

# 50 Hz 大容量水冷却発電機及び水素冷却発電機

## 50 Hz Large-Capacity Water-Cooled Generator and Hydrogen-Cooled Generator

山川 政幸      垣内 幹雄      片山 仁  
 ■ YAMAKAWA Masayuki      ■ KAKIUCHI Mikio      ■ KATAYAMA Hitoshi

東南アジアでは、アジア通貨危機からの回復以降、再び大型石炭火力発電所の建設が活発化してきており、800,000 kW 級水冷却発電機が必要となっている。また、コンバインドサイクル発電所も 1,500 °C 級のガスタービンが市場投入され始めており、500,000 kW 級大容量発電機のニーズが高まっている。前者については、東芝は 60 Hz 機で 1,120,000 kVA の発電機を製作した実績を持つが、今回は 934,000 kVA と 50 Hz 発電機としては当社最大容量の水冷却発電機をマレーシア石炭火力発電所向けに製造し、出荷した。後者については、従来の設計概念では水冷却方式が適用される範囲であるが、この容量帯でも補機構成がシンプルな水素間接冷却方式の発電機を開発し、ラインアップを完了した。また、これを独立系発電事業者 (IPP) 向け 563,334 kVA 水素冷却発電機に実適用し、製造・出荷した。

Demand has recently been increasing in Southeast Asia for 800,000 kW-class generators to be used in coal-fired power plants and for 500,000 kW-class generators to be used in 1,500 °C gas turbine combined-cycle power plants.

Toshiba has developed a large-capacity water-cooled generator for coal-fired plants and a large-capacity indirectly hydrogen-cooled generator for combined-cycle plants. Applying these technologies, we have manufactured and shipped a 934,000 kVA generator of the former type and a 563,334 kVA generator of the latter type.

### 1 まえがき

最近、東南アジアでは大容量石炭火力発電所の需要が伸びており、800,000 kW クラスの高効率大容量発電機へのニーズが高まっている。一方、今後需要の増大が見込まれる H System<sup>TM</sup> (注1) (H型) (1,500 °C 級) ガスタービンを使用した一軸型コンバインドサイクル発電所には、400,000 kW (60 Hz 機) ~ 540,000 kW (50 Hz 機) クラスの高効率発電機が必要とされている。

東芝は今回、934,000 kVA-50 Hz 水冷却発電機を 2005 年 5 月に、563,334 kVA-50 Hz 水素冷却発電機を 2005 年 10 月に完成し出荷した。

ここでは、それぞれの発電機への適用技術及び工場試験結果について述べる。

### 2 設計コンセプト

発電機は容量によって最適な冷却方式を選択しており、当社では電機子巻線空気間接冷却 (空気冷却)、電機子巻線水素間接冷却 (水素冷却)、電機子巻線水直接冷却 (水冷却) の 3 種類の冷却方式を採用している。各冷却方式による容量帯を図 1 に示す。

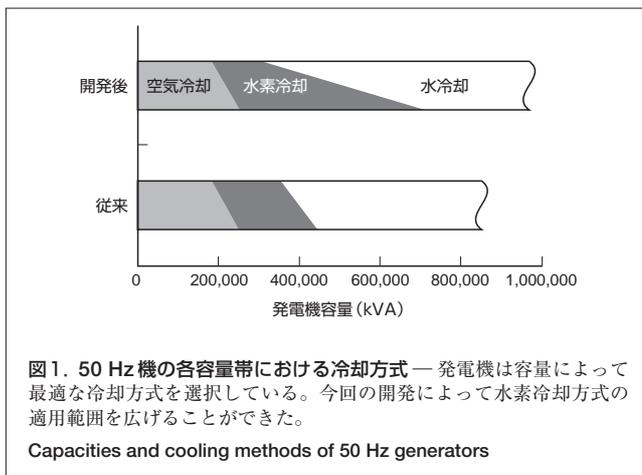


図 1. 50 Hz 機の各容量帯における冷却方式 — 発電機は容量によって最適な冷却方式を選択している。今回の開発によって水素冷却方式の適用範囲を広げることができた。

Capacities and cooling methods of 50 Hz generators

2 極 50 Hz 発電機として当社最大容量となる 934,000 kVA には、水冷却方式を適用し、最適化設計を行った。563,334 kVA には、水素冷却方式の大容量化で対応することとした。水素冷却発電機は水冷却発電機と比較して、電機子巻線冷却水装置を必要としないので、システムをシンプル化でき、更に、水冷却機よりも高効率となるため、経済性、運転性、保守性が向上し、顧客にとって大きなメリットがある。

