巻 頭 言

特集：発電機

電力系統の安定化に貢献するガスタービン発電機

Gas Turbine Generator to Contribute to Grid Stability

織戸 浩一*1
ORITO Koichi

我が国の火力・水力発電に用いられる発電機は，100年を超える長い歴史の中で高度経済成長期の電力需要の増大，省エネルギー化への国際的な要求の高まりなど，その時々の社会・経済の変化と共に技術的な発展を遂げてきた。特に，1980年代に大型ガスタービンが登場して以降，タービン発電機に対しては大容量化，高効率化への要求が高まり，当社では単機90万kWを超えるコンバインドサイクル用水素冷却発電機を実用化した。また，発電機周辺機器では，大容量化と共に適用が拡大するガスタービン起動装置として，パワーエレクトロニクス技術を応用した静止型起動装置を開発・実用化するなど，技術革新に応じた最適な電気品を供給することでガスタービン発電プラントの発展に貢献してきた。

一方，2012年に再生可能エネルギー（以下，再エネと記載）の普及・拡大を目的として，国内で固定価格買取制度（FIT）が導入されると，日本国内でも再エネの導入が進み，タービン発電機を取り巻く環境，要求事項は大きく変化している。再エネの内，風力発電や太陽光発電は気象現象により発電量が変動する。再エネの多くはインバータを介して電力系統に接続されるため，回転体の慣性力による周波数維持能力が無い。またインバータを介するため，事故時には再エネ電源から短絡電流が供給されない。大量の再エネ電源が系統に導入されると，急激な周波数変動の発生や系統事故時に短絡電流が流れないことにより既設保護リレーで系統事故が検出できない恐れがある。このため，より多くの再エネを受け入れ，かつ系統の安定運用を維持するためには大型発電設備の慣性力による系統周波数維持，短絡電流供給が重要となる。これに加え，出力調整能力の高い火力発電設備に対し起動時間の短縮，出力変化率などの更なる能力向上が求められている。

系統内の異なる特性を持つ複数の火力設備をどのように最適運用するかも課題である。天候任せの再エネによる電力発生量と時々刻々変化する電力需給を天候データから予測し，想定される火力発電システムの総出力計画を立てるとともに，その変動具合に応じて，どの設備に出力を割り当てるか，経済性を考慮した運用計画を立てることが必要とされる。加えて発電設備の最適運用や稼働率向上による収益拡大，燃料コストに連動した効率運転による発電原価の削減等の設備運用をサポートする高度化システムも付加していく必要がある。また，国内では2020年の発送電の法的分離，電力市場における需給調整市場，容量市場の創設など電力システム改革も計画されている。これらを背景に，電力設備の最適運用や従来の発電システムに対する負荷変動対応力の強化に対する要求は，今後増してくるものと予想され，さらに非常時への対応として，緊急電源の準備や電力貯蔵などの手段についても，想定されるシナリオへの準備が必要とされる。

従来，異系統接続に用いられてきた直流送電技術は洋上風力の拡大に伴って大きく進歩しており，蓄電池も大容量化することで再エネの変動対策として実用化が進んでいる。電力系統の安定運用ならびにCO_2削減を達成するためには，これら大容量蓄電池システム等の高度化したパワーエレクトロニクス技術と従来の火力発電技術の融合が重要であり，火力発電システムによる変動対応能力強化と，再エネを含む電力系統全体の安定かつ効率的な運用をサポートするシステムの構築が必要である。

このような市場を取り巻く環境変化のなか，発電機や主回路設備，監視制御システムなどの電気品に加え，情報システムを活用した先進のシステム運用技術が開発され，安定した電力供給，省力化に貢献してきた。当社は，これらの蓄積された技術を基に，電力インフラの強靭化に寄与すべく，ベストミックスを目指して開発した発電，変電，電力流通を支える機器やシステムの提供を進めている。これにより，従来の火力発電と再エネの融合をより強固なものとし，持続可能な社会の実現，いつもある安全・安心・快適な社会の実現に貢献していきたい。

原稿受付　2019年12月5日

＊1　三菱電機㈱ 常務執行役員，電力・産業システム事業本部長
〒100-8310　千代田区丸の内二丁目7番3号
E-mail: Orito.Koichi@cb.MitsubishiElectric.co.jp

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

論説◆解説

特集：発電機

大型・中型ガスタービン用発電機の開発と異常予兆検知・診断技術

Development of Large and Middle-sized Gas Turbine Generator and Technology of Detection and Diagnosis of Abnormal Portent

高橋 和彦*1 TAKAHASHI Kazuhiko　工藤 和宏*1 KUDO Kazuhiro　中村 洋子*1 NAKAMURA Yoko　小椋 裕*1 OGURA Yu

柿本 忠昭*1 KAKIMOTO Tadaaki　水野 嵩寛*1 MIZUNO Takahiro　栗原 瑶実*1 KURIHARA Tamami　村山 博英*1 MURAYAMA Hirohide

キーワード：タービン発電機，高効率，ガスタービン，水素間接冷却，空気冷却，異常予兆検知・診断
Key Words：Turbine Generator, High Efficiency, Gas Turbine, Indirect Hydrogen Cooled, Air Cooled, Detection and Diagnosis of Abnormal Portent

1．緒言

低炭素・脱炭素社会の実現に向け，再生可能エネルギーの急速な拡大や電力システム最適化への取り組みがなされている。こうした中，ガスタービン・コンバインドサイクル発電プラント（GTCC）をはじめとする火力発電における更なる高効率化が求められている。三菱日立パワーシステムズ（MHPS）では，タービン発電機の発電効率を向上する技術開発を進めている。これまで水直接冷却機で対応していた容量帯において，発電効率が向上する水素間接冷却機に置き換えるべく，固定子巻線の絶縁層の熱通過率を約3倍に高めた高熱通過絶縁®（HHT®）の開発や，多目的最適化計算による発電機の最適設計，および発電機各部の低損失化技術の開発を進め，200MW～800MW級の中型から大型のガスタービン出力帯に対応した水素間接冷却機のラインアップ化を行ってきた[1]。

本稿では，開発技術を適用した500MVA級水素間接冷却機を設計・製作し，工場回転試験にて99.14%（遅れ力率0.8）の高効率を達成した結果と，現在詳細設計の段階にある，一軸GTCC向けCGS配列（ガスタービン－発電機－蒸気タービンの配列）の800MVA級水素間接冷却機の開発状況を述べる。また，再生可能エネルギーの台頭により，ピーク電源として急速起動と負荷変動追従のできるガスタービンの需要が高まっており，そのソリューションとして，MHPS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機を志向する場合があり，ここでは，ガスタービン向け350MVA級の大容量空気冷却機の設計・製作状況も述べる。

原稿受付　2019年11月18日
＊1　三菱日立パワーシステムズ㈱・発電機技術部
〒317-8585　日立市幸町3－1－1
E-mail: kazuhiko1_takahashi@mhps.com

MHPSでは，火力発電プラント機器の開発，設計，製作，建設，試運転からサービスまでのトータルソリューションを展開している。加えて，火力発電プラントの最適運用を目指して開発された分析プラットフォームを含むデジタル総合ソリューション，MHPS-TOMONI®[2]も提供している。ここでは，MHPS-TOMONI®のサービスコンテンツの一部である発電機異常予兆検知アプリケーションや，実運転データに基づく物理シミュレーションについても紹介する。

2．タービン発電機

Fig. 1にタービン発電機の外観図を示す。タービン発電機は回転子と固定子から構成され，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。タービン発電機では，電磁気，熱，通風冷却，振動などの現象が連成しているため，これらの相互作用を考慮して設計する。また，発電機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，空気冷却，水素間接冷却，水直接冷却が開発され，タービン発電機の大容量化が図られてきた。

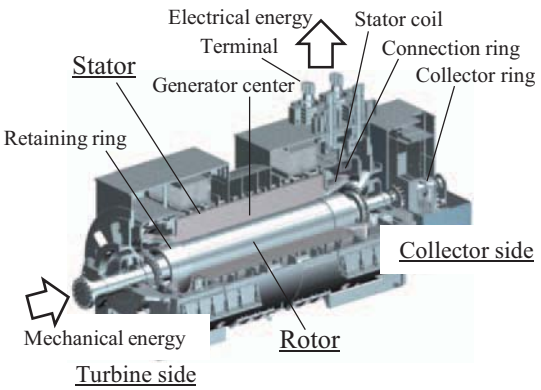


Fig. 1　Structure of turbine generator

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

3．水素間接冷却機の高効率化と実機検証[(1),(3)]

3.1　高熱通過絶縁®

タービン発電機の水直接冷却方式は，固定子巻線の中空導体に冷却水を流して固定子巻線が発生する熱を冷却するものであり，水素間接冷却方式に比較して冷却能力が高く，大容量発電機の固定子冷却方式として採用されている。一方，水素間接冷却方式は，水直接冷却機に必要な中空導体が不要で，導体の面積が増加できるため低損失・高効率となる。これまで水直接冷却方式で対応してきた容量帯に水素間接冷却方式で対応するため，固定子巻線の冷却性能を向上する高熱通過絶縁®を開発した。

固定子巻線は数10kVの高電圧に耐えうるように絶縁層で保護している（Fig. 2）。絶縁層の熱伝導率は素線導体の約1000分の１であり，高熱通過絶縁®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通過率（熱伝導率を絶縁層の厚みで除した冷却性能を示す指標）を従来の約３倍に高めて固定子巻線の冷却性能を向上させたものである。

600MVA級タービン発電機に高熱通過絶縁®を実装して冷却性能を実機検証した。Fig. 3に発電機軸中央部（Fig. 1参照）の固定子巻線の素線導体の温度上昇について，解析値と光温度センサによる実測値を示す。解析値は大規模ネットワーク解析による通風と温度の設計ツールを用いた[(4)]。先ず，解析により従来絶縁と高熱通過絶縁®の温度上昇を比較した。Fig. 3の解析結果より，素線導体の温度上昇は，高熱通過絶縁®の適用により従来絶縁に比較して約40%低減できる予測となった。そして，高熱通過絶縁®の実測値と解析値は良く一致して，設計予測通りの冷却性能を有することを検証した。

高熱通過絶縁®は，新設の発電機だけではなく，既設の発電機に適用した場合，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，ガスタービンの出力アップにも対応が可能となり，既設の発電機への適用も進めている。

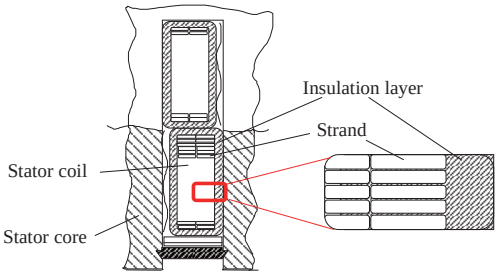


Fig. 2　Cross section of stator coil

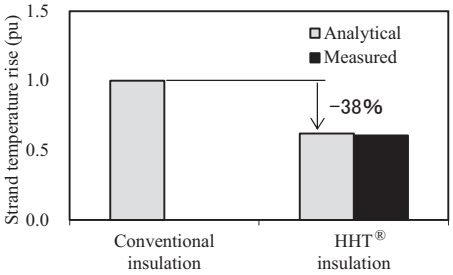


Fig. 3　Analysis of stator coil strand temperature rise and measurement results

3.2　高効率化技術

タービン発電機の高効率化には，発電機各部で発生する損失を低減することが必要となる。発電機の損失は大きく分けて，機械損，鉄損，固定子銅損，界磁銅損，漂遊負荷損からなる。これらの損失は，発電機の電磁気的特性，冷却・温度，機械強度，電気絶縁の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。例えば，水素ガス圧力を低減すると機械損を低減することができるが，熱伝達や熱容量が低下するため，発電機各部の温度上昇につながる。また，銅損の低減のために巻線の断面積を増加することは，重量やコストの増加を招く要因ともなる。

そこで，発電機の基本特性，効率，冷却，機械強度，などの技術評価に加え，材料費や製造工数などのコスト評価も同時に計算するプログラムを開発し，大規模なパラメータサーベイの実施と，遺伝的アルゴリズムと組み合わせた多目的最適化計算システムを構築した。このシステムにより，発電機の効率が局所最適に陥ることなく，全体最適の視点から高効率設計の選定が可能となる。

多目的最適化計算で基本設計を決めた後，発電機各部の通風冷却，温度，機械強度，振動などの詳細設計評価については，大規模なネットワーク解析や三次元FEM解析を実施して，それぞれ制限値以内になるよう各部の構造や寸法・諸元を設計する。

漂遊負荷損は，全損失から機械損，鉄損，固定子銅損，界磁銅損を差し引いた残りの損失であり，巻線の交流磁界により発電機各部の金属部分に発生する（鉄損は除く）。多目的最適化計算で評価できない漂遊負荷損は，発生部位毎に三次元FEMによる損失解析で評価し，損失低減構造を検討する。

3.3　500MVA級開発機の設計と実機検証

500MVA級開発機の主な仕様を先行機と比較してTable 1に示す。機械損低減を目的に先行機より水素ガス圧力を大きく低減している点が特徴である。

500MVA級開発機は，高効率化技術の適用と，大規模なネットワーク解析や三次元FEM解析による発電機各部の詳細設計評価を実施した。

漂遊負荷損低減の一例として，固定子巻線と発電機端子を接続する亘線（Connection Ring, Fig. 1参照）の三次元FEMによる損失解析結果をFig. 4に示す。亘線の損失分布には偏りが生じている様子が分かる。亘線には50Hzの交流電流を通電していて，交流電流が発生する交流磁界により，損失分布に偏りが生じる。これは表皮効果や近接効果と呼ばれる現象で，損失分布が偏ることで均一な分布より損失が増加し，この増加分が漂遊負荷損となる。亘線はライン側とニュートラル側のそれぞれ

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

Table 1 Comparison of main specifications between 500MVA class developed generator and preceding generator

	Preceding generator	Developed generator
Capacity（MVA）	473	474
Voltage（kV）	19	19
Current（A）	14,373	14,404
Power factor	0.8（Lagging）	0.8（Lagging）
Frequency（Hz）	50	50
Rotating speed（min^{-1}）	3,000	3,000
H2 Pressure（MPa・g）	0.41	0.19
Standard	IEC 60034-1, 60034-3	IEC 60034-1, 60034-3
Insulation system class	155（F）	155（F）
Thermal class	130（B）	130（B）

三相分で６種類の電流位相があり，電流位相の異なる亘線の配置を入れ替えて漂遊負荷損を低減した。亘線の接続ルートの見直しも含め，亘線の漂遊負荷損と銅損の合計値を先行機から約30%低減した。そして，亘線の温度解析評価を実施し，水素ガス圧力を低減した開発機の亘線温度が制限値以内であることを確認している。

開発機の組立後，性能検証のための回転試験を実施した。Fig. 5に回転試験時の組立状況を示す。回転試験では，無負荷飽和特性や三相短絡特性などの基本的特性や，各種リアクタンスや時定数などの発電機定数についても実測を行い，仕様および規格の要求を満足するだけでなく，設計予測精度の高さを確認した。

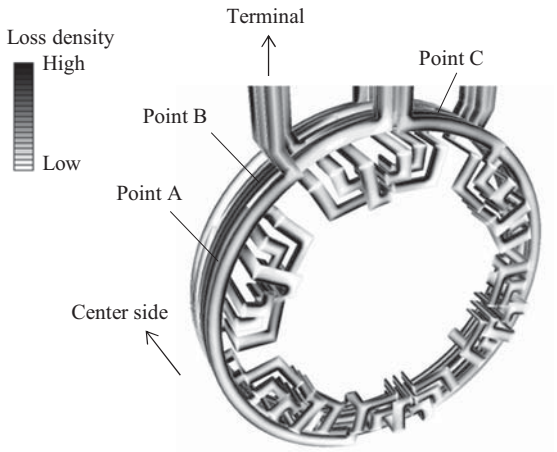


Fig. 4 Loss density distribution of connection ring（3D FEM）

Fig. 5 Shop test of 500MVA class generator

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。Fig. 6に先行機との全損失比較を示す。先行機に対して損失は88%に低減し，効率において先行機よりも0.1ポイント以上向上し，力率0.8（遅れ）という条件にも関わらず，99.14%という非常に高い効率を達成した。実機検証により，開発技術の有効性を確認するとともに，効率についても設計値と非常に良く一致した。

その他の検証として，温度センサや振動センサを発電機内の各部に設置して，実測と健全性の評価を行った。評価の例として，固定子巻線の温度上昇と，亘線の温度の実測値と解析値の比較をそれぞれFig. 7とFig. 8に示す。Fig. 7の固定子巻線の温度上昇は軸方向の分布も含めて実測値と解析値は良く一致しており，開発機の健全性とともに設計予測精度が高いことを確認した。Fig. 8

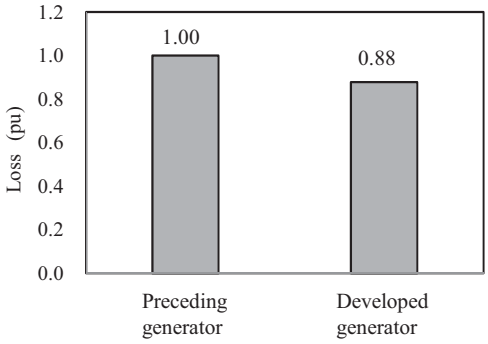


Fig. 6 Total loss of 500MVA class generator

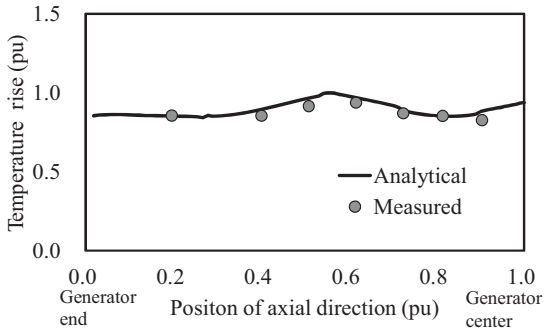


Fig. 7 Stator coil temperature rise of 500MVA class generator

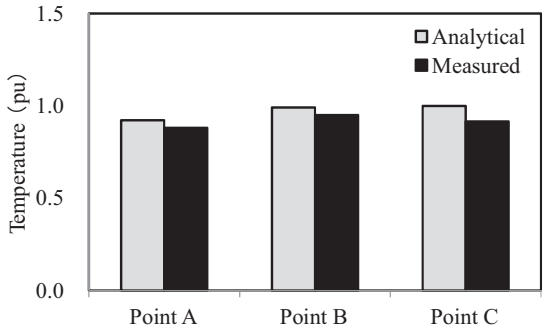


Fig. 8 Connection ring temperature of 500MVA class generator

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

の亘線の温度は，設計時に温度が高いと評価された3か所（Fig. 4のpoint A ～ C）に温度センサを設置して温度を実測した。亘線の各部の温度は実測値と解析値で良く一致し，亘線の損失と温度についても設計予測精度が高いことを確認した。

4．一軸GTCC向けCGS配列の800MVA級水素間接冷却機の開発

4.1　800MVA級機の設計方針

800MVA級機の主な仕様をTable 2に示す。基本設計はラインアップモデルを適用しているが，発電機がタービン側とコレクタ側の両端から駆動される軸構成であることが大きな特徴であり，この部分については特殊仕様として開発を進めている。また，800MVA級機は，水素間接冷却機としては大容量の帯域であり，冷却性能向上のため高熱通過絶縁®を適用している。

Table 2　Main specifications of 800MVA class generator

Capacity（MVA）	758
Voltage（kV）	22
Current（A）	19,892
Power factor	0.85（Lagging）
Frequency（Hz）	60
Rotating speed（min^{-1}）	3,600
H2 Pressure（MPa・g）	0.29
Insulation system class	155（F）
Thermal class	130（B）

4.2　CGS配列の特徴

Fig. 9 (a)に示すように，大型の一軸GTCCは，ガスタービン(C)－蒸気タービン(S)－発電機(G)（CSG配列）の順に軸が構成され，発電機はタービン側からの駆動となっていた。しかし，この軸構成では，蒸気タービンが常時ロータ軸に繋がる構成であるため，起動時間が長くなる課題があった。

CGS配列はFig. 9 (b)に示すように，ガスタービン(C)－発電機(G)－蒸気タービン(S)の順に軸を構成するものであり，発電機と蒸気タービンの間にクラッチを設置して，起動時には蒸気タービンを軸から切り離すことで，短時間の起動が可能となる。一方，発電機はタービン側でガスタービンから駆動され，コレクタ側から蒸気タービンで駆動される両端からの駆動となる。そのため，発電機は，蒸気タービンからの定常トルクや短絡事故時の過渡トルクに十分耐えうるように，コレクタリング軸廻りの強度設計を実施した。

4.3　コレクタリング装置の実機大試験

CGS配列対応のコレクタリング軸廻りの設計の結果，コレクタリングが大径となり，周速が実績の約1.3倍となった。コレクタリングは回転子に焼き嵌めされており，固定子側のブラシと摺動して直流電流を発電機外部から

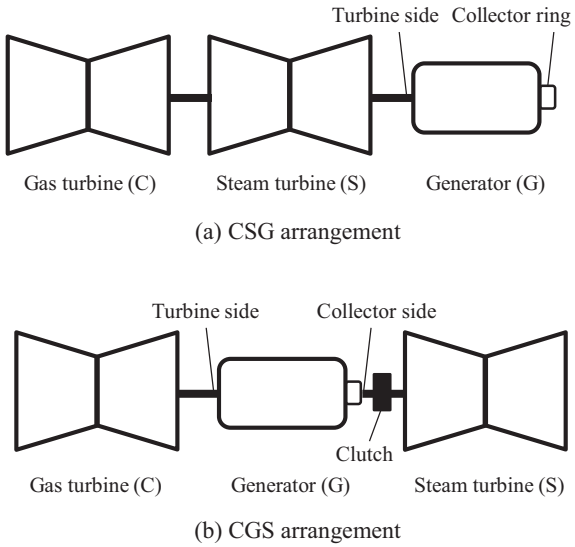


Fig. 9　Arrangement of single shaft GTCC

回転子側に通電する役割を担う。コレクタリングの周速が速くなると，コレクタリングとブラシの摺動状態の変化により，ブラシの異常摩耗やコレクタリングとブラシ間の火花の発生などのリスクが高まることが懸念される。これらのリスクへの対応策を机上だけで検討することは難しく，Fig. 10に示す実機大の試験装置を製作して，ブラシおよびコレクタリングの設計諸元などの条件を変えた試験を実施した。そして，試験結果を設計仕様に反映することで，CGS配列対応のコレクタリング装置の信頼性を高めている。

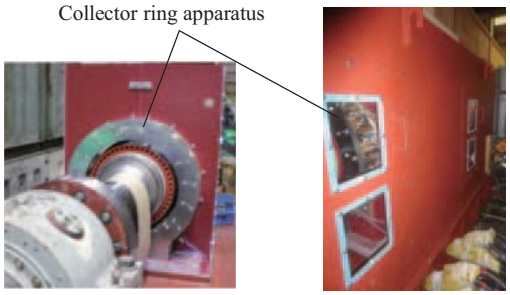


Fig. 10　Actual sized collector ring apparatus

5．350MVA級大容量空気冷却機の開発

5.1　350MVA級機の設計方針

空気冷却機は空気を冷媒としているため，水素と比較して密度と粘性が高く，冷却性能が水素より劣る。一方，空気冷却機は，運転保守が容易で補機類が簡素化できるメリットがあり，大容量空気冷却機の需要が高まっている。空気冷却機の大容量化には冷却性能の向上と，発電機各部で発生する損失を低減することがポイントとなる。

MHPSでは，空気冷却機の冷却性能が向上するインナクーラ冷却方式を開発し[5],[6]，1998年から実機に適用して多くの実績を積み重ねてきた。350MVA級機にもインナクーラ冷却方式を採用して冷却性能の向上を図った。

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

また，350MVA級機の損失低減に対して，水素間接冷却機の高効率化技術を適用した。具体的には，多目的最適化による発電機の基本設計や，漂遊負荷損の低減技術である。そして，水素間接冷却機と同様に，大規模ネットワーク解析や三次元FEMにより，各部の通風冷却，温度，機械強度，振動などの詳細設計評価を実施して，制限値以内となるように設計した。

350MVA級機の主な仕様をTable 3に示す。

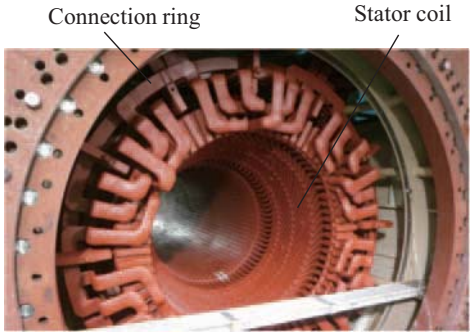
Table 3 Main specifications of 350MVA class air-cooled generator

Capacity（MVA）	349
Voltage（kV）	21
Current（A）	9,595
Power factor	0.85（Lagging）
Frequency（Hz）	60
Rotating speed（min^{-1}）	3,600
Insulation system class	155（F）
Thermal class	130（B）

5.2　350MVA級機の製作・組立状況

350MVA級機は工場回転試験に向けて，製作・組立中である。Fig. 11 (a)に回転子，Fig. 11 (b)に固定子巻線の製作・組立状況を示す。

(a) Rotor



(b) Stator

Fig. 11　Assembly of 350MVA class generator

6．発電機の異常予兆検知技術と物理シミュレーション

6.1　異常予兆検知技術/アプリケーション

近年，あらゆる産業分野でのデジタル化が進んでおり，火力発電プラント分野でもデジタルテクノロジーの活用が進んでいる。このような背景において，MHPSでは，ICT（Information and Communication Technology）活用を通して，火力発電プラントの価値向上（稼働率向上，計画外停止の未然防止，運用最適化 等）に寄与すべく，ICTプラットフォーム，並びに，各種アプリケーション/サービスをMHPS-TOMONI®として提供している。火力発電プラントの稼働率向上や計画外停止の未然防止には，発電機の異常予兆検知が有効であり，不具合発生・進展前の早期対応に貢献できる。

MHPSでは，発電機に設置された各種センサの信号を用い，発電機の技術的知見に基づいた物理・統計モデル等による運転データ予測及び分析を行っており，異常予兆を早期かつ精度良く検出することが可能となっている。Fig. 12は異常予兆検知のフローを示しており，リアルタイムでの異常予兆検知も可能である。

Fig. 13は統計モデル，Fig. 14は物理モデルによる異常予兆検知アプリケーションで分析した結果である。運転状態が正常時と相違しているかどうかを判定することで，異常予兆を検知している。統計モデルは統計学的手法にて運転データを評価し，物理モデルは各センサデータから予測値を算出して，それぞれ異常予兆の検知を行う。

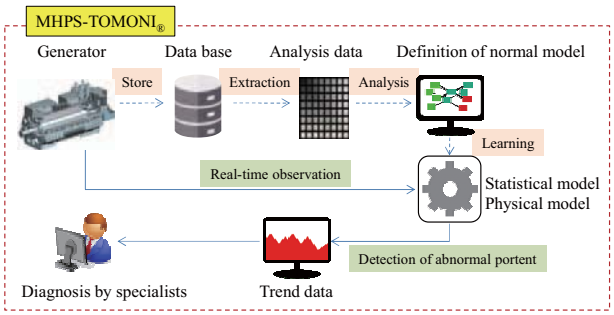


Fig. 12　Detection of abnormal portent flow

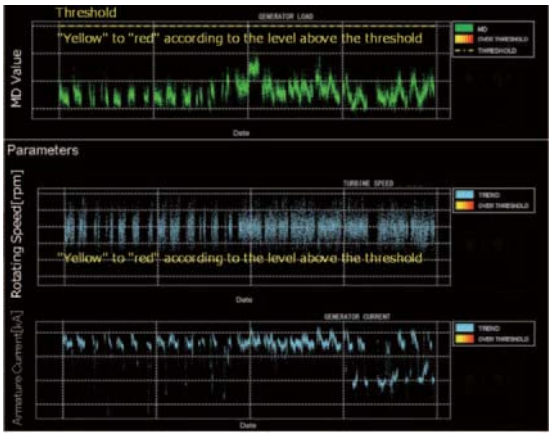


Fig. 13　Detection of abnormal portent with statistical model

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

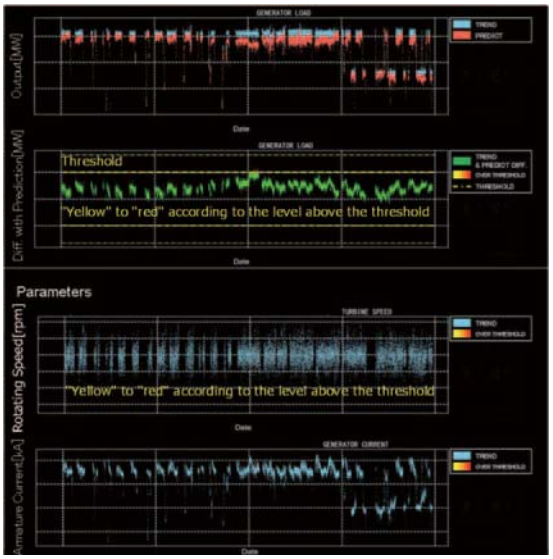


Fig. 14　Detection of abnormal portent with physical model

物理・統計モデルによる発電機異常予兆検知技術（特許出願中）は，再生可能エネルギーの台頭による火力発電プラントの運用の変化を踏まえ，定格出力時のみだけではなく，部分負荷時や負荷変動時にも対応できるように開発しており，全運転状態での異常予兆検知が可能である。

発電機異常予兆検知アプリケーションはMHPS-TOMONI®のサービスコンテンツの一部となっており，MHPS製発電機のみならず，他社製発電機にも適用可能であり，自社製/他社製共に，発電機異常予兆検知サービスを提供中である。

6.2　物理モデルを用いた機内温度シミュレーション

従来の寿命評価や健全性診断では，設計温度や各種センサデータを用いて評価するのが一般的であった。例えば，固定子巻線の絶縁材の評価に必要な素線導体の温度は，通常測定が難しいデータであり，固定子巻線の表面に設置したセンサの温度データからマージンを持たせて絶縁材の評価をする必要があった。

MHPSでは，Fig. 15に示す実運転データに基づく物理シミュレーション（固定子・回転子巻線温度予測モデル）を用いて，素線導体の温度を含む発電機内の状態を予測し，その数値を用いることで，精度良く固定子巻線の絶縁材，回転子巻線の絶縁材，回転子の金属材料（リテイニングリング，Fig. 1参照）の余寿命評価と，発電機の健全性評価が可能となっている。また，診断結果に基づく，検査・作業計画の立案を行うと共に，定期検査や交換部品等の事前準備による工期短縮の支援が可能である。

7．結言

ガスタービン用水素間接冷却発電機の高効率化技術を開発した。開発技術を500MVA級の開発機に適用し，工場回転試験にて実機検証の結果，効率で先行機を0.1ポイント以上向上する，99.14%（遅れ力率0.8）の高効率を達成した。そして，開発した高効率化技術は，水素間接冷却のラインアップ機に展開するとともに，大容量空気冷却機の開発にも適用している。

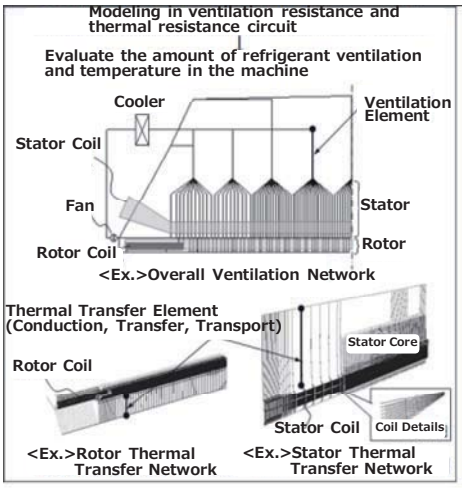


Fig. 15　Physical model simulation

また，発電機の技術的知見に基づいた物理・統計モデルによる運転データ予測と分析から，発電機の異常予兆を検知する技術や，実運転データから発電機各部の余寿命や健全性を診断するための物理シミュレーション技術を紹介した。

今後も，タービン発電機の高効率化技術，異常予兆検知や診断技術の適用拡大を進め，火力発電プラントの価値向上に貢献していく。

高熱通過絶縁およびHHTは，三菱日立パワーシステムズ㈱の日本及びその他の国における登録商標です。

MHPS-TOMONIは，三菱日立パワーシステムズ㈱の米国及びその他の国における登録商標または商標です。

参考文献

(1)　村山博英，高橋和彦，山本幸弘，河中貴行，伊東大輔，工藤和宏，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).

(2)　平崎大二郎，遠藤彰久，遠藤格，MHPS-TOMONI®：デジタルソリューションによる発電プラント運用の高度化，三菱重工技報，Vol. 56, No. 3 (2019).

(3)　高橋和彦，小野田満，田中清輝，村松誠二郎，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，三菱重工技報，Vol. 54, No. 3 (2017).

(4)　Hattori, K., Takahashi, K., Tohnosu, S., Miyakawa, K., State-of-the-art Technology for Large Turbine Generators, CIGRE SC A1 2008 Panel Session (2008).

(5)　服部憲一，井出一正，後藤文彦，仙波章臣，渡辺孝，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，Vol. 84, No. 2 (2002).

(6)　村松誠二郎，服部憲一，高橋和彦，中原明仁，岩重健五，250MVA空気冷却式タービン発電機の開発，日立評論，Vol. 87, No. 2 (2005).

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

特集：発電機

大容量水素間接冷却タービン発電機の高効率化・高信頼性化の最新技術

Latest Technology for High-Efficiency and High-Reliability of Large Capacity Indirectly Hydrogen-cooled Turbine Generator

岡野 紗耶[*1] OKANO Saya　梶原 剛[*1] KAJIWARA Go　田中 賢治[*1] TANAKA Kenji

キーワード：タービン発電機，水素間接冷却，コンバインドサイクル，大容量，高効率
Key Words：Turbine Generator, Indirectly Hydrogen-cooled, Combined Cycle, Large Capacity, High-Efficiency

1．緒言

近年，CO_2排出量削減・再生可能エネルギー導入拡大の観点から，下記の優位性を持つCGS配置（ガスタービン（C），発電機（G），蒸気タービン（S）の順序で配置される軸系構成）の一軸コンバインドサイクル発電方式を戦略的に採用するプラントが増加している。

1）発電効率：コンバインドサイクル発電は高温の燃焼ガスによりガスタービンを回すと共に，その排気ガスから得られる高温・高圧の蒸気により蒸気タービンを回すことで発電する方式であることから，蒸気タービンやガスタービン単体での発電方式と比較して発電効率が極めて高い。

2）運用の柔軟性：再生可能エネルギー発電の代表例として風力や太陽光が挙げられるが，これらの電力供給力は気象条件に左右されやすく，設備容量や調整力の点での価値が乏しいことから，依然として火力発電は電力安定供給のための重要な役割が期待される。ガスタービン発電プラントは需要変動に対応した高速起動が可能であるため，ミドル・ピーク運用に適している。

3）負荷調整力：一軸コンバインドサイクル発電プラントは，建屋コストを抑えながら複数のユニットを設置することができ，ユニット単位での負荷調整運用が可能である。したがって，多軸コンバインドサイクル発電プラントと比較して部分負荷効率が高く，調整電源に適している。

上記の社会的背景に対応するため，当社では主力製品である水素間接冷却タービン発電機の高効率化やDSS（Daily Start and Stop）運用に対応可能な回転子疲労寿命評価技術の高精度化，CGS配置に伴う両軸駆動に対応可能な回転子軸強度の確保，起動時間短縮に対応可能な回転子の温度設計等に関する開発に取り組んできた。また，今後想定される新興国での経済発展に伴う電力需要の拡大に対応すべく，水素間接冷却タービン発電機の大容量化にも併せて注力している。

本稿では，これら開発成果を適用した海外プラント向けCGS配置の900MVA級水素間接冷却タービン発電機の概要，工場での回転電気試験結果，並びに同技術を適用した1,000MVA級水素間接冷却タービン発電機について述べる。

2．水素間接冷却タービン発電機の高性能化

2.1　大容量化による水直接冷却機との置き換え

発電機の固定子コイル冷却方式は，大容量機の水直接冷却方式，中容量機の水素間接冷却方式，小容量機の空気間接冷却方式に大別される。Fig. 1に水直接冷却方式と水素間接冷却方式の固定子コイル冷却構造を示す。水直接冷却方式は固定子コイルの主絶縁を介して導体を冷却する水素間接冷却方式とは異なり，固定子コイルの中空素線内に冷却水を通水する方式であるため，冷却能力が最も優れているという特徴がある。一方，Fig. 2に示すように，水直接冷却方式は水素間接冷却方式には不要となる固定子冷却水系統が必要になる。また，固定子コイル内に中空素線を設けるため，その分導体断面積を縮小せざるを得ず，効率が低下する傾向にある。したがってメンテナンス性および効率の面から判断すると，可能な限り水素間接冷却方式を採用する方が有利になる。

そこで当社では，主に固定子コイルの主絶縁の熱抵抗低減による冷却能力の向上を行うことで，Fig. 3に示す通り水素間接冷却方式の適用可能容量域の拡大を進めてきた。現在，水素間接冷却方式のタービン発電機として

原稿受付　2019年11月8日
＊1　三菱電機㈱ 電力システム製作所 回転機製造部
〒652-8555　神戸市兵庫区和田崎町1丁目1番2号
E-mail: Okano.Saya@bc.MitsubishiElectric.co.jp

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

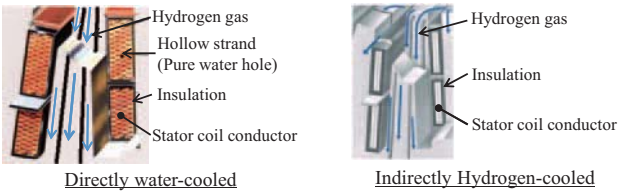


Fig. 1　Stator coil cooling design

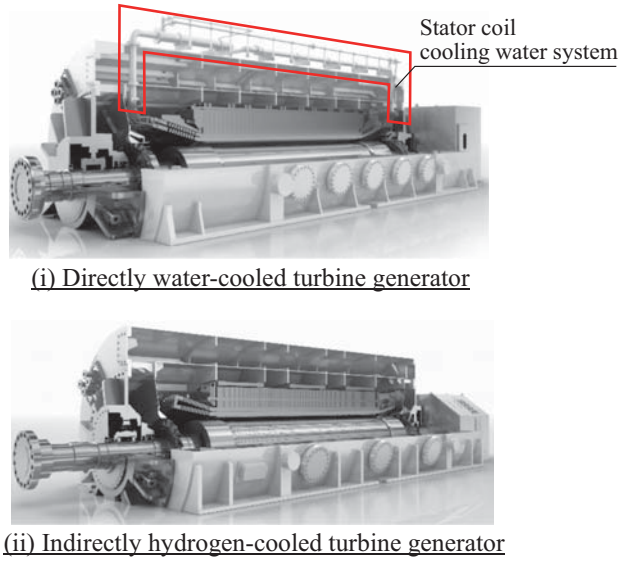


Fig. 2　Comparison of stator coil cooling system between the generator types

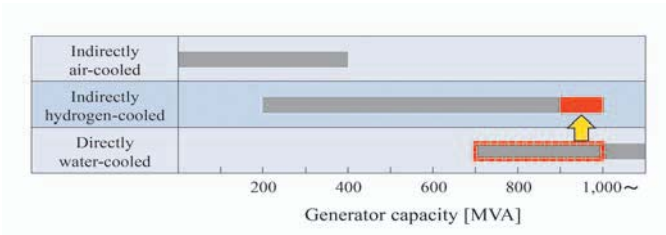


Fig. 3　Stator coil cooling system and capacity

は世界最大レベルの容量*となる1,000MVA級水素間接冷却タービン発電機の技術成立性を確認済みである。

2.2　大容量化技術

海外プラント向けCGS配置の900MVA級水素間接冷却タービン発電機に適用した最新技術をFig. 4に示す。本節では，大容量化技術について述べる。

2.2.1　固定子コイルの並列回路数増加による温度低減

水素間接冷却方式において，固定子コイル導体で発生した熱は主絶縁を介して冷却される。しかし，大容量化に伴い固定子コイルの定格電圧が上昇すると，主絶縁が厚くなり熱抵抗が増加することで固定子コイルの冷却能力が十分に確保できないという課題があった。そこで，固定子コイルの並列回路数に4並列回路を採用することで，電圧の上昇を抑制しつつ固定子コイルの冷却性能を確保し，効果的に大容量化を実現した。

また，固定子コイル冷却性能が向上することで発電機水素ガス圧の低減も可能となり，発電機風損の低減による高効率化を実現した。

2.2.2　固定子コイル端部の振動低減

大容量化による固定子コイル電流の増加に伴い，固定子コイル端部の電磁加振力が増大する。また，固定子コイル断面の大型化に伴い剛性が低下し，当該部の振動値増加が懸念される。そこで，これまでに実機検証で得られている知見を基に当該部の適切な支持強化を行うことで，固定子コイル端部の各部振動値が管理値を満足するような設計とした。一例として，Fig. 5に示すようにモーダル解析を実施し，定格運転時の共振を回避するように，固有振動数を加振周波数から十分に離調した。なお，近年の計算機性能の向上に伴い，本モーダル解析では従来と比較して大規模な計算モデルを採用しており，複雑なモードでも実機挙動を忠実に再現可能としている。これまでの多数の実績機のデータを基に解析の妥当性を確認しており，十分な解析精度を有している。

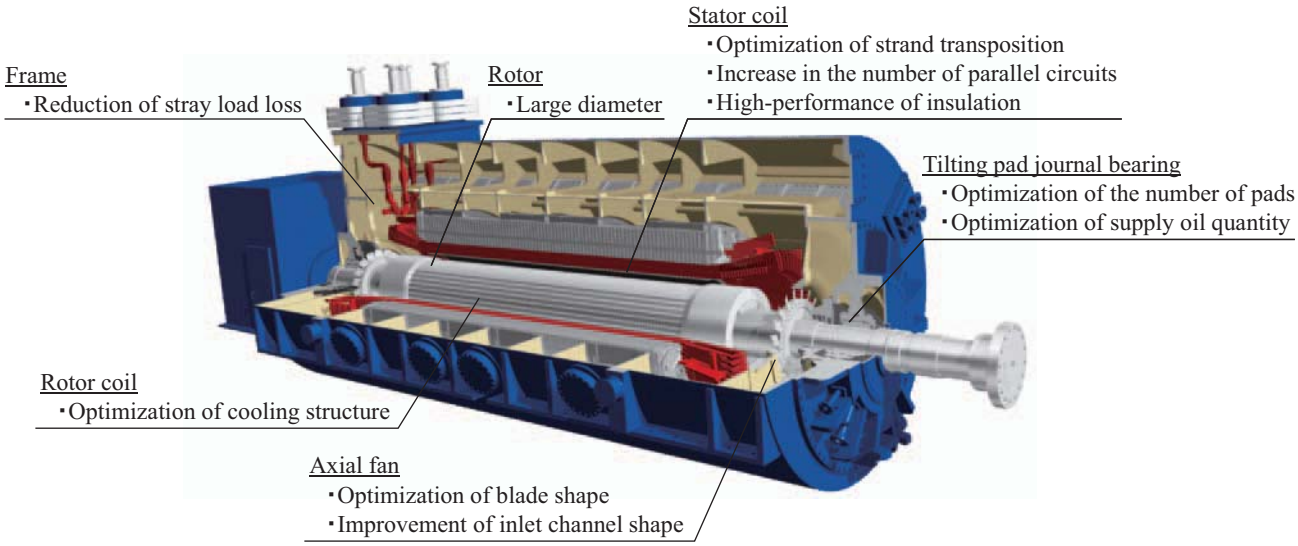
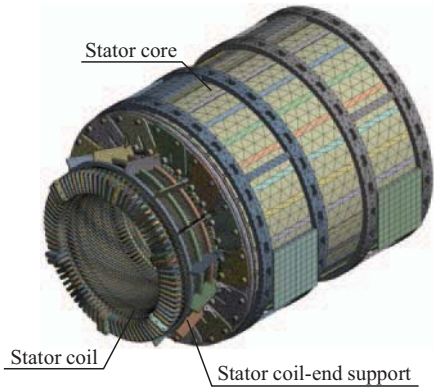


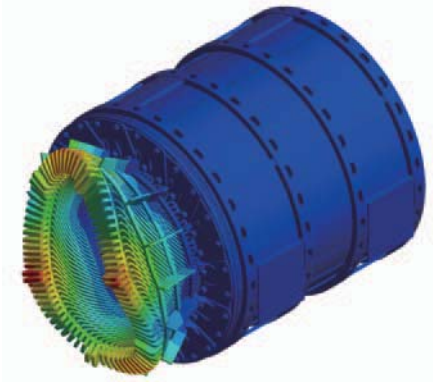
Fig. 4　State-of-the-art technology applied to 900 MVA indirect hydrogen-cooled turbine generator

＊　当社調べ（2019年10月現在）。

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.



