

350MVA 級大容量空気冷却発電機の開発と実機検証

Development and Verification of 350MVA Class Large Capacity Air-Cooled Generators



水野 嵩寛*1
Takahiro Mizuno

柿本 忠昭*2
Tadaaki Kakimoto

村山 博英*2
Hirohide Murayama

村松 誠二郎*3
Seijiro Muramatsu

高橋 和彦*4
Kazuhiko Takahashi

山本 幸弘*4
Yukihiro Yamamoto

再生可能エネルギーの台頭で、ピーク電源として急速起動と負荷変動追従可能なガスタービンの需要が高まっている。そのソリューションとして、三菱パワー株式会社(以下、当社)では、300MW 級のガスタービン発電機セットを提供している。その発電機は、運転保守の容易な空気冷却発電機が志向される場合があるため、これまで 350MVA 級空気冷却発電機の開発を進めてきた。このたび、開発機による実機検証を実施し、全ての性能が規格を満足することを確認した。本発電機は、当社の空気冷却発電機の従来実績より約 1.5 倍の容量アップを実現した。

1. はじめに

脱炭素化が世界的な潮流である中、再生可能エネルギーを活用する動きが加速している。一方、太陽光や風力発電はその出力変動に課題があり、需給バランスを調整するピーク電源として急速起動と負荷変動追従可能なガスタービンの需要が高まっている。

当社では、300MW 級のガスタービン発電機セットを提供しており、この容量帯では、水素間接冷却発電機が採用されるのが一般的であるが、運転保守が容易な空気冷却発電機を志向される場合がある。

今般、350MVA 級空気冷却発電機の開発を進め、実機による検証まで完了した。本稿では、発電機に適用した大容量技術とその検証、及び工場試験結果について述べる。

2. タービン発電機の冷却方式

タービン発電機は容量が増加するとともに、発電機機内で発生する熱量が増加するため、容量に応じて、固定子巻線の冷却方式として空気冷却、水素間接冷却、水直接冷却が開発され大容量化が図られてきた。

図1に当社で製作実績のあるタービン発電機の固定子巻線の冷却方式と発電機容量の関係を示す。一般的に、小型容量帯(～230MVA)を空気冷却方式、中容量帯(200～750MVA)を水素間接冷却方式、大容量帯(500～1400MVA)を水直接冷却方式で対応している。

このたび、350MVA 級空気冷却発電機(以下、開発機)の開発と実機検証を完了し、全ての性能が規格を満足することを確認した。当社の空気冷却発電機の従来実績(以下、先行機)より、約 1.5 倍の容量アップを実現した。

空気冷却方式は、他の冷却方式に比べ、システム構成が簡素化でき、メンテナンス性に優れ

*1 三菱パワー株式会社 ターボマシナリー本部発電機技術部

*2 三菱パワー株式会社 ターボマシナリー本部発電機技術部 グループ長

*3 三菱パワー株式会社 ターボマシナリー本部発電機技術部 首席技師 米国 PE(機械)

*4 三菱パワー株式会社 ターボマシナリー本部発電機技術部 首席技師

ていることや、水素を扱わないため、安全であるといったメリットが挙げられる(図2)。今回、空気冷却方式の発電機の大容量化に成功したことで、お客様の選択の幅を広げることができた。

