

# 世界最大出力900MVA級水素間接冷却タービン発電機の開発と製品化

三菱電機株式会社

代表執行役 執行役社長 柵山 正樹

三菱電機(株)	電力システム製作所	回転機製造部	空 信之
三菱電機(株)	電力システム製作所	回転機製造部	山本 直樹
三菱電機(株)	電力システム製作所	回転機製造部	井上 雅文
三菱電機(株)	電力システム製作所	回転機製造部	灘 隆志
三菱電機(株)	電力システム製作所	回転機製造部	川口 龍太郎

## はじめに

CO<sub>2</sub> 排出による地球温暖化や世界的な電力需要の高まりを背景に、火力発電プラントでは自然資源のさらなる高効率利用と電力の安定供給が急務となっている。このような状況において、タービン発電機もまた効率の向上と信頼性の向上が求められている。

今回開発を行った水素間接冷却タービン発電機は、発電時に機内各部で生じた熱を機内に密封した水素ガスにより冷却を行う方式のタービン発電機である(図1)。この機種は主絶縁を介して固定子コイルの導体部を冷却する方式であり、導体部を水素ガスや純水で直接冷却する方式と比較して大出力化の難しいタイプである。一方で冷却に必要なファン差圧が比較的小さく、導体内に冷却媒体を通さないことから導体

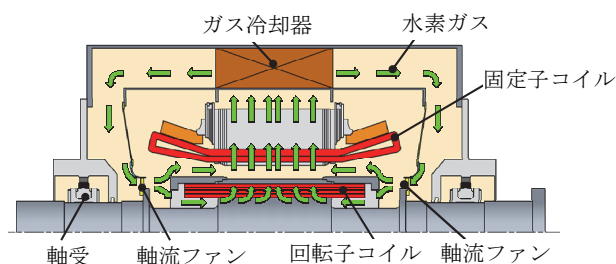


図1 水素間接冷却タービン発電機断面図

断面積を有効利用でき、高効率なタービン発電機とすることができる。加えて、固定子冷却水関連の付帯設備も不要であり、シンプルな構造のため保守面に優れた機種でもあり、大容量化に対するニーズが高まっている。

## 開発のねらい

これを受け当社では、高効率なタービン発電機である水素間接冷却タービン発電機の適用領域拡大を目的に、大出力化の技術開発を行い、併せて更なる高効率化や発電機体格をコンパクト化する技術についても開発を進めた。2014年にはこれら新技術を組み込んだ実機を製作し、検証試験によって信頼性を確認した。

また、開発機には輸送・組立・点検といった運用面での改善も加え、シンプルな外観と運用重視の視点に立ったデザインを採用することで更なる付加価値の向上を図り、電力用大型機器として初めてグッドデザイン賞を2014年に受賞した。

## 装置の概要

開発後の当社ラインナップを図2に、自社従

来機と新シリーズ機の体格比較を表1に示す。従来、水冷却機でカバーしていた700～900MVA級の容量域を、新型の水素間接冷却機では900MVA級までカバーが可能になった。また、体格増加を抑制して20%程度出力を増加、フレーム外径縮小により輸送性も向上した。これにより、大型ガスタービンの容量域まで、高効率な水素間接冷却機が適用可能になった。

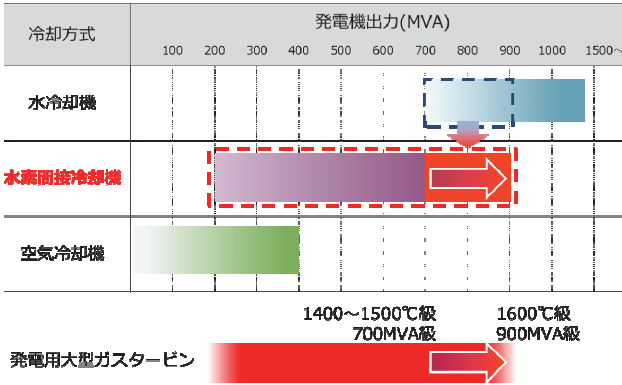


図2 タービン発電機ラインナップ

表1 従来機と新型機の比較

	従来型	新型	従来比
定格容量[MVA]	670	790	+18%
全長[m]	15.3	15.0	-2%
外径[m]	4.5	4.3	-4%
質量	1.0P. U.	0.99P. U.	-1%

