

特集記事 2

電磁鋼板はエコマテリアル

牛神義行

新日本製鐵(株) 鉄鋼研究所 主任研究員

Yoshiyuki Ushigami

Electrical Steel is an "ECO-MATERIAL"

1 はじめに

電気エネルギーは19世紀半ばから我々の生活に利用されるようになり、現在は日常生活に欠かすことのできないものとなっている。電磁鋼板は普段の生活では目に触れる機会もなく、その存在を意識されることも少ないが、実はこの電気エネルギーの発電、送電から利用にいたる電力システムの全てのステージで欠くことのできない鉄鋼材料である。具体的には、発電段階での発電機、送配電段階での変圧器、利用段階でのモーターなどの鉄心として用いられ、その生産量は、図1¹⁾に示すように電力需要に伴って増加してきている。世界及び日本において年間にそれぞれ520万トン、160万トン生産されている(1993年)。電磁鋼板には、方向性電磁鋼板と無方向性電磁鋼板があるが、今回は主に送配電の変圧器に使用される方向性電磁鋼板に絞って紹介する。

日本の送配電における電力損失の変遷をみると、1950年

頃は総発電量の25%が送配電中に失われていたが、電磁鋼板の低鉄損化を含む多くの技術開発により、現在は6%程度にまで低減されている(図2)²⁾。そのなかで、鉄心材料のエネルギー・ロス(鉄損)として消費されているものは送配電損失の約20%の90億kWhであり、金額で換算すると1600億円(18円/kWh)と推定される。

近年、オイルショックに代表される化石燃料の枯渇化、また、化石燃料を燃焼させる際に発生するCO₂、SO_x、NO_x等による地球温暖化や、環境汚染等の問題が顕在化し、徹底的な省エネルギーの気運が高まっている。特に、1997年12月に開催された地球温暖化防止京都会議(COP3)において温室効果ガス排出量の規制が議論され、2008~2012年の期間におけるエネルギー起源の排出量を1990年の排出量より6%削減させるという厳しい課題が日本に課せられた。この合意を受け、通産大臣の諮問機関である総合エネルギー調査会需給部会と電気事業審議会需給部会は長期電力需給見通しの見直しを行った。そのなかで電力需要面でみ

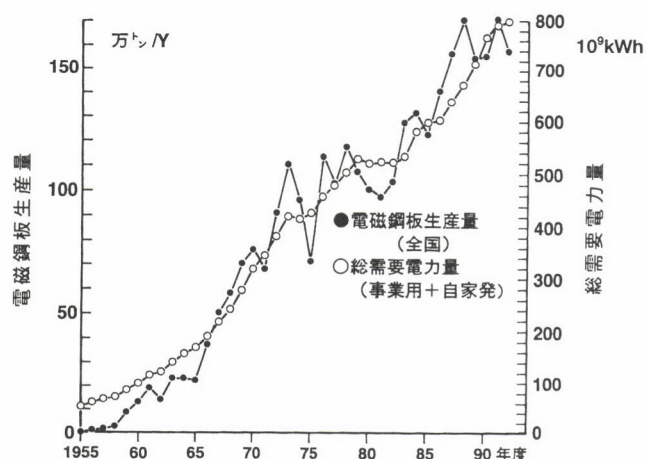


図1 日本における総電力需要量と電磁鋼板生産量¹⁾

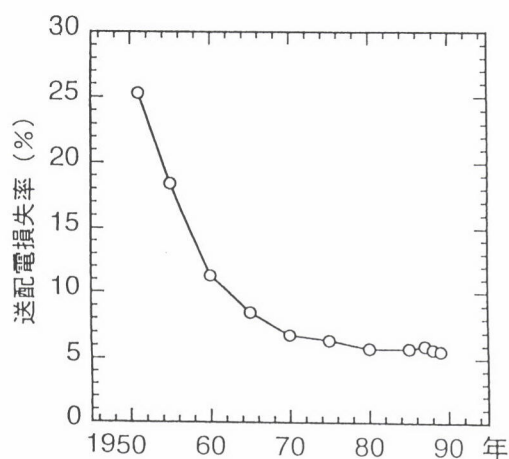


図2 日本における送配電損失率の推移²⁾

ると、日本の電力需要は現在約2%の割合で増加しているが、省エネルギー法の改訂・強化等の新たな省エネルギー対策により、この電力需要の増加率を1.2%にまで半減させる必要があるとの報告がなされている。この省エネルギー運動の一環として、送配電時のエネルギー・ロスの低減を目標に変圧器の効率向上が進められており、更なる低鉄損素材の開発が望まれている。

