

# 高信頼性発電機の開発と健全性評価

## Development and Performance Evaluation of a High-Reliability Turbine Generator

岡部 宏 Hiroshi Okabe

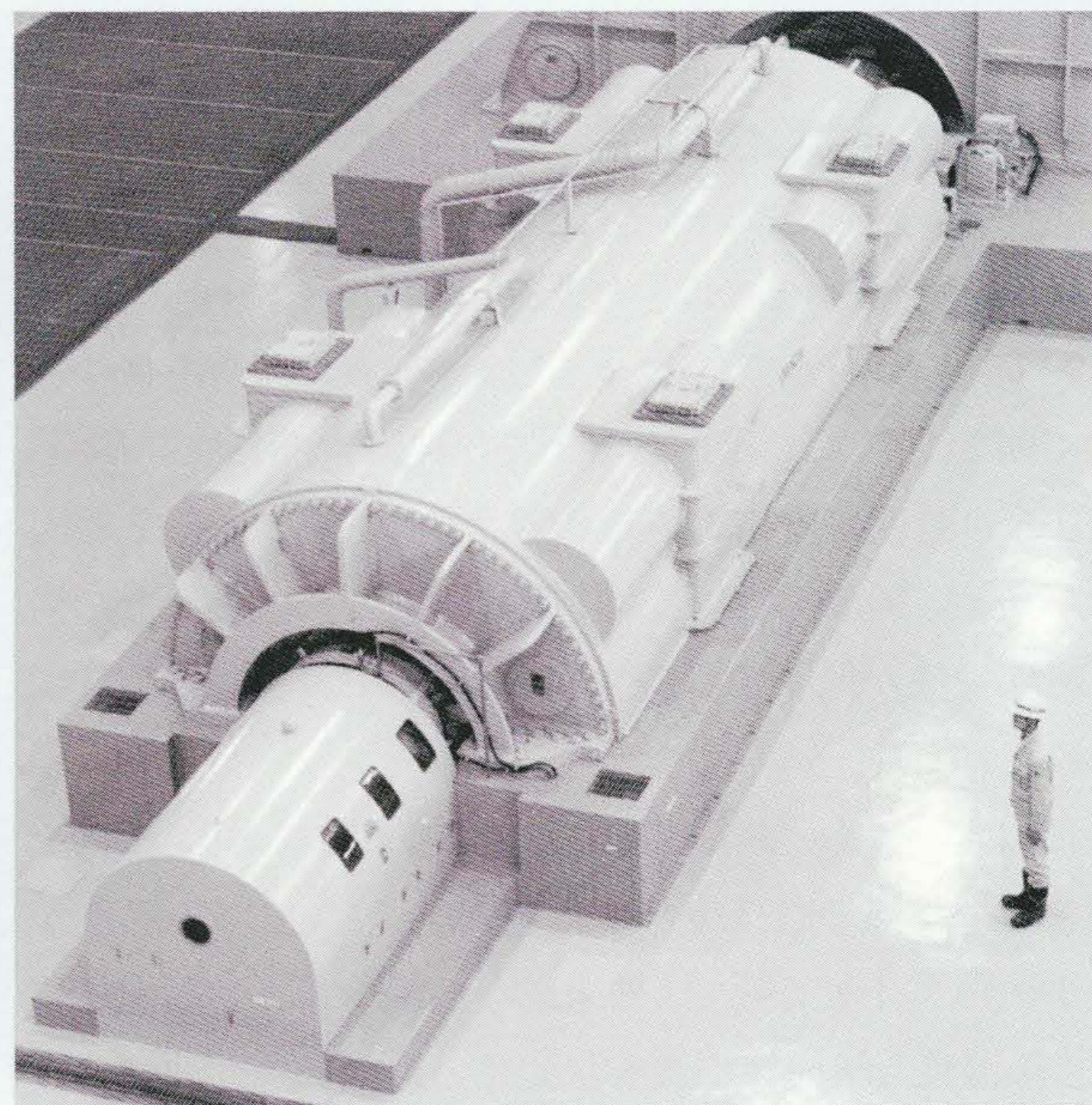
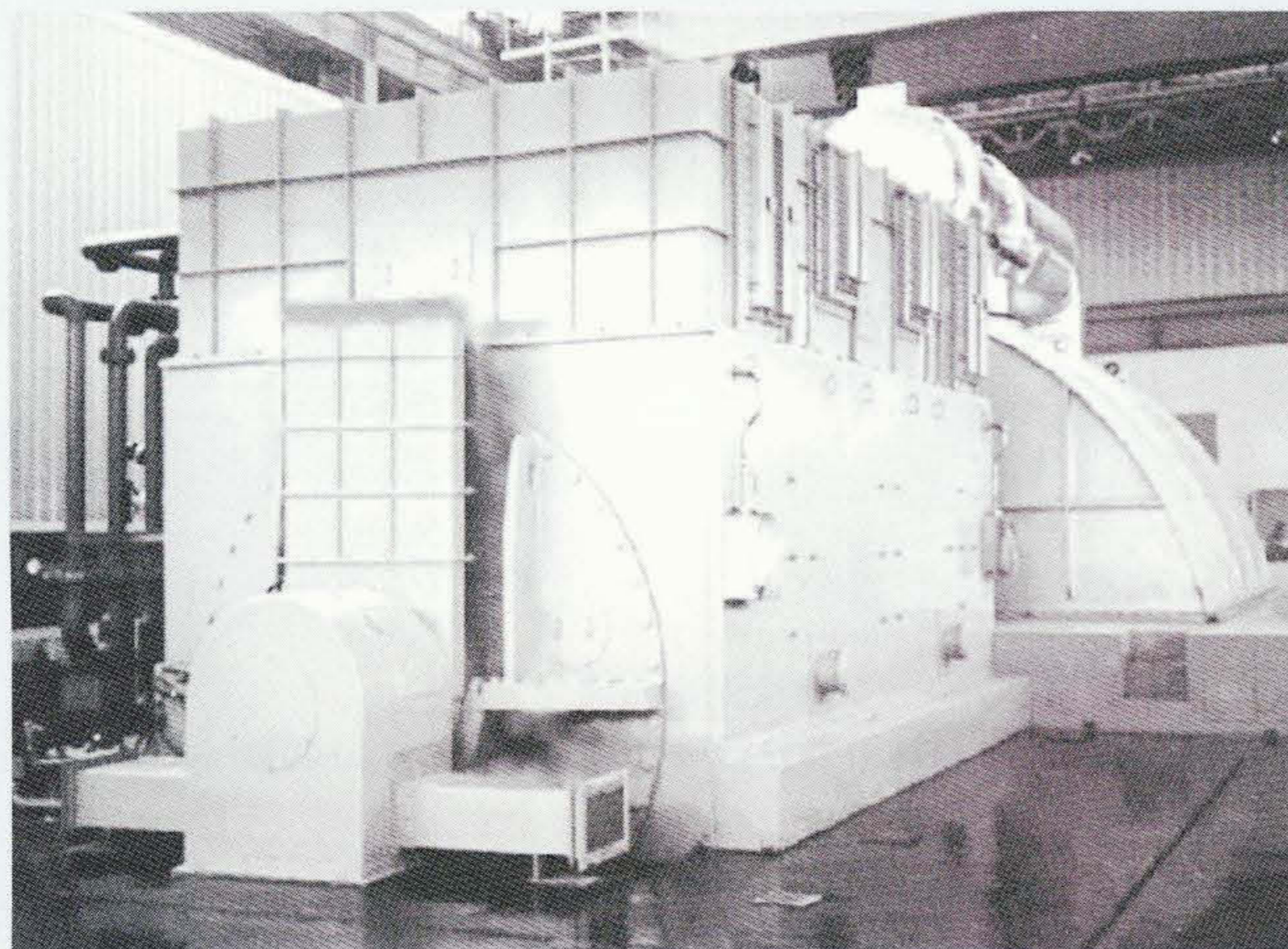
服部 憲一 Ken'ichi Hattori

