

Recent Activities in Research of Electrical Steel



小松原 道郎
Michiro Komatsubara
技術研究所 電磁鋼板
研究部門長・工博

要旨

この10年間の電磁鋼板研究において、1995年に終了した電磁鋼板の水島製鉄所での一貫製造化は重要な位置を占める。すなわち、数々の新規設備の導入を成功させるため、工場から依頼される多くの課題に対し研究部門は的確に答えていく必要があった。このため、電磁鋼板の成分、析出物、結晶組織、集合組織、鋼板表層組織について、その適正值を定量評価する研究技術と2次再結晶などの組織形成機構に関する新規理論の構築が進んだ。また、磁区細分化処理やモデルトランス、モデルモータなど応用磁気学的な研究も進んだ。こうした電磁鋼板研究の進歩により、電磁鋼板の品質の向上と各種新製品の開発に貢献できた。

Synopsis:

The integrated manufacture of electrical steels in Mizushima Works since 1995 has bestowed upon electrical steel research much development, because the research department has been obliged to rightly reply to many difficult questions as to conditions in operating several new process lines. Especially, the efforts to the progress of electrical steel research have been made on quantitative estimation for adequate values of materials such as components, precipitates, crystal structures, textures, surface microstructures, and so on. Moreover, the efforts have been made on constructing new theory of secondary recrystallization. Additionally, a research on magnetism has progressed in the field of magnetic domain refining techniques and in the area of applications of electrical steels for model transformers or model motors. These progresses have greatly contributed to the improvement of electrical steels and the development of new products at Kawasaki Steel.

1 緒 言

電磁鋼板は発電機、電動機、変圧器など電力の供給・変換システムの鉄心に使用される重要な機能材料である。特に、近年これらの機器の効率を高め省エネルギー化を推進することで大気へ放出されるCO₂量の削減に寄与するべく、その低鉄損化が求められている。

当社は、1931年に熱間圧延電磁鋼板の生産を開始して以来、1954年には無方向性冷間圧延電磁鋼板への転換、1959年の方向性電磁鋼板の製造開始、1973年の高磁束密度方向性電磁鋼板「RGH」の製造開始など電磁鋼板製品の品質向上への努力を営々と続けてきた。特に、ここ10年間では、効率的な製造と数々の新製品の開発を目的に、水島製鉄所での一貫製造を狙い、1995年に全製造設備の水島製鉄所移管や新設が完了した。

この間、開発された新製品や新プロセスに対して電磁鋼板研究部門の果たした役割も大きい。この小論はこれらの基礎となる新しい技術とその思想について概説しつつ、主要な新製品とその特徴を簡単に紹介する。

2 方向性電磁鋼板研究のトピックス

方向性電磁鋼板は、鋼中にインヒビターと称する鋼板の結晶成長を抑制する成分を含有させる点に特徴がある。すなわち、この技術は、インヒビターを鋼中に微細に分散させることで結晶成長を強く抑制し、結晶組織を細かく維持した状態にして高温長時間焼鈍（最終仕上げ焼鈍と呼称される）を施し、細かな結晶組織の中から磁気特性上有利な特定の方位の結晶粒を選択的に急成長させ（2次再結晶と呼称される）、磁気特性の優れた製品を得るものである。

したがって、製造上のポイントとしては、(1) インヒビターを鋼中に微細に分散・析出させる技術、(2) 結晶組織を微細に制御する技術、(3) 特定の方位の結晶粒を選択的に成長させる技術が重要である。

2.1 インヒビターの固溶微細析出技術の研究

この技術は、スラブ加熱においてインヒビターを鋼中に固溶させ、熱間圧延での加工中に微細に析出させることを骨子とする。

従来、スラブ加熱はガス炉での長時間均熱処理によってなされていた。この熱処理ではインヒビターが鋼中に固溶すると同時に結晶組織も巨大に成長し、熱間圧延での加工・再結晶により結晶組織を