(注 1) H System は、米国 GE 社の商標。

### 3 934,000 kVA 水冷却発電機の開発

#### 3.1 設計概要

今回開発した水冷却発電機の仕様を表1に示す。この発電機の容量は934,000 kVAであり、従来の当社製2極50 Hz 発電機の最大容量802,000 kVAに対して16%の容量増大となっている。

表1. 水冷却発電機の仕様比較

Comparison of water-cooled generator specifications

項目	開発機	既設機
容量 (kVA)	934,000	802,000
回転速度 (rpm)	3,000	3,000
電圧 (V)	26,000	22,800
周波数 (Hz)	50	50
力率	0.85	0.9
水素ガス圧力 (kPa・g)	520	440
励磁方式	サイリスタ励磁	サイリスタ励磁
適用規格	IEC60034	IEC60034
短絡比	0.5以上	0.5以上
工場試験結果：規約効率	98.92	98.85 (0.85pfへの換算値)

一般的に発電機容量は以下の式で表される。

$$P=k \times Di^2 \times L \times N \dots\dots (式1)$$

- P : 発電機容量
- k : 出力係数
- Di : 固定子内径
- L : 鉄心長
- N : 回転数

発電機単機容量を増大するためには、出力係数(k)を上げるか、発電機体格( $Di^2 \times L$ )を大きくする必要がある。

出力係数(エネルギー密度)は、単位体積当たりの容量であり冷却水素ガス圧力を上昇させることにより増加することができるため、今回、冷却水素ガス圧力を従来の440 kPa・gから520 kPa・gとした。

発電機体格については、固定子鉄心内径(回転子外径)と鉄心長が回転子設計のもっとも重要なポイントの一つである。回転子外径(D)を増加する設計(L/Dが小)では、遠心力の増加に伴い高強度の回転子材料が必要となる。また、鉄心長を増加する設計(L/Dが大)では、運転性、特に振動特性の確認が必要である。今回は、材料強度と振動特性を考慮して、L/D及び回転子外径(D)が当社実績範囲内となるよう、回転子外径(D)と鉄心長(L)をバランス良く選定した。

また、水素ガス圧増加を考慮したフレーム構造の設計では、フレームの3次元応力解析を行い、各部応力の最適化を行った。解析結果を図2に示す。ベアリングブラケットやクローラーボックスなどの平面構造物に対しては、板厚及び補

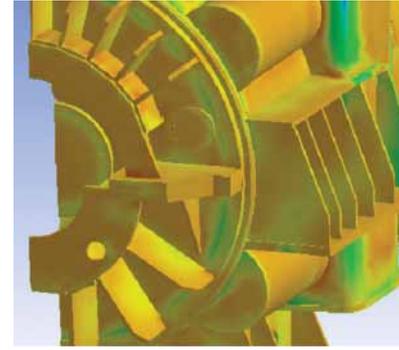


図2. フレーム応力の解析—水素ガス圧力増加を考慮し、フレームの3次元応力解析を行い、各部応力の最適化を実施した。

Stress analysis of stator frame

強を増加した。また、ターミナルボックスは、平面部分を減らして、応力を緩和する構造とした。

鉄心支持構造は、実績のあるバネ板による弾性支持構造を採用し、鉄心は小型・高効率化のため、方向性けい素鋼板を採用している。ステータコイルのスロット内の固定には、運転時のスロット内電磁力に対する信頼性を考慮して、サイドリップスプリングとテーパくさびを採用した。また、ステータコイルエンド支持構造には、運転時のステータコイル熱伸びを吸収するスライド機構を備えている。

ロータコイルの通風冷却は、大容量機で実績のあるダイアゴナルフローを採用するとともに、ロータ断面設計を最適化して、ロータコイル断面積を大きく確保した。

#### 3.2 試験結果

工場試験の状況を図3に示す。

工場にて出荷前にIEC60034(国際電気標準会議規格60034)に基づき特性試験、損失測定試験、温度上昇試験及び過速度試験を実施した。結果は、仕様及び規格を満足し良好であった。主な試験結果は次のとおりである。



図3. 934,000 kVA 水冷却発電機の工場試験風景—出荷前に工場試験を実施し、仕様及び規格を満足していることを確認した。

View of 934,000 kVA water-cooled generator undergoing factory test

- (1) 特性 無負荷定格電圧時、及び三相短絡定格電流時の界磁電流を確認した結果、設計値に対する差は1%程度であった。また、短絡比は仕様の0.5以上を満足した。
  - (2) 損失・効率 発電機法により各損失を測定し、IEC 60034規格に従って規約効率を算定した。793,900 kW-0.85力率(pf)時の効率は98.92%と、従来比+0.07%の良好な結果を得た。
  - (3) コイル温度上昇 等価温度試験法による試験を行い、定格負荷時の各部温度上昇を推定した。結果は、規格を満足しており、固定子、回転子、固定子鉄心端ともに従来機と同等レベルであった。
  - (4) 軸振動 定格速度及び120%過速度試験において、回転子振動を確認し、良好な結果を得た。
- この発電機は2005年5月に工場試験を終了し出荷された。