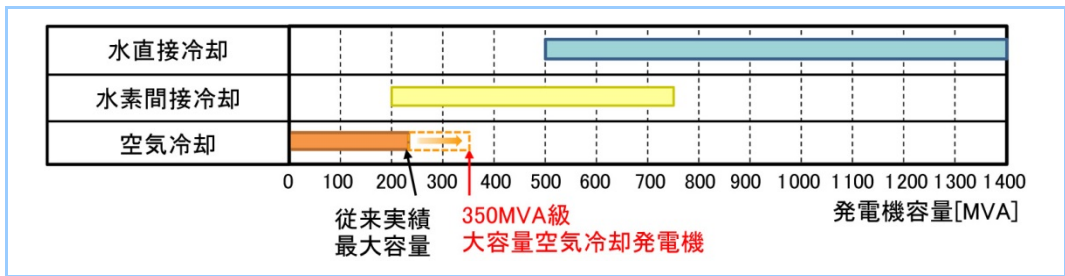


図1 固定子巻線の冷却方式と発電機容量の関係

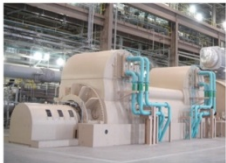


	冷却媒体	システム構成	保守
水直接冷却発電機 	水 水素	<ul style="list-style-type: none"> 固定子冷却水系統 ガス系統 密封油系統 冷却水系統 	△
水素間接冷却発電機 	水素	<ul style="list-style-type: none"> ガス系統 密封油系統 冷却水系統 	○
空気冷却発電機 	空気	<ul style="list-style-type: none"> 冷却水系統 (開放型は不要) 	◎

図2 発電機冷却方式の違いによるシステム構成比較

3. 350MVA 級大容量空気冷却発電機の完成

3.1 設計方針

発電機の容量 P は、一般に以下の式で表される。

$$P \propto K \times D^2 \times L \times N$$

(P: 発電機容量, K: 出力係数(電気装荷, 磁気装荷など), D: 固定子鉄心内径, L: 固定子鉄心長 N: 回転数)

発電機の大容量化は、回転数 N が同じであれば、出力係数 K の増加や発電機の体格 ($D^2 \times L$) の大型化で達成することができる。

表1に先行機と開発機の仕様比較を示す。先行機に対して、容量 50%増加を達成するために、出力係数を 20%増加し、体格の大型化は 27%増加とする設計方針とした。

これを実現するためには、冷却性能の向上や、発電機各部で発生する損失を低減することが重要となり、様々な大容量化技術を適用した。これらに加え、各部構造の強度・振動など詳細設計評価を実施し、設計の成立性を確認している。

表1 350MVA 級空気冷却発電機と先行機的主要仕様比較

	先行機	開発機
	従来実績最大容量 空気冷却発電機	350MVA 級 空気冷却発電機
冷却媒体	空気	空気
容量(MVA)	230	349
電圧(kV)	20	21
電流(A)	6640	9595
力率	0.9(遅れ)	0.85(遅れ)
周波数(Hz)	60	60
回転数(min ⁻¹)	3600	3600
容量(p.u)	1.00	1.52
出力係数K(p.u)	1.00	1.20
体格 D ² ×L(p.u)	1.00	1.27

