

# 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

60 Hz Large-Capacity Indirectly Hydrogen-Cooled Turbine-Driven Generator

富木 広明      上田 隆司      長倉 謙

■ TOMIKI Hiroaki      ■ UEDA Takashi      ■ NAGAKURA Ken

従来、火力発電所向けのタービン発電機は、中間容量機（～400 MVA 級）には固定子コイルを水素で間接的に冷却する水素間接冷却方式が、大容量機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よりも運転性及び保守性の面で有利であり、かつ構造も簡単であるため、東芝はこの方式を大容量機にも適用できるように、適用容量の拡大を目指して開発を進めている。その結果、水素間接冷却方式の実機適用機としては世界最大容量<sup>(注1)</sup>となる670 MVAのタービン発電機を開発し、関西電力(株)の舞鶴発電所2号機として出荷した。この方式は効率面でも有利であり、今回開発したタービン発電機は工場試験結果で99.1%という高効率を達成しており、エコプロダクツとして二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)排出量削減に寄与できる。

Water-cooled generators are widely used for large-capacity turbine-driven generators of thermal power plants. However, a simpler stator cooling system, such as an indirectly hydrogen-cooled generator for turbine-driven generators with an intermediate capacity of up to the 400 MVA class, is required to realize easy operation and maintenance.

With the aim of expanding the capacity of turbine-driven generators, Toshiba has been developing a large-capacity indirectly hydrogen-cooled turbine-driven generator as a solution to this issue. As a result of these efforts, we have manufactured and successfully tested a 670 MVA indirectly hydrogen-cooled turbine-driven generator and installed it at Maizuru Power Station Unit No. 2 of The Kansai Electric Power Co., Inc. The generator has achieved a high efficiency of 99.1% in a shop test, thus demonstrating the higher efficiency desired for turbine generators to reduce the load on the global environment.

## 1 まえがき

従来、事業用発電所向けの大容量タービン発電機は、固定子コイルの冷却に、冷却性能が水素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。しかし、この方式では冷却水を循環させるための固定子冷却水装置が必要となり、発電機の内部と外部、及び固定子コイル内に冷却水システムが必要となるため、システムや設備の構成が複雑になるという課題がある。

東芝は、このような冷却水システムが不要で、水素ガスを用いて固定子コイルの導体を絶縁材の外部から間接的に冷却する水素間接冷却方式を適用したタービン発電機の大容量化に取り組んできた。

ここでは、当社が開発した水素間接冷却方式による大容量化技術と、関西電力(株)の舞鶴発電所2号機用として開発した世界最大容量となる670 MVAのタービン発電機について述べる。

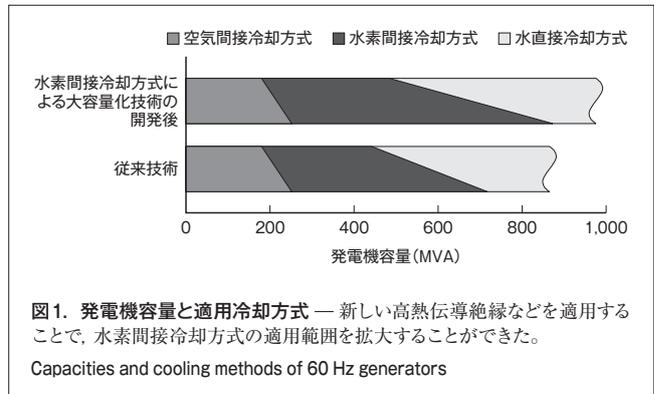


図1. 発電機容量と適用冷却方式 — 新しい高熱伝導絶縁などを適用することで、水素間接冷却方式の適用範囲を拡大することができた。  
Capacities and cooling methods of 60 Hz generators

その冷却水を処理する固定子冷却水装置が必要である。この装置は、ポンプや、電動機、イオン交換樹脂塔、計器などから構成されており、これらを定期的にメンテナンスすることで発電機の安定運転を実現している。

これに対して、固定子コイルの冷却を発電機内の水素ガスによる間接冷却へ変更することで、固定子冷却水装置やその関連配管、制御盤、計器盤などが不要になり初期の建設費用を削減できるとともに、プラント運用中の保守にかかる労力や費用も削減することが可能になる。また、これらの設置スペースも不要となることから、発電所の省スペース化や従来の設置スペースを有効活用することができる。

