

大容量水素間接冷却タービン発電機の開発とサービスへの展開

Development of Large Capacity Indirect Hydrogen-Cooled Turbine Generator and Latest Technology Applied to After Sales Service



高橋 和彦*¹
Kazuhiko Takahashi

小野田 満*¹
Mitsuru Onoda

田中 清輝*²
Kiyoteru Tanaka

村松 誠二郎*³
Seijiro Muramatsu

環境問題及び発電コストの観点から、高効率でメンテナンス性の良い水素間接冷却タービン発電機の大容量化が求められている。三菱日立パワーシステムズ(株)(MHPS)では、固定子巻線絶縁の熱通過率を従来の約3倍に向上させた高熱通過絶縁[®]を開発し、600MVA 級発電機による実機検証により、基本設計が完了している 900MVA 級水素間接冷却機の成立性を確認した。高熱通過絶縁[®]は、新設の発電機だけではなく、既設の発電機に対しても適用可能であり、出力増加や固定子巻線の過熱を抱える発電機の問題解決への貢献が期待できる。また、発電機のサービス分野に、新たに開発した技術の適用や、サービス特有の検査技術、監視技術の開発も推進している。

1. はじめに

近年、地球温暖化を抑えるために CO₂ 排出量を削減するとともに、電力を低コストで安定供給することが求められている。MHPS では高効率でメンテナンス性の良い、水素間接冷却機の大容量化に向けた開発を推進している⁽¹⁾。開発には、数億要素規模の流体解析や、電磁界-振動の連携解析などの各種設計ツールを用いた高冷却・低損失・低振動設計を実施した。また、固定子巻線の冷却性能を向上させた高熱通過絶縁[®]を開発し、今般、高熱通過絶縁[®]を実装した 600MVA 級発電機での実機回転試験が完了して、良好な試験結果が得られた。本稿では試験結果と合わせて、高熱通過絶縁[®]を既設の発電機に適用した事例も述べる。また、絶縁診断技術や固定子ウェッジ緩み診断技術など、既設の発電機のサービス向けの最新技術ラインアップを紹介する。

2. 水素間接冷却タービン発電機の大容量化技術

MHPS では、発電機の容量帯に応じて冷却方式を選定しており、従来、小容量帯(～300MVA)を空気冷却方式、中容量帯(200～500MVA)を水素間接冷却方式、大容量帯(500～1600MVA)を水直接冷却方式で対応してきた⁽¹⁾。水素間接冷却方式は、水直接冷却方式に比較して、固定子冷却水装置やその配管系統が不要となり、また、固定子巻線の水で冷却する中空銅線が不要で、導体の面積が増加できるため低損失になるなど、運転性、保守性、効率が向上するメリットがある。MHPS では、大規模解析や連携解析及び、計算精度を検証した設計ツール⁽¹⁾による高冷却・低損失・低振動設計と、固定子巻線の冷却性能を向上する高熱通過絶縁[®]の開発により、水素間接冷却機の大容量化に取り組んでいる。

*1 三菱日立パワーシステムズ株式会社ターボマシナリー本部発電機技術部 主席技師

*2 三菱日立パワーシステムズ株式会社サービス本部日立サービス部

*3 三菱日立パワーシステムズ株式会社サービス本部日立サービス部 主席技師 プロフェッショナルエンジニア(米国・機械)

図1に、大規模解析の例として、数億規模の要素を用いたファンから固定子巻線端部周りの流れ解析を示す。解析結果は最適構造の設計検討や、設計ツールの定数への反映に用いている。また、発電機の大容量化に伴い、固定子巻線端部の電磁力が増加するため、固定子巻線端部の支持を強固にする必要がある。支持構造の設計においては、固定子巻線端部の電磁力と振動応答の連携解析を適用している。図2に電磁力・応答連携解析の例を示す。電磁力解析は、固定子巻線端部と接続銅帯からなる接続線側を対象としており、固定子鉄心と回転子を解析モデルに含むことで発電機の様々な運転状態がシミュレーションできるようになっている。図2は定格負荷時の解析結果であり(ある瞬時の結果)、固定子巻線端部と接続銅帯の電磁力を1周期計算し、荷重として応答解析に入力した連携解析である。この解析結果を用いて、各部の振動値や応力値が設計制限以下となるように固定子巻線端部の支持構造を設計している。

