# 火力発電所向けタービン発電機の大容量化技術

Development of Large Capacity Turbine Generators for Thermal Power Plants

佐竹 恭典*1
Yasunori Satake

高橋 和彦*2
Kazuhiko Takahashi

和気 孝美*1
Takami Waki

小野田 満*2
Mitsuru Onoda

田中 崇廉*1
Takayasu Tanaka

電力需要の拡大や資源の有効利用を背景に，タービン発電機の大容量化の要求が高まっている。三菱日立パワーシステムズ(株)(MHPS)では従来実績の 1.2 倍の容量となる 1300MVA 級固定子水直接冷却方式のタービン発電機を開発した。開発機には様々な大容量化技術を適用し，工場試験において適用技術の性能や信頼性を評価し，良好な試験結果を経て出荷した。また，高熱通過絶縁システムを開発して冷却性能を強化した結果，従来固定子水直接冷却方式で対応した容量に水素間接冷却方式を適用した発電機の基本設計が完了し，50Hz，60Hz 共に 900MVA 級まで容量が拡大できる見通しを得た。

## 1. はじめに

世界的な電力需要の拡大や資源有効利用の観点から，大型石炭火力発電や効率の高い大型ガスタービンコンバインドサイクル発電が，原子力発電に替わるベースロード電源として注目されており，需要が増加している。これを背景に，タービン発電機の大容量化や高効率化の要求が高まっている。

MHPS では大容量タービン発電機の開発に注力してきており，今般，1300MVA 級の火力用発電機を開発，製作して良好な工場試験結果を得て出荷した。本稿では，発電機に適用した大容量化技術とその検証，及び工場試験の結果を述べる。また，高効率で冷却水装置が不要となる水素間接冷却方式の大容量化にも取り組んでおり，大容量化技術を適用した900MVA 級発電機の基本設計を完了した。この開発状況についても紹介する。

## 2. タービン発電機の大容量化

タービン発電機は，蒸気タービン又はガスタービンの機械エネルギーを電気エネルギーに変えるエネルギー変換装置である。そして発電機は，電磁気，熱，通風冷却，振動などの現象を含み，これらが連成しているため，相互作用を考慮して設計する。また，発電機は内部で発生する熱量の増加に応じて，固定子巻線の冷却方式として空気間接冷却，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は MHPS が製作してきたタービン発電機単機容量の推移を示す。発電機の容量は，市場の要求とともに年々増加の傾向にあり，2004 年には4極原子力用発電機で 1570MVA[(1)]，を完成させた。現在は 2000MVA 級の原子力用大容量機を開発中であり，基本設計が完了した状況に

*1 三菱日立パワーシステムズ(株) 発電機総括部発電機技術部
*2 三菱日立パワーシステムズ(株) 発電機総括部発電機技術部 主席技師

ある。一方，2極火力用発電機では 2006 年に 1120MVA（最大容量 1230MVA）の水直接冷却方式の大容量機[(2)]を完成させた。そして，2013 年には 1300MVA 級の2極火力用発電機を開発した[(3)]。60Hz 機は良好な工場試験結果を経て出荷し，50Hz 機は製作中の状況にある。