* 平成10年9月28日原稿受付

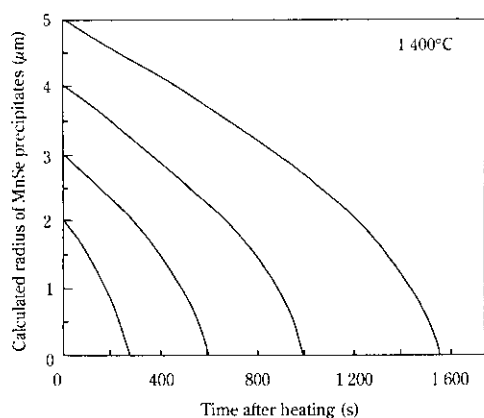


Fig. 1 Effect of initial MnSe size on computed dissolution kinetics

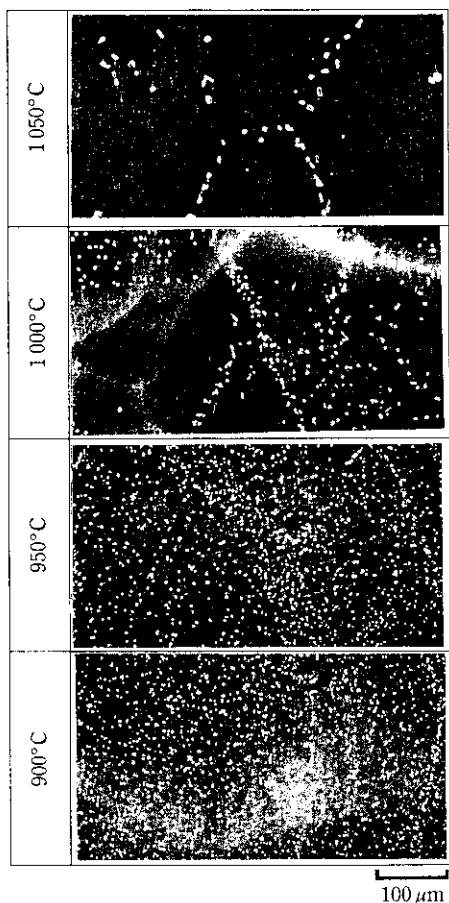


Photo 1 Effect of deformation temperature on the MnSe precipitation in the steel deformed and held for 60 s at various temperatures

細粒化することが完全にはできなかった。これに対し、スラブ加熱として高温で短時間の熱処理を施せばスラブの粗大な結晶成長を抑制し、かつインヒビターの完全固溶を促進することが可能となる。このため、電磁鋼板のスラブ加熱用としては世界で初めて電磁誘導加熱炉を導入⁹⁾した。しかしながら、連続鋳造時にスラブ中に粗大なサイズに析出したインヒビターの完全固溶条件を工業的に決定することは難しい。このために、昇温過程も含め複雑な熱処理に適用可能な逐次的温度変化対応のインヒビターの溶解・拡散モデル¹⁰⁾を構築した。Fig. 1 は初期径がそれぞれ2, 3, 4, 5 μm の大きさのMnSeの溶解挙動を計算した一例である⁹⁾。

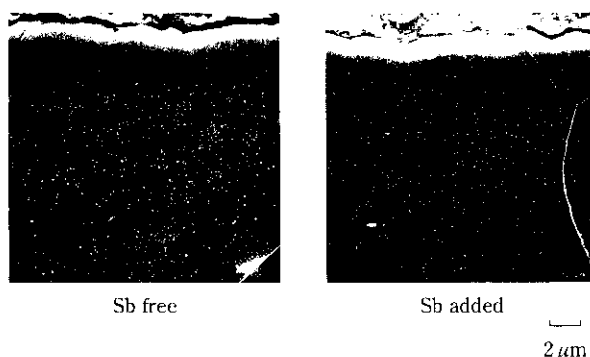


Photo 2 Cross sectional SEM observation of precipitated inhibitor in the vicinity of the steel surface

