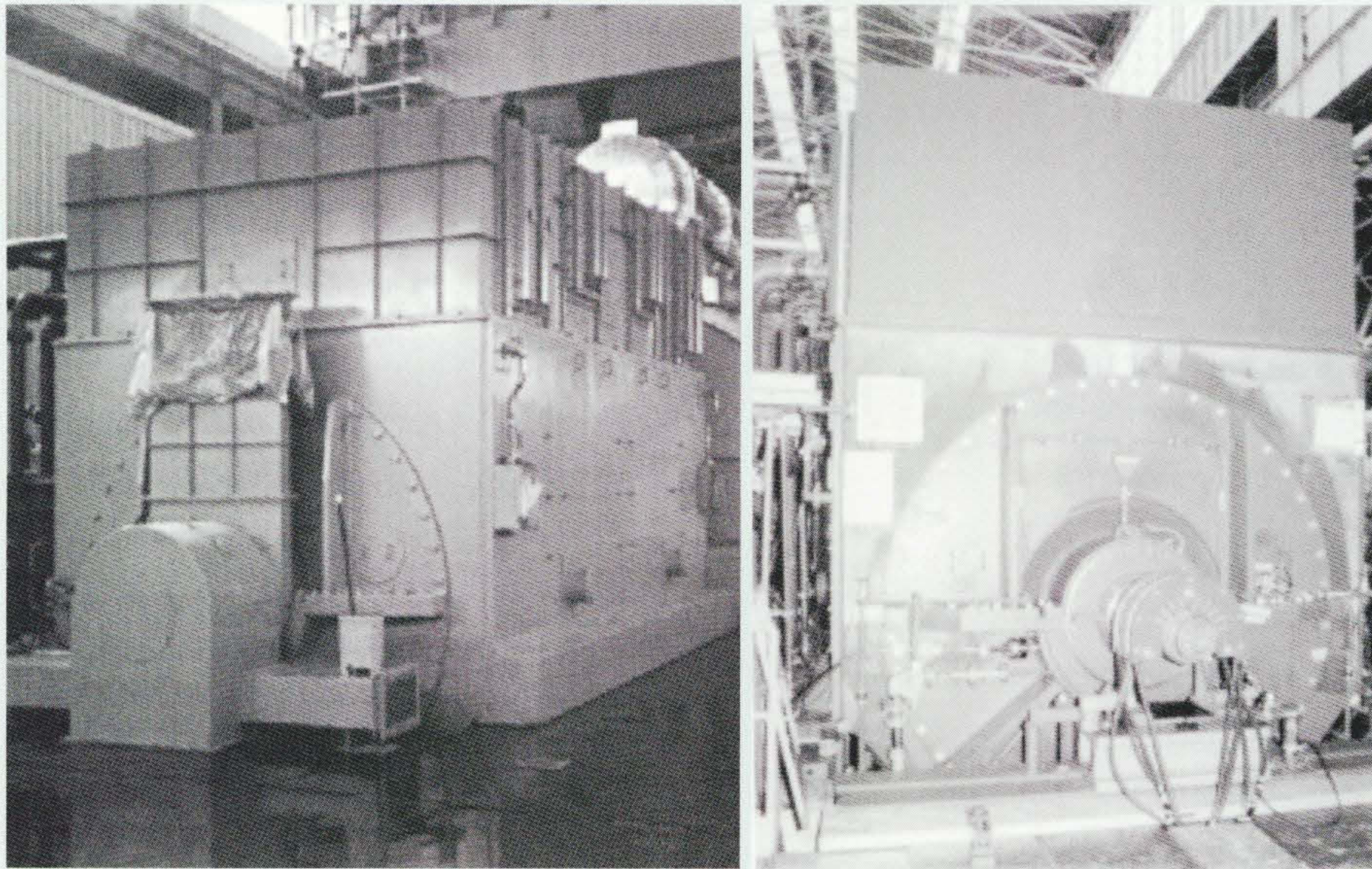


インナクーラ冷却方式を適用した高効率タービン発電機の高度設計手法

Sophisticated Design Method of Turbine Generator with Inner Cooler Ventilation System

服部憲一 Kenichi Hattori 後藤文彦 Fumihiko Gotô 渡辺 孝 Takashi Watanabe
井出一正 Kazumasa Ide 仙波章臣 Akitomi Senba



現地据付け時のインナクーラ方式空冷タービン発電機(左)と工場試験中の250 MVA(50/60 Hz)機(右)

