

電力用大型発電機の高効率化を実現する ナノコンポジット絶縁材料技術

馬淵貴裕*
Takahiro Mabuchi
梅本貴弘†
Takahiro Umemoto
武藤浩隆‡
Hirotaka Muto

森 翼‡
Tsubasa Mori

Nanocomposite Insulation Material Technology for Improving the Efficiency of Large Power Generators

*先端技術総合研究所
†同研究所(工博)
‡電力システム製作所

要 旨

脱炭素社会の実現に向けて、電力の安定供給とCO₂排出量削減の両立が求められている。この実現には、電力用大型発電機の高効率化が有効である。その達成手段の一つに、コイル絶縁材を高性能化することで薄肉化し、導体比率を高めて損失を低減する方法が挙げられる。

今回、NEDO(国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構)プロ“電力機器用革新的機能性絶縁材料の技術開発”を活用し、耐電圧、絶縁寿命に優れるナノコンポジット絶縁材料を開発した。この開発で、耐電圧1.4倍、絶縁寿命30倍以上(従来比)の絶縁性能を達成した。

1. ま え が き

脱炭素社会の実現のため、風力や太陽光など再生可能エネルギーによる発電が拡大している。これらの発電方式は、気候や立地条件による出力変動が大きいことが課題である。そのため、電力需要に応じた出力調整が可能な火力発電やベースロード電源である原子力発電は、今後も一定のエネルギー需要があると予想される⁽¹⁾。これらの発電方式に用いるタービン発電機は、電力の安定供給とCO₂排出量削減の両立のため、更なる高効率化が求められている。それを実現するために、今回、耐電圧、絶縁材料に優れるナノコンポジット絶縁材料を開発した。

この論文では、開発材料の特長やその適用効果について述べる。

三菱電機の発電機事業は、これまでに2,100台以上の販売実績があり、世界の電力安定供給に貢献してきた(国内台数比：約50%)。また2015年に発売した高効率(99%以上)のタービン発電機“VP-Xシリーズ”(図1)は、燃料費低減、省スペース化、納期短縮を実現し、新興国を中心に新設や老朽化更新の受注を獲得している。



図1. 当社タービン発電機“VP-Xシリーズ”(～900MVA級)

2. タービン発電機の概要

火力発電所では、天然ガスや石油などの燃料を燃やしてタービンを回して、発電機を動かすことで発電している。図2にタービン発電機の構造を示す。タービン発電機は、電磁石である回転子が回転して固定子コイルに電気が発生する。固定子コイルは、鉄心の内周に配置され、コイル導体とそれを覆うコイル絶縁材から構成される。コイル絶縁材はコイル導体に流れる電気を鉄心と絶縁する重要部材で、マイカとガラス繊維等の補強材を貼り合わせたマイカ絶縁テープを、導体周囲に積層し、その間隙にエポキシ樹脂を含浸・加熱硬化して形成される。

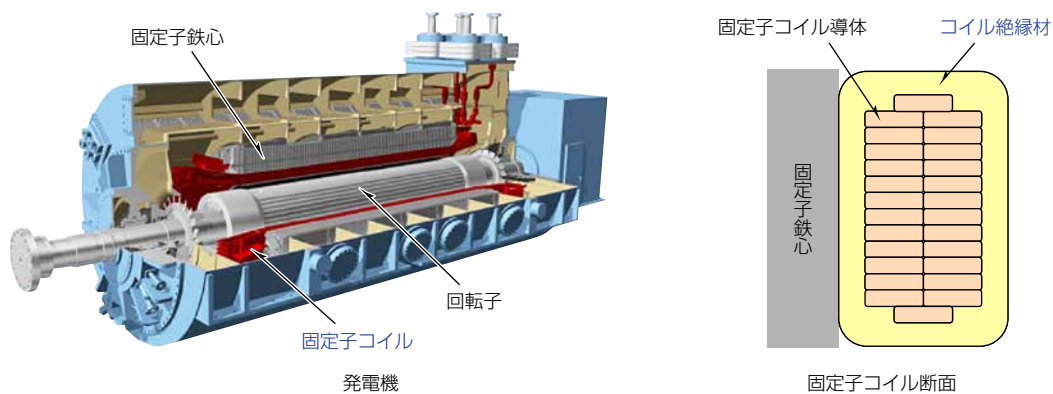


図2. タービン発電機の構造

3. タービン発電機の高効率化に向けた取組み

タービン発電機の更なる高効率化(目標値:全損失の5%低減)には、①コイル絶縁材を薄くしてコイルの導体比率を増やしてコイル導体に流れる電流によって発生するエネルギーロスを低減し、②コイル絶縁材の放熱性を高めて、コイルの温度上昇を抑えて、機器冷却に要するエネルギーを低減することが必要である。しかしコイル絶縁材を薄くした場合、絶縁性能が低下するため、発電機の寿命が短くなるという課題があった。