スラブ高温加熱の条件下でのインヒビターの析出に関しては、従来に増して高温の熱間圧延開始温度となることに加えて、従来の千葉製鉄所第1熱間圧延ラインに比較し長い水島製鉄所熱間圧延ラインに適合するインヒビターの析出条件を求める必要があった。したがって、インヒビターの析出挙動について基礎的な段階までさかのぼり再度研究を行い¹¹⁾最適な熱間圧延プロセス条件を調査した。この結果、インヒビターの微細分散析出は、鋼中に高密度の転位が存在することが必須であり、このためには、転位が消失しない温度と時間によって好適条件が定まることがわかった。Photo 1 は温度によるMnSeの析出状態の変化を調査した一例である⁹⁾。このような技術革新によりスラブ加熱後の粗大結晶粒成長が抑制され、従来から磁性不均一の原因のひとつとされてきた帯状の2次再結晶不良の発生が抑制された。

また、インヒビターの結晶粒成長抑制力に関する研究が飛躍的に進歩した。ひとつは、異種のインヒビターを複合析出させ抑制力を強化する技術である⁹⁾。これは、1種類のインヒビターを熱間圧延工程で極めて微細に析出させ、その後冷間圧延工程最初の焼鈍の昇温過程で別種のインヒビターを先に析出したインヒビターに接して複合的に析出させる技術であり、より強い抑制効果が得られることを見い出した。また、Sbなどの偏析型インヒビターの役割として粒界偏析による粒成長抑制作用の他に、鋼板表面に偏析し最終仕上げ焼鈍中の鋼板の窒化や酸化を抑制し2次再結晶を安定化する副次的な作用^{12, 13)}があることを明らかにした。Photo 2 は最終仕上げ焼鈍途中において鋼板表面の酸化による表層近傍のインヒビターの酸化・分解がSbの表面偏析によって抑制されている状態を示す。

2.2 冷間圧延工程研究の進歩

冷間圧延工程は、鋼板の1次再結晶組織と集合組織ならびに鋼板表層部組織の適正化が主要技術となる。水島製鉄所での方向性電磁鋼板の一貫製造化にあたり、設備面では、タンデム方式による世界初の高珪素鋼の連続圧延機や高速の脱炭焼鈍設備、最終仕上げ焼鈍炉の全数連続回転床炉方式化などの技術革新があった。このような技術革新にともない冷間圧延工程の研究も大きく進歩した。特に、脱炭焼鈍を高速で行うため、脱炭焼鈍時の1次再結晶組織や表層酸化物組織形成に大きな影響のある最終圧延前焼鈍に関する研究が進んだ。

すなわち、従来より行っていた最終圧延前焼鈍における鋼板表層の弱炭炭・弱珪処理の意味をより明確化し、この制御のための厳密な指標を与えるとともに、急冷処理にともない鋼中に析出する微細カーバイドの析出処理条件を新規脱炭焼鈍炉に適合するように

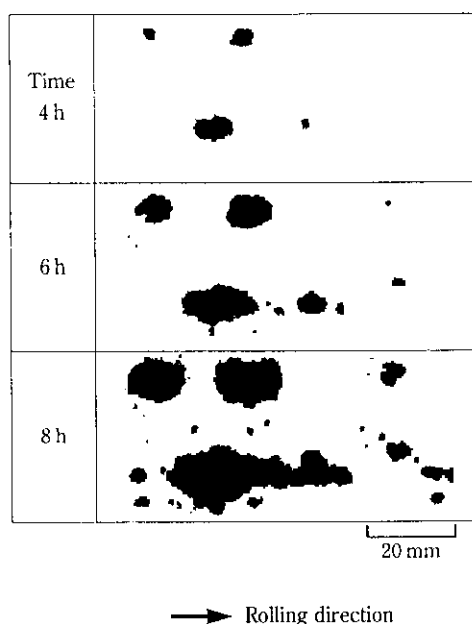


Photo 3 Secondary recrystallization behavior of RGH at 870°C observed by a newly developed ultrasonic method

