

新通風方式を採用した 大容量空気冷却タービン発電機

古賀清訓*

Large Capacity Air-cooled Turbine Generator with New Ventilation System

Kiyonori Koga

要 旨

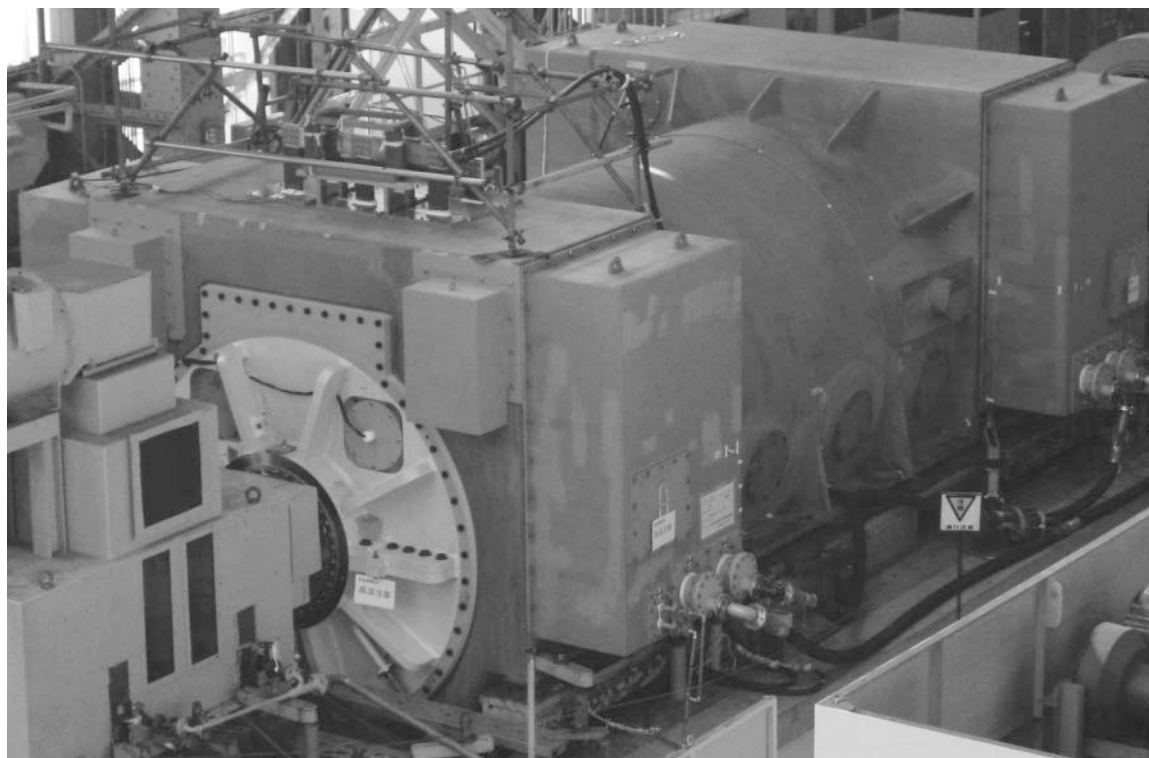
近年、火力発電プラントにおいては、ガスタービンを利用した熱効率の高い複合型発電方式(GTCC)の利用が世界的に拡大している。このGTCCは年々高性能化されており、このGTCCに対応する空気冷却タービン発電機についても高出力・大容量化することが要求されている。これに対応し三菱電機では新通風方式を採用することで高出力・大容量化した新型の空気冷却タービン発電機を市場投入した。

一般に空気冷却タービン発電機の大容量化には、冷却性能の向上が課題となる。新通風方式では冷却空気の流れを従来の“ファン→本体→空気冷却器(クーラー)”から“ファン→空気冷却器(クーラー)→本体”に変更することで、空気冷却器で冷却された空気を直接本体に送り込めるために、同一体格の条件で比較した場合、新通風方式を適用した発電機は従来機と比べ高出力化・大容量化が可能となった。

