

820 MVA-50 Hz 固定子コイル水素間接冷却方式タービン発電機

820 MVA-50 Hz Large-Capacity Indirectly Hydrogen-Cooled Turbine Generator

鈴木 曉志 幡野 浩 加幡 安雄

■ SUZUKA Satoshi ■ HATANO Hiroshi ■ KABATA Yasuo

これまで火力発電所向けタービン発電機の固定子コイル冷却方式として、中容量機（～400 MVA 級）には固定子コイルを水素ガスで間接的に冷却する水素間接冷却方式が、大容量機（400 MVA 級以上）には固定子コイルを水で冷却する水直接冷却方式が、それぞれ適用されてきた。

水素間接冷却方式は水直接冷却方式に比べてタービン発電機の効率及び運転・保守性能の面で優れており、かつ構造も簡略化できるため、東芝は、水素間接冷却方式の大容量化と高効率化を実現するための技術開発、設計、製造、及び試験を進めている。今回、固定子コイルの高熱伝導絶縁技術、高圧水素ガスに対応した構造設計技術、及び通風回路の最適化技術により、820 MVA-50 Hz の大容量水素間接冷却タービン発電機を開発した。

In general, stator bar cooling systems used for turbine generators of thermal power plants employ an indirectly hydrogen-cooled system for those with an intermediate capacity of up to the 400 MVA class, and a directly water-cooled system for those with a large capacity of 400 MVA or higher. The indirectly hydrogen-cooled system has advantages including higher efficiency, easier operation and maintenance, and a simpler configuration compared with the directly water-cooled system.

Toshiba has developed technologies that make it possible for an indirectly hydrogen-cooled system to be employed in turbine generators with both expanded capacity and improved efficiency, and is promoting the design, manufacturing, and testing of a large-capacity indirectly hydrogen-cooled turbine generator applying these technologies. As a result of these efforts, we have developed an 820 MVA-50 Hz indirectly hydrogen-cooled turbine generator.

1 まえがき

近年、欧州諸国の信用不安や米国経済の先行き不透明感が広がっているが、アジア諸国では堅調な経済成長に合わせて電力需要の拡大傾向が続いている。これを受けて大容量石炭火力発電所の増強が見込まれており、特に600 MW 級の大容量・高効率タービン発電機へのニーズが高まっている。

このニーズに応えるため、東芝は、固定子コイル水素間接冷却方式を採用したタービン発電機（以下、水素間接冷却タービン発電機と呼ぶ）の大容量化と高効率化を実現する技術開発に取り組んでいる。

当社が適用している固定子コイルの冷却方式と発電機容量の関係を図1に示す。大容量化技術の開発により、水素間接冷却方式を適用した発電機の容量を増大させており、2002年に470 MVA-60 Hz、2005年に563 MVA-50 Hz、2009年には670 MVA-60 Hzの水素間接冷却タービン発電機をそれぞれ製造し、出荷してきた。特に、2009年の670 MVA-60 Hz水素間接冷却タービン発電機は、その大容量化・高効率化技術が認められ、「平成21年度優秀省エネルギー機器表彰 日本機械工業連合会会長賞」をはじめとする多くの賞を受賞した。

