# 次世代ナノ結晶軟磁性材料の変圧器鉄心への適用



中国中国中国中国A●●●●A●●<td

■ 須永 善則 Yoshinori Sunaga

次世代ナノ結晶軟磁性材料ナノメット(NANOMET<sup>®</sup>,以下,ナノメット)は、優れた軟磁気特性を有する磁性材料 である。ナノメットは、材料レベルでは飽和磁東密度が高いため、変圧器に適用した場合、超高効率変圧器鉄心に使 用される Fe 基アモルファス合金に対して鉄心断面積を小さくすることが可能であり変圧器全体としてコンパクト化が 図れるといった特長を持つ。さらに無負荷損が低いため、高効率変圧器に使用される方向性電磁鋼板と比較して変圧 器の低損失化が図れるといった優位性が挙げられる。一方その優れた軟磁気特性を発現させるためには、ナノレベル の金属組織の微結晶化が必要であり、そのためには適切な熱処理が必須となる。その熱処理だが、条件によっては軟 磁気特性に大きく影響する。

東光高岳では、これまでナノメットについて素材レベルから鉄心形態での検証へスケールアップさせ、プロトタイ プ変圧器の鉄心に適用するまでの研究に取り組んでおり、各課題を解決し変圧器適用への可能性を見出してきた。本 稿では、研究の概要と10kVA プロトタイプ変圧器の試作および評価に取り組み、従来の高効率変圧器と同等以上の軟 磁気特性を確認したので報告する。

# 1 はじめに

文

論

世界的規模における地球温暖化対策の必要性が叫ばれ て久しいが,近年欧米やアジアを中心に環境保全の取り 組みが活性化してきている。

これまで国内においては,一般産業用変圧器に関して は2006年に油入変圧器,2007年にはモールド変圧器 にトップランナー制度が導入され,さらに2014年に第 2次トップランナー制度の新基準が導入された。変圧器 の高効率化は,常時一定に生じている無負荷損低減のた めの鉄心の改良や代替が不可欠である。一般社団法人日 本電機工業会が定めたトップランナー変圧器2014にお いて東光高岳では,さらに改善された方向性電磁鋼板な どを採用し,省エネ化による機器外形や質量の増加抑制 の実現に至っている。欧州,米国,中国,東南アジアな どにおいても,電力分野の環境対策のため,配電用変圧 器高効率化のための規制強化が進められてきている<sup>(1)</sup>。

以上のような背景から,東光高岳では,さらなる変圧 器の高効率化の一方策として,次世代ナノ結晶軟磁性材 料ナノメット(NANOMET<sup>®</sup>,以下,ナノメット)を 適用した変圧器の開発に着手している。これまで我々 は,ナノメットの材料レベルの検証からスケールアップ させプロトタイプ変圧器鉄心に適用するまでの一連の検 証に取り組み,各ステップにおける課題に対し変圧器適 用への可能性を見出してきた。その結果,従来の高効率 変圧器と同等以上の磁気特性を確認したので報告する。

2 ナノメットの概要

ナノメットは、「東北発 素材技術先導プロジェクト超

低損失磁心材料技術領域(文部科学省,復興庁)2012 年6月~2017年3月」の中で,国立大学法人東北大学 金属材料研究所によって開発された基本組成 FeSiBPCu から成るナノ結晶軟磁性合金の磁性薄帯である<sup>(2)(3)</sup>。 ナノメットは,現在東北大学発ジョイントベンチャーの (株)東北マグネットインスティテュートが製造してい るがまだ上市されていない。ナノメットおよび比較材と の軟磁気特性の比較を図**1**に示す<sup>(2)</sup>。

ナノメットの特長は、方向性電磁鋼板に匹敵する飽和 磁東密度とFe基アモルファス合金より高い透磁率(低 い無負荷損)を有していることにあり、この優れた軟磁 気特性は素材の高Fe濃度が大きく寄与している<sup>(4)</sup>。一 方その優れた軟磁気特性を発現するためには、急冷アモ ルファス組織からナノレベルの金属組織の結晶化が必要 であり、そのためには熱処理が必須となる。その熱処理 だが、条件によっては軟磁気特性に大きく寄与する<sup>(5)</sup>。 また熱処理前のナノメットはアモルファス状態であるた めハンドリング性に問題はないが、熱処理後のナノメッ



図1 ナノメットおよび比較材との軟磁気特性の比較<sup>(2)</sup>

トは微結晶化に伴い脆化するため、変圧器の製造工程に おいてはハンドリング性の難易度が高くなる。

# 3 検討内容

## 3.1 ナノメット単板試料による検証

(1) ナノメットの基本特性

ナノメットの熱的特性を把握するために DSC (示差走 査熱量分析装置) で分析した。その結果を**図2**に示す。



図 2 ナノメットの DSC チャート

熱処理前のナノメットを加熱すると、400℃を超えた 温度域で $\alpha$ -Fe 結晶化に伴う発熱反応が見られた。さら に加熱を進めると500~550℃の間で Fe-B 結晶化(化 合物の析出)に伴う発熱反応が現れた。一方一度最適な 温度で熱履歴を与えたナノメットに対して、上述と同じ ように再加熱を施すと $\alpha$ -Fe 結晶化の発熱反応は見られ ず、Fe-B 結晶化に伴う発熱反応のみが認められた。ま た結晶構造が変化したことで Fe-B 結晶化の発熱ピーク は低温側へシフトした。この結果から、ナノメットの最 適な熱処理温度範囲が明らかになった。