り厳密に求めた。

圧延技術としては、温間圧延による集合組織制御の研究やタンデム圧延における集合組織や鋼板表面制御の研究がなされた。

さらに、高速脱炭焼鈍炉での多鋼種単一ライン処理を可能にするため、脱炭焼鈍のより深い研究を進める必要があった。このため、鋼板表層に生成するサブスケールの組織や組成の解析のための電気化学を応用した評価法を開発した⁹⁾。このような努力の結果、鋼板表層に生成するサブスケールの品質制御法としての前処理技術確立した。さらに、こうした結果をもとに基礎方程式による脱炭・酸化シミュレーションモデルを確立し研究活動に役立てている。

最終仕上げ焼鈍においては、2次再結晶理論に著しい進展⁹⁾が図られ、2次再結晶不良となる機構、結晶方位の劣る2次再結晶粒が出現する機構、およびこれらと良好な2次再結晶組織を得る条件との境界とを明確にした。また、2次再結晶粒の成長挙動を超音波を用いて非破壊的に観察する技術を開発し⁹⁾、2次再結晶に対する理解を深めた。Photo 3 は、RGH の2次再結晶粒の成長過程を超音波共鳴法によって非破壊的に追跡したものである⁹⁾。こうした2次再結晶現象の理解の深化にともない、2次再結晶粒成長の駆動力増大の根元であるインヒビターによる正常粒成長抑制力の定量評価、1次再結晶粒径の定量評価、1次再結晶集合組織の定量評価、2次再結晶に多大な影響を及ぼす鋼板表面状態の定量評価法を確立した。1次再結晶集合組織の定量評価については、日本で初めて導入した全自動型 EBSD (electron back scattering diffraction) 装置が威力を発揮した。Fig. 2 はこれによる集合組織の定量評価の例である。このような新規理論や評価法は工場の操業診断や品質管理にも活用され、製品の品質の大幅な向上に寄与できるようになった。

さらに、最終仕上げ焼鈍時において鋼板端部の形状が劣化する機構を明確化し形状の向上にも寄与できた。

2.3 磁区細分化技術および製品評価技術の進展

方向性電磁鋼板に磁区細分化処理を施すと鉄損が大幅に低減するが、この手法としてプラズマジェット照射による従来の方法¹⁰⁾を改め、最終冷間圧延後の鋼板表面に溝を設ける手法¹¹⁾に統一した。こ

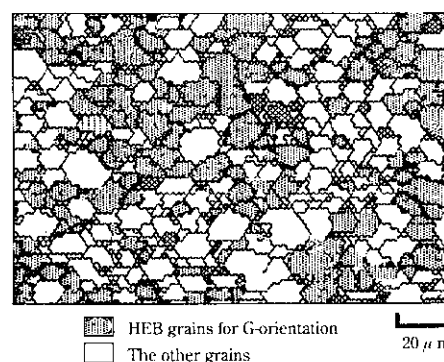


Fig. 2 Distribution of HEB grains (grains having high energy grain-boundary for a certain orientation) for G-orientation in primary recrystallized microstructure of high permeability 3% Si grain oriented steel: G-orientation is (110) [001], the ratio of HEB grains for which is 0.78. This means that G-orientation has a great advantage for grain growth.

の技術は、溝部に生成する磁極による反磁界によって磁区が細分化される現象を利用したものであるが、最適特性が得られる溝の形状や深さ、ピッチ、角度について実験的および理論的に求めた¹²⁾。

変圧器の性能は使用する方向性電磁鋼板の磁気特性に強く依存するが、この特性によって完全に決定されるものではない。特に、複雑な磁束の流れを有する T 接合部や L 接合部を持つ積層変圧器では、従来よりモデルトランスを用いて新材料を評価してきた。この材料評価技術を改善し、鋼板に加わる圧力や高次周波数成分がモデルトランスの励磁電流や鉄損および騒音にどのような影響を及ぼすかを正確に測定できるようにした^{13,14)}。これによって、新製品の優れた特徴が実機のトランスにいかに関与されるかをより正確に評価できるようになり、新製品紹介のための有力な道具となっている。