師岡 寿至 Hisashi Morooka

小野田 満 Mitsuru Onoda

渡辺 孝 Takashi Watanabe

東村 豊 Yutaka Higashimura



空気冷却発電機(左)と水素冷却発電機(右)

高信頼性評価技術は、250 MVA級の空気冷却発電機(左)から800 MVA級大容量水素冷却発電機(右)まで幅広く適用されている。

地球環境保全のため、発電機には高効率化、長期運転による廃棄物削減などが求められている。日立製作所は、250 MVA級大容量空気冷却機について信頼性評価試験を実施した。回転子コイルでは、この空気冷却機と大容量負荷機とを電氣的に接続し、定格界磁電流を通電することによって現地での運転時の条件を再現し、スロット内、コイルエンド部温度の健全性を確認した。固定子コイル温度では、上底コイル間の指定測定点でB種温度上昇以内であることに加え、コイル芯(しん)線の最高温度も許容温度に十分な裕度を持つことを確認した。

また、発電機性能を決定するキーコンポーネントの一つである固定子コイル絶縁では、「環境負荷低減型エポキシレジン」を採用した新絶縁システムを開発した。このエポキシレジンには、構成材に潜在性硬化触媒を付加したものであり、使用可能時間が従来品に比べて約6倍長く、廃棄物削減による環境への負荷低減が期待できる。新絶縁システムは、課電寿命、熱劣化試験、およびヒートサイクル試験などの性能評価を通して、優れた性能に加え、長期にわたって発電機の信頼性が確保できるものと確認している。

## 1 はじめに

近年、地球環境の保全が世界共通の課題として認識されるようになり、高品質の製品を提供するだけでなく、環境に与える負荷の軽減への対応が必要不可欠となった。そのため、発電機の開発・設計では、システム全体としての高効率化に

加え、長期間の運転での信頼性の確保や、製造時に副産物として生まれる廃棄物の削減がこれまで以上に重要視されている。

システム全体の高効率化では、540度トランスポジションとインナクーラ冷却方式を適用して、発生損失の最小化と最高温度の低減や均一化を図り、250 MVA級空気冷却発電機(以下、開発機と言う。)では、水素冷却機に迫る高効率

98.8%を達成した<sup>1),2)</sup>。

ここでは、発電機のコンポーネントに主眼をおき、回転子コイルと固定子コイルで検討した実機での温度や寿命、製作時に実施した各種評価試験結果について、また、空気冷却機の実機で実施した健全性評価試験<sup>3)</sup>、および固定子コイル絶縁システムについて述べる。

## 2 実機計測による健全性評価

### 2.1 発電機の信頼性と寿命

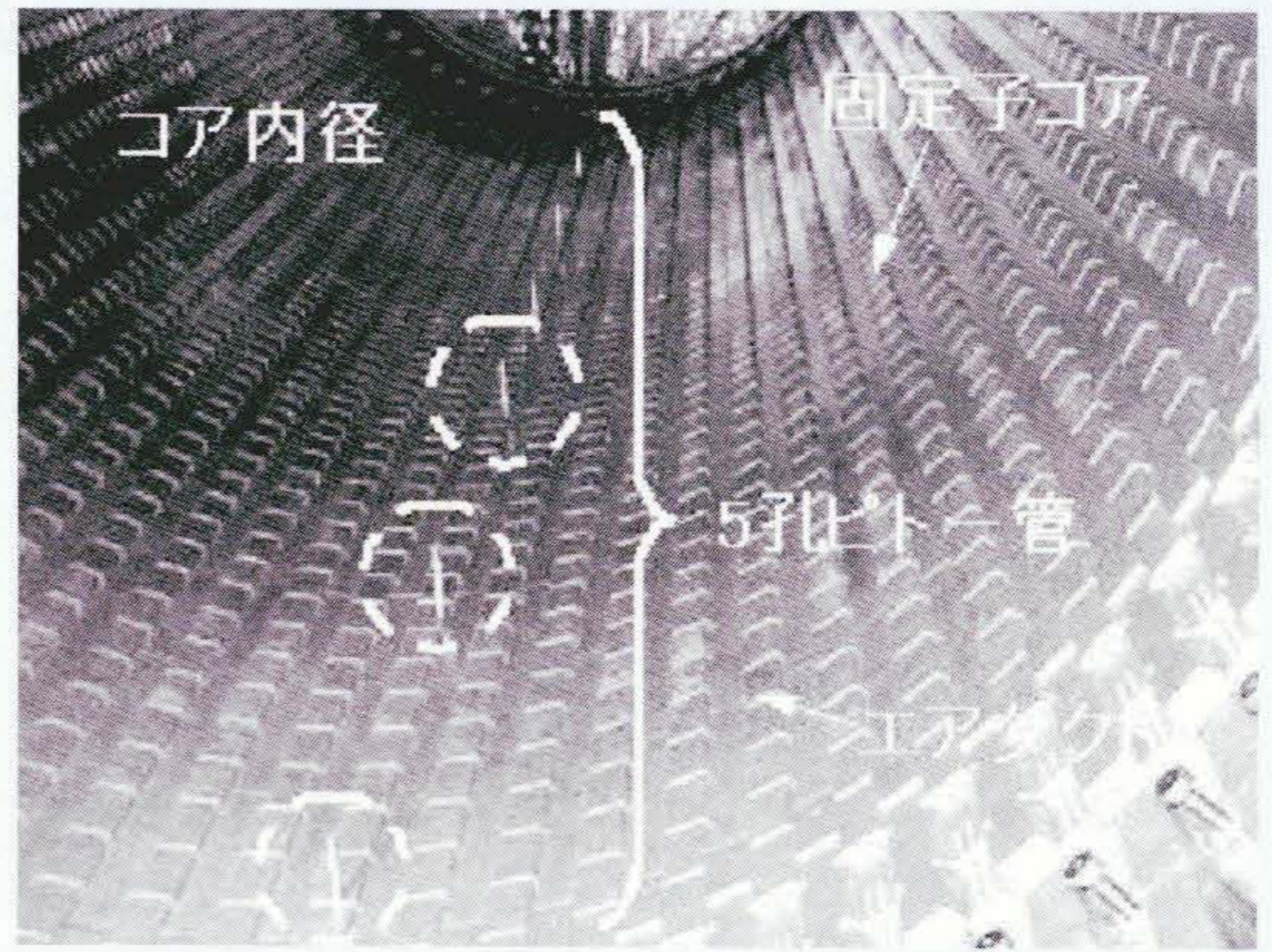
発電機を形成するコンポーネントの中でも、運転中に最も過酷な状況を強いられるのは、大電流、高電圧下にある固定子コイルと回転子コイルである。コイルは許容温度限界を持つ絶縁物で囲まれていることから、絶縁物内に納められたコイル芯(しん)線の温度が発電機の信頼性と寿命を決定する重要因子の一つとなる。許容温度以上で長期にわたって運転した場合、絶縁特性が低下することにより、運転ができなくなる可能性もある。

特に固定子コイルは絶縁物に完全に覆われており、機内を循環する冷却風で直接冷却することができないので、温度が上がりやすい。したがって、効果的な通風冷却が、固定子コイル芯線温度と絶縁物温度を決定する要因になると同時に、発電機の信頼性と寿命に大きな影響を及ぼす。

