

タービン発電機を支える絶縁技術

Insulation System Realizing Environmentally Conscious Stator Coils with High Thermal Conductivity for High-Efficiency Turbine-Driven Generators

小林 雅司

幡野 浩

中村 英之

■ KOBAYASHI Masashi

■ HATANNO Hiroshi

■ NAKAMURA Hideyuki

地球環境問題への意識の高まりとともに、火力発電所向けタービン発電機の高効率化がいつそう求められるようになり、また、製造プロセスでの環境負荷低減という新たな課題が出てきた。

東芝は、発電機容量400 MVAクラスが限界であった水素間接冷却方式の適用容量を拡大し、大容量タービン発電機の高効率化に取り組んでいる。今回、水素間接冷却タービン発電機を大容量化する技術の一つとして、固定子コイル絶縁の熱伝導率が向上した高熱伝導絶縁技術を開発した。発電機容量の限界を800 MVAクラスまで拡大でき、この技術を適用した670 MVA水素間接冷却タービン発電機では、発電機の効率を従来機と比べ0.1～0.2%改善できた。これは石炭使用量と二酸化炭素(CO₂)排出量を大幅に削減できることになる。また、樹脂や有機溶剤を使用する固定子コイル製造工程では、従来より環境負荷が小さい絶縁方式を開発し、樹脂や有機溶剤使用量の削減と、廃棄物量の低減、作業環境の改善などを実現した。

The recent enhancement of awareness regarding global environmental change has led to the development of high-efficiency turbine-driven generators, which are considered to be a means of reducing the environmental burden of various manufacturing processes.

Toshiba has been developing a high-efficiency, large-capacity, turbine-driven generator employing an indirectly hydrogen-cooled stator coil that has so far been used for turbine-driven generators with an intermediate capacity of up to the 400 MVA class. As a result of these efforts, we have developed a new insulation system that has made it possible to realize stator coils with high thermal conductivity. A 670 MVA indirectly hydrogen-cooled turbine-driven generator applying this insulation system has achieved 0.1% to 0.2% higher efficiency compared with conventional generators. In addition, the development of this environmentally conscious insulation system has reduced the amount of waste materials produced by and improved the working environment for the manufacturing of stator coils.

1 まえがき

昨今の環境意識が高まるなか、火力発電所のタービン発電機でも、より高い効率や環境負荷を低減した製造プロセスを適用することが求められている。

東芝は、これらのニーズに応えるため、絶縁技術とその製造方式に着目し、タービン発電機の主要な構成要素である固定子コイルの開発に取り組んでいる。今回、従来に比べ冷却性能を飛躍的に向上できる高熱伝導絶縁技術の開発に成功し、これを適用することで大容量タービン発電機の効率を向上することができた。更に、レジリッチ絶縁方式において、更なる環境負荷低減を図り、製造工程での樹脂や有機溶剤使用量の削減、廃棄物量の低減、作業環境の改善などを実現した。

ここでは、高熱伝導絶縁技術と低環境負荷の絶縁方式について述べる。

2 高熱伝導絶縁技術

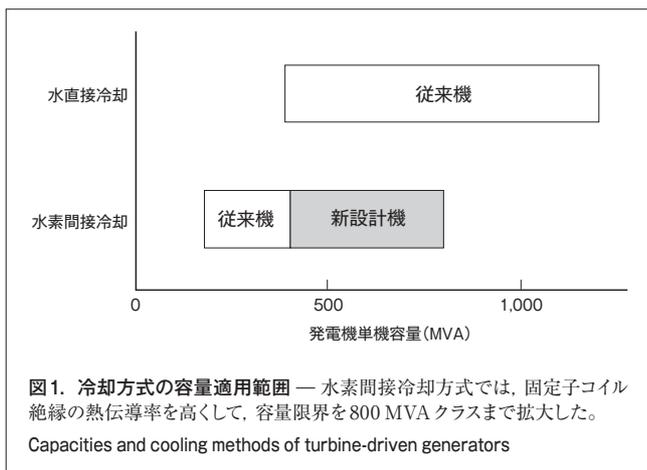
2.1 タービン発電機の固定子コイル冷却方式

発電機固定子コイルの冷却には、固定子コイル導体を直接

水で冷却する水直接冷却方式と、コイル導体に発生した熱を導体の周囲を覆う絶縁層を介して水素ガスや空気冷却する水素間接冷却方式及び空気間接冷却方式がある。冷却能力が高い順に水直接冷却、水素間接冷却、空気間接冷却となる。