また、方向性電磁鋼板の結晶粒は通常数 mm から数 10 mm のものまで製法によって異なり、結晶組織の配置が、鋼板の磁化状態に影響し、磁気特性を支配することが予想されていた。この機構を解明するため、探針をプローブとする局所磁気特性の測定装置を新しく開発し結晶の形状やサイズが鋼板全体の磁束の流れに大きく影響することを見出した¹⁵⁾。Fig. 3 はこの装置により方位のずれた結晶粒周辺で異常な磁束の流れが生じ磁気特性を劣化させる状態を検出したものである。こうした技術は、2次再結晶粒の配置やサイズ分布の適正化に指針を与えるもので今後の有効活用が期待される。

3 無方向性電磁鋼板開発研究のトピックス

無方向性電磁鋼板は、鋼板の純度を高め、製品の結晶粒径を増大させ、かつ磁束密度を高め、鋼板表面性状の改良を図ることを本質技術とする。

3.1 高純度鋼溶製と製造技術の研究

無方向性電磁鋼板の成分として、Si, Al, Mn 以外の不純物を基本的には極力低減することが必要であることが従来より知られていたが、近年製鋼技術の進歩により、C, S, N, O の一段の低減が進められた。また、鋼中の介在物や析出物の形態や分散についての研究も進み、この方面における技術革新の研究も進展した¹⁶⁾。さらに、このような純度のよい鋼の性質を磁気特性の向上によりよく反映させるための研究も進展した。

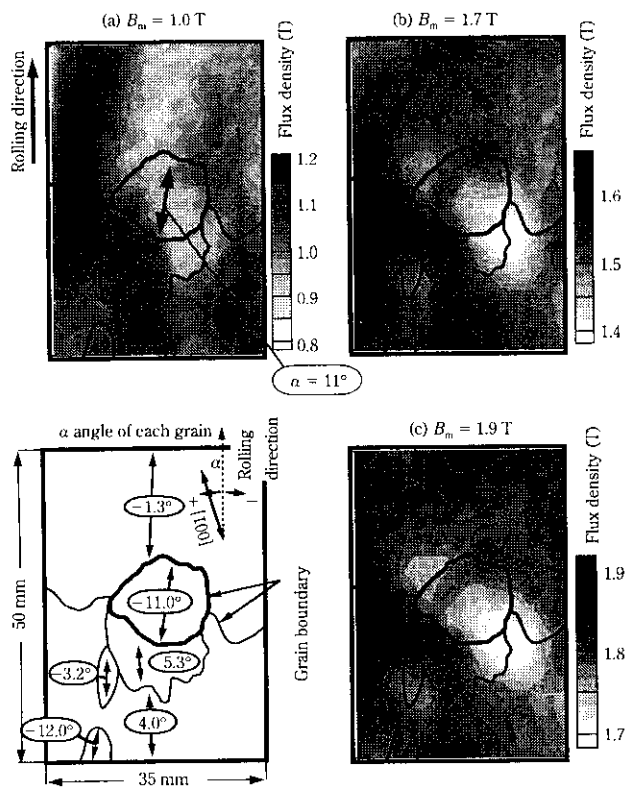


Fig. 3 Increase in distribution of flux flow around a large α angle-grain ($\alpha = 11^\circ$) with increasing magnetization of grain oriented Si steel shown in local flux density map observed by needle-probe method

3.2 集合組織の制御

無方向性電磁鋼板は製品の集合組織として (111) や (112) 強度を低減し、(100) や (110) 強度を増大させることがその磁気特性を向上させるのに有利である。上述のような結晶組織を創出する技術を集合組織制御と称しているが、川崎製鉄では、伝統的に Sb や Sn の鋼中添加技術を開発¹⁷⁻¹⁹⁾ してきており、こうした技術を低 Si 材にも拡大適用し、極めて透磁率の高い^{20, 21)} 製品を生み出した。