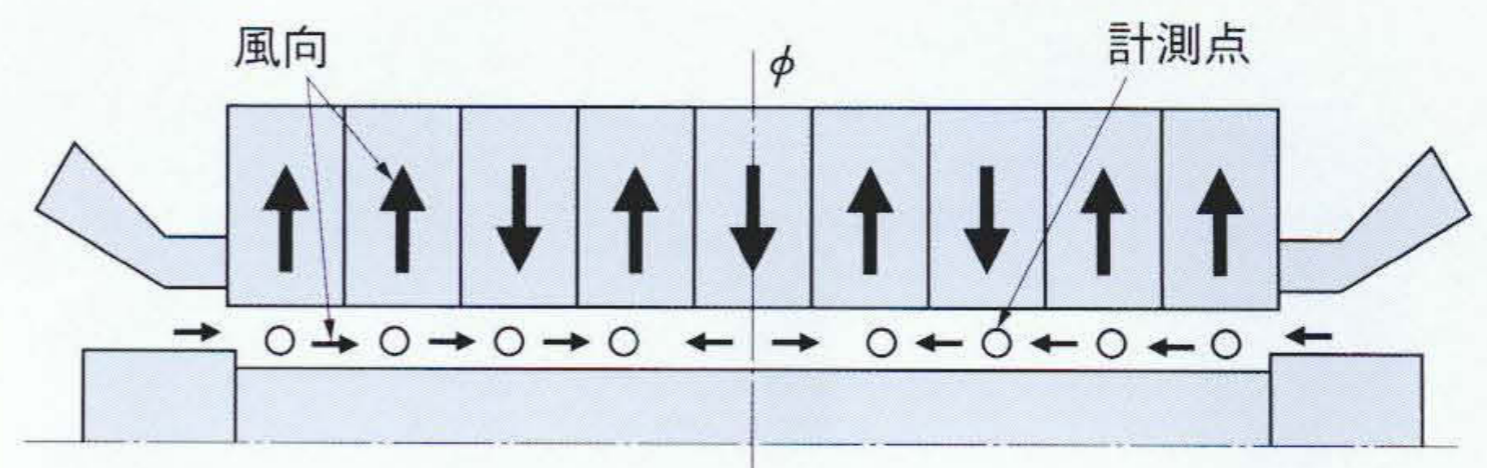
### 2.2 計測点の選定と計測方法

開発機では、発電機性能や寿命に密接に関係するコイル芯線の最高温度と、温度を決定する重要な要因である通風を評価するため、発電機内部に1,000点を超えるセンサを取り付け、詳細に性能を評価した。

通風計測では固定子コイルと回転子コイル間のエアギャップ風量77点をはじめ、全体風量など発電機各部の通風特性の解明を図った。主な計測項目を図1に示す。エアギャップ



(a) 風量測定センサの挿入図



(b) エアギャップの計測点

図2 エアギャップ風量測定結果

5孔ピトー管により、複雑な流れのあるエアギャップでの風量・風向測定を行った。

での冷却風の流れは、軸方向成分と旋回成分とが混在し、複雑な流れを形成する。このため、エアギャップでの風量と流れの方向の計測は困難であり、この部位での計測結果についての報告は少ない。

この開発試験では、複雑な流れの主流方向成分をとらえるため、5孔ピトー管を適用した。5孔ピトー管は先端に五つの圧力検出孔があり、風速をベクトルとしてとらえるセンサである。エアギャップ風量測定時のセンサ配置をわかりやすくするために、回転子を抜いた状態でのコア内径側の写真を図2(a)に示す。風量はエアギャップ軸方向8点で計測した[同図(b)参照]。各点では、径方向7か所の風速を測定し、風速ベクトルの平均値を軸方向流量に換算している。

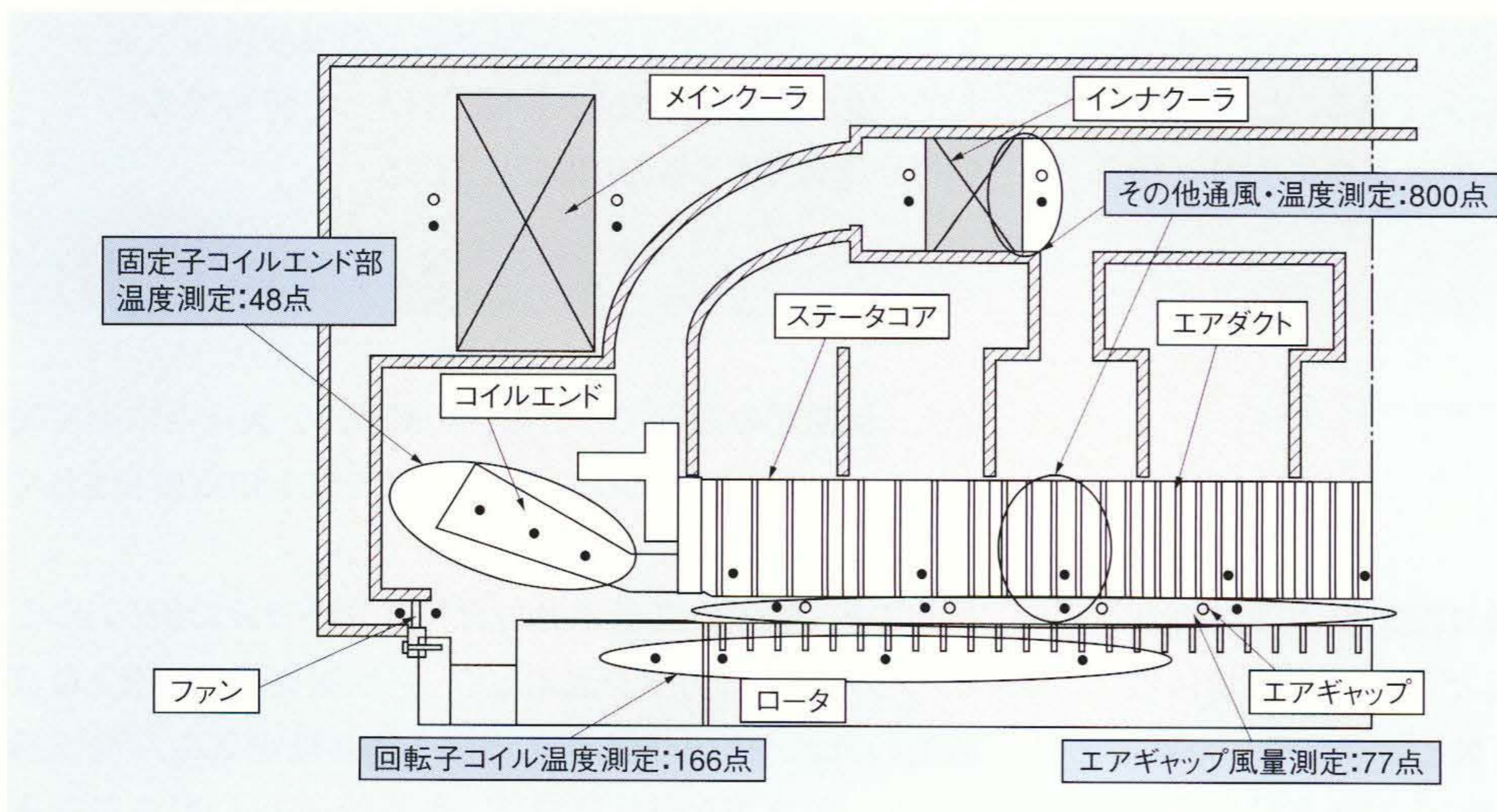


図1 開発機的主要な計測項目

固定子コイル、回転子コイルなどの発電機主要部に、通風・温度だけで1,000点を超える計測を実施した。

注：○(通風計測点)、●(温度計測点)