2 電磁鋼板の低鉄損化の経緯

図3に電磁鋼板の鉄損向上の歴史を示す。電磁鋼板は1900年に英国のHadfield等によって発見されたSi添加による磁気特性向上効果に端を発し³⁾、まず、熱間圧延珪素鋼板が欧米で工業生産されるようになった。次いで、1926年に本多、茅による鉄の結晶磁気異方性の発見⁴⁾により、結晶方位制御による磁気特性向上効果が見いだされ、1934年に米国のGossにより磁化容易軸である<001>軸を圧延方向に揃えた{110}<001>結晶組織をもつ方向性電磁鋼板が発明された⁵⁾。この方向性電磁鋼板の工業的製造プロセスは米国で確立され、1960年頃には、磁化容易軸<001>の圧延方向からの平均分散が約7度にまで制御されるようになり、鉄損は大幅に改善された。

日本では、1953年に八幡製鉄所で方向性電磁鋼板の製造が開始された。その後の技術開発により、現在の最高級グレードの鉄損値は当時の鉄損値の1/3以下にまで改善されている。この鉄損低減は主に次の3つの技術要素によるものである。それは、①高磁束密度方向性電磁鋼板の製造技術、②薄手高磁束密度方向性電磁鋼板の製造技術、及び③磁区細分化技術である。図4に、これら3つの技術要素による鉄損低減効果を示す。鉄損は、まず高磁束密度方向性電磁鋼板(HI-B:1968年⁶⁾、RGH:1972年⁷⁾の発明により

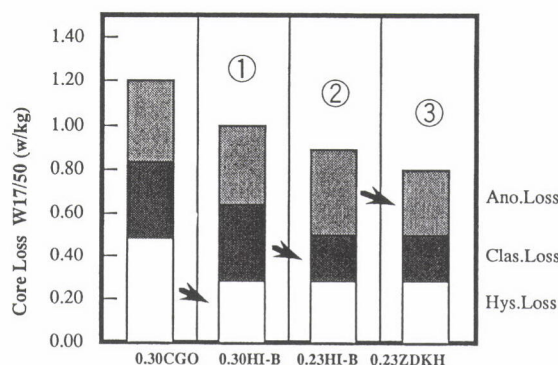


図4 ヒステリシス損失と渦電流損失改善の変遷

{110}<001>集合組織をシャープにすることにより達成された。高磁束密度方向性電磁鋼板(①)の発明により、{110}<001>方位への平均分散角が7度から3度へと尖锐になると共に、磁束密度;B8が1.82Tから1.92Tへと大幅に高まり、ヒステリシス損失が約0.2W/kg低減した。その後、鉄損のもう一つの要因である渦電流損失の低減技術が研究され、まず、板厚を薄くすると二次再結晶による{110}<001>方位制御が困難になるという冶金的問題を克服して、薄手高磁束密度方向性電磁鋼板(②)が開発された。製品板厚を従来の0.3mmから0.23mmに薄くすることにより、渦電流損失を0.15W/kg低下させることができた。一般に{110}<001>方位への集積度を高めると磁区幅が大きくなり、渦電流損失は逆に増加してしまう。そこで次に、広がった磁区幅を物理的に制御する製品へのレーザー照射⁸⁾、プラズマ照射⁹⁾等による磁区細分化技術(③)が開発された(図5)。これらの技術により渦電流損失を更に0.1W/kg低下させることができた。

