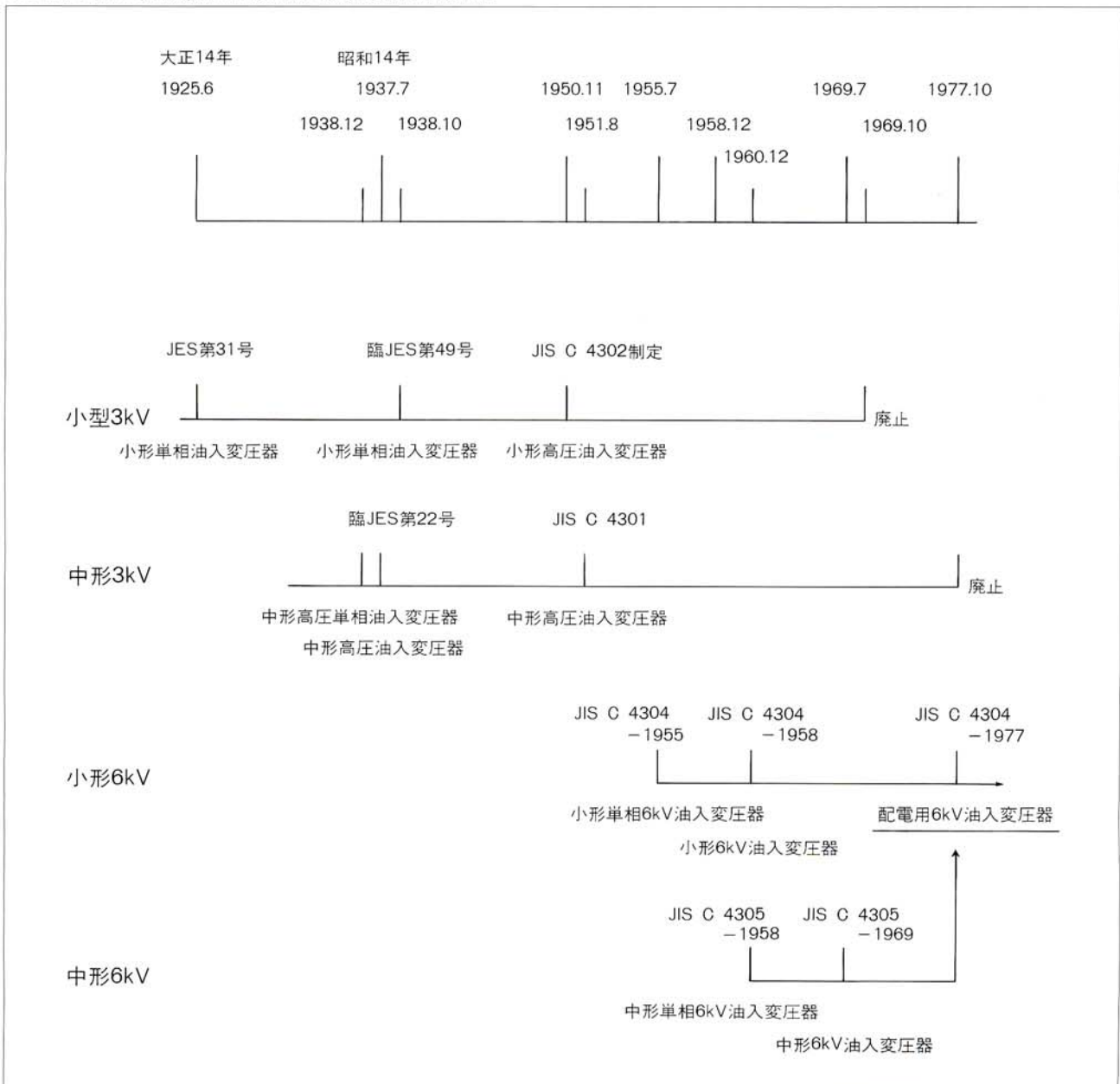
Sub-Tab. 3/History of pole mounted transformer in Aichi Electric Co.,Ltd.

1942	<ul style="list-style-type: none"> 当社創立 (株式会社愛知電機工作所) 		
変圧器種類の変遷		鉄 心	巻線, 絶縁処理, その他
草創期			
1945 1947	<ul style="list-style-type: none"> 昭和20年 変圧器製造免許を得る 一次3kV20kVA製造 	<ul style="list-style-type: none"> 短冊積鉄心 熱間圧延けい素鋼帯 	<ul style="list-style-type: none"> 一次綿巻銅線, 二次綿巻銅線 ワニス含浸, 鉄板製タンク 一次, 二次端子は套管に口出線を通しコンパウンド充填密封 鋳物製タンク採用
1950 1952	<ul style="list-style-type: none"> 一次3kV5,10,15kVA製造 6kV油入三相柱上変圧器製造納入 柱上変圧器月産2000台達成 6kV,3kV共用単相柱上変圧器の製作 		<ul style="list-style-type: none"> 鉄板製タンク採用試行 コールド焼付塗装 一部機種でPVF電線採用
1955 1955	<ul style="list-style-type: none"> 小形6kV油入変圧器の規格制定 JIS C 4304 		
1956~1957	<ul style="list-style-type: none"> 6kV,3kV共用単相柱上変圧器の本格生産開始 		<ul style="list-style-type: none"> 鉄板製タンク全面採用 一次スタッド形ブッシング採用 二次スタッド形リード付ブッシング採用
巻鉄心の時代			
1957	<ul style="list-style-type: none"> Cカット巻鉄心外鉄変圧器製造 	<ul style="list-style-type: none"> Cカット巻鉄心, 外鉄形 冷間圧延方向性けい素鋼帯採用 	
1958	<ul style="list-style-type: none"> ノーカット巻鉄心外鉄形変圧器製造 (Aichi-A形) 	<ul style="list-style-type: none"> ノーカット巻鉄心, 外鉄形 	
1959	<ul style="list-style-type: none"> ノーカット巻鉄心内鉄形変圧器製造 (Aichi-A2形) 配電電圧の6kV昇圧実施要領制定 	<ul style="list-style-type: none"> ノーカット巻鉄心, 内鉄形 	
1960			<ul style="list-style-type: none"> 二次クランプ形ブッシングの採用
1961			<ul style="list-style-type: none"> 全機種にPVF電線採用
1966			<ul style="list-style-type: none"> 紙巻平角銅線採用
1967		<ul style="list-style-type: none"> 2.5TC巻鉄心採用 	<ul style="list-style-type: none"> アルミ線, アルミ条 (産業用変圧器) 接着絶縁紙採用, ワニス含浸
1970	<ul style="list-style-type: none"> 複合変圧器完成 		
1971	<ul style="list-style-type: none"> アルミ変圧器製造 	<ul style="list-style-type: none"> 1TC巻鉄心採用 	<ul style="list-style-type: none"> ワニスレス化 (産業用変圧器)
1973		<ul style="list-style-type: none"> 高配向けい素鋼帯採用 	<ul style="list-style-type: none"> 柱上変圧器のワニスレスを開始
1979		<ul style="list-style-type: none"> 1TC巻鉄心改良形完成 	
低損失化の時代			
1980	<ul style="list-style-type: none"> 柱上変圧器の低損失化が始まる 耐雷形変圧器 		<ul style="list-style-type: none"> 酸化亜鉛避雷器素子内蔵
1981	<ul style="list-style-type: none"> ステップラップ三相巻鉄心変圧器 	<ul style="list-style-type: none"> DSL (オーバーステップラップ形) 巻鉄心完成 	
1982	<ul style="list-style-type: none"> ノーカットアモルファス巻鉄心変圧器製作 	<ul style="list-style-type: none"> アモルファス磁性材料採用 	
1983			<ul style="list-style-type: none"> 銅条を標準機種に採用

1973	米・ベトナム撤退 第1次石油危機	1973	JIS C 3213 ホルマールアルミニウム線規格制定 G6Hの製造
1975		1975	JIS C 3053 エナメル鋼線通則規格制定
1978	イラン革命 第2次石油危機	1977	JIS C 4304 「配電用6kV油入変圧器」…現行規格
1980	イラン・イラク戦争	1978	JEC 204 「変圧器」…現行規格
1985	ソ連ゴルバチョフ書記長誕生	1982	JEM1392 「配電用6kV低損失形油入変圧器の特性基準値」…現行規格 実用サイズ（4インチ幅）のアモルファス箔帯市販開始（米）
1986	チェルノブイリ原発事故	1991	機械式磁区制御形高配向性けい素鋼帯市販開始
1990	東西ドイツ統一	1992	耐熱形磁区制御形高配向性けい素鋼帯の製造開始
1991	湾岸戦争		
	ソビエト社会主義共和国連邦崩壊		
2000			