## 2 固定子コイル水素間接冷却方式の特長

従来の発電機では固定子コイルを水で直接冷却するため、

(注1) 2009年10月現在、当社調べ。

水素間接冷却方式は、従来、タービン発電機の間容量機（～400 MVA 級）に適用していたが、当社は、この方式での大容量化技術の開発を進めている。発電機容量に対して当社で適用している冷却方式は、**図1**に示すように、大容量化技術の開発により水素間接方式の採用が拡大している。

### 3 舞鶴発電所2号機用タービン発電機

関西電力(株)の舞鶴発電所2号機は出力900 MWのクロス

表1. 舞鶴発電所2号機用タービン発電機と従来機の諸元比較

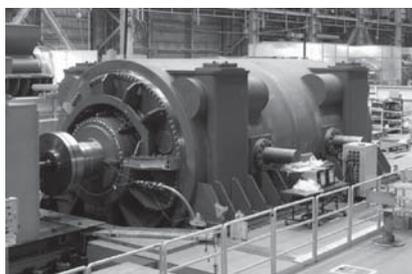
Comparison of specifications and test results of newly developed and conventional generators

項目	舞鶴発電所 2号機 一次発電機	舞鶴発電所 2号機 二次発電機	南港発電所 3号発電機 (1990年製造)
定格容量 (MVA)	670	370	670
定格電圧 (kV)	19	19	22
定格電流 (A)	20,360	11,244	17,583
定格力率	0.9	0.9	0.9
定格周波数 (Hz)	60	60	60
極数 (回転数)	2 (3,600 rpm)	4 (1,800 rpm)	2 (3,600 rpm)
冷却方式	固定子コイル	水素間接冷却	水素間接冷却
	回転子コイル	水素直接冷却	水素直接冷却
水素ガス圧 (kPag)	520	410	410
効率* (工場試験時) (%)	99.1	99.1	99.0

\* JEC-2130-2000ベース値



(a) 一次発電機 (670 MVA)



(b) 二次発電機 (370 MVA)

図2. 舞鶴発電所2号機用タービン発電機 — 670 MVA 及び 370 MVA 発電機の工場における回転電気試験の結果、99.1% (JEC-2130-2000 ベース値) という高効率を達成している。

670 MVA and 370 MVA generators undergoing shop test

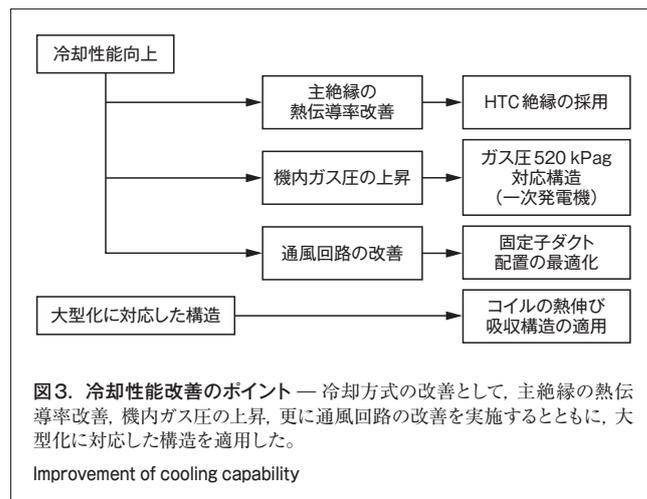


図3. 冷却性能改善のポイント — 冷却方式の改善として、主絶縁の熱伝導率改善、機内ガス圧の上昇、更に通風回路の改善を実施するとともに、大型化に対応した構造を適用した。

Improvement of cooling capability

コンパウンド発電設備である。タービン発電機は、670 MVA の一次発電機及び370 MVAの二次発電機に水素間接冷却方式が採用された。タービン発電機の主な定格と特徴を、この舞鶴発電所2号機一次発電機と同容量で高効率仕様の関西電力(株)南港発電所3号機と比較して**表1**に示す。

工場試験のようすを**図2**に示す。工場での回転電気試験の結果、効率において、一次発電機及び二次発電機ともに南港発電所3号機を上回る99.1% (JEC-2130-2000 (電気学会 電気規格調査会標準規格2130-2000) ベース値) という高効率を達成した。また、電気定数、温度上昇値、振動値など他の試験結果も規格及び仕様値を満足しており、良好な結果を得た。