3 今後の低鉄損化への展望

方向性電磁鋼板の極限特性を調べるために、磁区観察による磁壁移動挙動に関する研究が行われた。電磁鋼板の理想的な磁壁移動モデルは、全ての磁壁がストライプ状の180°磁壁で構成され、これらの磁壁が同じ速度で移動するというものである。しかしながら、磁壁移動を動的に観察すると、現実の製品は、理想的な磁壁移動モデルとは異なり、次の2つの磁氣的欠陥構造に影響されていることが解明された。

(1) 磁壁移動のピンニング

磁壁移動は表面の凹凸や、非金属介在物によって妨げられる。方向性電磁鋼板の表面には、絶縁性及び鋼板への張力付与のために、セラミックス被膜を被覆させており、このセラミックス被膜と地鉄の界面は平滑ではない(図6)¹⁰⁾。図7に磁化過程の各位相における磁区構造の変化挙動を示

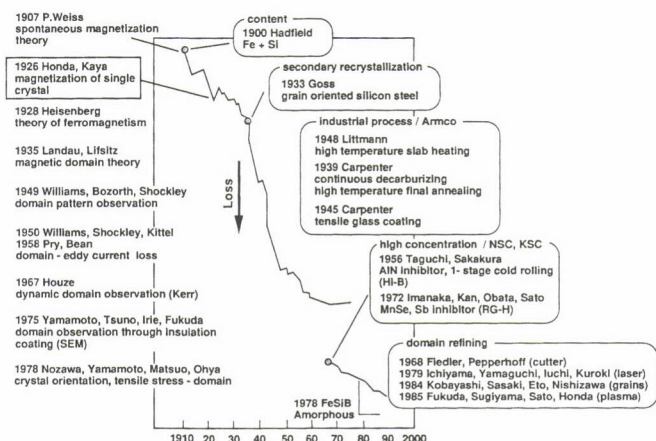


図3 電磁鋼板の低鉄損化を支えた磁気物性と生産技術の進歩

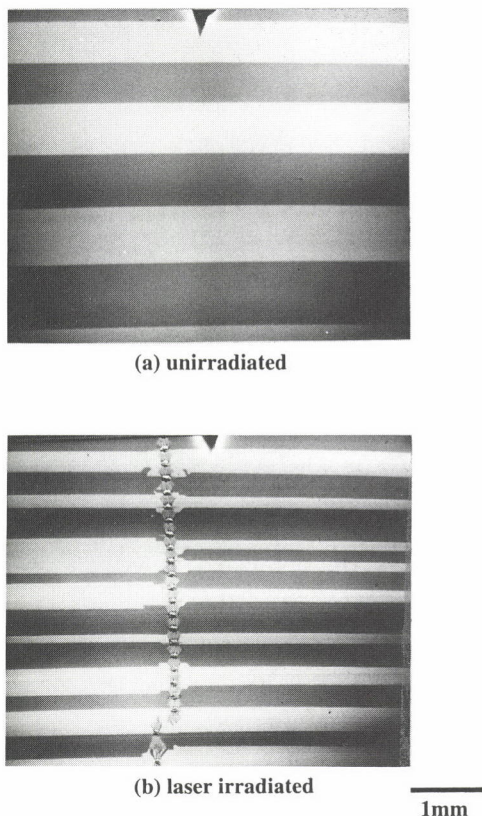
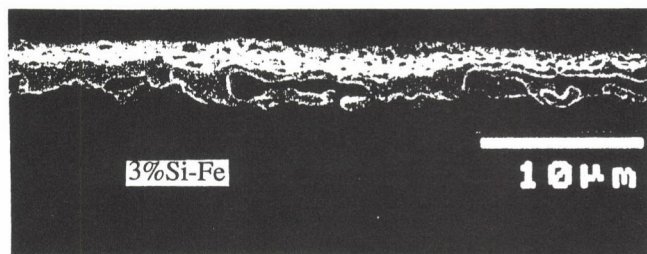


