

世界最大容量水素間接冷却タービン発電機

World's Largest Capacity Indirectly Hydrogen-Cooled Turbine-Driven Generators

佐藤 理

SATO Osamu

中村 英之

NAKAMURA Hideyuki

幡野 浩

HATANANO Hiroshi

東芝は、タービン発電機システム簡略化の顧客ニーズに応えるために水素冷却タービン発電機の大容量化を図り、水素間接冷却としては世界最大の700 MVA級までの開発を完了した。

Toshiba has developed indirectly hydrogen-cooled turbine-driven generators up to the 700 MVA class, the world's largest capacity. This achievement is the result of Toshiba's efforts to meet the needs of users for system simplification.

1 まえがき

火力発電所においては、経済性、運転性、保守性の向上に対する顧客要求が強くなっている。これを踏まえて、東芝では水素冷却発電機の大容量化を図っており、水素間接冷却としては世界最大容量の700 MVA級まで適用拡大できる技術の開発を完了している。

400 MVA以上の大容量水素冷却発電機は、2001年の初出荷以降既に3台が運転に入っており、設計どおりの高性能・高品質が確認されている。現在設計製作中のものは国内外で9台にのぼり、今後、続々と出荷・運転に入るとともに、1,500級次世代コンバインドサイクル発電プラントにも50 Hz-620 MVA及び60 Hz-455 MVA水素冷却発電機が標準的に採用されることが決まっている。

ここでは、実機での検証試験結果と、開発の概要を述べる。

2 実機検証試験結果

代表例として、2002年に出荷した470 MVA発電機の工場試験結果について述べる。発電機の外観を図1に、発電機諸元を表1に示す。

工場試験では特性試験、損失測定、温度上昇試験及び振動・加速度試験を実施した。いずれの試験も仕様及び規格を満足し、良好な結果が得られた。主な試験結果は次のとおりである。

- (1) 特性 無負荷飽和特性及び三相短絡特性を測定し、界磁電流と短絡比を確認し、良好な結果を得た。
- (2) 損失・効率 各損失を測定し、定格時の効率は99.07%に達し、保証値を十分に満足する結果を得た。
- (3) コイル温度上昇 等価温度法による温度上昇試験を行い、定格負荷時での各部温度上昇を推定し、規格

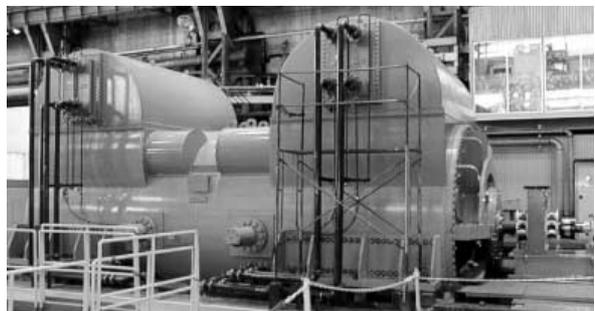


図1. 470 MVA 発電機 - 工場試験時の発電機の外観を示す。
470 MVA generator undergoing shop test

表1. 470 MVA 発電機諸元

Specifications and test results of hydrogen-cooled generators

項目	仕様
容量	470 MVA
電圧	19.5 kV
力率	0.9
回転数	3,600 /min
周波数	60 Hz
規格	ANSI C50
温度上昇	B種
短絡比	0.5以上
効率	99.07 %

ANSI : 米国規格協会

の温度上昇制限値を満足することを確認した。

- (4) 振動・加速度
 - (a) 軸振動 定格速度及び120%過速度試験において、優れた安定性を確認した。
 - (b) 固定子フレーム振動 固定子鉄心振動に対するフレーム振動を実測した結果、振動振幅が1/10以下

となっており、設計どおりの低レベルの振動になっていることを確認した。

- (c) 固定子コイルエンド支持 ハンマリング及び突発短絡試験により、低振動構造を確認した。

3 水素冷却発電機大容量化の概要

従来、400 MVA以上の発電機では、固定子コイルの冷却方式として、導体を純水で直接冷却する方式が適用されていた。この方式は、固定子コイル絶縁の周囲から水素ガスで間接的に冷却する方式と比較して、コイルの冷却効果は大きいですが水冷却に伴う補機や配管システムが必要なため、運転が複雑であり保守に時間がかかる作業が多かった。