発電機の容量Pは，一般に以下の式で表される。

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

ここで，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。

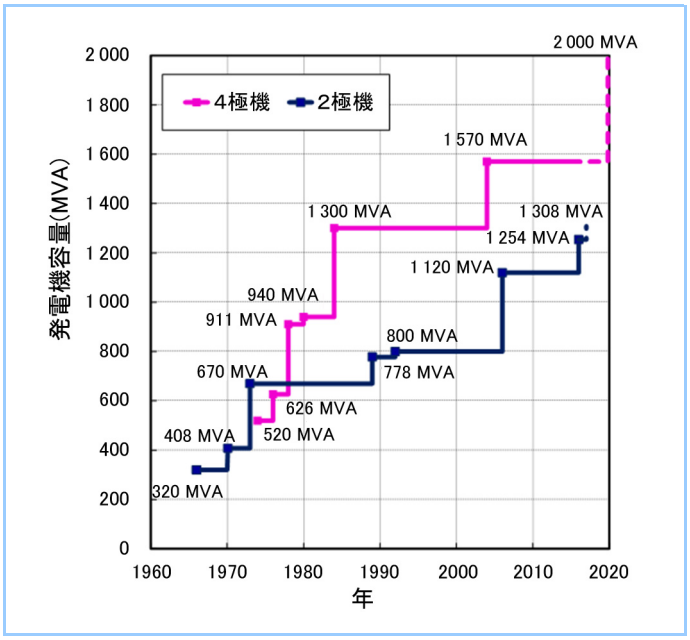


図1 タービン発電機単機容量の推移（MHPS 実績）

## 3. 1300MVA 級水直接冷却発電機の完成

### 3.1 設計方針

1300MVA 開発機の主な仕様を 1000MVA 先行機と比較して表1に示す。60Hz，50Hz 共に開発機は先行機に対して容量で約 20%の増加となる。開発機に必要な容量増加分に対し，冷却性能を強化することで，発電機仕様を満足し，各部の温度，振動が制限値以内となる見通しが得られたため，出力係数を約 15%増加し，体格の大型化は3%程度にとどめる方針とした。

設計を進めるに当たり，綿密なデザインレビューを重ねた。また，DRBFM（Design Review Based on Failure Mode：不具合未然防止法）を取り入れて，先行機からの変更・変化に関わる故障モードを抽出し，対策の事前検討を実施して設計に反映した。

表1 1300MVA 級開発機と先行機の主な仕様比較

| | 60Hz | | 50Hz | |
|---|---|---|---|---|
| | 開発機 | 先行機 | 開発機 | 先行機 |
| 容量（MVA） | 1254 | 1046 | 1308 | 1120 |
| 電圧（kV） | 27 | 25 | 27 | 27 |
| 電流（A） | 26815 | 24157 | 27970 | 23949 |
| 回転数（$min^{-1}$） | 3600 | 3600 | 3000 | 3000 |
| 水素ガス圧（MPa・g） | 0.52 | 0.52 | 0.52 | 0.52 |
| 容量（pu） | 1.20 | 1.00 | 1.17 | 1.00 |
| 出力係数 K（pu） | 1.16 | 1.00 | 1.13 | 1.00 |
| 体格 $D^2 \times L$（pu） | 1.03 | 1.00 | 1.04 | 1.00 |

pu: per unit

### 3.2 適用技術と検証

発電機の大容量化のため，開発機には様々な設計技術を適用した(図2)。例として以下を取り上げて具体的に述べる。また，60Hz 開発機の工場試験における各種測定結果との検証結果も述べる。

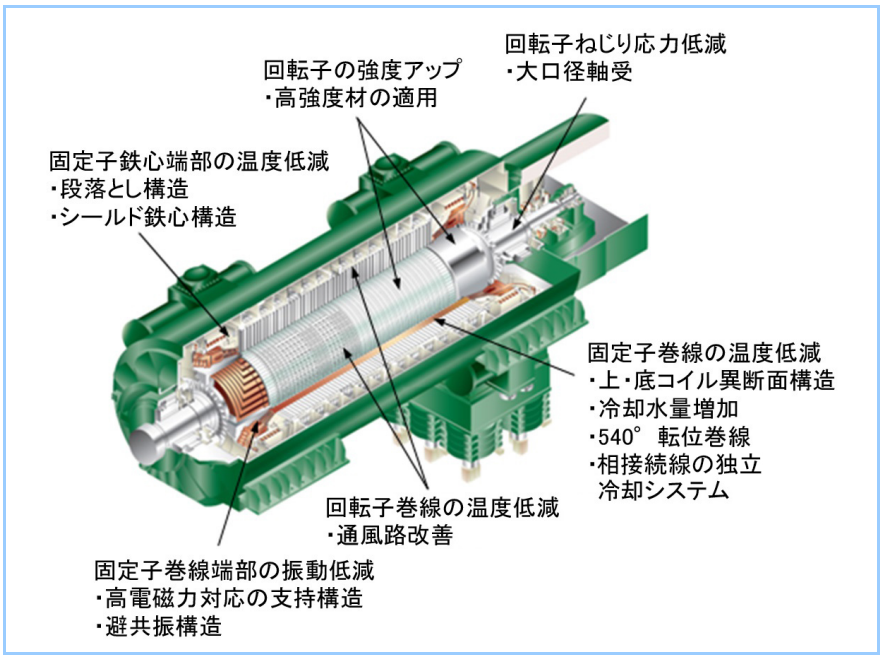


図2 1300MVA 級水直接冷却機への適用技術

(1) 冷却性能の向上

発電機内の温度が過度に上昇すると，巻線の絶縁劣化が進展して絶縁破壊を引き起こしたり，固定子巻線の冷却水が沸騰温度を超えて冷却不能となったりするため，発電機では各部の温度が制限値以内となるように設計している。