図5 レーザー照射処理による磁区細分化効果

図6 走査電子顕微鏡による表面酸化層の構造観察(断面)¹⁰⁾

す。白黒のストライプとして観察される 180° 磁区の境界である磁壁は直線状でなく乱れていることから、磁壁移動が一樣でなくピン止めしている場所があることが分かる。一方、表面のセラミックス層を除去した後に表面を平滑にした試料の磁壁移動の観察結果を図8に示す。表面を平滑にすることにより磁壁が直線的になり、全ての磁壁が移動して磁化が一樣に行われていることが確認できる¹¹⁾。このような表面の凹凸による磁壁のピンニングと併せて、二次再結晶粒内にサブバウンダリー等の格子欠陥があることがみだされており(図9)¹²⁾、この格子欠陥の制御が重要であることも指摘されている。

(2) 表面環流磁区

図10に理想的な $\{110\}<001>$ 方位に対して $<001>$ 軸が板厚方向に 4.5° 傾いた二次再結晶粒の磁区観察結果を示

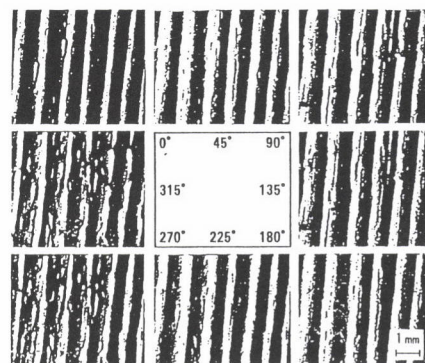
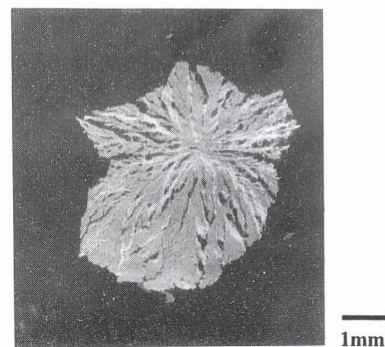


図7 方向性電磁鋼単結晶の磁壁移動の観察(表面酸化層付き)

図8 方向性電磁鋼単結晶の磁壁移動の観察(表面酸化層除去後平滑化处理)¹¹⁾図9 シンクロトロン放射光トポグラフィ法による二次再結晶粒内の下部欠陥構造の観察¹²⁾

す。磁化過程において、ランセット状の表面環流磁区が生成・消滅してエネルギーを消費していることが分かる¹³⁾。このような表面環流磁区は二次再結晶粒の傾角に依存し、結晶粒の $\{110\}<001>$ 方位への集積度を高めて傾角を 3° 以下に制御することにより表面環流磁区をなくすることができることが解明されている。

実験室において定量的に鉄損低減効果の評価を行った(図11)。その結果、①磁壁移動のピン止めサイトをなくすることにより 0.1W/kg の鉄損低減が、② $<001>$ 軸の圧延方向への集積度を高め(磁束密度; B_8 を 0.4T 高める)、傾角

