



入門講座

電磁鋼板入門－5

方向性電磁鋼板の利用

Utilization Technology of Grain-Oriented Electrical Steel Sheet in Transformers

林田 広和

Hirokazu Hayashida

富士電機（株）

パワエレエネルギー事業本部

開発統括部 変電機器開発部

マネージャー

1 はじめに

方向性電磁鋼板が主に利用されている機器として変圧器を思い浮かべる読者も少なくないだろう。方向性電磁鋼板の技術進歩と変圧器の歴史には密接な関係がある。本稿では主に電力設備で用いられる電力用変圧器の概要と技術変遷、方向性電磁鋼板を変圧器で利用する際の選定・評価・管理方法などについて紹介する。

2 電力用変圧器の概要と技術変遷

発電所等で発電された大容量の電力は遠方の需要家に効率的に送電・配電するため、高電圧にして送りだし、需要家の

近隣にて取扱いが容易な電圧に下げ分配しながら届けられている。この電圧を変換するのに用いられている機器が変圧器である。変圧器は単純な電力の託送目的だけではなく、新幹線などの車両用変圧器や電気炉・アルミ電解・ソーダ電解等に用いられる産業用変圧器など様々な産業分野でも利用されており、社会インフラや経済活動を支える上でも、高い信頼性と安全性が求められている製品である（図1）¹⁾。

変圧器と方向性電磁鋼板の関係性を知るためには、変圧器の原理と構造を知る必要がある。図2は、鉄心に2つの巻線1と2が巻かれている二巻線変圧器の要素を示す略図である。図2中(a) 無負荷時は巻線2の端子を開放し、他方の巻線1(以下、一次巻線といい、巻数を N_1 とする) に正弦波交番電圧(実効値 V_1 、周波数 f)を加えると、電流 I_0 が流れ込み、 I_0 と一次

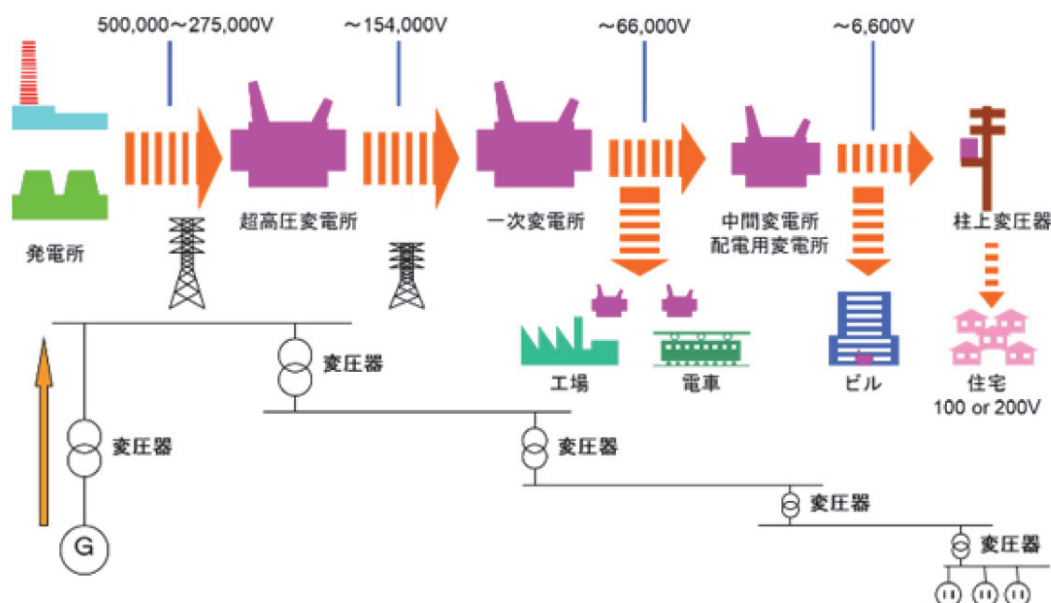


図1 送配電系統概念図 (Online version in color.)