そこで今回の開発目標である全損失の5%低減を達成するためには、コイル絶縁材の耐電圧を1.3倍、絶縁寿命を20倍(従来比)向上させることが必要であった。

3.1 ナノコンポジット化コイル絶縁材の開発

絶縁性能向上の達成方法の一つにコイル絶縁材のナノコンポジット化がある⁽²⁾⁽³⁾。ナノコンポジットとは絶縁樹脂にナノフィラー(粒径100nm以下の無機粒子)を分散した樹脂材料である。これによって、ナノフィラーによる絶縁破壊の前駆現象(電気トリイ)の進展抑制が期待できる。これまでにナノコンポジット材料の開発事例としてナノフィラーの酸化マグネシウムを架橋ポリエチレンに複合化した電力ケーブルや、ナノクレイをエポキシ樹脂に複合化した開閉装置に関する報告がある。

今回、タービン発電機の固定子コイル絶縁材をナノコンポジット化して、絶縁性能の向上を目的に、産学連携して基礎評価から実機コイルによる適用検証に至る開発を行った。

3.1.1 樹脂へのナノフィラー分散手法の検討

ナノフィラーは、比表面積や表面エネルギーが大きいので、樹脂中で凝集しやすい性質がある。コイル絶縁材は、マイカ絶縁テープにエポキシ樹脂を含浸して形成するが、凝集した場合は樹脂の含浸性が低下し、絶縁欠陥になるボイドが生成される。そのためナノフィラーは、樹脂中で均一に分散している必要がある。そこでナノフィラーの表面改質と樹脂組成の改良による均一分散を検討した⁽⁴⁾。

ナノフィラーの表面改質では、各種シランカップリング剤やフィラー表面と結合する処理剤を検討して、それらを高速せん断処理装置で樹脂と混合し、加熱硬化処理後(120℃×2h+180℃×4h)の断面を電子顕微鏡で観察した。これに併せて、樹脂の組成検討としてフィラー表面改質に用いた成分との溶解性や反応性を持つ樹脂添加剤を調査し、その種類や添加量の検討を行った。

図3に開発前後でのナノフィラーを複合化したナノコンポジット樹脂の外観と断面を示す。開発前は樹脂が白濁しており、その断面ではナノフィラーの凝集体が確認される。このような凝集体は、絶縁テープを構成するマイカ粒子の間に含浸されにくいと考えられる。一方、開発後の表面改質フィラーと、その改質成分との反応性を持つ添加剤を配合した樹脂を組み合わせた場合は、樹脂は透明化し、またその断面ではナノフィラーが均一分散した状態を確認した。これはフィラーの表面処理と添加剤との化学的な親和性によって凝集が解消されたためと推定する。