3.2 適用技術と検証

空気冷却発電機の大容量化、及び高効率化のため、開発機に様々な設計技術を適用した(図3)。例として、以下を取り上げて具体的に述べる。

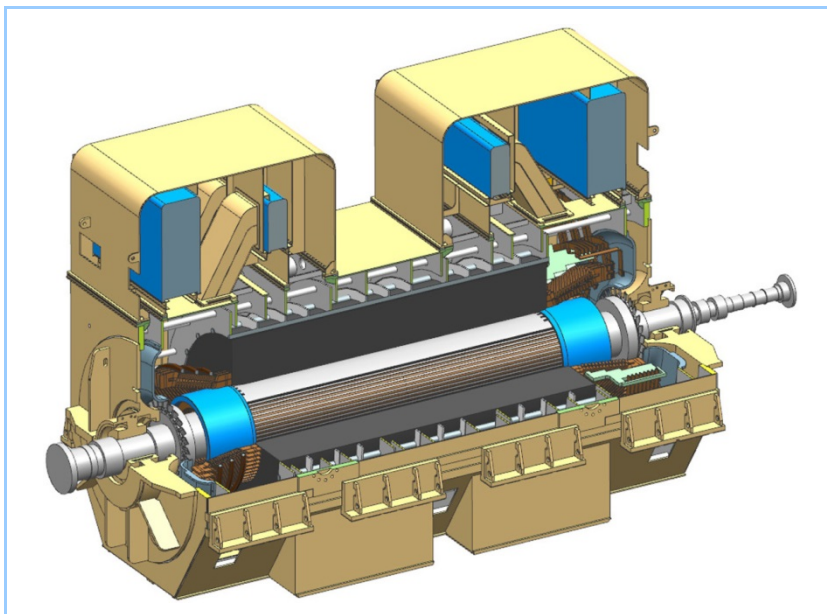


図3 350MVA 級空気冷却発電機

(1) 多目的最適化による基本設計

本開発機では、機内損失低減に対して、水素間接冷却発電機開発における高効率化技術を適用した。その一つに、多目的最適化による発電機の基本設計が挙げられる。

発電機の損失としては、機械損、鉄損、直接負荷損、界磁巻線の抵抗損、漂遊負荷損などの項目に大別されるが、それぞれの損失は、発電機の電磁気的特性や冷却、機械強度、電気絶縁といった重要な設計要素と密接に関連しており、独立して低減を図ることができないものが多い。この複雑なトレードオフの関係の中で、最適な設計解を選定する技術として、従来開発された多目的最適化計算システムがある⁽¹⁾。

本システムは、発電機特性と効率や冷却、機械強度などの技術評価に加えて、材料費や製造工数などのコスト評価も同時に計算し、大規模なパラメータサーベイを実施するとともに、遺伝的アルゴリズムと組み合わせることで、合理的かつ客観的な最適設計案を提案するものである。図4に多目的最適化計算の一例として、効率とコストの関係を評価したものを示す。

開発機についても、本システムを使用した最適化計算を実施し、要求された効率を実現しつつ、コストで優位となる基本設計案を選定した。

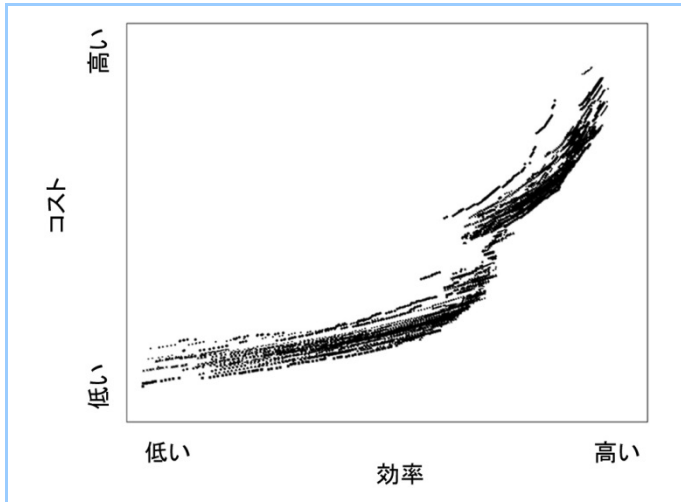


図4 多目的最適化計算の例

(2) 冷却性能の向上

発電機内の温度が上昇し、巻線の絶縁が長時間高温にさらされると、熱劣化により絶縁物としての機能が低下し、最終的には絶縁破壊に至る恐れがある。そのため、発電機では各部の温度が制限値以内となるように設計される。

空気は水素と比べて、比熱や熱伝導率が小さいため冷媒として不利である。また、密度が大きいため機械損が増大することで、機内ファン部での冷却風の温度上昇が大きく、冷媒温度が上昇してしまうといった問題がある。これらの課題がある中、空気冷却発電機の大容量化を実現するためには、冷却性能の向上が必要となる。

