

TODAY

## 持続可能な社会の構築に向けて鉄鋼業の課題



JFEスチール㈱  
常務執行役員 スチール研究所副所長

### 小松原 道郎

#### 1. 国際社会の抱える喫緊の課題

欧米なみの生活水準を目指し高度成長を遂げた日本は、多くの資源とエネルギーを消費し大量の廃棄物を排出してきた。また、現在BRICs諸国が後を追っている。従って、資源・エネルギー枯渇や生産物・廃棄物の環境負荷への増大がますます深刻な問題となり、われわれや次世代の豊かさを維持するためには、これらの解決が喫緊の課題となっている。

#### 2. 日本鉄鋼業の課題

日本鉄鋼業は、従来からこの分野においても多くの対策を講じて、高生産性と環境対応技術で世界をリードしてきたが、1996年、(社)日本鉄鋼連盟は「鉄鋼業の環境保全に関する自主行動計画」を策定し本格的に環境保全問題に取り組んでいる。

P.T.アナスタスはグリーンケミストリー12か条として製造業の環境負荷低減手法をまとめたが、鉄鋼業はほぼ全項目について取り組んでいる。次の6項目は喫緊の課題として特に力点がおかれているものである。

- 1条：高炉スラグセメントなど副生物の価値化技術（廃棄物をださない）
- 3条：蛍石不使用精錬などの技術開発（人体と環境に害の少ない反応物・生成物の利用）
- 4条：クロメートフリー化など代替商品開発（機能同等の場合、低毒性物質を採用）
- 5条：CO<sub>2</sub>削減技術の開発（補助物質の低減、無

害物質の採用）

6条：排ガス・蒸気・熱回収など省エネ技術（環境と経費への低負荷化、省エネ化）

7条：鉄スクラップ使用量の増加（原料を枯渇性資源から再生可能資源へ変換）

こうした取り組みの結果、日本鉄鋼業は世界で最も効率的・省エネ型の生産方法を採用し、例えば、エネルギー原単位で、中国は日本の1.5倍、米国は1.25倍、EUは1.1倍と高い。さらに、これらの技術はグリーンエイドプランやCDMの形で他国の環境保全にも役立っている。

#### 3. 日本鉄鋼業の技術的優位性の持続

現在、日本自動車産業は国際競争で圧倒的優位にあるが、この優位性は1970年のマスキー法に端を発する。日本自動車メーカーは、極めて厳しいこの排ガス規制値をクリアし、これがその後の日本車の低燃費、信頼性向上と競争力の向上につながった。

鉄鋼業の環境対応技術も将来の国際競争力の源泉となり得る。このためには、この技術を経済合理性のもとに正当に評価する仕組みを構築することが必要と考える。

例えば、鉄は資源枯渇指標においても優れており環境負荷も極めて小さく持続型社会への適応度が高い。また、名古屋大学の武田邦彦教授が提唱するように、リサイクルエネルギー負荷の大きいペットボトルよりもリサイクル性の点で経済合理性が高い。例えば、容器材としてスチール缶利用促進のインセンティブの付与の仕組みが考えられる。

また、省エネ値、低CO<sub>2</sub>排出値が価格に反映されれば、非効率で使用エネルギー過多の製鉄設備は国際的に淘汰されていくであろう。

最後に、10年後、20年後の日本の外貨獲得産業として鉄鋼技術を維持・振興していくためにも、大学には鉄鋼分野においても将来を担える人材の持続的育成をお願いしたい。

# 「変圧器の電力損失削減のための革新的磁性材料の開発」成果報告

鉄鋼材料研究部 板垣省三

## 1 はじめに

本開発は、変圧器の磁性材料の磁氣的損失を大幅に改善した革新的磁性材料を開発することを目的に、地球温暖化防止新技術プログラムの一環として平成14年度は経済産業省、15、16年度はNEDO技術開発機構から委託を受け、3か年の計画で実施された。

電力の送配電時には、発電所での昇圧変圧器、変電所での変電用変圧器、工場や大型ビル等での高圧受電変圧器、電信柱上の柱上変圧器等、多様な型式の変圧器が使用され、変圧器による損失は、総発電量の2.24%を占める。この損失のうち、約50%が磁性材料に起因するため、2010年に予想されている総発電需要量に対して、変圧器による電力損失は272億kWh、変圧器の磁性材料による損失は136億kWhに達すると予測されている。変圧器の磁性材料として使用される方向性電磁鋼板の品質特性は、日本製品が最高水準であり、磁束密度の極限までの向上、鋼板の板厚の低減、磁区を担う磁区の細分化技術等の開発により年々その鉄損が低減されているが、ここ数年は技術的に飽和状況になっている。このため、送配電変圧器の電力変換効率に直接かかわる磁性材料として大幅に磁氣的損失を改善した革新的な磁性材料(電磁鋼板)の開発が望まれている。