これに対して固定子コイルを水素間接冷却方式とすることにより、水冷却に必要な補機や配管システムが省略できるため、運転性、保守性が大幅に向上する。しかし、コイルの水素間接冷却方式は水直接冷却方式と比較して冷却性能が劣るため、冷却強化が最重要課題となる。そこで、固定子コイルに高熱伝導絶縁(High Thermal Conducting: 以下、HTC絶縁と略記)を適用し、また水素ガス流量配分の最適化を行い、水冷却機並みの高出力密度と高効率を達成することができた。

一方、固定子フレームなどの構造部品については、有限要素法(FEM)による大規模構造解析により信頼性を確保するとともに、コンパクト化と構造簡略化を実現した。

4 大容量水素冷却発電機の適用技術

4.1 HTC絶縁

4.1.1 HTC絶縁の開発目標 固定子コイルにHTC絶縁を適用するにあたり、以下を開発目標として定めた。

- (1) 従来比約2倍の熱伝導率
- (2) 従来絶縁と同等の絶縁性能と長期信頼性
 - (a) 従来絶縁と同等の設計電界
 - (b) 従来と同等の耐熱性
- (3) 従来絶縁と同じ製造設備、製造方式
 - (a) コイル単品の真空加圧含浸方式
 - (b) 多くの実績を持つ含浸樹脂(エポキシ樹脂)

4.1.2 高熱伝導化の施策 開発目標に掲げた前記(2)及び(3)項を達成するために、長期にわたって多くの実績を持つエポキシ-マイカ絶縁をベースとした。そのうえで(1)項を達成するために高熱伝導化手法について検討を重ねた。従来のエポキシ-マイカ絶縁を構成する各材料の熱伝導率を表2に示す。鉄心や導体に適用される金属に比べて、絶縁材料の熱伝導率は極めて小さく、有機物であるエポキシ樹脂の熱伝導率は絶縁構成材料中、もっとも小さい。そこで今回、有機物に比較して熱伝導率の高い無機物を絶縁層に導

表2 従来絶縁層を構成する各材料の熱伝導率

Thermal conductivity of insulating materials

材 料	熱伝導率(W/mK)
コイル絶縁	0.27
マイカ	0.3 ~ 0.6
ガラス	0.8 ~ 1.2
エポキシ樹脂	0.2
鉄 心	18
コイル導体(銅)	400

入し、エポキシ樹脂の一部と置き換えることにより高熱伝導化を図った。

4.1.3 HTC絶縁の各種特性 無機物の材質、形状、絶縁への配合量及び製造条件の最適化を図ることにより、開発目標を達成することができた。

- (1) 熱伝導率 多数の実機及び実機大モデルコイルから採取したHTC絶縁層の熱伝導率を図2に示す。従来絶縁層に比べて約2倍の熱伝導率を安定して達成している。
- (2) 課電寿命特性 HTC絶縁を適用したモデルコイルの課電寿命特性を図3に示す。絶縁層中に新たに無機

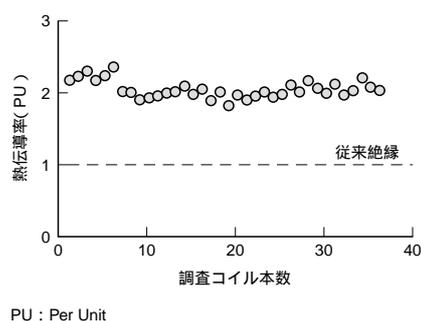


図2 HTC絶縁層の熱伝導率 - 従来比2倍の熱伝導率を達成した。
Thermal conductivity of high thermal conducting (HTC) insulation layer