(i) Calculation model



(ii) Calculation result

Fig. 5 Modal analysis of stator coil-end

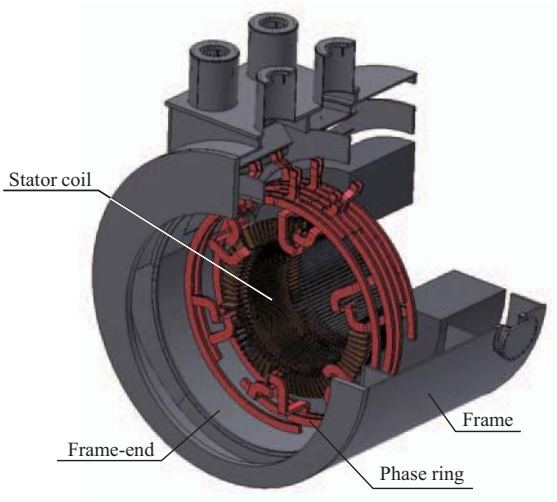
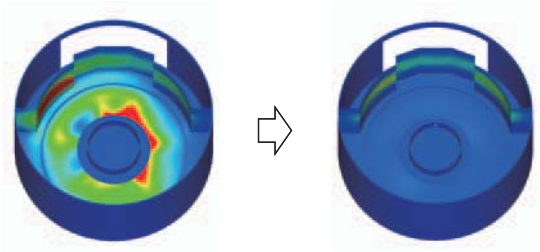


Fig. 6 Structure of frame-end



3 parallel circuits　　4 parallel circuits

Fig. 7 Loss distribution of frame-end portion

2.3　高効率化技術

本節では，海外プラント向けCGS配置の900MVA級水素間接冷却タービン発電機に適用したFig. 4の最新技術の中で，高効率化技術について述べる。

2.3.1　フレーム端部漂遊損低減　固定子コイル３並列回路の場合，Fig. 6の位相リング（Phase ring）からの漏れ磁束により，発電機フレーム端部には渦電流による損失が多く発生する。大容量化に伴い，これらの損失が更に増大することから，2.2.1節で示した固定子コイルの並列回路数の４並列化と合わせ，位相リングの漏れ磁束が低減可能な結線を採用することで，フレーム端部に発生する漂遊損の大幅な低減を図った。

Fig. 7に位相リング漏れ磁束に起因するフレーム端部の損失の電磁界解析結果を示す。固定子コイル４並列回路の場合，フレーム端部に発生する損失は３並列回路と比較して大幅に削減することが可能となり，発電機で発生する全漂遊損のうち約10%を低減する効果を得た。

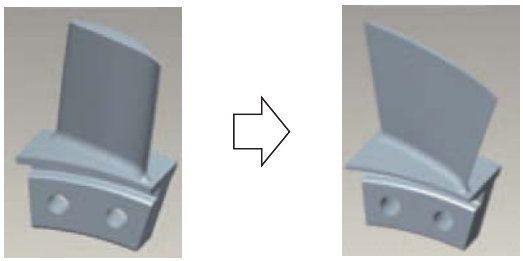
2.3.2　低損失軸受　発電機の回転子を支持する軸受により発生する損失は発電機全体損失のうち約10%を占める。当社では，これまでも低損失軸受として直潤型ティルティングパッド軸受（給油ノズルで軸ジャーナル-軸受パッド間の摺動部に直接給油する方式）を採用しているが，各軸受パッドの必要給油量に対して適切な給油量が確保できていない場合は，パッドごとに負荷容量のばらつきが生じ，異常振動が発生する懸念があった。そこで，これまでに実機検証で得られている知見から，各給油ノズルからの給油量の最適化等を実施することで，品質の健全性を十分に担保しつつ給油量の削減を行い，軸受損の低減を実現した。

2.3.3　高効率ファン　発電機の回転子軸両端には，冷媒の循環と機内各部の冷却を目的として軸流ファンが設置されている。軸流ファンの動力損は発電機風損のうち30～40%を占めていることから，Fig. 8に示すように軸流ファンの翼形状の最適化，および軸流ファンの入口吸い込み流路での水素ガスの流れの整流化を実施し，軸流ファンの高効率化を図った。モデルファンを用いた風洞試験での性能評価を行った結果，従来比で静圧効率が約10ポイント向上することを確認した。

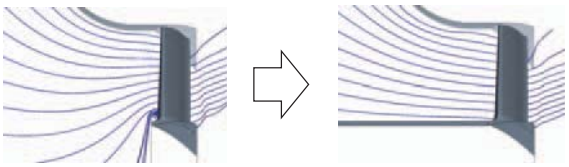
2.3 4　回転子コイル通風路形状最適化　発電機風損の更なる低減策として，回転子コイル通風路形状の最適化を実施した。Fig. 9に回転子ダクト入口形状を示す。ダクト入口の形状を最適化することにより，従来形状に対して圧力損失を約60%低減可能であることをCFD（Computational Fluid Dynamics）解析と要素モデルを用いた風洞試験により確認した。

この結果を基に発電機内各部の風量バランスの最適化を行い，軸流ファンの動力を調整することで発電機風損の低減を図った。

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

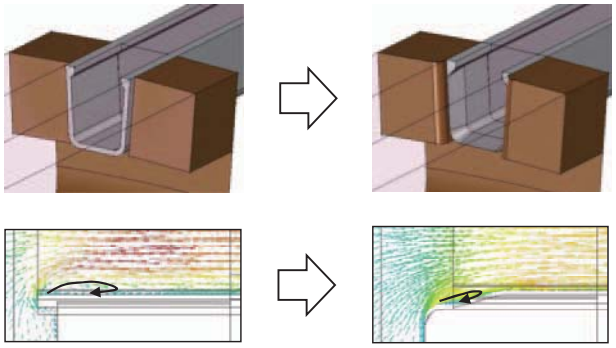


Optimization of blade shape



Improvement of inlet channel shape

Fig. 8　High-efficiency axial fan



Conventional structure　　Improvement structure

Fig. 9　Cooling structure of rotor coil inlet

2.4　その他適用技術

CGS配置（ガスタービン（C），発電機（G），蒸気タービン（S）の順序で配置される軸系構成）の発電機は，従来の片軸駆動の発電機とは異なり，両軸端にそれぞれガスタービンと蒸気タービンが接続されることから，両軸端共に駆動トルクを伝達するための十分な軸強度を確保しておく必要がある。このため，片軸駆動の発電機の蒸気タービン側にあたる回転子軸強度の向上，および焼嵌め部品の強度・性能確保を行うことで，大容量CGS配置に適用する発電機の信頼性を確保した。

また前述の通り，火力発電プラントは調整電源としての役割が期待されている。当社が標準的に採用しているSFC（Static Frequency Converter）起動に対しては，運用の柔軟性を高めるため，大容量化が進むCGS配置や高速起動におけるトルク増大にも対応可能なように，SFCの大容量化を進めている。これにより，発電機はSFC起動時の回転子温度上昇を抑制する必要があり，大容量CGS配置向け発電機においても，起動時間短縮に対応した温度設計を実施している。

2.5　DSS運用に対応した回転子寿命評価技術の高精度化

火力発電プラントの調整電源としての運用により，従来のように長時間連続運転せずに一日の中で必要な時間のみ運転（DSS：Dairy Start and Stop）させる運用が増加し，発電機の起動停止回数は確実に増加するものと予想される。特に発電機の回転子部品は，起動停止回数の増加に伴い，各部に作用する遠心力による繰り返し負荷の回数が増加し，疲労による破損リスクの増大が避けられない。したがって，従来以上に疲労に対する高精度な設計技術が不可欠となってきている。このため，当社では今後のDSS運用プラントの増加に対応すべく，最新の解析技術を用いて高精度な寿命評価技術の開発を進めている。海外プラント向けCGS配置の900MVA級水素間接冷却タービン発電機においても当該技術を適用しており，本節ではそれら適用技術について述べる。

2.5.1　大規模３次元解析技術　複雑な構造で要素数の多い解析モデルでは膨大な計算時間が必要となることから，設計業務での実用性に課題があり，これまでは簡易モデルや部分モデルでの解析評価に留まっていた。しかし，近年は計算機の性能向上に伴い，複雑な回転子構造を3次元で丸ごとモデル化した構造解析が実用レベルで対応可能になった。そこで，過去の要素検証の再評価や実機運用状態との比較評価を通じ，低サイクル疲労寿命に影響する回転子各部の複雑な形状の局所応力に大規模３次元解析技術を用い，より正確に評価することで，回転子疲労寿命評価技術の高精度化を実現した。

Fig. 10に発電機の回転子ボディの断面形状を示す。回転子は主に回転子軸（シャフト），回転子コイル，およびウェッジで構成される。シャフトには軸方向に溝（スロット）を設けており，スロット内部にコイルとウェッジが挿入されている。運転時にはコイルに遠心力が作用し，その負荷をウェッジを介してティース（シャフトのスロット間部分）が保持するため，ティースおよびウェッジには引張力が作用する。一方，停止時には遠心力は作用しないことから，ティースおよびウェッジには起動停止に伴い応力振幅が発生する。

Fig. 11に回転子端部構造を示す。回転子端部は直線部とは異なり，コイルに作用する遠心力をリテーニングリングで保持する構造としている。リテーニングリングはシャフト（端部ティース）およびエンドプレートに焼嵌めをすることで取り付けていることから，リテーニングリングと端部ティース，エンドプレート嵌合部には運転時に遠心力による引張力が作用し，停止時には焼嵌めによる圧縮力が作用する。これにより起動停止に伴いそれぞれの部品に応力振幅が発生する。

Fig. 12に回転子端部の構造解析モデル，Fig. 13に発電機起動停止１回あたりの回転子端部各部の応力振幅値（運転時と停止時の応力変動幅）を示す。解析により得られた応力集中部は起動停止の繰り返しに伴う低サイクル疲労による破損リスクが高い部分と良く一致する。ま

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

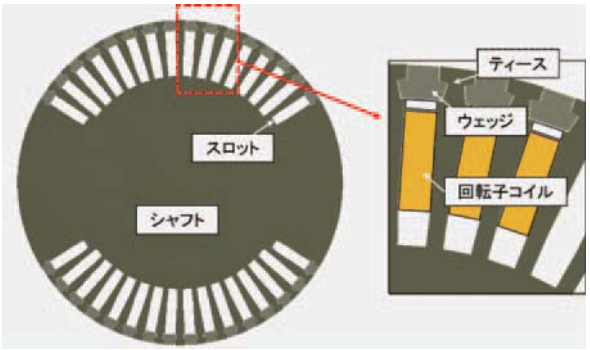


Fig. 10 Cross section of rotor body

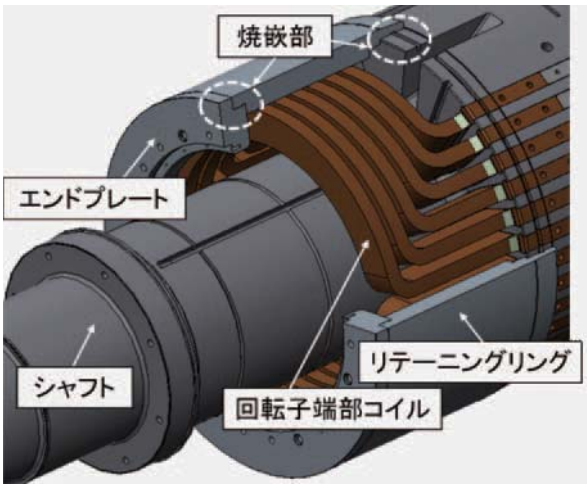


Fig. 11 Structure of rotor-end

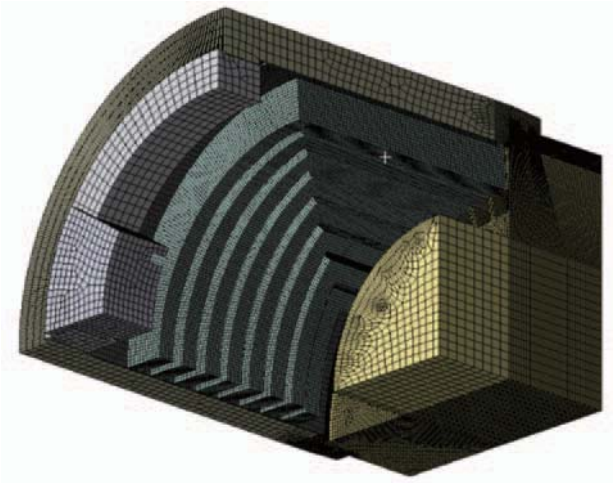


Fig. 12 Calculation model of rotor-end portion

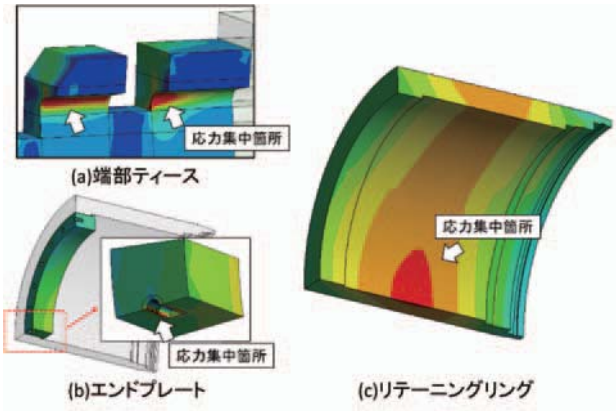


Fig. 13 Stress amplitude of rotor-end portion

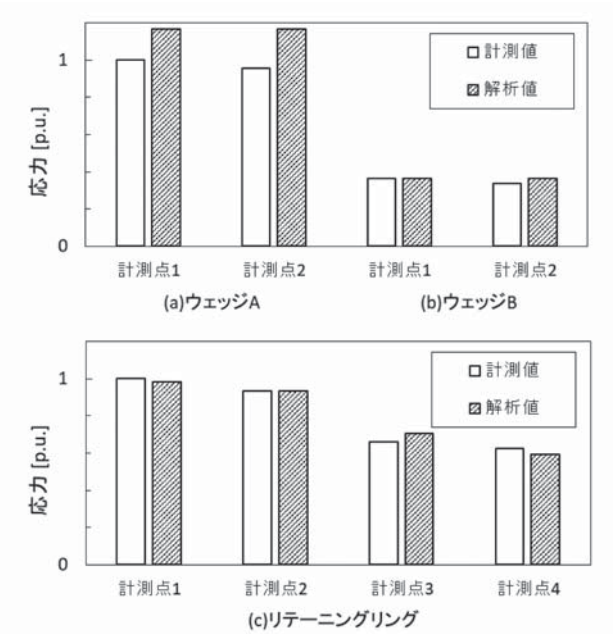


Fig. 14 Strain comparison between measurement and calculation

た，この解析から端部ティース，エンドプレート，リテーニングリングの応力は周方向に分布を持っていること，軸方向についても従来の２次元解析とは異なる傾向が得られることが新たに判明した。この結果は従来の解析から想定される応力振幅値を上回る結果であったことから，実機の低サイクル疲労破壊に対する許容可能な起動停止回数は従来想定回数よりも少ないことが明らかになった。これは３次元解析により得られた新たな知見である。

2.5.2　３次元解析結果の妥当性　３次元解析で得られた発生応力の計算精度の確認を目的として，実機回転子を使用した回転子各部のひずみ計測を実施した。Fig. 14に回転子ウェッジおよびリテーニングリングのひずみ計測結果を示す（回転子ウェッジ・リテーニングリングそれぞれの計測値のうち最大値を１として正規化して示している）。いずれの結果も周方向および軸方向の差分を含め，解析値とひずみ計測値は精度良く一致していることから，３次元解析手法は実機の挙動を正確に模擬できており，疲労寿命評価法として実用レベルでの有用性を確認した。

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

3．回転電気試験結果

これらの大容量化・高効率化技術を適用し，海外プラント向けCGS配置の900MVA級水素間接冷却機（Table 1）を製作した。2019年10月に工場で回転電気試験を実施し（Fig. 15），下記の通り全ての試験項目について所要の性能が得られていることを確認し，世界最大レベルの容量となる900MVA級水素間接冷却タービン発電機の商用機の製品化を完了した。

1）軸振動

120%過速度試験を含む全ての運用回転数において，軸振動値は規格値を満足しており，良好な結果であることを確認した。また，軸受においても計測温度は設計仕様を満足しており，運転試験後の点検においても異常がないことを確認した。

2）各部温度

定格負荷運転時の温度を等価温度法にて評価した結果，回転子コイル平均温度や固定子コイル温度，固定子コア温度において規格値以下であることを確認した。

3）各部振動

定格運転時の固定子コイルエンド振動や固定子コア振動，フレーム振動等，各部品において社内基準値以下であることを確認した。

4）特性

無負荷飽和特性試験，三相短絡特性試験，突発短絡試験により，各電気特性は規格および社内基準値を満足しており，設計値通りの特性が得られていることを確認した。

5）効率

機械損，鉄損，固定子抵抗損，漂遊負荷損，界磁損の各損失値は設計値と同等であり，定格運転時の規約効率は99.1%以上である結果が得られた。

4．さらなる高出力密度化

900MVA級水素間接冷却タービン発電機の検証試験結果を踏まえ，更なる大容量・高効率な水素間接冷却タービン発電機を計画中である。現状，世界最大容量級となる1,000MVA級に必要な要素技術の検証を実施し，世界最高レベルである99.0%の規約効率を有する水素間接冷却タービン発電機の技術成立性を確認した。

Table 1　Design specifications of 900MVA indirect hydrogen-cooled turbine generator

Capacity［MVA］	900
Terminal voltage［kV］	23.0
Armature current［A］	22592
Power factor［-］	0.85（Lag）
Frequency［Hz］	50
Gas pressure［MPa-g］	0.35
Number of stator slots［-］	84（4Y）
Cooling system of stator	Indirectly hydrogen-cooled
Applied standard	JEC/IEC/IEEE
Insulation class［-］	155（F）
Temperature rise class［-］	130（B）

Fig. 15　Shop test of 900MVA indirect hydrogen-cooled turbine generator

5．結言

近年のCO_2排出量削減・再生可能エネルギー導入拡大に伴う火力発電の調整電源としての役割に対応すべく，当社では水素間接冷却タービン発電機の高効率化やDSS運用に対応可能な回転子疲労寿命評価技術の向上，CGS配置に伴う両軸駆動に対応可能な回転子軸強度の確保，起動時間短縮に対応可能な回転子の温度設計等に関する開発に取り組んできた。これら開発成果を適用した海外プラント向けCGS配置の900MVA級水素間接冷却タービン発電機の設計・製作を完了し，工場での回転電気試験にて所要の性能が得られていることを確認した。併せて世界最大容量級となる1,000MVA級に必要な要素技術の開発を完了し，世界最高レベルである99.0%の規約効率を有する水素間接冷却タービン発電機の技術成立性も確認した。

今後も火力発電プラントの更なる地位および付加価値の向上に向けた開発を継続すると共に，運用形態の変化に追従したタービン発電機ビジネスを引き続き継続していく所存である。

参考文献

(1)　舟崎陽一，古賀清訓，空信之，前田英昭，近藤雅浩，水素間接冷却タービン発電機“VP-Xシリーズ”と要素技術の既設機への展開，三菱電機技報，Vol. 90, No. 11 (2016), pp. 33(635)-36(638).

(2)　小倉一晃，梶原剛，発電機の信頼性向上に貢献する予防保全技術，三菱電機技報，Vol. 93, No. 11 (2019), pp. 46(656)-49(659).

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

特集：発電機

コンバインドサイクル向け両軸駆動650MVA 水素間接冷却タービン発電機の開発

Development of 650MVA Indirectly Hydrogen-cooled Double-end Drive Generator for Combined Cycle Power Generation System

淵本　遼[*1]
FUCHIMOTO Ryo

キーワード：両軸駆動発電機，コンバインドサイクル，効率，水素間接冷却方式　検査ロボット
Key Words：Double end drive generator, Combined Cycle, Efficiency, Indirectly hydrogen-cooled, Robot Inspection

1．はじめに

近年，高い発電効率と出力調整の容易さから，ミドル電源とベース電源の両用で運用可能な一軸型ガスタービンコンバインドサイクルユニットの大型化が進んでいる。Fig. 1は，日本国内にある一軸型コンバインドサイクル（C/C）発電機出力の変遷を示している。これまでの大型一軸型ガスタービンコンバインドサイクルユニットは発電機のメンテナンス性と発電機ロータの励磁構造を有するコレクタ軸の強度の観点から，ガスタービン，蒸気タービン，発電機の順にロータ軸を繋ぎ，発電機を端部に設置する構成としてきた（Fig. 2(a)片軸駆動発電機）。この構成では，起動時から蒸気タービンを共に駆動する必要があり，起動に時間を要する等の運用上の制約があった。

発電機をガスタービンと蒸気タービンの中間に設置する両軸駆動機（Fig. 2(b)）は，これまで450MW以下の出力帯で適用されていたが，当社では発電機のコレクタ側軸端の強度向上を図る事で，両軸駆動650MVAタービン発電機（出力569MW）の実用化に成功し，プラント起動時間の短縮と運用性を向上させた大容量一軸型コンバインドサイクルシステムの提供を可能にした。またこの発電機のステータコイルの冷却には，東芝で長年実績のある信頼性の高い水素間接冷却方式を採用することで，発電効率の向上を図っている[(1)(2)(3)]。

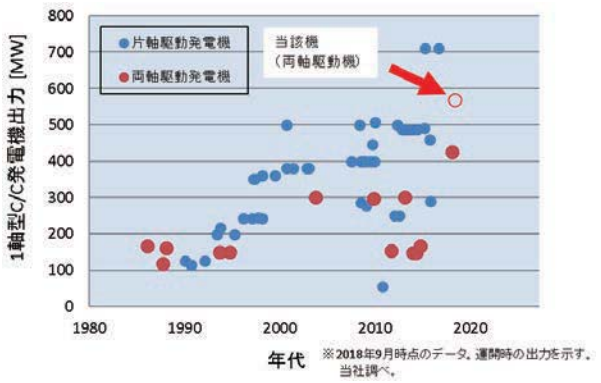
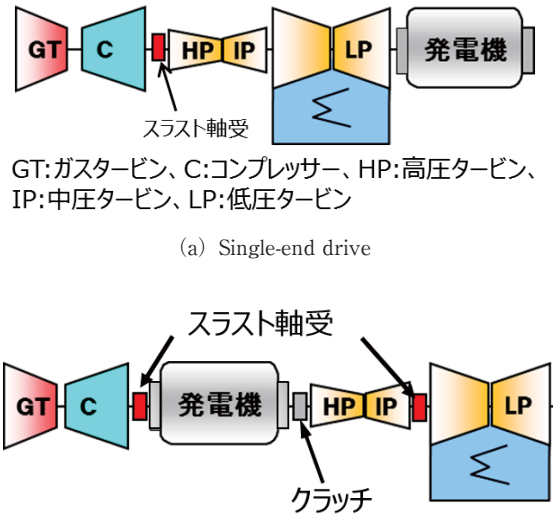


Fig. 1　Power of single shaft combined cycle unit in Japan



(a) Single-end drive

(b) Double-end drive

Fig. 2　Power train of single shaft combined cycle

ここでは，北海道電力 石狩湾新港発電所１号機向けの両軸駆動650MVA水素間接冷却発電機の技術的特徴と実機の性能試験結果および，両軸駆動発電機の点検に関して述べる。

2．両軸駆動発電の特長

Fig. 2に一軸型コンバインドサイクル軸構成を示す。片軸駆動発電機では，ガスタービンと高中圧蒸気タービン，低圧蒸気タービン，発電機というパワートレインの構成で，発電機のロータは片側からのトルクを受けて回転する。両軸駆動発電機では，ガスタービン，発電機，クラッチを介して高中圧蒸気タービン，低圧蒸気タービンのパワートレイン構成となり，発電機は両側からのトルクを受けて回転する。発電機と蒸気タービン間にはク

原稿受付　2019年11月10日
＊1　東芝エネルギーシステムズ㈱京浜事業所
設計第二部タービン発電機設計担当
〒230-0045　横浜市鶴見区末広町２－４
E-mail: ryo.fuchimoto@toshiba.co.jp

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

ラッチを設置しているため，一軸型コンバインドサイクルでありながら起動時はガスタービン昇速後に蒸気タービン が昇速し，蒸気タービンが定格回転数到達後にクラッチが嵌合して発電機にトルクが伝達される。停止時は先に蒸気タービンを降速させクラッチが離脱し，その後にガスタービン を降速させる運用方法となる。

ここで，片軸駆動方式に対する両軸駆動方式の利点を以下に示す[4]。

➢ ガスタービン先行起動による早期送電

クラッチを有することで，蒸気タービンの蒸気温度が上がるのを待たずに，ガスタービンを単独で先行起動し発電することができるため，早期に送電が可能となる。

➢ 起動時のNO_x低減

ガスタービンのみ先行起動が可能なため，NO_x発生量が多い燃焼温度でのガスタービン燃焼時間を短くでき，NO_xの低減が可能となる。

➢ 蒸気タービンのクーリング蒸気レス，補助ボイラ容量低減

片軸駆動の一軸型コンバインドサイクル発電方式では蒸気タービン通気までの間，蒸気タービンは空回りとなり，低圧蒸気タービンの長い羽根の温度上昇を抑えるためにクーリング蒸気を送る必要がある。両軸駆動の場合，クラッチ設置により空回り時間が無くなることから，クーリング蒸気を送る必要が無くなり，補助ボイラ容量の低減が可能となる。

➢ 蒸気タービン性能向上（軸方向間隙差小）

片軸駆動一軸型コンバインドサイクルの場合，スラスト軸受は通常ガスタービンと蒸気タービンの間に設ける。両軸駆動の場合，クラッチが軸方向の熱伸びを吸収するため，スラスト軸受はクラッチの両側に設けることが可能となる。蒸気タービン側は，低圧蒸気タービンと高中圧蒸気タービンの間に設置することで片軸駆動よりも軸方向熱伸びが小さくなるため，羽根と固定子側の軸方向間隙を小さくでき，効率向上が図れる。

一方，詳細は後述するが，両軸駆動方式発電機のクラッチと接続する軸は，ロータコイルに界磁電流を供給する構造と，必要なトルクを伝達する強度を有する構造を両立しなければならないという課題がある。

3．発電機仕様および工場試験結果

本発電機は，Fig. 3に示す北海道電力 石狩湾新港発電所１号機向けの発電機である。また，発電機仕様をTable 1に示す。本発電機の回転電気試験を2017年６月に当社京浜事業所内で実施し，仕様を満足する良好な結果を得た。Fig. 4に回転電気試験の実施状況を示す。

主要な試験項目と結果について以下に述べる。

⑴　特性

無負荷飽和特性試験，三相短絡特性試験，及び三相突発短絡試験を行い，各種電気特性が要求仕様値を満足することを確認した。

Fig. 3 Hokkaido Electric Power Company Ishikariwan Shinko Power Plant Unit 1

Table 1 Generator specification

項目	仕様
容量	650MVA
電圧	21kV
力率	0.9
回転数	3000回転/min
周波数	50Hz
規格	JEC-2130-2000
温度上昇	B種
短絡比	0.58以上
水素ガス圧力	520kPaG
冷却方式	水素間接冷却方式

Fig. 4 Generator performance test

⑵　損失及び効率

JEC-2130-2000に基づき各損失を測定し，規約効率を算定した。定格出力時における規約効率は99.1％に達し，同容量帯の発電機では世界最高レベルとなる結果が得られた。

⑶　ステータコイル・ロータコイル温度上昇

等価温度上昇法による試験を行い，定格出力時における各部の温度上昇を推定した。ステータコイルおよびロータコイル温度上昇はJEC-2130-2000の要求を満足することを確認した。

⑷　軸振動

定格速度及び120％加速度試験により軸振動の計測，確認を行った。結果は良好であり，振動に対する要求仕様値を満足することを確認した。

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

(5)　ステータフレーム振動
ステータ鉄心振動に対するステータフレーム振動を実測した結果，フレーム振動振幅はステータ鉄心振幅の１/10程度に減衰されており，設計計画通りの小さい振動になっていることを確認した。
(6)　ステータコイルエンド振動
ハンマリング試験および突発短絡試験での振動実測により，設計値通りの低振動構造であることを確認した。

4．両軸駆動発電機のコレクタ周り軸構造

Fig. 5に発電機構造とロータのコレクタリング部まわりの外観を示す。発電機ロータの片側の端部には，コレクタリングが焼き嵌められ，ブラシをコレクタリングに押し当てることで，界磁電流をロータコイルに供給する。このコレクタリングがある軸端側をコレクタ側と呼ぶ。片側駆動のコレクタ側軸端部は，通常の石炭火力の発電機と同一構造で，反タービン側に位置し伝達されるトルクはないので，比較的細い径となる。一方，両軸駆動発電機の場合は，このコレクタ側軸端には蒸気タービンからのトルクが伝達されるので，大容量の両軸駆動発電機には特に十分な強度が必要となる。

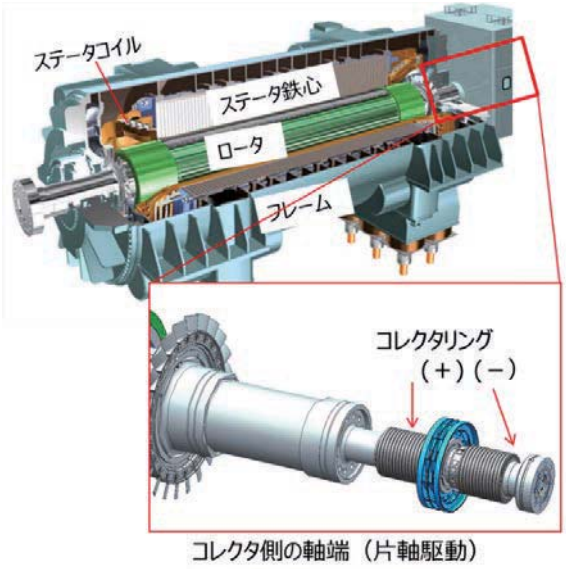


Fig. 5　Generator collector shaft

Fig. 6に片軸駆動発電機と本両軸駆動発電機のコレクタリングからロータコイルまでの銅帯接続構造を示す。Fig. 6(a)の片軸駆動の場合，コレクタリングからシャフト軸芯に挿入している中心孔銅帯までは，半径方向のスタッドで接続し，中心孔銅帯を介してロータコイルまで銅帯を接続する構造である。スタッド部の断面AAに示すとおり，シャフトにはスタッドを通すための，径方向の穴が存在する。

この従来の片軸駆動発電機の構造を両軸駆動発電機に適用した場合の強度評価を実施した。解析条件とモデル形状をFig. 7に示す。ここで，トルクに対しては，径を大きくすることが有効であるため，径はコレクタ周りの制約の中で可能な限り大きくした寸法で評価した。軸端には短絡事故時のトルクを与える。Fig. 8(a)の解析結果に示すとおり径方向のスタッド用の穴の座グリの部分に高い応力が発生することが確認できる。この構造であると短絡事故時の過渡トルク変動により疲労亀裂が生じてしまう。

そこで，本両軸駆動発電機では，Fig. 6(b)に示す新構造を適用した。中心孔銅帯はコレクタリングよりも手前までの長さとし，その先端部でコレクタリングが焼き嵌められているシャフトの径まで銅帯を径方向に立ち上げ

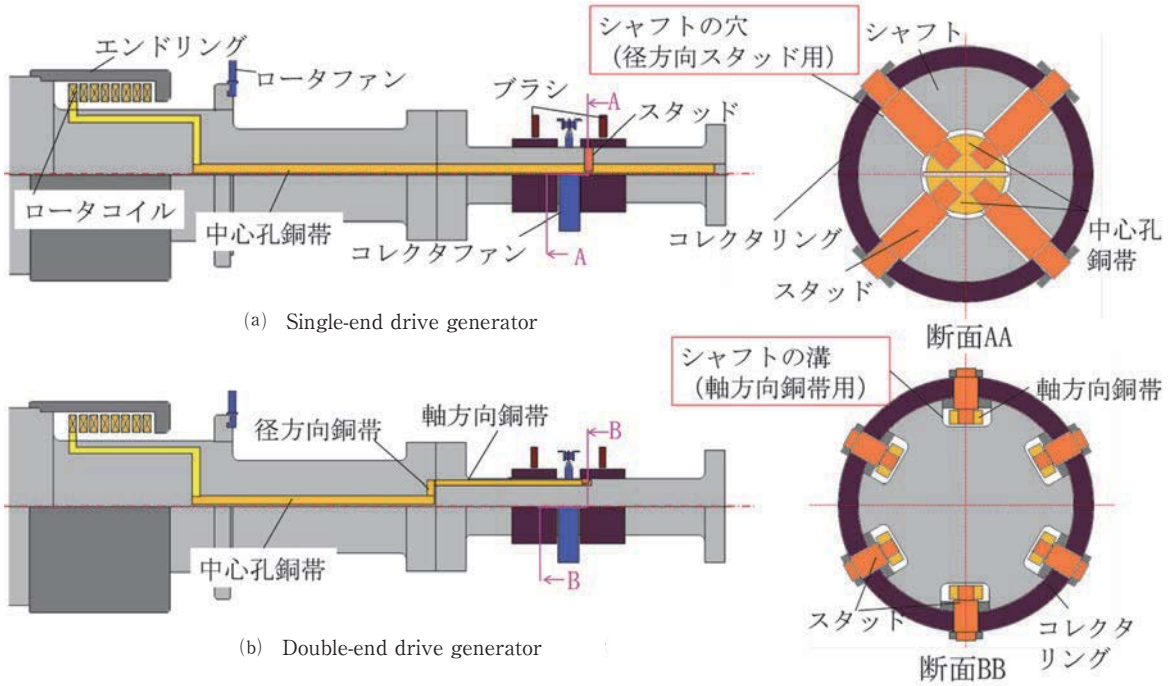


Fig. 6　Comparison of collector shaft structure between single-end drive generator and new double-end drive generator

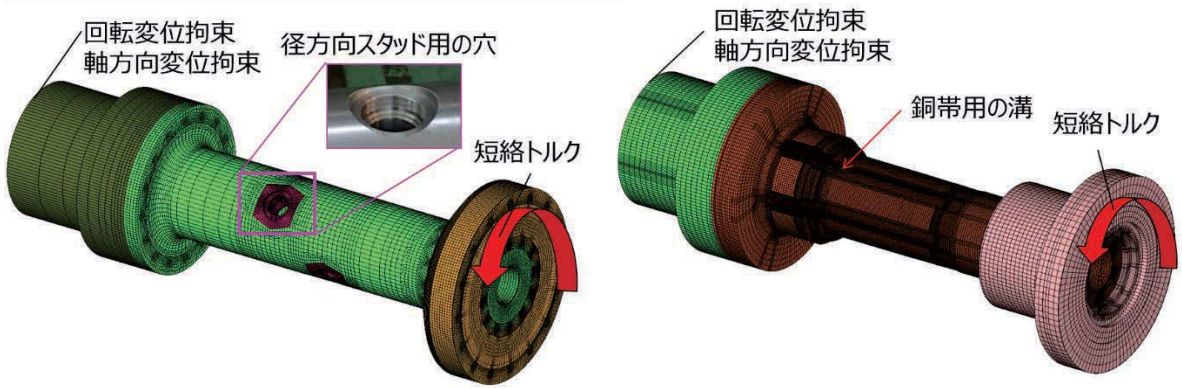
Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

る。そこからはシャフト外表面に設けた溝の中に，銅帯を設置しコレクタリングまで軸方向に銅帯をつなげる構造を適用した。コレクタリングと軸方向銅帯間を接続するスタッド部の断面（断面BB）に示すとおり，中心孔の穴はなく，外表面の溝の中に軸方向銅帯を設置する構造である。また，高い応力が発生するような径方向のスタッド用の穴も存在しない断面となり，トルクに対して強度のある断面構成となる。

Fig. 7(b)に示す解析モデルに同じ短絡トルクを与えた解析結果をFig. 8(b)に示す。両軸駆動用の新構造は，片軸駆動を適用したケースの58％の発生応力まで低減することができた。短絡事故時の過渡トルク変動に対しても，十分な疲労強度を有することを確認した。