回転子巻線は，回転子と固定子の通風路を改善して，高温部を効果的に冷却する構造とした。この設計検討においては，ネットワーク解析(発電機内の通風や伝熱経路を回路網でモデル化する解析)による通風と温度の計算ツール[4]を用いて実施した。また，先行して製作した1000MVA 級の発電機に通風路の改善構造を適用し，設計予測通りに冷却性能が向上する効果を工場試験にて確認している。

固定子巻線は，上・底コイルの異断面構造を採用して発生損失のバランスをとり，冷却水量を増加して冷却性能を向上させた。この設計検討もネットワーク解析の計算ツールを用いている。

図3に工場の銅損試験時における回転子巻線の平均温度上昇の設計値と測定値の比較を示す。縦軸の温度上昇は単位法(pu:per unit)で表示している。設計値と測定値の差が6%と設計精度が高く，回転子巻線は設計通りに冷却されていることが確認できた。

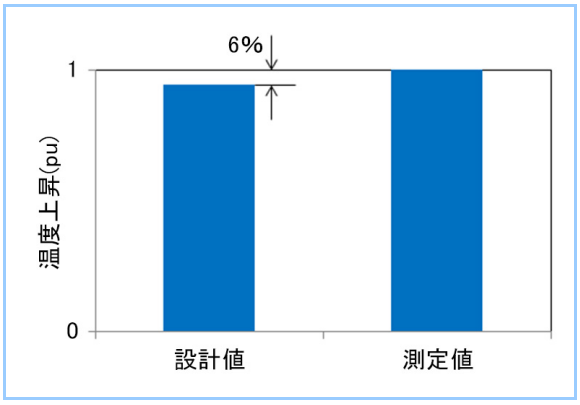


図3 回転子巻線の平均温度上昇の比較

(2) 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。先行機を含めて大容量機の固定子鉄心端部には，段落としやシールド鉄心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[2]。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[5]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4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5に工場の鉄損試験時における固定子鉄心端部の温度上昇の設計値と測定値の比較を示す。固定子鉄心端部の温度上昇の設計値と測定値の差は 12%であり，実用上十分な精度で予測できることを確認した。