そこで、開発機では1998年から実機に適用して多くの実績を積み重ねてきたインナクーラ冷却方式を採用した。インナクーラ冷却方式の通風回路を図5に示す。冷却風は、ファンで昇圧され、一部が軸端部コイルなどの構造物を冷却し、インナクーラに向かう。空気冷却発電機では、この時点で風温上昇が発生しており、インナクーラで再冷却される。その後、ステータを冷却した風はロータから排出された冷却風と合流し、最終的にはメインクーラに戻る。このように、インナクーラ方式は、一つの通風ループに直列に二つ以上のクーラを持つことを特徴としており、所望の場所に冷却ガスを導入できる特徴を持つ。また、偏流が生じにくいダクト構造を採用し、クーラ面積を有効的に活用できる設計とした。

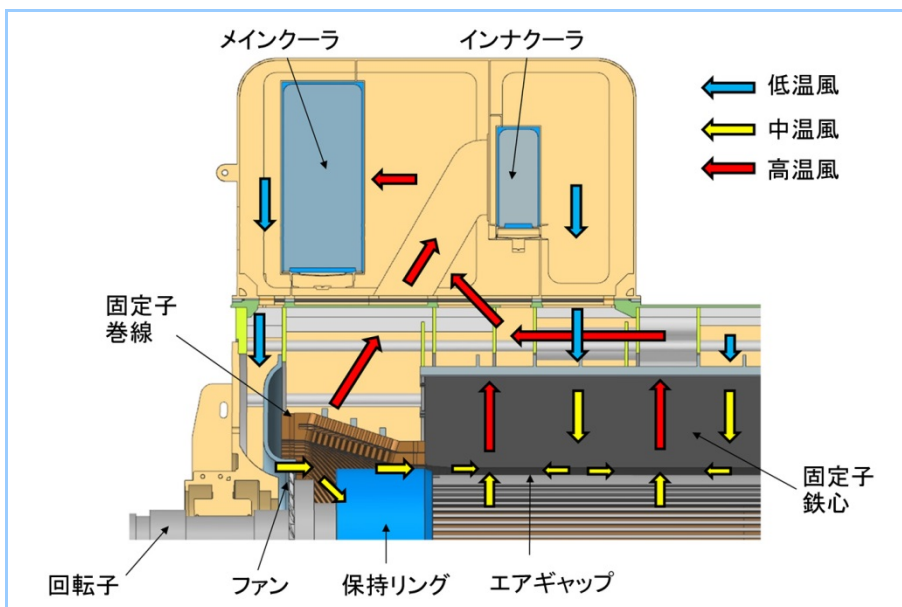


図5 インナクーラ通風経路図

(3) 固定子鉄心端部の温度低減

表1に示したように、開発機は先行機と比較して電流が増加している。大電流化により端部漏れ磁束を起因とする損失が増加するため、固定子鉄心端部の過熱を評価する必要がある。大容量機の固定子鉄心端部には、段落としや銅シールド板を設置する構造とし、それらの形状を最適化して端部漏れ磁束を低減している。本開発機にこれらの構造を採用するに当たり、三次元有限要素法による固定子端部の磁界解析、及び温度解析を実施して、固定子鉄心端部の温度が制限値以内であることを確認した。図6には固定子鉄心端部の磁界解析のモデルと結果を示す。