これらの解析や設計ツールは、設計データを完全に得ることが困難な他社製発電機の修理や部品更新において、得られているデータと解析結果との比較評価により、詳細な設計仕様を推定し、これをもとにした性能改善の設計にも活用している。

高熱通過絶縁[®]の実機検証については、次章で詳細に述べる。

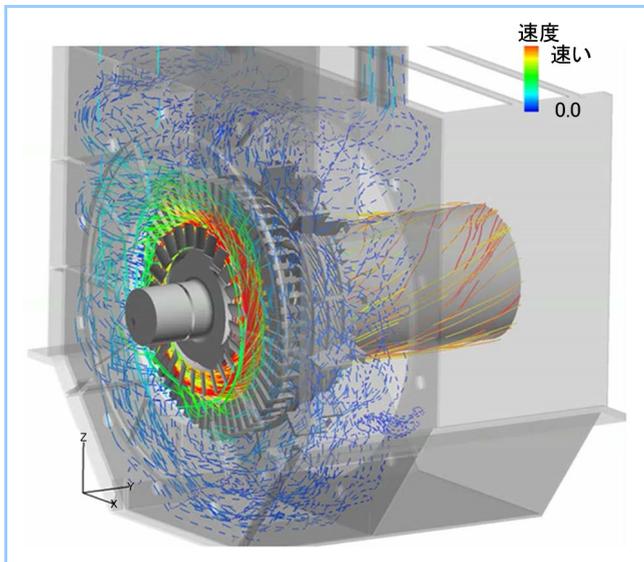


図1 ファンから固定子巻線端部周りの流れ(流線分布)

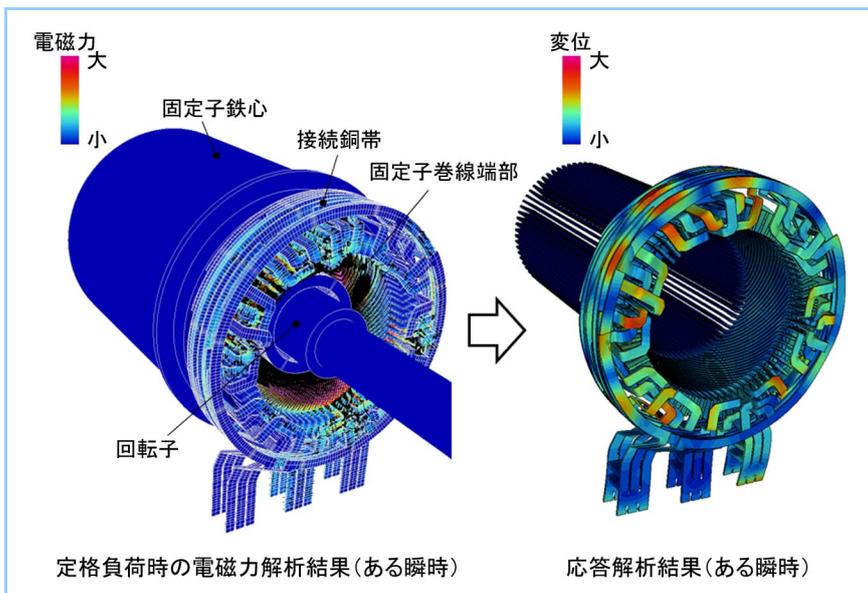


図2 固定子巻線端部の電磁力・応答連携解析

3. 600MVA 級発電機による高熱通過絶縁[®]の実機検証

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向上する高熱通過絶縁[®]がキー技術となる。ここでは、自社開発の高熱通過絶縁[®]を 600MVA 級タービン発電機に実装し、実機回転試験により冷却性能を検証した結果を示す。

固定子巻線は数十 kV の高電圧であり、巻線は絶縁層で保護されている。図3に示すように、水素間接冷却機の固定子巻線の素線導体で発生した熱は、絶縁層を介して水素ガスで冷却される。絶縁層の熱伝導率は素線導体の約 1000 分の1であり、絶縁層の熱伝導率を向上することが固定子巻線の冷却性能を強化することとなる。高熱通過絶縁[®]は、絶縁層に高熱伝導微小ファイバーを添加することで、絶縁層の熱通過率を従来の約3倍に向上させたものであり、これまでに熱的・電氣的・機械的な基礎特性の評価及び長期信頼性評価が完了し⁽²⁾、現在は実機適用の段階にある。ここで、熱通過率とは熱伝導率を固定子巻線の絶縁厚みで除した冷却性能を示す指標である。これは、絶縁の熱伝導率の向上だけでなく、電気絶縁特性が向上して絶縁厚みが薄くなれば、冷却性能はさらに向上するため、熱伝導率ではなく、熱通過率で冷却性能を評価するものである。