このタービン発電機は1999年10月に営業運転を開始し、以後順調に運転実績を積み重ねている。中央寄りに見える小型のクーラがインナクーラである。

250 MVA機では、通風、温度関係だけでも1,000点を超えるセンサを設置し、今後の発電機開発のために必要かつ十分なデータベースを取得した。

日立製作所はこのたび、250 MVA(50/60 Hz)の大容量空冷発電機を開発した。当機はインナクーラ冷却方式を最大限利用した高効率の空冷発電機であり、今後の水素冷却発電機や空気冷却発電機を設計するためのデータベースを構築するため、1,000点を超える通風・温度・応力センサを実機に埋め込み、実測で性能を評価した。固定子および回転子温度については、ANSI(American National Standards Institute)B種温度上昇を満足することを確認し、98.8%を超える効率を達成した。

この250 MVA機の設計にあたっては、大規模な発生損失、通風、温度および振動強度解析ツールを整備し、数百を超えるパラメータサーベイの後、適用構造を決定した。また、本機の実測により、ツールの妥当性も評価できた。

1 はじめに

低価格、高効率で、運転保守の容易な発電機に対するニーズは多いが、一般には、高効率の水素冷却発電機か、運転、保守の容易な空気冷却発電機のどちらかを選択するのが実状である。通風摩擦損が比較的小さい50 Hz機を使用するヨーロッパでは空冷機を使い¹⁾、通風摩擦損が大きい60 Hz機を使用する米国では水素冷却機を好む傾向があるが²⁾、高効率な空気冷却機、あるいは運転保守の容易な水素冷却機に対する期待は世界共通である。

日立製作所は、100 MVA以上の空冷発電機に対し、

インナクーラ冷却方式(ICVS: Inner Cooler Ventilation System)を開発し、状況に応じて高信頼化と高効率化を図ってきた。また、大規模な設計計算ツールを整備し、空気冷却機、水素冷却機のどちらをターゲットにしても最適構造の発電機を設計できるように努力してきた。

今回、このツールの適用第1号機として250 MVA(50/60 Hz)発電機をターゲットにした。数百に及ぶパラメータサーベイの後に、各部寸法、冷却構造を決定し、高効率と低温度上昇を実現した。また、開発機では通風温度関係だけで1,000点を超える測定を実施し、ツールの妥当性と発電機の健全性を評価した。

ここでは、発電機の最重要部品の一つである固定子コイルの例について述べる。

2 インナクーラ冷却方式(ICVS)発電機

発電機は、高磁界、高電流密度で運転して発熱するため、それを除去する冷却構造を持つ。

一般にはロータの軸端部にファンを設置し、発電機各部に冷却風を循環させる。各部を冷却して上昇した冷媒温度を低減するためのエアクーラを、発電機端部に集中配置する。ファンで昇圧された冷却風は、ステータ、ロータの各部を冷却して軸端部のクーラに戻り、再びファンを通して循環する。この場合、各通風閉ループに設置されているクーラは1台しかないため、下流にある発熱体を冷却する冷却風自体の温度が上昇している。特に空冷機では、最初に通るファンでの温度上昇が無視できない。

この対策として日立製作所は、1998年から、100 MVA以上の空冷発電機に対し、状況に応じてインナクーラ冷却方式を適用し、発電機の温度低減と高効率化を図ってきた³⁾。インナクーラ冷却方式の通風回路を図1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。空冷機では、この時点で冷却風の温度が10～20度上昇しており、冷却風はインナクーラで再冷却される。その後、冷却風はステータに設けたエアダクトを外径から内径へ通り、エアギャップに至る。エアギャップでは、ロータから排

出された冷却風と合流し、最終的にエアダクトを内径側から外径側に向けて冷却し、エアクーラに戻る。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という特長を持つ。つまり、エアギャップの温度を下げることでロータの熱振動を抑え、さらには固定子側の温度を低減する効果も期待できる。