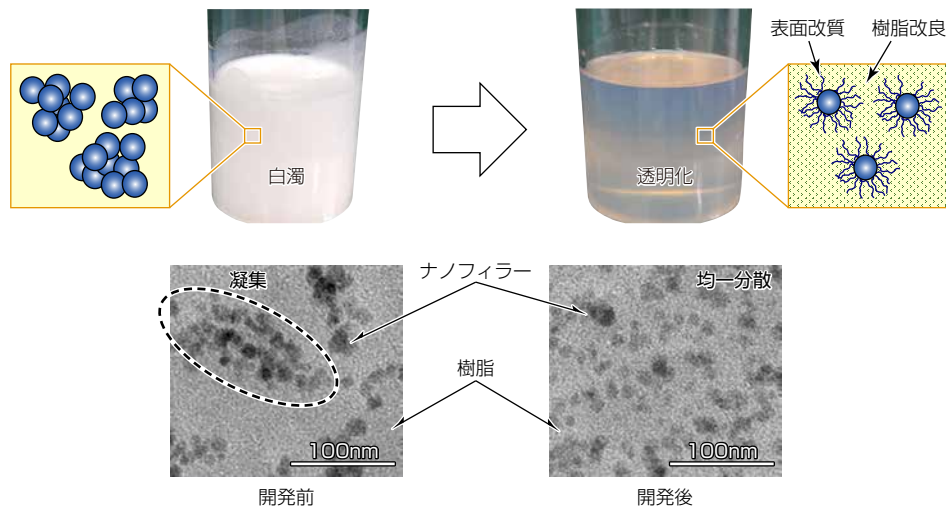


図3. 開発前後のナノコンポジット樹脂の外観と断面

また開発前後のナノコンポジット樹脂を長期間静置した場合、開発前は経時的にナノフィラーが容器底部に沈殿するのに対して、開発後は沈殿なく安定して1年以上分散状態を維持することを確認した。これらの性状から開発したナノコンポジット樹脂は、大型発電機の固定子コイルの製造プロセスに適した分散性、保管安定性を持つことを確認した。

3.1.2 実機固定子コイルを用いたナノコンポジット樹脂の含浸性検証

3.1.1項で開発したナノコンポジット樹脂のマイカ絶縁テープへの含浸性を検証するため、実機固定子コイルを用いて、実際の製造プロセスと同条件で真空加圧含浸処理を行った。コイルは、銅平角素線を束ねた導体周囲に、マイカ絶縁テープを厚さ約3mmになるまで繰り返し巻き付けたものを用いた。比較のためナノフィラーを含まない従来のエポキシ樹脂を用いてこれと同じプロセスでコイルを作製した。なおこの検証では、ナノコンポジットのフィラー性状を各種の電気基礎特性を反映し適宜調整した。図4に作製したコイル外観とコイル絶縁材の断面を示す。

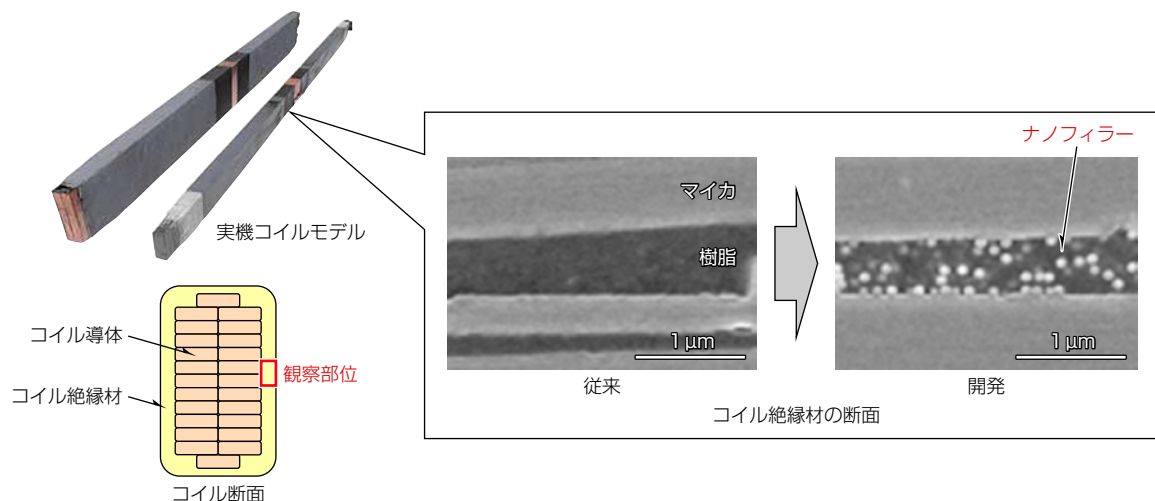


図4. 実機コイル絶縁材の外観と断面

コイル絶縁材のマイカ粒子間を拡大観察したとき、開発品ではナノフィラーがマイカ粒子の隙間に含浸され、凝集体を含まない均一分散状態であることを確認した。またコイル絶縁材中に、樹脂が含浸していないボイド欠陥がないことを断面観察や電気的特性評価(誘電正接、放電特性)から確認した。