また、機内冷却空気を循環させるファンまわりを中心に冷却空気の流れについて流体解析や縮小モデルによる風洞試験を重ね、結果を設計に反映することで冷却性能の向上を図り、空気冷却タービン発電機の高出力化・大容量化を実現できた。

400MVA級の空気冷却タービン発電機にも適用する新技術の総合試験実施のため、220MVAのプロトタイプ機を試作し、工場で実機検証試験を実施した。試験結果は固定子コイル温度の約10Kの低減、約0.1%の効率向上などいづれも良好な結果を確認した。

これらの技術試験結果を基に、今後も引き続き技術開発を進めることで、空気冷却タービン発電機の大容量化と高効率化に取り組んでいく。



220MVAプロトタイプ空気冷却タービン発電機

新通風方式を適用した220MVAの空気冷却タービン発電機を試作し、工場試験によって設計の妥当性と信頼性を確認した。これらの技術成果を基に、空気冷却タービン発電機の容量を400MVA級まで拡大することが可能である。

1. ま え が き

近年、メンテナンスの簡略化及び補機装置の簡素化などの理由によって、大容量空気冷却タービン発電機の需要が高まっている。また、温室効果ガスであるCO₂の排出削減のため、水素冷却タービン発電機と同等の効率が求められている。

火力発電では、ガスタービンを利用した熱効率の高いGTCCの利用が世界的に拡大している。このGTCCは、年々高性能化されており、発電機も高出力化・高効率化が要求されている。通風方式を変えた新しいタイプの空気冷却タービン発電機について、部分縮小モデル試験の実施、プロトタイプ機を試作しての実機検証試験を実施した。これらの検証試験結果について述べる。

2. タービン発電機の出力範囲

2.1 空気冷却タービン機の大容量化

当社では、1970年代後半から空気冷却タービン発電機の大容量化に対し、積極的な取組みを進めてきた。図1に当社製の空気冷却タービン発電機の大容量化の変遷を示す。1996年以降、空気冷却タービン発電機の出力は250MVAを超えるようになり、出力範囲が200~300MVAの空気冷却タービン発電機を、すでに30台以上製造してきた。その豊富な実績・経験に基づいて、空気冷却タービン発電機の更なる大容量化に向けた技術開発を進めている。

2.2 発電機のラインアップ

図2に、冷却方式で分類した発電機のラインアップを示す。当社では、“空気冷却”“間接水素冷却”“水素内部冷却”“水冷却”の4種類のラインアップを持っており、発電機容

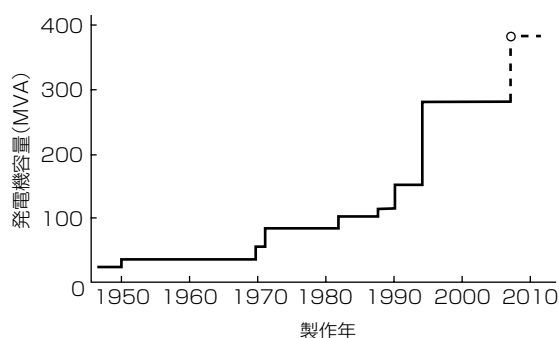


図1. 空気冷却タービン発電機の大容量化の変遷

冷却方式	発電機容量 (MVA)								
	100	200	300	400	500	600	700	800	900
空気冷却方式	■	■	■	■	■	■	■	■	■
間接水素冷却方式			■	■	■	■	■	■	■
水素内部冷却方式					■	■	■	■	■
水冷却方式							■	■	■

図2. 冷却方式によるタービン発電機出力範囲

量に応じて、それぞれ最適な冷却方式を選定している。このうち、空気冷却タービン発電機については、新しい通風方式を適用することによって、400MVA級(50Hz)までラインアップ化が可能であることを今回確認した。さらに、この新通風方式を従来の出力範囲にも適用することで、単機の高出力化・高効率化を実現するための、ラインアップの拡充を図っている。