3 250 MVA機的设计

3.1 発電機設計の流れ

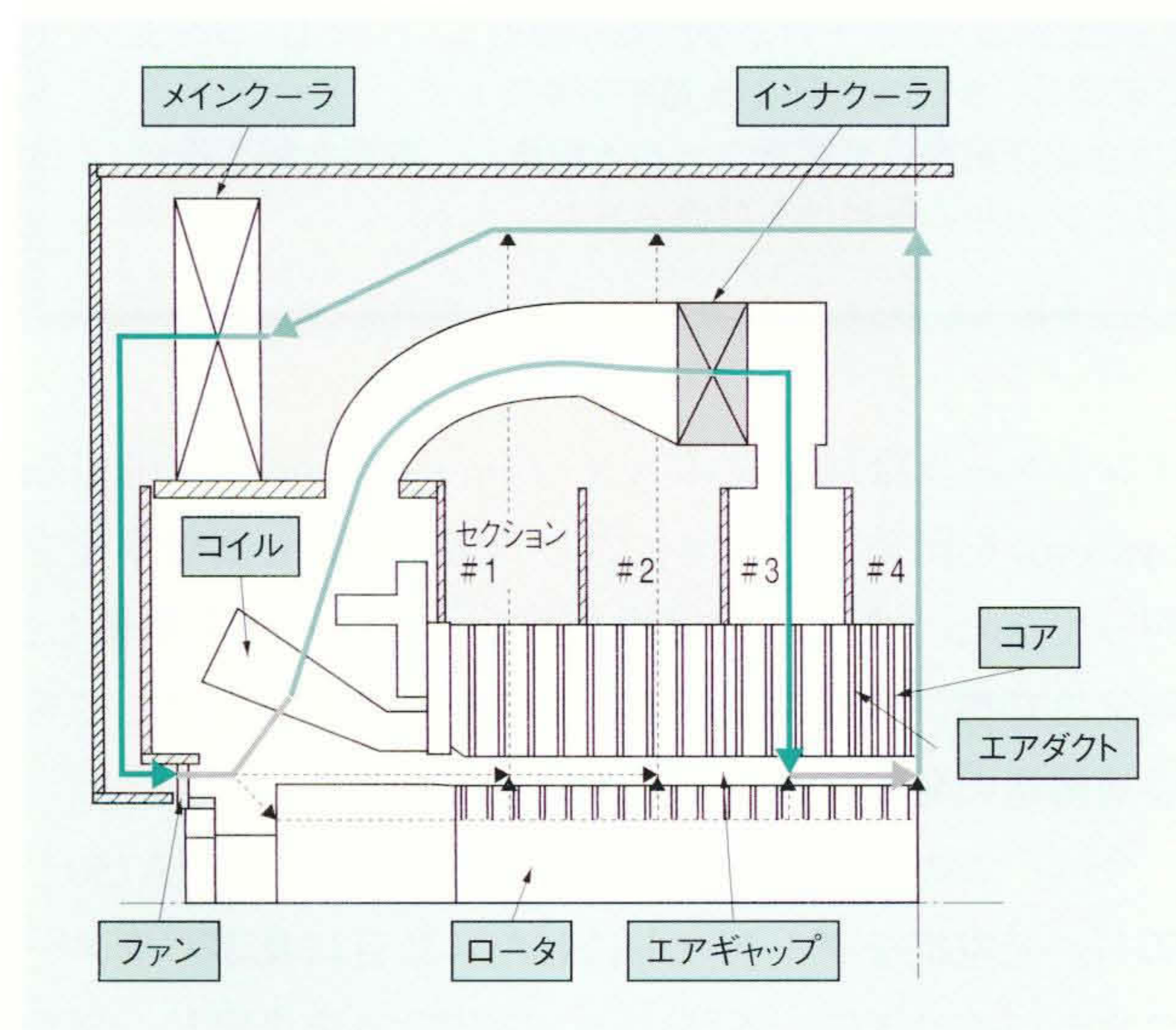
発電機の設計にあたっては、まず発電機の実出力と概略の体格を決定し、電気設計に移る。電気設計では、発電機の電氣的な諸特性を満足させるように各部寸法を決定する。電気設計で各部の詳細な発生損失分布を求めたあと、通風パターンや、エアダクトの配置を決定し、通風、温度分布を計算する。ここで、所定の温度性能を満足しない場合は電気設計から再度やり直す。その後、各部の振動、応力設計により、各部の詳細構造を決定し、実機製作に移る。