付表2 日本の油入変圧器国家規格の変遷

Sub-Tab. 2/History of Japanese industrial standard for transformer



1891	ドイツ万国電気技術博覧会兼万国電気工学者大会	1891	独・A・E・G社のドブロウオリスキー万国博覧会で三相送電実験に成功(三相誘導電動機, 三相変圧器開発(ドブロウオリスキー), 三相発電機はスイスのエリコン社開発) 東京電灯会社が, ドイツ製発電機で単相交流配電を始める(明治29年(1896) 50Hz発電機採用)
1894	日清戦争 露仏同盟	1893	三吉電機工場で三吉氏が国産変圧器を初めて製作
1896	第1回国際オリンピック大会(アテネ)	1894	芝浦製作所が気冷式変圧器の製造を開始
1900	ロ・ポポフと米・マルコーニ無線通信公開実験を個々に行う	1895	ナイアガラ水力発電所完成(二相交流発電)
1900	明治33年	1900	ハドフィールド(英) けい素添加による鉄損改善効果の発明
1902	日英同盟	1903	熱間圧延けい素鋼板製造(独)
1904	日露戦争, 工業所有権保護協会創立	1909	我が国でエナメル線製造
1905	アインシュタイン「特殊相対性理論」	1913	GE タングステンフィラメント電球完成
1912	大正元年	1919	国産鉱油(宝田石油が変圧器, 開閉器油生産)
1914	第1次世界大戦(1918まで) パナマ運河開通	1924	B級熱間圧延けい素鋼板国産化
1917	第二次ロシア革命	1926	JES 第31号「小型単相油入変圧器」決定(日本最初の変圧器規格)
1920	国際連盟発足(1945まで) コンラッド(米)無線放送開始	1929	T級電磁鋼板製造開始(国産)
1922	ソビエト社会主義共和国連邦誕生	1934	ゴス(米)方向性けい素鋼板発明 JEC 36 変圧器, 誘導電圧調整器及びリアクトル制定
1925	東京放送局が無線放送開始	1935	方向性けい素鋼帯製造(米)
1926	大正15年, 昭和元年	1941	鉱油系絶縁油の臨時日本標準規格の制定
1929	世界大恐慌	1950	国産ホルマール銅線製造開始 JCS第193号エナメル綿巻及び絹巻線規格制定
1937	BBC世界初のテレビ放送開始	1952	JIS C 3203 ホルマール銅線規格制定
1939	第2次世界大戦(1945まで)	1953	平角ホルマール銅線の製造開始 熱間圧延けい素鋼板T90 製造開始
1941	日米開戦(1945まで)	1956	JDS第241号紙巻平角銅線規格制定
1945	広島, 長崎原爆被爆 第2次世界大戦終結	1958	国産冷間圧延方向性けい素鋼帯製造開始
1948	ショックレー等トランジスタ発明	1959	配電電圧 6kV昇圧実施要領制定
1949	中華人民共和国建国	1960	耐熱絶縁紙(シアノエチル化紙)製造
1950	朝鮮戦争(1953まで)	1961	国産方向性けい素鋼帯G9製造開始
1957	ソ連人工衛星成功	1967	熱間圧延けい素鋼板の製造中止
1958	イラク革命	1968	高配向性けい素鋼帯製造
1961	ソ連人間衛星成功 ガガーリン初めて宇宙へ 特許公開制度開始	1969	JIS C 3208 二重綿巻平角銅線規格制定
1965	米・北ベトナム爆撃開始	1970	JIS C 3209 ホルマール平角銅線規格制定
1967	EC発足		
1969	米アポロ11号月面着陸		

付表1 / 変圧器に関わる世界と日本の歴史

Sub-tab. 1/History of transformer engineering and world topics

西暦	世界と日本の出来事		変圧器に関わる歴史
1800	伊能忠敬, 蝦夷地測量	1799	ボルタ (伊) 電池 (堆) を発明, 電流を発見 (このときから電気の時代が始まる)
1804	仏・ナポレオン皇帝に即位(第一帝政1814まで)		(このときから直流電気の世界が開ける)
1812	米英戦争	1819	エルステッド (デ) 電流の磁気作用の発見 (このときから電磁気の世界が開ける)
1823	米・モンロ主義宣言: 孤立主義 不干渉宣言		
1825			
1830	仏・七月革命	1831	ファラデー (英) 交流の発見, 電磁誘導則発見 ファラデーがディスクダイナモ (発電機) 発明 (このときから交流電気の世界が開ける)
1833	英・工場法制定	1834	レンツ (独) 起電力の向きを定めるレンツの法則発見
1837	英・ビクトリア女王即位		
	米・モールス電磁石式電信機発明		
1840	アヘン戦争		
1844	オランダ国王開国進言	1845	ステイト, ベトリなど実用的アーク灯開発 (ダニエル電池使用) (照明の時代が始まる)
1849	佐久間象山, 我が国最初の電信機を作る		
1850			
1854	日米, 日露和親条約締結		
1859	ダーウィン「種の起源」		
1861	米・南北戦争	1862	ホームズがダンジネス灯台 (英) のためにアーク灯用に実用的直流発電機開発 (蒸気機関原動機駆動)
1863	リンカーン奴隷開放宣言		スターポイント灯台用に交流発電機開発
1867	マルクス「資本論」出版	1864	マクスウエルの電磁波理論
1868	明治元年		
1869	東京・横浜間電信が開通	1870	グラム (仏) 実用的自励式発電機開発
	スエズ運河開通		
1872	東京・横浜間鉄道開通	1875	発電機, 電動機, 電力輸送などエネルギー変換機器の誕生を告げる博覧会
1875	ウイーン万国博覧会	1876	ポール・ヤブロチコフ (露) 電気ローソクをパリで発明 (交流でも使用)
	米・ベル電話機を発明	1878	我が国で初めてアーク灯点灯 (明治11年)
1878	国産電話機の使用開始	1879	エジソン (米) 炭素線使用真空式白熱電灯試作
		1880	エジソン実用的な白熱電灯発明
1882	独・オ・伊三国同盟		ワールブルク (独) ヒステリシス現象発見
		1882	エジソン水力発電所を作る。ロンドンで直流配電開始
			ゴラール (仏) ギブス (英) 二次発電機発明: 交流変換
		1883	東京電灯創立, 持回り発電機で点灯
			英・交流発電所設立
		1885	ハンガリーのガンツ社のツィペルノウスキー, デリー, プラティがトロイダル変圧器開発 (変圧器の始祖)
		1886	スタンレー交流配電の実験に成功。ウエスティングハウス電気会社 (米) 油入変圧器開発・交流配電を始める。
		1887	ハウゼルワンダー三相変圧器製作, ドプロウオリスキー (独) 三相交流発電機開発
1888	日本の電気学会創立 (明治21年)	1889	大阪電灯交流発電所竣工, 米国製交流発電機で我が国初の単相交流配電 (明治22年) 始める (明治30年 (1897) に60Hz発電機採用)
1889	大日本帝国憲法発布		
1890	第1回帝国議会		

当社は既に述べたようにアルミ条を巻線に使用するために、1971年に1TC巻鉄心を開発し電力会社向けの一部機種と産業用変圧器に採用していたが、低損失化時代に経済的に対応するには特性が不安定で改善が急務であった。そこで1979年に理論構築を行い、これに基づき1TC巻鉄心のカット方法、焼鈍方法を改善し、特性を大幅に改善、安定化させることに成功し、この低損失化時代に対応した。

更に1980年には、電磁鋼帯間の磁束の渡りがノーカット巻鉄心と同じくワンパスであるDSL鉄心(ダブルステップラップ鉄心で現在ではオーバーステップラップ鉄心とも呼ばれている。)を開発して産業用変圧器、電力用変圧器に順次採用している。

この時代は電線材料、絶縁材料、一次端子、二次端子については特記すべき変革はないが、電力会社の柱上変圧器も産業用変圧器と同様に接着絶縁紙を使用して全面的にワニスレス化を行った。

タンクの形状はノーカット時代の小判形から1TC時代にはその中身に適合した円形タンクに変更し、ワニスレス変圧器では、コイルの乾燥方法をワニス時代の熱気乾燥から、前述したインピーダンス加熱真空乾燥方式に変更した。