冷却能力の高い水直接冷却方式は大容量機に用いられるが、冷却水を循環する配管系統や循環装置、純水を維持するための純水化装置などの付帯設備を必要とする。一方、水素間接冷却方式は水直接冷却方式に比べ冷却水関連の付帯設備が不要となり、建設と運用保持が容易である。また、水直接冷却方式は固定子コイルに冷却水を流すための中空部を持つ中空素線を使用するのに対し、水素間接冷却方式は中空部を持たない中実素線を使用する。したがって水素間接冷却方式では固定子コイルの銅断面積を大きく取ることができ、同容量帯の水直接冷却方式より高い効率を実現することができる。しかし、冷却能力が水直接冷却方式より低いので、従来では発電機容量で400 MVAクラスが限界であった。

当社は、高効率化と設備構成の簡素化、運用保守の省力化の実現を目指し、水素間接冷却タービン発電機を大容量化する技術の開発を行ってきた。その結果、水素間接冷却適用機の容量を飛躍的に増大することに成功し、現在この冷却方式



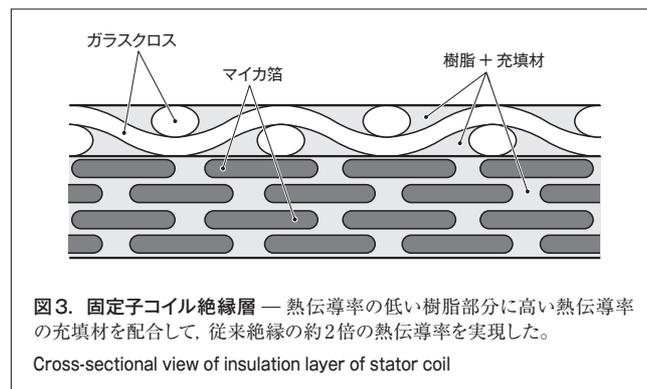
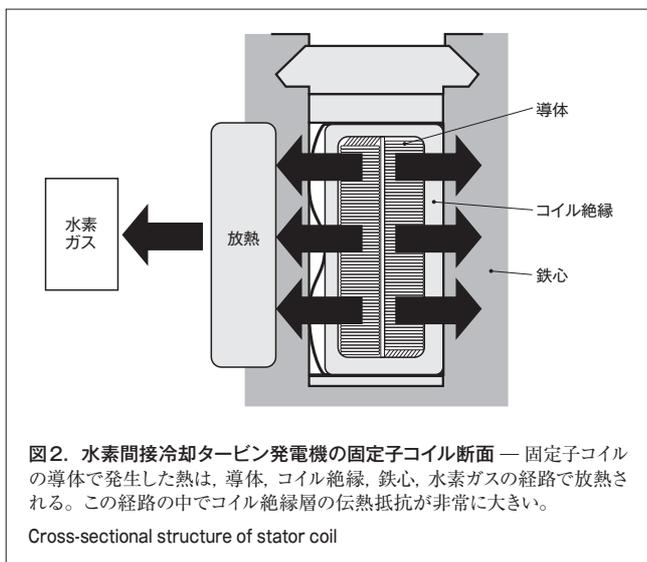
の容量限界が800 MVAクラスまで拡大している(図1)。

2.2 大容量発電機の絶縁技術

固定子コイル絶縁の観点から、水素間接冷却方式の発電機を大容量化するためには、高耐熱化、高電界化、高熱伝導化などが必要である。当社は発電機の高信頼性を維持するため、使用実績のある材料、製造方法、及び設備を使用し、発電機運転温度を従来と同等にできる高熱伝導絶縁の開発に取り組んできた。

図2に示すように水素間接冷却方式では、固定子コイルの導体で発生した熱は、導体、コイル絶縁、鉄心、水素ガスの経路で放熱される。この伝熱経路上では、コイル絶縁層の伝熱抵抗が非常に大きいので、コイル絶縁の熱伝導率を高くすることが固定子コイルの冷却性能向上のポイントとなる。

コイル絶縁の熱伝導率を高くする手法の一例を図3に示す。従来の絶縁は、マイカ箔(はく)、補強材ガラスクロス、そして両者を結合する樹脂から構成されている。この中でもっとも熱伝導率が低い樹脂部分に高い熱伝導率を持つ充填