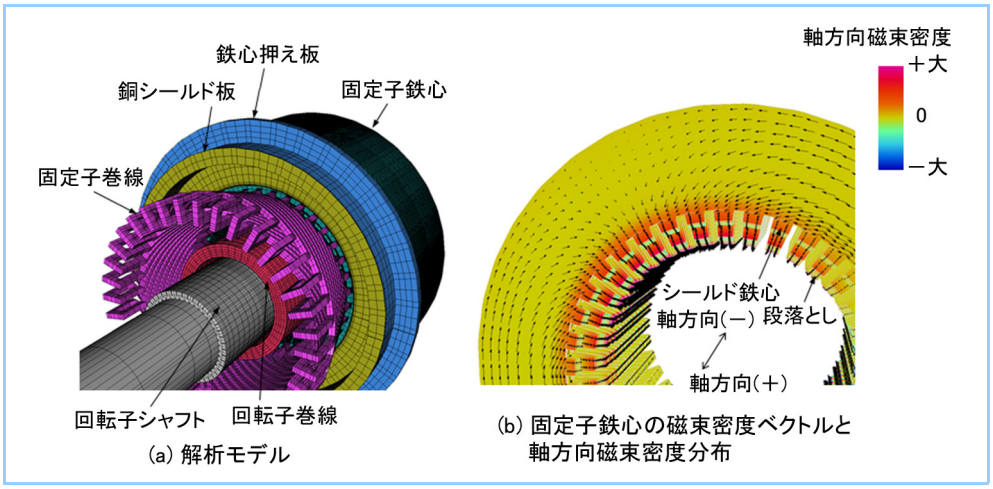


図4 固定子鉄心端部の磁界解析

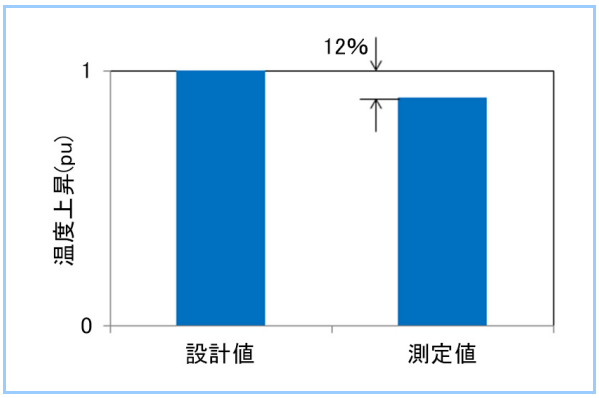


図5 固定子鉄心端部の温度上昇の比較

(3) 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，固定子巻線端部の支持を強固なものにするとともに，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，図6に示すような電磁力－振動応答解析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には固定子巻線端部の円環4節（1次モード）固有振動数の設計値と工場試験における測定値を示す。固有振動数は電磁振動周波数の 120Hz より十分離れており，また，設計値と測定値の差は5%で設計精度が高いことが示された。

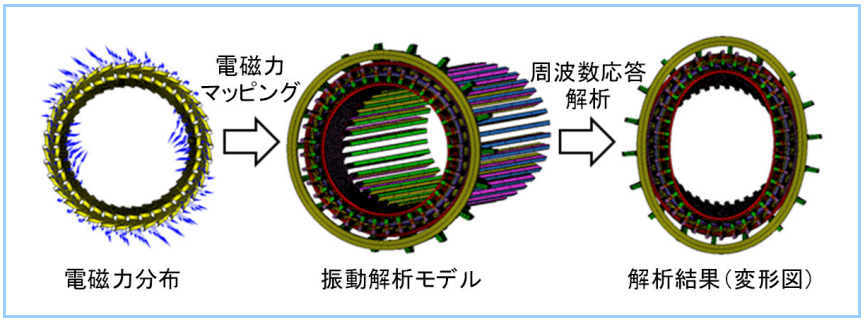


図6 固定子巻線端部の電磁力－振動応答解析

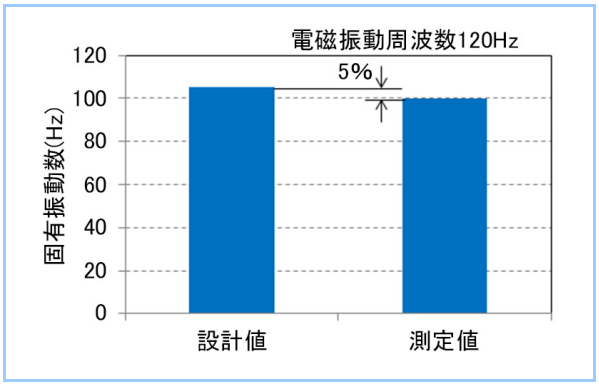


図7 固定子巻線端部の固有振動数の比較(円環4節1次モード)

### 3.3 工場回転試験での性能評価

60Hz 開発機は 2013 年 10 月に工場において組立てが完了し，性能検証のための回転試験を実施した。そして，各試験において，設計仕様を満足することを確認した。

特性試験においては，無負荷定格電圧時及び三相短絡定格電流時の界磁電流が，設計値と1%以内で一致した。また，効率や短絡比の設計精度が良いことも確認した。

温度試験においては，固定子巻線温度，固定子冷却水温度，回転子巻線平均温度，固定子鉄心端部，シールド鉄心の各部温度が制限値以下であることを確認した。

振動測定においては，各温度試験における軸振動，固定子巻線端部振動が制限値以下であることを確認した。

## 4. 900MVA 級水素間接冷却機の開発

図8には，MHPS 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。発電機の容量が増加するとともに，発電機内で発生する熱量が増加するため，小容量帯(～300MVA)を空気間接冷却方式，中容量帯(200～500MVA)を水素間接冷却方式，大容量帯(500～2000MVA)を水直接冷却方式で対応している。この中で水素間接冷却方式は，付帯設備として水直接冷却方式に必要な固定子冷却水装置やその配管系統が不要であり，運転性や保守性が向上するメリットがある。さらに，固定子巻線を水で冷却する中空銅線が不要となり，導体の断面積が増加できる分，損失が減るため効率が向上する。