3.2 設計計算法

3.2.1 電気、通風、温度設計

発電機の信頼性、寿命に大きく関わるものとして、高電圧がかかる固定子コイル絶縁物の温度があげられる。この部分の温度に最も影響するのは固定子コイル自身の損失である。

固定子コイル冷却構造と、交流損失の発生メカニズムを図2に示す。スロット内に、上、底の2コイルが格納され、それぞれは数十段の素線によって構成される。素線で発生した損失は、絶縁物を通してコアを經由し、冷却風に流れる。素線には、発電機の実出力に対応するいわゆる直流電流のほかに、鎖交する磁場を打ち消すための循環電流および渦電流が流れる。一般に、スロット内では鎖交磁束を相殺するために、素線にトランスポジションをかけるが、軸端部を含む全長にわたる鎖交磁束をすべて打ち消すことは難しく、循環電流による損失がわずかに残る。また、素線自身にも鎖交磁束を打ち消す向きの起電力が発生し、渦電流損が発生する。これらの交流損はトランスポジションのピッチ、素線の寸法に密接に関係しており、素線の断面積を増やすと増加してしまう場合もある。そのため、詳細な損失計算プログラムを開発し、交流損と直流損の合計が最小になるように素線の配列、寸法などを決定した^{3),4)}。回転子の損失、コアの損