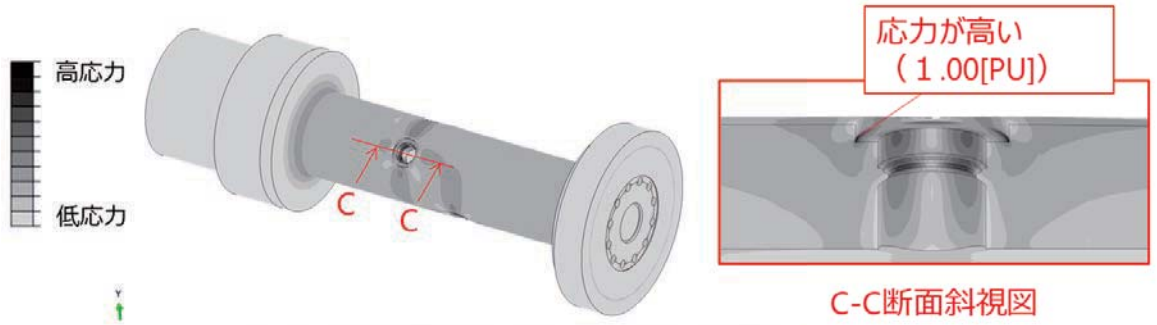
5．ステータコイル水素間接冷却方式について

大型の事業用発電機の冷却方式には，水素ガスのみを使用する水素冷却方式と，ステータコイルの冷却に水を使用する水冷却方式がある。Table 2に各冷却方式の，ロータコイル，ステータコイル，ステータ鉄心を冷却する冷媒を示す。

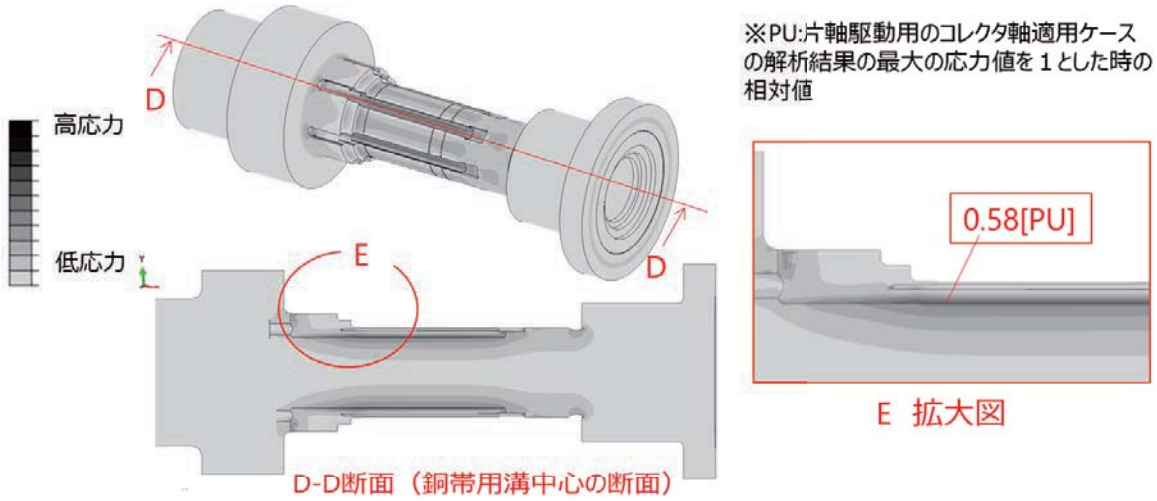


(a)　In case of applying single-end drive collector shaft structure　　(b)　New collector shaft structure

Fig. 7　Stress analysis model and boundary condition of collector shaft



(a)　In Case of applying single-end drive collector shaft structure



(b)　New collector shaft structure

Fig. 8　Analysis result of collector shaft

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

Table 2 Cooling method and refrigerant of each part

発電機冷却方式	ステータコイル	ステータ鉄心	ロータコイル
水素冷却	水素ガス	水素ガス	水素ガス
水冷却	水	水素ガス	水素ガス

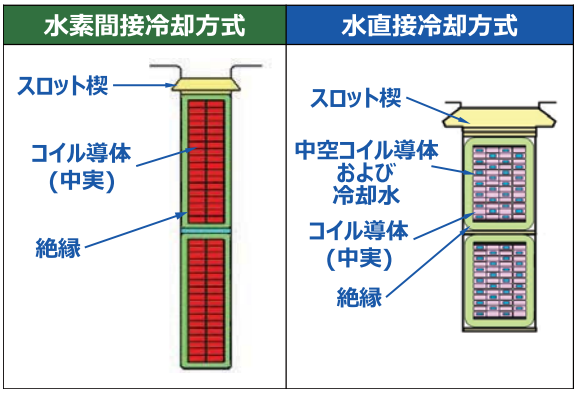


Fig. 9 Cross section of generator stator slot

それぞれ冷却方式のステータスロット断面をFig. 9に示す。水素冷却方式のステータコイルは，中実なコイル導体を用いており，コイル導体をステータコイル外部から絶縁を介して冷却している。この冷却方式を水素間接冷却方式と呼んでいる。水冷却方式では，中空コイル導体を用いてコイル導体の内部に冷却水を流して，コイル導体が発生する熱を冷却している。コイル導体に直接冷媒を流すことから，この冷却方式を水直接冷却方式と呼んでいる。

水直接冷却方式は水素間接冷却方式と比較して冷却能力が高く，大容量発電機のステータコイルの冷却方式として採用されており，水素冷却方式は適用可能な発電機容量に制限があった。東芝では，水素冷却方式の発電機の容量を拡大するため，ステータコイル水素間接冷却方式の冷却能力を強化する施策として，高熱伝導絶縁を開発した。ステータコイル水素間接冷却方式では，Fig. 10に示すように，ステータコイルの導体で発生した熱は導体⇒コイル絶縁⇒鉄心⇒水素ガスと言う経路で放熱される。この伝熱経路上において，コイル絶縁の熱伝導率は導体や鉄心と比較して非常に小さいため，コイル絶縁の熱伝導率を増加させることが冷却能力向上に大きな効果がある。高熱伝導絶縁においては，ステータコイル絶縁層に高い熱伝導率を持つ充填材を導入することで，絶縁性能を損なうことなく熱伝導率を従来絶縁の約２倍に増加することができた。この高熱伝導絶縁は，2000年より実機に適用しており，十分な実績を有している。

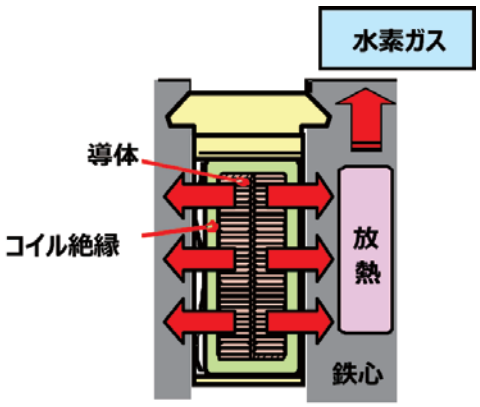


Fig. 10 Indirectly hydrogen cooling method of stator coil

Table 3に水素冷却方式と水却方式の効率と設備の比較を示す。

Table 3 Comparison of efficiency and auxiliary facility between indirectly hydrogen cooled type and water cooled type

	水素冷却方式	水冷却方式
発電機効率 (650MVA級)	99.1%	99.0%
ステータ重量 (650MVA級)	115%	100%
水素ガス 配管・供給装置	要	要
ステータコイル 冷却水配管・供給装置	不要	要

水素冷却方式では，ステータコイル導体の電流密度を水冷却方式と比較して低くするため損失が減少し，発電機効率が水冷却方式より約0. 1 %向上する。発電機の効率が向上することで，発電所の燃料消費量・CO_2排出量が削減できる。一方，水素冷却方式のステータコイル断面は，水冷却方式と比較して大きくなるので鉄心外径が増加し，ステータ重量が約15%増加する。

水素ガス配管・供給装置については，Table 2に示したように，水素冷却機および水冷却機とも水素ガスを冷媒に使用するので，同等の配管・供給装置が設置される。

水冷却方式では，ステータコイルを水（純水）で直接冷却するため，その冷却水を処理するステータコイル冷却配管・純水供給装置が必要であるが，水素冷却方式では，水を使用しないため，ステータコイル冷却水配管・純水供給装置が不要となる。よって，水素冷却機では，発電機構造が簡素化され，発電所内での必要スペースが少なくなり，発電機の据付・試運転作業が削減される。

ステータコイル冷却水配管・純水供給装置にはポンプ・電動機・イオン交換樹脂塔・計器等が設置されており，これらを監視し，また定期的に保守することで発電機の安定運転を実現している。水素冷却方式では，この部位の保守・監視項目が不要となる。また，水冷却方式特有のリスク（ステータコイル冷却水の水漏れなど）が無くなり，発電機の信頼性向上につながる。

以上をまとめると，水素冷却機は水冷却機と比較して，ステータ重量は増加するものの，効率面および保守性に優れており，同容量であれば水素冷却方式が選択されている。

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

6．両軸駆動発電機の点検について

通常，発電機のステータとロータを詳細点検するためには，ロータを軸方向に引き抜く必要がある。片軸駆動発電機は，Fig. 2に示すように，発電機はパワートレインの端部に置かれているため，反タービン側にロータを引き抜くことは容易である。一方，両軸駆動発電機の場合，蒸気タービンとガスタービンの間に発電機が据え付けられているため，発電機ロータを軸方向に引き抜くには，発電機を横方向にスライドさせることや上に持ち上げる等の発電機自体の移動が必要であること，または蒸気タービンを先に分解する必要がある等，多くの時間を要する。

そこで弊社では，両軸駆動発電機の点検に，ロータを引き抜かずにロータとステータを点検可能とするロボットを適用することを計画している。Fig. 11に弊社の発電機点検ロボットの外観を，Fig. 12にロボット走行時の外観を示す。本ロボットは，ステータとロータの間に設置し，３本のアームで固定子を突っ張り，ロータの表面を這うように自動走行する。本ロボットでは下記に示す点検が可能である。

- 高精細カメラによるロータ，ステータの外観点検
- ロータ通風孔の点検
- ロータの超音波探傷検査
- 小型ハンマによるステータ楔ゆるみ診断
- ステータ鉄心検査（EL-CID）

これにより，従来の点検期間の約半分の日数で詳細な点検が可能となる。

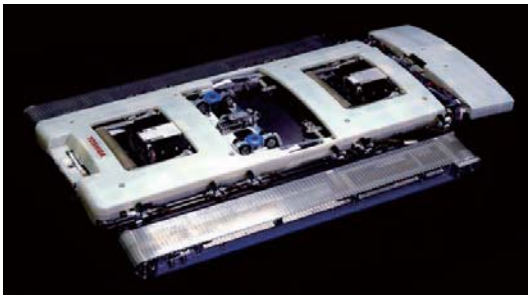


Fig. 11　Inspection robot for turbine generator

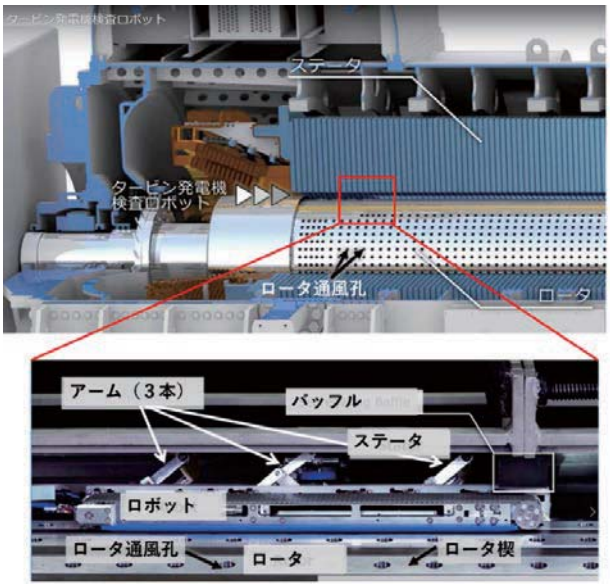


Fig. 12　Appearance of inspection robot operating

7．まとめ

コレクタ側軸端の強度を上げた新構造を開発し，50Hz650MVA両軸駆動発電機の製造を完了した。この新構造により，更なる大型の一軸型コンバインドサイクル向け両軸駆動機にも対応が可能となった。

また本発電機は，水素間接冷却方式を適用し，99.1％の効率を実現した。

両軸駆動発電機は，パワートレインの構成上ロータの引き抜きに時間を要するが，検査ロボットを適用することで,ロータを引き抜かずにロータとステータを点検することが可能となり，発電機の点検期間の短縮が可能となる。

参考文献

(1)　鈴鹿暁志他，大容量水素間接冷却タービン発電機の開発，平成23年度火力原子力発電大会論文集（2011），pp. 54-58.
(2)　小林雅司他，タービン発電機を支える絶縁技術，東芝レビュー VOL. 65 No. 8（2010），pp. 16-19.
(3)　冨木広明他，固定子コイル水素間接冷却を適用した60Hz大容量タービン発電機，東芝レビュー VOL. 65 No. 2（2010），pp. 48-51.
(4)　鳥飼高行，コンバインドサイクル発電の発展～フレキシブル運用と合理化～，平成27年「火力原子力発電」第66巻９月号（708号）p. 8.

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

特集：発電機

タービン発電機向け精密点検ロボットの開発

Development of Robotic Inspection Technology for Turbo Generator

片山 仁*1
KATAYAMA Hitoshi

キーワード：ロボット，回転子外表面走行，セグリゲーティングバッフル，自動直進制御，音響分析，液体媒質不用UT技術
Key Words：Robot, Rotor surface crawling type, Segregating baffle, Automatic linear traveling, Acoustic analysis, Dry UT technology

1．はじめに

事業用大型発電機（Fig. 1参照）の詳細点検は，固定子から回転子を取り出し，専門検査員により実施される。この詳細点検に要する期間は発電機の分解組立を含めると約１ヵ月になる。

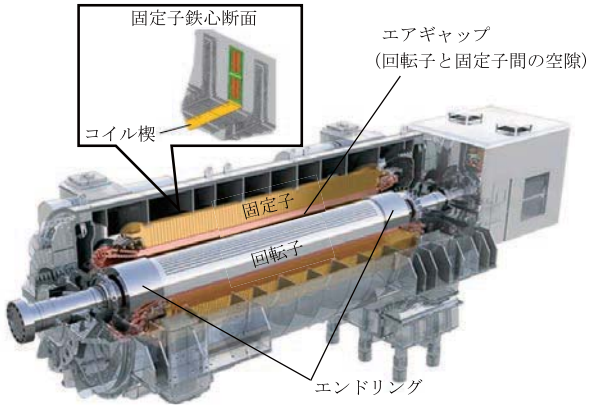


Fig. 1　Large turbo-generator

現在，火力発電が直面する運用コスト削減と稼働率向上のため，機器検査に必要な時間の短縮と，それに加え点検周期延長が検討され，その実現が大変重要となっている。

近年，上記の点検期間短縮を実現する技術として，ロボットによる回転子抜きを伴わない発電機点検が注目されている。Fig. 2に従来の方法とロボットを使った場合の発電機詳細点検日程の一例を示す。

これまで実績のある点検ロボットはステータ側に磁力で貼り付き，移動しながら点検を行う。一方，大容量発電機では，効率良く回転子を冷却するために固定子鉄心内面にセグリゲーティングバッフル（Fig. 3参照）を設置しているが，これが点検ロボット移動の障壁となり，点検ロボットによる発電機点検実施の対象外となっていた。

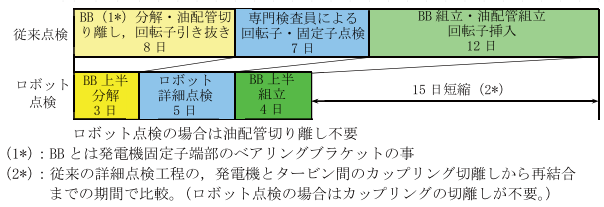


Fig. 2　An example of inspection time reduction

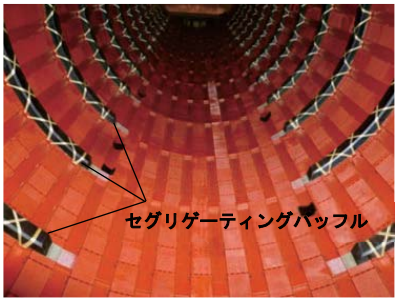


Fig. 3　Segregating baffle

今回開発した新しいロボットは，固定子鉄心内面をロボットから伸びた３本の腕で押し，ロボットを回転子側に押し付けながら移動し，更にバッフルを乗り越える時に腕を１本ずつ折り畳むことで，バッフルを回避しながら前進することができるため，セグリゲーティングバッフルを設置した大容量発電機の点検実施が可能となる。

更に，この新しいロボットは，液体媒質を使用しないUT（Ultrasonic Testing）技術を備えることで，ロボットによる回転子構造物の非破壊検査実施を世界で初めて

原稿受付　2019年11月10日
＊1　東芝エネルギーシステムズ㈱京浜事業所
〒230-0045　横浜市鶴見区末広町２－４
E-mail: hitoshi1.katayama@toshiba.co.jp

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

可能とした。これにより，発電機の詳細点検全てが回転子を引き抜くことなく実施出来ることになる[1]。

2．発電機点検ロボット

これまで実用化されている発電機点検ロボットは，回転子と固定子間のエアギャップ間を走行し，発電機の回転子と固定子を検査するタイプのものである。それらロボットは，大きく分けて３つのタイプがある。

一つ目は，ロボットに搭載された一本の腕で固定子鉄心を突っ張り，回転子表面を走行するロボットである。

二つ目は，磁力で固定子鉄心の内表面に貼り付き，固定子のコイルスロットをガイドにして進み，検査を行うロボットである[2],[3]。

そして最後に，三つ目は，ガイドアームをエアギャップに差込み，アームに沿ってエアギャップ内を進みながら点検を実施するロボットである。

大型火力向けの大容量発電機には回転子の冷却性能を向上するために固定子鉄心内面にセグリゲーティングバッフルを設置してある機種があり，このセグリゲーティングバッフルは，上記の３タイプのロボットにとっては走行上の大きな障壁となっている。

一つ目に挙げた回転子上を走行するロボットは，固定子鉄心下部のセグリゲーティングバッフル切り欠き部を使って，軸方向に移動し検査をすることができるが，完全リングタイプのバッフルを有する発電機の検査は実施することが出来ない。

今回開発したロボットは，ロボットに設置された３本の腕を一本ずつ折り畳みながら走行することで，セグリゲーティングバッフルを回避しながら走行するため，完全リングタイプのバッフル設置機でも発電機の検査を実施することが出来る。

また，液体媒質を使わない新しいUT技術の開発により，回転子の楔とティースのUT検査をロボットによって実施出来き，回転子抜き無しのロボットによる完全な発電機詳細点検実施が可能となる。

更に，検査と診断を，開発したアルゴリズムで実施することで，専門検査員と同等の品質検査をロボットで実施出来る様にしたため，ロボット検査時に専門検査員が同行する必要がなくなることから，春や秋の定検時期の検査日程の調整がしやすくなるというメリットも生まれる。

3．開発したロボットの特徴

今回開発したロボットには下記の特徴がある[4]。

① セグリゲーティングバッフルの有無に関わらず，発電機点検が可能。

② 回転子，固定子のVT（Visual Testing）検査，固定子コイル楔緩み検査，鉄心EL-CID（Electro-magnetic Core Imperfection Detection）検査，回転子コイル通風孔詰まり検査，回転子UT検査が実施可。

③ 走行，検査，判定を自動で実施。

3.1　開発ロボット外観

開発したロボットの寸法はFig. 4に示す様に，長さ710mm，幅400mm，高さ38mmとなっている。

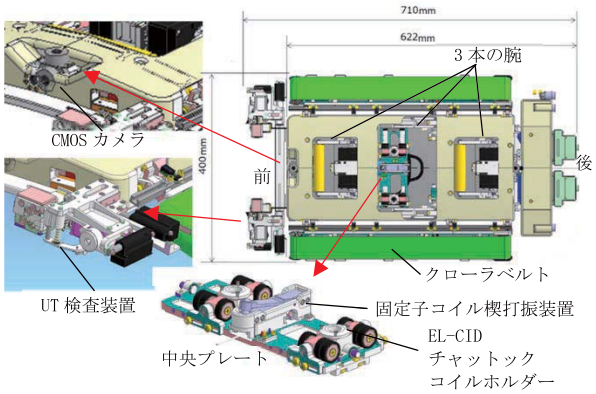


Fig. 4　Generator inspection robot

点検ロボットは，筐体上部に固定子鉄心側に伸ばす３本の腕を有し，中央の腕の上には，EL-CID用チャトックコイルホルダーと固定子コイル楔の打振検査を行うハンマをセットする中央プレートが設置されている。更に，回転子UT検査装置をロボットの前面に設置することが出来る構造となっている。

また，ロボットは，データベースへ事前に入力された発電機寸法データを使い，回転子または固定子上の検査位置へ自動的に移動し，検査を実施する。

3.2　ロボットステーション

ロボットは，検査ロボット自体とFig. 5に示すロボットステーションから構成されるシステムとなっている。ステーションは回転子の両端に設置されるエンドリング上に設置される。

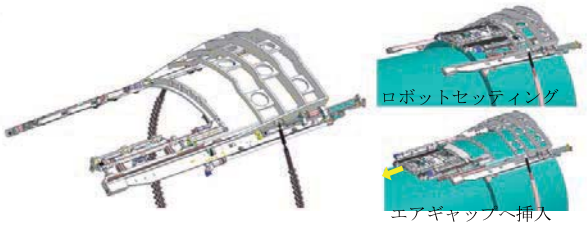


Fig. 5　Robot station

ステーションはロボットの発電機エアギャップへの挿入・取り出し・周方向搬送を担う装置となっている。また，ステーションは，データベースへ事前に入力された発電機寸法データを使い，エンドリング上を回転して，ロボットを周方向の検査位置へ自動搬送することが出来る。

3.3　ロボット走行技術

セグリゲーティングバッフルの有無に関わらず，ロボットをエアギャップ内で走行できるようにするため，

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

ロボットは回転子外表面を走行するタイプとした。回転子表面走行を実現するために開発した技術を以下に示す。

3.3.1　固定子鉄心押し腕　当初，ロボットは磁力を利用して回転子表面に吸着して走行するタイプで開発されていたが，様々なタイプの表面形状をした回転子に吸着するには，十分な磁力が得られず，特に，セグリゲーティングバッフルを有する，ダイアゴナルフロー型回転子の様な，凹凸が多い表面を有する回転子へ吸着しながらの走行は不可能と判断された。その結果，ロボット上部に設置した腕で固定子鉄心を押し，ロボット本体を回転子に押し付けながら走行するタイプにて開発を進めた。

腕を使ったロボットの場合，ロボットの姿勢を安定して保つためには，少なくとも２本の腕で鉄心を押し続ける必要があり，周方向のどの位置に於いても，例えばバッフルを乗り越える時も，必ず２本の腕でロボットを支えておく必要があった。その結果，ロボットにはFig. 6に示す様な３本の腕を設置することにした。

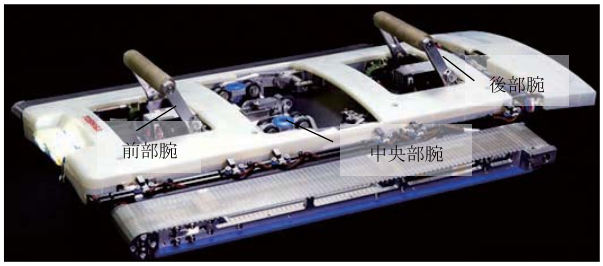


Fig. 6　Robot with 3 arms

また３本の腕の内，前部と後部に設置された腕は，突然ロボットへの電力供給が途絶えた時でも，ロボットが滑り落ちたりしない様に，スプリングでロボット上部に常に押し上げる機構とした。

更に，ロボットの回転子表面の摩擦力は，その周方向位置によって変わることから，走行のための十分な摩擦力を得るためには，ロボットの周方向位置により腕の押し付け力を変える必要がある。そこで，前後２本の腕はスプリングにプラスしてモータによって，その押し付け力を最適にコントロール出来る様にした。また，中央の腕は，エアシリンダーにて押し付け力を制御出来る様にし，エア供給がなくなった場合は，スプリングによりロボット本体へ格納する機構とした。

固定子コイル楔点検用の打振ハンマと鉄心EL-CID検査用チャトックコイルは，中央部腕に設置する中央プレートに取り付ける構造とした。

ロボットはバッフルを通過するために，Fig. 7に示す様に腕を１本ずつ折り畳みながら前進していく。ロボットに取り付けたセンサによってバッフルを自動検知し，自動で腕の折り畳みと跳ね上げを行いながら前進するシステムとした。これにより操作員がバッフル回避の操作をすることなく，発電機の検査を実施することが出来る。

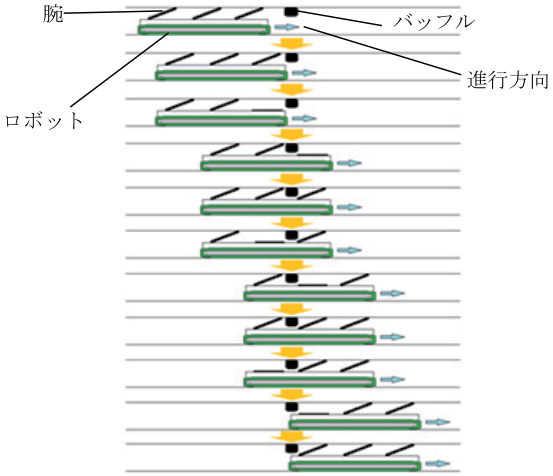


Fig. 7　Crawling with overpassing baffle

3.3.2　自動直進走行システム　ロボットは，発電機の軸方向に走行しながら回転子と固定子の検査を実施した。

ロボットの走行用にはエンコーダを備えた２つの独立制御可能なDCモータをロボット筐体の両側へ設置した。これらのモータは，開発した自動直進走行アルゴリズムによって個々にコントロールされる。

開発した自動直進走行アルゴリズムは次の制御から成っている。

① カメラで撮影された固定子コイルスロットのエッジ部の１点を走行基準となる直線の片端として定義。
② ①で定義した点から離れた，同じスロットのエッジ部の点を定義し，２点を結ぶ直線を定義。
③ 定義された直線とロボット軸の幾何学情報をプログラムで自動認識。
④ 定義された直線とロボットの軸を一致したままとする様に筐体両側のモータ回転速度を個別に制御しながら走行。

ロボットは，新しい自動直進制御アルゴリズムと，高摩擦力を備えたクローラベルト，更に固定子鉄心を押し付ける３本の腕の最適圧力制御により，発電機のどの周方向位置にあっても，自動的に発電機の軸方向に直線走行をすることが可能となった。

3.4　ロボットに搭載した計測技術

ロボットには新しく開発した計測システムと診断システムを搭載した。このシステムにより専門検査員と同等の検査品質を確保することが出来る。

以下に検査技術に関して説明する。

3.4.1　回転子・固定子のVT検査　ロボットは前方に３台のカメラ，後方に１台のカメラを設置している。検査に必要な明瞭な映像を得るために，カメラにはFig. 8に示すLEDを備えたCMOSセンサーカメラを採用した。

前方３台のカメラは，ロボット進行方向前方，下方，上方の３方向を撮影する。(Fig. 9参照)

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

Fig. 8　CMOS sensor camera

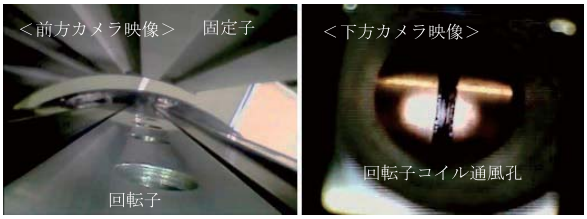


Fig. 9　View on forward & downward

前方カメラでは回転子と固定子の表面状態の検査を行う。下方カメラでは，回転子表面の詳細検査と回転子コイル通風孔の孔詰まりの有無を検査する。
上方カメラは，固定子内表面の詳細検査及び，自動直進制御のための固定子コイルスロットのエッジ部検出を行う。また，ロボットが後方へ移動している場合は，後方カメラはロボット進行方向である後部側の確認に使用される。

また，開発したロボットは，回転子表面を走行する新しいシステムを備えたことで，回転子や固定子の任意の位置を走行することが出来るため，固定子検査のための最適位置，及び回転子コイル通風孔検査のための最適位置に移動することが出来る。

更に，回転子コイル通風孔検査では，Fig. 10に示す新しく開発した孔詰まり自動診断システムにより，通風孔の検査毎に孔詰まりの有無を判断して自動診断を行い，検査結果を記録することが出来る様にした。

通風孔詰りの自動診断には，通風孔の底まで照明を当てて写真を撮影する必要があることから，新しくLED付きCOMカメラシステムを開発した。また孔詰り有無の判定には二値化処理した画像データを使い通風孔にある異物等の有無を自動で判断するアルゴリズムを開発した。

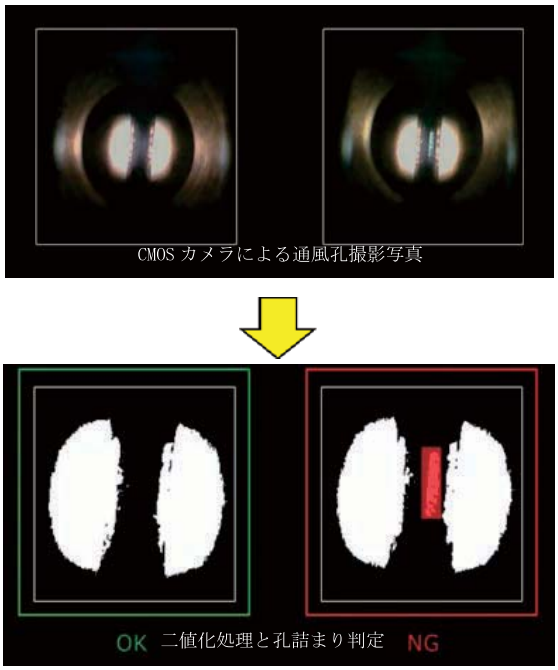


Fig. 10　Automatic diagnostic of ventilation hole

3.4.2　固定子コイル楔緩み診断　固定子コイル楔緩み診断には，新しく開発した打振ハンマと，打振音を高精度に分析する音響分析アルゴリズムを用いている。(Fig. 11参照）この新診断システムは，専門検査員が行うハンマ打音での楔の緩み診断方法をヒントに開発したもので，専門検査員と同等の検査品質レベルを確保することに成功した。

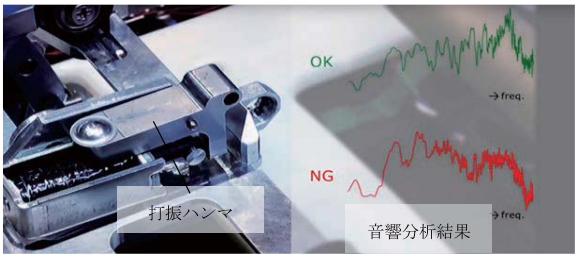


Fig. 11　Tapping hammer & Acoustic data analysis

打振ハンマはソレノイドコイルで駆動され，良質かつ診断に必要な十分な音響エネルギーを得るため，材料にステンレス鋼を選定した。

また，ハンマは，ソレノイドコイルのエネルギーを効率的に打振エネルギーに変換できる最適な形状とした。

音響解析では，打音の周波数特性を分析することで，高精度な診断を達成している。

3.4.3　固定子鉄心検査　ロボットに取り付けた前方／上方のCMOSカメラとEL-CID検査によって，固定子鉄心の高精度な検査が可能となる。

ロボットは走行しながら前方と上方カメラで固定子鉄心内表面を撮影し，ロボット操作員がディスプレイ上に映し出された映像を確認することで，鉄心の傷や異物等

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

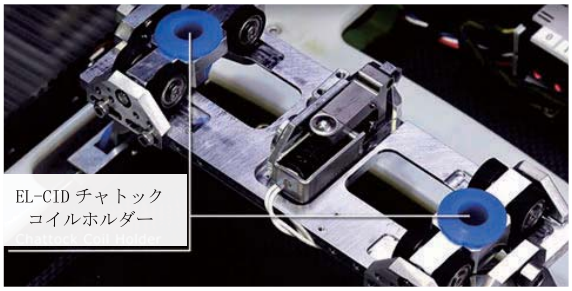


Fig. 12 Chattock coils holder

の有無を確認する。カメラ映像はデータベースに記録され，詳細分析や確認が必要な場合は，専門検査員へデータを転送し確認することが出来る。

また，Iris社の提供するチャトックコイルをFig. 12に示すホルダーに取付ける事で，EL-CIDテストによる鉄心検査を実施する事が出来る様にした。

3.4.4　回転子コイル楔と回転子ティースのUT検査

UT検査は検査探傷子から発信される超音波を検査体へ伝達させるため，探傷子と検査体間の隙間に機械油などの接触媒質を塗布した状態で実施するのが通常の方法で，これまでは回転子を引き抜かない状態では実施出来なかった。

回転子を引き抜かない状態で，回転子表面に接触媒質を使った場合は清掃が難しいことから，異物残存の恐れが高く，ロボットによる回転子のUT検査は実質的には不可能とされてきた。

今回，探傷子と検査体間の隙間を埋めるため，接触媒質の代替としてゲルを使う技術を開発した。ゲルは，今まで接触媒質不要のドライカップリングとして利用されているようなゴム系の材質とは異なり柔軟性が高いため，回転子表面へわずかな力で押し付けることで，超音波を回転子へ伝播させることが可能である。また，ゲルを探傷子へ設置する技術を共に開発したことで，回転子を引き抜くことなく，ロボットによる回転子のUT検査が可能となった。

また，通常UT検査は探傷子を前後左右に走査させ，検査を行うが，ゲルの粘着性の影響で走査が難しいため，Fig. 13に示す「多重チャネル超音波探傷子」を用いることで，走査無しに高範囲のUT検査を実現した。

ロボットによる回転子のUT検査が実現したことで，これまでロボットカメラによる目視検査では発見が難しかった回転子楔やティースのき裂を，回転子を引き抜くことなく，高精度で検査することが可能となった。

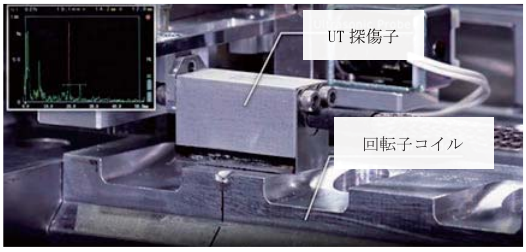


Fig. 13 Developed UT probe

UT検査の実施には超音波探傷子を検査位置に高精度で設置する必要がある。ロボットはデータベースの発電機寸法を基に検査位置まで自動で移動するが，回転子の楔は軸方向に若干の遊びがあり，正確な検査位置が計算できないことから，超音波探傷子の設置を自動で実施することは難しいと判断した。

そこで，超音波探傷子の近辺にカメラを設置し，探傷子を目視で確認しながら検査位置へ微調整移動できるシステムを開発し，Fig. 14に示す様にロボットの前方に設置することにした。これにより，ロボットを使った高精度な回転子コイル楔とティースのUT検査実施が可能となる。

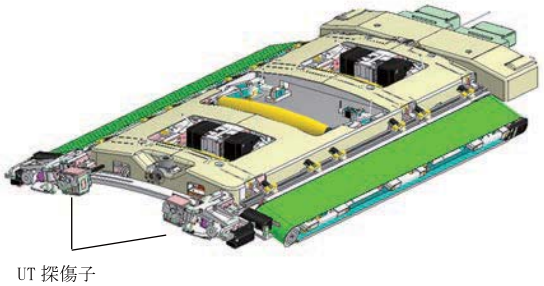


Fig. 14 Developed UT system on robot

3.5　自動検査・自動診断

開発したロボットはロボット操作員による検査品質のバラつきを抑えること，また専門検査員が同行することなく高品質の検査を実施できるようにするため，検査位置への走行・検査の実施・検査結果の診断を自動で行うシステムを開発した。

ロボット操作員は初期設定を行うだけで，ロボットが自動で検査位置まで移動し，検査を行い，診断結果を操作PCへ表示（可視化）すると共にデータベースに保存するため，検査毎に診断結果を確認しながらロボットによる発電機の検査を進めることができるようになった。

このように，検査員によるロボット操作を最小化することで，検査時間の短縮を図ると共に，人為的ミスによる後戻りや検査の抜けなどが無い，リアルタイムで検査結果を確認できる，高品質な検査が実現できた。

自動走行のためには発電機の固定子と回転子の組み立て状態での寸法データから，自動走行に使うデータベースの作成が必要になる。自社設計の発電機は設計データがあることから，容易にデータベース作成が可能であるが，自社以外の発電機の場合には検査前に事前にデータベースを作成することが難しいため，実際の検査前にロボットを手動で走行させ，固定子と回転子の寸法を計測してデータベースを作成するプログラムを開発した。この寸法計測プログラムを使うことで，自社以外の発電機の点検に於いても，自社製と同様の検査品質を確保できることになる。

また，データベースがそろっている発電機は，ロボッ

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

ト検査に要する時間を大まかに把握することができるようになっている。

4．まとめ

発電機のロボットによる点検は，全世界において現在急速に普及している。ロボット点検技術は，定期点検の日程短縮となることから，発電所運営側には経済的メリットがあると思われる。また一方で，発電機メーカや検査会社の専門検査員不足を補う１つの解決策になり得る。

また近年，稼働率向上の為に，回転子引き抜きを伴う詳細点検の周期延長が実施され始めた。この周期を基本としたメンテナンスであるTBM（Time Based Maintenance）の場合，点検周期が長くなると，点検時に発見される不適合が重度となる可能性が高まり，その対策のために計画外の点検期間延長が必要となる等の稼働率低下に伴う収益低下のリスクが高まる。

ロボットによる点検は点検時間が短いことから，これまで実施出来なかったバルブ点検などの短い点検期間内での発電機詳細点検が可能となることから，これまでよりも詳細な発電機の状態データから，計画的なメンテナンスであるCBM（Condition Cased Maintenance）を行うことが可能となり，計画外停止等のリスクの回避へつながり，稼働率向上に寄与できると考える。

今回開発した発電機点検ロボットには，新しい走行技術や検査・診断技術が適用されており，従来よりも操作性が向上すると共に高精度検査が可能になった。これにより，ロボットによる発電機点検の促進に寄与できると考えている。

参考文献

(1) Working Group A1.23 CIGRE. “State of the Art and Capacity for Robotic Inspection of Turbogenerators, August 2012.

(2) J. Willem “Turbo Generator Testing with the Rotor in Situ”（IMechE, UK. March 2019）.

(3) F. S’ Agostino “Life Cycle Maintenance Cost Improvement Using Innovative Technology Implementation for Generator Robotic Inspections”（IMechE, UK. March 2019）.

(4) T. Ishikawa “Robotic Inspection Technology for Turbo-Generator”（IMechE, UK. March 2019）.