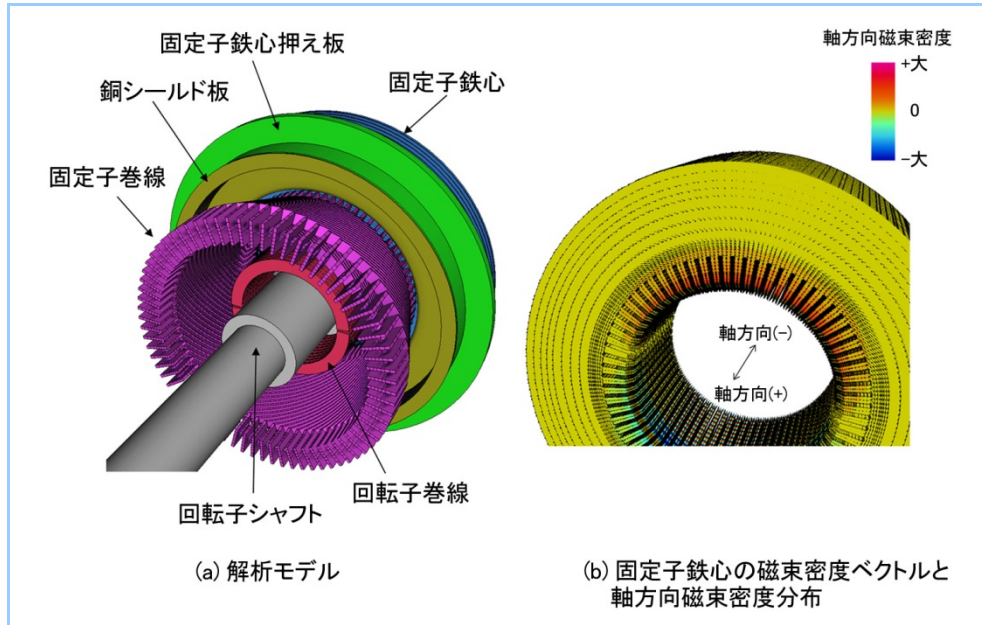


図6 固定子鉄心端部の磁界解析

(4) 固定子巻線端部の振動低減

大電流化に伴い、固定子巻線端部の電磁力は増加するため、固定子巻線端部の固有振動数を定格運転時の電磁振動周波数(定格周波数の2倍)から外す、避共振構造とする必要がある。支持構造の設計においては、電磁力-振動応答解析(図7)を用いて各部の応力値が許容値以下になるようにした。また、固有振動数解析を行い、電磁振動周波数から十分離れる支持構造とした。

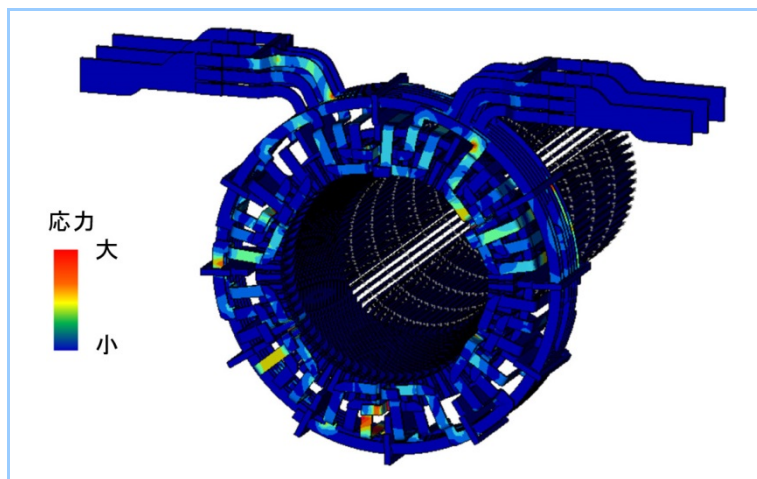


図7 固定子巻線端部の電磁力-振動応答解析

(5) 回転子巻線端部の保持リング焼き嵌め応力の評価

回転子の胴部はスロット加工しており、回転子巻線が挿入される。遠心力による巻線飛び出し防止のため、スロット内には回転子くさびが挿入される。スロットから出た回転子巻線端部については、その遠心力に耐える強度を有した保持リングが焼き嵌められる。この焼き嵌めについては、遠心力が働く定格回転中に、回転子からリングが離れない十分な焼き嵌め量について決定する必要がある。

また、静止時と定格回転時では、遠心力の有無により応力分布が異なる。その結果、起動停止回数が多いピーク電源の場合、繰り返し応力を受けるため、疲労破壊に対して十分な強度を有している必要がある。