注：←（低温冷却風）、←（中温冷却風）、←（高温冷却風）

図1 インナクーラ冷却方式

インナクーラ冷却方式は一つの通風ループに二つのクーラを持つ。

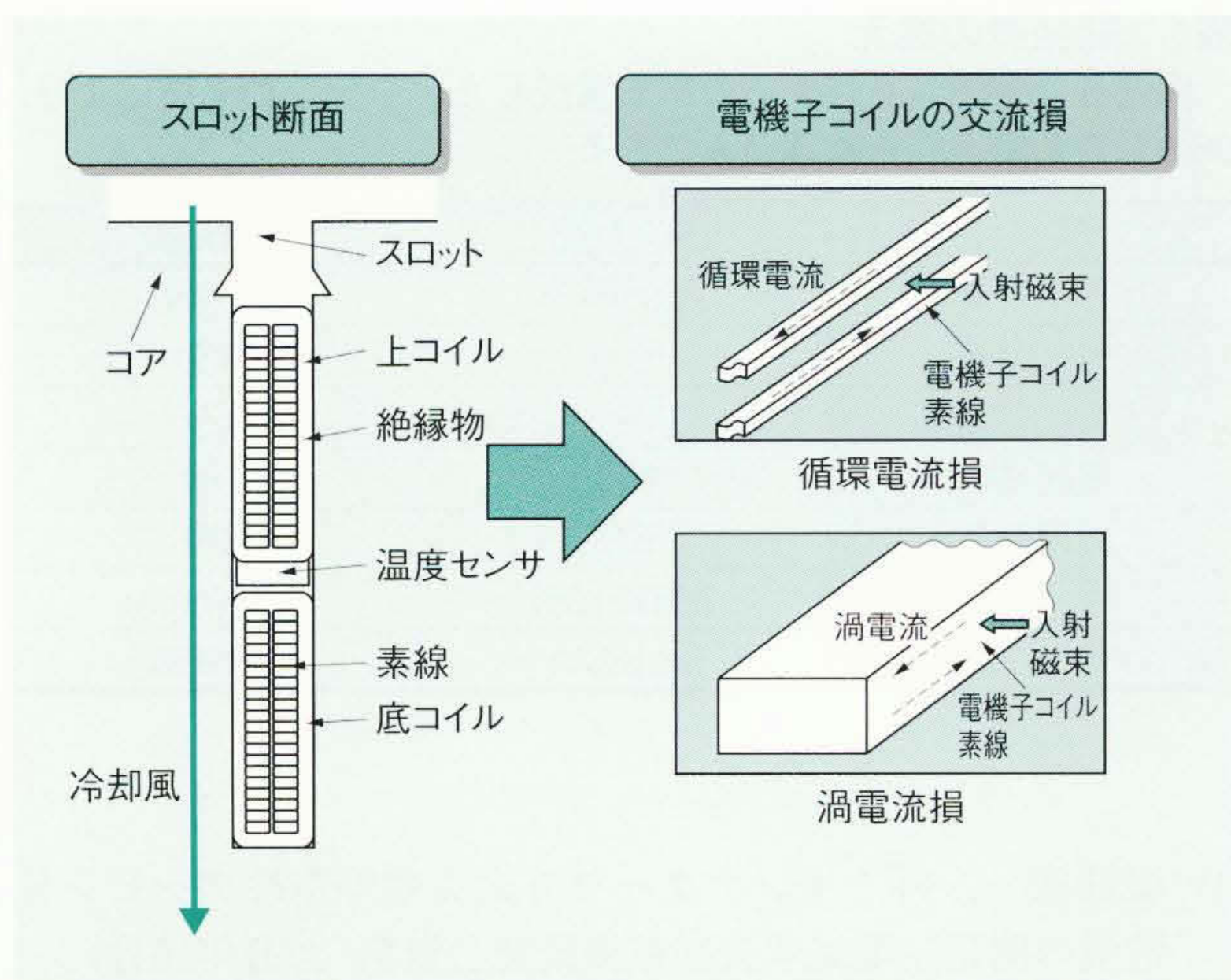


図2 固定子コイルの冷却と損失発生メカニズム
交流損の低減が固定子損失低減のかぎとなる。

失なども同時に計算する。

この後、図1に表示している回転子、固定子内のすべての通風路をネットワーク化し、発電機の通風温度の軸方向分布を計算する⁵⁾。開発機では、固定子のエアダクト配置や通風パターン、ファンの構造などを含め、実機を製作するまでに数百の組み合わせを評価した。なお、ここまでの一連の流れは、標準の設計ツールとして整備済みである。

3.2.2 振動・応力設計

振動・応力設計としてはコイル端部が最も重要である。この部分は落雷事故などの影響を最も大きく受ける。構造最適化のためには、大規模な構造解析を数多く実施する必要があるため、寸法入力だけでモデリングする自動作成ツールを開発し、設計に使用した⁶⁾。このツールは解析精度を落とさない範囲で入力情報を絞り、図面上で各構成材の形状寸法と位置関係を入力するだけで、図3に示す構造解析用のメッシュを自動生成する。

モデル作成後、固有値解析によって円環振動と運転周波数の関係を検討する。円環振動1次のような電磁力により、大きく励起されやすい振動モードが運転周波数領域に存在しないことを確認し、応答および応力解析によって強度評価を実施する⁶⁾。図3に示すように、変位を拡大表示することで、振動モードを容易に判断することができる。