水素間接冷却方式を採用したタービン発電機を大容量化するには、固定子コイルの冷却性能向上が一番のポイントとなる。当社は**図3**に示すように、高熱伝導 (HTC: High Thermal Conductivity) 絶縁を開発し適用するとともに、一次発電機では水素ガス圧力を520 kPagと高め、更に通風回路のダクト配置を最適化してエネルギー密度を大きくしている。また、鉄心長と温度に比例して増大するコイルの熱伸びを吸収できる固定子コイルエンド支持構造を採用した。

### 4 大容量化のための適用技術

#### 4.1 HTC 絶縁の適用

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4**に示すように、導体からコイル絶縁層、鉄心、水素ガスへという経路で放熱される。この伝熱経路はコイル絶縁層の熱抵抗が大きいため、コイル絶縁層の熱伝導率を増加することが冷却性能の向上に大きな効果がある。そこで、固定子コイルの絶縁にHTC材を添加することによって、従来と同等の絶縁性能でありながら約2倍の熱伝導率を持つHTC絶縁を開発し適用した。

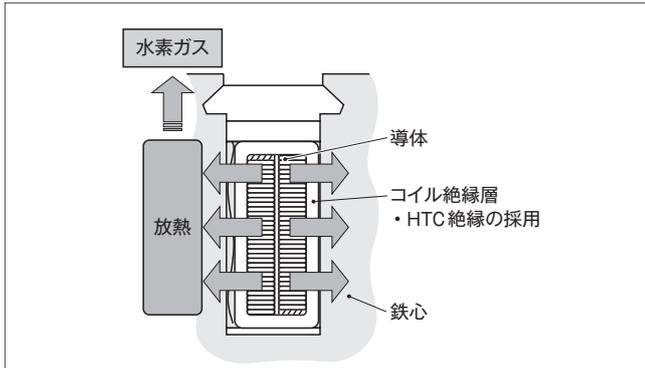


図4. 固定子コイルの断面構造 — 固定子コイルの導体で発生した熱がコイル絶縁層を経由して鉄心に放熱される。

Cross-sectional structure of stator bar

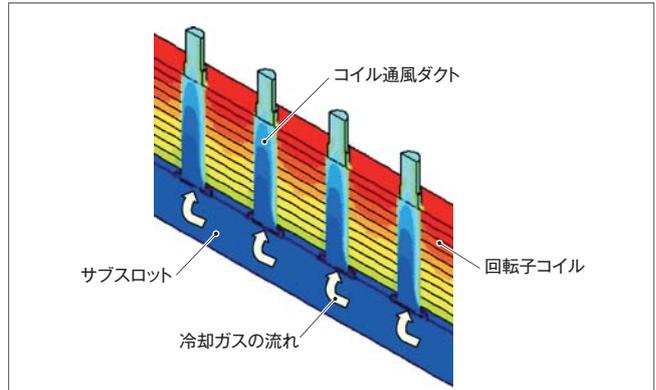


図7. 回転子通風温度のCFD (数値流体力学) 解析結果 — 発電機内の通風温度解析を行い、温度の均一化を図るために通風ダクトの大きさやピッチの最適化を行った。

Computational fluid dynamics (CFD) analysis of cooling gas flow

## 4.2 通風回路の最適化

水素間接冷却方式の通風回路には、図5に示すように固定子鉄心内通風経路(ダクト通風)を給気セクションと排気セクションに分けるマルチベンチレーションシステムを採用した。

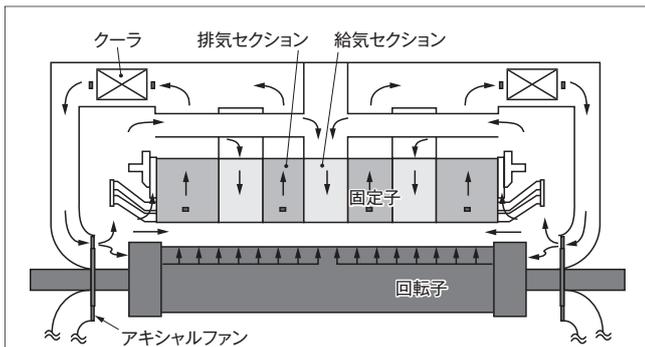
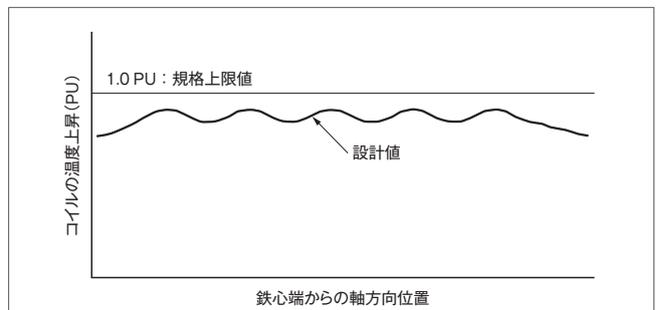