今回、更なる発電機容量の増大を目指して開発を進め、

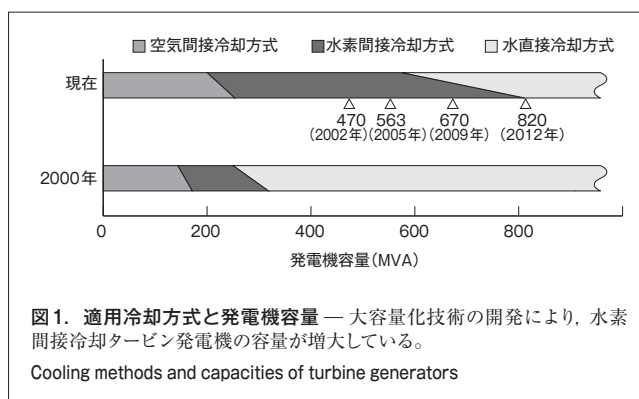


図1. 適用冷却方式と発電機容量 — 大容量化技術の開発により、水素間接冷却タービン発電機の容量が増大している。

Cooling methods and capacities of turbine generators

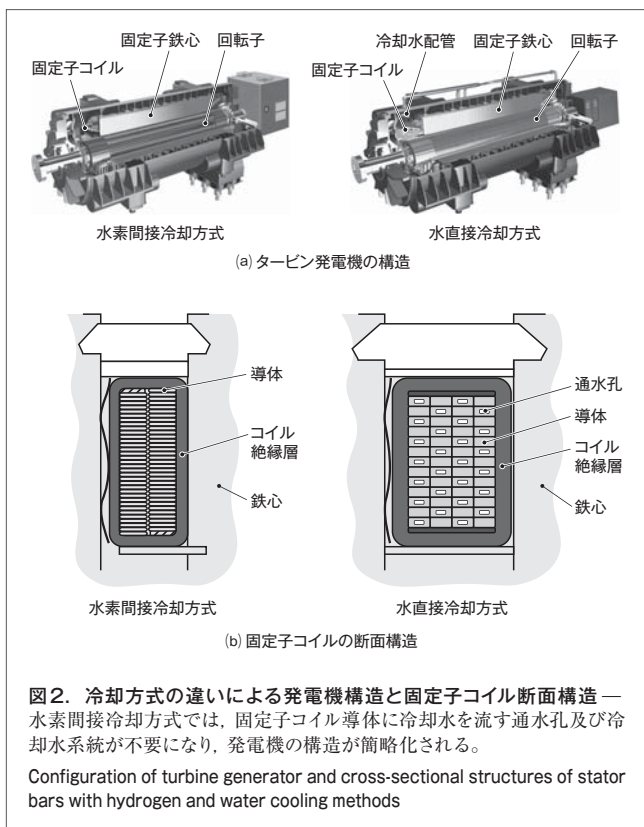
820 MVA-50 Hz の大容量水素間接冷却タービン発電機を開発した。ここでは、開発したタービン発電機の特長と適用技術について述べる。

2 固定子コイルの冷却方式とその特長

2.1 固定子コイルの冷却方式

水素間接冷却方式と水直接冷却方式のタービン発電機の構造及び固定子コイルの断面構造を、図2に示す。

これまで当社は、火力発電所向けタービン発電機の固定子



コイル冷却方式として、大容量機（400 MVA 級以上）は冷却性能が水素ガスや空気よりも優れた水（純水）を固定子コイルの導体内に流して直接冷却する、水直接冷却方式を採用してきた。

一方、中容量機（～400 MVA 級）は、発電機内に封入された水素ガスを用いて固定子コイルの導体を覆っている絶縁材の外部を間接的に冷却する、水素間接冷却方式を採用してきた。

2.2 水素間接冷却方式の特長

水素間接冷却方式は、水直接冷却方式に比べて次のような特長がある。

2.2.1 高い発電機効率

水直接冷却方式では、固定子コイルの導体内に冷却水を流すための通水孔が必要になる。

一方、水素間接冷却方式では、この通水孔が不要なため、固定子コイルの導体断面積を大きくすることができ、従来の水直接冷却方式に比べて発電機の効率を0.1～0.15ポイント程度向上させることが期待できる。更に、発電機の効率が向上することで、火力発電所の燃料消費量と二酸化炭素排出量も削減できる。

また、通水孔及び冷却水系統が不要になることで、固定子コイルの構造が簡略化され、固定子コイル端部などの発電機内部構造も簡単になる。

2.2.2 冷却水装置の削減

水直接冷却方式では、固定子コイルの冷却水を循環させるための固定子冷却水装置が

必要になるが、水素間接冷却方式では不要である。

このため、冷却水装置の関連配管や、純水化装置、制御盤、計器盤などに掛かる費用が不要になるとともに、設置・試運転時の冷却水装置関連の作業項目や、プラント運用中の保守費用なども削減できる。

3 タービン発電機の大容量化技術

開発したタービン発電機の主な定格仕様を表1に示す。

一般に水素間接冷却方式は、冷却媒体や放熱経路の違いにより、従来の水直接冷却方式に比べて固定子コイルの冷却性能が低くなるため、大容量化が困難であった。

そこで当社は、この固定子コイルの冷却性能向上を中心に水素間接冷却方式の開発に取り組み、次に示すような三つの大容量化技術を開発した。

- (1) 固定子コイルの高熱伝導絶縁技術
- (2) 水素ガス圧力520 kPa・gに対応した構造設計技術
- (3) 通風回路の最適化技術

3.1 固定子コイルの高熱伝導絶縁技術

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図3(a)に示すように、導体から、コイル絶縁層、鉄心という経路で、水素ガスへ放熱される。この伝熱経路において、コイル絶縁層の熱伝導率は導体や鉄心に比べて非常に小さいため、コイル絶縁層の熱伝導率を増加させることは冷却性能の向上に大きな効果がある。