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

特集：発電機

内陸火力発電所に適した発電機の納入事例

Delivery Case of Gas Turbine Generator for Inland Thermal Power Plant

中山 大樹[*1]　水本 貴之[*1]　鈴木 亮輔[*1]　谷藤 怜[*1]　木村 誠[*1]
NAKAYAMA Hiroki　MIZUMOTO Takayuki　SUZUKI Ryosuke　TANIFUJI Satoshi　KIMURA Makoto

キーワード：ガスタービン発電機，コンバインドサイクル，内陸火力発電設備，輸送制限，現地製作
Key Words：Gas Turbine Generator, Combined Cycle, Inland Thermal Power Plant, Transportation limit, Onsite Manufacturing

1．緒言

ガスタービンと蒸気タービンから構成されているコンバインドサイクル発電方式は，発電効率が良く，環境負荷が低いという利点があり，近年，広く採用されその重要性は高まっている。そのような大型火力発電所は，蒸気の冷却に海水等を用いる水冷式を採用しているため臨海部に立地が適しているが，臨海部では地震や津波に遭う危険リスクが伴う。そのため，これら大型発電における自然災害に対する電力安定供給対策が国内での専らの課題となっている。これに対して，内陸火力発電設備は，従来型の大規模発電所が立地する臨海部と比較して地震発生確率が低く，地震に伴う津波被害にあうことが無いため，震災時においても電力を安定的に供給できる可能性が高い。このため，内陸への大型火力発電設備の設置は，臨海部で発電される電力への依存度が高い首都圏全体にとって分散立地により電力の安定供給に貢献し，貴重なバックアップ電源となることが期待される。

このたび富士電機が，国内初となる内陸大型ガス火力発電設備である株式会社コベルコパワー真岡様　真岡発電所　2×624MWコンバインドサイクル発電設備一式をEPCとして請け負った。

本プラントは，内閣官房と経済産業省により，国土やエネルギー基盤強靭化に関する先導的な事例として選ばれており，地震や津波といった自然災害リスクが低く分散立地の大型電源としての意義を持っている。

本プラントでは，当社のガスタービン用発電機（以下GTG）2台と蒸気タービン用発電機（以下STG）2台の合計4台の発電機を納入した。

本稿では，内陸設置に対応したガスタービン用水素冷却発電機の特徴と適用技術について述べる。

2．プラント概要

本プラントは，最新鋭の開放サイクル1軸形ガスタービンを使用し，蒸気タービンは，ガスタービンとは別の軸系列で構成されている。発電機は，ガスタービン発電に間接水素冷却発電機，蒸気タービン発電に間接空気冷却発電機を用いている。内陸となるため，復水器は空冷式で水を冷却循環する大型空冷復水器を採用している。

内陸への発電所の建設に伴い，各種大型機器の現地製作が生じる。特に発電機に関しては内陸輸送による道路の許容荷重や輸送寸法制限により発電機を完成状態で輸送することができない。その対策として，内陸設置を可能とした新構造および現地製作に適した発電機の製品開発を実現した。本プラントの主な仕様をTable 1に示す。

Table 1　Plant outline

Generation system	Gas turbine combined cycle
Capacity	1248 MW（624 MW×2）
Fuel	City gas
Site area	ca. 9 ha
Major Equipment	Gas turbine, Steam turbine, HRSG, ACC

3．発電機仕様

ガスタービン発電機の主な仕様をTable 2に，断面図をFig. 1に示す。

4．内陸設置に対する発電機の課題

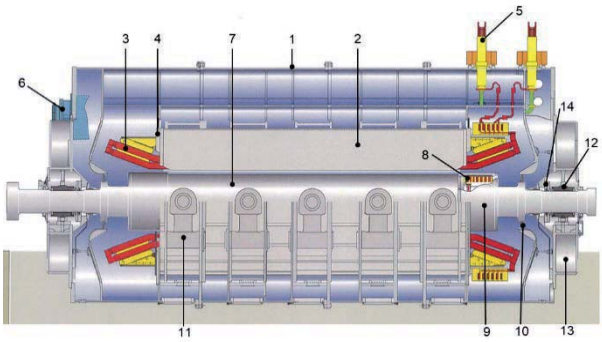
今回，内陸輸送による輸送制限は長さ26m，幅寸法

原稿受付　2019年11月29日
＊1　富士電機㈱　発電プラント事業本部
川崎工場　回転機部
〒210-9530　川崎市川崎区田辺新田1－1
E-mail: nakayama-hiroki@fujielectric.com

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

Table 2 Major specification of gas turbine generator

Output	470 MVA
Voltage	22 kV
Power factor	0.9
Frequency	50 Hz
Cooling type	Stator: H2 indirect, Rotor: H2 direct
H2 pressure	0.5MPaG
Speed	3000 min^{-1}
Excitation	Static
Total length	13.9 m
Total weight	456 t



1. Stator casing
2. Stator core
3. Stator winding
4. Pressure plate
5. Bushing
6. H2 gas cooler
7. Rotor shaft
8. Rotor winding
9. Retaining ring
10. Axial fan
11. Spring plate
12. Bearing metal
13. Bearing bracket
14. Seal oil ring

Fig. 1 Sectional view of gas turbine generator

3.5m，高さ4.68m，重量164tであった。この条件より，固定子は一体での輸送ができず，固定子側をいかに現地で製作するかが大きな課題となった。

この固定子の製作工程をFig. 2に示す。固定子の製作は「固定子枠製作」，中子製作（「固定子鉄心積み」，「固定子巻線組立」），固定子枠と中子の「ドッキング作業」からなり，各作業は大型の専用設備を用いた専用の工場で製作している。そのため，固定子を現地製作するためには，輸送制限に対応する新構造の開発のみならず，作業場所の確保や専用設備の導入などの作業設備を整え，その作業設備に対応した製作方法の計画，実施，導入を行うことが必須となる。また，現地で発電機を製作するためには，建屋建設段階での発電機現地製作が必要となる。そのため，雨水対策や粉塵対策等の環境対策を考慮する必要が生じる。

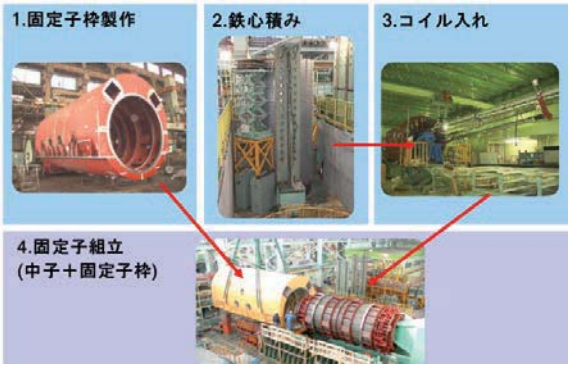


Fig. 2 Generator manufacturing process

これら，現地製作に関する課題と施策についてFig. 3に示す。また，次項より設計開発に関する事項，現地製作方法に関する事項を下記する。

Fig. 3 Topics for onsite manufacturing

5．課題に対する設計，新構造

5.1　固定子枠分割構造の開発

1）固定子枠分割構造

固定子枠は中子を覆うための大型部品（約５m×約５m×約10m，約85t）で，冷媒としての昇圧された水素ガスを保持すると共に，冷却経路を形成するために内部構造が複雑となっている。水素ガスは冷却性能に優れる一方，酸素との混合により爆発しやすい性格を有するため，固定子枠には爆発圧に対して十分な強度と，水素ガスに対する完全な気密性が求められる。

固定子枠の製作は「製缶（溶接）」，「機械加工」，「組立」の３つの作業工程からなる。現地にてこれら全ての作業工程を工場と同様の作業方法で実施できれば，製品として問題とはならないが，製品の計画段階では現地の作業環境の程度が不明確であるため，製品品質の低下や，問題が生じたときの現地工程のリカバリーの難しさといったことが大きなリスクとなる。そのようなことから，現地作業を必要最小限に抑えることが，製品設計の上で

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

最も重要であった。そこで，Fig. 4に示す現地作業を極力簡便化した「固定子枠の分割構造」を開発した。

本構造の特徴は，それぞれ長手方向に４分割した固定子枠をボルト締結により一体化するもので，現地では固定子枠の縦積みによる組立と，固定子枠内部にある一部部品の溶接のみで製作できる構造となっており，現地作業の低減を図っている。

固定子枠の分割部はFig. 5に示すように，分割フランジの内側を溶接することで水素ガスをシールする構造としている。また，気密性に対する信頼性を向上するため，外径側にOリングを配置し２重の気密構造としている。その他，経年劣化などによるシール性能の低下を考慮し，万が一の場合にも追加の処置ができるよう合計３重シール構造を採用した。

Fig. 4　Block Stator frame

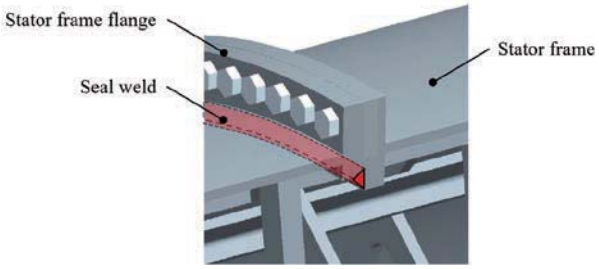


Fig. 5　Detail of block stator frame flange

Fig. 6　180 type transporter

Fig. 7　Stator frame transportation style

Fig. 8　Stator core

２）分割固定子枠の輸送

今回の輸送には，固定子枠のような大型製缶物を輸送可能なFig. 6に示す「180型輸送トレーラ」を採用し，その車両寸法に合わせてケーシングの分割寸法を決定した。実際に，分割固定子枠の輸送は，輸送制限寸法に収めるため，Fig. 7に示すよう分割固定子枠を正規据付向きから90度回転した状態にしている。180型輸送トレーラへは，ケーシングの側面に輸送用の脚を４点設け，180型輸送トレーラの枠に固定された状態で，最終的に，海上及び陸上輸送を考慮した防錆処置を実施した上で輸送される。

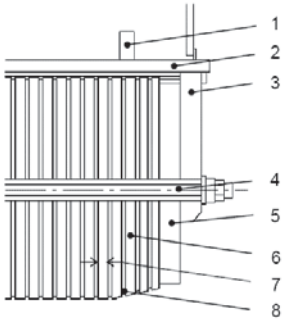
5.2　固定子鉄心の端部ブロック固め構造の採用

固定子鉄心は，電磁鋼板をセクター状に打ち抜き(Fig. 8)，バリを除去した後に絶縁ワニスを塗布して，1/2ラップさせて数十mmのブロックに積層される。積層方向のブロック毎にダクトピースを配置し，冷却のための通風ダクトを形成する。ブロックとダクトピースを積み上げ形成された鉄心長は約６mとなる。

固定子鉄心は，数万枚の電磁鋼板を積層した構造物であるため，強固に締め付ける構造とする必要がある。このため，鉄心の両端に配置しているプレスリングと周上に配置する締付スタッド及び鉄心取付梁により強固に締め付け，更に外周側からリングで固定する構造を採用している（Fig. 9)。このように固定子鉄心積み製作は，「鉄心積み」,「鉄心締め」,「固定部品の取付」から成る。

本プラントでは，輸送制限から固定子完成状態での輸送ができないことから現地での固定子鉄心の積層作業を行う。通常工場で製作する場合，固定子巻線と鉄心を一体で絶縁樹脂を含浸する全含浸絶縁システムを採用している。全含浸は鉄心と巻線，くさびの間に樹脂を充填させ強力に固着することでゆるみを防止している。全含浸設備がない現地での鉄心積層作業をする場合，端部の内

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.



1. Support ring
2. Core fix key
3. Pressure plate
4. Clamping stud
5. Clamping finger
6. Stator core
7. Core Block
8. Duct piece

Fig. 9 Stator core end structure

径歯先部のゆるみ防止対策として樹脂固め（１セクター対して樹脂を刷毛塗りし積層後に硬化）を実施する必要があるが，納期から製作工期に制限がある。

このような背景から，「品質」，「コスト」，「納期」の観点から，鉄心の両端部は数ブロックを工場にて積層して，真空含浸するドーナッツ状のブロック固め鉄心構造（Fig. 10）を採用した。

Fig. 10 Block stator core

本構造は，積層した鉄心ブロック全体を樹脂に浸した後に加圧樹脂含浸をするため，通常採用している全含浸絶縁システムと同等の樹脂固めの効果を得ることができる。これにより，経年的な鉄心の緩みを防止し，漏れ磁束による鉄心端部にかかる積層方向の電磁力に耐えうる構造とした。

また，これらドーナッツ状のブロック固め鉄心を工場で製作した状態で現地に納入することで，現地鉄心積み製作工期の短縮（刷毛塗り，乾燥の期間を削減）が可能となる。

６．現地製作に対する製造技術

製品製作を行う上で重要なことは，生産管理の管理要素である「Q：品質」，「C：コスト」，「D：納期」に加え「S：安全」，「E：環境」を満たすことである。そのため，現地製作でポイントとなるのは，この「S：安全」，「E：環境」の観点で，現場の作業環境を工場と同等以上に作り上げることである。そのため，工場と現地での作業環境の異なる点を詳細に洗い出し，これらについて，いかに工場の管理水準と同等にするか１つ１つ検討を行った。

今回，発電機の現地製作を現地の建屋内で行うにあたり，建屋の建設と同時並行で作業を始めなければならなかった。そのため，屋根や壁が無いといった建築中の建屋に対する雨水・粉塵対策に加え，土建側との作業スペースの調整，また，安全を考慮した専用設備の検討が重要な課題であった。以下に専用設備導入と環境対策について紹介する。

6.1　現地への専用設備の導入

通常，発電機固定子の製作には大型の専用設備を導入した工場が必要となる。専用設備の導入には，まず土建側やプラント全体の施工計画との調整により発電機製作の作業区画の確保が必要となる。次に，作業区画に対する最大荷重を算出し，各作業区画への耐荷重要求を行い，土建計画に反映してもらう必要がある。ここで重要なことは，プラント建設の初期である土建計画段階で詳細な要求を行う必要があるため，土建側との綿密な調整が重要となる。その際，建屋の定検等の耐荷重要求とも照らし合わせ極力追加要求項目を極小化することでコストの低減を図った。各作業工程に対する設備面については下記にて計画・実施した。

⑴　固定子鉄心積み作業の設備導入

鉄心積み作業は0.5mm厚さのケイ素鋼鈑を円筒状に６mの高さまで積み上げる構造であるため，作業高さとしてはフロアレベルから10m程度になる。そのため工場ではピット内で作業を行っているが，現地建屋内へのピット設置はコスト面や工程面から現実的ではなく，フロアレベルでの作業が条件となる。よって，高所作業に対する安全性を考慮した専用設備の導入が大きな課題となった。

設備設置に当たっては，まず専用設備を含めた総荷重を洗い出し，作業区画ごとの耐荷重変更の要求・設定を行った。また，本設備設置にあたっては部品積み定盤上の水平度だけでなく直角方向の定盤も精度良く管理する必要がある。よって，埋込金物を設置し，埋込金物上で各定盤を微調整できる構造とした。安全面については，高所作業となることから積み上げる製品（鉄心）の周囲に転倒防止の支柱を入れ耐震強度0.3Gに耐えうる構造とした。また，スライド手摺りやスライド幅木等を各高所作業となる箇所に設置し，高所からの転落や落下物に配慮した。

⑵　固定子巻線組立の設備導入

鉄心への固定子巻線組立作業は，円筒型で製作された鉄心の内径側へコイルを挿入するため天井クレーンでは作業ができず，専用のクレーン設備が必要となる。この専用設備は全長で20mほど必要となるため，建屋天井ク

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

レーン範囲外にも跨って作業が発生する。従って，本設備を導入する際の条件として天井クレーンの無い場所での設備組立や部品供給の方法を考慮した専用設備の計画，設計，導入を行った。

本設備は大型設備となるため，プラント側の各機器の設置場所にも跨って設備を設置する必要が生じる。そのため，プラント計画と埋込金物の配置可否や専用設備の設置期間等の調整を行った。

固定子巻線組立は１本当たり190kgの固定子巻線を100本程挿入する作業となるため，工程短縮の観点から回転台車や作業用昇降設備を導入して作業性を改善した。また，固定子巻線を鉄心内部へ搬送する装置の昇降にインバータ駆動方式を採用して微動調整を容易とした。

⑶　固定子枠と固定子中子とのドッキング設備導入

円筒形の固定子枠内部へ固定子巻線組立後の中子を挿入する作業（以降，ドッキング作業）によって固定子が完成となる。本作業に必要な設備は，中子の仮置き治具と天井クレーンとなる。今回，固定子完成後の重量が建屋天井クレーンの最大容量を超える問題があった。よって，本作業はパワージャッキシステム（以降，PJS）の導入を検討した。

PJSは，大型のジャッキを門型に配置してレール上を動かすことで大物品を吊り上げるユニットである。本ユニットは，大物の移動に使用するため細かな精度で動かすことができず，また走行方向のみの移動が可能となるものである。ドッキング作業にPJSを使用するに当たって注意すべき点はドッキング作業時のお互いの隙間が数ミリ程度となるためPJSの精度を超えてしまうことであった。

そこで，PJSで吊り上げた部品に対して相手側に微動装置を設けて横方向の位置調整を可能とした。

6.2　現地作業時の粉塵対策

発電機固定子は電気を通す部品となるため絶縁技術が施されており，製作時の粉塵対策が重要な課題となる。

建屋建設段階での作業となることから，防塵対策のみならず雨水対策や防錆対策が必須であった。そのため，作業毎に養生ハウスの設置を行った。

特に鉄心積み作業は，10mに及ぶ高所作業となるため耐震強度を考慮した大型の養生ハウスを検討・設置した。養生ハウスは，部品搬入出のため上部や側面の開閉構造を設けた構造とし作業性を良好にしている。養生ハウスの内部は空調設備を導入し，日々の温湿度管理により結露対策を行っている。また，粉塵計による粉塵測定を定期的に行い，工場の環境レベルを順守することで現地の品質管理を図った。

6.3　品質確保

現地での戻り工程の撲滅には「検討段階でのリスクの低減」や「現地での品質管理の確立」が重要となる。

前者のリスク低減については，現地環境を考慮した作業手順書を作成し，想定されるリスクを潰し込み，必要により設計計画へ反映し現地製作を考慮した構造とすることで現地作業のリスク低減を図った。また，可能な限り工場で製品を作りこみ，工場での組立確認を行うことで現地作業を想定し，更なるリスクの顕在化を図った。

後者の現地での品質管理については，現地でのデザインレビューや製品監査の体制を整え，各作業開始前には関係者でのレビューを行い工場と同様の管理体制を整えた。また，お客様とは御立合いだけでなく，細かい作業ステップごとに品質を確認する「顧客モニタリング」の機会を設定して細かな品質確認体制を構築した。

また，現地と工場間は情報の交換を密にするため，ウェブ会議による進捗状況確認や品質確認を行うと共に，IT機器を駆使してリアルタイムで製品状態に関する情報を共有した。

７．発電機現地製作の納入事例

7.1　固定子枠組立

固定子枠の組立は，各分割固定子枠を縦積みで組立作業を行っていく。その際，各分割固定子枠の機械加工位置を合わせ精度良く組立てることが求められる。これらの精度を出すためには，建屋床の水平度の管理だけでなく，各分割固定子枠の上下左右位置やそれぞれの周方向位置の緻密な調整が必要不可欠となる。そこで，これら作業が対応できるよう各種調整治具の開発や各高さでの安全対策を考慮した機内外の足場作成を行い，本作業を完遂した。Fig. 11に組立作業時の写真を示す。

Fig. 11　Stator flame assembly

分割固定子枠組立後は，一体となった固定子枠の横転作業を行う。横転は，通常，工場では天井クレーン２基を用いて行うが，現地に設置される建屋クレーンの仕様が固定子枠横転作業の要求事項に対して満足しなかった。そこで，屋外での横転作業を計画し，油圧クレーン２基を用いた横転をロジスティックス部隊と共同で検討した。そのときの実際の横転作業時の様子をFig. 12に示す。固定子枠の横転作業を屋外で実施するにあたり，固定子枠を建屋から搬出する際は，車両を含めた製品寸法高さが建屋の搬出口の高さ制限を超えることから，建屋建設側と搬出口の建設工程について事前調整を図りなが

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

Fig. 12　Overturn stator frame by two cranes

ら，本作業を行った。

7.2　固定子鉄心積み

鉄心積み作業は，6.1項に記載した設備を導入し作業を行った。Fig. 13に鉄心積み作業時の写真を示す。各定盤の水平度調整や垂直型の定盤の位置調整については微動装置を開発した。その結果，調整は工場管理値を十分に満足する結果となると共に，設備導入時の調整作業の簡素化につながった。

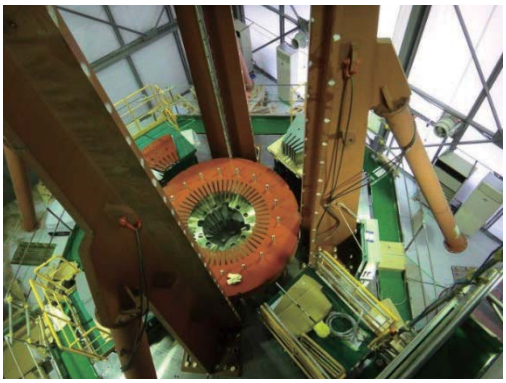


Fig. 13　Stator core assembly

7.3　固定子巻線組立

固定子巻線組立は，6.1項に記載した設備を導入し作業を行った。Fig. 14に固定子巻線組立作業時の写真を示す。本設備での作業範囲は建屋天井クレーンの可動範囲外となるため，移動式の設備組立用治具や部品の移送治具の開発により本作業を完遂した。

Fig. 14　Stator coil assembly by hanging tool

一方の安全面については，本プラントサイズに合わせた昇降足場の導入や手摺り付きスライド足場の設置等を行うことで安全強化を図った。また，養生ハウス内での溶剤塗布作業時は，養生ハウス内への簡易ハウスを設置し，排気装置の導入やエアーラインマスクによる環境・安全面への配慮を行った。

7.4　固定子組立

通常のドッキング作業の横行方向調整は天井クレーンで調整を行う。今回，PJSでの横行方向の調整ができないことを克服するため，仮置き治具や固定子中子を微動調整するための装置を開発し，ドッキング作業時の位置調整を行った。

PJSでの固定子中子の仮置き作業写真をFig. 15に，固定子枠のドッキング作業写真をFig. 16に示す。中子を仮置きする際の周方向の位置調整についてはPJSのパワージャッキの片側ジャッキアップ量を変化させることで中子を周方向へ回し，周方向の調整作業を実施した。また，固定子中子へ固定子枠を挿入する作業については，PJSの片側の進行方向の速度を変化させることで中子と固定子枠とのお互いの平行度を調整して挿入作業を行った。これら微動の治具やPJSでの微調整により作業を完遂した。

Fig. 15　Stator hoisting by PJS

Fig. 16　Stator flame assembly by PJS

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

8．まとめ

本稿では，内陸設置への発電機の導入事例についてガスタービン用間接水素冷却発電機に関する開発内容，現地製作内容を記載した。設計開発では，輸送制限に対する固定子枠の分割方式を開発し，また，鉄心積みに関する端部の技術向上の例を紹介した。現地製作の製造技術では，各種導入設備例や作業環境対策について紹介した。

これらにより当社は，内陸輸送に対する発電機の導入を可能にする技術を確立し，現地工程を順守し，発電機引き渡しを完了した。

今後もお客様のニーズに合わせた製品を供給するために必要な技術を開発し，社会に貢献していく所存である。

参考文献

(1) 池田忠司，武田淳一郎，山本隆夫，コンバインドサイクル発電設備. 富士時報，vol. 78, No. 2（2005）, pp. 116-120.

(2) 山崎勝，新倉仁之，谷藤怜，一軸式コンバイドサイクル発電設備用全含浸絶縁水素間接冷却タービン発電機，富士時報，Vol. 86，No. 2（2013）(2), pp. 113-117.

(3) 内閣官房国土強靱化推進室，電力インフラの強靱化に資する日本初の本格的な（120 万kW 級）内陸型火力発電所の建設，国土強靭化 民間の取組事例集（2015），pp. 61-63.

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

特集：発電機

4極突極形タービン発電機の開発事例紹介

Development of Salient Solid Type 4-Pole Turbine Generator

谷川 和哉*1　本間 優人*2　倉澤 拓也*3　村井 和也*4
TANIGAWA Kazuya　HONMA Yuto　KURASAWA Takuya　MURAI Kazuya

キーワード：タービン発電機，高効率，軽量化，4極
Key Words：Turbine Generator, High-efficiency, Light-weight, 4-pole

1．緒言

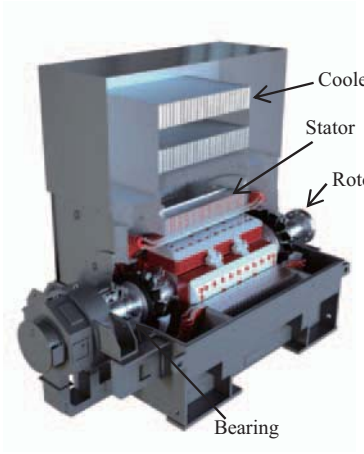
当社の4極タービン発電機には円筒形回転子を採用してきたが，2014年に製品競争力向上を図るため，突極形回転子を開発し，高効率・軽量化など大幅な性能向上を達成した。今回，更なる改良のために基礎技術の拡充プロジェクトを「骨太開発」と称し，そこで培った基礎技術を基に試作機を製作し，技術の実機適用を確認した。本稿では，4極突極形タービン発電機開発の概要を紹介する。

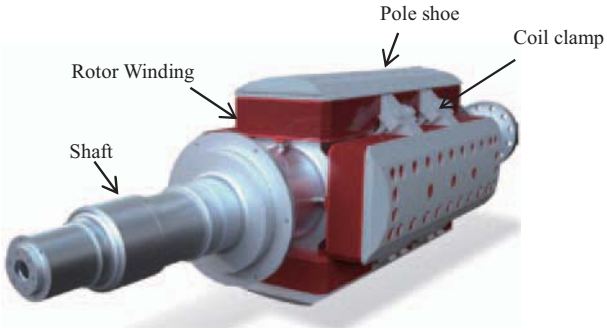
2．開発概要

Fig. 1に当社発電機の構造を示す。2014年まで当社で多く採用してきた4極タービン発電機では，回転子構造として，積層鉄心を用いた円筒形構造を採用してきた。しかしながら，積層鉄心を用いた円筒形回転子は，回転子鉄心の強度による出力増加の制約や高効率化の限界などの問題があり，それらの解決のため塊状鉄心の回転子（以下，「突極形回転子」とする）を用いた4極タービン発電機を開発した。Table 1に突極形回転子と円筒形回転子の比較を，Fig. 2に4極突極形タービン発電機（以下「突極形」とする）と4極円筒形タービン発電機（以下「円筒形」とする）の損失比率を示す。

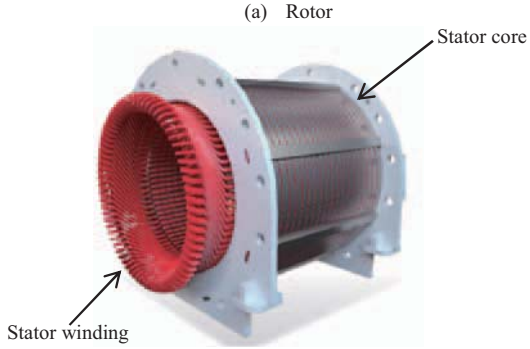
円筒形の回転子巻線は円周上に分布した溝に同心巻のコイルを配置しているのに対し，突極形は各磁極に集中的に電線を巻けるため占積率が良く，銅量を増やすことができる。このため界磁損失を大幅に低減できる。また電線を直接冷却できることから，冷却効率も格段に向上し，出力を増加することができる。円筒形から突極形に変更することにより，高効率・軽量化を達成した。今回の開発では，従来の突極形に対して更なる軽量化のために，主に冷却性能改善および損失低減技術の折り込み確認を実施した。

「骨太開発」により取り込んだ要素技術開発の成果を以下に示す。





(a)　Rotor



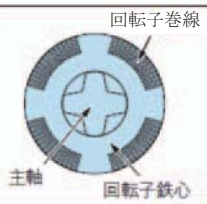
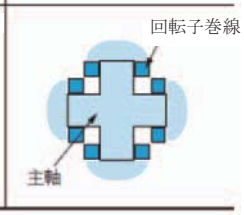
(b)　Stator

Fig. 1　Salient solid type generator structure（current model）

原稿受付　2019年10月25日
＊1　㈱明電舎 発電システム技術部
〒141-6029　品川区大崎2－1－1
E-mail: tanikawa-k@mb.meidensha.co.jp
＊2　㈱明電舎 知的財産部
〒141-8565　品川区大崎2－8－1
＊3　㈱明電舎 EV事業部開発部
〒409-3894　中央市中楯825
＊4　㈱明電舎 回転機システム工場回転機設計部
〒373-0847　太田市西新町127

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

Table 1 Comparison between the cylindrical rotor and the salient solid pole rotor

項目	円筒形	突極形
回転子構成	珪素鋼板積層	塊状（十字シャフト）
効率	相対的に突極に比べて低い	円筒に比べ0.4～0.5程度高い
短絡比	0.5程度	0.5程度
リアクタンス	過渡リアクタンスが小さい	過渡リアクタンスが大きい
回転子損失	界磁回路損が比較的大きい	銅量多く，界磁回路損が比較的小さい
界磁巻線	絶縁電線を同心巻き，鉄心と一体でレジン含浸	薄い銅板同士のロー付け必要
回転子冷却	絶縁電線で，間接冷却のため冷えにくい	裸導体で，直接冷却のため冷えやすい
風損	ダクトの影響を受け大	円筒形の約半分
危険速度（軸剛性）	小さい（積層鉄心）	大きい（十字シャフト）
回転子断面構造		

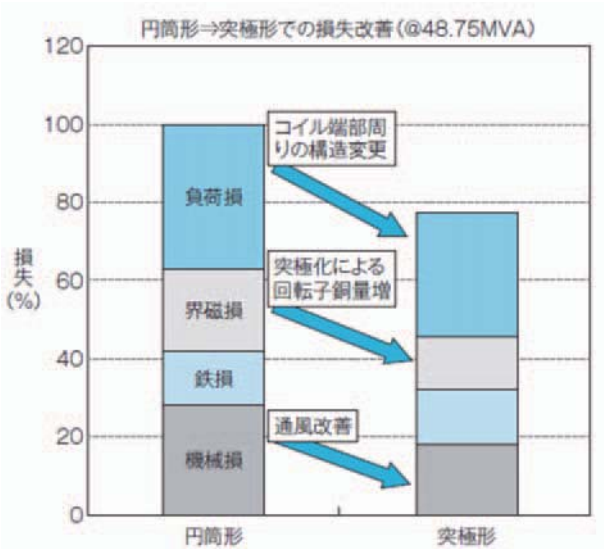


Fig. 2 Loss ratio of the cylindrical type and the salient type

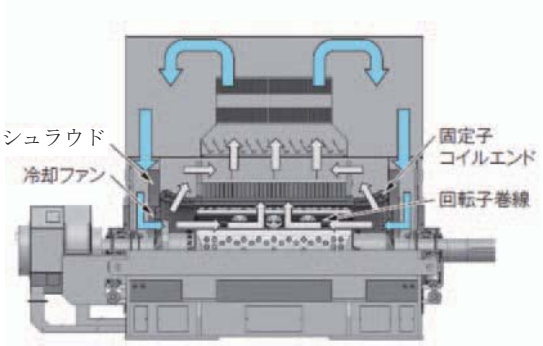
2.1　冷却技術の要素開発

発電機の軽量化のためには，冷却性能の向上が重要である。そのため，以下の開発を実施した。

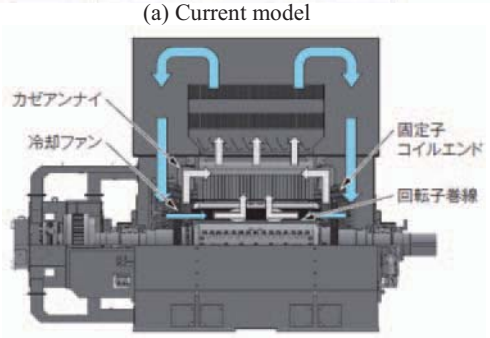
2.1.1　冷却構造変更　以下に，開発機における冷却構造の開発概要を示す。

(1)通風構造

Fig. 3 (a)に発電機冷却通風構造（突極形の従来機）を，Fig. 3 (b)に発電機通風冷却構造（突極形の開発機）を示す。回転子巻線の両隣に設けた冷却ファンによって，発電機内部を冷却風が循環する。当社の従来構造では，冷却ファンの外周に設けたシュラウドで冷却風を整流しているが，試作機ではシュラウドの代わりにカゼアンナイを固定子コイルエンドの外周部に配置し，また冷却ファンを固定子コイルの内周部に配置した。この配置変更で，発電機の軸方向長さを短縮することができる。この構造を採用することによる風量変化は，事前シミュレーションどおりの結果であり，良好な冷却効果が得られた。なお，冷却ファンが固定子コイルと近接するため，空間距離を十分配慮し，放電が発生しない距離を確保している。



(a) Current model



(b) Next model

Fig. 3 Ventilation path

(2)回転子冷却構造

Fig. 4に回転子コイルの積層構造を示す。回転子コイルはらせん状に積層した銅線の間に，レジンを含んだ薄厚の絶縁シートを挟み込んで，加熱プレス成型をしている。

突極形回転子の構造上，回転子巻線のホットポイント（高温部）の存在がある。Fig. 5に回転子巻線のホットポイントを示す。突極形回転子は，コイル押えの裏側の温度が高い傾向を示し，このホットポイント温度を下げることが発電機体格を決める上での課題となる。

骨太開発では，このホットポイント温度を下げるため

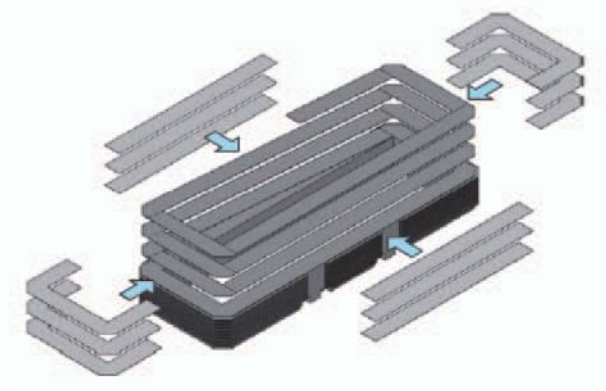


Fig. 4 Laminated structure of rotor coil

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

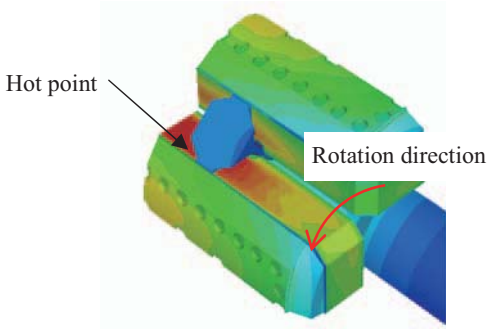


Fig. 5 Hot point of rotor winding

回転子巻線に通風口を設けるとともに，回転子コイルの許容温度を上げるため高耐熱の絶縁シートを採用した。Fig. 6に回転子巻線の通風口を示す。試作機では，通風口を設けることで，ホットポイント温度を低減した。また，通風口内部に実際に冷却風が流れていることを確認するため，極小の風速プローブを取り付け，設計通りの風速であることを確認した。また，試作機試験では，回転子巻線に熱電対を埋め込み，シミュレーションによる温度と実測値が同等であることを確認した。

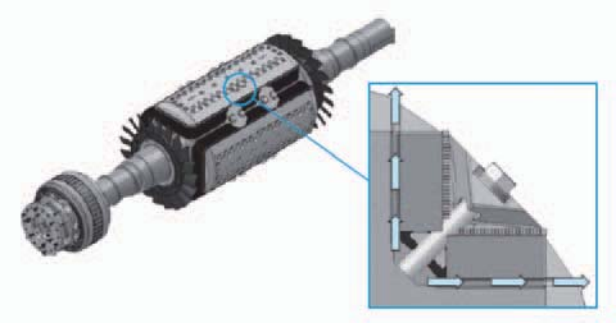


Fig. 6 Air path of rotor winding

2.1.2　解析精度の向上　通風構造の変化により，冷却風の流れが従来と大きく変化し，かつ限られた風量の中で最良の冷却効率を得ることが必要になった。そこで発熱と伝熱に関連する構成要素に対して，解析と実験を相互に比較しながら３次元全体解析の精度を高め，試作機設計と実機による冷却効果を検証した。以下に，PQ特性での検討を例として示す。

2.1.2.1　風洞実験による冷却ファン特性の確認　新構造の試作検証に先だって，解析結果を検証するため，基本構成をJIS B 8330に準拠した風洞装置を製作し実験した。Fig. 7に風洞装置の外観を示す。圧力測定は径方向と周方向の異なる複数の位置で，冷却ファンの上流側と下流側を測定した。風速の測定は熱線式風速計とピトー管を併用している。Fig. 8に風洞実験で得られたPQ特性の結果を示す。事前に実施した同モデルの３次元解析と比較している。実験では同一風量における圧力差はやや高い傾向が見られたが，風量と圧力差の変化，傾きは一致した。

Fig. 7　Wind tunnel experimental equipment

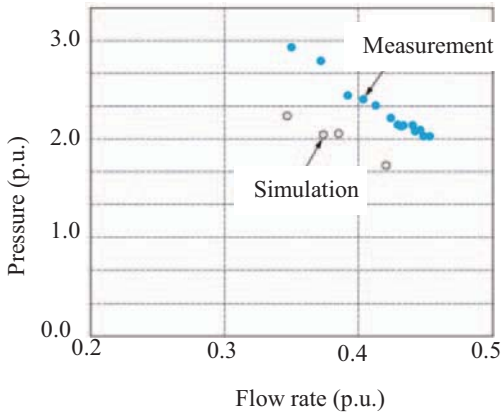


Fig. 8 PQ character result by wind tunnel

2.1.2.2　縮小模型実験　解析で得られた冷却ファンの周辺構造やハネ角度の変更による影響を検証するために，縮小模型実験装置を製作した。縮小にあたり，流動条件をできる限り試作機と等しくするため，冷却ファン周辺のレイノルズ数を合わせ，寸法は５分の１，使用する流体はフッ素系不活性液体，回転数は0.6倍とした。

冷却ファン・固定子コイルエンド・カゼアンナイなどの各構造は3Dプリンタを使用してナイロン樹脂で忠実に縮小再現した。これらを透明アクリル製の水槽で構成されたフレーム内部に配置した。Fig. 9に縮小模型実験装置の概要を示す。装置はPQ特性を取得するため，排出部水路内に設置した抵抗板の大きさを変えることで流路抵抗を変え，圧力と流量を計測する構造となっている。当初は，流量を通常の管状流量計で直接計測する計画であった。しかながら流体解析で，縮小模型に対して一般的な流量計では流路抵抗が大きく，その影響による不要な個所で逆流が生じることが分かった。そこで実験に影響を与えない個所で流速分布を測定し，計算から流量を得ることにした。Fig. 10に縮小模型実験におけるPQ特性（試作機換算）を示す。実験値は，上部水路の流速分布と冷却ファンの上流側固定子背面の圧力を測定して得たものである。これにより，ハネ角度を大きくするとPQ特性の流量・圧力とも増加する。実験と解析の比較では，解析結果の方が流量・圧力とも小さい。これは解析時間短縮のため，定常解析で行っていることによると考えられる。

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

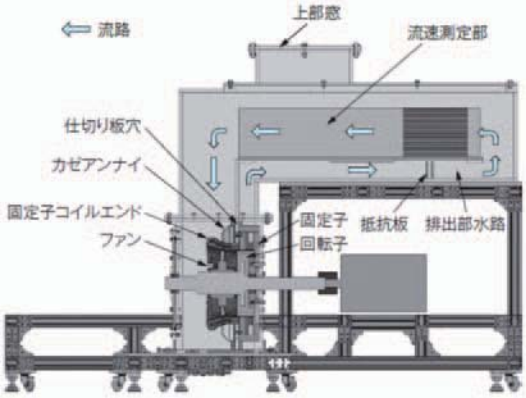


Fig. 9 Overview of miniature model experiment

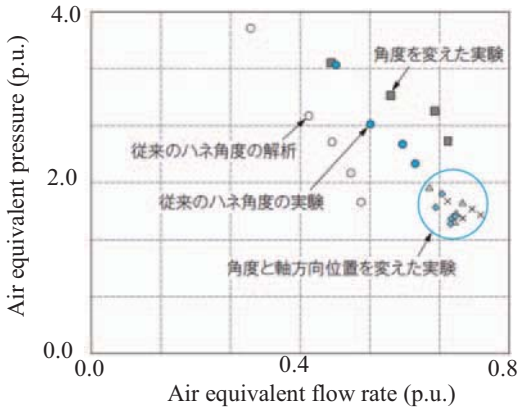


Fig. 10 PQ character result by miniature model

2.2　損失低減構造

巻線温度を低減するために，発電機を構成する各部位の発生損失を正確に予測し，把握することが重要である。従来の設計では類似構造の実測値に対し経験式を用いて傾向を確認し，損失予測を行っていたが，「骨太開発」では3次元有限要素法による解析を行うことで，損失の発生個所の特定および低減対策を実施した。試作機では，従来構造に比べ大幅な損失低減を確認した。

2.2.1　損失解析の精度向上　損失解析で損失の発生箇所を特定し，低減の対策箇所と方法を決定するため，解析の精度が非常に重要となる。

これまでの開発では，損失が大きいと想定される個所に絞って損失解析を行い，傾向を確認するにとどまり，実測値と比較できないなど不十分な点があった。

今回解析対象を機器全体に広げて損失分布を把握し，損失と実測値を比較して解析の精度を検証した。ここではいくつかの解析例を紹介する。

⑴固定子鉄心

Fig. 11に固定子鉄心に流入する磁束の概略を示す。従来，固定子鉄心の損失は，面内方向を流れる磁束による損失の検討にとどまっていた。固定子鉄心の端部や通風ダクト部では，固定子鉄心の積層面に対して垂直方向に流入する磁束が発生する。面内方向の磁束による損失は，薄厚の電磁鋼板を積層することで渦電流を分断して抑制