塗装については、前述したように1985年に下塗りにエポキシ系塗料を使ったカチオン電着塗装を採用し、また

1991年には柱上変圧器の一部機種に限ってはありますが、上塗りに業界初の粉体塗装を採用し防錆面での新境地を開いている。

7 あとがき

簡単に主として当社の柱上変圧器の歴史を振り返って見たが、付表3の年表に示すように最近でも、酸化亜鉛形避雷器素子を内蔵した耐雷形変圧器(東京電力殿仕様、1985年)、多機能形(無停電工事対応、酸化亜鉛形避雷器素子付)複合変圧器である三相共用変圧器(中部電力殿仕様、1990年)、一体形変圧器(九州電力殿仕様、1992年)等今後の柱上変圧器の方向性を示すような柱上変圧器が開発されている。

また、1991年からは無負荷損失が極めて小さいアモルファス鉄心変圧器が、アメリカに続いて日本でも試行段階に入っており、更に1991年にはけい素鋼帯で焼き鈍しに耐える低無負荷損失の磁区制御形高配向性けい素鋼帯が日本で市販され、これの柱上変圧器への採用の時代も近づいている。

我々が製造し、ユーザに使っていただいている柱上変圧器は過去我々の先輩達が辛苦の末現在の製品に仕上げてきたが、今も変革の嵐の最中にあり日々完成度を高めるために多くの関係技術者が努力しているのが現況である。



草創期の変圧器例



巻鉄心時代の変圧器例



低損失時代の変圧器例

図1 / 各時代の柱上変圧器

Fig. 1 / Picture of pole mounted transformer of each era

4年から、川崎重工業では昭和7年から製造が開始されたが、当初製造できたのは鉄損の高いものであり、熱延電磁鋼板のなかで最も鉄損の低いT90は戦後の昭和28年、米国アームコ社と技術提携を行った八幡製鉄で製造が開始された。T級熱延電磁鋼板は、T90～T155にW10/50の鉄損値0.90～1.55W/kgでランク分けされていたが、これらを造り分けるための製造管理は成分、圧延温度、焼鈍温度などを目安に行われた。しかし成分、圧延温度などのバラツキが大きいために目的の特性が常に安定して得られるとは限らなかったため、実際的には製品の特性を測定してランク分けされていた。

当社の柱上変圧器の製造は昭和22年8月に月産50台で始まったが、その後昭和23年には1～30kVA全機種について新たに設計を行うと同時に、人員、設備等を整備して柱上変圧器製造の基礎を固め月産約2000台に達するに至った。この期間に使われた熱延電磁鋼板はT級であったが、製造開始初期は戦後の物資不足期であり、苦勞して入手した電磁鋼板の特性はバラツキが大きい材料の特性に合わせて設計を変更して変圧器の特性を揃えるという面倒な操作を行った。

熱延電磁鋼板の名称は初期はJIS C 2501-1955「けい素鋼板」であったが、その後冷延材が出てからはJIS C 2501-1961「熱間圧延けい素鋼板」となり、その種類を表す記号も例えばBはS23F、T145はS14F、T90はS09Fに変わった。

表2は10,20,30kVA柱上変圧器について、2章以後で説明している電磁鋼板種類別に仕様と特性(規格値)を比較したものである。昭和27年当時の熱延電磁鋼板を使ったものの重量や無負荷損は現在の高配向方向性電磁鋼板を使ったものに比べて大幅に大きく、重量は約2倍、無負荷損は2倍以上であった。

表3は1000kVA変圧器について表2と同様に比較したもので、昭和34～40年当時の熱延電磁鋼板を使ったものは現在の方向性電磁鋼板を使ったものに比べ重量は約2倍、無負荷損は約2.6倍で大きかった。

以上のように、昭和40年頃までの変圧器の重量や無負荷損が現在のものに比べて大きかった一番大きい理由は、その当時の鉄心用電磁鋼板の特性が現在のものに比べて大幅に劣ったものであったためである。

3 無方向性冷間圧延電磁鋼板

無方向性電磁鋼板は以前は熱間圧延で製造されていたが、現在は全て冷間圧延で製造されている。これは昭和33年にゼンチマー冷間圧延機が八幡製鉄所に導入されてけい素量の多いものの冷間圧延ができるようになったためである。

冷延に置き換った主な理由は冷延材は熱延材に比べて

鉄損が小さく、また表面性状、形状、板厚精度が格段に優れ占積率が良く、更に切板からコイルになって製造側と使用側の両方の作業能率が向上するためである。昭和31年にまずけい素量の少ない冷延無方向性電磁鋼板ハイライトコアが八幡製鉄で製造され始め、変圧器鉄心用としても使用できるけい素量が多く鉄損の比較的小さいS14、S12は昭和36年に製造され始めた。このために熱延電磁鋼板は昭和42年に製造が中止された。

無方向性電磁鋼板は現在モータなどの回転機器に大量に使われており、その規格は鉄損の小さいS9から大きいS60までである。この鉄損の制御はけい素や不純物の成分量、結晶粒径を変えるための冷延回数と連続焼鈍条件などにより行われている。

無方向性電磁鋼板のうち鉄損の小さいS14以上のものは、方向性電磁鋼板が普及した昭和36年以後も一部の小型積鉄心変圧器に使用された。表3に示すように冷延無方向性を使ったものは熱延に比べて重量は10～30%軽くなり、無負荷損は20～30%小さくなった。この改善理由は変圧器の設計法及び製造法の進歩があった外に、占積率の良い冷延無方向が使われたためである。

しかし無方向性電磁鋼板は結晶粒の方向が後述する方向性電磁鋼板のように揃っておらずランダムなため、鋼板方向による磁性の変化は小さいが鉄損は方向性電磁鋼板より大幅に劣る。

4 方向性電磁鋼板

常温における α 鉄の結晶構造は体心立方格子(図3)であるが、その結晶方向により磁化され易さが異なり〔100〕方向が最も磁化され易く(磁化容易方向)、〔111〕方向が最も磁化され難い(図4)。この〔100〕方向が最も磁化され易いことは、大正15年に東北大学の本多・茅両博士により鉄の単結晶を用いて発見された。

鋼板は多数の単結晶の集まったものであるが、圧延後焼鈍された電磁鋼板では一般的にはその結晶方向は無秩

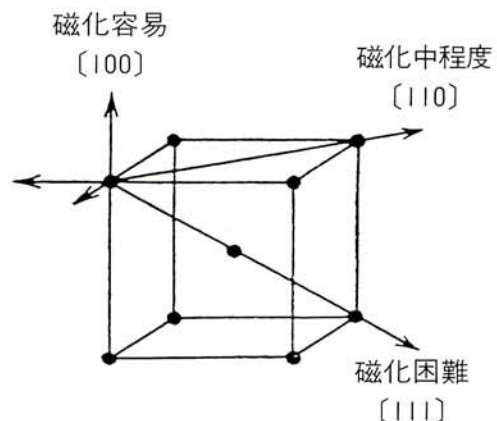


図3/鉄の結晶方位

Fig. 3/Grain arrangement of iron

序に配列して、鋼板のある特定の方向が磁化され易いということはない。これが前述の無方向性電磁鋼板である。一方、適当な成分の熱延鋼板を中間厚まで冷間圧延したものを焼鈍後さらに最終板厚まで冷間圧延、最終仕上焼鈍を行うと、圧延方向に磁化され易い〔100〕方向が揃った結晶の集まった電磁鋼板が得られる。この圧延方向に平行な〔100〕の結晶方向をゴス方位といい、稜の部分が圧延面に接しているため Cube-on-Edge の結晶組織という。このような結晶組織を持つものを方向性電磁鋼板と呼ぶ。その製造方法は昭和9年ゴス（米国）により発明されたもので2段冷延法と呼ばれる。

図5⁽⁶⁾は方向性電磁鋼板の結晶配置概念図を、図6⁽⁷⁾は圧延方向を0°としたときの鉄損の方向性を示す。方向性電磁鋼板の鉄損はそれまでの無方向性電磁鋼板に比べて大幅に小さくなったので、その出現は変圧器に無負荷損の大幅減少、高磁束密度設計による小型化、大容量化などの変革をもたらした。

日本における方向性電磁鋼板の製造研究は戦時中に始まり、昭和29年頃には質、量ともに十分とはいえないが一応使用できるものが出荷され始めた。その後昭和33年アームコ社と技術提携した八幡製鉄でオリентコアの商品名で製造が始まり、質、量ともある程度安定して供給されるようになった。

方向性電磁鋼板の製造工程は転炉によって溶解された鋼を連続鋳造してスラブにし、これを高温加熱後連続熱間圧延してコイルに巻取る。この熱延コイルを焼鈍酸洗後中間板厚まで冷間圧延し、これを連続焼鈍軟化してから再び冷間圧延して成品厚さとする。これを連続脱炭焼鈍してから高温長時間の仕上焼鈍をする。最後に平坦化連続焼鈍後、表面に無機系の絶縁皮膜をコーティングし