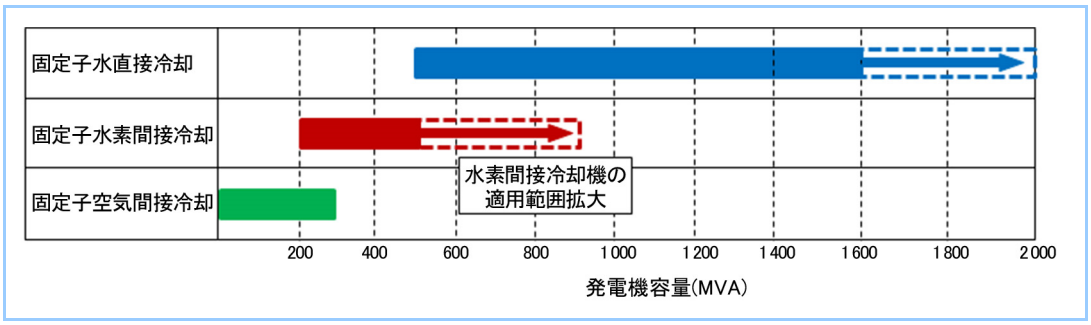


図8 固定子巻線の冷却方式と発電機容量の関係

MHPS では，2010 年に 500MVA 級水素間接冷却機を製作・出荷しており，これまで水直接冷却方式で対応していた500MVA以上の容量帯を水素間接冷却方式に置き換えるべく，水素間接冷却機の大容量化に取り組んでいる。ここでは900MVA級水素間接冷却機の開発状況について述べる。

### 4.1 設計方針

水素間接冷却方式は，水直接冷却方式より冷却性能が低いため，水素間接冷却機の大容量化には，冷却性能の強化と発生損失の低減が重要な課題となる。図9に 900MVA 開発機の主な適用技術を示す。水素間接冷却機の大容量化技術の中で，固定子巻線の冷却性能を強化する高熱通過絶縁システムがキー技術となるため，この技術は 4.2 節で紹介する。

先行機や 1300MVA 開発機で計算精度を検証した最新の設計ツールを用いて 900MVA 開発機の設計を実施した。この設計に当たっては，まず，固定子巻線に既存の絶縁を適用して，回転子，固定子の冷却強化と損失低減を図り，50Hz，60Hz とも 600MVA までの容量増加を図った。次いで，固定子巻線に高熱通過絶縁システムを適用して容量を増加するステップをとり，発電機仕様を満足し，各部の温度，振動が制限値以内である設計予測のもと 50Hz，60Hz それぞれの 900MVA 開発機の基本設計を完了した。表2に主な仕様を示す。900MVA 開発機は 99.0%～99.1%の高効率となる見通しである。

表2 900MVA 級水素間接冷却機の主な仕様

| | 開発機 | |
|---|---|---|
| | 50Hz | 60Hz |
| 容量(MVA) | 880 | 880 |
| 電圧(kV) | 20 | 21 |
| 電流(A) | 25 403 | 24 194 |
| 力率 | 0.85 | 0.85 |
| 回転数($min^{-1}$) | 3 000 | 3 600 |
| 水素ガス圧(MPa・g) | 0.52 | 0.52 |
| 効率(%) | 99.1 | 99.0 |