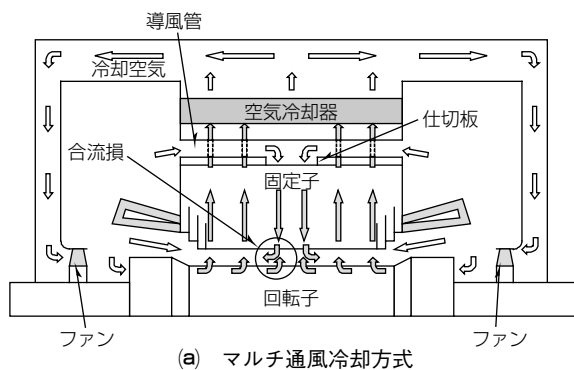
3. 新しい通風方式のコンセプト

3.1 通風方式の変遷

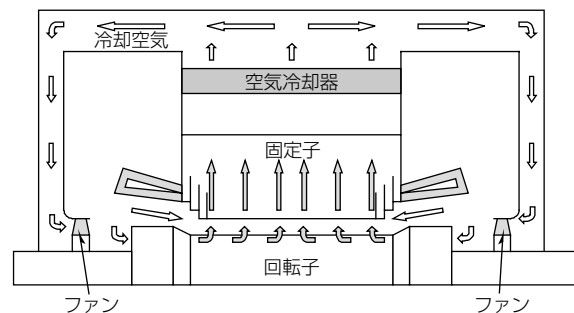
図3に空気冷却タービン発電機に適用してきた通風方式を示す。旧来は“マルチ通風方式”を適用していたが、マルチ通風の場合、冷却風を分配するための仕切り板・導風管が必要で複雑な構造となり、また回転子、固定子間のエアギャップで冷却風の過大な合流損が生じるなどの問題点があった。そこで、これらの問題点を改善する目的で“シンプル通風方式”適用するにいたった。なお、シンプル通風方式の採用に際しては、通風回路網と熱回路網の解析技術を用いることで、通風冷却性能の信頼性を高めた設計としている。

3.2 新通風方式とその特徴

図4に、今回採用する新しい通風方式を示す。新通風方式では、図5に示すとおり冷却空気の流れを従来の“ファン→本体→空気冷却器(クーラー)”から“ファン→空気冷却器(クーラー)→本体”に変更する。なお、この冷却空気の流れから新通風方式をFTC(Fan To Cooler)通風方式と呼ぶ。



(a) マルチ通風冷却方式



(b) シンプル通風冷却方式

図3. 従来の通風冷却方式

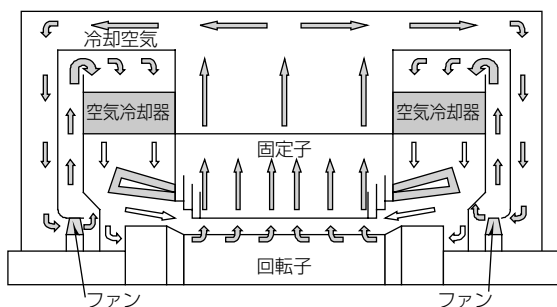
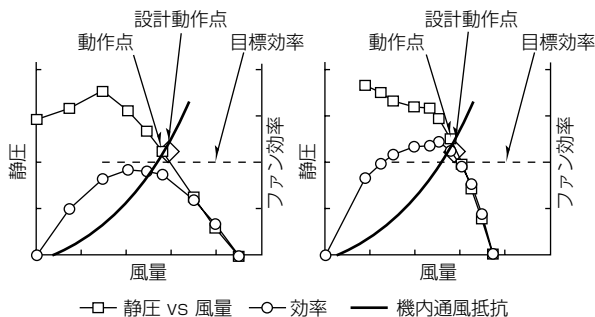


図4. 新通風冷却方式(FTC通風冷却方式)