巻線の抵抗 R_1 による電圧降下 $\dot{I}_0 R_1$ と $\dot{I}_0$ の起磁力がつくる交番磁束によって誘起される自己誘導作用による起電力との和が、加えた電圧と平衡する。この交番磁束によって誘起される起電力を誘起電圧という。一般に、 $\dot{I}_0 R_1$ は誘起電圧に比べて著しく小さいので、これを無視すると、加えられた電圧 $\dot{V}_1$ と平衡する誘起電圧は、おもに鉄心中を通る交番磁束（最大値を Φ [Wb] とする）によって起こり、これを E_1 で表せば、

$$\dot{E}_1 = -\dot{V}_1 = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} N_1 \dot{\Phi} = 4.44fN_1 \dot{\Phi} [\text{V}] \quad (1)$$

となる。このとき鉄心中に交番磁束を通すのに必要な起磁力を与えるため、一次巻線中に流れ込む電流 $\dot{I}_0$ を励磁電流という。この電流は鉄心の非線形性やヒステリシス特性のためにひずみ波形となり、かつ、供給電圧より 90° 遅れた位相を有する。

巻線1の励磁電流によって生じた磁束が全て巻線2に交わるとすれば、巻線2（以下二次巻線といい、巻数を N_2 とする）にも同じようにして

$$\dot{E}_2 = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} N_2 \dot{\Phi} = 4.44fN_2 \dot{\Phi} [\text{V}] \quad (2)$$

の電圧が誘起される。式 (1)、式 (2) から、

$$\frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (3)$$

となり、変圧器における一次、二次電圧の比は、巻数比 a に等しい。

また、図2中 (b) のように二次巻線に負荷をとれば、二次巻線には負荷電流 $\dot{I}_2$ が流れ、 $\dot{I}_2$ と二次巻線の巻数 N_2 にて新たに起磁力が生じ、一次巻線には無負荷時で述べた磁束とは異なる磁束が交わろうとする。しかし、一次誘起電圧は一次供給電圧とつりあわなくてはならないので、二次巻線にて生じた磁束を完全に打ち消すような補償電流 $\dot{I}_1'$ が流入することになり、この電流を一次負荷電流という。このとき、 $\dot{I}_1'$ と $\dot{I}_2$ は電流の向きが反対で同じ大きさのアンペアターンを与えるものであるから、

$$\dot{I}_1' N_1 = -\dot{I}_2 N_2 \quad (4)$$

よって

$$\frac{\dot{I}_1'}{-\dot{I}_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a} \quad (5)$$

つまり、一次と二次の負荷電流の比は、巻数比 a に反比例する²⁾。

つぎに、変圧器の損失と効率について考えてみる。一般的に二巻線変圧器の等価回路として用いられる回路を図3に示す。鉄心は加えられた電圧に応じて一次巻線に流れる励磁電流を、負荷には関係なく通す並列回路（励磁アドミタンス $\dot{Y}_0$ で表す）として表され、負荷率100%、力率1の変圧器の効率は式 (6) で表され、変圧器の出力電力を入力電力で割る事で求められる。

$$\text{効率}[\%] = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_i + P_p + P_s} \times 100 \quad (6)$$

一般的な変圧器の効率は98%以上と非常に高効率で製作されている。

ここまで、変圧器の基本的な原理を述べてきたが、実際に変圧器の製造を行う際は、磁束を通す鉄心の体格、飽和磁束密度、巻線サイズ等がメーカー毎に、有限な値をとるため、巻線の電流密度と鉄心の磁束密度を一定に保ったとすると近似的に

$$\text{容量} \propto (\text{銅重量}) \times (\text{鉄心重量}) \quad (7)$$

と表現する事ができ、変圧器の設計者は銅と鉄との最適な使用量を仕様に応じて設計を行っている。これらのことから、変圧器の性能を向上させる上では、巻線および鉄心におけるエネルギーの高密度化に対する研究・開発が重要な事が理解いただけたかと思う。現在に至るまでの変圧器の性能に關す