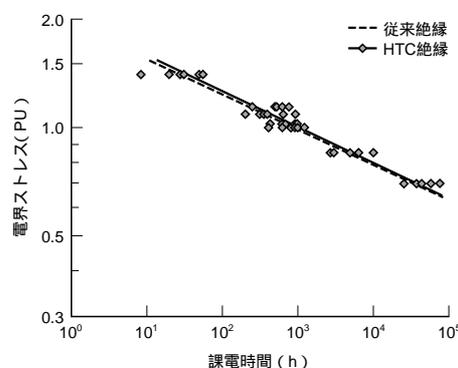


図3 HTC絶縁の課電寿命特性 - 従来絶縁と同等であることを検証した。
Voltage endurance characteristics of HTC insulation

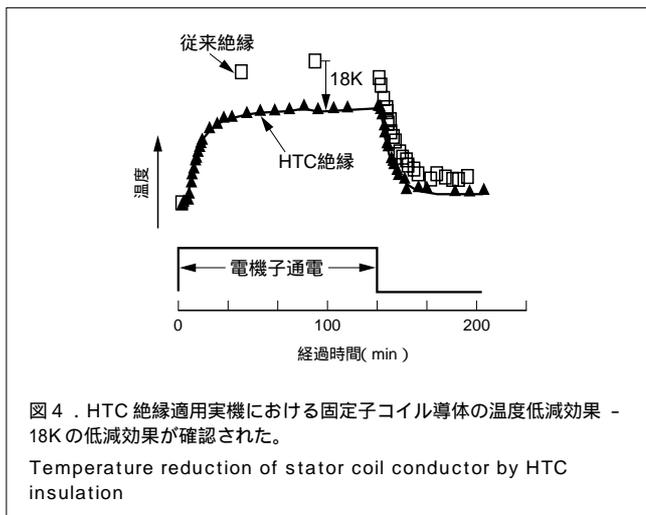
物を導入するため性能低下が懸念されたが、材質、形状などを最適化することにより、従来絶縁と同等の性能を達成することができた。また、実機大モデルコイルを用いて評価した誘電特性、絶縁破壊電圧についても、同様に従来絶縁と同等の性能を確認した。

4.1.4 HTC 絶縁適用による発電機の機内温度低減効果
同一設計で、固定子コイル絶縁のみ HTC 絶縁に変更した発電機(350 MVA 級)の温度上昇試験結果を図4に示す。HTC 絶縁の適用により、コイル導体温度で18Kの低減効果が確認された。

4.2 水素ガス流量配分の最適化

発電機の大容量化とコンパクト化に伴い、固定子及びロータの発熱密度は上昇する。発電機各部の発熱分布を正確に把握し、効率的に冷却ガスを供給して冷却することが重要である。

通風線図を図5に示す。固定子のダクトは複数のセクションに分割する。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。この発電機では三次元熱流体(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