## 4 563,334 kVA 水素冷却発電機の開発

### 4.1 設計概要

水素冷却発電機の大容量化については、9H型ガスタービンを使用した一軸型コンバインドサイクルに適用することを目的として、最大容量710,000 kVAを目標に開発を行ってきた。今回、この開発成果を適用し国内独立系発電事業者(IPP)向けとして、563,334 kVA発電機を完成し、出荷した。発電機諸元を表2に示す。

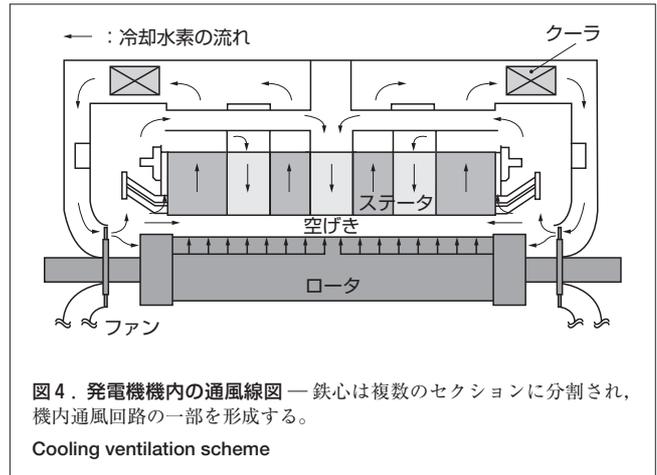
表2. 水素冷却発電機の仕様比較

Comparison of indirectly hydrogen-cooled generator specifications

項目	開発機	既設機
容量 (kVA)	563,334	445,000
回転速度 (rpm)	3,000	3,000
電圧 (V)	20,500	15,000
周波数 (Hz)	50	50
力率	0.9	0.9
水素ガス圧力 (kPa・g)	410	410
励磁方式	サイリスタ励磁	サイリスタ励磁
適用規格	JEC2130	IEC60034
短絡比	0.5以上	0.5以上
工場試験結果：規約効率	99.19	99.06

この発電機容量の場合、従来は水冷却方式を適用する領域であったが、冷却技術及び解析技術の向上と、固定子巻線に高热伝導絶縁を適用することにより、水素冷却方式が適用可能となった。

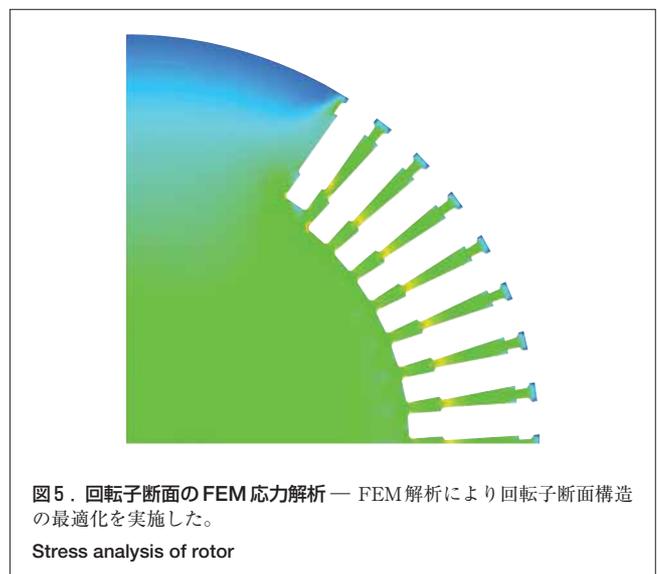
高热伝導絶縁は、2000年の初採用以降これまで十数台の適用実績があり、これらの試験結果を踏まえて、解析精度の



充実と機内通風の最適化を図った。図4に機内通風線図を示す。鉄心は複数のセクションに分割されており、機内の通風分布は、各セクションのダクト配分により変化する。この発電機では、3次元熱流体(CFD)解析により、固定子ダクトピッチ及び各セクションのダクト配分の最適化を図った。回転子からの冷却ガスの温度は、固定子からのガス温度よりも高いため、回転子排気が特定の固定子ダクトに集中すると、固定子のダクトのガス温度に大きな温度分布差が生じる。固定子ダクト配分を最適化することで、この温度分布を平準化するとともに風損低減を図った。