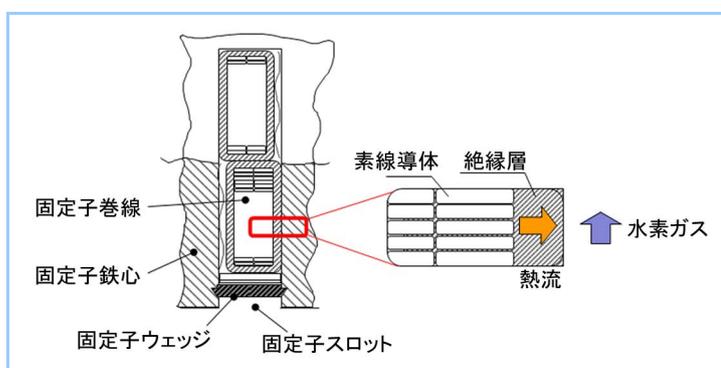


図3 固定子巻線断面

高熱通過絶縁[®]を大容量水素間接冷却発電機へ適用した場合の冷却性能を検証するため、600MVA 級タービン発電機に実装し、実機検証試験を実施した(図4)。実機検証試験に先立ち、ネットワーク解析⁽³⁾(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)により高熱通過絶縁[®]の冷却性能向上を予測した。図5に解析結果を実線と破線で示す。高熱通過絶縁[®]の固定子巻線の素線温度上昇は、従来絶縁に比較して約 40%低減できる設計予測である。実機検証試験により得られた固定子巻線の素線温度上昇実測値を図5の○で示す。温度上昇の実測値は、固定子巻線スロット内部及び固定子巻線端部のいずれも解析値と良く一致して、高熱通過絶縁[®]の固定子巻線が設計予測通りの冷却性能を有することを検証した。

以上より、高熱通過絶縁[®]による冷却性能向上を検証したことで、基本設計が完了している900MVA 級水素間接冷却機⁽¹⁾の成立性を確認した。



図4 高熱通過絶縁[®]の実機検証試験の状況

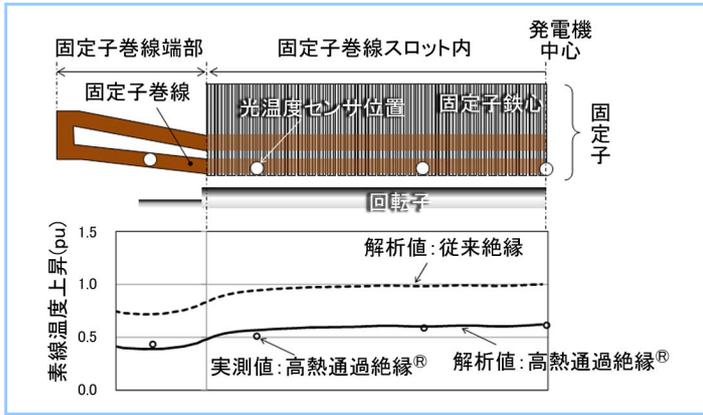


図5 固定子巻線素線温度の解析と実測結果

4. サービスへの展開

MHPS では、新設発電機で開発した最新技術を積極的に発電機のサービス分野に展開すると同時に、サービス特有の検査技術、監視技術を開発してきた。発電機サービスに適用可能な最新技術を表1に示す。本章では、開発した高熱通過絶縁[®]を既設発電機に適用して、固定子巻線の温度を低減した例をはじめ、表1*の項目を紹介する。

表1 発電機サービスの最新技術

| No. | 技術の種類 | 項目 |
|-----|-------------------------|---|
| 1 | 固定子巻線の温度低減, 信頼性向上 | *高熱通過絶縁 [®] |
| | | *固定子巻線構造最適化 |
| | | インナーコロナシールド(絶縁特性向上) |
| 2 | 絶縁余寿命の定量評価, 備品交換時期最適化技術 | *固定子巻線の絶縁診断, 余寿命定量評価 |
| | | *Digital Wedge Tapper [®] (固定子ウェッジ緩み診断) |
| 3 | 発電機大容量化対応 | 固定子巻線端部エルボのステンレス化 |
| | | 発電機端子の冷却強化構造 |
| | | 固定子巻線端部振動低減構造 |
| 4 | 他社製発電機修理技術 | *3D スキャン, 3D CAD による部品干渉及び取合い確認 |