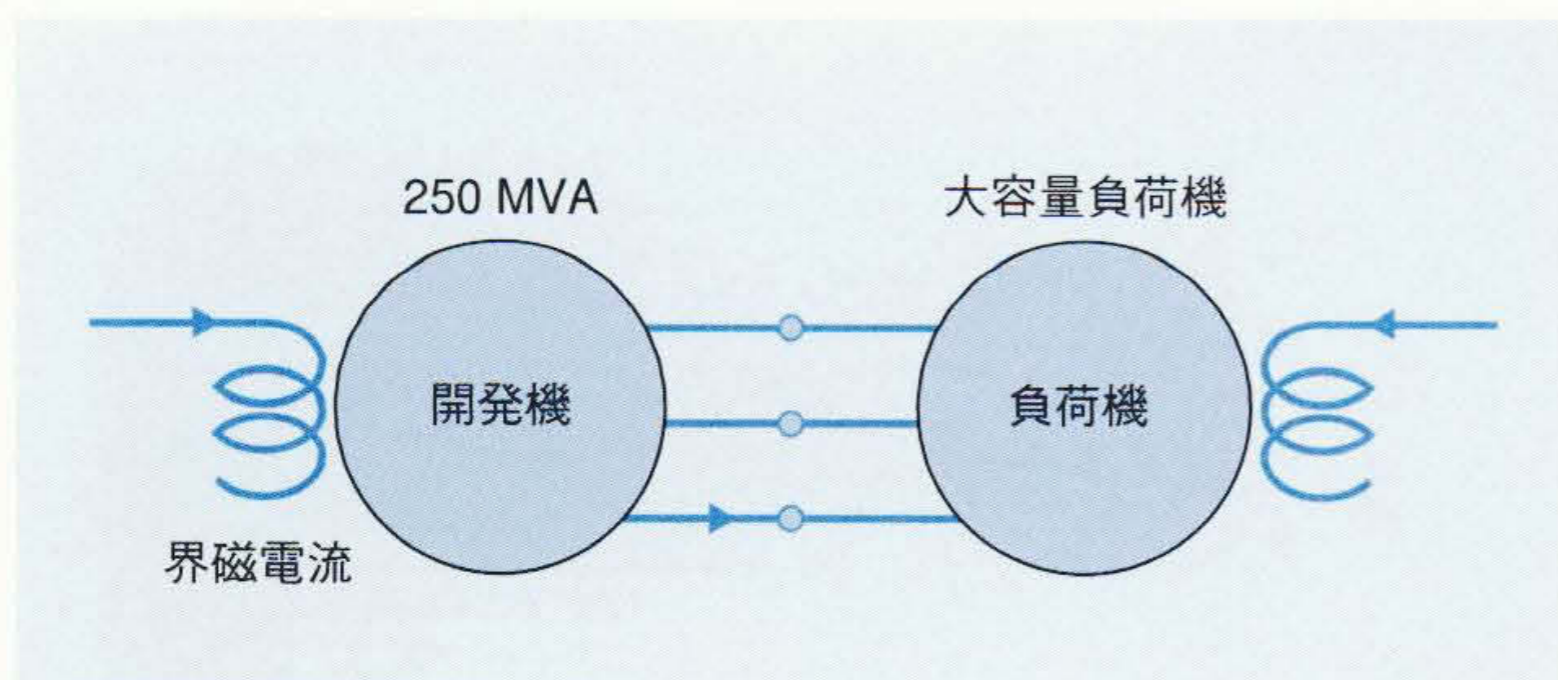


図3 定格界磁電流通電試験の回路図

開発機と大容量負荷機を接続し、定格界磁電流通電試験を実施した。

次に、回転子コイルの温度計測について述べる。通常の工場試験では、コイルに温度センサが取り付けられていないので、回転試験前に測定した回転子コイルの抵抗値と、回転試験時の通電界磁電流および界磁電圧から得た抵抗値との比較によってコイル温度を求めている。しかし、この方法で得られる温度は全コイルの平均温度であり、最高温度を測定することはできない。また、回転子コイルに通電する界磁電流も、工場試験時では発電機の容量に見合う負荷が存在しないので、定格通電は困難である。このため、現地での運転時の回転子コイル温度は、銅損温度試験の結果から定格負荷時の温度上昇を推定するのが一般的であるが、最高温度についても同じ方法を用いて高精度で推定できるかどうかは未知のままであった。

この開発試験では、回転子コイルの軸方向分布とターンごとの分布だけでなく、最高温度を詳細かつ高精度に測定するために、スロットの内外に166個のセンサを直接コイルに埋め込んだ。また、開発機と大容量負荷機を電氣的に接続することによって定格界磁電流通電試験を行い、現地運転と同条件での回転子コイル温度の健全性評価を実施した(図3参照)。

固定子コイルには、上底コイル層間に挿入した抵抗温度計に加え[図4(a)参照]、芯線に取り付けた光温度計も合わせて100点以上の温度センサを取り付け、温度分布と発電機の

寿命を決定する芯線の最高温度評価を行った。同図(b)のように、コイルエンド部は電磁力に対する強度を確保するために、隣接するコイル間を複数か所で固定しており、構造が複雑で冷却風が流れにくい。加えて、コイルエンドシリース接続部では、絶縁層の厚さから冷却能力が他の部位と比べて低く、温度の高いことが推定されるので、同部での芯線温度の測定を実施した。芯線に光温度計を取り付けた後は、当該部を実機と同条件にするために正規の絶縁を施して計測を行った。

また、空冷機では冷却媒体の特性上、ファン通過時の温度上昇、およびエアギャップでの通風摩擦損による温度の上昇が大きい。そのため、固定子コイル温度に大きな影響を与えるエアギャップの冷却風温の分布を正確に把握する目的で、45点の熱電対(ついで)を配置した。

### 2.3 性能評価試験結果

定格界磁電流通電時の回転子コイル温度計測結果を図5(a)に示す。横軸は回転子スロット出口部を0 pu、軸中央部を0.5 puとしている。縦軸は回転子コイル温度であり、最高温度はスロット出口部に存在している。開発機では最高温度、平均温度ともにB種の許容温度を満たし、現地運転時の健全性を検証することができた。また、銅損温度試験から分離法によって推定した定格時の回転子コイルの最高温度は、定格界磁電流通電試験時の温度とほぼ一致することも確認できた[同図(b)参照]。

固定子温度試験結果を図6(a)に示す。同図は、銅損運転、入気温度40℃時の固定子コイル温度とエアギャップ風温である。固定子コイル温度は、上底コイル間に挿入した抵抗温度計による測定結果である。横軸はコア端部を0 pu、軸中央部を0.5 puとしている。固定子コイル温度とエアギャップ風温は、ともに軸方向温度が均一に分布していることから、インナクーラ冷却方式は一般に軸中央部の温度が高くなる大容量