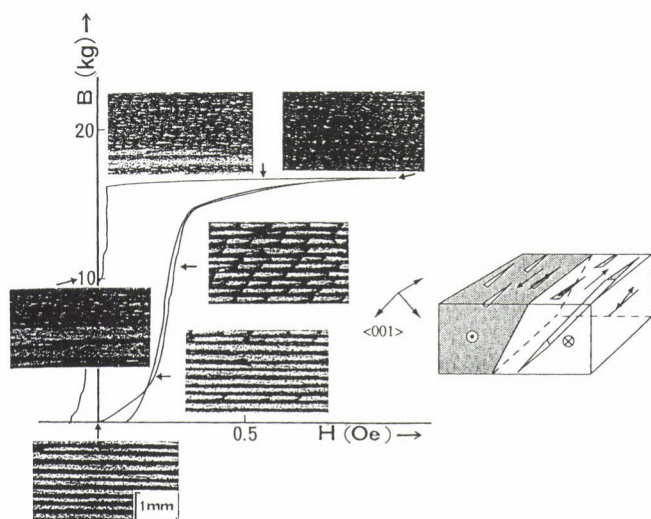


図10 {110} <001>方位との傾角4.5°の方向性電磁鋼単結晶の磁壁移動の観察¹³⁾

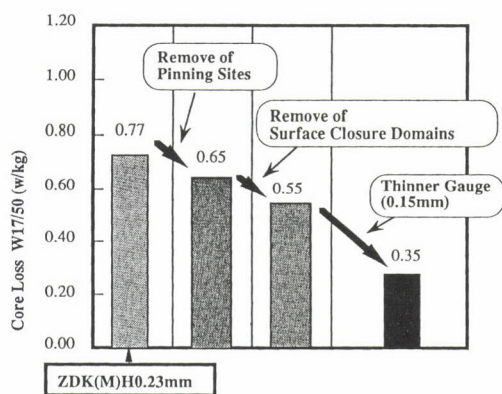


図11 方向性電磁鋼板の将来の低鉄損化への展望

を小さくすることにより0.1W/kg鉄損を低減できることが確認された。更に③板厚の薄い(0.15mm)材料で二次再結晶による方位制御を安定化させる技術を確認させることにより、0.35W/kg程度の現在の最高級グレードの約1/2の超低鉄損を実現することが可能である¹⁴⁾。

4 むすび

電気文明の中に生きる我々は、社会活動を拡大させると共に、電力消費量を増大させてきた。電力システムに不可欠な材料である電磁鋼板は、この100年間で金属学的・物理的アプローチによりその鉄損を1/10以下にまで低減してきた。現在、もし日本の全ての電力用変圧器に最高級グレードの電磁鋼板を用いたと仮定すると、年間約22億kWhの電力を節約することができる。これは約50万世帯、ほぼ島根県の電力使用量を賄うことができる量である。

今後の社会の発展とCO₂ガス削減等の地球環境問題を両立させるためには電力システムにおいて省エネルギー化を追求していく必要がある。電磁鋼板はこれからも、“エコマテリアル”として更に省エネルギー効果の高い製品の開発・普及を通じ、社会に貢献することが期待される。

参考文献

- 1) 菅 洋三：第155・156回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会編，(1995)，114.
- 2) 荒井賢一，石山和志：第155・156回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会編，(1995)，5.
- 3) W. F. Barret, W. Brown and R. A. Hadfield : Sci. Trans. Roy. Dublin. Soc., 1 (1900), 67.
- 4) K. Honda and S. Kaya : Sci. Rep. Tohoku Imp. Univ., 15 (1926), 721.
- 5) N. P. Goss : U. S. Patent No. 1965559.
- 6) S. Taguchi, A. Sakakura and H. Takashima : U. S. Patent No. 3287183, S. Taguchi, A. Sakakura, T. Wada, K. Ueno, T. Yamamoto and N. Urushiyama : U. S. Patent No. 3636579.
- 7) I. Goto, I. Matoba, T. Imanaka, T. Gotoh and T. Kan : Proc. Soft Mag. Mat., 2 (1975), 262.
- 8) T. Iuchi, S. Yamaguchi, T. Ichiyama, M. Nakamura, T. Ishimoto and K. Kuroki : J. Appl. Phys., 53 (1982), 2410.
- 9) B. Fukuda, K. Sato, T. Sugiyama, A. Honda and Y. Ito : Proc. ASM Conf. Hard and Soft Magnetic Materials, 8710-008 (1987).
- 10) H. Fujii, S. Yamazaki, T. Nagashima, H. Kobayashi, H. Masui and M. Shiozaki : J. Mat. Engineering and Performance, 3 (1994), 214.
- 11) T. Nozawa, M. Mizokami, H. Mogi and Y. Matsuo : J. Mag. Mag. Materials, 133 (1994), 115.
- 12) Y. Ushigami, Y. Suga, N. Takahashi, K. Kawasaki, Y. Chikaura and H. Kii : J. Mater. Eng., 13 (1991), 113.
- 13) K. Ueno, N. Takahashi and T. Nozawa : J. Mater. Eng., 12 (1990), 11.
- 14) Y. Ushigami, H. Masui, Y. Okazaki, Y. Suga and N. Takahashi : J. Mat. Eng. and Performance, 5 (1996), 310.

(1999年2月26日受付)