4.1 固定子巻線の温度低減と信頼性向上技術

既設発電機の固定子巻線の温度を低減することで、絶縁寿命を延ばすことや、発電機の出力増加のメリットが見込める。そこで、既設の発電機においても、高熱通過絶縁[®]や、素線構成最適化を適用した固定子巻線に更新して温度低減を図っている。例えば、160MVA の水素間接冷却発電機では、高熱通過絶縁[®]及び素線構成最適化により、固定子巻線の素線温度を 40%程度低減できる見通しを得ている。素線構成最適化技術としては、スロット内の素線転位角度を 360° から 540° に変更することにより循環電流を低減すること⁽⁴⁾、素線肉厚を減らして渦電流を低減することが挙げられる。

高熱通過絶縁[®]の効果は、水素間接冷却機の方が空気冷却機よりも、顕著になる。これは、水素間接冷却機ではガス温度上昇が空気冷却機に対して小さく、固定子巻線温度上昇に対して主絶縁の熱抵抗が支配的なためである。既設の発電機には、リバースエンジニアリングの結果、素線温度が制限温度を超えていると推定されるものもある。本既設機の固定子巻線更新の例では空気冷却機でありながら、高熱通過絶縁[®]及び素線構成最適化技術の適用により、素線温度上昇を 25%低減し、温度が制限値以内となる見通しを得た。ネットワーク解析による温度検討結果を図6に示す。

本技術により、発電機を大幅に改造することなく、固定子巻線等の部品の入れ替えのみで、温度低減等の性能改善や信頼性の向上、出力増が可能となる。高熱通過絶縁[®]は160MVA水素間接冷却機以外にも、火力用の各種空気冷却機、水素間接冷却機への適用だけではなく、水力用にも適用している。