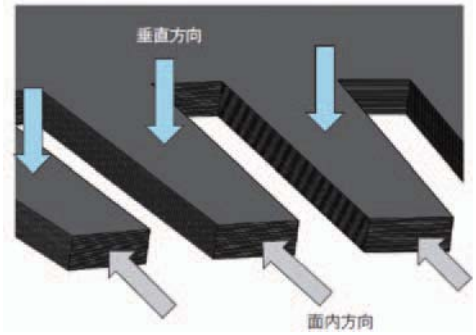


Fig. 11 Overview of magnetic flux flow to stator core experiment equipment

しているが，垂直方向の磁束は損失を抑制できないため，大きな損失が発生する。このため，鉄心端部および通風ダクト間の損失解析を行う必要がある。

Fig. 12に固定子鉄心の部分解析モデルを示す。ここでは，鉄心端部および通風ダクト間を模擬した部分モデルで解析することで，解析精度を向上した。

⑵回転子の磁極表面

発電機の構造を円筒形から突極形に変更した際に，回転子には塊状磁極を採用している。塊状磁極の場合，積層鉄心とは異なり渦電流の分断効果がないため，磁極表面に発生する損失は大きくなる。Fig. 13に磁極表面の解析モデルを示す。従来は解析モデルの規模が大きく，解析に非常に時間を要するため，ボルトの配置ごとに部分モデルを作成し，各モデルの解析値を合成して求めていた。しかし，1/2モデルにて解析を実施したところ，1/2モデルの解析では部分モデルよりも損失が多め

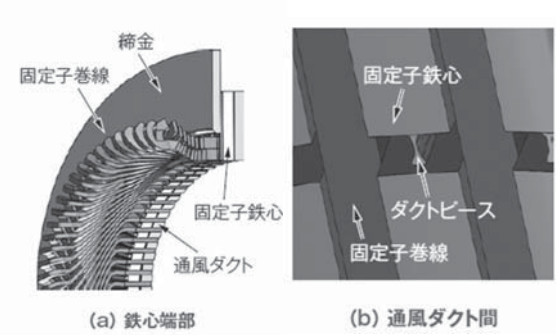


Fig. 12 Partial simulation model of stator core

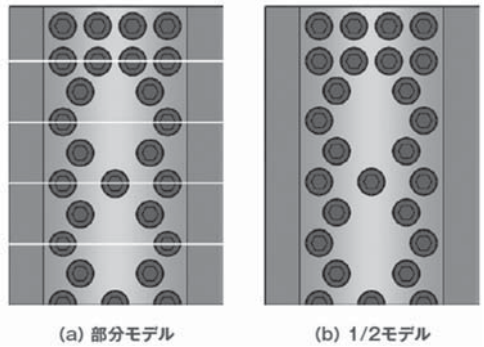


Fig. 13 Simulation model of magnetic pole

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

に計算されることが分かった。今回の開発では1/2解析モデルを使用することにより，解析精度の向上を図った。Fig. 14に磁極表面の解析結果を示す。

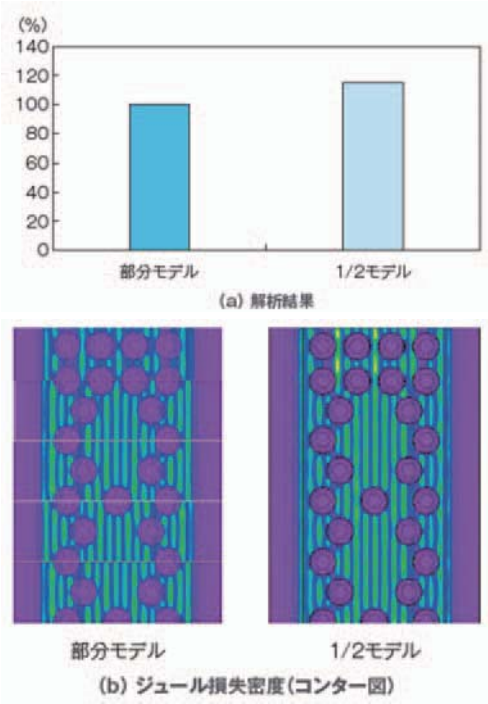


Fig. 14 Simulation model of loss simulation for magnetic pole surface

2.2.2　製造要因での損失検証　実際に発電機を製作する工程で，製造上の要因が損失に影響を及ぼすことがある。この製造要因で発生する損失は，解析だけでは求められない部分が多く，別途部分検証して結果を求めた。ここでは部分検証した事例を紹介する。

固定子鉄心に用いられる電磁鋼板は，打ち抜き加工で製造されるため，打ち抜き面付近がひずみ，残留応力が残る。電磁鋼板は，応力がかかると特性が変化し，磁気特性の劣化や鉄損が増加する性質を持つ。打ち抜き時のひずみによる損失増加は，解析から求めることが困難なため，基礎実験によって検証した。

Fig. 15に打ち抜き時の影響検証用試料を示す。幅の異なる5mmから100mmの間で複数の単板試料を用意し，各試料で電磁鋼板の磁化特性曲線（B-H曲線）・鉄損曲線を測定した。

Fig. 16に打ち抜き時のひずみによる影響検証結果を示す。打ち抜き幅が狭い，すなわち応力を受けている面の割合が大きいほど，打ち抜きの影響を受けて磁気特性の劣化，鉄損が増加する結果が得られた。検証結果から得られたデータを使用して製造要因で増加する損失を考慮し，解析精度を向上した。

他にも固定子鉄心は大きさの制約から周方向に分割したものを積み重ねて製造するため，分割した電磁鋼板の間にセグメントギャップと呼ばれる隙間が生じる。鉄心を通る磁束は，セグメントギャップを避けて積層方向の

Fig. 15 Test piece for effect verification by punching experiment equipment

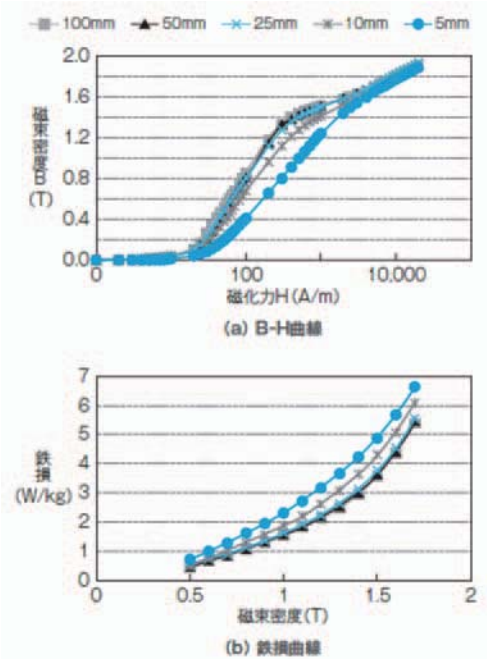


Fig. 16　Result of effect verification by punching

電磁鋼板を通過するため，局部的な磁束集中や電磁鋼板に対して垂直に磁束が流入することにより，損失が増加する。この部分は解析での評価が難しいため，簡易モデルを製作し，固定子鉄心の積層による影響を別途検証することで解析精度を確認した。

Fig. 17に固定子鉄心の積層による影響検証用試料を示す。

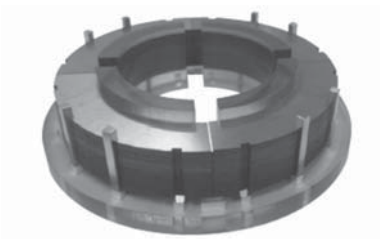


Fig. 17　Test piece for effect verification of laminated of stator core

2.2.3　損失低減検討　負荷損は，負荷銅損と漂遊負荷損に分けられる。ここでは，従来経験式で算定していた漂遊負荷損と鉄損について検討した結果について示す。Fig. 18に従来構造における鉄損・漂遊負荷損の内訳を

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

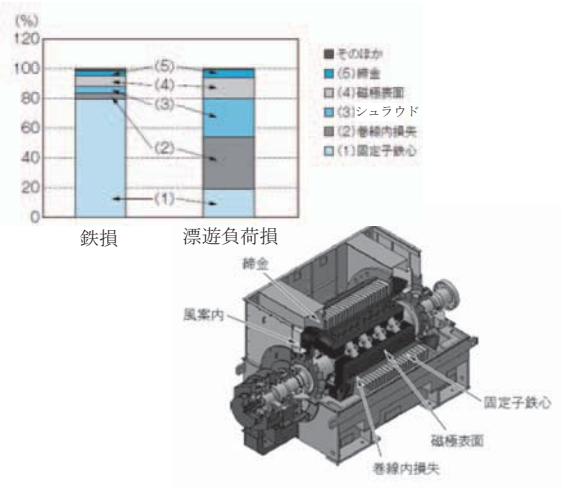


Fig. 18 Details of No-load core loss and stray loss at current machine

示す。解析結果から，(1)固定子鉄心，(2)固定子巻線内損失，(3)シュラウド，(4)磁極表面，(5)締金の順に損失の割合が大きいことが分かる。この結果から，損失の大きい個所の低減対策を，それぞれ解析を用いて検討した。ここでは，損失低減対策の具体例を紹介する。

損失低減の検討例として，固定子鉄心端部の面内渦電流損失の低減を紹介する。Fig. 19に固定子鉄心の解析による損失内訳を示す。無負荷時の固定子鉄心端部の損失は，固定子鉄心全体の16%と損失に占める割合が大きい。固定子鉄心端部は，前述のとおり固定子鉄心面に垂直に流入する磁束が存在し，損失増加の要因となる。鉄損は，回転子の磁極からの漏れ磁束によるものが主となる。従って，磁極からの漏れ磁束を低減できれば，損失も低減できるため，回転子の磁極からの漏れ磁束を低減する方法を検討した。

Fig. 20に検討前後の磁極端部の形状を示す。従来は加工の容易さの観点から，磁極端部の構造は平面に切り落とす形状を採用していた。今回の検討では，磁極端部の形状を曲面に変更した。また，新たに磁極表面との間に段差を設ける形状とした。曲面形状への変更および段差の追加は，ともに鉄心端部との空隙を従来よりも大きくすることで，磁気抵抗の増加を図り，漏れ磁束の抑制を狙ったものである。

Fig. 21に損失低減検討前後の磁極端部解析結果を示す。グラフは従来構造の解析値を100%とした場合の割合で示す。従来構造の損失値を解析結果からも，新構造では鉄心端部の面内渦損が従来よりも30%低減していることが確認できる。

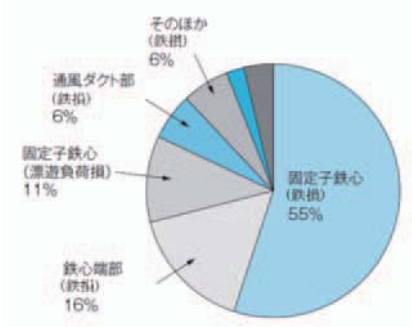


Fig. 19 Loss item at stator core by simulation

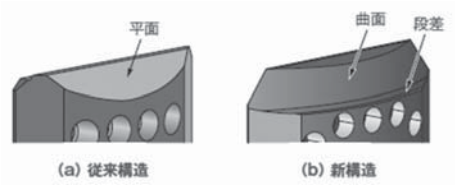


Fig. 20 Shape of rotor pole edge

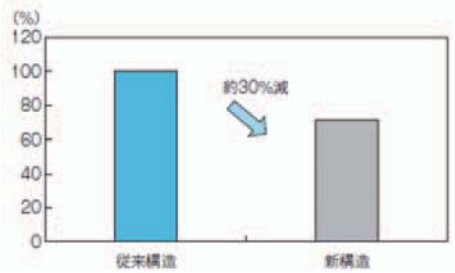


Fig. 21 Simulation result at pole edge

このほかにも損失の大きい部位で，同様に損失の低減方法を検討し，損失の低減を図った。

2.3　薄厚絶縁採用

冷却性能改善のため，発電機の絶縁について検討した。固定子コイルの主絶縁材料であるガラスクロス基材マイカテープには，従来と比較して薄厚かつ高強度の基材を新たに採用した。絶縁の厚みを低減することで，固定子スロット内の導体占積率が向上し，温度低減効果が見られた。また，採用にあたり，絶縁耐久性について各規格に準拠した評価試験を行い，問題ないことを確認した。

3．まとめ

「骨太開発」で培った基礎技術を基に，4極突極形タービン発電機の開発が完了した。この開発によって，軽量化が出来る見込みが立った。

販売に向けたシリーズ化を実施し，さらに性能及び信頼性の高い製品を提供していく所存である。

参考文献

(1) 高瀬冬人，木村誠，島崎洋生，荒隆裕，太田伸也，落合勉，北内義弘，久保田学，熊野照久，田村淳二，中村英之，宮武亮治，村山博英，須加泰臣，松本孝史，鷲巣正樹，狩野隆志，坂本織江，前田進，電気学会技術報告第1222号（2011），pp. 34-47.

(2) Maximilian，N. Andress, M. Ernst, F. Gebhard, K., Numerical Analysis of Heat Transfer and Flow of Stator Duct Models，IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY ANALICATIONS, Vol. 50, No. 1（2014），pp. 226 - 227.

(3) 太田伸也，村井和也，石橋太郎，明電時報　通巻345号（2014），pp. 10-14.

(4) 村井和也，石橋太郎，本間優人，江尻光良，江島正一，倉澤拓也，石井亮太，明電時報　通巻361号（2018），pp. 6-40.

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

論説◆解説

特集：発電機

デュアルフューエル非常用ガスタービン発電装置の納入事例

Delivery Result of Dual Fuel Emergency Gas Turbine Generator Set

谷川 和哉*1　TANIGAWA Kazuya
池田 崇*1　IKEDA Takashi

キーワード：ガスタービン，デュアルフューエル，非常用発電機，事業継続性
Key Words：Gas Turbine, Dual Fuel, Emergency Generator，BCP

1．緒言

当社は1950年代から，非常用発電設備を全国各所のビル・ショッピングセンター・病院などに数多く納入してきた。スプリンクラーや非常用エレベータなどの防災設備には，法律上，停電時に給電する電源設備の設置が義務付けられ，非常用発電装置を設置することが決められている。

また，従来の防災設備・非常用設備に限らず，今日では大規模なビル・工場・病院・データセンタなどで，事業継続性（BCP）対応のため，保安電源・バックアップのバックアップとして非常用発電装置を設置するケースが増えている。長期間停電を想定して長時間運転の希望も多い。

最近の災害では，非常用発電装置が動かず，電源車が出動し，活躍したことが話題になった。この電源車は当社の製品ラインナップの一つとなっている。

長時間運転に当たり必要なものは燃料であり，その量は大容量になり，液体燃料を保存するに当たり，地下タンクが必要にある。しかし，その貯蔵場所は敷地に依存することになり，タンク設置数，すなわち貯油量は物理的な制約を受ける事になる。

最近では災害時の地域集合場所等の指定もあり，長時間給電を自治体からの要請で対応する施設もある。特にビルなどは災害時に帰宅困難になることもあり，ビルにて災害がある程度復旧するまで電源が必要になることも想定される。

敷地中央部が広大な広場になっており，災害時には近隣住民の一時避難所となることをコンセプトとしていることも最近の大きな傾向となっている。

近年，液体・ガスの燃料確保を行い，非常用電源を構築する設備が多くなる傾向になっている。特に都内の大型商業ビルにおいては，長期停電時でも業務に支障が無いように10日間は給電を行い，事業が継続できるようにと電源の確保を行うなど，長時間化給電対応に関してはシステム構築に対してお客様の意識は非常に高い傾向がある。

当社の非常用発電装置は，発電機および制御盤，ディーゼルエンジン・ガスタービンを組み合わせ非常用発電装置である。

本稿では，特に都内にデュアルフューエル式非常用ガスタービン発電装置２台を納入した事例を紹介する。

2．デュアルフューエル非常用発電装置の特長

2.1　概要

都内に納入したデュアルフューエル式3000kVA非常用ガスタービン発電装置の概要を示す。起動は液体燃料（A重油）で行い，負荷へ先行給電を行う。その後，都市ガス（13A）に切り替えて運転するシステムである。停電時はガスを圧縮する機器が動かせないが，停電後に発電機電源が生きると，都市ガス（13A）は圧縮機運転が可能となり，昇圧を行う。原動機メーカにより時間は違うものの，液体燃料を混焼させてから，一般的には15～30秒間でガス燃料専燃に切り変わることができる。これにより，ガス燃料運転が継続する。ただし，ガス燃料運転は液体燃料専焼型に比べ，ガス圧縮機・アキュムレータ・緊急遮断弁・緊急開放弁・ガス圧縮制御盤が等のガス運転に必要機器が増える事になる。また，原動機であるため潤滑油が必要になるため，長時間運転を考慮したものにするには補給ができるように考慮が必要になる。

2.2　主要機器構成

Fig. 1に非常用発電設備システムの概要を，Fig. 2に非常用発電設備の外観を示す。Fig. 3に燃料小出槽を，Fig. 4に燃料小出槽フロートスイッチ油量設定を示す。また，Fig. 5にガス付帯設備を示す。また，主要機器の仕様を以下に列挙する。

原稿受付　2019年11月25日
＊1　㈱明電舎 発電システム技術部
〒141-6029　品川区大崎２－１－１
E-mail: tanikawa-k@mb.meidensha.co.jp

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

なお，主要機器の番号はFig. 1の番号に対応する。

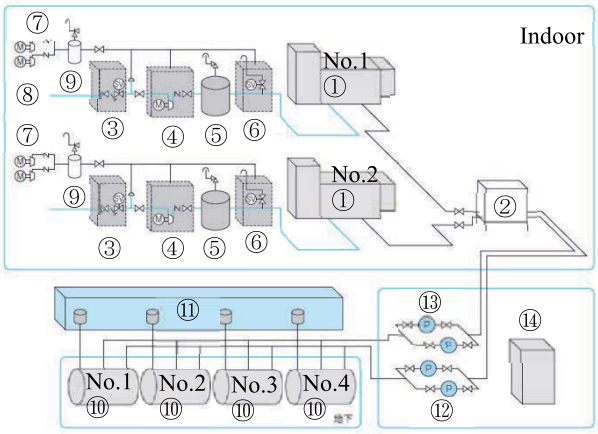


Fig. 1　Overview of emergency power generation system

Fig. 2　Emergency power generation system

①ガスタービン発電装置
　設置場所　　：屋内設置　地下２階
　騒音値　　：機側１m 85dB（A）
　並列運転　　：２台同期仕様
　原動機　　：ガスタービン機関
　瞬時負荷投入量：100%
　始動方式　　：電気式
　使用燃料　　：液体　特A重油
　　ガス　都市ガス13A
　＜発電機仕様＞
　形式：回転界磁突極形（制動巻線付）
　定格容量　　：3000kVA ×２台
　定格電圧　　：6600V
　回転速度　　：1500min^{-1}　減速機２次側
　力率　　：80％遅れ
　定格周波数　：50Hz
　極数　　：４極
　絶縁種別　　：F種
　励磁方式　　：ブラシレス励磁方式
　通風方式　　：自由通風形
②燃料小出槽の仕様
　容量　　：1950L
　使用燃料　　：特A重油
　付属機器　　：警報用フロートスイッチ
　　ポンプ制御用フロートスイッチ
　　ウイングポンプ
③緊急遮断弁
　ガス会社からの責任分界点における遮断用
④燃料ガス圧縮機
　ガスタービンで使用する圧力へ昇圧機器
⑤ガスアキュムレータ
　圧縮したガスを貯蔵する
　燃料切替が作動するとガスアキュムレータからガスを使用し，ガス圧力変動を抑制も兼ねる
⑥ガス緊急開放弁
　緊急時に大気にガスを放出する弁
⑦計装用空気圧縮機
　内部のガス燃料の各弁制御作動用
　計装用空気槽に充気された圧縮空気にて制御
⑧都市ガス（13A）
　各ガス会社による供給
⑨計装用空気槽
　内部にガスを使用するため，電気制御不可の為
　装置内は空気にて制御
⑩地下タンク　50,000L ×４基
　72時間運転必要量
⑪給油口ボックス（液面計内蔵）４口
　各地下タンクに個別給油可能
⑫燃料移送ポンプ　２台
　自動交互運転，故障時バックアップ
⑬燃料返油ポンプ
　自動交互運転，故障時バックアップ
⑭屋内燃料移送ポンプ制御盤
　燃料移送・返油ポンプ・電動弁一括制御

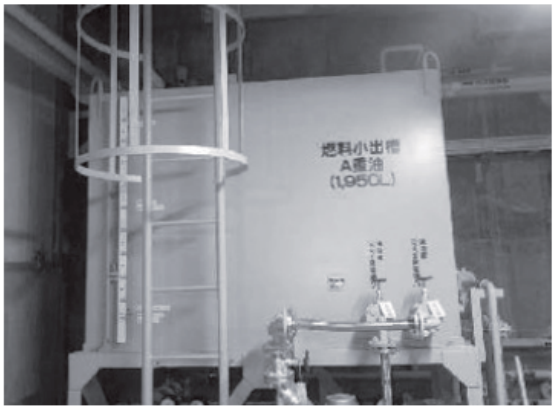


Fig. 3　Fuel small tank

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

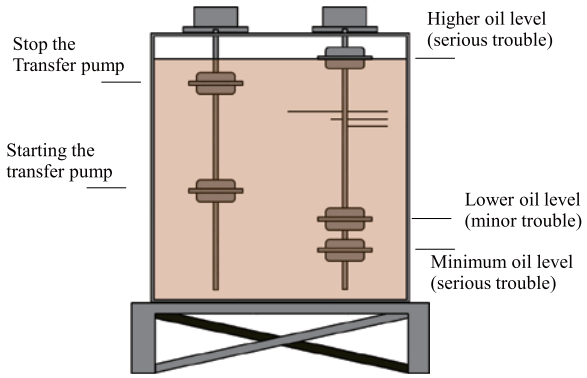
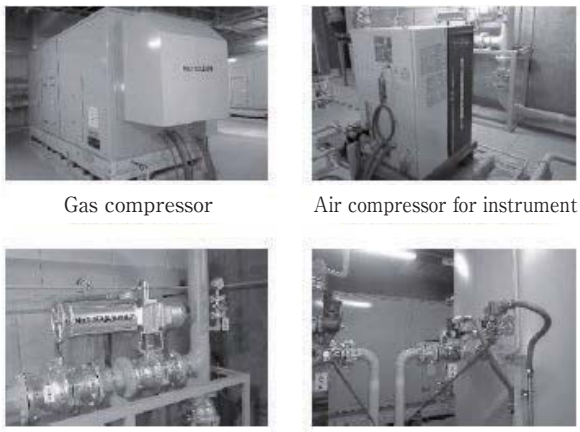


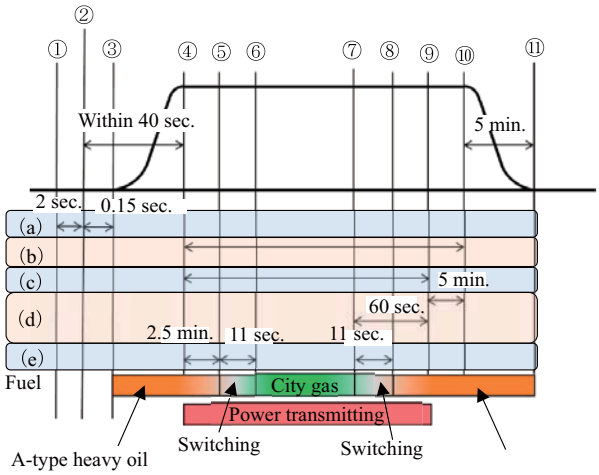
Fig. 4　Float switch setting of fuel small tank



Gas compressor　　Air compressor for instrument

Gas emergency release valve　　Gas emergency shutoff valve

Fig. 5　Attached equipment for gas



①系統停電
②停電信号受信
③非常用発電装置始動
④遮断器入り
⑤ガス燃料への切り替え開始
⑥ガス燃料への切り替え完了
⑦系統復電　→　液体燃料への切り替え開始
⑧液体燃料への切り替え完了
⑨遮断器切
⑩非常用発電装置停止指令
⑪非常用発電装置停止
(a) 停止確認
(b) 電圧確立
(c) 遮断器入
(d) 冷却運転
(e) 燃料切替

Fig. 6　Time chart

2.3　運用

電力会社からの受電方式は各設備により異なる。停電の考えは受電方式に合わせたものにする必要がある。停電した場合は，非常用ガスタービン発電設備２台同時運転で運用する。この場合は，液体燃料でまず起動する。消防上，40秒以内に負荷に給電することが要求される。

一般的には先行機１台送電（同期制御開始）後，２台目の同期制御を行い，同期運転による給電を行う。また，同期運転中に１台故障となった場合は速やかに解列して単独送電する。この時，制御は設備の負荷を考慮しながら受変電設備と調整しながら設備の制御を構築する必要がある。商用電源が復電した場合，受変電設備から復電信号を確認した後，非常用発電設備は速やかに停止する。停止の際には，ガス運転による給電を行っていれば，液体に切替えた後，停止する。

災害時等にガスが供給されない事も想定される。その場合は，液体燃料での運転を継続し，地下タンク分の運転のみ可能である。

また，ガス運転中への制御に対してFig. 6に非常用発電システムのタイムチャートを示す。

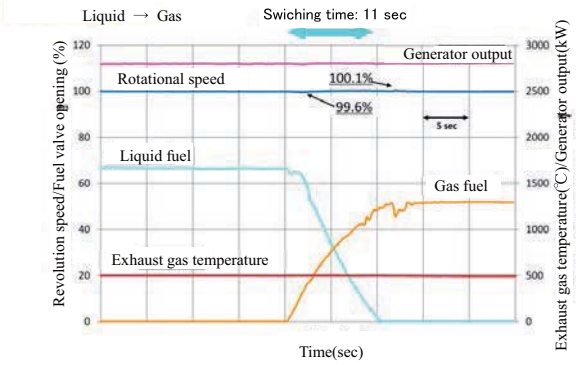
2.4　液体/ガス燃料

燃料の特徴として，特Ａ重油/都市ガス13Aの２種類の燃料が使用できる事があげられる。自動制御で液体から気体へ，または気体から液体へと切り替わる。また，液体単独運転も可能である。

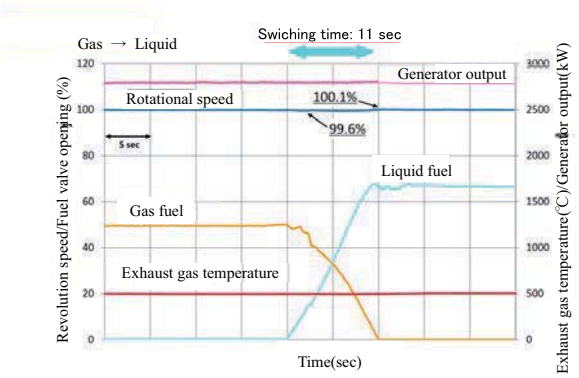
以下Fig. 7に液体―ガス，ガス―液体におけるある原動機メーカの切り替え時間のタイムチャートを表示する。

このメーカではどちらにおいても約11秒で切り替わることがわかる。投入熱量つまりはエネルギーが一定になるようにしながら燃料の切替を行っていく。

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.



(a) Liquid to gas



(b) Gas to liquid

Fig. 7 Time chart for fuel switching

2.5　ガス燃料配管

使用するガスの配管工事が必要になる。中圧以上が必要であり，本設備を設計するに当たり，ガス配管工事を考慮する必要がある。検討する設備直近に中圧ガス配管があり，無い場合は配管工事が必要になる。コストを見込む必要がある。

先の３.11の東日本大震災では，都内ガス配管が比較的健全であったとのことであり，比較的ガス管故障のリスクは少ない。ガス供給設備が停電時に健全であれば液体燃料で立ち上がった後，速やかに気体運転に切り替る事が出来る。従って，連続的にガス燃料の供給が可能となれば，非常用電源からの長時間給電が可能になる。

仮に首都大震災が発生した場合は，都内に車両規制がかかり，タンクローリーが進入できない事も想定される。この時は地下タンク分の運転のみ可能であり，その時間には制限がかかってしまう事になる。

2.6　潤滑油給油方法

長時間運転を考慮する場合は，ガスタービンに潤滑油補給が必要となる。これは原動機には必要不可欠な事である。本設備では長時間運転の考えがある事から，非常用発電装置が運転中であったとしても，潤滑油補給ができるようにとの考えから，非常用発電装置外部に潤滑油補給装置を設置した。これにより非常用発電設備は長時間運転が可能になる。

Fig. 8に潤滑油補給装置の外観を示す。

ただし，非常用であるため，原動機メーカで推奨される一定時間運転毎にガスタービンのメンテが必要になるため，システムを構築する際に考慮する必要がある。

Oil supply port　　Liquid level indicator

Fig. 8 Time chart

3．まとめ

都内に納入したデュアルフューエル式非常用ガスタービン発電装置の納入事例を紹介した。

特にテナントビルなどにおいては，運転時間の長時間化により，その特徴を前面に押し出している傾向にある。

商用電源は台風・地震に強いが，万全とはいいきれないところもある。特に最近の災害時においては，復旧に時間がかかっているという事も実情としてある。電源確保はある意味リスク対応に必要と考えている。

今後も，お客様の要求を反映し，満足していただける製品を提供していく所存である。

参考文献

(1) 池田崇，田村泰樹，明電時報，通巻361号（2018），pp. 51-53.

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

報　告

特集：第47回定期講演会（函館）報告

第47回日本ガスタービン学会定期講演会　全体報告

Report of the 47th GTSJ Annual Conference Hakodate

渡邊 裕章*1
WATANABE Hiroaki

1．市民フォーラム

定期講演会の前日９月17日㈫，函館工業高等専門学校（以下，函館高専）において，ガスタービン市民フォーラムを開催した。このフォーラムは，当学会の活動対象であるガスタービンおよびエネルギー関連技術について，学生や一般の方々に広く知っていただくことを目的としており，函館高専の本村真治先生の全面的なご協力のもと，同校との共催事業として，同校校長主催の「第23回先端科学技術講演会」としても実施された。

参加者は，函館高専の学生を始めとして，同校教職員，および地域連携協力会の会員企業からの参加者を得た。

今回の講演は，船﨑健一氏（岩手大学）による「航空機用ガスタービンエンジン～その原理と最新の研究開発動向～」であった。ガスタービンエンジンの歴史や作動原理から最新の研究開発動向まで，盛りだくさんの内容を多くのビデオ映像なども交えて学生・一般向けに具体的で分かりやすい説明が行われた。講演後には，活発な質疑応答が交わされ，将来を担う学生や地域の先端科学技術に関連する連携協力会の参加者には，航空エンジンの基礎から最先端の技術開発にまで触れる大変有意義な機会になったものと思われる。

2．定期講演会

市民フォーラムに続き，９月18日㈬および19日㈭に，函館市内の函館アリーナにて，「第47回日本ガスタービン学会定期講演会」を開催した。講演会は函館アリーナの１階フロアを貸し切って行われ，講演室の３室の他に，受付・展示室，休憩室，練習室，および委員会室を設けた。なお，今回の講演会から正式に企業展示ブースを設置することとしたところ，９社の参加を得ることができた。併設されたコーヒーコーナーと相まって，講演会参加者と出展企業との活発な情報交換の場を提供できたものと思われる。

講演会の参加者は177名であった。IGTC開催年であることを考慮すれば，かなり多くの方々に参加して頂けたと思う。一般講演は60件の発表件数を集めた。その内訳は，空力：18件，材料：14件，伝熱・システム・性能：13件，燃焼：７件，蒸気タービン・振動：４件，噴霧・凝縮：４件である。例年通り空力分野が一番多いが，材料分野も増える傾向にあった。どのセッションにも多くの参加者があり，熱心な質疑応答が行われていた。

講演会２日目の午後には，公立はこだて未来大学において，AI技術の開発と社会実装に尽力されている松原仁教授による特別講演「人工知能は世の中をどう変える

Fig. 1　National Institute of Technology, Hakodate College

Fig. 2　Open forum

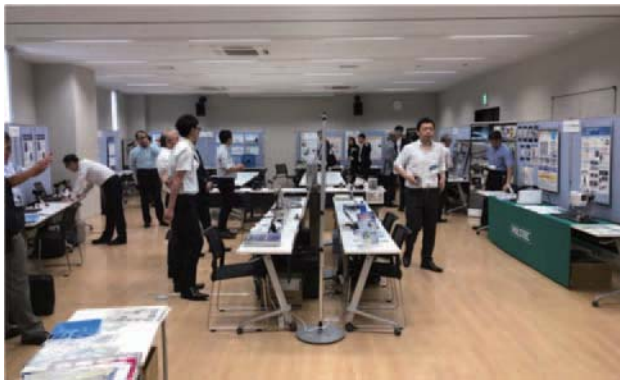


Fig. 3　Exhibition by companies

原稿受付　2019年11月18日
＊1　九州大学 大学院工学研究院 機械工学部門
〒819-0395　福岡市西区元岡744
E-mail: whiroaki@mech.kyushu-u.ac.jp

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

か」が一般にも公開される形で行われた。

特別講演に続いて，「ガスタービンの構造材料研究開発の最新動向と今後の展望」と題して，先端技術フォーラムが開催された。始めの講演会形式では，吉岡洋明氏（東北大）を座長として，竹村誠洋氏（科学技術振興機構）から「SIP革新的構造材料の研究開発について」，阿部俊夫氏（中菱エンジニアリング）から「航空機構造向け複合材開発」，御手洗容子氏（物質・材料研究機構）から「大型鍛造シミュレータを用いたNi，Ti合金鍛造プロセス」，および今成邦之氏（IHI）から「航空エンジン用CMCコーティング材料の開発」が紹介された。

続く総合討論では，４名の講演者をパネリスト，吉岡洋明氏を座長として，ガスタービンの構造材料研究開発の最新の研究動向や今後の展望などを中心に議論がなされ，活発な意見交換が行われた。こちらの詳細は，本誌の別記事に解説されているので，参照されたい。

今回も，学生登壇者からのエントリーがあった20件の講演を対象として，学生優秀講演賞の審査が実施された。講演会１日目から２日目午前まで学生の発表が行われ，総ての発表が終了した講演会２日目の昼休みに審査委員会が開催された。厳正な審査の結果，有賀寛純さん（高知工科大学大学院）と光末由宇陽さん（東京大学大学院）が受賞された。講演会２日目の午後の始めに，学生優秀講演賞審査結果報告が開催され，渡辺紀徳会長より賞状が授与された。

３．懇親会

懇親会は，函館駅近くのホテルフォーポイントバイシェラトン函館において，講演会１日目の夜に開催された。渡辺紀徳会長の挨拶，船﨑健一元副会長の乾杯で始まり，会員同士の交流が図られた。北海道にゆかりのある参加者による挨拶，学術講演会委員会委員長からの次回開催地の発表，太田有IGTC副実行委員長からのIGTC開催案内などがあり，湯浅三郎氏（首都大学東京）による中締めの挨拶で散会となった。

４．見学会

見学会は，講演会翌日の９月20日㈮に実施され，32名の参加者があった。函館港に停泊する津軽海峡フェリー株式会社の双胴高速カーフェリー「なっちゃんワールド」や北海道電力株式会社の新北本連系設備「北斗変換所」などを巡るコースであった。

「なっちゃんワールド」は，津軽海峡フェリー株式会社がPFI（Private Finance Initiative）法に基づいて運用するPFI事業船舶であり，有事や災害発生時等に防衛省がチャーターし自衛隊設備を輸送するためのオーストラリアインキャット社製の112m級双胴高速カーフェリーである。有事や災害発生時以外は，所有する船会社が自由に使えることから，今回の見学会受け入れが実現した。PFI事業船舶であることから，内装は大人数の自

Fig. 4　Special lecture

Fig. 5　Special lecture（Prof. Matsubara）

Fig. 6　Advanced technology forum（panelists）

Fig. 7　Advanced technology forum（discussion with audience）

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

衛隊員や戦車等の重量物を輸送するために大きく改造されている。なっちゃんワールドは双胴船であり喫水面が低いことが特徴で，水深の浅い港でも着岸できる。ディーゼルエンジンはドイツMAN製で，V型20気筒・出力約14,000馬力を左右２台ずつ計４台運用し，水流ジェット推進方式により航行する。津軽海峡フェリーにとり，今回が見学受け入れ第一号ということもあり，懇切丁寧な対応と説明をいただき，質疑応答も活発に行われた。

「北斗変換所」は，2019年３月に運転を開始した新しい直流方式による30万kWの容量をもつ連系設備であり，北海道と本州の間を青函トンネルを利用して結んでいる。これにより電源開発株式会社が所有する既設の60万kW連系設備に加えて，トータル90万kWの容量とすることで，連系設備の故障や改修による停止時にも常時60万kWを確保できるようになり，今後の北海道地域における電力の安定的な供給体制を確立している。本設備の特徴は，国内で初めて採用することとなった「MMC（Modular Multilevel Converter）を用いた自励式変換器」である。これは，電圧調整（無効電力調整）が可能で，交流系統の電源や調相設備，高調波フィルタ等の設備が不要であること等から，電力系統の安定化と建設コストの低減に寄与している。また，青函トンネル内にケーブルを敷設しているため，ケーブルの保守・点検に掛かる時間や手間の抑制に繋げている。本設備の運転開始により，北海道内の再生可能エネルギーの導入拡大への対応についても取り組んでいくとのことであった。

５．来年度の開催

来年度の第48回定期講演会は，山口県周南市で開催する。会場は「周南市文化会館」で，市の中心部に位置している。開催日は2020年10月14日㈬と15日㈭である。また，見学会は翌16日㈮を予定している。次回定期講演会・見学会もたくさんの方々に参加していただき，講演会や懇親会を思う存分楽しんでいただけることを祈っている。

６．謝辞

定期講演会の準備全般に多大なご協力をいただいた函館市観光誘致課様，市民フォーラムの開催に多大なご協力をいただいた函館高専の本村真治先生，学生，および地域連携協力会の皆さま，定期講演会の講演者・参加者の方々，特別講演の松原仁先生，先端技術フォーラムの座長・講演者の皆さま，見学会の開催にご協力をいただいた津軽海峡フェリー株式会社，北海道電力株式会社，および川崎重工業株式会社の関係各位に，心より御礼申し上げます。

（学術講演会委員会委員長）

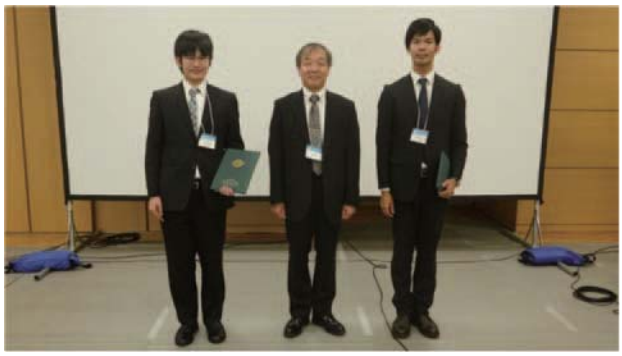


Fig. 8　Best student presentation award
(left: Mr. Ariga, right: Mr. Mitsusue)

Fig. 9　Nachan World

Fig. 10　Kita-Hon power grid connection facility（tour）

Fig. 11　Kita-Hon power grid connection facility（Q&A）

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

報　告

特集：第47回定期講演会（函館）報告

先端技術フォーラム「ガスタービンの構造材料研究開発の最新動向と今後の展望」

Advanced Technology Forum “Latest Trends and Future Prospects of Gas Turbine Structural Materials Research and Development”

吉岡 洋明*1
YOSHIOKA Yomei

キーワード：航空機材料, SIP革新的構造材料, CFRP, 鍛造シミュレーション, セラミックス基複合材料
Key Words：Aircraft materials, SIP Structural materials for innovation, CFRP, Forging simulation, CMC

1．緒言

函館で開催された第47回定期講演会では，「ガスタービンの構造材料研究開発の最新動向と今後の展望」と題した先端技術フォーラムが学術講演会委員会の方で企画された。ガスタービンのキー技術の一つである材料技術の将来的なシーズの発掘を意図したものである。折しも内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）では，航空機材料に焦点をあてた「革新的構造材料」[1]の第１期５年間のプログラムが終了し今年度から第２期がスタートしていたことから，この成果と今後の取り組みを紹介していただき，その後の総合討論の中で，参加いただいた会場の方々と意見交換を行い，今後の研究テーマ発掘の糸口をつかんでいただくこととした。

講演は，SIPおよび「革新的構造材料」プログラムの全容とこのプログラムを構成する４つの領域のD領域「マテリアルズインテグレーション（MI）」を（国研）科学技術振興機構の竹村誠洋氏に，A領域「航空機用樹脂の開発とCFRPの開発」を中菱エンジニアリング㈱の阿部俊夫氏に，B領域「耐熱合金・金属間化合物の開発」を（国研）物質・材料研究機構の御手洗容子氏に，C領域「セラミックス基複合材料（CMC）の開発」を㈱IHIの今成邦之氏に紹介いただいた。本稿では，その講演内容と総合討論の概要を報告する。