て成品とする。

良好な特性を持った方向性電磁鋼板を製造するための最も重要なポイントは、高温長時間の仕上焼鈍において方向性のすぐれた2次再結晶粒を成長させることである。このために重要な働きを示すのが最終の仕上焼鈍に際してインヒターとして1次再結晶粒の成長を抑制する鋼板中に微細に析出する MnS である。この MnS を熱間圧延前に高温加熱してスラブ中に完全に固溶させ、熱間圧延後に微細に析出させることが後工程の冷延、焼鈍において1次再結晶粒の成長を抑制するためのインヒターとして働かせるために必要である。この MnS の完全固溶とその後の微細析出には、高温加熱と高速圧延による高温仕上圧延が可能な連続ラインを必要とするが、八幡製鉄で昭和11年に着工した戸畑第1ストリップではこの要求を満足できなかった。戦後の昭和33年に稼働した戸畑

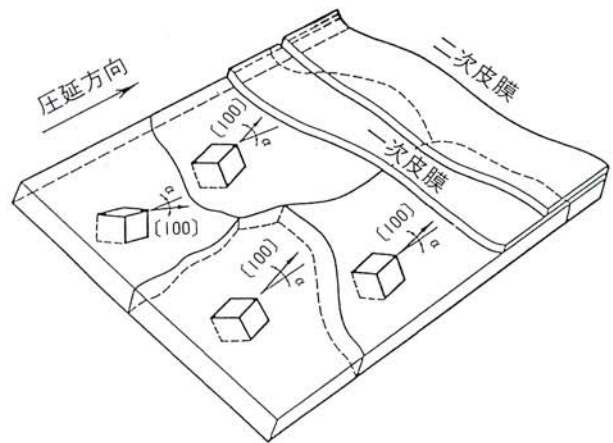


図5/方向性電磁鋼板の結晶方位⁽⁶⁾

Fig. 5/Grain arrangement of grain-oriented silicon steel sheet

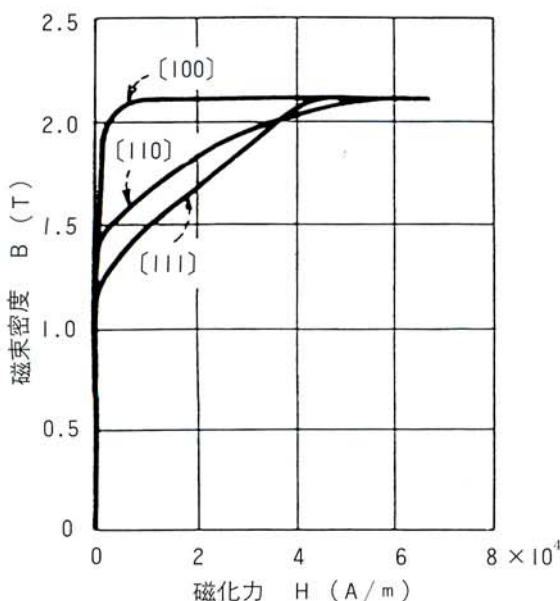


図4/鉄単結晶の主な結晶方位と磁化曲線⁽⁵⁾

Fig. 4/Principal grain arrangements and their magnetization curves of single iron

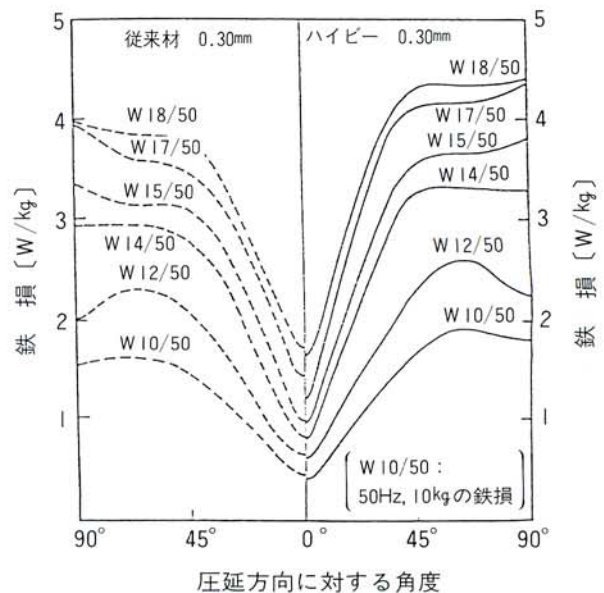


図6/方向性電磁鋼板の磁気特性の圧延方向角度依存性⁽⁷⁾

Fig. 6/Angle dependence of magnetic characteristics of grain-oriented silicon steel sheet

第2ストリップで初めて方向性電磁鋼板用の熱延コイルの圧延が可能となった。また変形抵抗の大きい電磁鋼板を0.35mm以下に能率的に冷間圧延できるようになったのは前述のようにゼンヂマー冷間圧延機が昭和33年に導入されてからである。また昭和30年代後半は鉄鋼業界に大型高炉、転炉が導入され始めた時期であり、それまでのけい素鋼の製造法であるスクラップを主原料とした平炉又は電気炉製鋼法に変わって、この新しい製鉄—製鋼—貫プロセスにより大量の溶銑を使って、不純物が少なく成分のバラツキが小さい品質の安定したけい素鋼が溶製できるようになった。更にその後開発された鋼中介在物量を下げ、成分の微量調整を可能とした真空脱ガス技術、鋼板の長手方向、幅方向の成分バラツキを小さくしたスラブ連続鑄造技術なども、方向性電磁鋼板の大量生産化と同時にその特性向上と安定化に貢献した。

方向性電磁鋼板は昭和33年にまず八幡製鉄からオリエントコアが販売され始めたが、その5年後昭和38年には特性が更に改善されたオリエントコアZ9(0.30mm板厚, W15/50:0.9W/kg)が量産化されるようになった。続いて昭和40年富士製鉄のベクトルコア、川崎製鉄のRGコアが販売されるようになって、それまで一部の電磁鋼板を国外に依存していた日本の電機業界は全て国産の材料に切り換えられた。

方向性電磁鋼板のJIS規格が定められたのは昭和39年のJIS C 2553-1964「方向性ケイ素鋼帯」が最初であり、G10~G15の0.30と0.35mmの占積率%,鉄損W/kg(W10/50, W15/50),磁束密度G(B10)の保証値が規格化された。昭和45年の改正では鉄損の最も小さいG09が追加され、同時に鉄損はW17/50で表すことになった。昭和50年の改正では鉄損の最も大きいG15が削除され磁束密度測定の磁化力の値は800A/m(B8)から1000A/m(B10)に改められた。更に昭和61年の改正では後述する高配向方向性電磁鋼板(P)及び板厚0.27mmが新たに追加されて、鋼帯の種類を表し方も呼称厚さ、記号及び鉄損保証値によることになった。また磁束密度

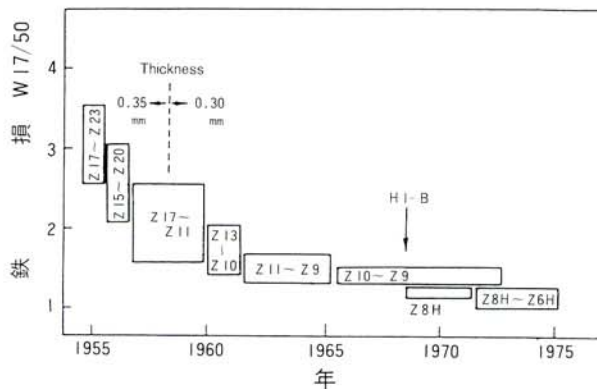


図7/方向性電磁鋼板の鉄損の変遷^{B)}
Fig. 7/Reduction of core loss of grain-oriented silicon steel

はB8に戻された。

図7^{B)}は昭和30年以後の方向性電磁鋼板のW17/50鉄損の向上を示すが、初期には3W/kg以上であったものが昭和40年代にはG09の1.3W/kgにまで減少した。このような特性の改善がなされた背景には、電磁鋼板製造研究の進展と同時に、前記の鉄鋼製造技術全般の発展があったためである。