—□- 静圧 vs 风量 —○- 効率 — 機内通風抵抗

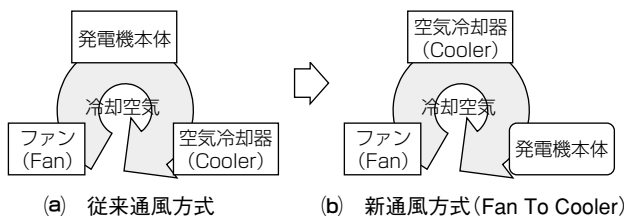


図5. 通風方式概念図

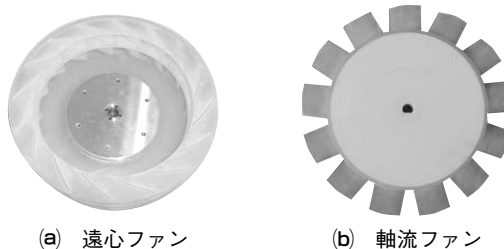


図7. ファン縮小モデルの風洞試験結果

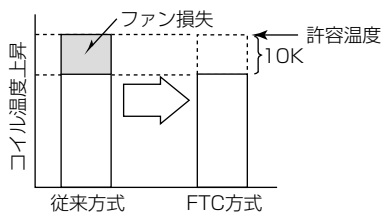


図6. コイル温度上昇

従来の通風冷却方式では、ファンで発生する損失によって、冷却空気温度が上昇して、本体に流れ込むが、この通風の順序を変更することによって、空気冷却器で冷却された空気を直接本体に送り込めるために同一出力条件下での発電機本体の温度は低下するので、発電機コイルの温度一定、同一体格の条件で比較した場合、新通風方式を適用した発電機は、従来機と比べて、より高出力が可能となる(図6)。

4. 部分縮小モデル検証

4.1 ファン形式の選定

新通風方式発電機におけるファン動作点の比速度の条件で効率の良いファン形式を選定すると軸流ファンとなるが、新通風方式ではファン前後で180°風向きが変わる狭い風路内でファンを動作させるため、風路の構成上では遠心ファンの方が有利ではないかと考えた。そこで、遠心ファンと軸流ファンの縮小モデルを作成し、風洞を用いた比較試験によってファン形式を選定することとした。

試験結果を図7に示す。通風抵抗曲線とファン特性曲線が交差する点が、実際に発電機で動作する点となる。発電機に必要なファン差圧、風量特性が達成可能なファンは、軸流ファンであることが分かるとともに、目標としていたファン効率も達成できることを確認できた。この軸流ファ

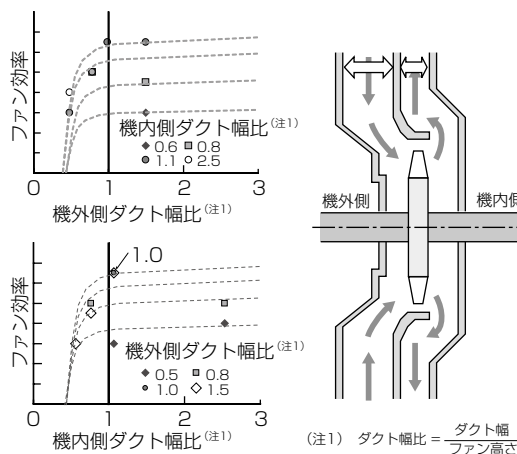


図8. ファン周辺風路幅の風洞試験結果

ンの縮小モデルの結果を基に、実機のファンを設計、製作した。

4.2 ファン周辺風路形状検証

ファン前後の通風ダクト幅のファン効率への影響を確認するために縮小モデルを用いた通風試験を行った。通風ダクト幅とファン高さの比がファン効率に及ぼす影響について整理したものを図8に示す。機外側(吸気側)、機内側(排気側)どちらの通風ダクトについても通風ダクト幅とファン高さの比が1.0となる、すなわちダクト幅がファン高さと同じになる付近でファン効率が飽和しており、ダクト幅をファン高さ程度とすることで、ファン効率を高く維持し、かつ通風ダクト寸法をコンパクト化できるデータを得た。

回転子と固定子間のエアギャップへの冷却空気の流入形態を図9に示す。従来通風方式ではファンを出た冷却空気はそのまま真っ直ぐエアギャップへ流入していたのに対し、新通風方式では固定子コイルエンド外周側から曲がりなが