円環振動が運転周波数領域に存在しない場合でも、局所的な振動が起きる可能性もあり、応力状態も複雑なため、この解析結果のビジュアルな情報は設計に不可欠である。

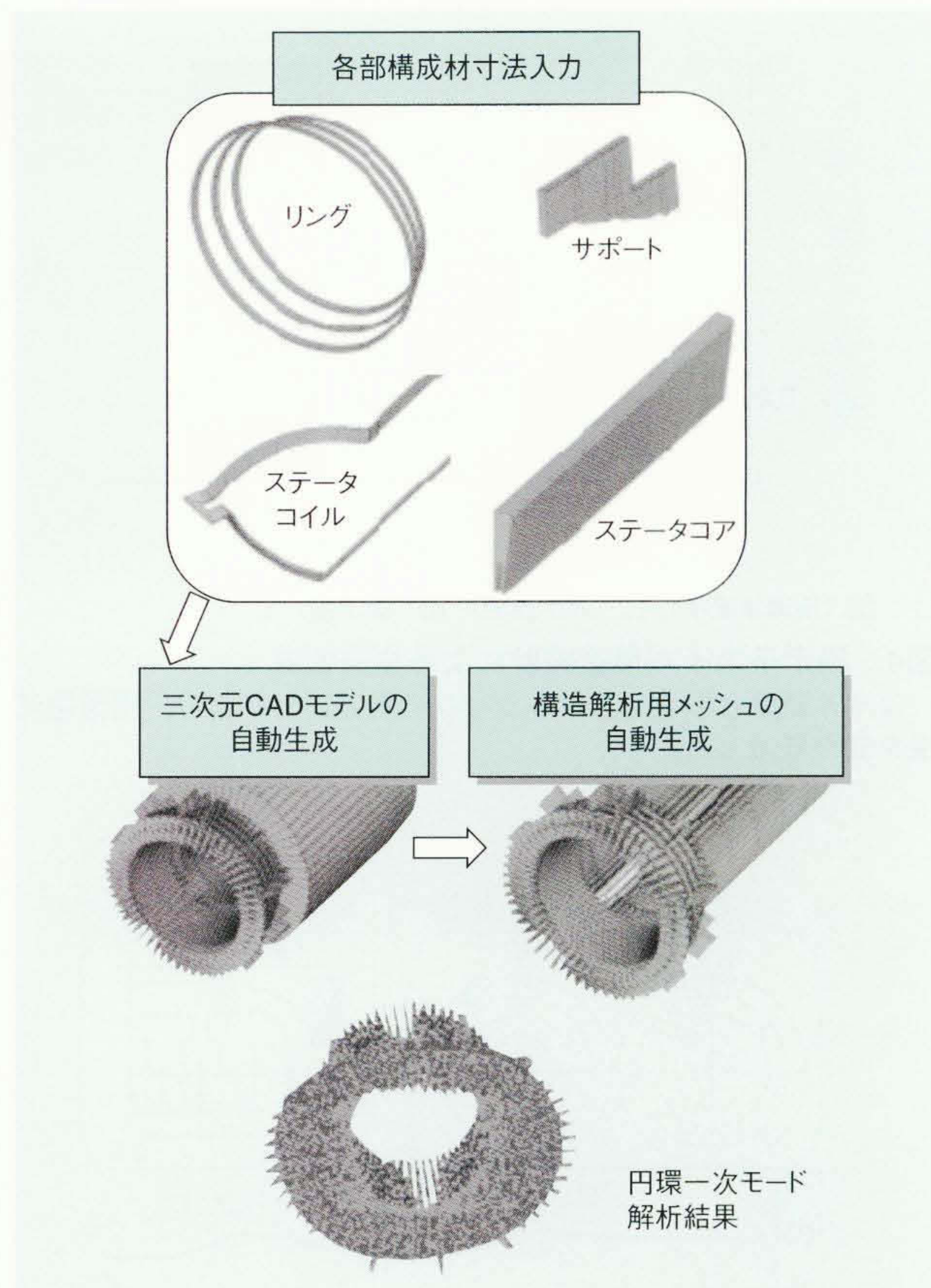


図3 固定子端部の応力、振動設計と分析結果

大規模な振動計算を設計ルーチンの中に組み込んでいる。変位を拡大表示することで、振動モードをビジュアルに判断することができる。

4 開発機の性能試験結果

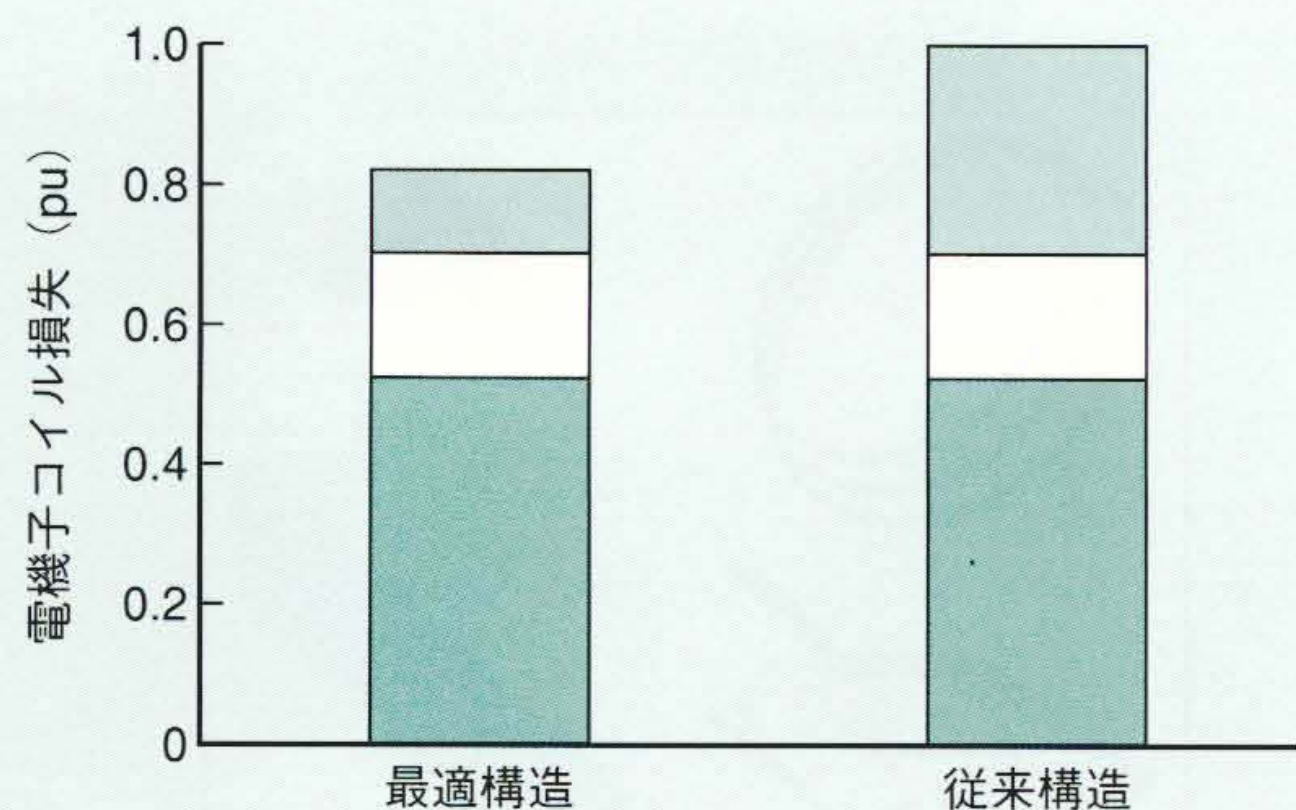
4.1 設計計算結果と実機性能試験結果

固定子コイル素線の最適設計による損失低減効果を図4に示す。循環電流損に関しては従来設計に対して50%以上の低減を実現している。固定子コイル全体の損失に換算しても、最適設計の効果は20%になり、温度低減、効率の上昇が実現できた。

固定子コイルの温度上昇試験結果を図5に示す。設計通りB種温度制限値の110℃をクリアした。周方向の温度も均一である。

各部応力、振動値ともに許容値以内であり、突発短絡時のコイルエンド応力も実測と計算値を比較評価した。以上の実測によって開発した設計ツールの妥当性も確認できた。

開発機の性能を表1に示す。この容量の空冷機としては世界トップクラスの効率98.8%を達成した。また、開発機は温度上昇に余裕があり、ファンなどの変更によっ



注：■ (循環電流損), □ (渦電流損), ■ (直流損)