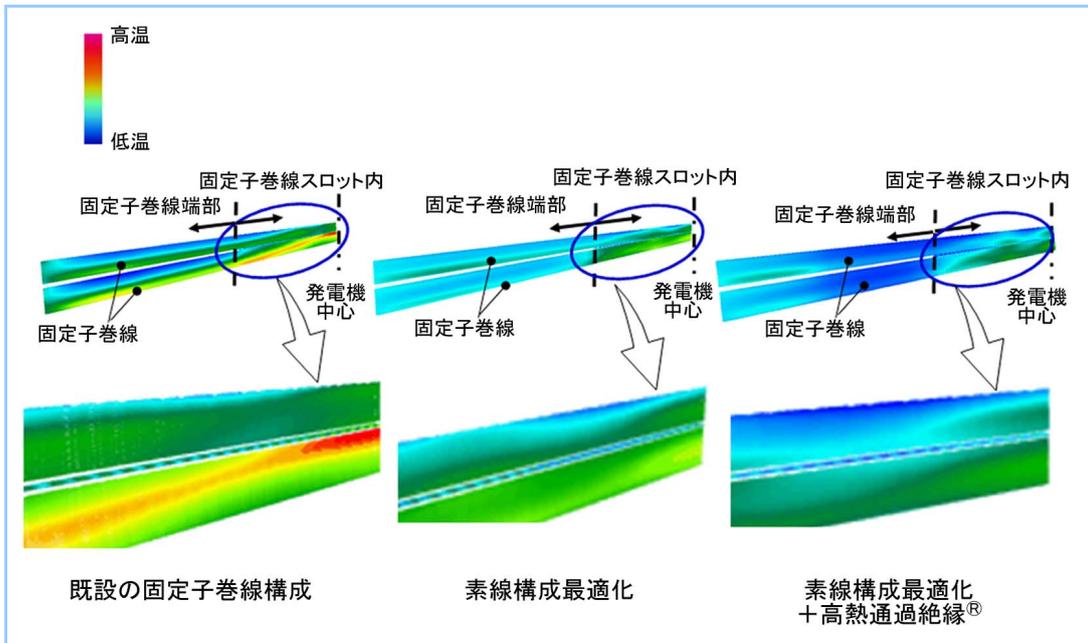


図6 固定子巻線温度の解析結果

4.2 固定子巻線絶縁の診断技術

発電機の固定子巻線の絶縁層は、高電圧、高温かつ巻線の電磁力等の振動が加わる環境で使用される。絶縁層が劣化して地絡すると発電機の停止に至ることから、絶縁層は発電機の信頼性を決定づける主要部品の1つであり、劣化診断、余寿命評価は、発電機の信頼性を評価する上で重要な技術である。また、固定子ウェッジは固定子巻線を固定子スロット内に強固に固定するために使用されている。固定子ウェッジの緩みは、絶縁層が摩耗して絶縁破壊を引き起すおそれがあるため、固定子巻線の絶縁層において固定子ウェッジの緩み診断も重要なものとなる。ここでは、固定子巻線絶縁の診断技術として、絶縁余寿命評価技術、固定子ウェッジの緩み診断技術について紹介する。

固定子巻線絶縁の余寿命を精度良く評価するため、加速劣化モデル巻線並びに実機抜き取り巻線の試験結果をデータベース化し、本データベースに基づく余寿命の定量評価手法を新たに開発した⁽⁵⁾。図7に示すように、本定量評価手法を用いた絶縁の残存耐力の推定値と試験による実測値の比較より、絶縁の余寿命評価が可能な精度であることを確認した。なお、開発した高熱通過絶縁®に関しても、本手法による絶縁余寿命評価は可能である。また、絶縁余寿命評価手法は既に実発電機に対して適用を開始している。

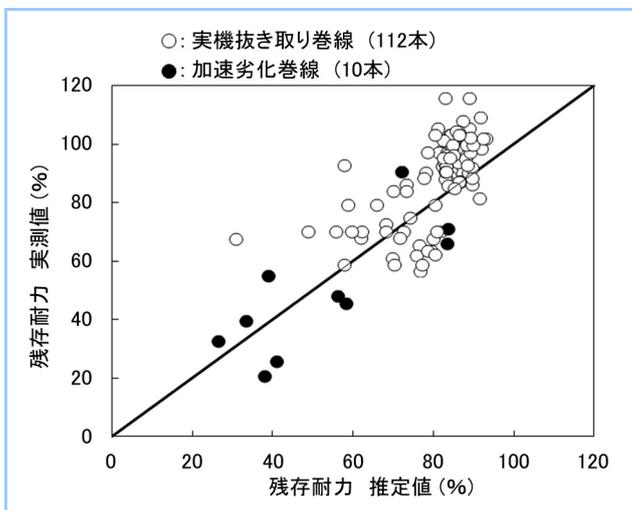


図7 絶縁の余寿命評価手法の推定値と実測値の比較

固定子ウェッジは、これまで作業者による官能検査(打音検査)にて緩み等の状態を評価してきたが、官能検査であるため、作業者による判定差が生じる可能性があり、また点検結果のデータベース化が困難であった。そこで、打音検査を機械化したウェッジ緩み診断装置(Digital Wedge Tapper[®])を開発した。図8に Digital Wedge Tapper[®]による固定子ウェッジ緩み診断と点検結果を示す。本装置でウェッジ緩み診断の定量評価を行うことで、作業者による判定のばらつきを解消でき、これまで課題であったデータベース化も容易となった。そのため、固定子ウェッジの交換時期を精度良く評価できるようになった。

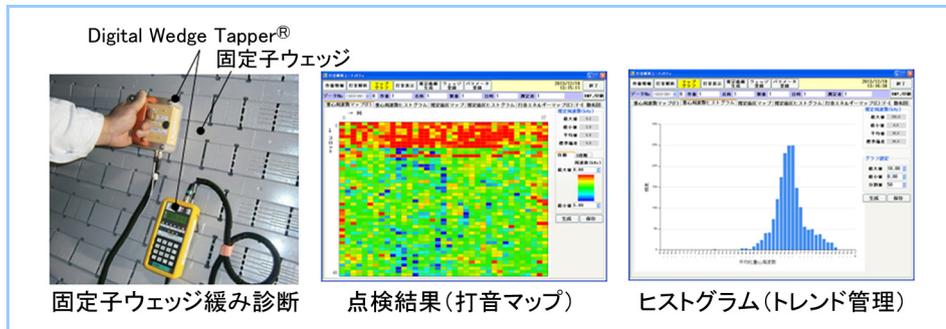


図8 固定子ウェッジ緩み診断(Digital Wedge Tapper[®])