(じゅうてん)材を配合することで、従来絶縁の約2倍の熱伝導率を実現した⁽¹⁾。

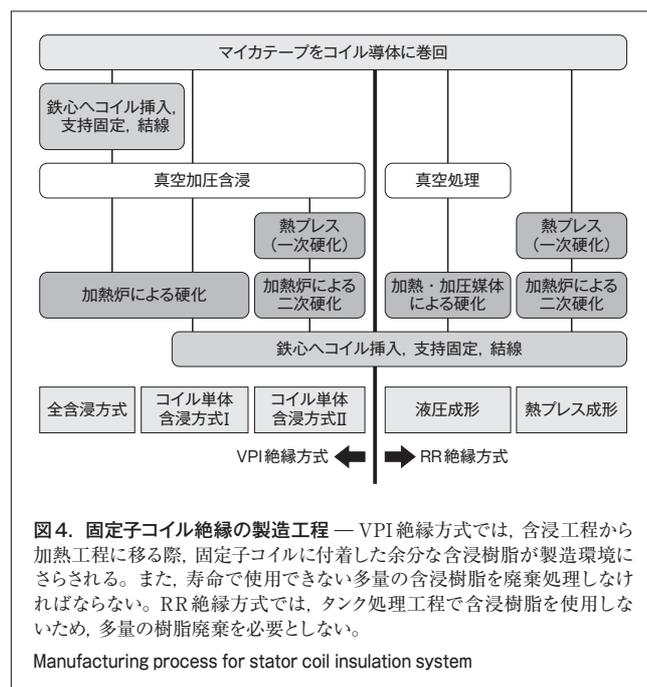
この高熱伝導絶縁技術は既に多数の実績があり、2009年に出荷した670 MVA級のタービン発電機にも適用され、同容量帯の水直接冷却機に比べ、約0.1～0.2%の効率向上を達成した。

0.1～0.2%の効率向上の効果を900 MW級の石炭火力発電所を例に示すと、年間約4,700 tの石炭消費量の削減と、約14,000 tのCO₂排出量の削減に相当する⁽²⁾。

3 低環境負荷のレジンリッチ絶縁方式

3.1 固定子コイル絶縁の製造工程

固定子コイル絶縁の製造工程は、真空加圧含浸(VPI)絶縁方式とレジンリッチ(RR)絶縁方式に大別される。各方式の製造工程を図4に示す。



VPI絶縁方式では、少量のエポキシ樹脂で接着されたマイカ箔及びガラスクロス等の補強材から構成されるマイカテープをコイル導体に巻回（けんかい）した後、多量の含浸樹脂で満たした含浸タンク内で各テープ間及びマイカ箔内の間隙（かんげき）に液状の熱硬化性エポキシ樹脂を真空加圧含浸し、加熱硬化する。含浸工程から加熱工程に移る際、固定子コイルに付着した余分な含浸樹脂が製造環境にさらされるほか、寿命で使用できなくなった多量の含浸樹脂を廃棄処理しなければならない場合がある。

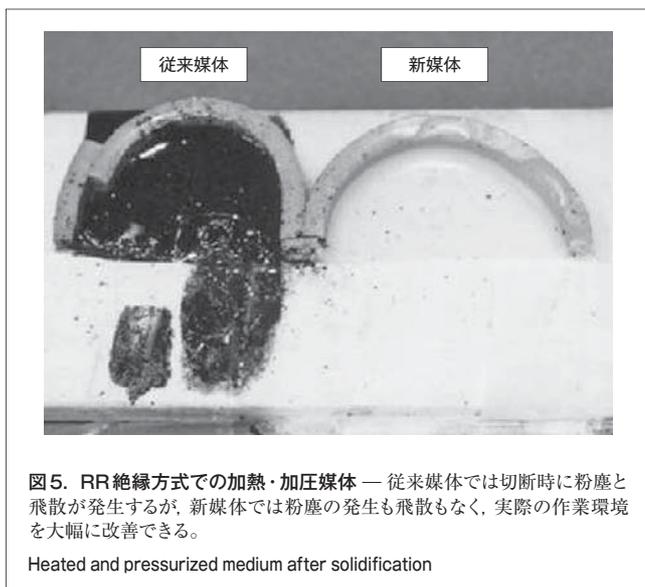
RR絶縁方式では、必要とされる量のエポキシ樹脂をあらかじめ含浸して半硬化させたマイカテープをコイル導体に巻回し、真空処理した後、加圧と加熱によって樹脂を溶解して、テープ間に浸透させ硬化させる。含浸樹脂を使用しないので多量の樹脂を廃棄する必要がない。特に当社が採用している液圧RR絶縁方式では、真空処理と加熱・加圧媒体による硬化が一つのタンク内で連続して行われるので、溶解した液状の樹脂が作業環境にさらされることはなく、VPI絶縁方式に比べて環境負荷が小さい。

液圧RR絶縁方式の課題として、加熱・加圧媒体にアスファルトを過去40年以上世界的に使用していることが挙げられる。アスファルトは、常温で粉塵（ふんじん）化して作業環境を悪化させ、コイルへの付着量が多く廃棄物量が増える。当社はアスファルトに代わる環境負荷の少ない新媒体を開発することで、いっそうの環境負荷低減を達成した。