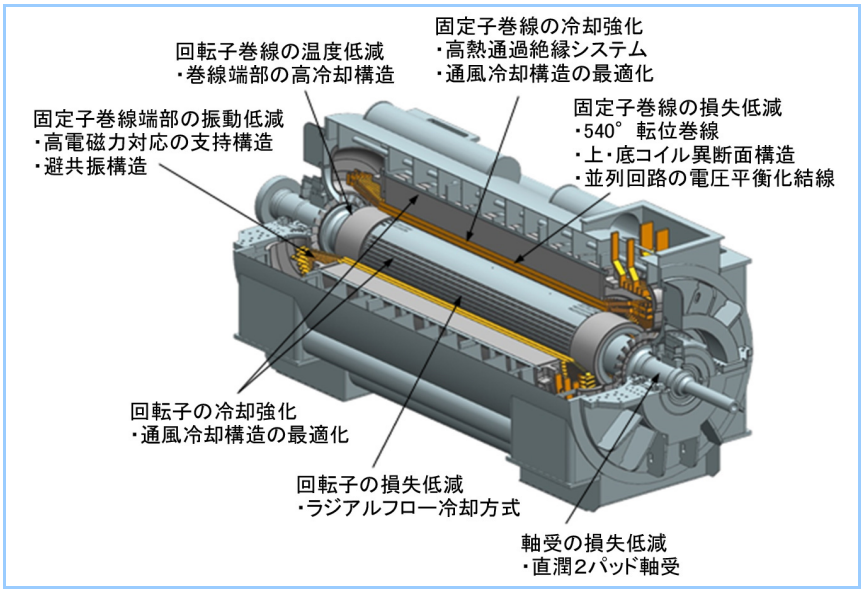


図9 900MVA 級水素間接冷却機への適用技術

### 4.2 高熱通過絶縁システム

固定子巻線は数十 kV の高電圧で運転されるため，高電圧に耐えうるように絶縁層で保護している。そして，絶縁層の熱伝導率は導体に比較して3桁程度小さいため，絶縁層の熱伝導率を向上することが冷却性能強化のポイントとなる。

MHPS では絶縁層に熱伝導の良いマイクロフィラーを添加して，絶縁層の熱伝導率を既存絶縁の約2倍となる高熱通過絶縁システムを開発した[6]。開発においては，物性値評価を始め，実

際にコイルを製作して，電気特性，機械特性，冷却特性，熱劣化，課電劣化，ヒートサイクルの各試験を実施して良好な結果を得て，絶縁システムとしての成立性を確認した。以下に具体的な試験結果の例を示す。

(1) 冷却特性

高熱通過絶縁システムの冷却特性の評価として，まず，絶縁層の熱伝導率を測定した。図 10 に示すように高熱通過絶縁層の熱伝導率は，既存絶縁層の約2倍であることを確認した。次いで，固定子巻線としての冷却性能を評価するため，図 11(a)に示す実機サイズのコイルに通電して発熱させたコイル全体をファンで冷却したときの導体部の温度を測定した。図 11(b)は高熱通過絶縁の既存絶縁の導体部との温度差を示す。熱伝導率の比を2倍としたときの計算予測温度差−18K に対して，測定温度差は固定子巻線の全長にわたり−20K 以下となり，固定子巻線として高熱通過絶縁システムが十分な冷却性能を有することを確認した。