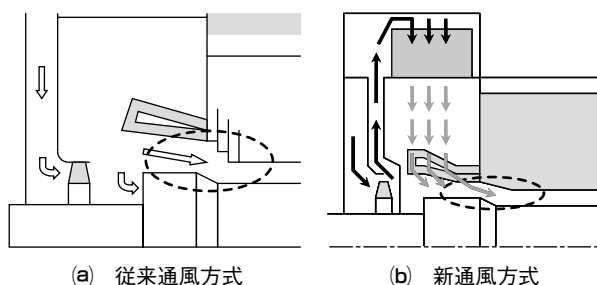


図9. エアギャップへの流入形態

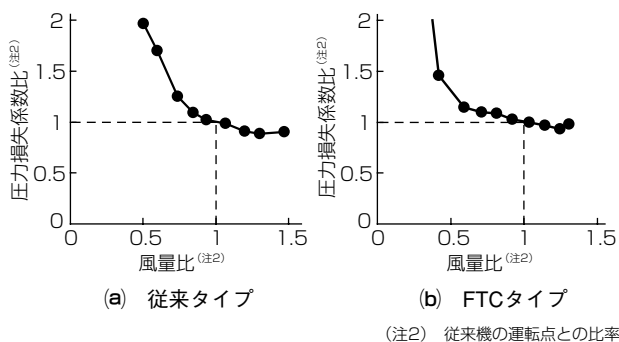


図10. 縮小モデルの通風試験結果



図11. 縮小モデルの風洞試験装置

ら流入する。この流入形態の違いによるエアギャップ入口での圧力損失への影響について三次元数値流体解析及び縮小モデルを用いた通風試験によって検討した。図10はその通風試験の結果を、図11はその風洞試験装置の外観を示しているが、実機動作点でのエアギャップ風量での圧力損失係数については、通風方式間での違いはほとんどなく、新通風方式採用による圧力損失増加に伴う通風量の減少、冷却性能の低下がないこと確認した。

5. プロトタイプ発電機の検証試験

5.1 プロトタイプ発電機の回転電気試験

新通風方式の空気冷却タービン発電機の開発の最終段階では、新技術の信頼性及びその他の発電機各部の健全性を確かめるために220MVAのプロトタイプ機を試作し工場にて回転電気試験を行った。発電機各部には284点の計測素

表1. 試験結果：コイル温度上昇

	従来タイプ	FTCタイプ
	F種ライズ	B種ライズ
固定子コイル(ETD)	129℃	119℃
回転子コイル	111℃	105℃

(220MVA, 冷却温度32℃)

表2. 試験結果：騒音

計測結果	目標値
84dB(A)	85dB(A)以下

50Hz定格電圧発生時, 機側1mフローラレベル

表3. 空気冷却タービン発電機の大容量化

	従来機最大容量	FTC	FTC
容量(MVA)	286	350	400
力率(-)	0.9	0.85	0.85
電圧(kV)	16	19	21
周波数(Hz)	60	50	50
温度上昇種別	F Rise	B Rise	B Rise
効率(%)	~98.60	~98.81	~98.70

子を取り付け温度・振動などのデータを採取し各部の健全性、設計の妥当性を確認した。代表的な試験結果を表1、表2に示す。この開発の目的である固定子コイルの温度^(注3)については、従来機と同一出力で比較した場合約10Kの低減ができた。また、騒音についても、目標85dB(A)以下であることを確認した。

(注3) 固定子コイルの温度は埋込温度計(Embedded Temperature Detector: ETD)で測定

5.2 新ラインアップ空気冷却タービン発電機

これらのプロトタイプ発電機の検証試験結果を反映させることで、空気冷却タービン発電機の容量を400MVA級まで拡大することが可能である(表3)。また、従来の空気冷却タービン発電機に比べて効率が約0.1%向上できることを確認した。

6. むすび

新通風方式を適用した空気冷却タービン発電機のプロトタイプ機の回転電気試験によって400MVA級の空気冷却タービン発電機に適用する新技術の信頼性を確認した。今後も引き続き技術開発を進めることで、空気冷却タービン発電機の大容量化と高効率化に取り組んでいく予定である。

参考文献

- (1) Koga, K., et al.: INTRODUCTION OF NEW VENTILATION SYSTEM LARGE CAPACITY AIR-COOLED TURBINE GENERATOR, CIGRE SC A1 MEETING 2009 (2009)