方向性電磁鋼板の持つ圧延方向の磁性が最もすぐれているという特徴を生かすことのできる巻鉄心変圧器は、昭和11年米国に初めて出現した。当社では、昭和23年柱上変圧器の製造が軌道に乗り始めたころから巻鉄心変圧器の研究を始めたが、当時は方向性電磁鋼板の安定した品質のものが得られなかったことや、電磁鋼板の特性測定機器も無かったことなどのため途中で研究を断念せざるを得なかった⁹⁾。次いで、昭和26年研究を再開したが、この頃八幡製鉄では月産能力30トンの試験設備を造って方向性けい素鋼帯の製造試験を始めていた。当社では、この材料を使って主として巻鉄心の歪取り焼鈍法の研究を行ったが、この時も使用材料の品質が不安定であったことや、技術的経験や設備の不足もあって満足できる結果は得られなかった。この昭和26年は日本で、米国製の5kVA巻鉄心型変圧器を購入して研究を行った年である。当社ではその後も基礎的な研究を進め、昭和33年ノークット外鉄型巻鉄心変圧器の試作に成功し、Aichi A型と名付けて生産体制をととのえ各電力会社に出荷を始めた。この年は八幡製鉄とアームコ社(米国)との間に方向性電磁鋼板製造に関する技術導入が決まった年である。この技術導入により数年前から2段冷延法の特許の使用権を得て生産を始めてはいたが、品質、歩留に問題のあった点が是正され、従来よりも安定した品質の方向性電磁鋼板が供給されるようになった。

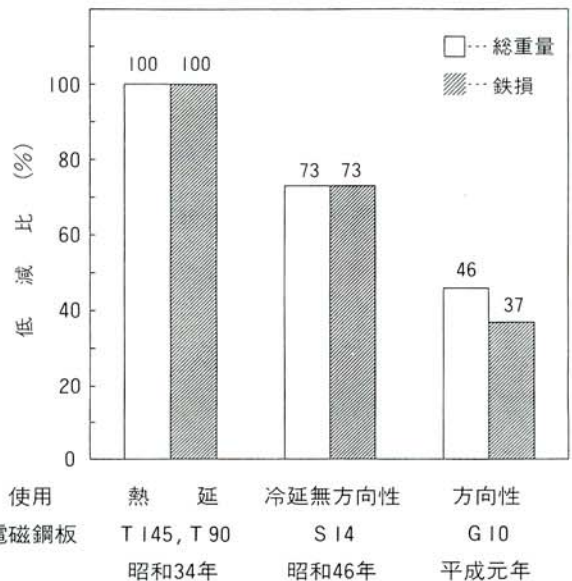


図8/1000kVA(3φ,60Hz)変圧器の総重量と鉄損の低減推移

Fig. 8/Change of total weight and core loss of 1000kVA(3φ,60Hz)transformer

表2に示す方向性電磁鋼板を使って昭和35年製造開始した柱上変圧器は、昭和33年製造開始したA型を改良したA2型であり、ノークット内鉄型巻鉄心方式が採用されていた。このA2型は熱延電磁鋼板を使って昭和27年製造開始したものに比べ、容積は9～18%、重量は29～44%、無負荷損は30%減少した。無負荷損の減少した原因は鉄心素材の鉄損が3分の1以下になり、かつ鉄心構造が方向性電磁鋼板の特徴を生かせるノークット巻鉄心へ変わったためである。容積と重量の減少は高磁束密度設計による鉄心及びコイルの大きさの減少、変圧器ケースの鋳鉄から鋼板への変更、それにとまなう油量の減少などによる。

表3に1000kVA変圧器について、無方向性電磁鋼板と方向性電磁鋼板の寸法・重量と特性を比較して示す。図8に示すように現在の方向性を使ったものは熱延無方向性を使っていたものに比べて60Hz変圧器の場合重量は46%に、無負荷損は37%に減少している。同時に寸法も大幅に小さくなっている。このように寸法と重量及び無負荷損が大幅に減少できた主な理由は鉄心用電磁鋼板の鉄損が3分の1以下になったため、及び飽和磁束密度が大きくなったために高磁束密度設計が採用できるようになったためである。

昭和30年代前半は家庭電力使用量の増加対策として全国的に配電電圧の3kVから6kV化を始めとする配電方式の近代化が進められ、小型、軽量、低鉄損化した巻鉄心型柱上変圧器が大量に使用され始めた時期である。丁度この時期にタイミングよくAichi A型の量産体制をととのえることができたことが、現在の当社の柱上変圧器メーカーとしての地歩を築くことのできたきっかけとなった。このような時期にタイミングよく巻鉄心型柱上変圧器を量産できた理由としては、それまでの社内における巻鉄心変圧器製造法の研究、その研究成果を生かした経営的判断があったことは勿論であるが、同時に当時の日本の鉄鋼製造技術の発展を背景として、良質の方向性電磁鋼板が安定して供給されるようになったことも重要である。

5 高配向方向性電磁鋼板

方向性電磁鋼板は日本においては昭和33年から本格的に製造され始めた。その特性はその後の鉄鋼業における技術開発を背景として改良研究が進められた結果順次向上し、昭和38年には八幡製鉄でZ9（0.3mm厚、W15/50：0.9W/kg）の量産が可能になった。その後もその

特性値向上が種々計られた結果、バラツキが小さくなって平均値は向上したが、絶対値はこれ以上改善の余地は無いと考えられる状態にまで達した。

この状態に変化を与えたのが、昭和43年に八幡製鉄が製造を開始した高配向方向性電磁鋼板（商品名：オリエントコアハイビー、ZH）である。ハイビーの製造法の特徴はAℓNをインヒビターとする一回冷延法である点で前述の方向性電磁鋼板のMnSをインヒビターとする2回冷延法に比べて冷延とその後の焼鈍回数が1回少ない。

表4はハイビー（高配向方向性電磁鋼板）とオリエントコア（方向性電磁鋼板）の鉄損と磁束密度を比較したもので、各板厚のハイビーの代表的な特性値はオリエントコアに比べて鉄損は16～19%減少し、磁束密度は4%増大する。このようにハイビーの鉄損と磁束密度が同時に向上する理由は、磁化容易軸の〔100〕の方位がより揃った結晶組織になっているためである。オリエントコアの〔100〕方位の圧延方向への集積度は10°以内が75%、平均7°であるのに対し、ハイビーでは10°以内が100%、平均約3°であり⁽⁸⁾ハイビーの方向性がすぐれていることが分る。このように方向性のよく揃ったものを高配向方向性電磁鋼板と呼ぶ。変圧器の騒音を起こす原因の一つである電磁鋼板の磁歪は方向性の優れたものほど小さい。したがって高配向方向性電磁鋼板を使用した変圧器は無負荷損が小さくなると同時に騒音も小さくなると考えられる。

国内では新日鉄の外に川崎製鉄が昭和49年頃から高配向方向性電磁鋼板RGHを販売し始めた。その製造方法は初期はMnSe+Sbを、後にはMnSをインヒビターとして利用する2回冷延法であり、方向性電磁鋼板RGコアとの製造条件の違いは熱延素材板厚、2回冷延圧下率、2次再結晶温度などである⁽⁶⁾。現在世界の方向性電磁鋼板の生産量は約100万トンであるが、そのうちの約3分の1が日本で生産され国内に供給されるとともに、高配向方向性を中心とする高品質の方向性電磁鋼板が全世界に輸出されている。

表4に示すようにオリエントコアハイビーの板厚は薄くなると、磁束密度は変化しないが鉄損が減少する。これは板厚が薄くなると電気抵抗が増えて古典的渦電流損が減少するためである。このように方向性電磁鋼板の板厚は薄くなるほど鉄損は減少するが、薄くなるほど2次再結晶が不安定になる上に、鋼板形状を保ちながら薄くすることは冷間圧延そのものが厳しくなり製造コストが上昇するので限界がある。現在0.17mmまでが新日本製鉄で商品化されている。

表4/方向性及び高配向方向性電磁鋼板の板厚別磁気特性の代表値

Tab.4/Typical magnetic properties of grain-oriented and highly grain-oriented silicon steel sheet

電磁鋼板種類	0.23mm			0.27mm			0.30mm		
	規格	鉄損	磁束密度	規格	鉄損	磁束密度	規格	鉄損	磁束密度
方向性(オリエントコア)	23Z110	1.06	1.85	27Z120	1.15	1.85	30Z120	1.17	1.85
高配向方向性(オリエントコアハイビー)	23ZH90	0.87	1.92	27ZH95	0.93	1.92	30ZH100	0.98	1.92

鉄損(W/kg)はW17/50、磁束密度(T)はB8

(新日本製鉄 カタログ (1987))