図4 固定子コイル最適設計による損失低減

コイル断面とトランスポジションの最適設計により、循環電流損を50%低減した。

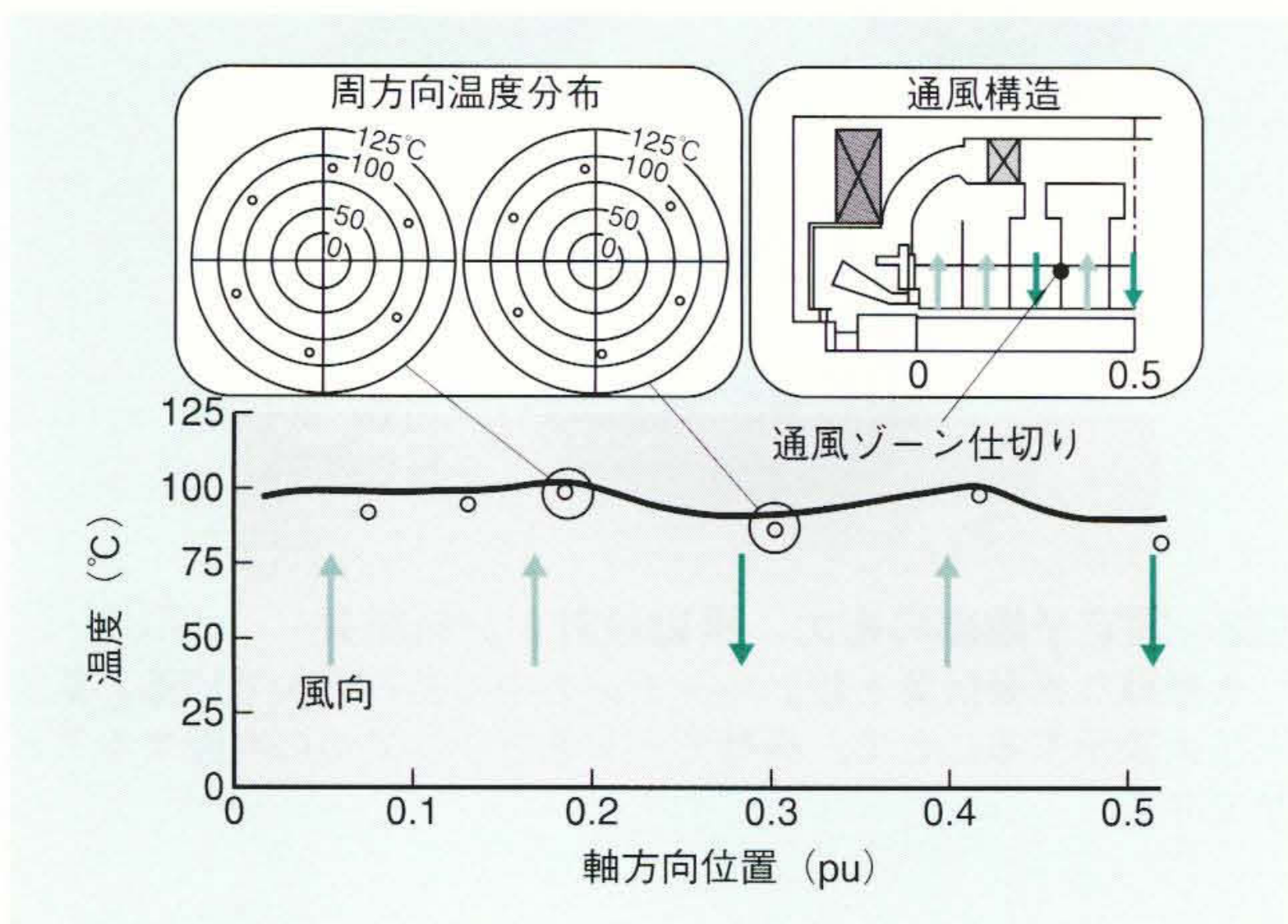


図5 定格運転時の固定子コイル温度設計、実測値比較
温度低減と均一化を実現した。

て効率98.9%の達成も確認できている。今後もこの開発機を標準化し、ラインアップの強化を図っていく。

5 おわりに

ここでは、発電機設計手法の高度化と日立製作所が開発した250 MVA機の固定子コイル回りに特化した内容について述べた。例として、インナクーラ方式大容量空冷機を選んだ。この設計手法は、水素冷却機や水冷却機などにも適用できる。

参考文献

- 1) R. Joho, et al.: Air-cooled Turbogenerators Superseding Hydrogen-cooling Domain, IEMDC (Aug. 2001)
- 2) J. M. Fogarty: Connections Between Generator Specifications and Fundamental Design Principles, IEMDC (Aug. 2001)

表1 開発機の諸元

開発機は98.8%を超える効率を達成した。ファンの変更により、98.9%の効率達成も確認済みである。

項目	50 Hz機	60 Hz機
容量	250 MVA	250 MVA
力率	0.9	0.9
極数	2	2
絶縁種別	F種	F種
温度上昇	B種	B種
回転数	3,000 rpm	3,600 rpm
効率	98.8%>	98.6%

- 3) 服部憲一, 外: インナクーラ方式高効率空冷タービン発電機の開発, 電気学会回転機研究会資料(2001年10月)
- 4) 高橋和彦, 外: タービン発電機実規模モデルコイルの素線電流分布, 電気学会回転機研究会資料(2001年10月)
- 5) 井出一正, 外: タービン発電機電機子巻線における素線電流分布の設計計算, 電気学会回転機研究会資料(2001年10月)
- 6) 江島英博, 外: タービン発電機ステータコイルエンドの電磁振動解析, 電気学会回転機研究会資料(2001年10月)

執筆者紹介



服部憲一

1992年日立製作所入社, 電機システム事業部 電機品信頼性本部 回転機信頼性エンジニアリングセンタ 所属
現在, タービン発電機の開発に従事
電気学会会員
E-mail: kenichi_hattori @ pis. hitachi. co. jp



井出一正

1988年日立製作所入社, 日立研究所 情報制御第5研究部 所属
現在, 研究所におけるタービン発電機開発の取りまとめと設計ツールの開発, 整備に従事
工学博士
電気学会会員, IEEE会員
E-mail: ide @ gm. hrl. hitachi. co. jp



後藤文彦

1982年日立エンジニアリング株式会社入社, コンサルティングエンジニアリング部 所属
現在, タービン発電機の振動設計ツールの開発, 整備に従事
E-mail: fumihiko_gotou @ pis. hitachi. co. jp



仙波章臣

1997年日立製作所入社, 電機システム事業部 発電機システム本部 電力設計部 交流機設計グループ 所属
現在, タービン発電機の設計に従事
E-mail: akitomi_semba @ pis. hitachi. co. jp



渡辺 孝

1962年日立製作所入社, 発電機システム本部 所属
現在, 発電機開発の取りまとめに従事
工学博士
日本機械学会会員
E-mail: takashi-a_watanabe @ pis. hitachi. co. jp