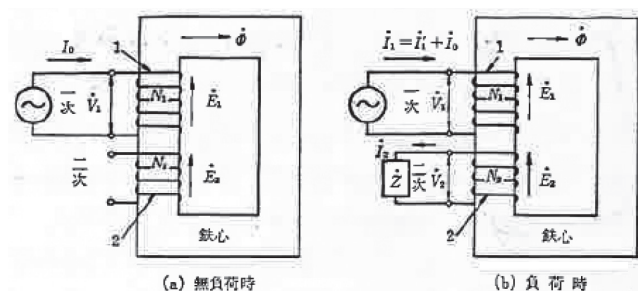


図2 二巻線変圧器の要素²⁾

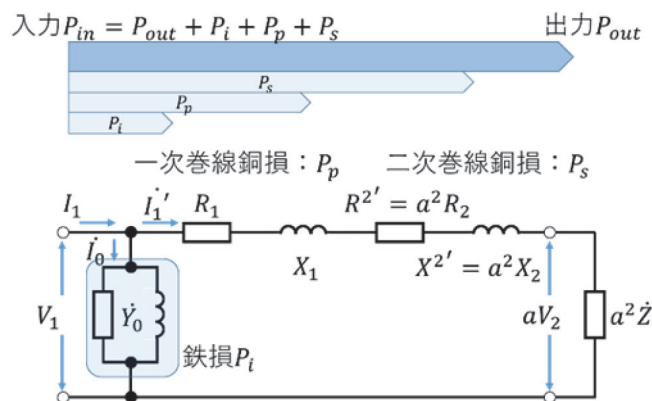


図3 二巻線変圧器の等価回路 (Online version in color.)

る変遷を表1に示す³⁾。

変圧器の誕生以降、最も大きな転換点のひとつは、方向性珪素鋼板の登場であろう。従来の熱間圧延のけい素鋼板に比べ磁化特性に優れ、励磁電流の減少と高い飽和磁束密度を達成した事で変圧器の機器体格を大幅に縮小する事を可能とした。当時、高度経済成長期にあった日本において、増加する電力需要に対し、輸送等の制約で変圧器の大容量化が困難とされている中で、方向性電磁鋼板は大きく日本社会に貢献したものと考えられる。

その後、日本国内においては、1973年の第一次石油機器を契機に1979年に省エネ法が制定され、1997年地球温暖化防止京都会議を受け改正された省エネ法において、エネルギー

表1 変圧器の性能の変遷³⁾

年	性能の変遷
1885	Ganz 社で内鉄および外鉄型変圧器を製作。 (ブダペスト博覧会で変圧器を使用した配電照明の展示)。
1885	Stanley が鉄針金の環状鉄心および薄板成層鉄心構造の変圧器完成。
1893	初の国産変圧器製作。
1910	けい素鋼板初適用。
1922	非共振変圧器製作。
1928	耐雷巻線構造の適用開始。
1933	サージプルーフ巻線適用開始。
1934	方向性けい素鋼帯の発明。
1942	中性点段絶縁方式開発。
1950	無振動巻線(耐雷形成層円筒巻線)の開発。
1951	制振遮へい巻線初適用。
1952	タンク磁気遮へい初適用(外鉄型)。
1954	転位電線初適用。
1954	複導体電線適用。
1955	方向性けい素鋼板初適用。
1956	巻線強制冷却初適用。
1956	ハイセルキャップ巻線初適用。
1971	国内向け 500kV 変圧器の製作。
1972	高配向性けい素鋼板適用開始。
1973	タンク磁気遮へい初適用(内鉄型)。
1982	磁区制御けい素鋼板の適用開始。
1983	アモルファス変圧器の開発。
1984	ステップラップ積み鉄心適用開始。
2006	第一次トッランナー基準適用開始(油入)。
2007	第一次トッランナー基準適用開始(モールド)。
2014	第二次トッランナー基準適用開始。
2014	JEC-2200 改正で温度と絶縁の仕様合理化適用。