固定子コイル絶縁層は図3(b)に示すように、マイカ、ガラス繊維、及びそれらを覆う樹脂から成っている。固定子コイル絶縁層の中では、樹脂の熱伝導率がもっとも低いいため、樹脂部分に高い熱伝導率を持つ充填材を配合することで、従来と同等の絶縁性能を保ちながら約2倍の熱伝導率を持つ高熱伝導絶縁を実現している。

当社は、これまでもこの高熱伝導絶縁を採用した水素間接冷却タービン発電機を多数製造してきた実績があり、今回

表1. 開発した水素間接冷却発電機と従来機の定格仕様の比較

Comparison of specifications of newly developed and conventional turbine generators

項目	仕様	
	開発機（水素間接冷却）	従来機（水直接冷却）
定格容量 (MVA)	820	802
定格電圧 (kV)	21	22.8
定格電流 (A)	22,545	20,309
定格力率	0.85	0.90
定格周波数 (Hz)	50	50
極数 (回転数)	2 (3,000 rpm)	2 (3,000 rpm)
固定子コイル冷却方式	水素間接冷却	水直接冷却
回転子コイル冷却方式	水素直接冷却	水素直接冷却
水素ガス圧力 (kPa・g)	520	440

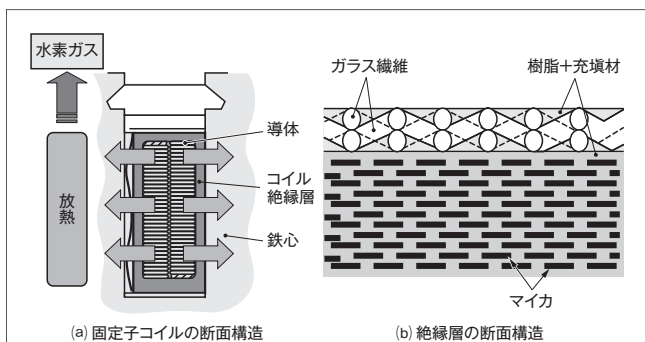


図3. 固定子コイルの冷却経路と絶縁層構造 — 水素間接冷却方式では、固定子コイル導体で発生した熱がコイル絶縁層を経由して鉄心から水素ガスに放熱される。コイル絶縁層は、マイカ、ガラス繊維、及び両者を結合する樹脂から成る。

Cooling path and insulation layer structure of stator bar

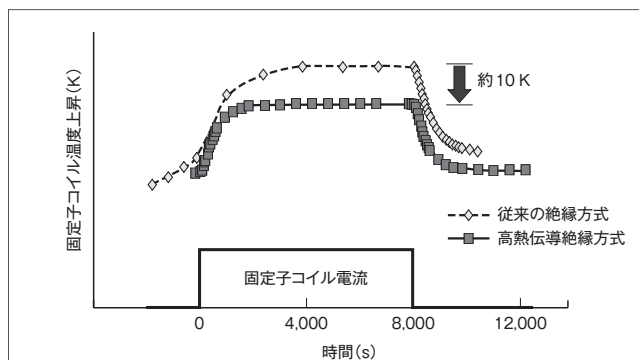


図5. 高熱伝導絶縁方式を適用した場合の固定子コイルの温度低減効果 — 従来の絶縁方式を適用した発電機に比べて、高熱伝導絶縁方式では固定子コイルの温度上昇を約10 K低減できることを確認した。

Temperature profiles of stator bars with high-thermal-conductivity and conventional insulation layers

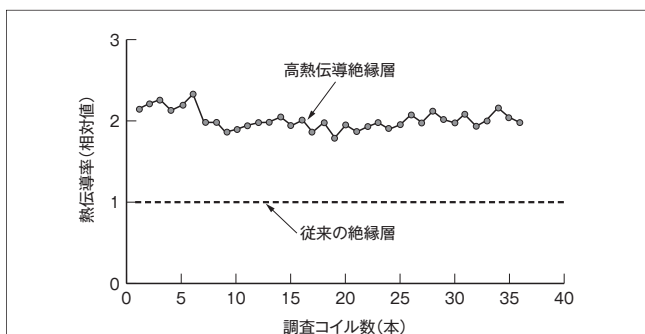


図4. 高熱伝導絶縁層の熱伝導率の測定結果 — 従来の絶縁層に対して約2倍の熱伝導率を持つ高熱伝導絶縁層を実現した。

Results of measurements of thermal conductivity of newly developed and conventional insulation layers