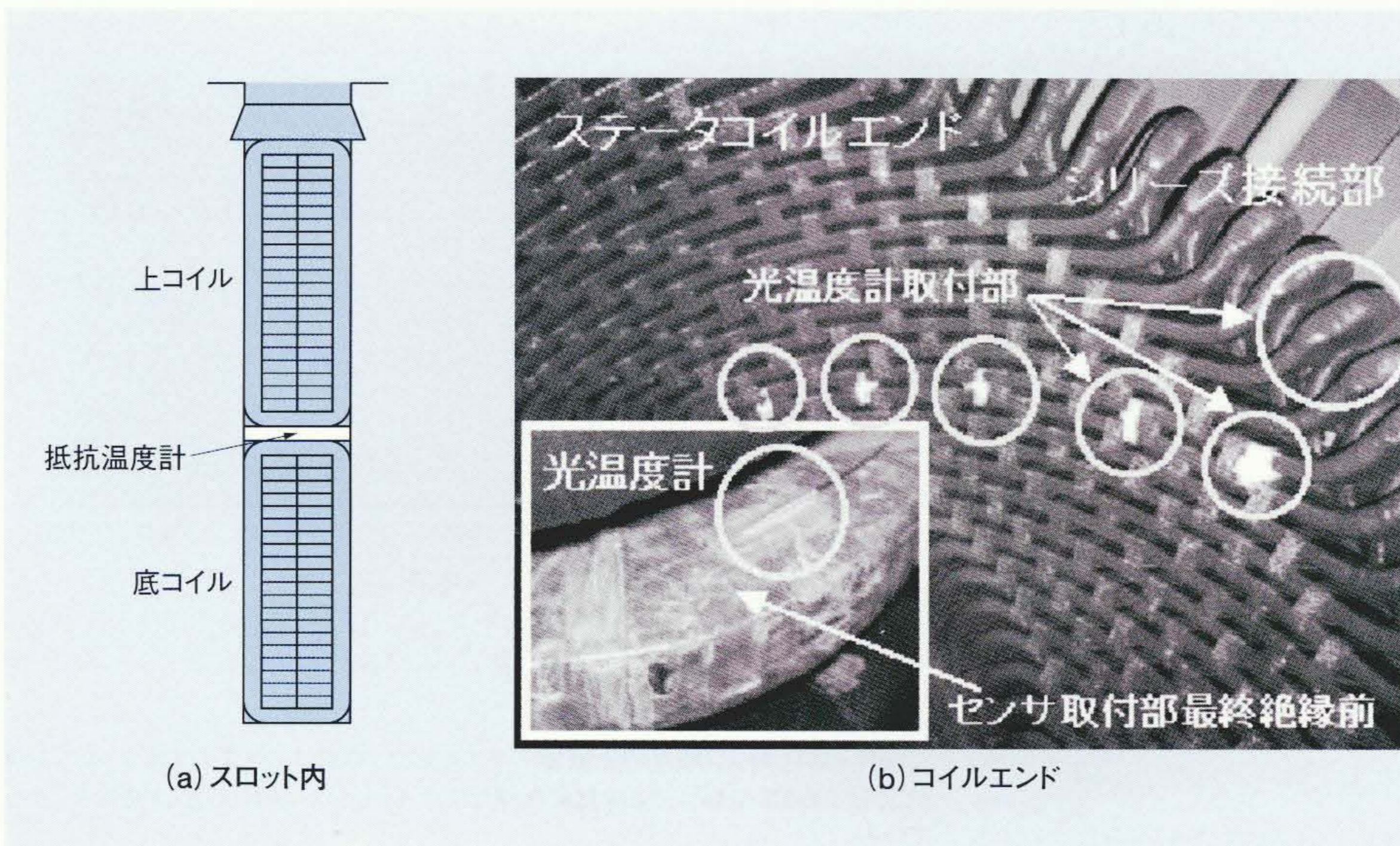


図4 固定子コイルの温度計測

スロット内は上底コイル間に挿入した抵抗温度計で、コイルエンド部は光温度計でそれぞれ温度を計測した。

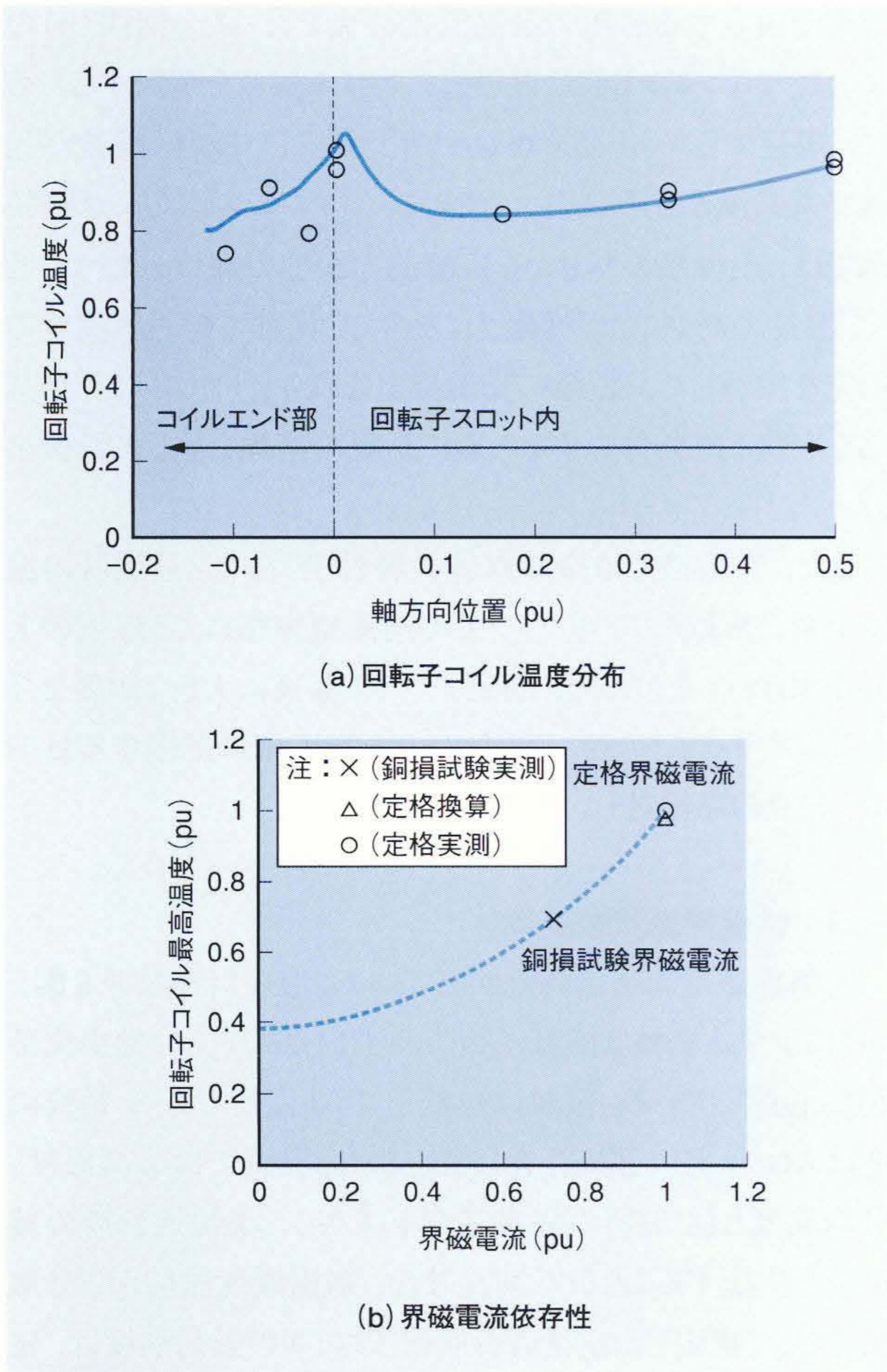


図5 回転子コイルの温度分布

定格界磁電流通電試験で現地運転時の温度を評価し、スロット内、コイルエンド部の最高温度が規格値以内であることを確認した。

空冷機に対して、非常に有効な冷却方式であると言える。

定格運転時での開発機の固定子コイル芯線温度推定値を図6(b)に示す。上コイル、底コイルともに芯線温度は低く、B種絶縁物の許容値に対して十分な裕度があり、開発機が優れた温度特性を持つことを確認した。

## 2.4 性能評価試験のまとめ

この大規模実機計測では、発電機の真の性能を評価するうえでキーポイントとなる通風、温度計測の結果、開発機が良好な温度特性を持っていることを確認した。特に寿命を決定する要因である、回転子コイル、固定子コイル芯線の最高温度を詳細に評価した結果、双方ともB種絶縁物の許容温度に対し裕度があることを検証することができた。なお、測定した芯線の最高温度でも十分な裕度を持っている。