## 2 研究開発の背景と目的

変電所等送配電経路で使用されている変圧器での電力損失の低減を目指して、変圧器の電力変換効率に直接かかわる磁性材料として、既存の材料と比較し大幅に磁氣的損失を改善した革新的磁性材料を開発、実用化することにより、変圧器の性能を格段に高め、高効率送配電システムを構築し、省エネルギーとCO<sub>2</sub>排出量の削減へ貢献することを目的としている。

本開発は、半導体の製造等で用いられているPVD(物理蒸着)、CVD(化学

蒸着)技術を応用し、方向性電磁鋼板に大きな張力を付加し得るサブマイクロン厚さの薄膜を表面にコーティングすることによって、磁区幅の画期的な細分化を達成し、方向性電磁鋼板の磁氣的損失を大幅に低減する技術の実用化を図ると同時に、この開発材料の材料特性を最大限に利用して送配電用変圧器の電力変換効率を格段に高めることを目指すものである。

具体的な研究開発課題と最終目標は、次のとおりである。

### (1) 鉄損低減に最も効果的な薄膜物質の探索とその高速成膜技術の開発

変圧器用最高級電磁鋼板の鉄損値(W17/50を現状の0.75W/kgから0.60W/kg以下に20%以上低減する膜物質を開発する。また、最適膜物質を最も経済的に成膜し得る乾式成膜技術(PVD,CVD)の開発を行い、電磁鋼板コイルの高速成膜技術(2000 1分以上)を確立する。

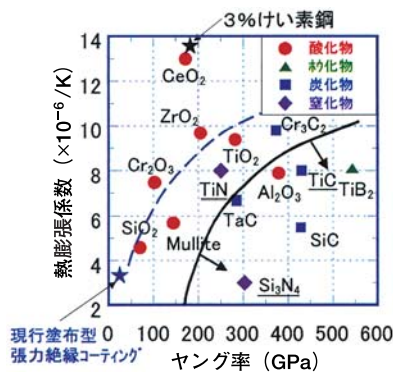


図-1 各種膜物質のヤング率と熱膨張係数の関係

### (2) パイロット規模の小型試験コイルを用いた高速・連続成膜技術の開発

(1)の技術を用いたパイロット規模の電磁鋼板処理装置を開発し、小型試験コイルを用いて高速・連続成膜実験を行い、材質特性目標を達成可能な成膜処理プロセスの最適な操業条件を探索し、高速・連続成膜技術を確立する。また、同時に経済性のある技術であることを確認する。

### (3) 高性能変圧器の設計・製作と性能評価

(2)のパイロット規模の高速・連続成膜試験装置で作製した開発材料を用いて実用規模の数種の変圧器を試作し、現行材を使用した同型の変圧器との性能比較及び信頼性評価試験を行い、変圧器の電力損失(鉄損分)を20%以上低減できることを確認する。

本技術開発は、JRCM、JFEスチール(株)、アルバック株(平成15年度以降中止)の3社が参画して推進された。

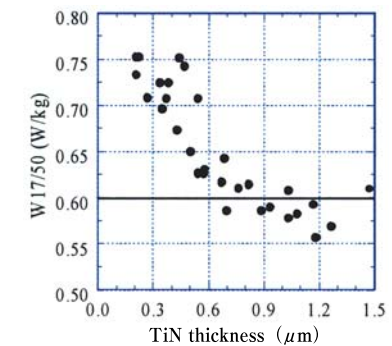


図-2 TiN成膜厚みと磁気特性の関係

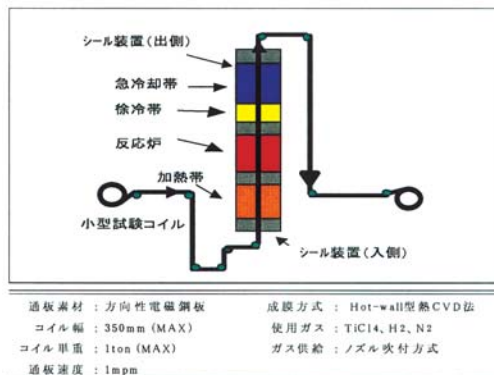


図-3 パイロット規模CVD試験装置の構成と仕様

### 3 研究開発成果の概要

磁性材料(電磁鋼板)の鉄損低減に効果的な薄膜物質の探索等に関して、基礎的な検討から開始し、工業化に必須である高速成膜技術のラボ試験検討を実施した。さらに、これらの成果を適用して、パイロット規模の電磁鋼板処理装置を設計・製作、薄層皮膜電磁鋼板コイルを得て、変圧器を製作し性能評価を実施した。これらの研究開発によって次のような研究成果が得られ、当初の開発目標が達成された。