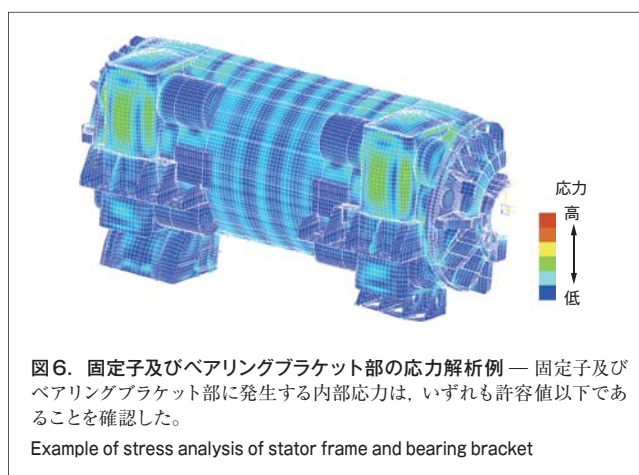


図6. 固定子及びベアリングブラケット部の応力解析例 — 固定子及びベアリングブラケット部に発生する内部応力は、いずれも許容値以下であることを確認した。

Example of stress analysis of stator frame and bearing bracket

開発したタービン発電機にもこの高熱伝導絶縁技術を適用した。図4は、高熱伝導絶縁層と従来絶縁層の熱伝導率の測定結果を示したものである。

高熱伝導絶縁材の温度低減効果を示す一例として、高熱伝導絶縁方式と従来の絶縁方式をそれぞれ適用した発電機の温度上昇試験結果を図5に示す。これら二つの発電機は、固定子コイルの絶縁層だけが異なる発電機である。高熱伝導絶縁方式を適用した発電機は、従来絶縁方式の発電機に比べて、固定子コイルの温度上昇を約10 K低減できることを確認した。

3.2 水素ガス圧力520 kPa・gに対応した構造設計技術

冷却性能は、冷媒である水素ガスの圧力を上げることで向上できる。このため開発機では、採用実績のある中で最大の水素ガス圧力520 kPa・gを適用した。設計時の検討事項としては、固定子フレームやベアリングブラケットの強度が挙げられる。

当社は、水素ガス圧力520 kPa・g対応の発電機を多数製造した実績があり、更に有限要素法 (FEM) を用いた大規模構

造解析などに基づいた強度評価を実施することで、信頼性を確保するとともに、コンパクト化と構造簡略化も実現している。

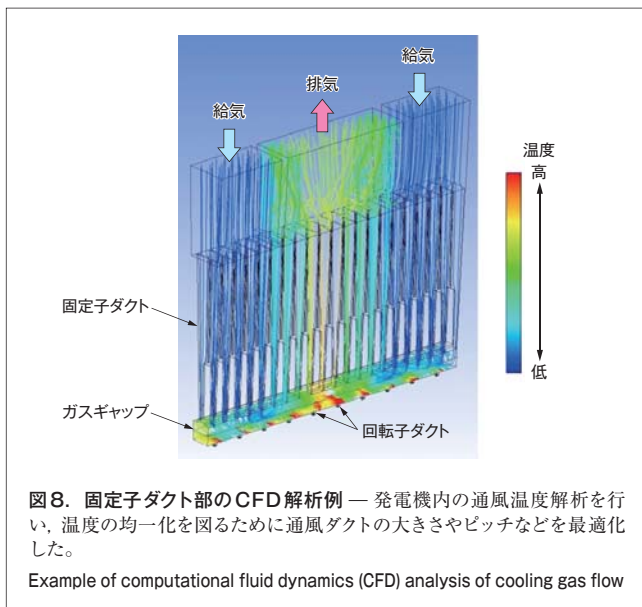
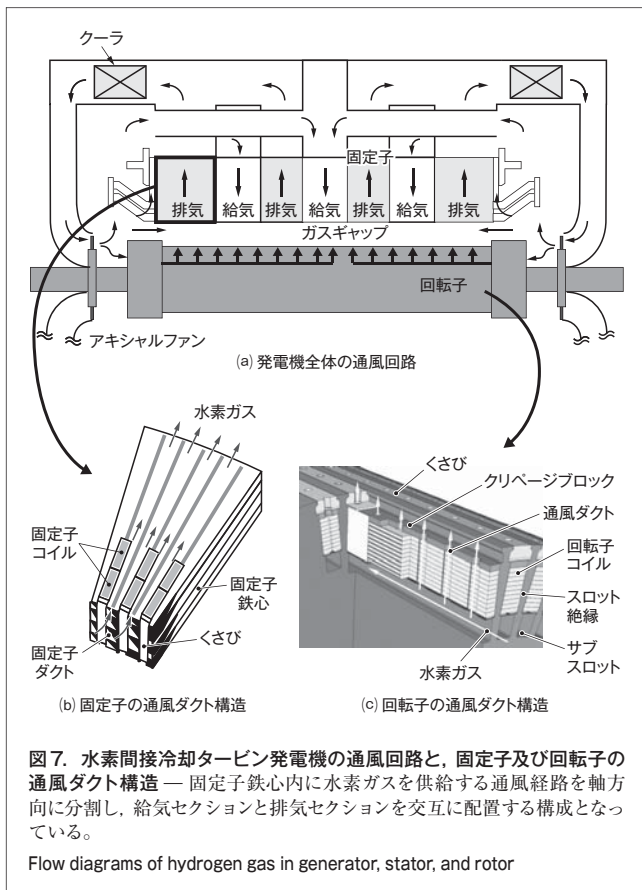
固定子フレーム及びベアリングブラケット部の応力解析評価結果の一例を図6に示す。各部に発生する応力が、許容値内であることを確認している。