ところで、家電製品に使用されているモータとしては誘導モータが圧倒的に多い。このモータの損失は銅損が主体であるので、モータコアの磁束密度を高めることが有益となる。また、小型変圧器である EI コアの材料も高効率化のためには高磁束密度であることが要求される。こうした目的のためには電磁鋼板の集合組織を上述の方向へとさらに改善することが必要となる。このため、鋼成分、介在物、結晶組織の革新的な研究を行い²²⁾、RP や RMA シリーズにおける新製品を次々と生みだしてきた。Fig. 4 に RMA と RM の結晶組織を比較して示すが、RMA では、好ましい方位の結晶粒の存在頻度が高いことがわかる。

3.3 圧延技術

電磁鋼板の磁気特性のうち鉄損特性は、板厚が薄いほど Si 含有量が多いほど向上することが知られている。しかし、Si 含有量の増加にともなう硬度の上昇や延性・脆性遷移温度の上昇によりロールによる圧延加工は困難となる。したがって、工業的には、冷間板厚の最小限界や板厚偏差の限界や鋼中 Si 含有量の限界が存在し、また、センジマーミルでの高能率圧延やタンデム圧延による高生産圧延を難しくしてきた。しかし、この分野においても加工・制御研究

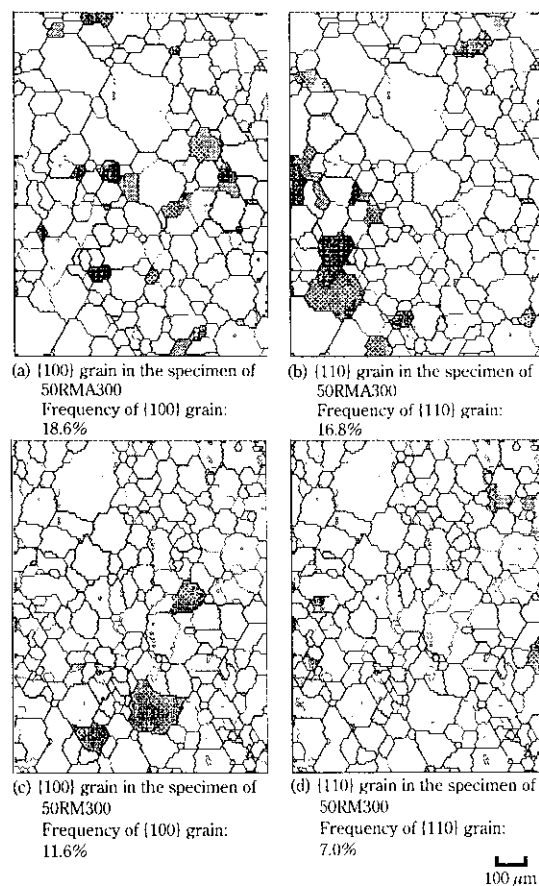


Fig. 4 Comparison of grain orientations in microstructure of the products after stress relief annealing between 50RMA300 (high permeability material) and 50RM300. {100} or {110} grains are favorable for improving permeability of materials.

部門の主導により新規圧延油やワークロールシフト技術の適用で著しい進歩をみた。

3.4 コーティング研究の進展

無方向性電磁鋼板は各種用途に使用され多様な形状に打抜き、せん断加工され、また加工後の鋼板は磁気特性の回復を目的として亜取焼鈍に供される場合が多い。無方向性電磁鋼板の鋼板表面は電気的絶縁性を付与するため絶縁コーティングを施しているが、上述のような使われ方のため、コーティングの特性として、絶縁性、打抜き性、耐熱性、耐錆性、溶接性などが要求される。川崎製鉄には、こうした要求を満たす汎用コートとして A 系コートがあるが、より優れた特性への改善研究が進んだ。また、こうした汎用コートの工場での塗布・焼付け処理を高速化可能とする組成研究も進展した。

また、溶接などの接合ができない用途や、積層時により気密が要求される用途に合わせて鋼板の加熱接着処理が可能な接着コート「B コート」も研究開発された²³⁾。

3.5 モータ特性評価技術の開発と適合材料の研究

無方向性電磁鋼板の磁気特性については、2次元測定²⁴⁾ などが提案されているが、採用されるには至っておらず、JIS2550 によって規定されているエプスタイン試験法で従来どおり評価されている。しかしながら、無方向性電磁鋼板の実際の用途は発電機、モータ、スイッチ、チョークコイル、EI コアなど多様であり、必ずしもエプスタイン特性が万能であるとはいえない。特に、モータ特性と