2．講演

2.1　「SIP」および「革新的構造材料」の全体像およびD領域「MI」

「SIP革新的構造材料の研究開発について」と題して講演をしていただいた。

SIPは内閣府の総合科学技術・イノベーション会議が社会的に不可欠で，日本の経済・産業競争力上重要とみなした課題に対して，産学官連携で基礎研究から実用化・事業化まで一気通貫で研究開発を推進するプログラム。その規模は，第１期は2014～2018年度で11課題，325億円/年，第２期は2018～2022年度で12課題，300億円/年。「革新的構造材料」はその中の一課題であり，第１期は33企業，43大学，10公的・非営利機関が参画し，総予算約187億で行われた。

全体は，４つの研究領域に分かれ，A領域は，エンジンファンと機体全般を対象とし航空機用樹脂の開発とCFRPの開発，B領域は，エンジン部品を対象としたTi合金あるいはNi基合金の鍛造シミュレーション，レーザ粉体肉盛り，粉末射出成型技術，タービン・圧縮機動翼用TiAl金属間化物の開発，３次元積層造形法，C領域は，タービンブレードを対象としたCMCの耐環境コーティング（EBC）および高生産性プロセスの開発を行った。

D領域「MI」は，材料工学手法に情報工学を活用して，プロセス・組織・特性・性能のモジュールやワークフローを計算機上でつないで材料開発を加速する統合型材料開発システムであり，モジュール間を自動でつなぐシステムを2018年度に完成した。

SIP第２期の「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」は本年度から開始した。３つの領域からなり，A領域がMI基盤拠点，B領域がCFRP，C領域が粉末・3D積層となっており，A領域は第１期のモジュールを活用した逆問題解析手法の開発をする逆問題解析，B領域と連結するCFRP向けのモジュールを開発する原子・構造体デザイン，そして，C領域と連結する積層造形向けのモジュールを開発するプロセスデザインの３チームで構成している。航空機やエネルギー産業に必要とされる耐熱・高比強度の材料に主眼を置いた開発に邁進する。

なお，この講演の中の第２期の計画にある「逆問題MI」で用いられた「逆問題」の定義に関する質問が座長よりあった。情報工学を活用して考え得る因子を網羅

原稿受付　2019年12月12日
＊1　東北大学大学院工学研究科材料科学国際共同大学院支援室
〒980-8579　仙台市青葉区荒巻字青葉６－６-02
E-mail: y.yoshi@material.tohoku.ac.jp

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

的・効率的に最適化するとの意味合いで用いているとのことであった。

2.2　A領域「航空機用樹脂の開発とCFRPの開発」

「航空機構造向け複合材料」と題してA領域の中の「航空機用高生産性・強靭複合材の開発」の内容と成果について報告いただいた。ここでは，航空機の歴史，商業航空機の進化とイノベーション，材料に絡めた航空ビジネス拡大の流れと本プログラムの中で行った航空機向け複合材料の生産性向上に向けたCFRPの製造・品質保証技術の開発成果について紹介していただいた。

技術革新は，マーケットドリブンで図られてきた。特に近年の中型機の多目的地直行運航に対し，中型機のシートマイル大幅向上に果たした複合材料の軽量化への貢献は大きい。複合材の特徴は比強度および疲労強度が優れていることが挙げられる。しかし，アルミ合金に比較し素材価格は約10倍以上であり，部品の製造および組み立てにも手間を要する。航空機の価格は市場により決まることから，高機能ではあるが高価格の複合材を適用するには，競争力のある部品や構造体を作る必要がある。そのため，「軽く」，「安く」，「信頼性を高める」の３つを開発目標に掲げ，新材料の開発とその材料の性能を活かす設計法および安く作る成形プロセスの基礎技術を確立し，実証試験によりその成果を検証することができた。

なお，講演に対して以下の質疑応答があった。

座長：ボーイング787が商業運転を開始した折，長期運用上の疲労面での信頼性が不安視されていたが，それは破壊予測が困難ということに起因したことなのか。

阿部：複合材の疲労強度が弱いということはない。破壊予測が困難というのは事実だが，傷が入っても進展しないことが認証試験項目として入っている。このため，かなりコンサバティブな設計となっており，複合材の実力ほどの軽量化は図られていない。運用上のリスクとしては，ペイントが剥がれ紫外線に当たると脆いくなることであり，複合材固有のメインテナンスは行う必要はある。

森（NIMS）：CFRPの機体の整備はどのようにやっているのか。

阿部：アルミニウム合金と同じで，目視検査とクリティカル部位の超音波検査を実施している。コンサバティブに疲労限よりもはるかに低い応力で設計していることもあり，主点検は通常の機体が5.5年毎であるのに対し，複合材は13年毎となっている。

森：アルミニウムボディと違って，検査で繊維にクラックが見つかった場合の修理はどのようにするのか。

阿部：修理方法は確立しているが，誰でもできるレベルにはなっていないことが課題として挙げられる。最初に購入し運用が一番進んでいる航空会社では，特別チームが羽田に常駐し対応している。

2.3　B領域「耐熱合金・金属間化合物の開発」

「大型鍛造シミュレータを用いた革新的新鍛造プロセス開発と材料・プロセスDB構築」と題して，B領域の概要と特に開発した鍛造シミュレータの位置づけとそれを用いた研究成果について報告していただいた。

日本は航空機鍛造部品の世界市場に参入するため，日本エアロフォージを2011年に設立，2013年には世界最大級の油圧５万トンプレスを竣工し，操業している。油圧プレスにすることにより精緻な加圧力での鍛造を可能としている。エンジンの耐熱材料は厳しい組織と特性への要求がある。また，エンジンディスクは複雑な形状をしているため，精緻な温度・歪み制御が必要となる。欧米では空軍をトップとしたコンソーシアムを形成し，長年鍛造モデリングのデータベースを構築してきた実績がある。このため本プロジェクトでは，NIMSに実製品に近い鍛造履歴の付与と組織・特性評価の試験片採取ができるサイズの素材製造ができる1500トン精密鍛造シミュレータを導入し，塑性加工と材料のデータベースを取得することで，鍛造条件，組織，力学特性を一気通貫で結び付け実機鍛造に役立てるツール開発を行った。チタン合金，ニッケル合金を対象とし，４企業，10大学との連携体制でプロセス，予測モデルの開発から検証までを実施し，開発した予測モデルを使用して実機鍛造の最適鍛造条件を求め，実機鍛造に成功することができた。

田沼（帝京大）：量産品の歩留まりを良くしてコストを抑えることは大事とは思われるが，潤滑剤の塗布などシミュレーションに乗らない要素もある。現在はどのような状況にあるのか。

御手洗：量産品と今日の話には多少乖離がある。素材メーカーや鍛造メーカーは，ユーザーからの特性や納期の要求に対し，鍛造条件を示すだけでなく試験鍛造したデータも見せる必要がある。これまでは経験知をもとに試行錯誤してこのデータを作成してきたが，受注のためのこの試行錯誤を減らし，短期間で確実に要求性能のものをつくりだすことに役立てたいと考えている。また，量産品に対しては，温度をこのようにコントロールすれば問題が軽減できるといった実験データを示すことができるし，自動化が難しいことについても，ここが問題でこれさえクリアできれば良いものが大量生産できるといった方向性を示す基礎的なデータを提供することができると考えている。

座長：第１期でデータベースとしては世界水準までキャッチアップできたと考えてよいか。

御手洗：第１期の目標は達成したが，まだ十分に取り切れていないデータはあるので，第２期で継続して取得しデータの充実を図ることにしている。

2.4　C領域「CMCの開発」

「航空機エンジン用CMCコーティング材料の開発」と題して，講演の前半では航空エンジンの運用ライフサイクルコストの低減，環境負荷の低減というニーズの中でのCMCの技術開発の位置づけを，後半ではその開発の課題解決のために実施したコーティング材料の開発研究の成果を紹介していただいた。

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

まず前半に関しては，推進効率の向上を図るにはファンの圧力比を下げバイパス比を上げる必要があるが，それはファンの直径および重量の増加を伴う。このため複合材の適用が進められている。一方で，熱効率の向上にはエンジンの全体圧力比を上げるとともに，空力要素効率の向上と冷却空気量の低減が求められる。これまでNi基合金が活用されてきたがその耐熱温度は限界に近付いてきたことから，次世代候補材料としてCMCの研究が行われていると紹介された。

後半では，まず高性能型のCMCは1400℃までの耐用温度を有すること，SiC/SiC系セラミックスには高温環境下で水蒸気減肉の問題がありEBCが必要であることが，また，従来のEBCの設計思想は，熱化学的安定性が良く，異相界面反応がない，CMCと熱膨張差の小さい材料であることの３点であったが，本プログラムではこれに物質移動制御による酸素遮蔽性と構造安定性を加えて開発を行ったことが報告された。最外層にYb_2SiO_3の熱衝撃緩和層，中間層にYb_2SiO_5 ～ $Yb_2Si_2O_7$の水蒸気遮蔽層，最下層にムライトの酸素遮蔽層を有する多層積層構造を採用することで1400℃での耐用性が確保し，実験によりそれを検証したことで技術成熟度レベル（TRL）[2]の３を達成することができた。ここでは産学官の強力な連携のもとに，原子・ナノレベルの物質移動の本質の解明がなされており，それをもとにした設計指針の策定やマクロな特性評価・解析法による耐久性の評価も行われた。

今後はコーティングの量産性の向上と製造コスト低減のためのプロセス改良を行うとともに，実エンジン搭載試験を通じて1400℃級CMCの技術実証を行い，2030年頃に運航開始予定の航空機エンジンへの実装を目指すとのことであった。

岡田（電中研）：EBCは減肉したり劣化したりするが，その寿命はCMCと同じと考えてよいのか，それとも，CMCより寿命は短くEBCだけを補修して使うのか。

今成：補修して使うという方向で考えている。

３．総合討論

総合討論では，まず各パネラーより講演順に，本プログラムを通じて考えられる研究開発のシーズを提案いただき，その後，会場からの意見，提案，コメントを受ける形で意見交換を行った。

竹村：SIP第２期ではMIを特に企業の皆様に使っていただきたいと考え，使えるシステムにということで，計算科学，データ科学，機械学習，AIを駆使した開発を考えている。また，第２期では３次元積層造形（AM）に力を入れている。日本は装置および粉末の開発で欧米に後れを取っている。よって第２期では粉末および冶金面に特化して取り組み，製品開発に力を入れていきたいと考えている。溶解凝固も数十ミクロンオーダーの微細粉末になると現象的に様相を異にすることが分かってきているので，最先端の計測技術，計算技術を使って欧米と戦えるレベルまでもっていきたいと考えている。

阿部：CFRPについては，より一層の社会実装化を図るには，総合的にいかに効率良くかつ安く作るかにつきる。素材は東レなどの材料メーカーで作られるが，仕入れ後の作り方によって性能が違ってくる。この仕入れ後の処理面から素材へのフィードバック・改良の中にシーズがあるし，オールジャパンでこの体制が組めるのであれば，いろんな分野での適用が可能となり，低コスト化にもつながる。低コストと生産性は研究になじまないといわれるが，アメリカ空軍の研究所では行っている。広い分野のモビリティで使えるようにしていくことが重要と考えている。

御手洗：第１期では，新しい材料の開発ではなく，既存の材料の特性を最大限に引き出すプロセス技術の開発とそのツール作りに専念してきた。その内容については協力メーカーとの関係で開示できないものもあるが，第２期では，1500トンの鍛造シミュレータを公開するので，皆さんに使っていただきたいと思っている。ガスタービンでは耐熱材料の鍛造材を多数用いていることから，大型の実験装置として積極的に活用していただきたいと思っており，この中に研究シーズは多数あると考えている。

今成：高温材料は開発・評価・検証に時間とお金が掛かるという宿命的な問題がある。これに対しては状態図や熱力学のシミュレーション技術を用いて短時間化を図る必要がある。また，今回のSIPではシミュレーションも用いたが，まだ研究者の経験に依存するところが多い。この経験値のデータ化も進める必要がある。また，スイスの材料メーカーと話をした折，彼らは多元系シミュレーションを活用し絨毯爆撃した結果から選別しているとのことであった。MIの中ではこういうこともしていただきたいという期待がある。

座長：竹村さんの方から冶金的なところで具体的なテーマがあるということ，今成さんから状態図やシミュレーションで高温材の時間短縮につながる技術開発をといったご提案がありました。

今野（MHPS）：積層造形は，技術が遅れているだけでなく，普及も遅れているのが実情。海外では伸びているのに日本だけが伸びていない。普及を図ることで投資もしやすくなる。粉末の製造は日本でも進んできてはいるが，市場を作っていくことが重要と考えている。

竹村：ビジネスモデルがうまく立てられていない。AMでものを作って売ろうとしている方々が顧客探しに苦労している。サンプルは作るが本格的な受注には至っていない。たとえば米国の某エンジンメーカーはAMの装置メーカーを買収し内製化している。日本でもそのような方法をとらないと進まないのかもしれない。どうやって産業として伸ばすか悩んでいるというのが実情。

今野：造形技術，アプリケーションは海外が進んでいる

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

が，材料開発や粉末製造などの上流側では日本の強みが活かせるのではないか。

竹村：AMに関する粉末を含めた開発テーマは第２期の中で取り上げている。広い視野で進めて行きたい。

夏村（IHI）：広い視点での質問となりますが，合金とかプロセスについてはジェットエンジンメーカーとして使わせていただいている。コストの話ですが，世界の中で勝負をしていくためには，TRL4，5[2]を超えたあたりから，計画的にそれなりの投資をし世の中に通じるコストまで下げていく必要がある。投資額が大きいとコストで世界に打って出ることはできない。良い例としては，コストダウンというテーマではないが，今回のNIMSと日本エアロフォージ，更に他のメーカーといったスキームで国内が整備されると，そのスキームの中でコストダウンが図れるようになる。今日紹介していただいた色々な新しい技術，取り組みは心強いとは思うが，世の中に出していくことを考えると妥当なコストで出す必要がある。日本エアロフォージのようなアイデア，スキームがもしあればご披露していただきたい。

御手洗：日本エアロフォージは日立金属，神戸製鋼などの会社が必要性を感じて立ち上げています。3Dプリンティングの場合は，政府の力でするのが良いのか，企業で自主的に行った方が早いのかはわかりかねるが，企業間が連携して新しい会社を作り，新しいプロセスを検討していくのは良い方法であると思う。

今成：製造プロセスの間で個々の会社の強みを高めるような枠組みができるとコストが下がる。材料が部品になるまでには様々なプロセスを通る。全てのプロセスを保有している会社がないとはいえないが，大概は複数の会社を介している。一気通貫にできないことで，この取り合いの部分で会社が違うと開示できない情報が生じ，重複しての費用が発生しており，このあたりにコストを下げる余地がたくさんある。複数のプロセスを束ねるような仕組み作りはコストを下げるためのアイデアとしてあると思います。

夏村：機体では苦労されていると思いますが，更に低コスト化を考えた場合，設備導入も含めどんな施策が考えられるでしょうか。

阿部：複合材は料理法によって性能が変わってくる。この料理法で各社がしのぎを削っているが，日本の場合規模の小さな会社が行っていることもあり，この先立ち行かなくなっていくような気がする。日本の市場は小さく，小さな会社が競りあっていても仕方がない。それぞれに良いところがあるのでうまく統合できたら，例えば，ヨーロッパではエアバスのような統合例がある。あれほど大きくなることは無理かもしれないが，その形にもっていかなければいけないのではないか。個人的には，国の指導でエアバスで行われた取り組みを参考に吸合していく必要があるのではないかと思っている。

座長：今ある技術の改良ということになると，官学の協力を得る場合，前提として情報開示が出てくると思いますが，そういったことは可能でしょうか。できるといろいろなシーズがでてくると思う。

竹村：情報開示ということに関しては難しいというのが現状で，企業に強く求めると企業側が引いてしまうところがある。秘密保持契約とか共同研究契約とかは基本的には参画機関同士で結んでいただくことにしているが，同じ国プロでも省庁によってやり方が異なる。経産省の技術研究組合などは権限を持って行えると思われるが，本SIPの場合は難しく，航空機材料を対象としていることもありメーカーの意向をできるだけ重視せざるを得ないという状況にある。プログラムディレクターは，国際共同研究まで展開したいと考えられていたが，苦労されていた。

4．おわりに

SIP全体の取り組みおよびその中の「革新的構造材料」の活動成果を俯瞰して竹村氏に，また，その各研究領域の内容を阿部氏，御手洗氏，今成氏に紹介いただきました。航空機材料に絞り込んでのプログラムとはいえ，その技術の裾野は広く，具体的なシーズを提示するまでには至りませんでしたが，第１期の膨大な研究成果と第２期の計画に関する情報の共有化は図れたのではないかと思います。各研究機関においての今後の研究開発に役立てていただければと思います。

なお，本フォーラムは定期講演会の最後に行われたにもかかわらず，多くの人に参加いただき盛況に執り行うことができました。講演いただいた４名の方々，本フォーラムを企画し事前調整をしていただいた学術講演会委員会をはじめとする関係者の方々，また，参加いただいた皆さんに対しこの場を借りて深く御礼申し上げます。

5．謝辞

本稿の執筆にあたり，JFEエンジニアリングの富永純一委員に作成いただいた議事録を大いに参考にさせていただきました。また，このフォーラムに臨むに際し事前に東北大にまでお越しいただき打ち合わせをしていただく等，非常にお世話になりました。ここに記して深く謝意を表します。

参考文献

(1)　（国研）科学技術振興機構，戦略的イノベーション創造プログラム革新的構造材料
＜http://www.jst.go.jp/sip/k03/sm4i/index.html＞（参照日2019年12月12日）

(2)　フリー百科事典『ウィキペディア』https://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8A%80%E8%A1%93%E6%88%90%E7%86%9F%E5%BA%A6%E3%83%AC%E3%83%99%E3%83%AB＞（参照日2019年12月12日）

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

技術論文

フィルム冷却の高効率化に関する V字流れ制御デバイス形状の最適化

Optimization of V-shaped Flow Control Device for Improvement of Film Cooling Performance

齋藤 涼*1 SAITO Suzuna
船﨑 健一*1 FUNAZAKI Ken-ichi
河村 朋広*1 KAWAMURA Tomohiro
森﨑 哲郎*2 MORISAKI Tetsuro

ABSTRACT

This paper describes a new V-shaped flow control device to improve film cooling performance of gas turbine cooling holes. This is invented with the aim of reducing the aerodynamic loss and the thermal load of devices, which are regarded as points for improvement of the double flow control devices (DFCD) invented by some of the authors. This device is a V-shaped protrusion that is created by merging a pair of protrusions with the shape of hemi-spheroid. In addition, this is attached to the turbine blade surface just upstream of each of cooling holes. The purpose of this study is to optimize V shaped device, by use of CFD and Taguchi Methods so as maximize its film effectiveness.

キーワード：ガスタービン，フィルム冷却，流れ制御，効率，タグチメソッド，CFD
Key words：Gas Turbine, Film Cooling, Flow Control, Efficiency, Taguchi-Method, CFD

1．研究背景

近年，ガスタービンの更なる高効率化が求められており，高効率化を達成するための手段の一つとして，タービン入口温度（TIT）の上昇が挙げられる。しかし，TITの上昇は同時に燃焼器直下流に位置する高圧タービン部の熱負荷を増大させるため，タービン翼には少量の冷却空気で効果的な冷却を実現する技術が求められる。中でも高温の主流ガスに対して優れた遮熱効果を持つフィルム冷却技術についてはフィルム冷却効率の向上が強く求められている。

フィルム冷却については様々な研究がなされている。Haven[(1)]らはフィルム冷却が主流と干渉する際に発生させるCounter Rotating Vortex Pair（CRVP）と呼ばれる渦構造が冷却空気の巻き上がりを誘起し，壁面への冷却空気付着性を著しく低下させることを示した。したがって，CRVPを抑制することが重要である。そこでFunazaki[(2),(3)]らは三次元形状の流れ制御デバイスであるDouble Flow Control Devices（DFCD）を発案した。なお，DFCDは岩手大学とMHPSにて日本で特許登録されている（登録番号：6134193）。DFCDを冷却孔上流に設置することでフィルム冷却性能が向上することを確認した。しかし，DFCDは二つのデバイスから生成した縦渦による空力損失とデバイス自体への熱負荷の増大を改善することが望まれていた。

そこで本研究ではDFCDをV字形状にした新規デバイス（以下，V字デバイスと称す）を提案する（Fig. 1）。これはデバイス間隔を狭めることで縦渦の生成間隔が狭くなり，冷却空気と干渉しやすくなる。したがって，小さな縦渦でもCRVPの抑制効果があると考えられる。さらに渦規模の縮小により空力損失の低減が期待できる。また，DFCDより冷却孔と設置位置が近いためデバイス壁面が冷却され，デバイス自体の熱負荷削減も期待できる。

本研究は，DFCDに代わり新たに提案するV字デバイスに関する総合的調査の第一歩として，V字デバイスがDFCD並の高いフィルム効率向上効果を持ち得るかを明らかにすることを目的としている。最適化評価指標に面平均フィルム冷却効率を選定し，数値解析による調査からV字デバイスの最適形状の導出及び最適形状の性能評価を実施した。

○主な記号

d　：冷却孔直径（10［mm］）
BR：吹き出し比［-］
DR：密度比［-］
ω　：渦度［-］
η　：フィルム冷却効率
U　：流速［m/s］
y　：代表長さ［m］
τ_w：壁面せん断応力［kg/m/s^2］
u，v，w　：x, y, z軸方向流速［m/s］
S：シグナル
N：ノイズ
Y：面平均フィルム冷却効率
n　：誤差因子数
ε　：主流流入角［deg.］
ρ　：密度［kg/m^3］
ν　：動粘性係数

原稿受付　2018年8月31日
査読完了　2019年10月18日
＊1　岩手大学大学院
〒020-8551　盛岡市上田4－3－5
＊2　三菱日立パワーシステムズ㈱

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

-添え字-
∞　：主流　　2　：二次空気
wall：断熱壁

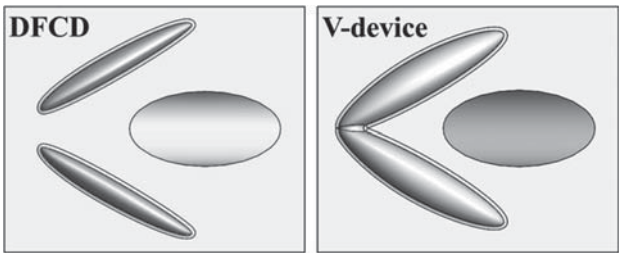


Fig. 1　DFCD and V-device.

2．最適化手法

2.1　概要

本研究では最適化手法にタグチメソッド[4]を用いた。本手法は解析対象への環境変動に対してロバストな設計を実現するなどの特徴がある。さらに，少ないサンプルデータから最適形状を導出できるなどの利点が挙げられる。

本最適化では，最適化指標に冷却孔下流領域の面平均フィルム冷却効率を選定した。面平均フィルム冷却効率値を最大化する望大特性を適用し，V字デバイスの最適形状導出を行なった。

2.2　タグチメソッド

⑴最適化形状導出の流れ

本手法は，いくつかの規則に沿って設計を進める。以下に最適化形状導出の流れ①～⑦を示す。

① V字デバイスの制御因子・誤差因子の選定
② 各因子の水準値選定
③ 適用する直交表の決定
④ 決定した水準値の直交表への割り付け
⑤ ④で作成されたV字デバイス形状を用いた最適形状導出用サンプルデータの取得
⑥ サンプルデータを用いたSN比算出及び最適化形状の決定
⑦導出された最適形状の性能評価

⑵制御因子及び誤差因子

V字デバイス形状の外観，および最適化に用いた制御因子A ～ GをFig. 2に示す。制御因子A ～ Gにおいて，A:FilletはV字デバイスのフィレット半径，B:AngleはV字デバイスの開き角度，C:DistanceはV字デバイスと冷却孔の中心距離，D:HeightはV字デバイスの高さ，E:Length2はV字デバイス中心より下流側長さ，F:Width1はV字デバイスの幅（内側），G:Width2はV字デバイスの幅（外側）である。V字デバイス中心より上流側長さのLength1はV字形状を保つため1.0*d*とした。制御因子の水準値については，予備調査[5]をもとにTable 1の通り選定した。この予備調査では，A ～ Gの制御因子の大きさを単独で変化させることによって，フィルム冷却効率がどのように増減するかを調べている．また，本最適化の直交表はL18直交表を採用した。全18種類のV字デバイス形状を用いてサンプルデータの取得を行なった。Table 2に使用したL18直交表を示す。また，Fig. 3に全18種類のV字デバイス形状を示す。

また，誤差因子には主流流入角 ε（=0, 5, 10 deg.）を選定した。DFCDに関する研究[6]において，流入角変化はデバイスが形成する渦構造に変化を与え，フィルム冷却効率に大きく影響することが明らかになっている．したがって，主流流入角を誤差因子に選んだ．

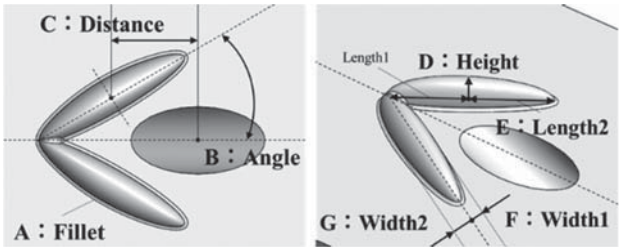


Fig. 2　Control factor

Table 1　Control factor's level

	Factor	Level1	Level2	Level3
A	Fillet	0.05d	0.1d	
B	Angle	25deg	30deg	35deg
C	Distance	1.2d	1.5d	1.8d
D	Height	0.3d	0.4d	0.5d
E	Length2	1.0d	1.5d	2.0d
F	Width1	0.15d	0.2d	0.25d
G	Width2	0.25d	0.3d	0.35d

Table 2　L18 orthogonal table

	A Fillet	B Angle	C Distance	D Height	E Length2	F Width1	G Width2
Case1	1	1	1	1	1	1	1
Case2	1	1	2	2	2	2	2
Case3	1	1	3	3	3	3	3
Case4	1	2	1	1	2	2	3
Case5	1	2	2	2	3	3	1
Case6	1	2	3	3	1	1	2
Case7	1	3	1	2	1	3	2
Case8	1	3	2	3	2	1	3
Case9	1	3	3	1	3	2	1
Case10	2	1	1	3	3	2	2
Case11	2	1	2	1	1	3	3
Case12	2	1	3	2	2	1	1
Case13	2	2	1	2	3	1	3
Case14	2	2	2	3	1	2	1
Case15	2	2	3	1	2	3	2
Case16	2	3	1	3	2	3	1
Case17	2	3	2	1	3	1	2
Case18	2	3	3	2	1	2	3

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

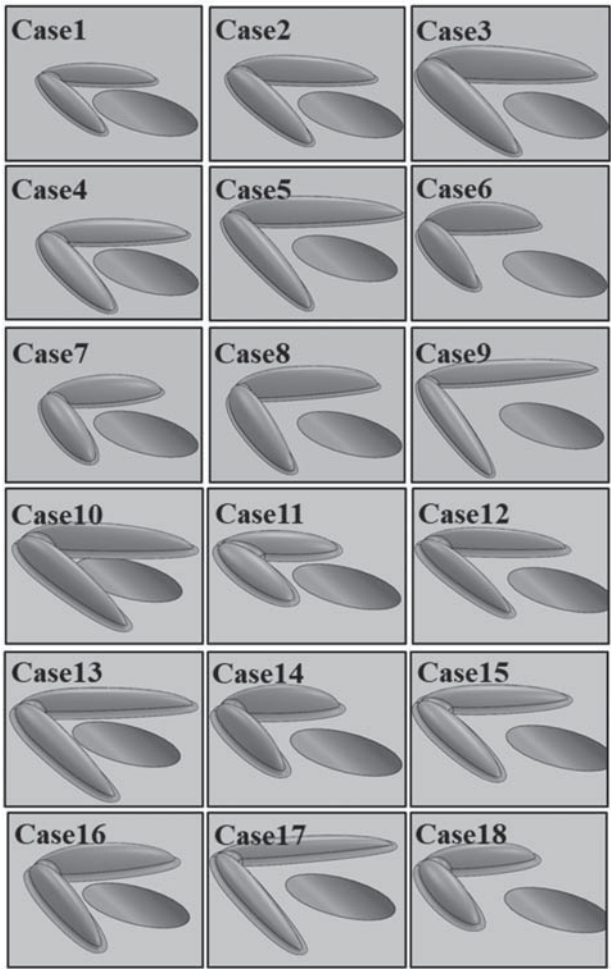


Fig. 3 18 cases of V-shaped device

(3)評価指標

最適化形状導出のためには，SN比と呼ばれるシグナル: Sとノイズ: Nの比を算出することが必要になる。SN比は式(1)で定義される。本研究において，Sは最適化評価指標であり，Nは誤差因子の主流流入角である。Yはある領域のフィルム冷却効率を平均した面平均フィルム冷却効率である。式(2)にフィルム冷却効率の定義式を示す。平均化した領域はFig. 4に示す通り，$0 \leqq x/d \leqq 35$, $-3 \leqq z/d \leqq 3$の範囲とした。原点は冷却孔後縁にとり，主流流れ方向にx軸，高さ方向にy軸，スパン方向にz軸を取っている。また，添え字iは条件名（Case1 ～ Case18），nは誤差要因数であり，本研究ではn=3である。

式(1)を使用した。高いSN比の値を選定することで誤差因子に対しロバストな性能及び面平均フィルム冷却効率が最大となるV字デバイスの最適形状を探索した。

$$(S/N)_i = -10\log\frac{1}{n}\left(\frac{1}{{Y_{i,\varepsilon=0deg}}^2}+\frac{1}{{Y_{i,\varepsilon=5deg}}^2}+\frac{1}{{Y_{i,\varepsilon=10deg}}^2}\right) \quad (1)$$

$$\eta = \frac{T_\infty - T_{wall}}{T_\infty - T_2} \quad (2)$$

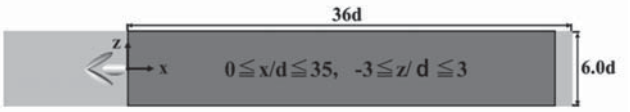


Fig. 4 Averaging area

3．数値解析

3.1　解析ソルバー

解析ソルバーには，汎用流体解析ソフトANSYS® CFX® ver16.0[7]を使用した。また，全条件の支配方程式はRANS，乱流モデルはSSTモデルを使用し解析を行った。本研究で採用したRANS解析及びSSTモデルの使用の妥当性については，DFCD最適化に関する研究[8],[9],[10]で検討されている。そこでは，数値的最適化及び実験的最適化の過程で探索された形状がほぼ一致したことが示されている。本研究で調査しているV字デバイスもフィルム冷却効率向上に関するメカニズムはDFCDと同様であると考えられ，RANS解析で最適形状の探索が可能であると判断した。ただし，V字デバイスの数値計算結果が実験結果と必ず傾向が一致するとは言えない。したがって，実験的検証については次報以降で報告予定である。

3.2　解析ドメイン・計算格子

(1)解析ドメイン

Fig. 5に使用した解析ドメインを示す。計算領域はx方向の冷却孔下流に36d，z方向に1ピッチ分の6dとした。冷却孔形状はRound hole，冷却孔傾斜角α=30deg.である。また，流入角条件の変化（5, 10deg.）は，冷却孔とV字デバイスの設置位置をスパン方向に角度を設けて，二次空気吹き出しの方向を傾けることで再現している。

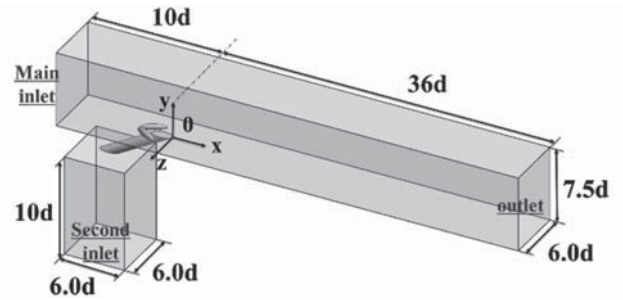


Fig. 5 Computational domain

(2)格子依存性調査

本研究の解析を行う前に格子点数によって計算結果に差が出ないか確認するため格子依存性の調査を行った。格子生成ソフトにはANSYS®ICEM CFD™ ver16.0[7]を使用し，非構造格子を生成した。非構造格子を使用した理由としては，デバイス周りの格子作成が容易であることが挙げられる。調査した格子サイズをTable 3，計算時間及び総格子要素数をTable 4に示す。また，Fig. 6に全条件の格子を示す。主流部ダクトにおいて，$0 \leqq y/d \leqq 2.5$，$2.5 \leqq y/d \leqq 3.5$，$3.5 \leqq y/d \leqq 7.5$の範囲でサイズを

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

変更した。また，壁面近傍にはプリズムメッシュを適用し，最小格子幅：0.0045[mm]，拡大率：1.2として生成層数を変更した。全てのドメインでy^+は３未満を満たしている。また，y^+の定義式は式(3)に示す。

本調査では，フィルム冷却効率及びx方向渦度，速度プロファイル，全圧損失等で格子依存性を評価した。フィルム冷却効率分布と面平均フィルム冷却効率，x方向渦度分布（x/d=10）をFig. 7に記載する。またx方向渦度分布には式(4)を使用した。

まず，計算時間においてtest2は総格子要素数が大きいため62時間要した。最適化では条件数が多いことからtest2は時間コストが大きい。次にフィルム冷却効率分布において，test3は他の３条件に比べ，格子が粗いため壁面近傍の効率分布を捉えられていない。他４条件は類似している。また，面平均フィルム冷却効率においてtest3は他４条件より著しく大きい値となった。test2は僅かに小さい値を示した。test1，test4，test5は同様な値を示し，x方向渦度分布ではコア部に僅かな差があるが，同様の結果になった。したがってtest1，test4，test5の内，計算時間コストの小さいtest1の計算格子を採用した。

$$y^+ = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \cdot \frac{y}{\nu} \qquad (3)$$

$$\omega = \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \qquad (4)$$

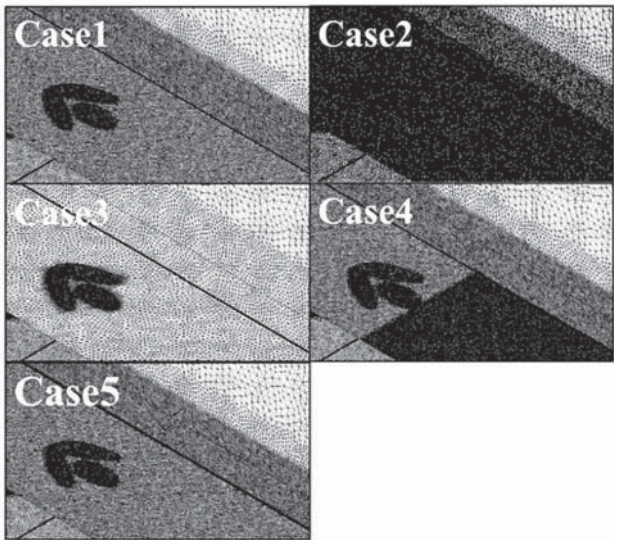


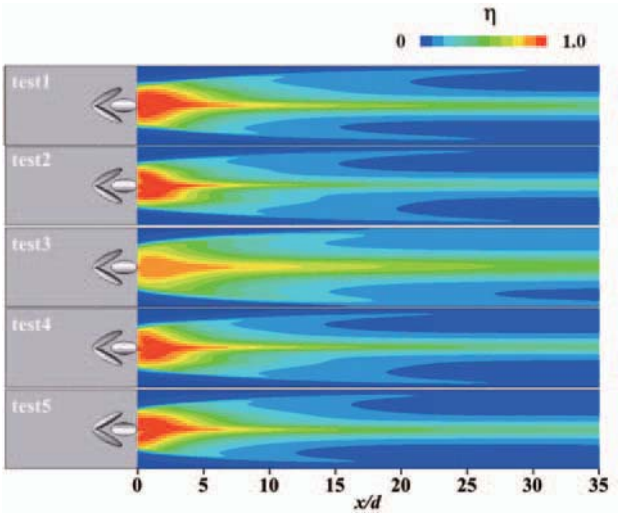
Fig. 6　Unstructured surface grids

Table 3　Size of computational grid

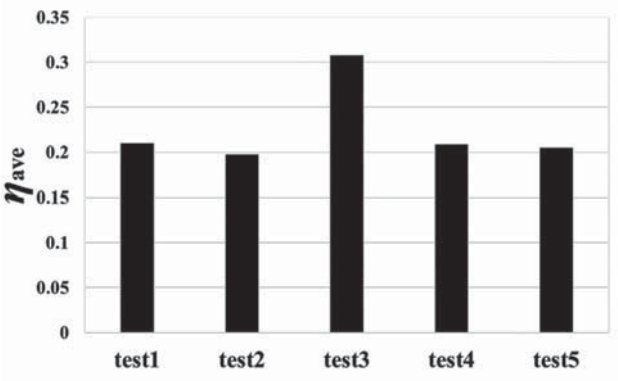
	0≦y/d≦2.5	2.5≦y/d≦3.5	3.5≦y/d≦7.5	プリズム高さ	冷却孔下流壁面
test1	0.1d	0.3d	0.5d	0.1d	0.1d
test2	0.05d	0.3d	0.5d	0.1d	0.1d
test3	0.2d	0.3d	0.5d	0.1d	0.1d
test4	0.1d	0.3d	0.5d	0.1d	0.05d
test5	0.1d	0.3d	0.5d	0.2d	0.1d

Table 4　Computational time and total elements of analysis

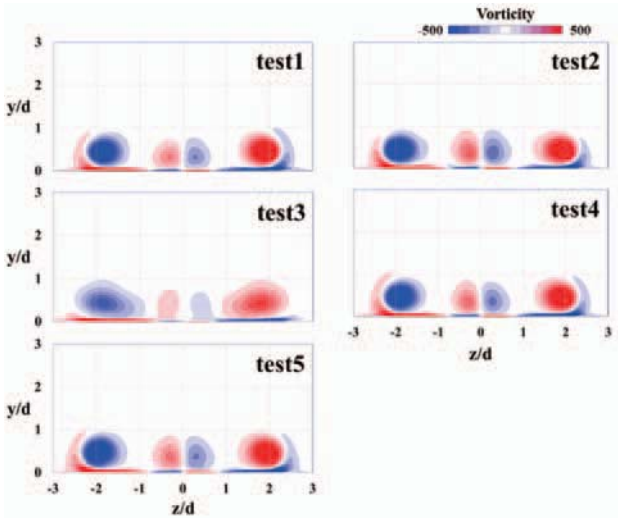
	test1	test2	test3	test4	test5
time [h]	17	62	9	47	18
Total elements [× 10^6 cell]	25.4	64.8	7.5	30.2	25.0



(a)　Contours of film cooling effectiveness



(b)　Area-averaged film cooling effectiveness



(c)　Contours of vorticity（x/d =10）

Fig. 7　Comparisons of calculated results

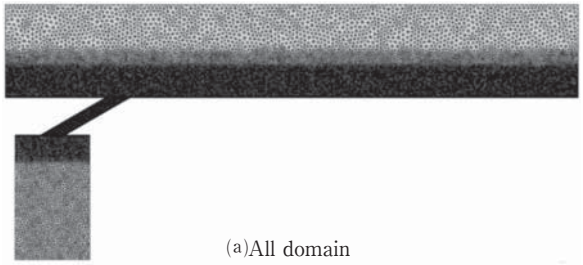
Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

(3)計算格子

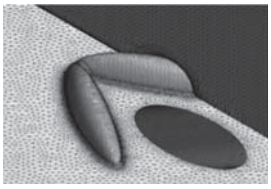
本最適化で使用した全54条件（形状数18×誤差因子数３）の計算格子の主流部ダクトの格子サイズは格子依存性調査を行って以下の通りに決定した。格子依存性調査については前項で述べている。壁面近傍以外での基本的な格子サイズは$0 \leqq y/d \leqq 2.5$の範囲で1[mm]，$2.5 \leqq y/d \leqq 3.5$の範囲で3[mm]，$3.5 \leqq y/d \leqq 7.5$の範囲で5[mm]とした。また，壁面近傍にはプリズムメッシュを適用し，最小格子幅：0.0045[mm]，拡大率：1.2，生成層数：21（プリズム幅：～1[mm]）とした。