3.3 通風回路の最適化技術

水素間接冷却タービン発電機全体の通風回路を図7(a)に示す。固定子の冷却構造は、回転子の軸方向を複数のセクションに分割して給気セクションと排気セクションを交互に配置し、それぞれのセクションの固定子鉄心内に水素ガスの通風ダクトを設けている (図7(b))。

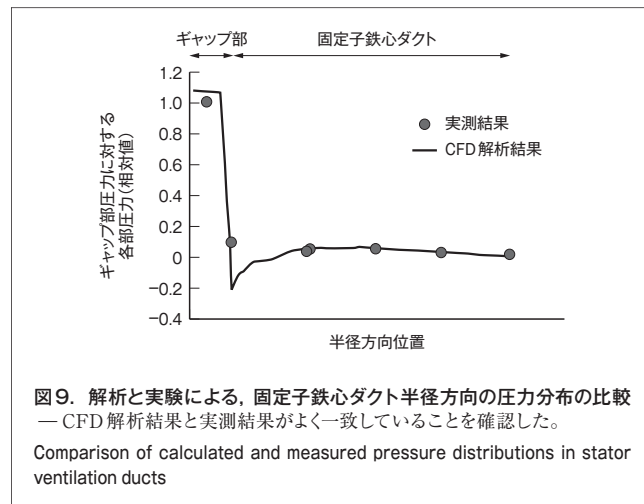
一方、回転子の冷却は、構造が簡単なラジアルフロー方式を採用した。この方式では、回転子コイルが入るスロット底部に更にサブスロットを設け、鉄心端部から水素ガスを軸方向に供給する。そして回転子の遠心力を利用して、回転子に設けた通風ダクトに水素ガスを導いて冷却を行う (図7(c))。

回転子の通風回路も含めた発電機内部全体の3次元熱流体 (CFD: Computational Fluid Dynamics) 解析 (図8) や電磁



界解析を駆使して、発電機各部の発熱分布を詳細に把握し、通風ダクトの大きさや配置を最適化した。これによって、水素ガスを効率的に固定子と回転子に導入するとともに、水素ガス流量も最適化して冷却性能の向上を図った。

また、固定子ダクトを模擬した通風損失評価装置を用いた各種の検証実験や、発電機の工場試験時にガス流量と通風損



失の関係を実測することによって、解析結果の信頼性を確認している。

一例として、固定子鉄心ダクトの半径方向の圧力分布について、通風損失評価装置での解析結果と実測結果との比較を図9に示す。解析結果は実測結果とよく一致しており、CFD解析が発電機内部の水素ガスの流動状態の把握に極めて有効であることがわかる。

4 あとがき

固定子コイルの高熱伝導絶縁技術、水素ガス圧力520 kPa・gに対応した構造設計技術、及び通風回路の最適化技術により、固定子コイルの冷却性能を向上させた、820 MVA-50 Hzの大容量水素間接冷却タービン発電機を開発した。

今後も水素間接冷却方式を適用したタービン発電機の更なる大容量化、高効率化、及びコンパクト化を目指した技術開発を継続していく。

- 鈴鹿 暁志 SUZUKA Satoshi**
 電力システム社 火力・水力事業部 火力電機技術部主務。
 火力発電所建設の電機システムエンジニアリング業務に従事。
 電気学会会員。
 Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.
- 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 高機能・絶縁材料開発部グループ長。回転電機の絶縁材料の開発に従事。電気学会、CIGRE会員。
 Power and Industrial Systems Research and Development Center
- 加幡 安雄 KABATA Yasuo, D.Eng.**
 電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 回転機器開発部主幹、博士(工学)。回転電機の通風冷却技術の開発に従事。電気学会、日本機械学会会員。
 Power and Industrial Systems Research and Development Center