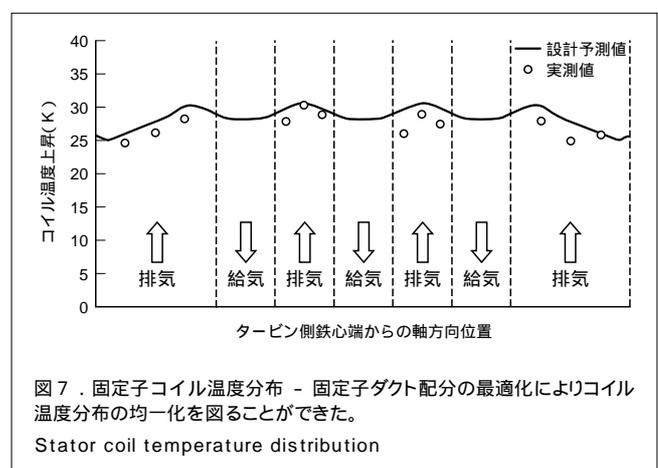
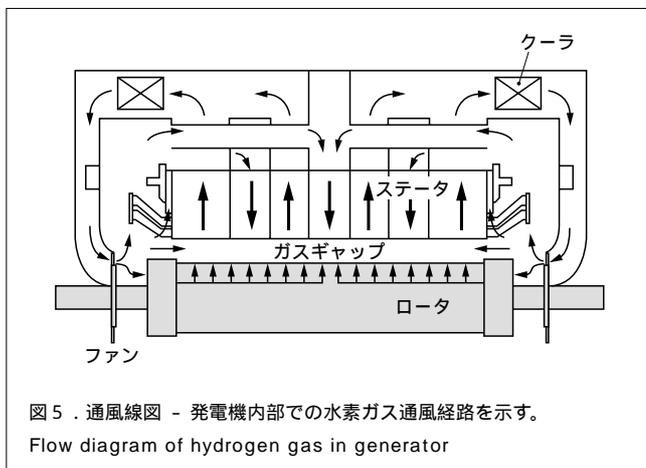
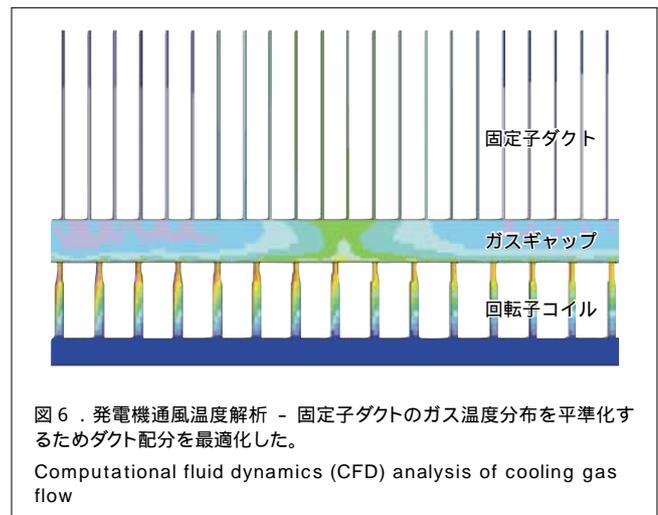
最適化を図った。解析結果の一例として図6にガスギャップ部のガス温度分布を示す。

回転子からの冷却ガス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ずる。この温度分布を平準化するように固定子ダクト配分を最適化した。

470 MVA 機の三相短絡試験時の固定子コイル温度測定値と設計値との比較を図7に示す。固定子ダクト配分の最適化の結果、軸方向のコイル温度分布を均一化することができ、電気設計及び冷却設計の妥当性を確認することができた。

4.3 固定子フレームのコンパクト化

発電所が内陸部などに位置し、そのため鉄道輸送による輸送制限が要求される場合がある。これらの輸送制限に対応できるように固定子フレームはコンパクトに設計する必要がある。一方、固定子フレームをコンパクトに設計するとその固有振動数が低下し、発電機の同期周波数又は2倍周波数に近づく傾向となる。固定子フレームの固有振動数をこれらの周波数から離調して、発電機の振動振幅の低減を図るには固有振動数及び応答感度の予測精度が要求される。精



度の高い予測を実現するために、大規模なFEM解析を実施し、この解析結果を反映して固定子フレームを設計・製作した。固定子フレーム振動解析のFEM解析モデルと応答計算結果を図8に示す。

工場試験の結果は解析値によく一致し、高い設計精度と設計の健全性が確認された。

4.4 固定子コイルエンド支持方法

発電機の大容量化に伴い、固定子コイルの熱伸び量は従来と比較して大きくなる。固定子コイルエンド支持部にはこの熱伸びを許容する構造を採用した。

一方、大容量化に伴い突発短絡事故などにおける電磁力は大きくなるが、固定子コイルエンド支持構造はこれに耐えるものでなければならない。そのために、FEMを適用して電磁解析及び振動・応力解析を実施した。FEM解析の例を図9に示す。解析方法としては同モデルにおいてまず電磁解析を行って電磁力を算定し、その結果を反映して振動・応力解析を実施した。工場試験において、突発短絡事故時におけるこの構造の健全性が確認された。