# 3 固定子コイル用新絶縁システム

## 3.1 環境負荷低減型エポキシレジン

固定子コイル絶縁システムに用いる注入用レジンには、硬化後のレジンの電気的特性、機械的特性、耐熱性などとも

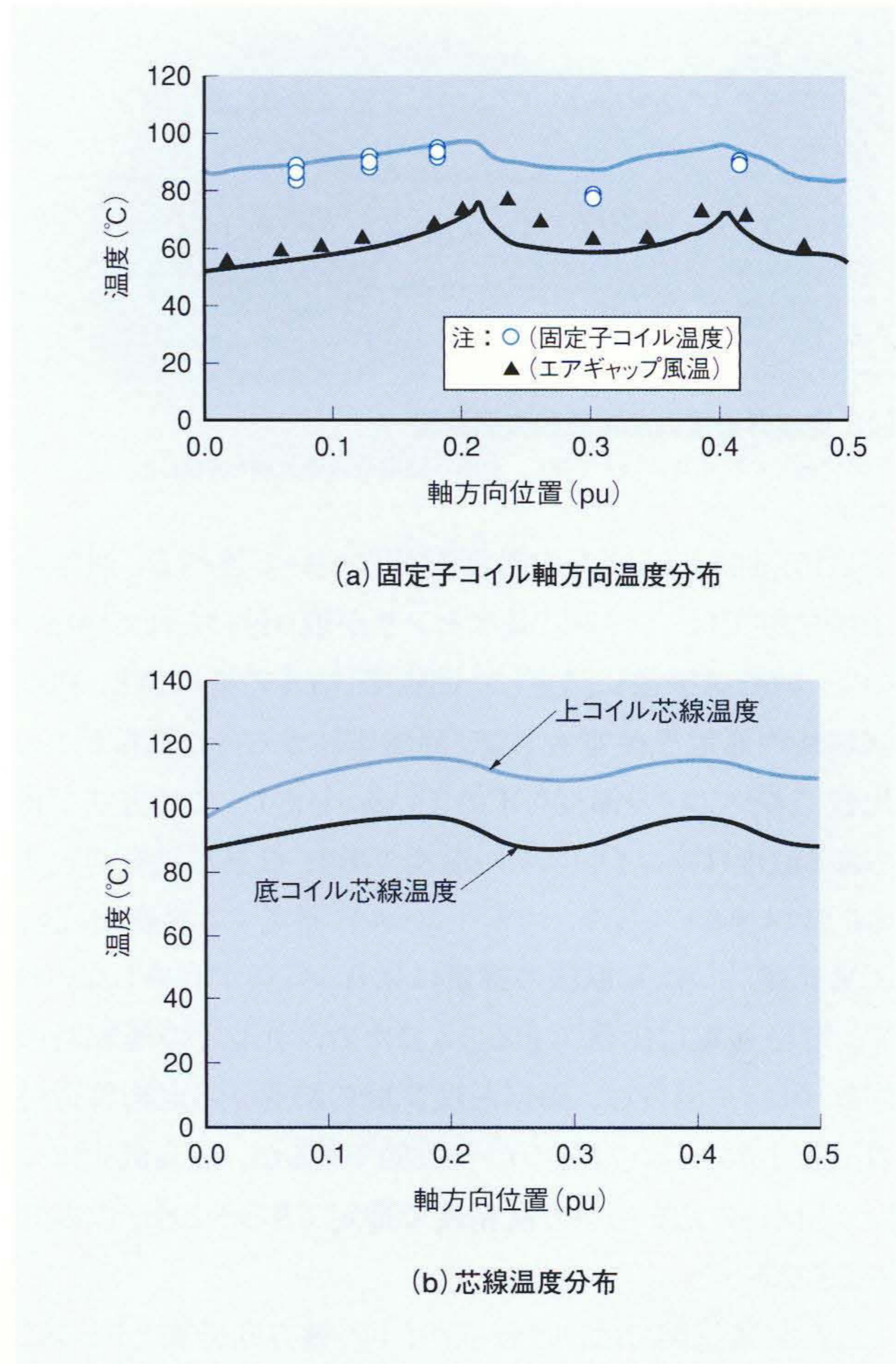


図6 固定子コイルの温度分布

上底コイルともに芯線温度は十分低く、開発機が優れた温度特性を持っていることを確認した。

に、真空注入の際に作業上必要となるレジンの適正な粘度、あるいは長いポットライフ(使用可能時間)などが要求される。新絶縁システムの特徴の一つは、従来用いていたエポキシレジンと比べて、ポットライフが長い「環境負荷低減型エポキシレジン」を用いていることである。エポキシレジンの粘度の経時変化を測定した結果を図7に示す。

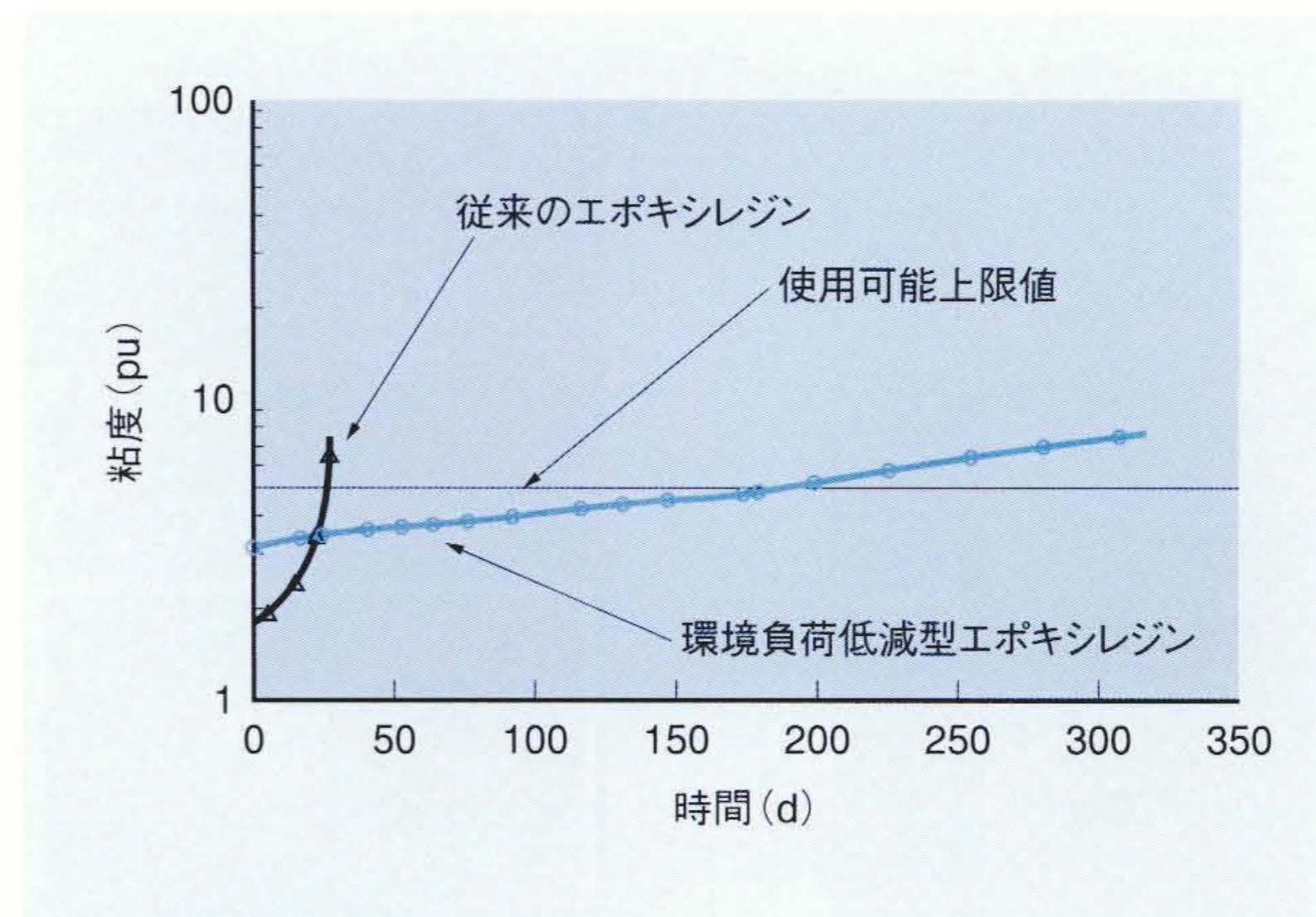


図7 レジンの粘度の経時変化

使用可能なレジン粘度の上限値に達するまでの時間は、従来のエポキシレジンが約30日であるのに比べ、環境負荷低減型エポキシレジンでは約180日と約6倍長くなっている。