## 技術上の特徴

前項で述べたとおり、本開発では、水素間接冷却タービン発電機の大出力化、高効率化およびコンパクト化を図るために新技術を適用しており、主な技術開発の一部を紹介する。

### (1) 大出力化技術

水素間接冷却機は従来700MVA未満の出力域に対応した機種であったが、900MVA級出力に対応すべく大出力化技術開発を行った。大出力化においては、各部の温度上昇や固定子コイルエンド電磁力増加など様々な技術課題があるが、本項では、新開発の冷却技術について述べ

る。

### (1-1) 固定子コイル主絶縁の高性能化

先述の通り、固定子コイルは水素ガスにより主絶縁を介して導体部の冷却を行う(図3)。固定子コイル主絶縁は、複数に重ねたマイカ層と熱硬化性樹脂が主材料であるため、基本的に熱を通しにくい構造となっている。そこで、900MVA級検証機では、製作プロセスの改善により主絶縁の熱伝導率を10%以上向上させた。

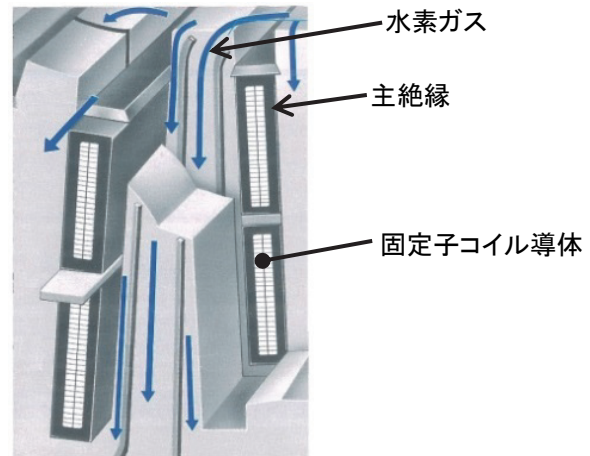


図3 固定子コイル冷却方式

### (1-2) 通風路形状の最適化

回転子コイルの冷却は、導体内に設けた通風路に水素ガスを通し、導体を直接冷却する方式で行う。900MVA級検証機では通風路の各部において圧力損失の低減と冷却性能の向上を目的に形状の最適化を図っており、一例として、図4に回転子ダクト入口形状の最適化構造を示す。形状最適化により、当該部の圧力損失が従来形状から約60%低減することをCFD解析及び部分モ

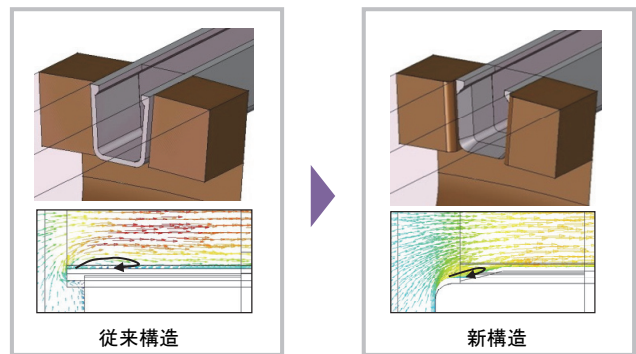


図4 回転子コイル通風孔入口周りの構造変更

デル試験で確認し、冷却性能の向上に貢献している。

(1-3) 固定子鉄心端部の損失・温度解析技術

固定子鉄心端部は進相運転時に漏れ磁束が増加するため、磁性シールドなどを設置することで過熱対策を施している。開発機では、出力密度増加に伴い固定子端部の漏れ磁束が増加し鉄心端部の過熱が懸念されることから、渦電流を考慮した三次元電磁界解析により損失・温度評価を実施した。損失・温度の解析結果より、実負荷進相運転時における温度が許容値を十分満足することを確認した。

(2) 高効率化技術

発電時に生じる損失は電気損や機械損など多様であり、各部の損失を極力抑える技術開発を進め、発電効率の向上を図った。本項では新開発の高効率化技術の一部を紹介する。

(2-1) 高効率ファン (図5)