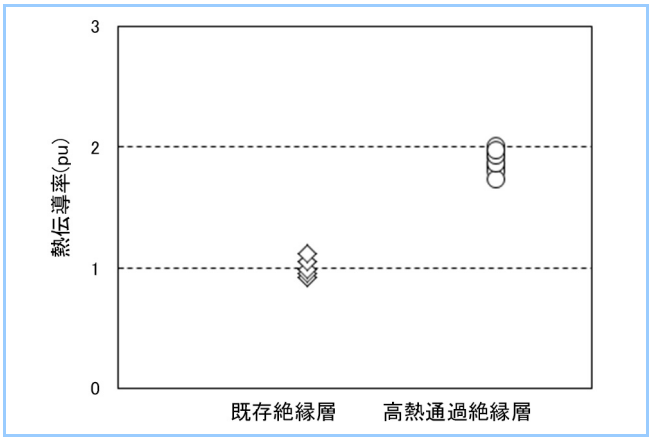


図 10 絶縁層の熱伝導率測定結果

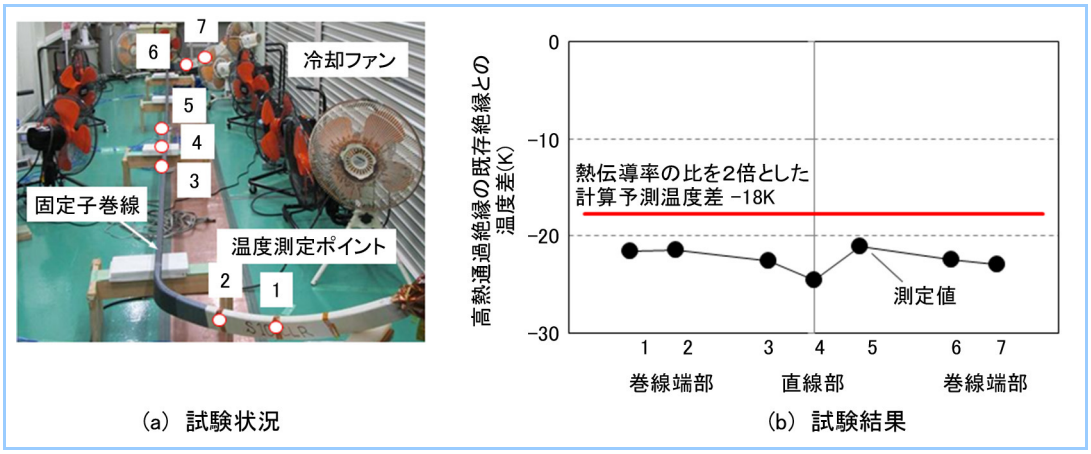


図 11 高熱通過絶縁システムの冷却性能評価試験

(2) 課電劣化試験

絶縁特性の評価として，IEEE 1553 と，欧州の認証機関として著名な KEMA の S13/S14 の規格にそれぞれ準拠した課電劣化試験を実施し，表3に示すように規格を満足する結果を得た。

表3 高熱通過絶縁システムの課電劣化試験結果

| 準拠した規格 | 試験仕様 | 試験結果 |
|---|---|---|
| IEEE 1553 | 電圧:2.17Un<br>時間:＞400 h<br>(絶縁破壊なし) | 電圧:2.17Un<br>時間:＞420 h<br>(絶縁破壊なし) |
| KEMA S13/S14 | 電圧:2Un<br>時間:＞1000 h<br>(絶縁破壊なし) | 電圧:2Un<br>時間:＞3100 h<br>(絶縁破壊なし) |

Un:定格電圧

### 4.3 実機検証の計画

要素試験により成立性を確認した，高熱通過絶縁システムを実機の固定子巻線に適用し，工場回転試験での性能評価により，900MVA 開発機の実機検証を行う計画である。

## 5. まとめ

タービン発電機の大容量化技術を適用した 1300MVA 級水直接冷却機を開発し，良好な工場試験結果を得た。適用した技術は工場試験で検証して信頼性を確認するとともに，設計ツールの予測精度を高めた。また，固定子巻線絶縁の熱伝導率を従来の2倍とする，高熱通過絶縁システムを完成させ，大容量化技術と合わせて 900MVA 級水素間接冷却機の基本設計を完了した。これらの結果，火力発電所向けの水直接冷却発電機では 1300MVA，水素間接冷却機では 880MVA までの大容量機の成立性を確認した。

今後は，900MVA 級水素間接冷却機の実機検証を進めるとともに，水素間接冷却機の容量を 1000MVA 級まで拡大し，タービン発電機のさらなる大容量化と高効率化に邁進する所存である。

## 参考文献

(1) 古賀智茂ほか，1,570MVA タービン発電機製作完成，電気学会回転機研究会資料 RM-03-26 (2003).
(2) 村松誠二郎ほか，中国華電集団公司・華電国際鄒県発電所 1,120MVA タービン発電機の完成，日立評論，Vol.89 No.02 (2007) p.18～21.
(3) Tanaka, T. et al., Development and Performance of 1GW Turbine Generator, Turbogeneratoren in Kraftwerken Technik-Instandhaltung-Schaden (2015).
(4) Hattori, K. et al., State-of-the-art Technology for Large Turbine Generators, CIGRE SC A1 2008 Panel Session (2008).
(5) 高橋和彦，連載講座 パワーマグネティックス 解析技術 I（有限要素法による解析），日本磁気学会，Vol.5 No.6 (2010), p.290～298.
(6) Tanaka, K. et al., Development of High Thermal Conductive Insulation System for Large Generator Stator Winding, Turbogeneratoren in Kraftwerken Technik-Instandhaltung-Schaden (2015).