を多く使用する機器ごとに、省エネルギー性能向上を促すトッランナー基準が設けられ、2006年よりトッランナー基準が施行され、2014年には更なるエネルギー消費効率削減を求めた第二次トッランナー基準が開始された。当時の試算では、日本国内における稼働台数は基準適合以前の変圧器で約260万台、基準適合以前の変圧器の総損失は製造年代別の損失特性、総出荷台数、平均容量をもとに試算すると約170億kWh/年(CO₂換算約94億kgCO₂)という膨大な量になり、順次トッランナー変圧器にリプレースを行う事で膨大なCO₂の削減効果が期待できる。図4に変圧器のエネルギー消費効率の推移をしめす。このような背景から、変圧器の負荷によらず一定で発生する鉄損(無負荷損)の低減が求められ、各鋼板メーカーにより、磁区制御技術やアモルファス鉄心などの低損失材の開発が行われ、現在も更なる低損失化に向けた社会的ニーズに対応し続けている。

また、近年では都市部の人口増加に伴い電力需要の集中が加速され、市街地に設置される変電所の規模は年々増加している。一方で環境保全への社会的な要請の高まり、変電所周辺への新興住宅地建設などから、周辺環境の保持を目的に法的規制は厳しさを増し、特に変電所の低騒音化への要求は年々強まっている。変圧器の騒音は主に、鉄心を励磁した際に発生する騒音で励磁騒音とも呼ばれており、方向性電磁鋼板の磁歪振動に起因する騒音である。後述で変圧器の鉄心構造について詳細を記述するが、変圧器の鉄心は薄い電磁鋼板を積層して構成されており、交番磁界が鉄心中を通過する際、鋼板それぞれが伸び縮みし、それが振動となり変圧器のタンクに伝わり、音となって外部に放出される。騒音対策を実施しない一般的な変圧器の騒音レベルは70dB～85dB程度と大きな騒音が発生する。

1996年に発刊された電気学会技術報告「静止器の騒音対策技術の現状とその動向」の中で、変圧器に要求される騒音仕様についての調査結果が報告されており、表2に1975年以前

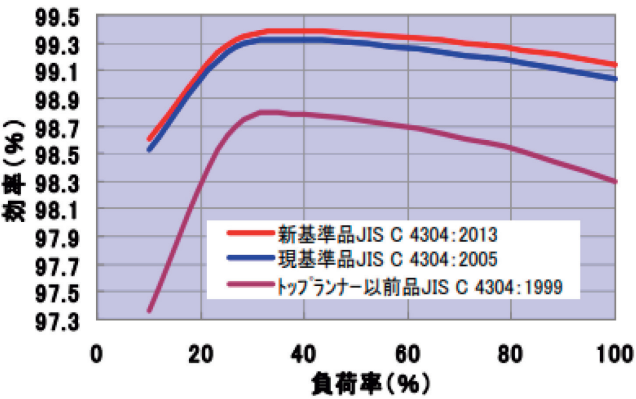


図4 変圧器のエネルギー効率の推移⁴⁾ (Online version in color.)

に設置された変圧器の騒音仕様値を表3に1976年以降に設置された変圧器の騒音仕様値の調査結果をしめす。

全体的に、60dB以上の高い騒音仕様値の変圧器は減少傾向となる一方で、低騒音仕様の変圧器が増加している。特に極低騒音仕様変圧器（50dB以下）については1975年以前のものは全体の10%程度であるが、1976年以降では全体の

表2 変圧器容量ごとの仕様値（1975年以前に設置したもの）⁵⁾
(台)