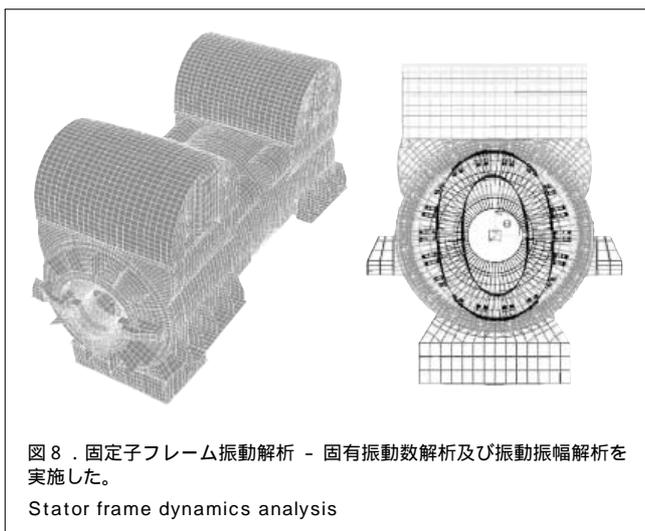


図8．固定子フレーム振動解析 - 固有振動数解析及び振動振幅解析を実施した。

Stator frame dynamics analysis

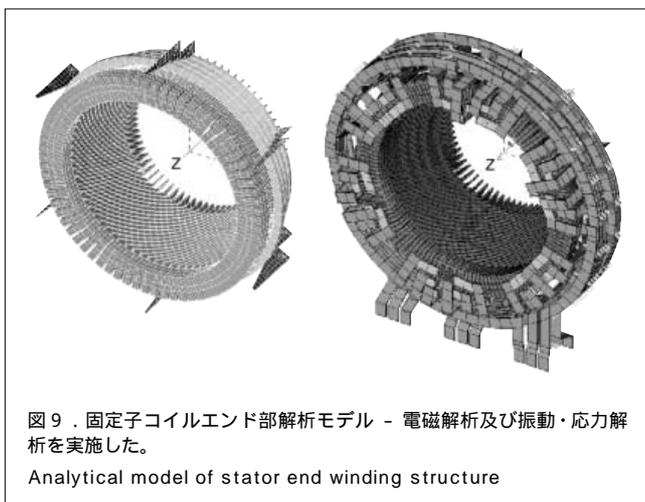


図9．固定子コイルエンド部解析モデル - 電磁解析及び振動・応力解析を実施した。

Analytical model of stator end winding structure

4.5 シックスシグマツールの適用

大容量水素冷却発電機の開発にあたっては、短期間で効果的に開発を進めるために、シックスシグマのツールをプロジェクト管理と設計に適用した。以下に代表例を挙げる。

- (1) 開発開始時にリスクを洗い出して個々のリスク度を評価したうえで、開発進行によるリスク低減度合いを個別項目ごと及び総合的に管理した。また、重要項目にはホールドポイントを設定して、設計審査を実施した。
- (2) 設計パラメータに対して、過去の実績から確率統計的な評価を実施して、設計精度を向上させた。
- (3) 回転子シャフトなどの主要構造物については、モンテカルロ法を適用して通常運転時の寿命消費確率を評価し、高信頼性設計を実現した。

5 あとがき

以上、火力発電所における経済性、運転性、保守性の向上という顧客ニーズに応えるために行った、水素冷却タービン発電機の大容量化の開発概要と実績を述べた。

今後とも、水冷却発電機、空気冷却発電機を含めた豊富な開発・設計・製造・運転の経験を生かし、タービン発電機のよりいっそうの高性能・高信頼化を目指していく。



佐藤 理 SATO Osamu

電力・社会システム社 火力・水力事業部 火力エンジニアリングセンターグループ長。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。電気学会会員。

Thermal Power & Hydroelectric Power Systems & Services Div.



中村 英之 NAKAMURA Hideyuki

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



幡野 浩 HATANO Hiroshi

電力・社会システム社 電力・社会システム技術開発センター 化学・絶縁材料開発部主務。回転電機絶縁の開発業務に従事。電気学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center