冷却孔の基本的格子サイズは0.5[mm]とし，二次空気部ダクトの基本的格子サイズは$-3.0 \leqq y/d \leqq -3.2$の範囲で1[mm]，$-3.2 \leqq y/d \leqq -13d$の範囲で3[mm]とした。また，壁面近傍にはプリズムメッシュを適用しており，最小格子幅：0.0045[mm]，拡大率：1.2，生成層数：21と主流部ダクトと同様である。

本最適化の格子は全54条件において同じ方法で作成しており，計算格子の総格子要素数は約2,500万セルである。Fig. 8に全体とV字デバイスの格子を示す。



(a)All domain



(b)Device

Fig. 8 Computational grid

3.3　解析条件

本研究で適用した解析条件をTable 5に示す。

代表長さに冷却孔直径d，代表速度に入口速度をそれぞれ用いたレイノルズ数Reを6,000とした。式(5)で定義される吹き出し比BRは1.0，式(6)で定義される主流と二次空気の密度比DRは1.53とした。主流乱れTuは１％とし，また，主流入口部には数値解析により得た速度プロファイルを与え，実験と同様の境界層厚さを再現[11]した。境界層厚さは入口流入位置で$0.24d$である。

解析ドメイン主流側上面部には対称境界条件，主流側下面部には断熱壁条件，主流側側面部には周期境界条件を適用した。解析ドメイン二次空気側上面部には断熱壁条件，二次空気側側面部には周期境界条件または断熱壁条件を適用した。

$$BR = \rho_2 U_2 / \rho_\infty U_\infty \tag{5}$$

$$DR = \rho_2 / \rho_\infty \tag{6}$$

Table 5 Calculation conditions

Reynolds number	Re=6,000
Blowing ratio	BR=1.0
Density ratio	DR=1.53
Mainstream inlet	Velocity profile [m/s] 298.15 [K]
Secondary flow inlet	0.00871515 [kg/s] 194.85 [K]
Mainstream outlet	Static pressure 0 [PaG]

4．結果と考察

4.1　要素効果図（SN比）

調査した全54条件から算出した要因効果図をFig. 9に示す。この目的は，探索範囲の中からフィルム冷却効率及びロバスト性に大きく影響する制御因子を発見することである。

要因効果図から，制御因子C：Distance，D：Height，E：Length2は他の制御因子よりSN比に対する影響が高いことが分かる。したがって，この３因子がロバスト性の向上に大きく寄与していることがわかる。

タグチメソッドの望大特性は，制御因子において最もSN比が高い水準値を選択することで最適形状を導出することができる。

よって，最適化形状（Fig. 10）として，A1-B3-C1-D3-E3-F3-G2を選択した。即ち，A:Filletが$0.05d$，B:Angleが35deg，C:Distanceが$1.2d$，D:Heightが$0.5d$，E:Length2

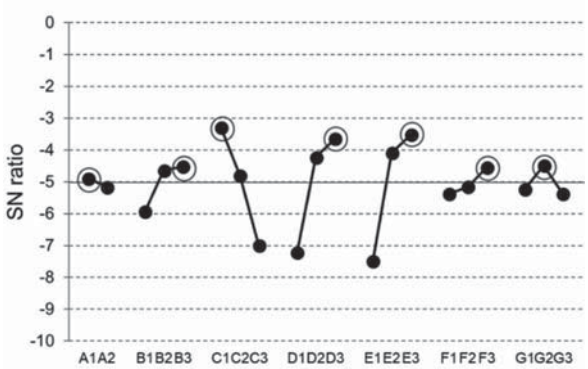


Fig. 9 Response graphs for major effect（film effectiveness）

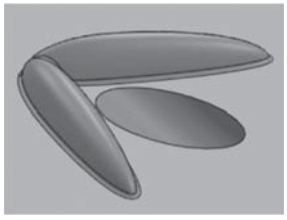


Fig. 10 V-Optimal

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

が2.0d，F:Width1が0.25d，G:Width2が0.3d の形状である。以下，この制御因子選択によって得られた形状をV-Optimalと呼ぶ。

4.2　最適形状の性能調査

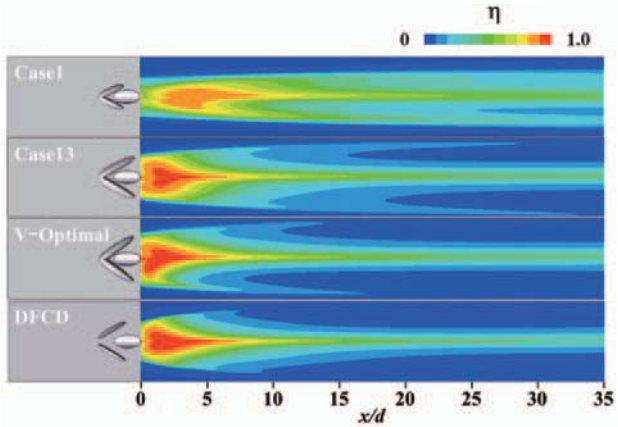
Case 1，Case 13及びDFCDを比較対象として選定し，フィルム冷却効率分布，フィルム冷却面平均効率値及び渦度分布により，V-Optimalのフィルム冷却性能を評価した。まずCase 1は，54条件の多くの結果と同様な傾向を示したため，代表例として選定した。誤差因子である流入角が拡大するとフィルム冷却効率が低下するという傾向である。また，Case 13は誤差因子に対して一定の高いフィルム冷却効率の結果を示したため選定した。DFCDは過去の研究で最適化された形状[12]を採用した（Fig. 1）。

Case 1，Case 13，V-Optimalの形状の大きな違いはAngle，Height，Length2が挙げられる。それぞれの特徴として，Angleは拡大するほど縦渦が中心から離れて生成される。Heightは高いほど縦渦が大きくなりCRVPを抑制する。Length2は長さで縦渦の生成位置が変わる。

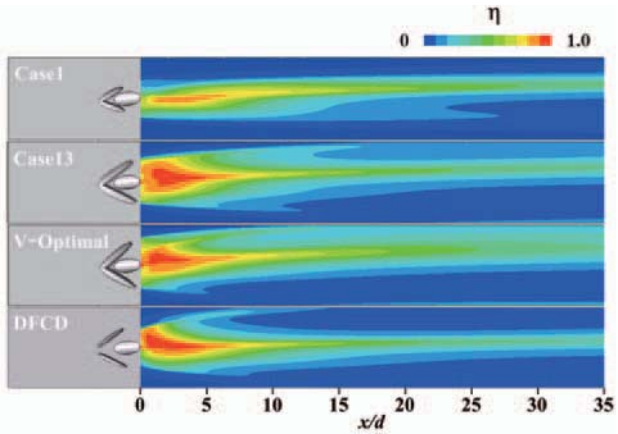
(1)フィルム冷却効率分布

フィルム冷却効率分布をFig. 11に示す。フィルム冷却効率分布において，Case 1は流入角が拡大すると共に付着性が低下しているのに対して，V-Optimalは流入角が拡大しても付着性が高く，フィルム冷却効率が高い。Case13と比較すると流入角 0 degではCase 13の付着性が高いが，流入角 5 deg，10degではV-Optimalの付着性が高い。

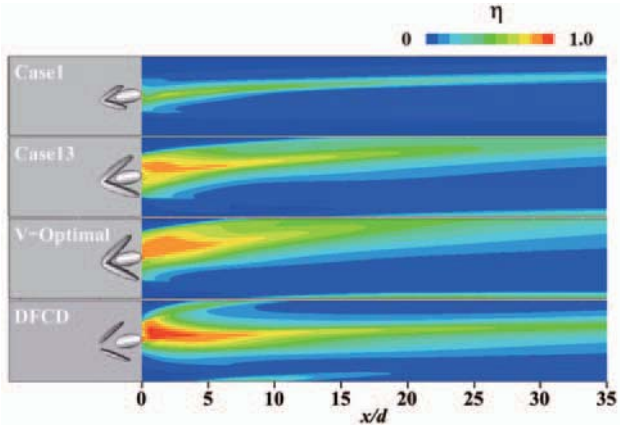
またDFCDと比較すると，流入角 0 deg，5 degではV-Optimalの方が下流部でスパン方向への付着性が高いが，流入角10degではDFCDの方が下流部での付着性が高い。



(a)　Inflow angle = 0 deg.



(b)　Inflow angle = 5 deg.



(c)　Inflow angle = 10 deg.

Fig. 11　Contours of film cooling effectiveness

(2)面平均フィルム冷却効率値

面平均フィルム冷却効率値をFig. 12に示す。V字デバイスにおいて，流入角 0 deg.のときCase 1が最も面平均高いが，流入角 5 deg.，10 deg.のときではV-Optimalが最も面平均が高い。また，Case 13と比較すると，V-Optimalは流入角 0 degのとき11％低く，5 degのとき11％，10degのとき 8 ％程度高い面平均結果となった。

DFCDと比較するとV-Optimalは流入角 0 degのとき10％，5 degのとき38％高く，10degのとき 2 ％程度低い面平均結果となった。流入角10deg.のとき僅かにV-Optimalが低い値を示した理由は，冷却孔直下において高いフィルム冷却効率の分布領域がDFCDの方が僅かに大きいためだと考える。

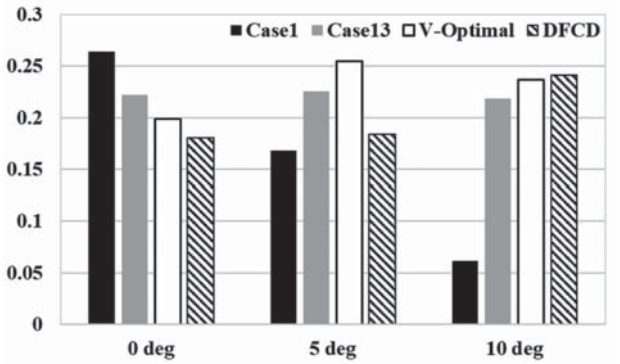
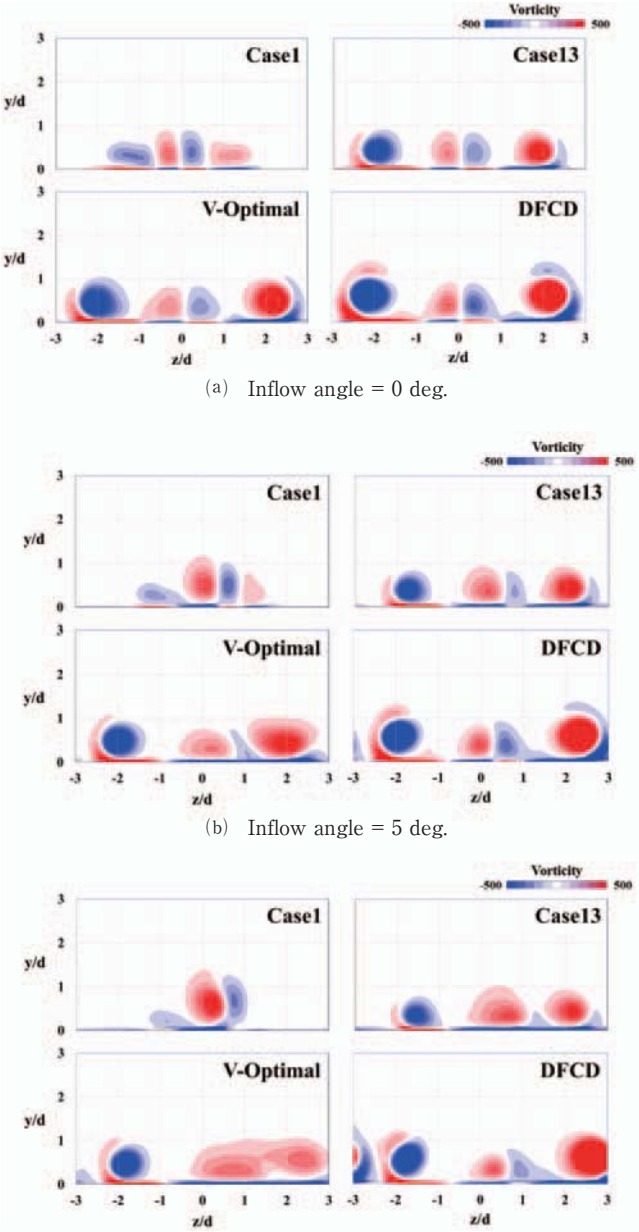


Fig. 12　Area-averaged film cooling effectiveness

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

(3)渦度分布

Fig. 13にx/d = 10の渦度分布を示す。Case 1はAngleとLength2が最も小さいため，縦渦がCRVPに近い位置で生成された。そのため，流入角 0 deg.のときCRVPをよく抑制している。しかし，流入角が大きくなるほど，生成位置のずれや縦渦が上手く生成できず，フィルム冷却効率が低い結果となった。次にCase 13について考える。流入角に対してロバストであるが，これはAngle，Height，Length2の大きさのバランスが関係している。縦渦の大きさや生成位置が中心対称でバランスも良く，流入角が大きくなってもCRVPを抑制したと考える。V-OptimalはAngleとLength2が大きく下流域に進むほど縦渦が外側へ離れていくため，流入角 0 deg.のとき冷却孔直下はフィルム冷却効率が高く，下流域は低い。しかし，流入角が大きくなると冷却孔直下から下流域まで平均的にz方向へ分布が拡大している。これは流入角により縦渦の位置がよりCRVPに近づいたためだと考える。



(a)　Inflow angle = 0 deg.

(b)　Inflow angle = 5 deg.

(c)　Inflow angle = 10 deg.

Fig. 13　Contours of vorticity（x/d = 10）

5．結言

本研究では最適化手法のタグチメソッドを用い，新規デバイスのV字デバイスの最適形状導出を行い，以下の知見を得た。

(1)　要因効果図より，制御因子C：Distance，D：Height，E：Length2が主流流入角変化に対するロバスト性に大きく寄与している。

(2)　導出した最適形状はAngleとLength2の効果により主流流入角が大きくなっても縦渦がCRVPを抑制するため，高いフィルム冷却効率を維持することができる。

(3)　導出した最適化形状はDFCDと比べても下流域まで付着性が高く，高いフィルム冷却効率を示した。

なお，V字デバイスはDFCD並みの高いフィルム冷却効率を示すことが分かった。今後は空力損失とデバイス自体への熱負荷を考慮した形状最適化を行い，実験的検証も行う予定である。

参考文献

(1)　B. A. Haven, D. K. Yamagata, M. kurosaka, S. Yamawaki, and T. Maya, 1997, "Anti-kidney pair of vortices in shaped holes and their influence on film cooling effectiveness", ASME IGTI Turbo EXPO, No. 97-GT-45.

(2)　Ken-ichi Funazaki, Ryota Nakata, Hirokazu Kawabata, 2014, ” Improvement of Flat-Plate Film Cooling Performance by Double Flow Control Device : Part1-Investigations on Capability of A Base-Type Device”, proceedings of ASME Turbo EXPO, GT2014-25751.

(3)　佐々木宏和，船﨑健一，瀧澤隼人，田川久人，中野晋，2016，”流れ制御デバイスを用いた平板フィルム冷却の高効率化に関する研究 -PSP＆PIV計測による密度比影響調査-”，第44回日本ガスタービン学会定期講演会，P. 1-2.

(4)　立林和夫，“入門タグチメソッド”，日科技連出版，2004.

(5)　齋藤涼，船﨑健一，河村朋広，田川久人，森﨑哲郎，2018，“流れ制御デバイスを用いたフィルム冷却の高効率化に関する研究”，東北学生会第48回学生員卒業研究発表講演会

(6)　川端浩和，船﨑健一，2014，“高圧タービン翼フィルム冷却の熱流体特性及び流れ制御技術に関する研究”，岩手大学博士学位論文, P. 321-360.

(7)　ANSYS, ANSYS Workbench, AUTODYN, CFX, FLUENT and any and all ANSYS, Inc. brand, product, service and feature names, logos and slogans are registered trademarks or trademarks of ANSYS, Inc. or its subsidiaries in the United States or other countries. ICEM CFD is a trademark used by ANSYS,

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

Inc. under license. All other brand, product, service and feature names or trademarks are the property of their respective owners.

(8) Hirokazu Kawabata, Ken-ichi Funazaki, Ryota Nakata, Hisato Tagawa, Yasuhiro Horiuchi, 2014, ” Improvement of Flat-Plate Film Cooling Performance by Double Flow Control Device : Part2 -Optimization of Device Shape and Arrangement by Experiment- and CFD-Based Taguchi Method”, proceedings of ASME Turbo EXPO, GT2014-26070.

(9) 佐々木宏和，船﨑健一，2017，“感圧塗料計測系の開発および先進的フィルム冷却技術の伝熱性能評価”，岩手大学修士学位論文, P. 107-108.

(10) 瀧澤隼人，船﨑健一，2017，“流れ制御デバイスを用いたフィルム冷却の高性能化に関する研究 - デバイス形状最適化及び新規デバイス形状の探索 - ”，岩手大学修士学位論文, P. 94-95.

(11) 川端浩和，船﨑健一，2014，“高圧タービン翼フィルム冷却の熱流体特性及び流れ制御技術に関する研究”，岩手大学博士学位論文, P. 63-64.

(12) 河村朋広，船﨑健一，瀧澤隼人，田川久人，森﨑哲郎，2018，” 流れ制御デバイスを用いたフィルム冷却の高効率化に関する研究-高密度比条件におけるデバイス最適形状検討-”，日本ガスタービン学会誌2018.7，P. 306.

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

技術論文

サイクル計算による アンモニア/天然ガス混焼ガスタービンの性能予測

Performance Prediction by Cycle Simulation for Ammonia / Natural Gas Co-fired Gas Turbine

伊藤 慎太朗*1 ITO Shintaro
内田 正宏*1 UCHIDA Masahiro
藤森 俊郎*1 FUJIMORI Toshiro
小林 秀昭*2 KOBAYASHI Hideaki

ABSTRACT

Performances of an NH3/natural-gas co-fired gas-turbine have been studied by simplified cycle simulations which account for NO emission from NH_3. Results showed that generator-end efficiency increases and turbine inlet temperature decreases with increasing NH_3 mixing ratio because the lower heating value of NH_3 is lower than that of natural gas. These changes cause saving fuel and reducing damages to turbines. On the other hand, generator-end efficiency decreases as the NO conversion ratio increases due to incomplete combustion of NH_3. It was shown that high NOx emission has adverse effects both on air pollution and operating cost. Further, it was also shown that the turbine outlet temperature decreases with increasing NH_3 mixing ratio, leading to the low thermal efficiency of the heat recovery steam generator. However, it is expected that high thermal efficiency could be maintained by adjusting the compressor inlet air flow rate to keep the turbine inlet temperature constant.

キーワード：ガスタービン，アンモニア，天然ガス，サイクル計算，効率
Key words：Gas Turbine, Ammonia, Natural gas, Cycle simulation, Efficiency

1．緒言

火力発電設備からのCO_2排出量を低減するため，アンモニアを燃料として利用する技術が注目されている。アンモニアは，再生可能エネルギーから生成される水素のエネルギーキャリア[(1),(2),(3)]の一つであり，①水素からの生成技術が確立されている，②輸送・貯留インフラが存在し，ハンドリング技術も確立されている，③20 ℃，0.857 MPaで液化するため，水素に比べ輸送・貯留コストが低い，④分子中の水素含有率が高い，⑤水素に再変換することなく直接燃焼可能であり，分子中に炭素原子を持たないカーボンフリー燃料でもある，というような優れた特性を持つ。このため，ガスタービン用燃料としてアンモニアを利用することができれば，CO_2排出量の削減に大きく寄与する。しかし，燃料としてのアンモニアには，課題も存在する。アンモニアは代表的な炭化水素燃料であるメタンに比べ，層流燃焼速度が約1/5 [(4)]，低位発熱量が約37%，断熱火炎温度が200 ℃～400 ℃程度低い。このため，アンモニアをガスタービンで使用する場合には燃焼安定性の悪化，燃焼効率の低下が懸念される。また，アンモニアは分子中に窒素原子を含んでおり，Fuel-NOxの発生が懸念される。一方で，アンモニアは，NOxの還元作用も有しており，NOxの生成および還元に関して複雑な反応メカニズムを有していることから[(5),(6)]，アンモニア燃焼におけるNOx濃度の予測は難しい。アンモニアは従来の炭化水素燃料とは大きく異なる燃焼特性を持つため，アンモニアを燃料として用いる場合には，従来の燃焼器設計技術が直接適用できず新たな技術開発が必要となる。これらの課題を解決し，自動車用エンジン[(7)]，工業炉[(8)]，ガスタービン[(9),(10)]，石炭焚きボイラ[(11),(12)]といった燃焼機器でアンモニアを燃料として利用するための研究が行われている。

著者らは，これまでに天然ガス焚きガスタービンでアンモニアを混焼することを目的として，スワールバーナにおけるアンモニアの燃焼特性把握，低NOx燃焼技術について研究開発を行ってきた[(13),(14),(15),(16)]。しかし，アンモニア/天然ガス混焼が，発電端効率やコジェネレーションシステムの総合熱効率等のガスタービン性能に及ぼす影響については知見が不足している。例えば，倉田ら[(7),(8)]がマイクロガスタービンで実施したアンモニア/メタン混焼試験では，アンモニア混焼時にNO濃度は最大で1200 ppmを超え，アンモニアのNO転換率は最大57%に達することが報告されている。このようにアンモ

原稿受付　2019年４月９日
査読完了　2019年10月18日
＊１　㈱IHI 技術基盤センター
〒235-8501　横浜市磯子区新中原町１番地
E-mail: ito7931@ihi-g.com
＊２　東北大学 流体科学研究所
〒980-8577　仙台市青葉区片平２－１－１

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

ニアの燃焼により生成されるNOx濃度は，天然ガス燃焼に比べ非常に高濃度であり，ガスタービン性能に大きく影響を与える可能性がある。そこで，本研究ではアンモニア燃焼からのNO生成を考慮したサイクル計算により，アンモニアを燃料として使用することが，発電端効率や総合熱効率等のガスタービン性能に与える影響について評価した。

2．主な記号

C_{NO} ：NO転換率［%］
G_A ：圧縮機吸入空気量［kg/s］
G_{CH4} ：メタン供給量［kg/s］
G_{EX} ：排気ガス流量［kg/s］
G_{NH3} ：アンモニア供給量［kg/s］
G_W ：排熱回収ボイラ（HRSG: Heat Recovery Steam Generator）給水量［kg/s］
h_{IC} ：圧縮機入口ガスのエンタルピ［MJ/kg］
h_{IT} ：タービン入口ガスのエンタルピ［MJ/kg］
h_{OC} ：圧縮機出口ガスのエンタルピ［MJ/kg］
h_{OH} ：HRSG出口における排気ガスのエンタルピ［MJ/kg］
h_{OT} ：タービン出口ガスのエンタルピ［MJ/kg］
h_S ：HRSGで生成される蒸気のエンタルピ［MJ/kg］
h_{OT} ：HRSGに供給される水のエンタルピ［MJ/kg］
H_{CH4} ：メタンの低位発熱量, 50.0［MJ/kg］
H_{NH3} ：アンモニアの低位発熱量, 18.6［MJ/kg］
H_F ：混合気体の低位発熱量［MJ/kg］
P_{CH4} ：メタン供給圧力［kPa］
P_{IC} ：圧縮機入口ガス圧力［kPa］
P_{IT} ：タービン入口圧力［kPa］
P_{NH3} ：アンモニア供給圧力［kPa］
P_{OC} ：圧縮機出口ガス圧力［kPa］
P_{OH} ：排熱回収ボイラ出口排気ガス圧力［kPa］
P_{OT} ：タービン出口圧力［kPa］
P_S ：排熱回収ボイラ発生蒸気圧力［kPa］
P_W ：排熱回収ボイラ給水圧力［kPa］
r_{NH3} ：アンモニア混焼率［%］
T_{CH4} ：メタン供給温度［℃］
T_{IC} ：圧縮機入口ガス温度［℃］
T_{IT} ：タービン入口温度［℃］
T_{NH3} ：アンモニア供給温度［℃］
T_{OC} ：圧縮機出口ガス温度［℃］
T_{OH} ：排熱回収ボイラ出口排気ガス温度［℃］
T_{OT} ：タービン出口温度［℃］
T_S ：排熱回収ボイラ発生蒸気温度［℃］
T_W ：排熱回収ボイラ給水温度［℃］
W_C ：圧縮機動力［MW］
W_F ：燃料の総投入熱量［MW］
W_G ：発電出力［MW］
W_T ：タービン出力［MW］
η_C ：圧縮機効率［%］
η_G ：発電機効率［%］
η_{GE} ：発電端効率［%］
η_T ：タービン効率［%］
η_{th} ：総合熱効率［%］

添字
ac ：実際の状態
id ：損失がない理想状態

3．計算方法

3.1 計算モデル

サイクル計算にはAspen Technology社製の商用プロセスシミュレータであるAspen HYSYS v9を用いた。Fig. 1に構築したガスタービンのサイクル計算モデルを示す。ガスタービンは出力2MW級のシンプルサイクルガスタービンを想定した。計算では，ガスタービン単体の場合，タービン出口に排熱回収ボイラ（HRSG: Heat Recovery Steam Generator）を設置した場合の二つのシステムで評価を行った。エンジン本体は圧縮機，燃焼器およびタービンの3部品から構成される簡易モデルとし，圧縮機の中間段あるいは出口での抽気，軸やタービンの冷却空気，脱硝装置については考慮していない。また，各要素間の流路における熱および圧力損失は無視した。

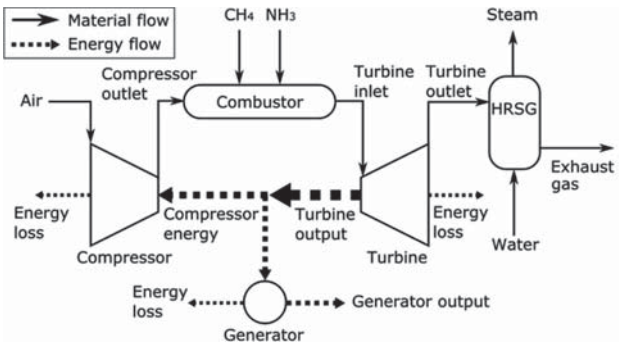


Fig. 1 Cycle simulation model of Gas Turbine with HRSG

3.1.1 圧縮機 圧縮機は圧縮機入口における温度，圧力，圧縮機入口と出口の圧力比，圧縮機効率，空気流量を入力値とし，圧縮機出口における空気のエンタルピを算出した。ここで圧縮機効率は75%で一定とし，以下のように定義した。

$$\eta_C = 100 \times W_{C,id}/W_{C,ac} \quad (1)$$

$$W_{C,ac} = G_A(h_{OC} - h_{IC})_{ac} \quad (2)$$

$$W_{C,id} = G_A(h_{OC} - h_{IC})_{id} \quad (3)$$

ここでエンタルピの計算にはPeng-Robinsonの状態方程式⑰を使用した。圧縮機出口温度は圧縮機出口エンタルピから算出した。

3.1.2 燃焼器 燃焼器には，圧縮機で圧縮された空気，燃料としてメタンとアンモニアガスを供給した。燃料

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

の供給圧力はメタン・アンモニアともに2000 kPaとし，アンモニアの温度は供給圧力における凝縮温度よりも十分に高い温度とした。燃料の混合比率はアンモニア混焼率で表し，投入燃料の全熱量に占める投入アンモニアの熱量の比率として以下のように定義した。

$$r_{NH3} = 100 \times G_{NH3} H_{NH3} / (G_{NH3} H_{NH3} + G_{CH4} H_{CH4}) \quad (4)$$

燃焼器内のける燃焼反応としては以下に示す３つの総括反応を考慮した。

$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O + 803$ kJ/mol　(R1)

$NH_3 + 0.75O_2 \rightarrow 0.5N_2 + 1.5H_2O + 318$ kJ/mol　(R2)

$NH_3 + 1.25O_2 \rightarrow NO + 1.5H_2O + 226$ kJ/mol　(R3)

反応式（R1），（R2）はメタンおよびアンモニアの完全燃焼反応式であり，反応式（R3）はアンモニアからのNO生成反応である。アンモニア/メタン混焼における主なエミッションとしては，未燃NH_3，CO，未燃炭化水素，NOxが挙げられる。本計算では，これらのうち，NOxが生成されることによる発電端効率や総合熱効率の変化を評価するため，NOx以外のエミッションについては無視した。また，アンモニアとメタンではNOxの生成メカニズムが異なるが，試験結果[13]より，メタンの燃焼により生成されるNOxは，アンモニアの燃焼により生成されるNOxに比べては無視できるほど低濃度であり，NOxの主成分はNOであることがわかっている。そこで，アンモニアから生成されるNOのみを考慮した。

燃焼器における実際の燃焼現象は，空間的および時間的に変化する非常に複雑な現象であるが，定常運転時の発電端効率や総合熱効率に対しては，燃焼器出口における温度および組成が重要であり，過渡的な温度および組成は影響しないため，総括反応式を用い，瞬時に反応するものとした。

Table 1に，反応式（R1）～（R3）の反応割合を示す。メタンは全量が完全燃焼するとした。一方で，アンモニアについては，NO生成による発熱量の変化を表現するため，一部がNOに変換されるものとし，反応式（R2），（R3）の反応割合をパラメータとして変化させた。反応式（R2），（R3）の反応割合の変化は，（R3）の反応割合をNO転換率として定義し，Table 1のように示す。

Table 1　Reaction ratio of CH_4 and NH_3

	Methane	Ammonia
Reaction ratio of R1[%]	100	0
Reaction ratio of R2[%]	0	100 - C_{NO}
Reaction ratio of R2[%]	0	C_{NO}
Total reaction ratio[%]	100	100

3.1.3　タービン　タービンについてはタービン入口における温度，圧力，タービン入口と出口の圧力比，タービン効率，排気ガス流量を入力値とし，タービン出口における空気のエンタルピを算出した。タービン出口圧力については，ガスタービン単体の条件では101.3 kPa，HRSG有りの場合には圧力損失を考慮し104.3 kPaとした。タービン効率は条件によらず85%で一定とし，以下のように定義した。

$$\eta_T = 100 \times W_{T,ac} / W_{T,id} \quad (5)$$

$$W_{T,ac} = G_{EX} (h_{OT} - h_{IT})_{ac} \quad (6)$$

$$W_{T,id} = G_{EX} (h_{OT} - h_{IT})_{id} \quad (7)$$

$$G_{EX} = G_A + G_{CH4} + G_{NH3} \quad (8)$$

タービン出口温度は，圧縮機と同様にタービン出口のエンタルピから算出した。

3.1.4　HRSG　HRSGの挙動は排気ガスと水のエネルギー保存則から算出した。計算では熱損失を無視し，以下のように定義した。

$$G_{EX} (h_{OT} - h_{OH}) = G_W (h_S - h_W) \quad (9)$$

ここで給水温度/圧力，蒸気温度/圧力およびHRSG出口の排気ガス温度は一定とした。ガスタービン運転条件の変更によるタービン出口のエンタルピ変化に対しては，式(9)が成り立つよう給水量を調整して計算を行った。

3.1.5　発電出力，発電端効率，総合熱効率　発電出力，発電端効率，総合熱効率は以下のように定義した。

$$W_G = \eta_G / 100 \times (W_T - W_C)_{ac} \quad (10)$$

$$\eta_{GE} = 100 \times W_G / W_F \quad (11)$$

$$\eta_{th} = 100 \times \{ W_G + G_W (h_S - h_W) \} / W_F \quad (12)$$

$$W_F = G_{NH3} H_{NH3} + G_{CH4} H_{CH4} \quad (13)$$

発電機効率については，条件によらず95%で一定とした。また，発電出力は，条件によらず2.0 MWで一定となるよう燃料流量を調整した。

3.2　計算条件

Table 2に計算条件を示す。Case 1はHRSGが無いガスタービン単体運転の場合であり，アンモニア混焼率とNO転換率をパラメータとした。Case 2および3はHRSGが有るコジェネレーションシステム運転の場合であり，アンモニア混焼率のみをパラメータとした。いずれの条件においても，発電出力が一定となるように燃料流量を調整した。Case 3のみは，発電出力に加え，タービン入口温度がメタン専焼（r_{NH3}= 0 %）の1045 ℃のまま一定となるように圧縮機吸気空気量も調節した。これらの計算条件の違いが，タービン入口/出口温度，発電端効率，総合熱効率等に及ぼす影響を評価した。

4．計算結果

4.1　ガスタービン単体運転条件（Case 1）

4.1.1　NO発生が無い場合のガスタービン性能　Fig. 2にCase 1でNOが発生しない場合（C_{NO}= 0 %）におけるアンモニア混焼率とメタンおよびアンモニアの質量流量，総質量流量および燃料の総投入熱量の関係を示す。アンモニア混焼率が増加すると，メタン流量は単調に低下し，アンモニア流量は単調に増加する。増減量の変化に着目すると，メタンの減少量に対してアンモニアの増加量が大きく，燃料の総質量流量はアンモニア混焼率に対し単調増加する傾向にある。一方で，燃料

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

Table 2 Calculation condition

Unit	Item	Case 1	Case 2	Case 3
System	-	Without HRSG	With HRSG	
Compressor	G_A [kg/s]	9.5		Calculated
	T_{IC} [℃]	15		
	P_{IC} [kPaA]	101.3		
	T_{OC} [℃]	377		
	P_{OC} [kPaA]	1114		
	η_C [%]	75		
Combustor	r_{NH3} [%]	0-100		
	G_{CH4} [kg/s]	Calculated		
	T_{CH4} [℃]	30		
	P_{CH4} [kPaG]	2000		
	G_{NH3} [kg/s]	Calculated		
	T_{NH3} [℃]	70		
	P_{NH3} [kPaG]	2000		
	C_{NO} [%]	0, 5, 10	0	
Turbine	P_{IT} [kPaA]	P_{OC}		
	T_{IT} [℃]	Calculated		1045*
	P_{OT} [kPaA]	101.3	104.3	
	η_T [%]	85		
HRSG	T_W [℃]	-	60	
	P_W [kPaA]	-	1300	
	T_S [℃]	-	180	
	P_S [kPaA]	-	800	
	T_{OH} [℃]	-	160	
	G_W [kg/s]	-	Calculated	
Generator	η_G [%]	95		
	W_G [MW]	2.0		

* Same value as T_{IT} of case 2, r_{NH3}=0%.

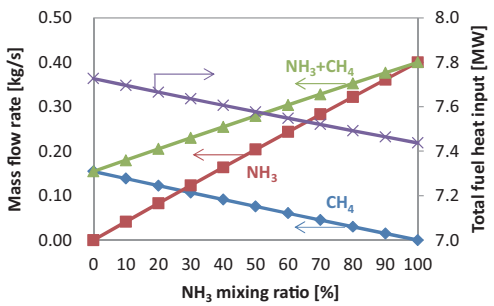


Fig. 2 Effect of NH_3 mixing ratio on fuel mass flow rate and total fuel heat input（Case 1, C_{NO}= 0 %）

の総投入熱量はアンモニア混焼率が増加すると単調減少しており，メタン専焼（r_{NH3}= 0 %）からアンモニア専焼（r_{NH3}=100%）へ変化すると約3.7%低下した。これはアンモニアの低位発熱量がメタンの約37%と非常に小さいことが原因である。アンモニアは低位発熱量が小さいため，アンモニア混焼（r_{NH3}> 0 %）時にメタン専焼（r_{NH3}= 0 %）時と同じ総投入熱量を維持すると，総燃料流量が増加し，タービン通過ガス流量が増加する。タービン通過ガス流量が増加すると，タービン出力が増加するため，２MWの発電出力得るのに必要な総投入熱量が低下する。これはアンモニアのように低位発熱量が小さい燃料では，燃料供給動力の一部がタービンで回収されることを示している。このため，アンモニア混焼により発電端効率は向上するものの，アンモニアの供給動力を加味した送電端効率は低下する可能性がある。一方，アンモニアの気化，昇温にガスタービンや工場の未利用排熱が利用できれば送電端効率の低下を抑制できる可能性がある。また，実際のガスタービンでは，タービン通過ガス流量が増加すると，タービン効率が変化する。また，タービンでの圧力損失が増加すると，圧縮機出口圧力が増加し，圧縮機効率にも影響を与える可能性がある。より詳細な検討を行うためには，具体的なアンモニア供給方法やタービンおよび圧縮機の性能変化を考慮し

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

た計算モデルが必要となる。

Fig. 3にNOが発生しない場合（C_{NO}= 0 %）におけるアンモニア混焼率と発電端効率およびCO_2排出量削減率の関係を示す。CO_2排出量削減率は，メタン専焼（r_{NH3} = 0 %）のCO_2排出量に対する削減割合と定義した。発電端効率はアンモニア混焼率の増加に対して単調増加しており，メタン専焼（r_{NH3}= 0 %）からアンモニア専焼（r_{NH3}=100%）へ変化すると最大で 1 %程度高い値となる。これはアンモニア混焼率の増加により総投入熱量が低下したためであり，発電出力が一定のため発電端効率が増加する結果となった。CO_2排出量削減率は，アンモニア混焼率に対しほぼ線形に減少している。アンモニア混焼率50%でのCO_2排出量削減率は約51%と発電端効率が向上する効果によりアンモニア混焼率よりもやや高いCO_2削減効果が得られている。

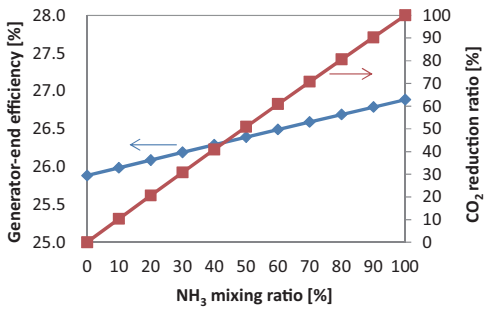


Fig. 3 Effect of NH_3 mixing ratio on generator-end efficiency and CO_2 reduction ratio（Case 1, C_{NO}= 0 %）

Fig. 4にNOが発生しない場合（C_{NO}= 0 %）におけるアンモニア混焼率とタービン入口および出口ガス温度の関係を示す。アンモニア混焼率が増加すると，双方のガス温度が単調に低下する。これはアンモニアの火炎温度がメタンに比べ低いこと，アンモニア混焼により燃料の総投入熱量が低下することが原因である。タービン入口ガス温度の低下は，タービンの耐久性の向上や破損リスクの低減に寄与すると考えられる。

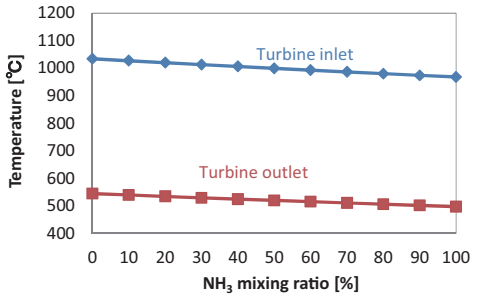


Fig. 4 Effect of NH_3 mixing ratio on gas temperature at turbine inlet and outlet（Case 1, C_{NO}= 0 %）

4.1.2　NO転換率の影響　ガスタービン単体運転条件（Case 1）で，NO転換率をパラメータとし，エンジンに及ぼす影響を調査した。ここで計算では，アンモニア混焼率に依らずNO転換率は 5 , 10%で一定とした。実際のガスタービンでは，アンモニア混焼率によってNO転換率が変化するはずであるが，本計算はNO発生の影響を検討することが目的であるため，NO転換率を固定した検討を行った。

Fig. 5にNO転換率 5 %および10%におけるアンモニア混焼率とタービン出口におけるNO濃度の関係を示す。ここでNO濃度は無水条件での濃度とし，酸素濃度16%に換算して示した。NO濃度はアンモニア混焼率に対し単調に増加する。計算した条件中でNO濃度が最も高くなるのは，NO転換率10%のアンモニア専焼条件（r_{NH3}=100%）であり，1800 ppm以上の値となる。

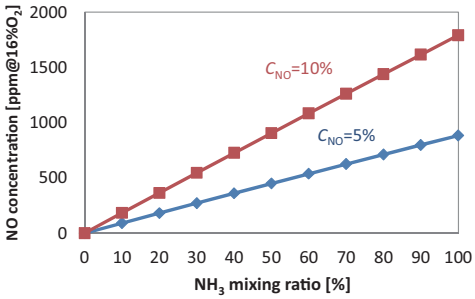


Fig. 5 Effect of NH_3 mixing ratio and NO conversion ratio on NO concentration at turbine outlet（Case 1）