4.3 他社製発電機修理技術

MHPSでは、技術的問題を抱えている他社製発電機の修理ニーズに応えられるよう、他社製発電機修理の技術開発に取り組んでいる。他社製発電機では、設計図面や修理に必要な情報が得られないケースが多く、特に既設機器との取合いが重要になる。そこで、現地にて 3D スキャンを用いた3次元測定を行い、設計の過程では 3D CAD にて3次元モデルを作成し、干渉や取合いの確認を行っている。対象の部品は、固定子巻線の他、接続線や固定子巻線端部サポートといった、形状の複雑な部品も、3次元モデルの活用により、精度の高い設計ができるようになり、既に納入、現地据え付けを実施した実績を持つ。図9に他社製発電機の固定子巻線巻更新の例を示す。また、MHPS では、固定子巻線等の部品であっても、既設の設計をリピーターするのではなく、発電機全体の電気設計、通風・温度設計、強度設計による総合的な評価で、その発電機に適した部品を設計・製造して供給している。

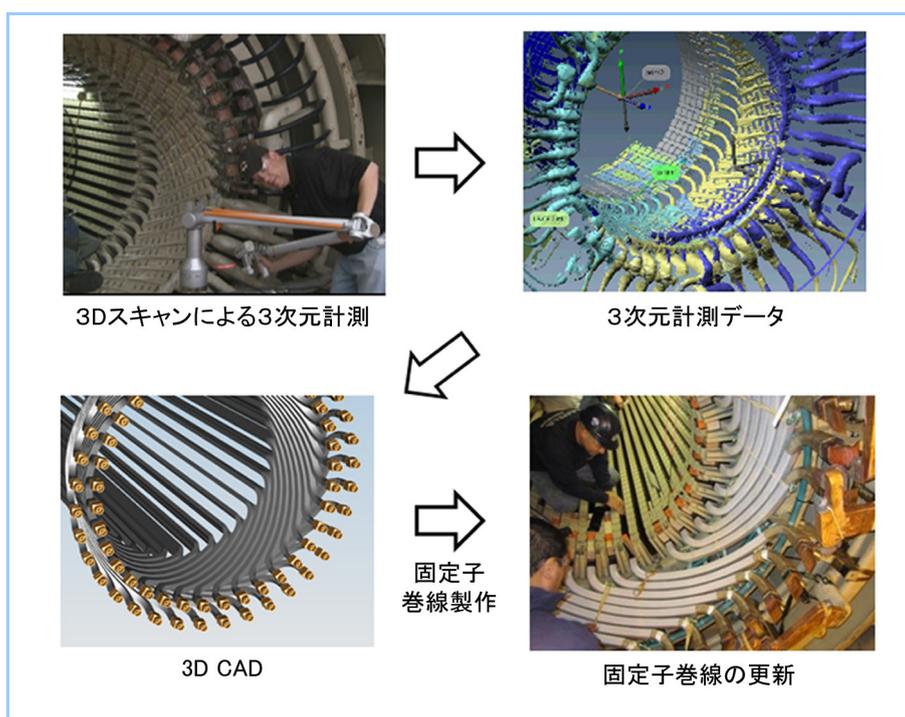


図9 他社製発電機の固定子巻線の更新

5. まとめ

高熱通過絶縁®を実装した 600MVA 級タービン発電機での温度検証試験により、基本設計が完了している 900MVA 級水素間接冷却発電機の成立性を確認した。また、開発した高熱通過絶縁®等の技術は既設の発電機に対しても適用を推進しており、固定子巻線等の部品の更新で、温度低減等の性能改善や信頼性向上、出力増が可能になった。その他の最新サービス技術についても、実機に適用を開始し、信頼性向上に貢献している。

参考文献

- (1) 佐竹恭典ほか, 火力発電所向けタービン発電機の大容量化技術, 三菱重工技報, Vol.52 No.2 (2015), p.44~51.
- (2) 小野田満ほか, 大容量タービン発電機固定子コイル用高熱通過絶縁システム, 平成 28 年電気学会基礎・材料・共通部門大会, 6A-p2-6, (2016).
- (3) Hattori, K. et al., State-of-the-art Technology for Large Turbine Generators, CIGRE SC A1 2008 Panel Session (2008).
- (4) 高橋和彦ほか, 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, RM-01-154 (2001).
- (5) Tanaka, K. et al., Prediction of Residual Breakdown Electrical Field Strength of Epoxy-Mica Paper Insulation Systems for the Stator Winding of Large Generators, IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.22 Issue 2 (2015) p.1118~1123