環境負荷低減型エポキシレジンでは、各種エポキシレジン、硬化剤、硬化触媒の組合せを詳細に検討した。その結果、特に潜在性硬化触媒を効果的に組み合わせることにより、硬化後の絶縁層の要求特性を満たしつつ、注入用レジンのポットライフの長期化を達成している。

レジン粘度の経時変化を図7に示す。従来のレジンでは日数とともに粘度が上がり、約30日で使用できない粘度に達するのに比べ、環境負荷低減型エポキシレジンはこの粘度に達するまでの期間が約180日あり、およそ6倍長くなっていることがわかる。これにより、長期間にわたってレジンを使用することが可能となり、レジン廃棄量を削減することができるので、環境への負荷が低減できる。この環境負荷低減型エポキシレジンのガラス転移温度は150℃と高く、絶縁層の線膨張係数、熱伝導率についても、従来のエポキシレジンを用いた場合と同等の特性を持っている。

### 3.2 新絶縁システムの特性

固定子コイル絶縁は、発電機の信頼性、寿命に大きく関わっている。そのため、環境負荷低減型エポキシレジンを採用した新絶縁システムについて、小型バーコイル評価、実機サイズコイル評価、量産化評価と段階的に性能評価を実施し、実機適用の検証を行った。

注入レジンの変更に伴い、品質が均一となる製造プロセスを確立した。このプロセスの健全性は、製造したコイルの $\Delta \tan \delta$ を測定する方法で評価した。この試験法はコイル絶縁層の性状を示す代表的な試験法であり、 $\Delta \tan \delta$ 値が小さいほど絶縁層が緻密で欠陥が少ないことを示す<sup>4)</sup>。量産時の $\Delta \tan \delta$ の分布は図8に示すようにばらつきが小さく、品質のよいコイルが供給できることを確認した。

運転による絶縁劣化についての寿命評価では、課電寿命試験、熱劣化試験、曲げ疲労試験、およびヒートサイクル試験を実施した。これらの試験項目は固定子コイル絶縁の電気的、熱的、機械的、およびヒートサイクルの各劣化要因に対応したものである<sup>5)</sup>。

一例として課電寿命特性を図9に示す。新絶縁システムが、従来の注入絶縁システムと比べて課電寿命特性に優れていることを確認した。

### 3.3 コイルエンド電界緩和層

固定子コイルは、スロットから出た部分のコイルエンド近くの電界を緩和するため、半導電性の電界緩和層を表面に形成している。発電機の高電圧化を反映して、いっそう緩和性能の高い非線形抵抗特性の半導電性層を使用している。従来、このような電界緩和層はコイル絶縁層成形後に塗り込み作業で形成していたが、現在ではコイル絶縁層成形と同時に形成する技術を採用している。これにより、塗り込みのレジン取り扱い作業を省くことができ、環境負荷を削減した。この技術を確