表2に示すように昭和35年のG10方向性を使用したものに比べ、昭和48年のZ8H高配向方向性を使った柱上変圧器は無負荷損は変わらないが重量は5～11%減少している。これは無負荷損と寸法は変えずに重量だけを軽量化する要求を、鉄心構造はノーカットコアのままに鉄心材料を高配向方向性に変更して満足させた例である。この柱上変圧器のシリーズはその後昭和57年にさらに鉄損の小さい27P100を使い、鉄心構造をワンターンカットコアに変更して重量を5～8%、無負荷損を40%減少し、低無負荷損と軽量化とを同時に達成した。なお、この時から変圧器ケースは小判形から円筒形となり低コスト化が図られた。

図9は10kVA柱上変圧器について総重量と無負荷損の推移を示すが、使用電磁鋼板が熱延、方向性、高配向方向性と変わると同時に鉄心構造も変わった結果、これらは減少を続け現在のものは熱延当時のものに比べて両方とも2分の1以下になった。

表5は10MVA変圧器について鉄心材料が異なるものの寸法、重量、特性を比較して示す。昭和41年のG10を使用したものは騒音規制の無いものの例である。昭和43年のG11を使用したものは騒音規制を満足するために低磁束密度設計を行うと同時に防音壁を付けたもので、こ

のために総重量が昭和41年のものに比べて約10%増加した。しかし、鉄心材料は鉄損の大きいものを使っているにもかかわらず、低磁束密度設計のため無負荷損は22%減少した。昭和49年のZ7Hを使用したものは重量を変えずに騒音と無負荷損の低減を同時に要求されたもので、鉄損が小さく磁束密度の大きい高配向方向性を使った結果昭和43年のものに比べて騒音は89%に、無負荷損が85%に減少した。昭和59年には、鉄心材料板厚を0.30mmに薄手化した結果、昭和43年のものに比べて重量はわずかな減少であったが、無負荷損は77%に騒音は83%にさらに減少した。平成2年の30ZH105を使用したものはそれまでのものに比べて騒音レベルはそのまま、寸法、重量、無負荷損を大幅に低減することを要求されたものである。重量を大幅に低減するためには防音壁を無くす必要があり、そのためには鉄心の騒音発生を小さくしなければならない。このために鉄心材料に鉄損が小さく磁束密度の大きい30ZH105を使い、更に低磁束密度設計にすると同時に、Vノッチステップラップにするなどの工夫をして騒音の発生を小さくした。その結果、騒音レベルは昭和59年のものと同等でありながら、重量は昭和43年の73%に、無負荷損は59%に減少した。以上の推移を図10に示す。

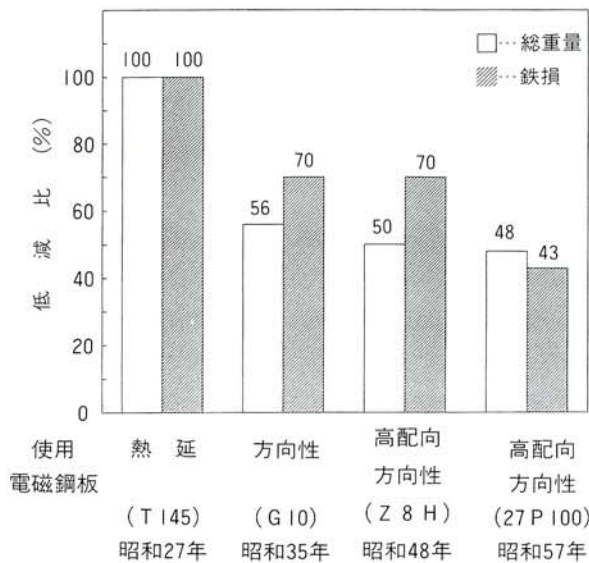


図9/10kVA(1φ,60Hz)柱上変圧器の総重量と鉄損の低減推移

Fig. 9/Change of total weight and core loss of 10kVA(1φ,60Hz)pole mounted transformer

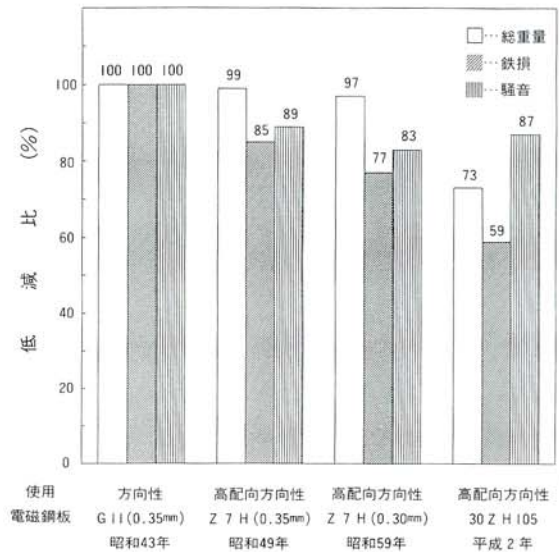


図10/低騒音型10MVA変圧器(3φ,60Hz)の総重量・鉄損・騒音の低減推移

Fig. 10/Change of total weight, core loss and noise level of 10MVA (3φ,60Hz)low noise level transformer

表5/3相60Hz77kV/6.6kV10MVA変圧器の使用電磁鋼板別の寸法・重量・特性例

Tab. 5/Change of size, weight and electrical properties of 10MVA transformer with the type of silicon steel sheet used

種類	電磁鋼板		変圧器製造年	騒音規制(防音壁)	寸法・重量				特性						
	規格(板厚)	鉄損(W/kg) 磁束密度(T)			横幅(mm)	奥行(mm)	高さ(mm)	油量(ℓ)	総重量(kg)	効率(%)	電圧変動率(%)	無負荷電流(%)	無負荷損(W)	負荷損(W)	騒音(ホン)
方向性	G10(0.35)	1.42(1.26)	昭41(1966)	無(無)	4480	4040	4770	11600	34700	99.28	0.833	0.491	17040	55310	-
	G11(0.35)	1.52(1.84)	昭43(1968)	<55(有)	5360	4750	4750	10300	37600	99.31	0.850	0.227	13240	55280	54
高配向方向性	Z7H(0.35)	1.15(1.94)	昭49(1974)	<50(有)	5360	4670	4920	10400	37200	99.35	0.820	0.180	11200	53800	48
	Z7H(0.35)	1.08(1.94)	昭59(1984)	<50(有)	5310	4550	4400	10000	36500	99.32	0.800	0.160	10200	51100	45
	30ZH105(0.30)	1.01(1.91)	平2(1991)	<50(無)	5490	3100	4280	74000	27500	99.37	0.850	0.081	7860	55370	47

6 磁区制御電磁鋼板

電磁鋼板の鉄損改善を歴史的に辿ると、けい素添加量の増加と製品板厚薄手化及び表面皮膜改良による層間抵抗の増大などによる古典的渦電流損の低減、及び表面弾性張力の付与による異常渦電流損の低減、鋼の純度向上と結晶方位の改善によるヒステリシス損の低減などを主な目標として行われてきた。これらの鉄損改善の方策はいずれもその時点での鉄鋼製造技術の進展を背景として電磁鋼板製造条件の工夫、改善を行った、いわゆるプロセスメタラジに頼ったものである。高配向方向性電磁鋼板の出現以降は、これ以上の改善をプロセスメタラジで望むことは技術的にも限界に近づいたと考えられた。このような時に現れたのが磁区を細分化するというプロセスメタラジに頼らない、従来とは異なった方法で鉄損を改善しようとする磁区制御電磁鋼板である。

強磁性体の内部は分子磁気モーメントが互いに平行な多数の磁区に分かれており、それぞれの磁区内の自発磁化はいろいろの方向を向いている。磁区と磁区との境界は磁壁と呼ばれる。磁界を強磁性体かけると、まず磁界方向と同じ磁化成分を持つ磁区の面積が増す磁壁移動が生じ、次に磁区内の磁化方向が磁界方向に一様に回転する磁化回転が生じて全体が磁化される。炭素、窒素などの不純物が少なくかつ高透磁率である方向性電磁鋼板を交流磁化したときに生ずるエネルギー損は、主として非可逆の磁壁移動によるものである。この磁壁移動にもなうエネルギー損は異常渦電流損といわれその大きさは磁区幅に比例する。したがって電磁鋼板の磁区幅を小さくすることがその鉄損を小さくするために有効と考えられた。磁区幅は結晶粒径にほぼ比例するので、〔100〕方向を揃えるために2次再結晶を行って結晶粒径を大きくしている方向性電磁鋼板はヒステリシス損は小さい反