容量	仕様値(dB)				小計
	50以下	50～60	60～70	70超過	
30MVA以下	623 (12%)	2,029 (38%)	1,371 (26%)	1,193 (23%)	5,216 (100%)
30超～300MVA	27 (3%)	272 (26%)	272 (26%)	473 (45%)	1,044 (100%)
300MVA超過	3 (4%)	2 (2%)	57 (70%)	19 (23%)	81 (100%)
小計	653 (10%)	2,303 (36%)	1,700 (27%)	1,685 (27%)	6,341 (100%)

表3 変圧器容量ごとの仕様値（1976年以降に設置したもの）⁵⁾
(台)

容量	仕様値(dB)				小計
	50以下	50～60	60～70	70超過	
30MVA以下	3,076 (47%)	1,791 (27%)	523 (8%)	1,167 (18%)	6,557 (100%)
30超～300MVA	127 (11%)	391 (34%)	318 (27%)	324 (28%)	1,160 (100%)
300MVA超過	3 (2%)	34 (20%)	119 (70%)	15 (9%)	171 (100%)
小計	3,206 (41%)	2,216 (28%)	960 (12%)	1,506 (19%)	7,888 (100%)

41%にも達しており、変電所が騒音規制指定地域内に設置されることが多くなっていることがわかる。このようなことから、方向性珪素鋼板は低損失化だけでなく低騒音化への対応も求められてきた。

以上のような背景から鉄心の材質を選定するには以下を留意して選定することとなる。

- 1) 無負荷損失（鉄損）
- 2) 磁歪量（騒音）
- 3) 飽和磁束密度（機器の小型化）
- 4) 鉄心占積率（機器の小型化）

一般的に大容量変圧器等では、数百トンもの鉄心材料を使用することとなり、当然ながら機器のコストと変圧器に要求される仕様とを勘案しながら鉄心の材質を選定する。

3 方向性電磁鋼板の利用と評価

変圧器の鉄心として主に使用されている鋼板は0.23～0.35mmの方向性電磁鋼板である。冒頭に説明した変圧器の損失の一つである鉄損は、鉄心を通過する交番磁界の影響で、磁束が鎖交する事で生じる渦電流損失と鉄心のヒステリシス特性に起因したヒステリシス損失で構成されている。このうち、渦電流損を低減する事を目的に0.23mm～0.35mmと極めて薄い材料を用いている。変圧器の鉄心構造において最も広く用いられているのが積み鉄心である。これはさらに、内鉄形と外鉄形に大別される。内鉄形三相鉄心構造を図5に、外鉄形三相鉄心構造を図6に示す。内鉄形はあらかじめ鉄心を組立ておき、それに巻線を組込むもので、変圧器完成状態の積層鉄心の積層方向が垂直となる。一方で、外鉄形は巻線を組立ておき、後から鉄心を組み合わせるもので、変圧

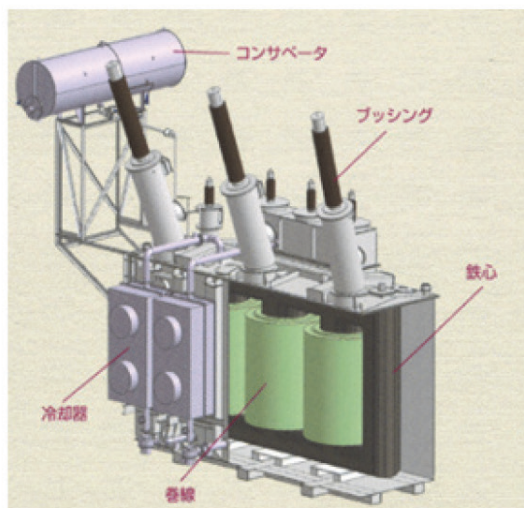
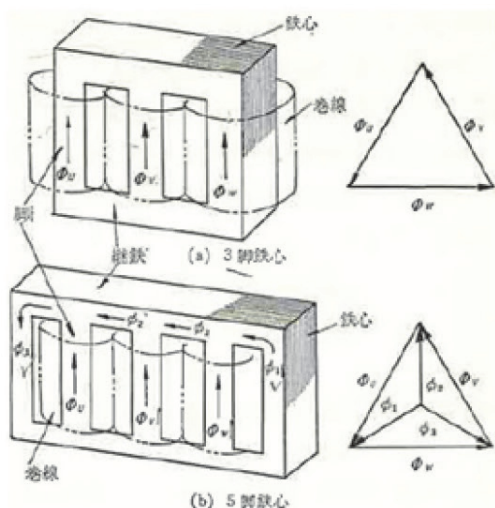