3.2 新しい加熱・加圧媒体の開発

従来媒体のアスファルトの代替材として、製造工程や絶縁性能に影響を及ぼさない低分子量の熱可塑性樹脂を開発し、RR絶縁方式の加熱・加圧媒体に適用した。

新媒体と従来媒体を、それぞれ加熱後に冷却して固化し、更に中央で切断した後の状態を比較して図5に示す。従来媒



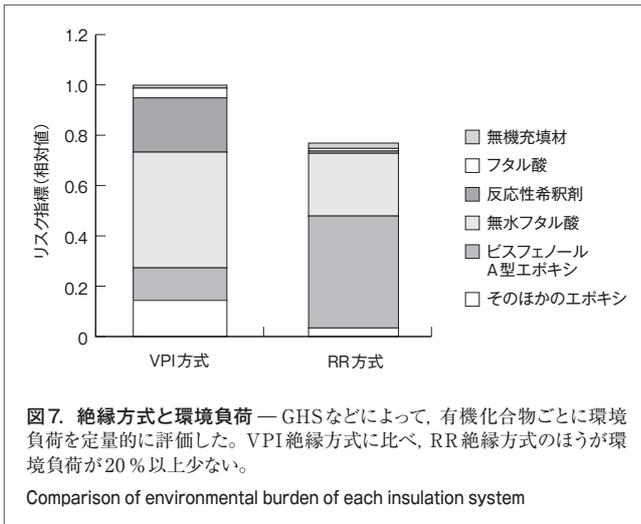
体では、切断時に粉塵が発生し飛散物が観測されるのに対し、新媒体では、粉塵の発生も飛散もなく、実際の除去作業時の作業環境を大幅に改善できる⁽³⁾。

付着物などの除去作業前には、コイルに加熱・加圧媒体が付着している。従来の加熱・加圧媒体や成形ジグの除去作業前のコイル外観を図6(a)に、新媒体を用いたコイル外観を図6(b)に示す。新媒体の付着量は従来媒体に比べ約40%低減しており、廃棄物量を大幅に削減することができる。

3.3 絶縁方式と環境負荷

新加熱・加圧媒体を用いたRR絶縁方式とVPI絶縁方式の環境負荷を評価した。評価方法は、各方式で使用する代表的な有機化合物ごとに、GHS (Globally Harmonization Systems) などによって作業環境を含む環境への負荷を数値で定義し、定義した数値と有機化合物の使用量を積算することで環境負荷を定量的に評価した。前述の方法から算出した絶縁方式ごとの環境負荷を図7に示す。RR絶縁方式はVPI絶縁方式に比べ負荷が20%以上少ないことがわかる⁽⁴⁾。

当社は、タービン発電機の絶縁にRR絶縁方式とVPI絶縁方式の両方を採用してきたが、環境への負荷はRR絶縁方式のほうが小さいと判断している。



4 あとがき

タービン発電機の固定子コイルの絶縁について、従来に比べ約2倍の熱伝導率を持つ高熱伝導絶縁技術を開発した。この技術をタービン発電機に適用することで、水素間接冷却方式のタービン発電機の容量を800 MVAクラスまで拡大できた。

また適用実績がある670 MVA級のタービン発電機では、同容量帯の水直接冷却方式と比較して、効率が約0.1～0.2%向上した。この効率向上は、900 MW級の石炭火力発電所の場合、年間約4,700 tの石炭使用量と、約14,000 tのCO₂排出量の削減に相当する。

更に、液圧RR方式による新絶縁方式を開発することで、製造工程での樹脂及び有機溶剤使用量の削減や、廃棄物量の削減、作業環境の改善など環境負荷低減に大きく貢献することができた。

今後も引き続き、環境に配慮した絶縁技術の開発を進めていく。

文献

- (1) 幡野 浩. タービン発電機固定子コイル絶縁の技術動向. IEEE Journal, 126, 11, 2006, p.720-722.
- (2) 富木広明. 固定子コイル水素間接冷却を適用した60 Hz大容量タービン発電機. 東芝レビュー. 65, 2, 2010, p.48-51.
- (3) Hatano, H., et al. "Risk Evaluation of Organic Chemicals Utilized in Turbine Generators". The 7th International conference on Ecobalance (2006,11). Tsukuba, Japan, 2006-11, The Society of Non-Traditional Technology, 2008, 論文番号1113. (CD-ROM).
- (4) 幡野 浩. "新加熱・加圧媒体による低環境負荷レジソリッチ絶縁システム". 電気学会研究会資料 回転機研究会 タービン発電機 (II), 2003, p.81-86.



小林 雅司 KOBAYASHI Masashi

電力システム社 京浜事業所 発電機部。
タービン発電機的设计・開発に従事。電気学会会員。
Keihin Product Operations



幡野 浩 HATANO Hiroshi

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 高性能・絶縁材料開発部グループ長。回転電機の絶縁技術の開発業務に従事。電気学会会員。
Power and Industrial Systems Research and Development Center



中村 英之 NAKAMURA Hideyuki

電力システム社 京浜事業所 発電機部グループ長。
タービン発電機的设计・開発に従事。電気学会会員。
Keihin Product Operations