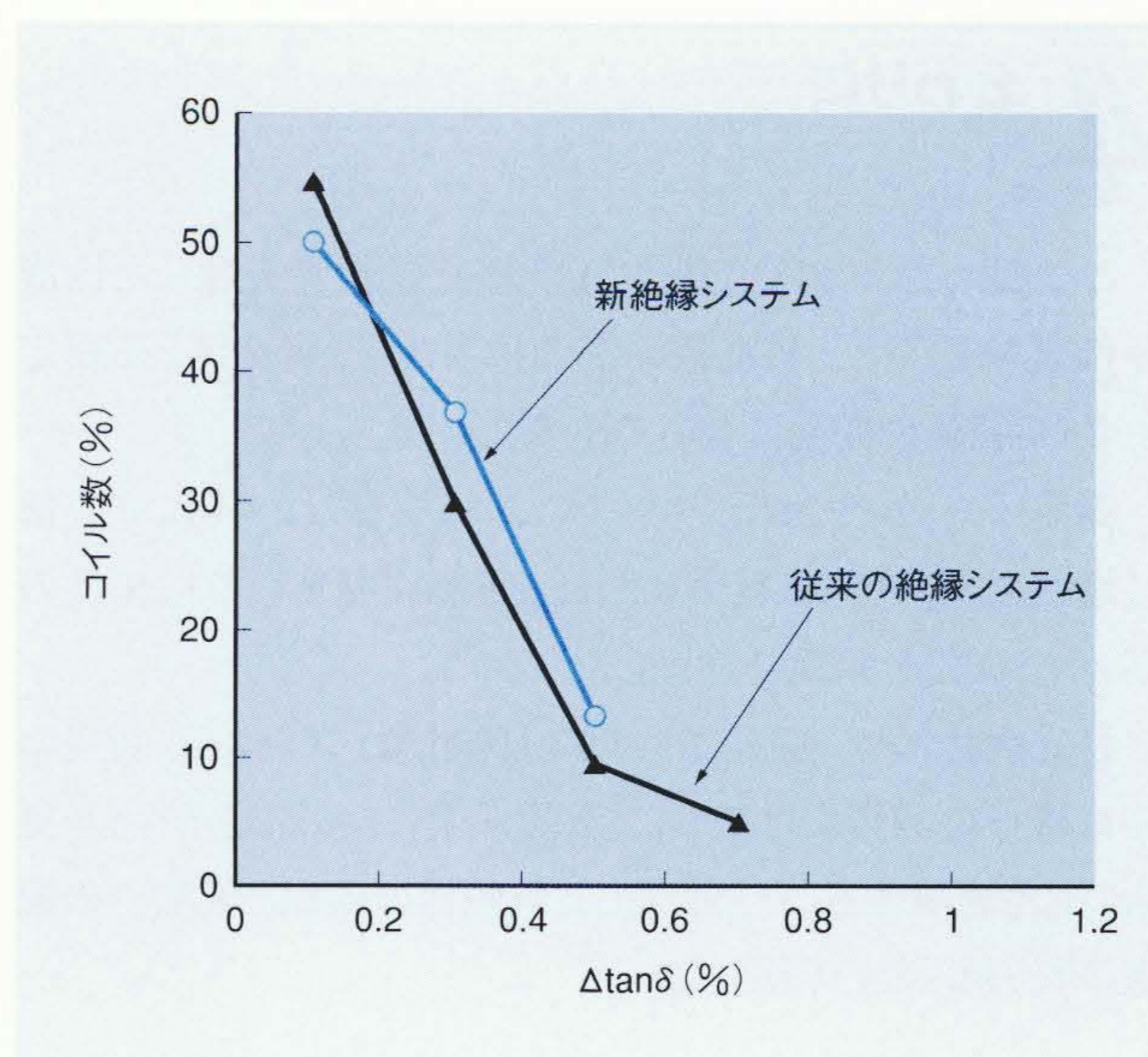


図8  $\Delta \tan \delta$ 分布の一例

ばらつきが小さく、品質のよいコイルが供給できることを確認した。

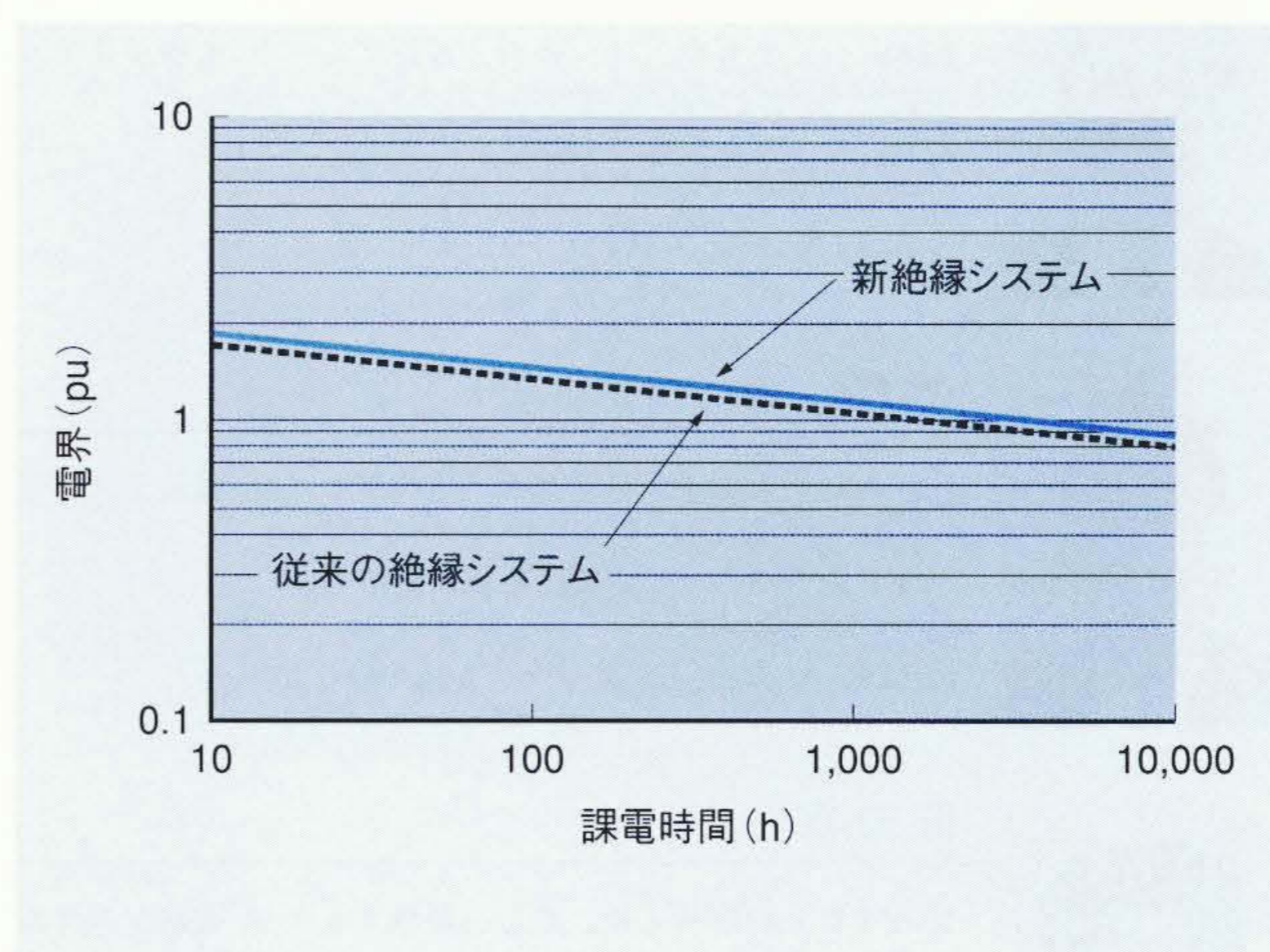


図9 課電寿命特性

新絶縁システムは、従来の注入絶縁システムと比べて課電寿命特性に優れていることを確認した。

立するためには、電界緩和層の電位分布特性を正確に把握することが重要となる。このため、電位分布特性を正確に評価する新しい測定技術を開発して適用した。この方法は、微小な電位プローブの電位を被測定対象のコイル表面の電位に追従させるようコントロールし、このプローブの電位を測定するものである。この方法を適用することにより、被測定部分の電位を乱すことなく評価することができるようになった<sup>6)</sup>。

環境負荷低減型エポキシレジンの注入絶縁に対応した電界緩和層の開発でも、この新測定技術を適用し、適切な構造を確立した。この電界緩和層は、定格電圧の3倍もの高い電圧を課電しても沿面放電の発生がないことを確認している。

固定子コイル用新レジン注入絶縁システムは環境にやさしく、耐熱性と品質に優れており、長期にわたって発電機の信頼性が確保できる。

## 4 おわりに

ここでは、250 MVA級空気冷却発電機で実施した性能評価試験結果と、発電機の寿命に大きく影響を与える固定子コイル絶縁の開発について述べた。

固定子コイルや回転子コイルの芯線温度は、ともに許容値に比べて十分低く、長期にわたる運転に対応して信頼性の高いマシンであることを検証した。

日立製作所は、固定子コイル用新絶縁システムを、新規の発電機への適用だけでなく、予防保全による固定子コイル更新時にも適用することを推進し、信頼性の確保と環境への配慮に取り組んでいく考えである。

## 参考文献

- 1) K. Hattori, et al.: Air-cooled Large Turbine Generator with Inner Cooler System, CIGRE, 11~104(2002)
- 2) 服部, 外: 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, 日立評論, **84**, 2, 177~180(2002.2)
- 3) 岡部, 外: 250 MVA級空気冷却発電機の多点計測による健全性評価, 電気学会回転機研究会資料(2002.10)
- 4) 安芸, 外: 大型回転機固定子コイル用スーパーハイレジン絶縁方式, 日立評論, **55**, 7, 679~682(1973.7)
- 5) 神谷, 外: 発電機の予防保全技術, 日立評論, **72**, 8, 741~748(1990.8)
- 6) 東村, 外: 高電圧回転機コイルエンドコロナシールドの電位分布評価法, 電機学会論文, Vol.119-A, No.7, 1033~1038(1999.7)

## 執筆者紹介



**岡部 宏**

1999年日立製作所入社, 電力・電機グループ 電機システム事業部 電力設計部 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: hiroshi\_okabe @ pis. hitachi. co. jp



**渡辺 孝**

1962年日立製作所入社, 電力・電機グループ 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  
機械学会会員  
E-mail: takashi-a\_watanabe @ pis. hitachi. co. jp



**小野田 満**

1983年日立製作所入社, 電力・電機グループ 電機システム事業部 電力設計部 所属  
現在, 発電機のコイル設計業務に従事  
電気学会会員  
E-mail: mitsuru\_onoda @ pis. hitachi. co. jp



**師岡 寿至**

1990年日立製作所入社, 日立研究所 エネルギー材料研究部 所属  
現在, 電力機器用絶縁材料の研究開発に従事  
電気学会会員  
E-mail: hmorooka @ hr. hitachi. co. jp



**服部 憲一**

1992年日立製作所入社, 電力・電機グループ 電機システム事業部 電力設計部 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



**東村 豊**

1970年日立製作所入社, 日立研究所 情報制御第五研究部 所属  
現在, 回転機コイル絶縁の研究開発に従事  
電気学会会員  
E-mail: yhigashi @ hr. hitachi. co. jp