図5 内鉄形三相鉄心構造 (Online version in color.)

器完成状態の積層鉄心の積層方向が水平となる。いずれの形にも一長一短があり、各製作メーカーの経験と設備によって得意とする形を自社の標準としている。

変圧器の製作にあたっては、その材料特性を十分に理解して利用する必要がある。特に鉄心の接合部は磁束の流れが極端に悪化する部位と考えられており、局所的な損失増加による、鉄心の異常過熱によって溶損などが発生した事例も報告されている。このような接合部の影響を最小限とするため、鉄心構造について、いくつか具体的な例を紹介する。けい素鋼帯の接合端を45°に切断し図7に示すような額縁形構造を採用し、この接合部を部分的に重なり合せた、重ね接合方式を採用している。また、小容量クラスの変圧器においては、接合部を減らす事で特性を改善する巻鉄心と呼ばれる鉄心構造も採用されている (図8)。

このように、実際の変圧器で用いられる際には方向性電磁鋼板の単板磁気特性だけでなく、製作する上での作業性の評価と変圧器としての損失・騒音を評価する必要がある。

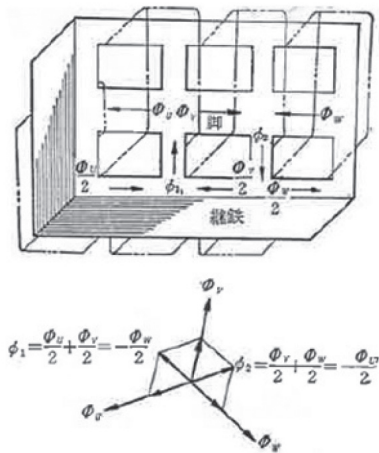


図6 外鉄形三相鉄心構造

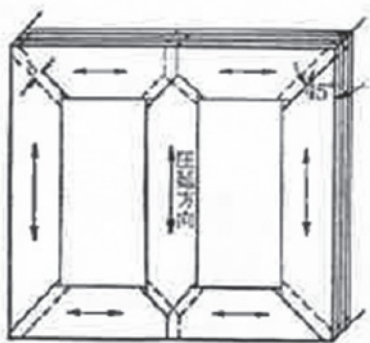


図7 額縁形の組み方 (45°重ね接合) ²⁾

4 方向性電磁鋼板の管理

変圧器製作時における方向性電磁鋼板の管理について、一般的に広く知られている点について記載する。鉄心はこれまで述べてきたとおり、変圧器の主磁束を通す重要な役割を担っており、薄板間の微小短絡や鉄心接合部の不良によって、渦電流が過大となり異常過熱や溶損といった重大な不具合に繋がる部品である。また、変圧器の最深部に位置することから、交換する事は全て再製作する事とほぼ同義となり、製作時は様々な点に配慮し管理する事が、重要である。

4.1 電磁鋼板の厚み

大形変圧器で主に用いられる積鉄心の断面図を図9に示す。設計時に検討した所望の鉄心断面積となるよう、大型のものでは、数十種類の幅に切断された方向性電磁鋼板を1m程度を数千枚にわたって積上げ、円に近い形を形成していく。その際に0.23~0.35mmと非常に薄い方向性電磁鋼板を積み上げていくため、使用する方向性電磁鋼板の厚みが均一でないと、積上げた際の誤差が大きくなり、接合部の不良であるとか、所望の断面積が確保できず飽和磁束密度領域で鉄心を利用する事となる。