#### (1) 鉄損低減に最も効果的な薄膜物質の探索とその高速成膜技術の開発

張力付加による磁区細分化効果の観点から、鋼板への張力を最大化して鉄損の低減を達成できる膜物質として、膜物質の弾性係数、熱膨張係数、成膜温度及び膜厚が大きく影響することをラボ試験で確認した。薄膜物質としては電磁鋼板と薄膜物質との熱膨張率の差を利用して鋼板に張力を発生させることから、ヤング率が高く、かつ熱膨張係数が小さい、チタン及びけい素の炭化物や窒化物、具体的にはTiN、TiC、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、SiC等の化合物が有効であることを明確化した。各種膜物質のヤング率と熱膨張係数の関係を図-1に示す。また、高速成膜技術では、ラボ試験装置を用いてPVD法、CVD法の両法において2000・m/分以上の成膜速度の条件で0.60W/kg以下の磁気特性を達成できることを確認した。

次に、成膜技術としてPVD法とCVD法の品質(磁気的特性・被膜密着性及び経済性(成膜速度・製造コスト))の評価を行い、今後の技術の発展性等総合的に勘案し、パイロット規模の電磁鋼板処理装置による高速成膜技術の開発に関しては、CVD技術を採用することとし、最適な膜物質及び膜厚等の基礎検討をラボ試験にて実施した。CVD技術における膜物質は、鋼板の実用化時に不可避的に行われる絶縁被膜の焼き付けと歪取り焼鈍における被膜密着性の不良、析出物形成による履歴損劣化等が問題になるため、窒化物であるTiN薄膜を選択した。さらに、磁気特性の目標値を達成するために必

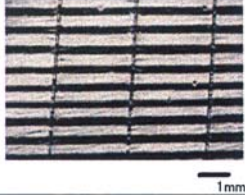
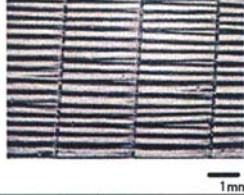
	TiN成膜前	TiN成膜後
磁区構造		
鉄損 W <sub>17/50</sub>	0.79W/kg	0.63W/kg

図-4 TiN成膜前後の磁区構造と鉄損

要な鋼板へのTiN薄膜の膜厚は、絶縁被膜塗布焼き付け後、歪取り焼鈍後の密着性等を考慮して0.7μm以上とした。TiN成膜の厚みと磁気特性の関係を図-2に示す。

#### (2) パイロット規模の小型試験コイルを用いた高速・連続成膜技術の開発

パイロット試験装置の電磁鋼板への高速・連続成膜法として、膜構造の単純性、大量生産性及び技術的発展性の観点から、CVD技術を採用した。パイロット試験装置の構成及び主要な装置仕様を図-3に示す。装置は性能確認のための最低限の仕様として、小コイル幅350mm(MAX)、通板速度1mpm(MAX)とした。成膜炉は加熱帯・反応帯・冷却帯(徐冷・急冷)の3ゾーンにより構成され、各ゾーン間には、炉圧制御用のシール装置が設けられている。成膜は電気ヒータで1100程度に加熱された反応帯において、ノズルから鋼板表面に向けて四塩化チタン(TiCl<sub>4</sub>)ガスをキャリアガスとともに吹き付けることにより行われる。成膜終了後のガスは、排ガス処理装置によって中和処理し、多量の空気と混合して水素濃度を爆発限界未満に希釈した後、水で洗浄して屋外に放出される。



図-5 TiN成膜コイルと試作変圧器の外観

パイロット試験装置を用いて、板厚0.23mm、板幅350mmの方向性電磁鋼板小型コイルにTiN成膜処理を行い、2000/分以上の成膜速度で0.7μmの高張力のTiNを成膜することが可能であることを確認した。TiN成膜電磁鋼板は磁区細分化が効果的に行われ、鉄損値(W<sub>17/50</sub>)が0.79W/kgから0.63W/kgへ約20%低減されることを確認した。TiN成膜前後の磁区構造と鉄損値を図-4に示す。また、歪取り焼鈍後の被膜密着性も良好であった。