図5. 水素間接冷却方式の通風回路 — 水素ガスのダクト通風を給気セクションと排気セクションに分けるマルチベンチレーションシステムを採用した。

Flow diagram of hydrogen gas in generator



PU : Per Unit

図8. 固定子コイルの温度分布 — マルチセクション方式の固定子コイルの温度分布例である。軸方向に対して温度変化の均一化を図った。

Temperature distribution of stator winding

回転子には、構造が簡単なラジアルフロータイプを採用した(図6)。ラジアルフローは、冷却用の水素ガスを鉄心端部からサブスロットに通し、回転子の遠心力を利用して回転子内部に設けられた通風ダクトに導入することにより冷却する方式である。

ラジアルフロータイプは、その特性から鉄心長が長くなると冷却が難しくなるが、通風ダクトの大きさやピッチを最適化し、開発した発電機に適用した。回転子通風温度の解析結果の一例を図7に、マルチセクションタイプの固定子温度分布を図8に示す。

## 4.3 水素ガス圧力520 kPagに対応できる構造の適用

水素間接冷却方式はガス圧力を上げることで冷却性能が向上するため、一次発電機には実績で最大となるガス圧力520 kPagを適用した。その際の課題として、図9に示すように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、これまでに水素ガス圧力520 kPagのタービン発電機を多数開発した実績があるうえ、更に有限要素法(FEM)による大規模構造解析などによって強度評価を行うことで、信

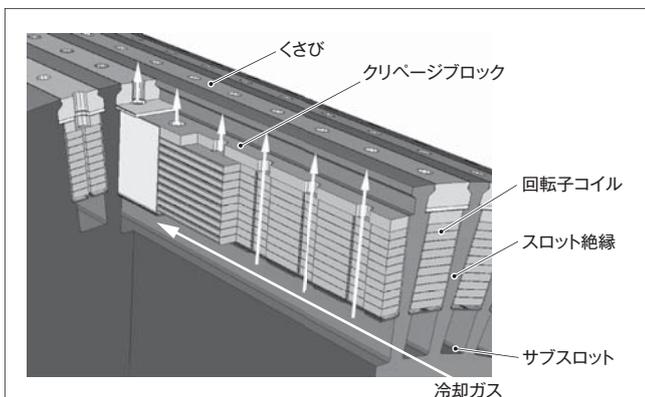
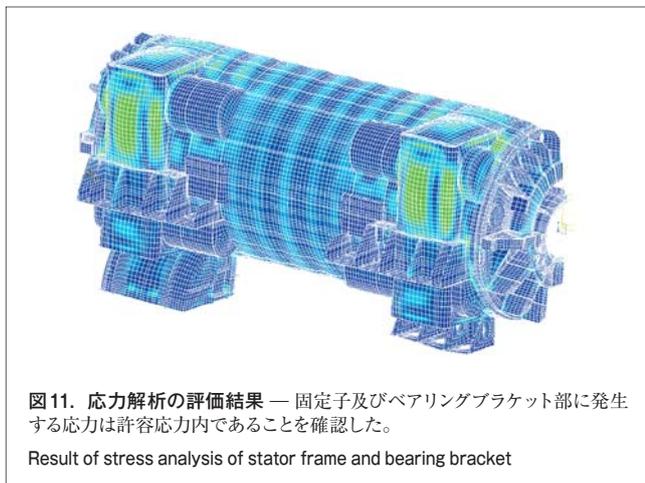
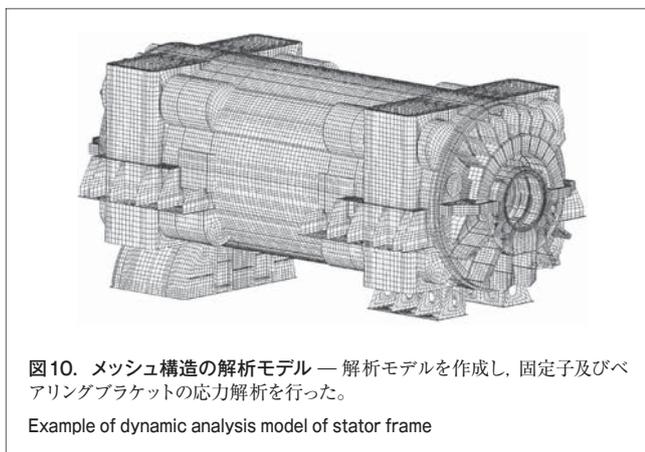
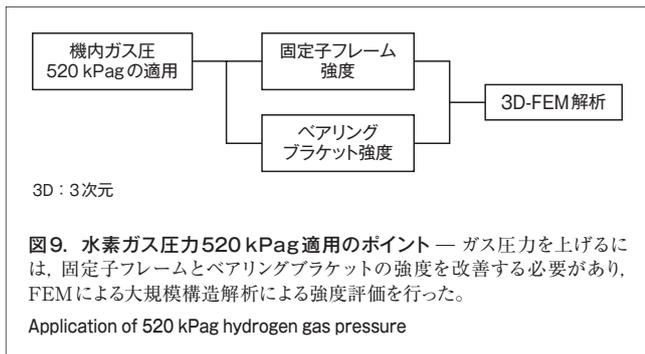