これらの結果から、ナノフィラーが均一分散したナノコンポジット化コイル絶縁材を得た。

3.2 ナノコンポジット化コイル絶縁材の絶縁性能

開発したナノコンポジット化コイル絶縁材の絶縁性能を評価するため、実機固定子コイルモデルで長期課電寿命を検証した。検証では3水準の印加電圧を設定し、数十～1,000時間レベルで絶縁破壊が起こるまでの時間(寿命)をそれぞれ測定した。各電圧で得た寿命結果の整理から、ナノコンポジット化コイル絶縁材は、ナノフィラーを含まない従来のコイル絶縁材と比較し、特に低電圧水準で長寿命化する傾向があり、実機運転電圧付近では30倍以上の寿命向上が見込まれることを確認した。また実用想定使用年数で、ナノコンポジット化によって約1.4倍の高耐電圧効果を確認し、コイル絶縁材のナノコンポジット化によって今回の開発目標の絶縁性能向上を達成した(図5)。この要因は、絶縁破壊に至るまでの電気トリーの観察から、絶縁破壊のツリー状進展をナノフィラーの遮蔽効果等によって抑制したためと考えられる。

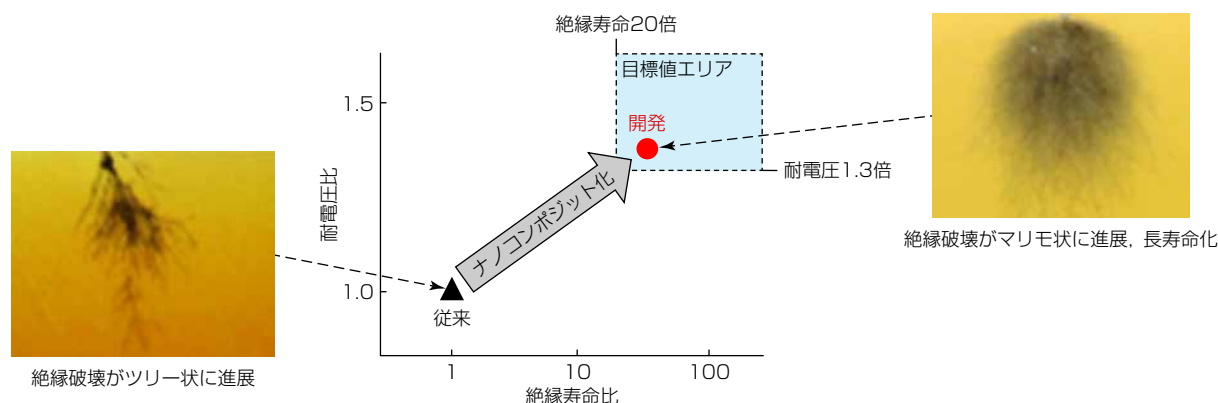


図5. ナノコンポジット化によるコイル絶縁材の性能向上

4. む す び

コイル絶縁材のナノコンポジット化によって、耐電圧1.4倍、絶縁寿命30倍以上(従来比)の絶縁性能を達成した。これによって現状の絶縁性能を維持しながらコイル絶縁材を薄肉化でき、全損失の5%低減を達成し、高効率化できるめどを得た。今回の開発成果を実機適用することで、発電時の燃料を削減し、電力1GW当たり1,000トン/年のCO₂排出量を削減できる見込みである。今後、ナノコンポジットを適用したタービン発電機の製品化開発を進めるとともに、高効率化による脱炭素化、燃料削減効果を顧客にアピールし、新設や既設機更新需要の獲得を目指す。

この研究の一部は、NEDO戦略的省エネルギー技術革新プログラム(電力機器用革新的機能性絶縁材料の技術開発, JPNP12004)の一環として実施した。

参 考 文 献

- (1) 資源エネルギー庁：2030年に向けた今後の再エネ政策（2021）
https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/community/dl/05_01.pdf
- (2) Tanaka, T., et al.: Advances in nanodielectric materials over the past 50 years, IEEE EIM, **29**, No.1, 10～23 (2013)
- (3) Ohki, Y.: Development of XLPE-insulated cable for high-voltage dc submarine transmission line (1), IEEE EIM, **29**, No.4, 65～67 (2013)
- (4) Mabuchi, T., et al.: Electrical Insulation Properties of Nanocomposite Epoxy Resin and Application to Mica Insulation, Proc. IEEE ICD, 241～244 (2020)