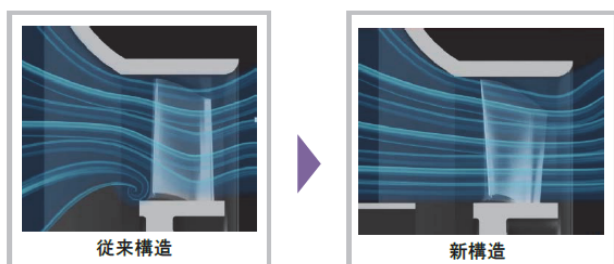


図5 ファンの高効率化

機内冷媒の加圧水素ガス循環に伴う風損の低減を目的にファン効率の改善を行った。新開発のファンには、翼形状最適化及びファン入口の吸い込み風路構造の適正化により、従来品と比較して約10ポイントファン効率を改善させた。

(2-2) 低損失軸受

回転軸を支持する軸受には振動特性に優れ比較的損失が低減した直潤型テイルティングパッド軸受（給油ノズルで摺動部に直接給油する方式）を従来から採用してきた。開発機では、従来の直潤型テイルティングパッド軸受からパッド数を最適化することにより、軸受損失を従来品から約30%低減させた。実機検証試験より、設計どおり

軸受損失が低減すること、及び軸振動特性が良好であることを確認した。

(2-3) 端部漂遊損低減

固定子端部の漏れ磁束は鉄心端部や端部構造物に鎖交し渦電流による損失が生じる。開発検証機では従来機に比べて端部漏れ磁束が増加するため、損失を低減する構造、材料を採用している。一例として、図6に端部構造物の仕切り板（高圧部と低圧部を仕切る板）に非磁性材料を採用した効果について示す。当該部は固定子コイルエンドの近傍に位置することから損失低減効果が大きく、端部漂遊損を約5%低減させる効果を得ている。

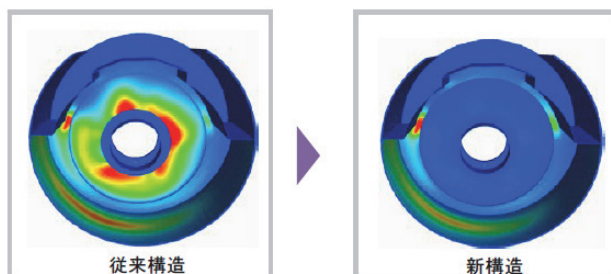


図6 端部構造物の低損失化

(3) コンパクト化技術

鉄道輸送による輸送制限への対応や設置場所の省スペース化の要求など、タービン発電機にはコンパクトな設計が要求される。開発機では、水素ガス冷却器のフィン性能を向上させることで熱交換性能を従来機から約30%改善し、水素ガス冷却器の小型化を実現した。加えて、水素ガス冷却器を最適に配置することで、固定子フレーム体格を従来機から約20%縮小させた（図7）。

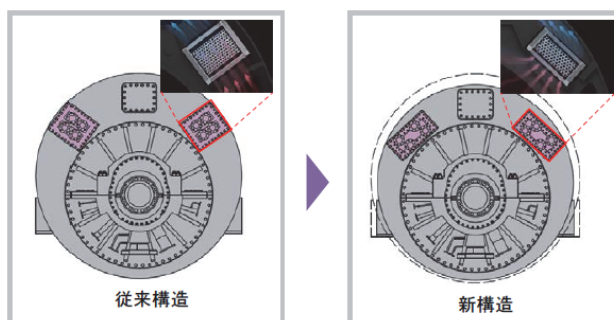


図7 固定子フレームの小径化

## 実用上の効果

これら開発技術を実機に組み込み、900MVA級を実証できる検証機を製作し検証試験を実施した。発電機特性や各部温度は設計値とよく一致しており、各部振動や温度上昇は規格/社内基準を満足することを確認した。また、発電機のコンパクト化を実現しながらも、発電機効率は世界最高レベルの99%以上を達成することができた。

これら新技術を組み込んだ新シリーズの発電機は、2015年より市場投入を開始し適用拡大を進めている。

## 知的財産権の状況

本開発品の装置に関する特許登録は下記の通りである。

①日本国特許第 5881921 号

名称：回転電機

概要：ファンガイド設置による効率改善

②日本国特許第 5885842 号

名称：回転電機

概要：冷却装置の最適配置

## むすび

今回開発した世界最大級の水素間接冷却機は、高効率（99%）、大容量（900MVA級）でありながらコンパクト化を実現し、且つ水冷却機と比較して高効率で構造が比較的簡素であるためメンテナンス性にも優れ、性能だけでなく運用全体の付加価値を高めた高出力タービン発電機を世界各地に提供し、高まる電力需要に応え経済・産業の発展に寄与していく。