面異常渦電流損は大きい。

この磁区幅を物理的な方法で狭くする方法として、始めはボールペンで電磁鋼板の表面に圧延方向と直角にスクラッチを入れる方法が試みられた。図11⁽⁸⁾は張力をかけると鉄損が下ること、表面に10mm間隔のスクラッチを入れると鉄損が下ること、これらの効果はB8の大きいものすなわち方向性の良いものほど顕著であることを示す。

表面にスクラッチを入れた方向性電磁鋼板の量産化を目指して、鋼球で鋼板表面にケガキを入れる方法をはじめ種々の方法が新日本製鐵で試みられたが、昭和52年頃から研究を始めたレーザー照射による方法が昭和58年に工業化に成功した。レーザーは鋼板の圧延方向に直角に約5mmの間隔で照射される。その結果、鋼板の表面直下にはレーザーの衝撃加工によって誘起された弾塑性領域が生じ、その結果生ずる圧縮応力とレーザー照射列の間に生ずる張力によって180°磁区が細分化されると考えられている。

図12⁽⁹⁾はレーザー照射による磁区制御が鉄損を減少させることを示すが、図11と同様に鋼板の磁束密度が高いほど、すなわち結晶粒の方位が揃っているほどその効果は大きく最大20%減少する。したがって、磁区制御は高配向方向性電磁鋼板に適用するとその効果は最もよく発揮される。

図13⁽¹⁰⁾はレーザー照射による磁区制御電磁鋼板は600℃以上の焼鈍により鉄損減少の効果が無くなることを示す。したがって、本電磁鋼板は積鉄心には使用できるが歪取焼鈍が必要な巻鉄心には使用出来ない。また図13⁽¹⁰⁾の結果はレーザー照射によるスクラッチ効果の物理的意味は、レーザーの衝撃加工によって誘起された残留内部応力であることを示していると考えられる。

レーザー照射による磁区制御鋼板は前述のように、600℃以上の焼鈍により鉄損減少効果が無くなるため巻鉄心には使用できない。それで、焼鈍後も鉄損減少効果を持

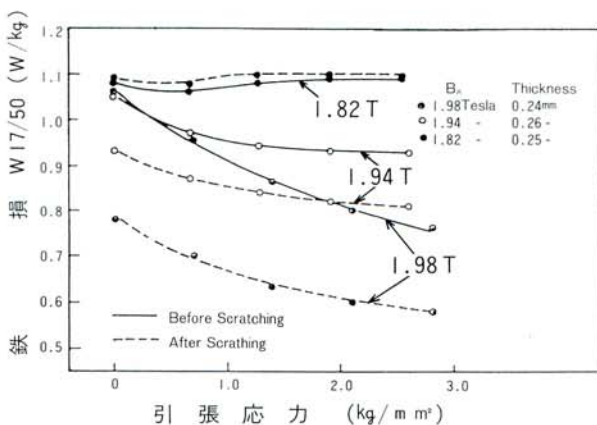


図11/方向性電磁鋼板の鉄損におよぼす引張応力と10mm間隔スクラッチの影響⁽⁸⁾

Fig. 11/Effect of tensile stress and scratches on core loss of grain-oriented silicon steel

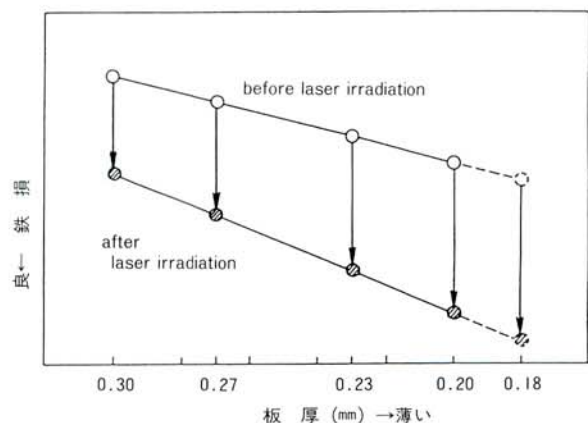


図12/レーザー処理による鉄損の向上⁽⁹⁾

Fig. 12/Core loss reduction by laser-scribed domain refinement

つ磁区細分化法がその後種々検討されたが、刃状の突起をつけたロールを回転させながら鋼板に押しつけて局部的に大きな歪を与えると同時に、深さ約20 μ mの溝を形成し、その後その部分を再結晶させる方法が平成2年に実用化された。歪を受けた部分は焼鈍により再結晶するが、その結晶方位は母材の結晶方位と異なること及び溝の存在が磁区細分化の原因となっている。

図13¹¹⁾は高配向方向性電磁鋼板に局部的な歪を入れてから焼鈍したときの鉄損の変化を示すが、歪を与えたために一度増大した鉄損は焼鈍後は元の値よりも12%減少する。

以上の2つの方式の磁区制御電磁鋼板はそれぞれ新日鉄で商品化され、レーザー照射による積鉄心用にはZDKH、熱処理可能な巻鉄心用にはZDMHの商品名がつけられている。これらの磁気特性の一例を表6に示す。

表7は昭和59年にZDKHを使用した配変級変圧器2台の鉄損を、同じ時期に製作した同タイプのZ7Hを使用したものと比較した結果を示す。ZDKHを使用したものはZ7Hに比べて12~22%無負荷損が改善された。さらに騒音が7~8ホン低くなったがその理由は明らかでない。

表8は平成2年にZDMH(0.23mm厚)を使用した柱上変圧器2台の特性をZ7H(0.27mm厚)を使用した同タイプの柱上変圧器と比較した結果¹²⁾を示す。ZDMHを使用したものはZ7Hに比べて21~28%無負荷損が改善され、騒音もZDKHの場合と同様に6ホン低くなった。

以上のように2つのタイプの磁区制御電磁鋼板ZDKH、ZDMHはそれぞれ積鉄心と巻鉄心変圧器で高配向方向性電磁鋼板を使った現行のものに比べて、20%前後無負荷損が低減できることが確かめられ、さらに騒音も低減できる可能性のあることが分かった。

現在磁区制御電磁鋼板は若干高価のため当社では通常製品には使用していない。しかし各級変圧器に対する省エネルギー化、コンパクト化、低騒音化、軽量化などの

要求は今後ますます強くなると考えられるので、将来は厳しい性能が要求される変圧器には磁区制御電磁鋼板のような超低鉄損型の鉄心材料も使われるようになると考えられる。

表9に、熱延電磁鋼板から磁区制御電磁鋼板までの開発史と当社の柱上変圧器製造の開発史を年代表にまとめて示す。

表6/磁区制御電磁鋼板の磁気特性測定例

Tab. 6/Typical magnetic properties of highly grain-oriented and domain refined silicon steel sheet

磁区制御電磁鋼板種類	0.23mm			0.27mm		
	規格	鉄損	磁束密度	規格	鉄損	磁束密度
ZDKH	23ZDK H90	0.83	1.91	27ZDK H95	0.89	1.92
ZDMH	23ZDM H85	0.77	1.91			

鉄損(W/kg)はW17/50、磁束密度(T)はB8 (新日鉄 カタログ (1987))

表7/レーザー照射磁区制御電磁鋼板(ZDKH)を使用した変圧器の鉄損測定例

Tab. 7/Examples of core loss and noise level of 10MVA transformer applied with laser-irradiated domain refined grain-oriented silicon steel sheet(ZDKH)

電磁鋼板種類(0.30mm)	鉄損 W17/50(W/kg)	各磁束密度における鉄損(W/kg)			騒音 (ホン)	
		1.5T	1.7T	1.9T		
レーザー照射磁区制御(ZDKH)	No.1	1.00	0.81	1.07	1.60	55
	No.2		0.86	1.14	1.74	54
高配向方向性(Z7H)	1.10	0.98	1.33	2.05	62	

(3 ϕ 33kV / 6kV50Hz10MVALRT)

表8/熱処理可能な磁区制御電磁鋼板(ZDMH)を使用した柱上変圧器鉄損測定例¹²⁾

Tab. 8/Some example of core loss and noise level of pole mounted transformer used partially pressed domain refined grain-oriented silicon steel sheet(ZDMH)

電磁鋼板		特性				
種類(厚み)	鉄損(W17/50)	容量(KVA)	無負荷電流(%)	無負荷損(W)	効率(%)	騒音(ホン)
熱処理可能な磁区制御(ZDMH)(0.23mm)	1.01	30	0.31	60	98.50	28
		20	0.28	42	98.35	
高配向方向性Z7H(0.27mm)	1.26	30	0.30	76	98.45	34
		20	0.41	58	98.28	

(1 ϕ 6600V / 210,105V 三相共用変圧器 2台の平均値)