固定子コイルは、上下コイルで断面構成の異なる異断面コイル及び540°トランスポジションを採用することで、上下コイルの温度均一化と損失低減を図った。

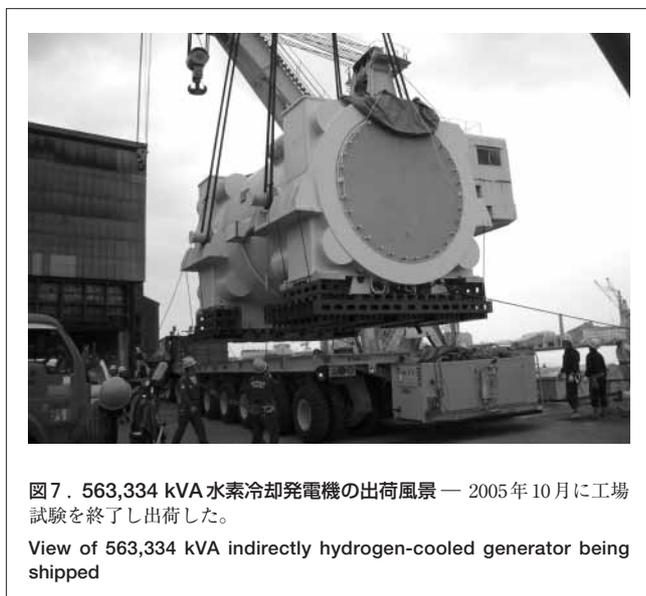
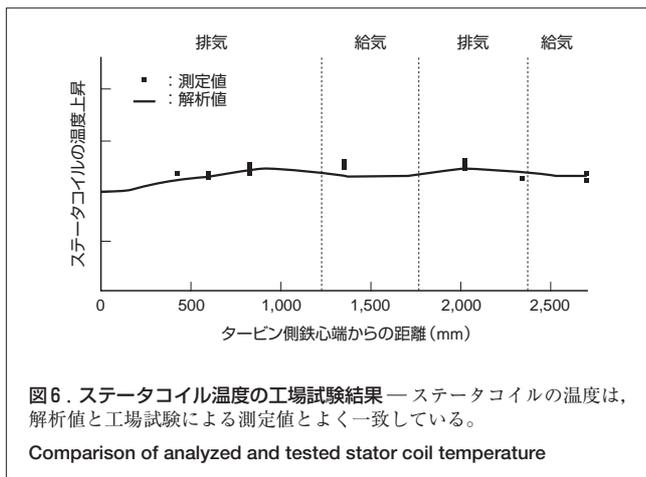
回転子コイルの冷却は、実績のあるラジアルフロー方式を採用した。また、回転子断面構造は、有限要素法(FEM)解析により、ポール角とスロット形状の最適化を行った。応力解析の結果を図5に示す。



## 4.2 試験結果

工場試験は、JEC2130(電気学会 電気規格調査会標準規格2130)に基づき前述の934,000kVA機と同様の試験項目について実施した。結果は、設計値どおりの良好なものであった。主な試験結果は次のとおりである。

- (1) 損失・効率 発電機法により各損失を測定し、JEC2130規格に従って規約効率を算定した。507,000kW・0.9pf時の効率は99.19%で、従来比+0.13%の良好な結果を得た。



- (2) コイル温度上昇 等価温度上昇試験法による試験を行い、定格負荷時の各部温度上昇を推定した。結果は、規格を満足しており、固定子、回転子、固定子鉄心端ともに従来機と同等レベルであった。固定子コイル温度の軸方向分布の解析値と工場試験による測定値を図6に示す。

この発電機は2005年10月に工場試験を終了し出荷した。出荷風景を図7に示す。

これらの試験結果から、H型コンバインドサイクル発電所向け最大定格710,000kVAに対しても、この設計が適用可能であることが検証できた。

## 5 あとがき

当社2極50Hz最大容量機である934,000kVA水冷却発電機と、563,334kVA水素冷却発電機を開発・設計・製造・出荷した。今後、これらの技術を更に発展させ、よりいっそうの大容量化と高効率化を目指す。



山川 政幸 YAMAKAWA Masayuki

電力・社会システム社 火力エンジニアリングセンター 火力電機技術部主務。火力発電所の電気系システムエンジニアリング業務に従事。

Thermal Power Engineering Center



垣内 幹雄 KAKIUCHI Mikio

電力・社会システム社 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



片山 仁 KATAYAMA Hitoshi

電力・社会システム社 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。日本機械学会会員。

Keihin Product Operations