#### (3) 高性能変圧器の設計・製作と性能評価

パイロット規模の電磁鋼板処理装置により作製したTiN成膜電磁鋼板コイルを用いて、実機変圧器を試作し、変圧器の電力損失等を調査した。試作した変圧器は単相巻30kVA、単相巻100kVA、3相積1000kVAの3種で、比較のため従来材(23JGSD)を鉄心材料に用いた変圧器も併せて試作した。開発材は、従来材と同様に問題なく切断加工が可能であった。

TiN成膜処理後の電磁鋼板コイルと試作した変圧器の外観写真を図-5に示す。開発材を用いて試作した変圧器の鉄損(無負荷損失)は、従来材の最高級グレードの方向性電磁鋼板に対し

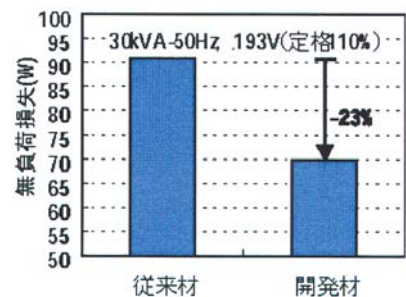


図-6 変圧器無負荷損失の比較 (30kVA巻変圧器)

最大23%改善し、騒音特性も優れていることを確認した(図-6)。

## 4 おわりに

変圧器の磁性材料の磁氣的損失を改善するために、世界で初めてCVD技術を適用した高速成膜技術を確立し、

電磁鋼板へTiN成膜処理を行うことにより鉄損値(W17/50)を現状の最高級電磁鋼板に比較して大幅に低減可能な膜物質を開発した。また、実用規模の変圧器を試作し、鉄損低減効果を明確化して実用化の可能性が高いことを確認した。本技術は、変圧器の電力損失削減

のために極めて有望な技術であり、今後も早期の実用化に向けてさらなる技術開発を推進させていく予定である。

### 引用文献

- 1)「変圧器の電力損失削減のための革新的磁性材料の開発」平成14～16年度成果報告書(2005年5月)

### セミナーのお知らせ

#### ナノメタル鉄系研究成果公開シンポジウム 「ナノCu析出を活用した 鋼材特性の向上」

主催：(社)日本鉄鋼協会「材料の組織と特性部会」・JRCM 共催  
日時：3月23日(木) 9:00～12:10  
場所：早稲田大学 大久保キャンパス  
(社)日本鉄鋼協会第151回春季講演大会第17会場

NEDOプロジェクト「ナノメタル」の鉄系研究体では、将来にわたるスクラップ問題と析出強化型鋼の強度・延性バランスの向上における軟質粒子の活用という観点から、ナノサイズのCu粒子析出を利用したCu添加鋼に注目し、フェライト系でのCu析出の基礎的研究から実用化を睨んだマルテンサイト系実験鋼の試作まで幅広く行ってきました。本シンポジウムは、鉄鋼関係者に5年間のプロジェクトの成果を公開し、次なる研究分野の発展につながることを目的として開催します。析出強化メカニズム、強度・延性バランスの向上、微細析出物の評価方法や析出予

測計算等に興味をもたれている関係者の多数のご参加を期待しています。

参加費：無 料

参加申込：事前申込不要

問い合わせ先：JRCM鉄鋼材料研究部  
櫻谷  
TEL 03-3592-1283  
FAX 03-3592-1285  
E-mail：tsakuraya@jrcom.jp

#### 異業種交流セミナー 「エネルギー資源・その高効率利用技術と それらを支える材料技術の開発最前線」

日時：4月21日(金)  
場所：東京電機大学 神田キャンパス  
11号館17階大会議室  
主催：(社)日本鉄鋼協会  
定員：100名  
参加費：一般6,000円、学生3,000円  
(資料代含む)  
問い合わせ先：(社)日本鉄鋼協会  
総務グループ 亀井  
TEL 03-5209-7011  
FAX 03-3257-1110  
E-mail somu@isij.or.jp

The Japan Research and Development Center for Metals  
JRCM NEWS / 第233号

内容に関するご意見、ご質問はJRCM 総務企画部までお寄せください。  
本誌は地球環境保全を考慮し再生紙を使用しています。  
本書の内容を無断で複写・複製・転載することを禁じます。

発行 2006年3月1日  
発行人 小島 彰  
発行所 財団法人 金属系材料研究開発センター  
〒105-0003 東京都港区西新橋一丁目5番11号 第11東洋海事ビル6階  
TEL (03)3592-1282(代)/FAX (03)3592-1285  
ホームページURL <http://www.jrcm.or.jp/>  
E-mail jrcom@oak.ocn.ne.jp