開発機では、三次元有限要素法による各部応力振幅評価(図8)を行い、応力集中緩和策として焼き嵌め部の構造見直しにより、疲労強度を満足させる設計とした。

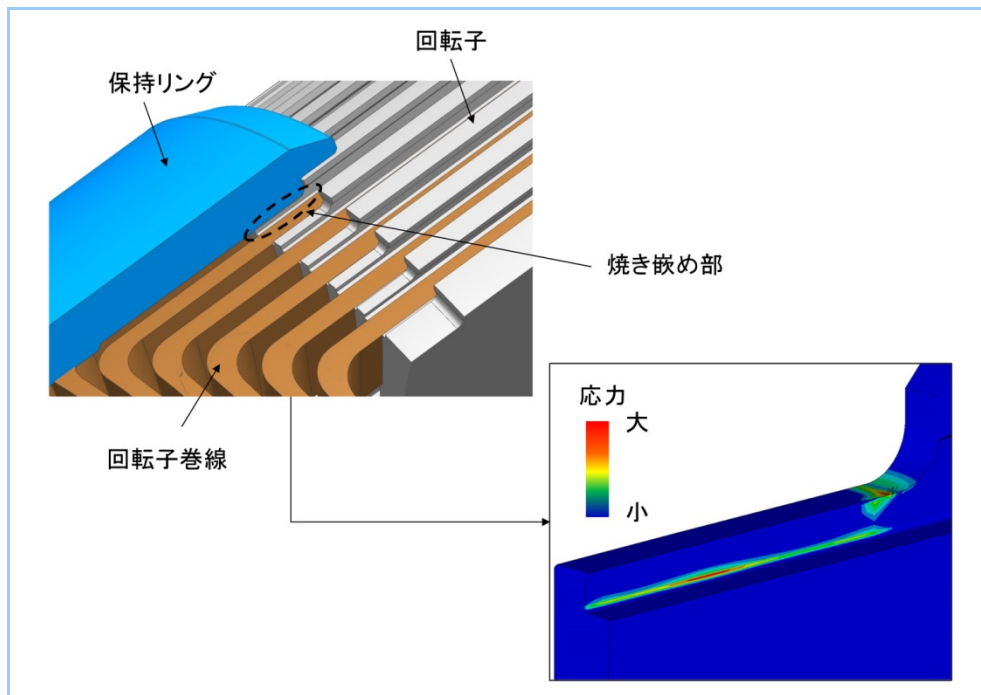


図8 回転子端部の応力解析

(6) 各種起動条件下での温度評価

ガスタービンの始動方式として、タービン発電機を電動機として駆動するサイリスタ始動が用いられる。ピーク電源としてガスタービンが用いられる場合、通常の約5倍の昇速速度での急速起動や、連続ターニングなど特殊な運転モードが要求される。開発機では、それら各種起動条件下における発電機内各部の温度評価を実施し、サイリスタ始動における健全性を確認している。

一例として、有限要素法によるサイリスタ始動モードでの回転子胴部温度の解析結果を図9に示す。サイリスタ始動時に、固定子巻線に流れる電流波形には複数の高調波成分が含まれ、これらの成分は、回転子に対して非同期磁界を形成する。タービン発電機の回転子は、導電性を有するため、非同期磁界が生じると回転子表面に渦電流を誘発し、損失を発生させる。開発機では、渦電流による局所的な過熱の発生を避けるため、ダンパ巻線の挿入等のサイリスタ始動を考慮した構造を採用している。