熱処理後のナノメットの結晶構造を把握するために XRD(X線回折装置)で分析した。その結果を図3に 示す。

最適な条件で熱処理したナノメットは, α-Fe 結晶の みのピークが確認された。また,この結果から求められ る結晶子サイズの最適値は 15~25 nm の範囲内であっ た。これらは、ナノメットの熱処理は限られた条件で実 施する必要があることを示している。

(2) ナノメットの軟磁気特性

熱処理炉を用いて大気雰囲気でナノメットの熱処理を 実施し,熱処理後の軟磁気特性を取得した。その結果を 図4,図5に示す。

図4から磁束密度は1.80T以上であることが確認で きた。また図5から、ナノメットの無負荷損は鉄基アモ ルファス合金より若干高いが、方向性電磁鋼板より低い ことが確認できた。したがって、ナノメットを変圧器の





図 4 ナノメット単板試料の軟磁気特性



図5 ナノメット単板試料の軟磁気特性

鉄心に適用した場合,鉄基アモルファス合金と比較して 鉄心断面積を小さくすることが可能であり,変圧器全体 としてコンパクト化が図れるといった利点が考えられる。 さらに無負荷損が低いため,方向性電磁鋼板と比較して 変圧器の低損失化が図れるといった優位性が挙げられる。

#### 3.2 ナノメット鉄心形態での検証

### (1) ナノメット 500 VA 鉄心での検証

現行の変圧器の製造工程には、矩形の鉄心と巻線を個 別に製作し、鉄心の1辺を開放し巻線を組み込み、開 放した1辺を再度閉じて鉄心形態に戻す工程がある。 これがラップ工程である。ラップ工程ではラップ部で鉄

項目	仕様		
容量	500 VA		
鉄心重量	約 3.5 kg		
鉄心寸法	194 mm $ imes$ 100 mm $ imes$ 50 mm		

表 1 ナノメット 500 VA 鉄心の諸元



(a) ラップ工程前



図 6 ナノメット 500 VA 鉄心ラップカット部の状況



図7 ナノメット 500 VA 鉄心の軟磁気特性

心材料を複数枚ずつ交互に重ね合わせ閉磁路を形成する 必要があるが、ラップ工程後はラップ工程前と同形態で あることが軟磁気特性の低下抑制のためには望ましい。

ここでは、熱処理条件の探索とラップ工程による軟磁 気特性への影響について明確にするために 500 VA 鉄心 の形態に成形して検証した。500 VA 鉄心の諸元を表1 に示す。ラップ工程前後のラップ部の状況を図6に示 す。また取得した軟磁気特性を図7に示す。

再ラップ後のラップ部の状態がラップ開放前と同様 の形態に戻るよう試作を重ねた結果、ラップ工程前後 のラップ部のようすは、ほぼ差が見られない状態にま で至った。また軟磁気特性においてもラップ処理前後で 差が見られず、方向性電磁鋼板より低く、Fe 基アモル ファス合金鉄心並みの低い無負荷損が確認できた。また Fe 基アモルファス鉄心合金では実現できない磁東密度 1.7 Tにおいても、方向性電磁鋼板より低い無負荷損が 得られている。

(2) ナノメット 10 kVA 鉄心での検証

ナノメット10kVA鉄心を試作した。試作した

表 2	ナノ	メット	10kVA	鉄心の諸元
-----	----	-----	-------	-------

項目	仕様		
容量	10 kVA		
鉄心重量 約 36.3 kg			
鉄心寸法	206 mm $\times$ 294 mm $\times$ 120 mm		



図8 ナノメット 10 kVA 鉄心の外観



図 9 ナノメット 10 kVA 鉄心の軟磁気特性

10 kVA 鉄心の諸元を表2に示し、外観写真を図8に 示す。また取得した軟磁気特性を**図9**に示す。

ナノメット 10 kVA 鉄心に適切な条件で熱処理を施し た結果,鉄心形態では方向性電磁鋼板より無負荷損が 低く, Fe 基アモルファス合金鉄心並みの低い無負荷損 が確認できた。また Fe 基アモルファス合金では実現で きない磁束密度 1.7 T においても、方向性電磁鋼板より 低い無負荷損が得られ、従来の高効率変圧器と同等以 上の省エネルギーの可能性が確認できた。さらに Fe 基 アモルファス合金では実現できない高磁東密度領域に おける変圧器の設計ができるため、Fe 基アモルファス 合金と比較して変圧器の小型化にも寄与できる可能性 を見出した。