の関係については従来より活発な議論がなされてきた。

こうした問題を解決するため、単相誘導モータおよびインバータモータ、DC ブラシレスインバータモータなどをモデルモータとして取りそろえ、一連の無方向性電磁鋼板の材料特性が鉄損・銅損で表されるモータ効率やトルクに及ぼす影響についての評価を開始した²⁵⁾。こうした研究は完全に完結したわけではないが、この成果を新たな材料開発の指針として活用するとともに、お客様に対しモータの種類に応じた適切な製品を推奨することにも役立てている。

4 電磁鋼板 10 年間の新製品とその特徴

以下に、過去 10 年間ににおける新製品とその特徴を列記する。なお、詳細は川崎製鉄技報「電磁鋼板特集号」²⁶⁾を参照されたい。

- (1) 低磁場領域での低鉄損方向性電磁鋼板：「20RGHPD090」
鋼板板厚は 0.20 mm、磁区細分化処理を有する、 $W_{15/50}$ や $W_{15/60}$ といった低磁場設計での変圧器の鉄損低減に有利。
- (2) 高磁場領域まで広範囲での低鉄損方向性電磁鋼板：
「23RGH090N, 23RGHPD085N, 27RGHPD090N」
高磁束密度かつ低鉄損の材料。「23RGHPD085N」は $W_{17/50}$ といった高磁場設計での変圧器の鉄損低減に最も有利。「23RGH090N」は磁区細分化処理がされておらず、より高磁場領域における鉄損低減にも有効。「27RGHPD090N」は板厚が 0.27 mm であり、積み工数を削減できる。これらはいずれも高磁束密度材であり、変圧器の低騒音化に有効。
- (3) 高磁束密度方向性電磁鋼板：「27~35NewRGH」
 B_2 ：1.94 T 近傍の値で、極めて高磁束密度な材料。変圧器の低騒音化に威力を発揮する。
- (4) 低鉄損無方向性電磁鋼板：「50RM230, 35RM210」
金属組織の改善により、従来に増して低鉄損化を実現、前者の板厚は 0.50 mm、後者は 0.35 mm。各種発電機など大型回転機の鉄心材料に最適。また、特殊モータの効率アップにも有効。
- (5) 高磁束密度無方向性電磁鋼板：「50RP1~3, 50RP1H~3H」
{111} 強度を低減し、{110} 強度を強化し磁束密度を向上させ

た。EI コアやモータの小型化のニーズに適合する。

- (6) 歪取焼鈍後低鉄損無方向性電磁鋼板：
「50RMA300, 35RMA250」
組成の再設計と鋼板の高純度化により、歪取焼鈍後において高磁束密度と低鉄損を得ることを特徴とする RMA シリーズの最高級品。RMA シリーズは一般に AC 誘導モータの高効率化に威力を発揮するが、これらの製品は低鉄損であるためインバータ駆動方式の DC モータの高効率化にも有効である。
- (7) 高周波低鉄損無方向性電磁鋼板：「20RMHF1500」
鋼板板厚を 0.20 mm とした無方向性電磁鋼板。高電気抵抗と板厚低減により、高周波鉄損 $W_{10/400}$ を大幅に低減した。小型高速特殊モータなどに好適。
- (8) 接着型コーティング：「B コート」、「耐熱型 B コート」
鋼板表面の絶縁コーティングが有機樹脂被膜からなり、150~300°C の接着温度下で 0.5 N/mm² 以上の加圧力により 10 N/mm² 以上の良好な接着強度を得る。打抜き後のモータの鉄心などの一体化技術のひとつとして使用されている。