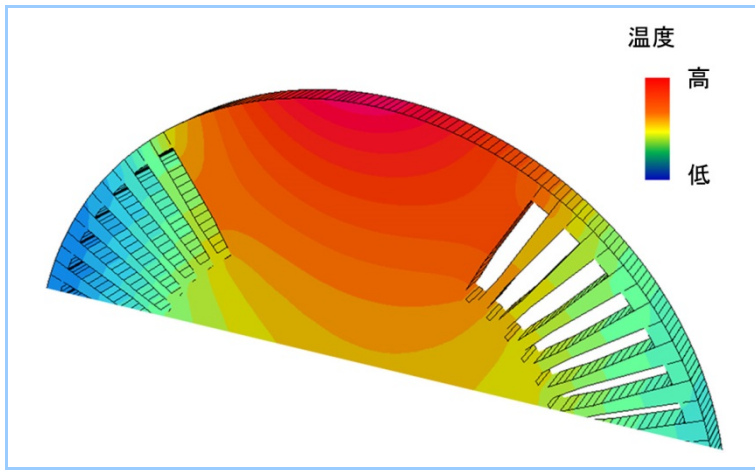


図9 サイリスタ始動における回転子胴部温度の解析

(7) 工場回転試験での実機検証

工場での製作・組立てを経て、性能検証のための回転試験を実施した。無負荷飽和特性や三相短絡特性といった基本的特性に加えて、各種リアクタンスや時定数などの発電機パラメータについても実測を行い、仕様、及び規格の要求を満足することを確認した。

また、温度センサや、振動センサを発電機内の各部に設置して、測定と健全性の評価を行っている。評価の一例として、固定子巻線温度の評価例を図10に示す。図に示すように、実測最高温度とその部位の計算値はよく一致しており、健全性ととも計算予測精度の高さも確認した。

高効率化技術の検証として、規格に定められた測定法に従って各種損失測定を行い、規約効率の算定を行った。表2に先行機との効率比較を示す。大容量化を達成しつつ、先行機と同等以上の効率である 98.82%という高い効率を達成し、適用技術の有効性を確認した。また、今回の開発機では、鉄心材料に無方向性電磁鋼板を適用しているため、高グレード電磁鋼板を採用することで、更なる損失の低減・高効率化を実現できる見込みである。

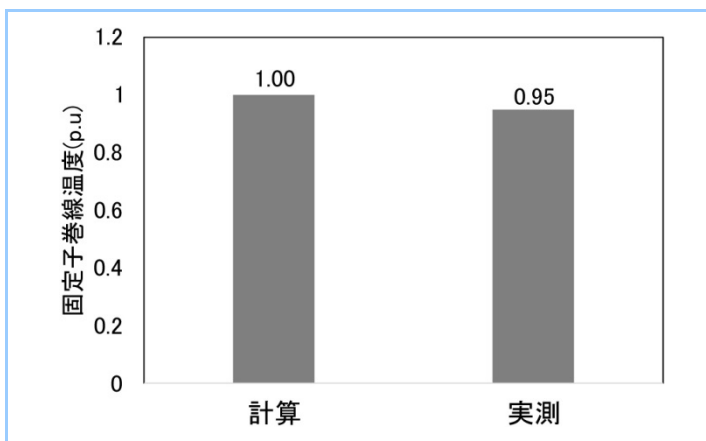


図10 固定子巻線の実測最高温度とその部位の計算結果比較

表2 350MVA 級空気冷却発電機と先行機の規約効率比較

	先行機	開発機
	従来実績最大容量 空気冷却発電機	350MVA 級 空気冷却発電機
規約効率(%)	98.81	98.82
鉄心材料	方向性電磁鋼板	無方向性電磁鋼板

4. まとめ

350MVA 級空気冷却発電機の開発と実機検証を完了し、全ての性能が規格を満足することを確認した。開発においては、冷却性能を向上する方式の採用や、水素間接冷却発電機にも適用される高効率化技術を適用した。また、各部の詳細設計評価には、三次元有限要素法などの解析技術を用いて、設計成立性の評価を実施した。

適用技術の検証として、工場回転試験における実機検証を実施した。検証の結果、仕様や規格などの要求事項を満たすことに加え、先行機と同等以上 98.82%という高効率を達成した。

今後は、更なる空気冷却発電機ラインナップの拡充、並びに適用範囲の拡大を進める。

参考文献

- (1) 村山博英ほか、水素間接冷却タービン発電機の高効率化と実機検証、三菱重工技報、Vol.56 No.3 (2019)