## 3.3 ナノメット 10 kVA 鉄心適用変圧器の試作と評価

試作したナノメット 10 kVA プロトタイプ変圧器の諸 元を表3に示し、外観写真を図10に示す。また得ら れた変圧器の特性を表4に示す。

図9および表4より、ナノメット鉄心を変圧器に組み

## 表3 ナノメット 10 kVA プロトタイプ変圧器の諸元

項目	定格・仕様		
定格電圧	6,600 V		
定格容量	単相 50 Hz 10 kVA		
鉄心材料	ナノメット		



## 図 10 ナノメット 10 kVA プロトタイプ変圧器の外観

表4 ナノメット IUKVA フロトタイフ変圧器の	)特性
---------------------------	-----

項目	測定値	プロトタイプ 変圧器設計値
無負荷電流(%)	1.01	≦ 3.5
無負荷損(W)	18.6	15
短絡インピーダンス (%)	2.64	2.64
電圧変動率(%)	2.23	≦ 2.3
変圧比試験(N)	± 1/250 以内	± 1/250 以内
極性試験	減極性	減極性
単三平衡度試験(V)	+∼N 短絡 1.04 −∼N 短絡 1.04	≦ 2.0

上げる際に無負荷損が若干増加するため,変圧器の設計 値には至らず課題となっている。しかし,500 VA 鉄心 の検証ではより低い無負荷損が確認されたことから,検 証を重ねることで無負荷損の低減が図れると考えている。 また変圧器としての特性は,問題ないことが確認できた。

# 4 おわりに

今後は、500 VA 鉄心の検証ではより低い無負荷損が 確認されていることから、10 kVA 鉄心におけるさらな る軟磁気特性向上の検討および同鉄心の変圧器適用に関 する研究を進める予定である。

最後に、本研究を進めるにあたりご協力賜りました 国立大学法人東北大学様、(株)東北マグネットインス ティテュート様,アルプスアルパイン(株)様の関係各 位に深く謝意を表します。

### ■参考文献

(1) 稲垣勝敏ら:「地球環境保全に貢献するアモルファス 変圧器」,日立評論, Vol.93, No.02, pp.222-223 (2011)

(2) 清水一行ら:「MeV 電子照射による FeSiBPCu 合金のナノ結晶化過程の動的観察」,日本金属学会誌,Vol. 78,No. 9, pp.364-368 (2014)

(3) 牧野彰宏:「超低磁心損失・高鉄濃度軟磁性合金 「NANOMET<sup>®</sup>の最新研究開発動向」,まてりあ,Vol.55, No.3, pp.89-96 (2016)

(4) 高宮俊人ら:「JFE スチールにおける方向性電磁鋼板の最近の進歩」, JFE 技報, No.36, pp.1-5 (2015)

(5) 松浦真ら:「ケイ素鋼板に替わる超低損失ナノ結晶軟 磁性材料 Fe<sub>85-86</sub>Si<sub>1-2</sub>B<sub>8</sub>P<sub>4</sub>Cu<sub>1</sub> (NANOMET<sup>®</sup>)の磁気特性最 適化のためのナノ結晶形成プロセスの解明」, http://support. spring8.or.jp/Report\_JSR/PDF\_JSR\_26B/2014B1795.pdf

#### ■語句説明

注1)ナノ結晶軟磁性材料:Fe基アモルファス合金を結 晶化させ、ランダム配向した強磁性相のナノ結晶粒を残存す るアモルファス相に分散させた材料

注 2) ナノメット (NANOMET<sup>®</sup>):登録商標((株) 東北 マグネットインスティテュートと(株) トーキン)

注 3) Fe 基アモルファス合金:合金溶湯を超急冷(毎秒 100 万℃以上)して製造する結晶構造に由来する異方性がな い鉄(Fe)を主成分とする金属

注 4) 無負荷損:変圧器が無負荷のとき,定格周波数・定 格電圧を一次側に加えたときの入力

注5)方向性電磁鋼板:鋼板の一方向のみに磁化しやすく なるように結晶方位を一方向に揃うよう製造された鋼板

注 6) 微結晶化:液体急冷により作製したアモルファス相 を用いて,このアモルファス相が適当な合金組成であるとき に、ナノ結晶組織が形成される結晶化

注7) FeSiBPCu:元素記号(組成)

注 8) DSC: 一定の熱を与えながら,基準物質と試料の温 度を測定して,試料の熱物性を温度差として捉え,試料の状 態変化による吸熱反応や発熱反応を測定する装置

注 9) XRD: 試料に X 線を照射した際 X 線が原子の周り にある電子によって散乱,干渉した結果起こる回折を解析す る測定原理とし,構成成分の同定や定量,結晶サイズや結晶 化度を測定する装置

# 出井 和弘

技術開発本部 技術研究所 材料技術グループ 所属

**栗原 二三夫** 技術開発本部 技術研究所 材料技術グループ 所属

#### 須永 善則

電力機器事業本部 小型変圧器製造部設計グループ 所属