5 結 言

電磁鋼板は「鉄の芸術品」と呼ばれ、その製造技術の中にはその時々における最先端の鉄鋼製造技術が盛り込まれている。しかし、高度な技術もさることながら、やはり、工業製品に要求される大量生産性、品質安定性などが重要視され、水島製鉄所への移行によって高効率、高品質の一貫製造体制の確立に成功した。この間、電磁鋼板研究は、新しい製造技術や新製品開発に取組み本報で述べたような成果をあげることができた。

今後、社会のニーズは急速に省エネルギー化、低騒音化の方向に移行しつつあり、電磁鋼板に対する低鉄損化、高磁束密度化の要請もますます強まっている。また、電磁鋼板の機械的性質のより的確な制御や鋼板寸法のより高精度な制御など、お客様からの期待も大きい。こうした要請に答えるべくお客様の声に積極的に耳を傾け、さらに新たな技術を駆使していくことで今後も電磁鋼板の研究ならびに新製品開発の努力を続けていく所存である。

参 考 文 献

- 1) 川崎製鉄(株)：特公平 6-104867
- 2) M. Muraki, Y. Ozaki, T. Takamiya, H. Yoshida, and T. Obara: Proc. of 7th Int. Symposium on Physical Simulation, (1997), 177
- 3) 高宮俊人、村木峰男、尾崎芳宏：川崎製鉄技報，**29**(1997)3, 143-146
- 4) 村木峰男、前田千寿子、小松原道郎：CAMP-ISIJ, **11**(1998), 460
- 5) 小松原道郎、早川康之、黒沢光正、岩本勝生、石飛宏威：CAMP-ISIJ, **4**(1991), 835
- 6) 渡辺 誠、土 力、石飛宏威、小松原道郎：CAMP-ISIJ, **7**(1994), 1819
- 7) H. Toda, K. Sato, and M. Komatsubara: J. of Mater. Eng. and Perform., **6**(1997)6, 722-727
- 8) Y. Hayakawa and J. A. Szpunar: Acta mater., **45**(1997)3, 1285-1295
- 9) 定広健一、本田厚人、小松原道郎：CAMP-ISIJ, **7**(1994), 1818
- 10) 貞頼捷雄、飯田嘉明、福田文二郎、岩本勝生、佐藤圭司、清水洋：川崎製鉄技報，**21**(1989)3, 239
- 11) 佐藤圭司、福田文二郎、菅 孝宏、日名英司、後藤公道：まてりあ，**34**(1995)6, 777-779
- 12) M. Ishida, K. Senda, K. Sato, and M. Komatsubara: Electromagnetic Phenomena Applied to Technology, Ed. M. Enokizono, JSAEM, (1996), 260
- 13) 石田昌義、佐藤圭司、小松原道郎：電気学会マグネティックス研究会資料，MAG-95-20(1995)
- 14) 石田昌義、佐藤圭司：電気学会マグネティックス研究会資料，MAG-96-105(1996)
- 15) 千田邦浩、高宮俊人、石田昌義、小松原道郎：電気学会マグネティックス研究会資料，MAG-96-115(1996)
- 16) 川崎製鉄(株)：特開平 8-3699
- 17) 川崎製鉄(株)：特公昭 56-54370, Kawasaki Steel Corp.: Jpn. Kokoku 56-54370
- 18) 川崎製鉄(株)：U.S. Patent 4 204 890
- 19) 川崎製鉄(株)：U.S. Patent 4 293 336
- 20) 小松原道郎、中村広登、松村 裕：CAMP-ISIJ, **2**(1989), 1935
- 21) 高島 稔、真鍋昌彦、小原隆史：CAMP-ISIJ, **5**(1992), 1921
- 22) 高島 稔、篠原雅典、本田厚人、岡村 進、森江延行：まてりあ，**36**(1997)4, 385-387
- 23) 小森ゆか、足立重好、寺嶋 正：川崎製鉄技報，**29**(1997)3, 187-188
- 24) M. Enokizono: JSAEM, Studies in Applied Electromagnetics, **1**(1992), 3
- 25) A. Honda, B. Fukuda, I. Ohyama, and Y. Mine: J. Mater. Eng., **12**(1990), 141
- 26) 電磁鋼板特集号：川崎製鉄技報，**29**(1997)3