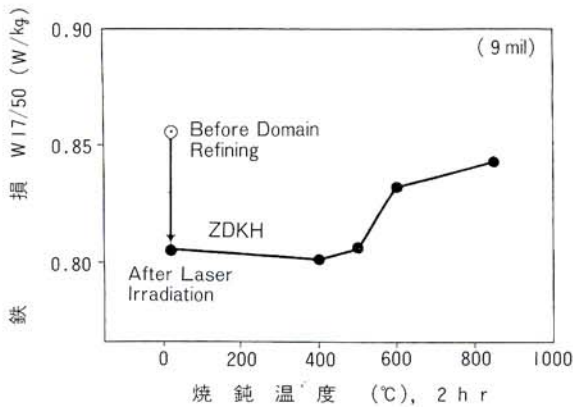


図13/レーザー照射後の焼鈍効果¹¹⁾

Fig. 13/Relationship between annealing temperature and core loss of laser irradiated grain-oriented silicon steel(ZDKH)

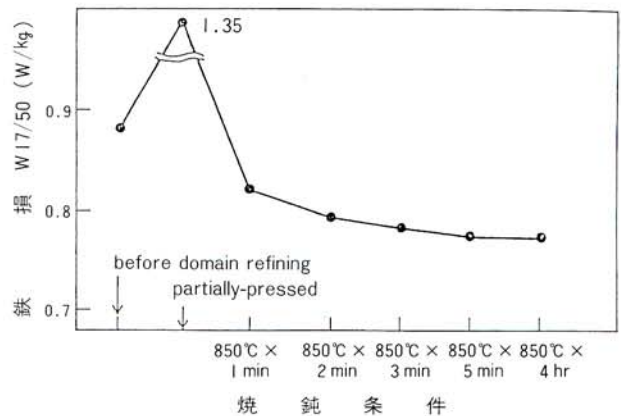


図14/局部歪導入後の焼鈍効果¹²⁾(0.23mm方向性電磁鋼材)

Fig. 14/Relationship between annealing temperature and core loss of partially pressed grain-oriented silicon steel(ZDMH)

表9/電磁鋼板及び当社柱上変圧器の開発史

Tab. 9/Development of silicon steel sheet and pole mounted transformer of Aichi Electric Co.,Ltd.

西 暦 (年号)	電 磁 鋼 板	当 社 柱 上 変 圧 器
1900 明23	電磁鋼板の発見 ハドフィールド (英国)	
1924 大13	熱延電磁鋼板 (B級) 製造開始 (八)	
1926 大15	鉄単結晶の磁化容易軸発見 本多・茅	
1929 昭 4	熱延電磁鋼板 (T級) 製造開始 (八)	
1932 昭 7	熱延電磁鋼板 (T級) 製造開始 (川)	
1934 昭 9	方向性電磁鋼板の発明 ゴス (米国)	
1942 昭17		積鉄心型 修理再生開始
1947 昭22		積鉄心型 製造開始 (熱延電磁鋼板使用)
1956 昭31	冷延無方向性 (ハイライト) 製造開始 (八)	
1958 昭33	方向性 (オリेंटコア) 製造開始 (八)	ノーカット巻鉄心 Aichi A型製造開始 (方向性電磁鋼板使用)
1963 昭38	方向性 (Z9) 製造開始 (八)	
1965 昭40	方向性 (ベクトルコア) 製造開始 (富)	
1965 昭40	方向性 (RGコア) 製造開始 (川)	
1967 昭42	熱延電磁鋼板製造中止	
1968 昭43	高配向方向性 (オリेंटコアハイビー) 製造開始 (八)	
1973 昭48		ノーカット巻鉄心型製造開始 (高配向方向性使用)
1974 昭49	高配向方向性 (RGH) 製造開始 (川)	
1982 昭57		ワンターンカットコア・ステップラップ型製造開始 (高配向方向性使用)
1983 昭58	磁区制御 (ZDKH) 製造開始 (新)	
1990 平 2	磁区制御 (ZDMH) 製造開始 (新)	三相共用変圧器製造開始
1991 平 3		アモルファス変圧器製造開始

(八：八幡製鉄 川：川崎重工業、川崎製鉄 富：富士製鉄 新：新日本製鐵)

7 あとがき

変圧器鉄心用の各種電磁鋼板について、日本における開発経緯とその特性の向上を、これらの電磁鋼板が当社の変圧器におよぼした影響とともに概説した。

日本における電磁鋼板は昭和初期に製造の始まった熱延電磁鋼板から、その後の方向性、高配向方向性、磁区制御などの変革を経てその特性は格段の進歩を示した。特に昭和40年代に、日本において高配向方向性電磁鋼板が開発されてからは、それまでの製造技術の外国への依存状態を抜けだして、日本の電磁鋼板の品質水準は世界最高になった。同時にこの頃から日本鉄鋼業の発展を背景として電磁鋼板の生産量が増加したため国内の自給体制が整った。これらの電磁鋼板の質と量の発展は変圧器にも大きな影響を与え、無負荷損の大幅減少、高磁束密度設計による小型軽量化、大容量化などの変革をもたらした。当社の例を挙げると、熱延を方向性に変更して鉄心構造を変えて寸法、重量、無負荷損を改善した柱上変圧器や、高配向方向性を使って騒音レベルはそのまま寸法、重量、無負荷損を改善した10MVA変圧器などの例がある。

最近、柱上変圧器鉄心の新しい材料として、アモルファスが注目されている。これは溶融状態の鉄-ほう素-けい素合金を急速に冷却して、結晶構造を持たないアモルファス(非晶質)状態の、厚みが約0.025mmの箔にした

ものである。電磁鋼板に比べ飽和磁束密度は小さいが鉄損が3分の1以下のため、アモルファスを使った変圧器の無負荷損は大幅に低減される。

現在、日本ではアライドシグナル社(米国)から購入したアモルファス材を使って、平成3、4年度中に32000台の柱上変圧器を製作し、各電力会社で実使用してその性能の確認を行いつつある。ちなみにこの台数は平成2年度の日本の標準変圧器の出荷台数63万台の5%に相当する。

当社では昭和57年からアモルファス変圧器の製造研究を行ってきたが^{10)~12)}、平成4年度上期までに約4,000台を製作、各電力会社に納入している。

今後、アモルファス変圧器の長期安定性については上記の32000台の実使用品で確かめられていくと考えられるが、一方、その経済性についてはアモルファスの価格、変圧器製造コストなどの影響もあり、電磁鋼板を使った通常の変圧器との比較結果が出るまでには、まだ時間がかかると考えられる。

変圧器鉄心用材料の特性は今後も薄手化、高けい素化、アモルファス化などにより、ますます向上することが期待されるが、より小形軽量で省エネルギー化した変圧器を開発するためには、磁区制御電磁鋼板も含めてこれらの新しい材料の最適な鉄心への適用方法について、変圧器製造法の一層の検討が行われる必要がある。

本報告をまとめるにあたり新日本製鐵(株)及び当社変圧器事業部技術部、設計部の関係各位に御協力戴きましたので感謝を申し上げます。

参考文献

- (1)電気協同研究：Vol 40 (1984) P.7
 - (2)新日本製鐵電磁鋼板技術部編：わかる電磁鋼板 (1985) P.23
 - (3)日本鉄鋼協会・金属学会編：鉄鋼材料便覧 (1967) 丸善 P.522
 - (4)日本金属学会編：金属便覧 (1960) 丸善 P.522
 - (5)(3)と同じ P.817
 - (6)田口：電磁鋼板 (1979) 新日鉄技術サービス部 P.45
 - (7)電気学会：電気工学ハンドブック (1978) 丸善 P.488
 - (8)田口：鉄と鋼, Vol 62, (1976) P.905
 - (9)愛知電機工作所 20 年史 (1964) P.91
 - (10)(2)と同じ P.95
 - (11)新日本製鐵：磁区制御オリエントコア HI-B,ZDKH テクニカルデーター (1984)
 - (12) N.TAKAHASHI et al:IEE.TRANS.MAG.,MAG-22 (1987) P.490
 - (13)宮島ら：電気学会・エネルギー部門第 2 回大会論文集 (1991) P.563
 - (14)柳沢ほか：愛知電機技報 No.2 (1986) P.21
 - (15)柳沢ほか：(14)と同じ No.3 (1986) P.22
 - (16)柳沢ほか：(14)と同じ No.5 (1987) P.10
- <その他の参考文献>
- U.S.S. 社編，日本鉄鋼協会訳：鉄鋼製造法 (1956) 丸善
日本鉄鋼協会編：鉄鋼製造法 (1972) 丸善
日本鉄鋼協会編：鉄鋼便覧Ⅳ鉄鋼材料 (1981) 丸善