図6. ラジアルフロータイプの回転子 — 回転子の遠心力を利用して回転子内部に導入した冷却用の水素ガスを、回転子コイルに設けた通風ダクトに流すことにより冷却する。

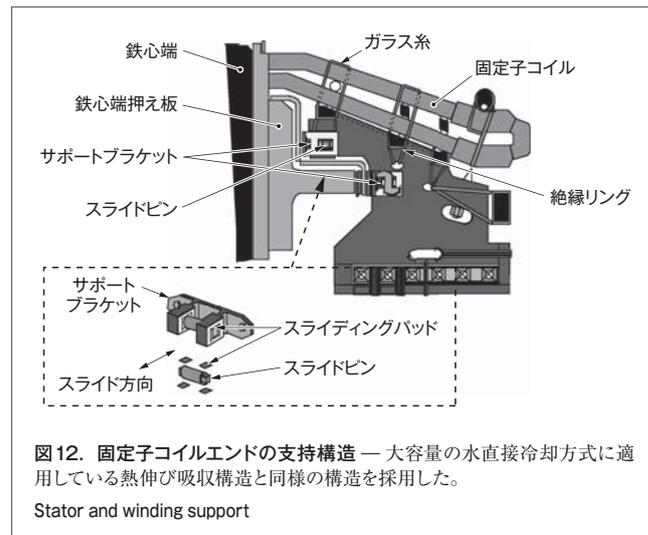
Radial-flow type rotor



頼性の確保とともに、コンパクト化及び構造の簡略化を実現した。解析モデルのメッシュ構造を図10に、固定子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11に示す。

#### 4.4 コイルの熱伸び吸収構造の適用

固定子コイルエンドには、これまでの大容量機で実績のある熱伸び吸収構造を持つ支持構造を適用した。この構造の特徴は、図12に示すように固定子コイルの軸方向への熱伸びを吸収するためのスライド機構を持ち、円周方向及び半径方向はガラス糸で強固に固定する構造である。



## 5 あとがき

当社は、HTC絶縁の適用や、ダクト通風の最適化、機内水素ガス圧の上昇に対応できる構造の採用など様々な冷却性能向上技術を適用することによって、水素間接冷却方式の実機適用機として世界最大容量のタービン発電機（一次発電機670 MVA）を開発し、関西電力（株）舞鶴発電所2号機として出荷した。

既設の南港発電所3号機や従来の水直接冷却方式のタービン発電機と比べ、約0.1～0.2ポイントの効率向上が達成でき、概算ではあるが、火力発電所の燃料として使用される石炭に置き換えると年間約4,700 tを、CO<sub>2</sub>排出量では年間約14,000 tを削減できる結果となる。

当社は今後も引き続き、地球環境に配慮したタービン発電機の開発を進めていく。



富木 広明 TOMIKI Hiroaki

電力システム社 火力プラント統括部 火力電機技術部。  
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。  
Thermal Power Plant Engineering Div.



上田 隆司 UEDA Takashi

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。回転電機の電磁気技術の開発に従事。電気学会会員。  
Power and Industrial Systems Research and Development Center



長倉 謙 NAGAKURA Ken

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