4.2 切断時のかえり

鉄心切断にはコンピュータ制御された高速自動切断装置を用いるが、切断刃の消耗や電磁鋼帯のたわみ等によって切断

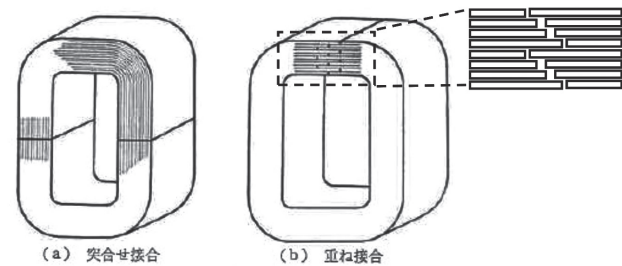


図8 巻鉄心 ²⁾

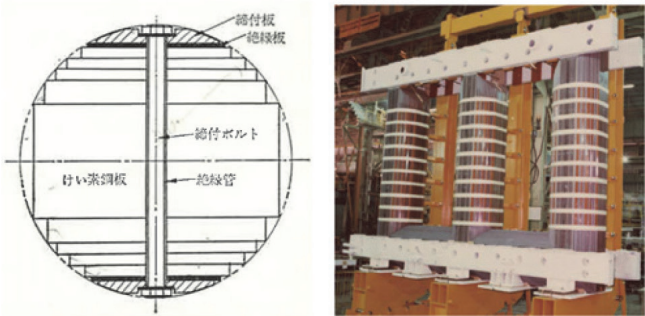


図9 鉄心構造 (Online version in color.)

部に微小のかえりが生じる可能性があるため、切断時には品質管理によって決められた枚数毎に切断部のかえりを確認する。

変圧器の鉄心は渦電流損を低減するために、極めて薄い材料を積層して製作している事を上述したが、その機能を果たすためには、銅板一枚ごとに絶縁されている必要があるため、方向性電磁鋼板の表面は極めて薄い絶縁処理が施されている。そのため、この鉄心切断部のかえりは方向性電磁鋼板表面にある絶縁被膜を傷つけて、部分短絡の原因とならないよう最大限の注意を払い管理を行っている。

4.3 接合部の寸法管理

鉄心接合部にて鉄心の端面同士が接触すると、額縁形状が大きな1ターン回路を形成してしまう。この回路に磁束が鎖交すると磁束を打ち消すために、鉄心内に循環電流が流れ、異常な損失・過熱が発生する。一方で、端面間の間隔を大きくしすぎると、空隙により磁気抵抗が大きくなり、騒音が過大になったりすることが知られている。

4.4 防錆措置

鉄心切断面は鉄部分が露出しており、発錆する可能性があるため、空調室などでの保管や、乾燥剤・塗料を用いて防錆処置を行う。

5 まとめ

変圧器における方向性電磁鋼板の利用について述べてきたが、変圧器において方向性電磁鋼板は最重要部品の一つであり、変圧器の性能・品質を決定するものである。

歴史を振り返ってみても変圧器と方向性電磁鋼板の繋がりは深く、引き続き、変圧器メーカーと銅板メーカーが手を取り合い、共に次代の省エネ・カーボンニュートラル技術を元に、持続可能な社会を作り上げていくことを願う。

参考文献

- 1) 矢成敏行：電力用変圧器技術発展の系統化調査，国立科学博物館 技術の系統化調査報告，第4集，(2004)，106.
- 2) 大岡登，前川定雄：変圧器，東京電機大学出版局.
- 3) 電気学会技術報告 No.1478，変圧器の機能・性能の多様化に関する最新動向.
- 4) 一般社団法人日本電機工業会講演会資料，トップランナー変圧器第二次判断基準2014年度スタート.
- 5) 電気学会技術報告第616号，静止器の騒音対策技術の現状とその動向.

(2023年1月30日受付)