Fig. 6，7にアンモニア混焼率と，総燃料流量および発電端効率の関係，CO_2排出量削減率の関係をそれぞれ示す。ここで，総燃料流量，発電端効率，CO_2排出量削減率はNOが発生しない場合（C_{NO}= 0 %）を基準として，そこからの差分で示した。 総燃料流量は，アンモニア混焼率が高いほど，またNO転換率が高いほど増加する。これは，式（R2），（R3）に示すように，1molのアンモニアが完全燃焼すると318kJの熱量が得られるが，NOに変換されると226 kJの熱量しか得られず，より多くの燃料を投入する必要があるためである。発電端効率は，アンモニア混焼率が高く，またNO転換率が高いほど低下する。アンモニア専焼条件（r_{NH3}=100%）で発電端効率を比較すると，NO転換率が 5 %増加する毎に約0.38%が低下する。Fig. 3で示したようにNOが発生しない場合（C_{NO}= 0 %）に，メタン専焼（r_{NH3}= 0 %）からアンモニア専焼（r_{NH3}=100%）への変更で約 1 %の発電端効率上昇が得られる。しかし，NO転換率と発電端効率が正比例の関係にあると仮定すると，NO転換率13%以上でアンモニア専焼（r_{NH3}=100%）の場合の発電端効率がメタン専焼（r_{NH3} = 0 %）よりも低くなると推定される。

CO_2排出量削減率は，NO転換率が高いほど減少する。アンモニア混焼率50%では，NO転換率が 5 %増加する毎にCO_2排出量削減率が約0.35%減少する。

以上のように，アンモニアからのNO生成は，発電端効率低下などガスタービンの運転性能に悪影響を及ぼす。NO生成による総燃料流量の増加は，CO_2排出量の削減

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

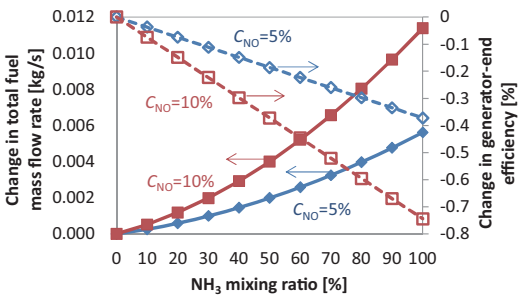


Fig. 6　Effect of NH_3 mixing ratio on change in total fuel mass flow rate and generator-end efficiency（Case 1, C_{NO}=5, 10%）

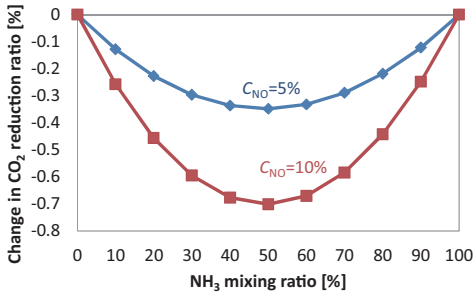


Fig. 7　Effect of NH_3 mixing ratio on change in CO_2 reduction ratio（Case 1, C_{NO}=5, 10%）

量が期待値を下回るなどの結果を引き起こす。このため，エンジン性能の正確な予測のためには，NOx生成量の正確な予測が重要となる。さらに，大量のNOx生成は，脱硝装置の大型化，脱硝用還元剤の流量増加といった設備および運用コストの増大にもつながるため，低NOx燃焼技術の開発も非常に重要である。

4.2　コジェネレーションシステム運転条件(Case 2, 3)

4.2.1　空気流量一定の場合（Case 2）　発電出力2 MW程度の小型ガスタービンでは，タービン出口に排熱回収ボイラを設けたコジェネレーションシステムとして使用すること一般的である。そこでコジェネレーションシステムにおけるアンモニア混焼の影響を検討した。

Fig. 8にコジェネレーションシステムにおけるアンモニア混焼率と燃料の総投入熱量および発電端効率の関係を示す。燃料の総投入熱量については，Fig. 2とFig. 8の比較から，アンモニア混焼率によってコジェネレーションシステムで0.14 MW程度多いことが確認できる。また，発電端効率については，Fig. 3とFig. 8の比較から，コジェネレーションシステムで約0.46%低いことが確認できる。これらの変化は，HRSGを設けたことでタービン出口の圧力損失が3 kPa増加した影響によるものである。

Fig. 9～11にコジェネレーションシステムのアンモニア混焼率と，HRSGへの給水量および総合熱効率の関係，タービン入口および出口ガス温度の関係，排気ガス流量の関係をそれぞれ示す。給水量および総合熱効率はアンモニア混焼率に対し単調に減少する。この理由はタービン入口および出口ガス温度と排気ガス流量の変化から理解することができる。アンモニア混焼率が増加すると，ガス温度は単調に減少し，ガス流量は単調に増加する。これらの変化により，式(9)左辺で排気ガス流量の増加よりも，タービン出口エンタルピの減少，すなわち，タービン出口温度の低下が支配的となり，給水量が低下する。本計算モデルにおける総合熱効率は，式(12)に示すように，給水量と燃料の総投入熱量のバランスによって変化する。ここではアンモニア混焼率の増加に対する給

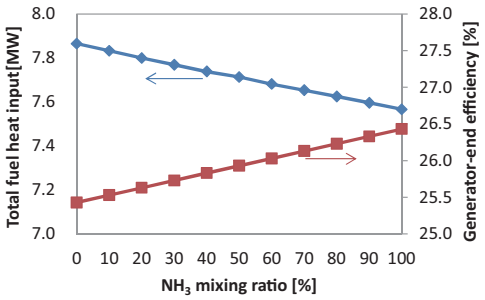


Fig. 8　Effect of NH_3 mixing ratio on total fuel heat input and generator-end efficiency（Case 2）

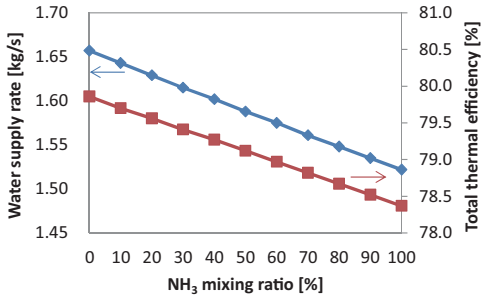


Fig. 9　Effect of NH_3 mixing ratio on water supply rate to HRSG and total thermal efficiency（Case 2）

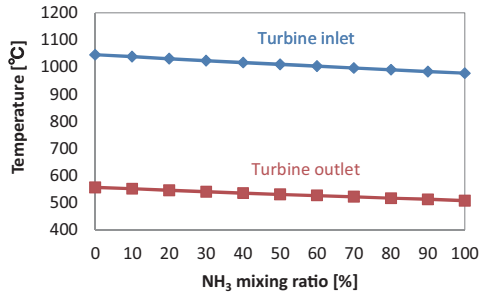


Fig. 10　Effect of NH_3 mixing ratio on gas temperature at turbine inlet and outlet（Case 2）

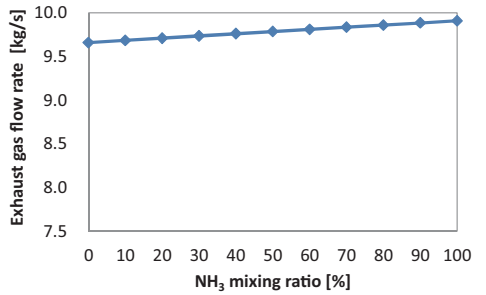


Fig. 11　Effect of NH_3 mixing ratio on exhaust gas flow rate at turbine outlet（Case 2）

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

水量低下の影響が，燃料の総投入熱量減少の影響よりも強く，総合熱効率が低下した。このように，アンモニア混焼によるタービン出口温度の低下は，コジェネレーションシステムにおいて，総合熱効率の低下を起こす可能性がある。一方で，タービン入口温度は，ガスタービン単体運転条件（Case 1）の場合と同様に，アンモニア混焼により低下しており，タービンの耐久性に良好な影響をもたらすと考えられる。

4.2.2　タービン入口温度一定の場合（Case 3）　前節で総合熱効率の低下はタービン出口温度の低下が主要因であることが示された。そこで，アンモニア混焼によるHRSGへの影響を回避するため，アンモニア混焼時（r_{NH3}> 0 %）のタービン入口温度がメタン専焼時（r_{NH3}= 0 %）のタービン入口温度1045 ℃のまま一定となるよう，圧縮機吸入空気量を調整した計算を行った。

アンモニア混焼率と圧縮機吸入空気量および排気ガス流量の関係をFig. 12に，タービン入口および出口のガス温度の関係をFig. 13に示す。圧縮機吸入空気量および排気ガス流量はアンモニア混焼率が増加すると単調に減少する。このとき，一定に固定しているタービン入口温度だけでなく，タービン出口温度もアンモニア混焼率によらず一定になることがFig. 13より確認できる。タービンの入口および出口の条件は式(5)～(7)に従うため，条件を固定したタービン入口温度および圧力，タービン出口圧力だけでなく，タービン出口温度も一定の状態でバランスするよう圧縮機吸入空気量が調整されていることを示している。

Fig. 14にアンモニア混焼率と燃料の総投入熱量および発電端効率の関係を示す。Fig. 8とFig. 14の比較から，タービン入口温度一定の場合（Case 3）にも空気流量一定の場合（Case 2）と同様に，アンモニア混焼率が増加すると燃料の総投入熱量が減少し，発電端効率が増加する傾向であることが確認できる。しかし，アンモニア混焼率の変化に対する感度は，タービン入口温度一定の場合（Case 3）の方が大きい。これは圧縮機吸入空気量が減少することで，圧縮機動力が低下したためである。圧縮機動力の低下は，式(10)より 2 MW発電に必要なタービン出力が減少をもたらし，結果として総投入熱量の低下につながる。

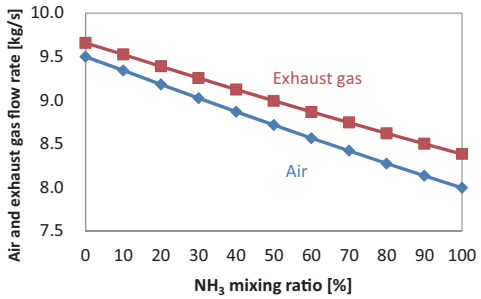


Fig. 12　Effect of NH_3 mixing ratio on compressor inlet air flow rate and exhaust gas flow rate at turbine outlet（Case 3）

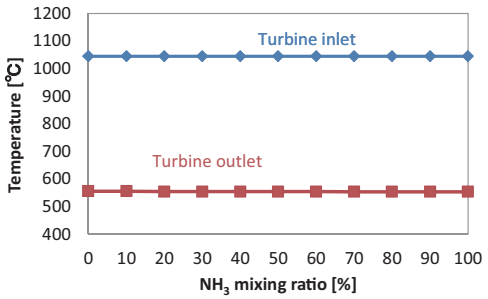


Fig. 13　Effect of NH_3 mixing ratio on gas temperature at turbine inlet and outlet（Case 3）

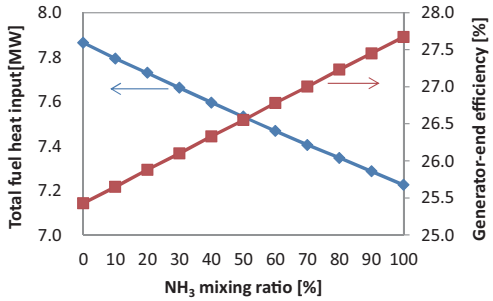


Fig. 14　Effect of NH_3 mixing ratio on total fuel heat input and generator-end efficiency（Case 3）

Fig. 15に，アンモニア混焼率に対するHRSGへの給水量および総合熱効率の変化を示す。Fig. 9とFig. 15の比較から，アンモニア混焼率に対する給水量の変化は，タービン入口温度一定の場合（Case 3）と空気流量一定の場合（Case 2）で同じ傾向である。しかし，アンモニア混焼率に対する給水量の変化量はタービン入口温度一定の場合（Case 3）方が大きい。この傾向から，空気流量一定の場合（Case 2）におけるタービン出口温度の低下よりも，タービン入口温度一定の場合（Case 3）における排気ガス流量の減少の方が，給水量に与える影響が強いことが確認できる。一方で総合熱効率に関しては，タービン入口温度一定の場合（Case 3）と空気流量一定の場合（Case 2）で大きく傾向が異なる。これはタービン入口温度一定の場合（Case 3）にも，アンモニア混焼率増加に対する給水量低下による熱効率低下の影響があるが，燃料の総投入熱量低下の影響がより大きく，発電

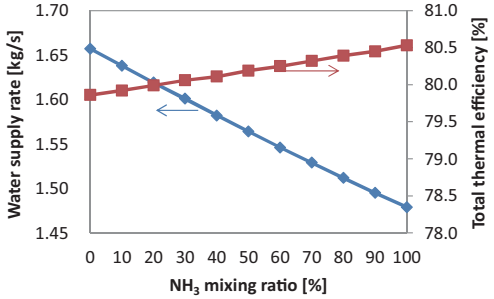


Fig. 15　Effect of NH_3 mixing ratio on water supply rate to HRSG and total thermal efficiency（Case 3）

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

端効率が増加の影響が支配的になるためである。

以上のように，タービン入口温度を一定に保つように圧縮機吸入空気量を調整することで，アンモニア混焼時に総合熱効率を高く保つことができることが示された。しかし，実際のガスタービンでは，圧縮機吸入空気量の減少により高温部材の冷却空気の不足やタービン入口ガス温度の上昇に依るダメージが懸念されため，これらのバランスを取るような装置の変更が必要である。

5．まとめ

NO転換率を考慮したアンモニア/天然ガス混焼モデルガスタービンのサイクル計算を行い以下の知見を得た。

(1) アンモニアの低位発熱量はメタンに比べ小さいため，アンモニア混焼率が増加すると，燃料の総質量流量が増加するが，総投入熱量は低下し，発電端効率が増加する。

(2) アンモニアからのNO発生は完全燃焼と比べて30%程度の発熱量の損失となる。このためアンモニア混焼でNOが生じると燃料の総質量流量増加，発電端効率低下といったエンジン性能への悪影響が発生する。

(3) アンモニアは燃焼温度が低いこと，またアンモニア混焼時には燃料の総投入熱量が減少するため，アンモニア混焼によりタービン入口および出口のガス温度が低下する。この結果，コジェネレーションシステムの総合熱効率が低下する可能性がある。

(4) アンモニア混焼によるコジェネレーションシステムの総合熱効率の低下を防ぐため，タービン入口ガス温度が一定になるよう圧縮機入口空気流量を減少させると，総合熱効率は増加する。

謝辞

本研究は，内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「エネルギーキャリア」（管理法人：JST）によって実施された。ここに記して謝意を表する。

参考文献

(1) C. Zamfirescu, I. Dincer, Using ammonia as a sustainable fuel, Journal of Power Sources, Vol. 185, Issue 1（2008）, pp. 459-465.

(2) E. A. Gilmore, A. Blohm, S. Sinasabaugh, An economic and environmental assessment of transporting bulk energy from a grazing ocean thermal energy conversion facility, Renewable Energy, Vol. 71（2014）, pp. 361-367.

(3) P.Trop, D. Goricanec, Comparisons between energy carriers' productions for exploiting renewable energy sources, Energy, Vol. 108, Issue C（2016）, pp. 155-161.

(4) Hayakawa A., Goto T., Mimoto R., Arakawa Y., Kudo T., Kobayashi H., Laminar Burning Velocity and Markstein Length of Ammonia/Air Premixed Flames at Various Pressures., Fuel, 159（2015）, pp. 98-106.

(5) 小林秀昭，早川晃弘，カーボンフリーアンモニア燃焼，日本燃焼学会誌，58巻，183号（2016），pp. 41-48.

(6) M. Tayyeb Javed, Naseem Irfan, B.M.Gibbs, Control of combustion-generated nitrogen oxides by selective non-catalytic reduction, Journal of Environmental Management, No. 83（2007）, pp. 251-289.

(7) 小池誠，宮川浩，鈴置哲典，小笠原和人，水素エネルギキャリアとしてのアンモニアとレシプロエンジン燃焼への適用，日本燃焼学会誌，58巻，184号（2016），pp. 99-106.

(8) 石川遥平，林潤，武石裕行，岡南貴大，山本康之，飯野公夫，赤松史光，同軸流拡散火炎における$NH_3/N_2/O_2$火炎の安定性に関する研究，日本機械学会論文集，Vol. 84, No. 859（2018），pp. 1-17.

(9) Iki, N., Kurata, O., Matsunuma, T., Inoue, T., Suzuki, M., Tsujimura, T. and Furutani, H., Micro Gas Turbine Firing Kerosene and Ammonia, Proceedings of ASME Turbo Expo 2015, GT2015-43689（2015）.

(10) Kurata, O., Iki, N., Matsunuma, T., Inoue. T., Tsujimura, T., Furutani, H., Kobayashi, H., Hayakawa, A., Performances and emission characteristics of NH3-air and NH_3-CH_4-air combustion gas-turbine power generations, Proceedings of the Combustion Institute, vol. 36（2017）, pp. 3351-3359.

(11) 中国電力株式会社 プレスリリース ＜http://www.energia.co.jp/press/2017/10540.html＞

(12) 石原咲子，張聚偉，伊藤隆政，藤森敏郎，微粉炭焚きボイラにおけるアンモニア混焼が排出NOxに与える影響，第55回燃焼シンポジウム前刷集，C133（2017）.

(13) 伊藤慎太朗，加藤壮一郎，斎藤司，藤森俊郎，小林秀昭，スワールバーナにおけるアンモニア・都市ガス混焼の基礎特性，第53回燃焼シンポジウム前刷集，A323（2015）.

(14) 伊藤慎太朗，加藤壮一郎，斎藤司，藤森俊郎，小林秀昭，アンモニア・天然ガス混焼ガスタービン燃焼器技術の開発，第54回燃焼シンポジウム前刷集，A332（2016）.

(15) 内田正宏，伊藤慎太朗，加藤壮一郎，斎藤司，藤森俊郎，詳細反応機構を使用したアンモニア/メタン混焼挙動のLarge-Eddy-Simulation，第54回燃焼シンポジウム前刷集，C333（2016）.

(16) 大西正悟，伊藤慎太朗，内田正宏，斎藤司，藤森俊郎，アンモニア・天然ガス混焼　ガスタービン燃焼器技術の開発 -第二報 低NOx燃焼方法の実験的検討-，第55回燃焼シンポジウム前刷集，D232（2017）.

(17) Peng, D. Y., D. B. Robinson, A New Two-Constant Equation of State, Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals, vol. 15-1（1976）, pp. 59-64.

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

モザンビーク共和国 マプト 100MW級GTCC発電設備の建設

100MW Class Gas Turbine Combined Cycle Power Plant Established in Mozambique

奈須野 祐一*1　NASUNO Yuichi
三輪 隆信*1　MIWA Takanobu
中村 有作*2　NAKAMURA Yusaku

キーワード：ガスタービン，コンバインドサイクル，サブサハラ地域
Key Words：Gas Turbine, Combined Cycle, Sub Saharan African

1．緒言

モザンビーク共和国（以下モザンビーク）のマプトに建設し，2018年８月に引渡した100MW級ガスタービンコンバインドサイクル発電設備（以下GTCC）を紹介します。

2．モザンビークの概要

2.1　一般情勢

モザンビークはアフリカ大陸，サブサハラ地域の国のひとつであり，アフリカ南東部に位置しています。国の東側はインド洋に面し，その他はタンザニアや南アフリカ，エスワティニ（旧スワジランド）等の国と接しています。南半球に位置しているため，季節は日本とは逆で，一般的に気温は10月から３月にかけて高く，４月から９月は比較的涼しいです。国土面積は日本の約２倍，人口は1/4程度の約3,000万人，日本との時差はマイナス7時間です。日本からモザンビークまでの空路は数パターンありますが，我々が良く使用していた東京→香港→ヨハネスブルグ（南アフリカ共和国）→マプトというルートは，乗継を含めると約24時間かかります。夕方，日本を発つとマプトには翌日の午前中に到着し，午後から働けるという，日本人にはもってこいです。

モザンビークは，1498年ポルトガルの航海者ヴァスコ・ダ・ガマの到達をきっかけとして，16世紀初頭からポルトガルの植民地支配がはじまったと言われています。以降，300年以上も植民地が続き，1975年６月25日，約10年におよぶポルトガル軍との独立戦争の末，独立を果たしました。同日は現在，独立記念日として祝祭日に指定されています。また，独立後も激しい内戦が1992年まで続き，経済成長の妨げ要因のひとつになったと言われています。植民地支配の影響により公用語はポルトガル語ですが，モザンビークには数多くの民族がおり，同様に現地語も多く存在しています。マプト空港では，モザンビーク南部現地語のシャンガナ語で「ありがとう」を意味する「カニマンボ（Kanimamno）」という言葉を目にすることができます。

Fig. 1　モザンビークおよびマプト[1]

モザンビーク経済は農林業や漁業といった第１次産業が主となっていますが，アルミニウム精錬を始めとした製造業や，豊富な天然資源を活用した資源開発において，高い将来性を有しています。また，アフリカ東部海岸部のリゾート開発にも潜在性がある国のひとつと言われています。

モザンビークはここ数年，経済成長率の停滞と現地通貨（メティカル）安に見舞われていますが，経済成長を続けており，天然ガス，石炭等の天然資源産出国として

原稿受付　2019年12月13日
＊1　㈱IHI原動機　陸用事業部　プラントエンジニアリング部
〒101-0021　千代田区外神田２-14-５
＊2　㈱IHI原動機　舶用事業部　相生事業ユニット　相生管理部
〒101-0021　千代田区外神田２-14-５

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

Table 1　モザンビークの一般事情[2]

1	国名	モザンビーク共和国（Republic of Mozambique）
2	首都	マプト（人口約127万人，2017年：INE（モザンビーク統計局推計人口））
3	面積	79.9万平方キロメートル（日本の約2倍）
4	人口	約 2,967万人，人口増加率1.0%（2017年：世銀）
5	民族	マクア，ロムウェ族など約40部族
6	言語	ポルトガル語
7	宗教	キリスト教（約40%），イスラム教（約20%），伝統宗教
8	通貨	メティカル（1ドル = 60メティカル，2018/11）
9	主要産業	（農林）　とうもろこし，砂糖，カシューナッツ，綿花，たばこ，砂糖，木材 （漁）　エビ （工鉱）　アルミニウム，石炭，天然ガス
10	経済成長率	3.6%（2016年：世銀）／ 6.5%（2015年：IMF）／ 7.5%（2014年：IMF）
11	物価上昇率	19.8%（2016年：世銀）
12	主要貿易品目	(1)輸出　アルミニウム，石炭コークス，天然ガス，電力，タバコ，砂糖，等 (2)輸入　石油，自動車・自動車部品，分析機器等

注目されています。天然ガスに関しては，世界最大級のガス田発見により，世界有数の輸出国になるとみられており，同国を取り巻く環境は好転するとの見方が強く，将来を期待されています。しかし，こういった資源開発が期待されているものの，国連開発計画における人間開発指数では下位にあり，国民一人ひとりの生活環境は決して豊かとはいえないのも実状で，世界で最も貧しい国のひとつとも言われています。

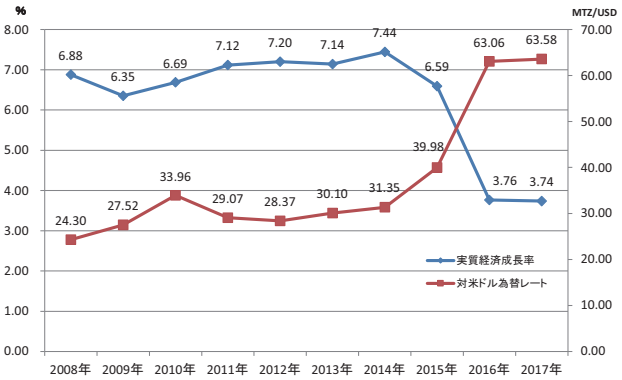


Fig. 2　モザンビークの経済成長率と対ドル為替推移[3]

2.2　電力情勢

上述の経済情勢を背景に，世界各国の企業がモザンビークに進出しており，それに伴い国内電力需要も伸びています。

モザンビークには南部と中・北部の二つの電力系統がありますが，相互連携しておらず電力融通ができない，という特徴があります。主要な発電所は中・北部系統に接続しており，大部分は南アフリカに送電され，モザンビーク国内での電力消費はわずかです。南部系統はその送電先である南アフリカから電力を逆輸入しているという状態です。また，モザンビーク最大の電力需要地は南部系統に接続しているマプトであり，このような背景からマプト首都圏含む南部系統の電力供給強化と安定的供給は急務な状態でした。本発電設備は発電容量100MW級ですが，モザンビーク全体の電力消費量の10%程度に相当し，モザンビークにおける本発電設備の期待・貢献度は大きいと言えます。

2016年２月の契約調印式において，エネルギー省大臣のスピーチ最中に停電が発生し，「モザンビークには電力が必要なのです。」とジョーク交じりの説明がなされ，安定電力の必要性と本プロジェクトに対する使命感を感じた象徴的な出来事がありました。

3．モザンビーク マプトプロジェクトの概要

3.1　プロジェクト概要

注文主のモザンビーク電力公社（以下EDM）はモザンビーク国内の発電・送電・配電事業を担っており，1995年に公営企業化しました。本プロジェクトは，EDMが独立行政法人 国際協力機構（以下JICA）の円借款を活用し，マプト市内に発電設備を建設する案件で，住友商事株式会社（以下住友商事殿）と株式会社IHI（以下IHI）のコンソーシアムで受注しました。住友商事殿が主導してEDMとの折衝・調整を行い，IHIが主要機器の供給，据付，土木工事，試運転を担当しました。

発電設備の建設場所は，マプトから南アフリカにつながる幹線道路に隣接するEDM所有地内で，かつては石炭焚き火力発電設備やガスタービン発電設備が運用されていた場所です。既設のガスタービン発電設備は撤去されることはなく残っていますが，常用発電には使用されず，非常時の運転が主です。

Fig. 3　Ground Breaking Ceremony

Fig. 4　発電設備全景

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

2016年２月の契約調印から，据付工事，試運転を経て，契約納期通り2018年８月にEDMへの引渡しが完了し，商用運転を開始しました。納期通りの完工という結果により，日本の技術や品質を示すことができました。

3.2　発電設備概要

主要機器は，IHI製LM6000ガスタービン・発電機および２圧式排熱回収ボイラが各２基，蒸気タービン・発電機が各１基となっており，2 on 1 構成のGTCCで送電端出力は106MWです。蒸気タービンが排出する蒸気は全て空冷復水器で回収し，ボイラ給水として再利用されます。発電した電力は66kV受変電設備を介して，系統へ送電されます。本発電設備の電力負荷は，近接する中央給電指令所から要求されます。発電設備オペレータが発電設備の電力負荷需要をプラント制御装置（DCS）に設定した後に，自動運転となります。

燃料ガスは，本発電設備に隣接するガス会社運営のGas Metering Stationを通じて供給されます。2.3～７MPaと供給圧力範囲が広いため，ガス圧縮機とガス減圧装置を設置して，ガスタービンへの供給圧力を最適化しています。

プラント制御装置は管理棟２階の中央制御室に設置されており，遠隔での発電設備の操作・状態監視を可能としています。

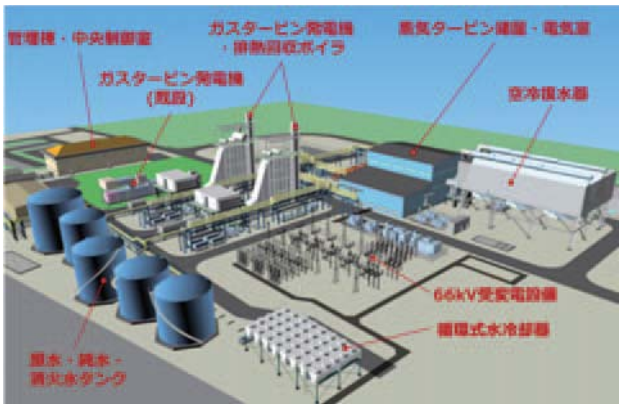


Fig. 5　発電設備機器配置

4．プロジェクトの特徴・振り返り

4.1　モザンビーク初のコンバインドサイクル発電設備

モザンビークでは初となるコンバインドサイクル発電設備ということで，EDMにとってもパイロット・プラントとなる重要案件でした。現地工事期間中も国内外から政府関係者や要人が多く見学に訪れ，発電所開所式にはモザンビーク大統領もご臨席されるほど，注目の高いプロジェクトでした。

また，日本政府の推進する「質の高いインフラパートナーシップ」に資するプロジェクト，弊社陸用原動機事業においてはサブサハラ地域初進出ということで，日本や弊社にとってプレゼンスを示すことができたことは大きく，今後のモザンビークのインフラ拡大や近隣アフリカ諸国へのインフラ進出を進めていく足掛かりとなりました。

Fig. 6　GT1初着火前の安全祈祷

4.2　技術伝承

今後，モザンビーク北部のガス田開発により，火力発電設備が主要電源になることが予想されており，それに伴い，発電設備を建設するだけではなく，我々日本企業が有する知識・技術・経験を，現地のプラントオペレータに伝承することも本プロジェクトの目的のひとつでした。コンバインドサイクル発電設備の導入が初めてである同国において，いかに早く，設備運用が可能となるレベルまでプラントオペレータの技能を向上できるか，ということが求められました。

その対応の一つとして，トレーニングの充実を図りました。弊社がこれまでのプロジェクトで提供してきたトレーニングに比べ，内容を充実させることはもちろんのこと，各オペレータの知識や技術レベルを把握し，それに合わせたカリキュラムを提供しました（Fig. 7）。

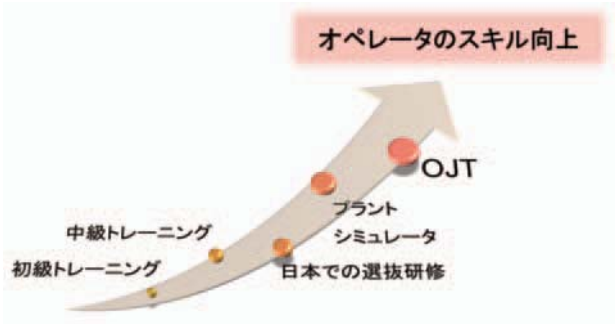


Fig. 7　トレーニングカリキュラム

初級・中級トレーニングでは座学を通じてオペレータの技術レベルを把握し，その後，日本での選抜研修を実施しました。選抜研修では座学のみではなく，ポンプやバルブの組立・分解実習（Fig. 8）を通じて，原理や構造の理解，保守管理手法，運転・保守時の基本動作の習得等，発電設備運用に必要な基礎スキルの習得を目標としました。また，文化や習慣が違うことから，単に技術を伝えるだけではなく，我々日本人のモノづくりや作業に対する考え方や姿勢などの背景も伝えることを意識しました。

発電設備内に，プラントシミュレータを常設している

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

Fig. 8　日本でのポンプ実習の様子

点も特徴の一つです。

本発電設備は年間連続運転であり，機器操作も自動化していることから，起動ボタンを押した後の操作頻度は少なく，習得した運転技能が低下する可能性があります。プラント制御装置と同じインターフェイス，制御ロジックを使用しているシミュレータを用いて操作訓練を行うことにより，運転技能を維持・底上げすることを可能にしています。また，手動起動するなど通常運用では実施頻度の少ない運転パターンが再現でき，警報動作など非定常な運転状態を模擬することで，問題の把握と対処策の検討・実施を行うことができ，発電設備の挙動や各機器の役割・動作の視覚理解促進にも有用となります。

引渡した現在も弊社エンジニアが現地常駐し，プラント運用管理をオペレータとともに行うと同時に，技術伝承やトレーニング，管理業務支援も行っています。プラントの状態管理は現地常駐エンジニアからの報告に加え，日本からのプラントデータによる遠隔監視を行っています。不具合が起こった場合や不具合の兆候が出ている機器に対して，データ解析を行い，現地エンジニアに情報提供を行い，オペレータとともに適切な処置を行い，プラントを健全に保っています。

4.3　水資源の有効活用

原水には地下水や河川水等が利用されますが，本プロジェクトでは上水が使用されています。この上水は決して十分な量を使用できる環境ではなく，プロジェクト当初よりその取扱いについて議論が多くなされ，復水器や潤滑油冷却器には空気冷却方式，冷却水システムには循環式を採用する等，極力水資源を節約するような機器を計画しました。建設期間中にはダム貯水率低下によりマプト市内でも取水制限が出され，その影響でサイトへの供給が止まることも度々ありました。建設・試運転日程に影響が出ないよう，必要水量が供給されない期間には，水を外部から購入して不足分を賄いました。こうした問題を解決し，将来にわたりプラントを安定運用するため，地下水を水源とする水処理設備（Fig. 9）を追設することになり，2019年11月に完成し，引渡しを終えています。

Fig. 9　追設した水処理設備

引渡し後は，本設備は積極的に活用され安定運用に寄与しています。

4.4　安全衛生管理

サブサハラ地域初の案件ということで，安全衛生管理にも注意を払いました。建設現場の安全確保のため，民間セキュリティ会社を建設現場に常駐し，24時間監視としました。また，建設現場への通勤ルートサーベイや定期的なルート変更，生活環境・施設のサーベイ実施，危険情報の共有，JICAから提供されるマプト市内ハザードマップによる危険区域の理解を積極的に行いました。一部，セキュリティ会社の警備員が犯罪組織に内通したと思われる盗難被害はありましたが，プロジェクト期間を通じて大きな犯罪被害に合うことはありませんでした。

モザンビークを含めたサブサハラ地域のHIV/AIDS感染は深刻な問題となっています。モザンビークにおける死亡原因の上位にあるマラリアにも注意が必要でした。HIV/AIDS感染対策には，すべての現地入構者に対して性感染症予防教育を徹底し，理解を深めると同時に，避妊具を配布し感染・拡大防止に努めました。マラリア罹患に対しては，降雨後の建設現場内の水たまりを素早く除去し，定期的に殺虫剤散布を行うことで，病原体発生の抑制に努めました。日本から持ち込んだ殺虫・虫除け効果の高い医療品を常時携行し，ホテルや飲食店でも散布し，罹患を予防しました。また感染を避けるため，蚊

Fig. 10　サイトに隣接する住宅

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

をむやみに殺さない（潰さない），ことも学びました。

4.5　現場建設における労務管理

サブ・コントラクターなど多くのモザンビーク人労働者が現場建設に従事しましたが，発電設備建設に携わった経験がある者は殆どおらず，力量不足に悩まされました。モザンビークにおける重機手配や現地到着後の国内輸送，輸送時の損傷リスク軽減を目的として，輸送は極力コンテナを使用し，ハンドリング性を向上させましたが，モザンビーク人労働者の力量問題もあり，現地組立工数が想定以上に要しました。また，時間外労働の制約が厳しい等の問題もあり，現地工程が計画通りに推移しない，思った通りのキャッチアップができないということが多くありました。経験を有する人材を投入し工程挽回を図りましたが，上手く機能せず，最終的には弊社が過去納入した同クラスのGTCCで現場建設を共にしたマネージャーレベルの人材投入，プロジェクトマネージャーの現地常駐を図り，細かいメッシュで工程管理・見える化を行い，全体工程をまとめることができました。

5．最後に

初のモザンビーク，サブサハラ地域での工事であり，当初想定していたリスク以上が起こり，建設期間中には色々と難しい局面はありましたが，プロジェクト全般においてお客さまであるEDM，時に納期より品質・安全を優先していただいた日本コンサルタント会社，コンソーシアムを組む住友商事殿の協力と理解があったからこそ，所定の納期・性能を満足させ，何より無災害で工事完了し，引渡すことがすることができました。この場をお借りして改めて感謝申し上げます。

ありがとうございました。

Muito Obrigado!!

Fig. 11　プラント管理棟

参考文献

(1)　外務省　わかる国際情勢 Vol. 159
＜https://www.mofa.go.jp/mofaj/press/pr/wakaru/topics/vol159/index.html＞（参照日2019年11月）.

(2)　外務省　モザンビーク共和国基礎データ
＜https://www.mofa.go.jp/mofaj/area/mozambique/data.html＞（参照日2018年11月）.

(3)　日本貿易振興機構　基礎的経済指標（10カ年統計）
＜https://www.jetro.go.jp/world/africa/mz/stat.html＞（参照日2019年11月）.

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

報　告

日本ガスタービン学会学生優秀講演賞選考結果について

表彰委員会
学術講演会委員会

2019年９月18日㈬，19日㈭に函館アリーナ（北海道函館市）で開催されました第47回日本ガスタービン学会定期講演会における「日本ガスタービン学会学生優秀講演賞」の選考結果についてご報告いたします。

本年この学生優秀講演賞の対象となった講演は，空力関係：８件，伝熱関係：５件，燃焼関係：３件，性能関係１件，材料関係：３件の合計20件でした。発表内容・発表態度等について，複数の審査員により厳正な評価を行い，全ての審査対象講演の終了後に審査会を開催し，以下のとおり授賞が決定されました。

・高知工科大学大学院基盤工学専攻知能機械システム工学コース修士２年　　有賀 寛純君
　講演題目：「防除氷のためのCFRP電流印加による発熱効果に関する実験的研究」
・東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻修士２年　　光末 由宇陽君
　講演題目：「圧縮機翼列から生じる空力騒音の特性と発生機構に関する研究」

授賞式は講演会第２日の午後に行われ，渡辺紀徳会長より賞状及び副賞が授与されました。
今回，学生優秀講演賞の対象講演20編の発表はいずれも素晴らしく，積極的にご参加頂いた学生の皆様に感謝申し上げると共に，審査をお願いした方々には，全ての審査対象講演の聴講や審査会の開催など貴重なお時間を頂戴いたしましたことを，この場を借りて御礼申し上げます。

日本ガスタービン学会学生優秀講演賞

防除氷のためのCFRP電流印加による発熱効果に関する実験的研究

高知工科大学大学院基盤工学専攻知能機械システム工学コース修士２年
有賀 寛純

この度，日本ガスタービン学会学生優秀講演賞に選出していただきまして，誠にありがとうございます。自分達の行ってきた研究活動を受賞という形で評価していただけたことを大変に光栄に思います。この結果に満足せず，これからも研究に対して真摯に取り組んでまいりたいと思います。今回の受賞に当たり，日ごろから厳しくも的確なご指導を頂いている高知工科大学野崎理教授，宇宙航空研究開発機構の水野様，鈴木様をはじめとした，お世話になっているすべての方々にこの場をお借りして深く御礼申し上げます。

圧縮機翼列から生じる空力騒音の特性と発生機構に関する研究

東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻修士２年
光末 由宇陽

この度は大変光栄な賞をいただき有難うございます！学会という場での発表は初めてでしたが，自身の研究を客観的視点から見つめなおす機会となり，研究に対するより深い理解を得られました。また第一線で活躍されている研究者の方々と交流することができ，貴重な経験となりました。発表に際して，指導教員の先生や研究室の先輩方からご助言いただいたことこの場を借りてお礼申し上げます。これを励みに今後一層の研究活動に従事したいと思います。

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

報　告

学術講演会発表助成について

表彰委員会

2019年９月18日㈬，19日㈭に函館アリーナ（北海道函館市）で開催されました第47回日本ガスタービン学会定期講演会に参加して講演を行った学生に対して，本人からの申請に基づき，交通費の助成を実施した結果についてご報告いたします。

本助成制度は，定期講演会で講演する学生に対して，往復交通費の半額相当を助成することで，ガスタービン関連分野の若手人材の育成や技術の発展を奨励することを目的として設置されたもので，自ら講演する学生であることに加え，日本ガスタービン学会または関連学協会の会員であり，会費の滞納がないことなどが助成の条件になっております。今回の講演会では，７月29日を期限として応募者の募集を行ったところ，15名の募集がありました。表彰委員会内で慎重に審議を行い，「学術講演会発表助成に関する内規」に則り，以下のような助成を行うことを決定いたしました。

東京地区からの参加者８名（高知工科大学１名，首都大学東京３名，東京大学２名，早稲田大学２名）に対しては各１万４千円/１万円（１名は往路を補助），宮城地区からの参加者１名（東北大学）に対しては１万５千円，岩手地区からの参加者１名（岩手大学）に対しては１万１千円，新潟地区からの参加者１名（新潟大学）に対しては２万４千円，石川地区からの参加者３名（金沢工業大学）に対しては２万３千円/１万５千円（１名は名古屋往復を補助），高知地区からの参加者１名（高知工科大学）に対して２万５千円。

本助成制度が学生諸君の研究発表を奨励する契機になるとともに，ガスタービンの将来を支える若手人材の育成に寄与することを期待しております。来年度の定期講演会（山口県周南市）でも同様の助成を検討しておりますので，学生諸君の積極的な参加をお待ちしております。

次号予告　日本ガスタービン学会誌2020年３月号（Vol.48 No.２）

特集　産業用中小型ガスタービンと適用事例
論説・解説
巻頭言　寺澤 秀彰（東京ガス）
H-100ガスタービンと適用事例　荒木 秀文，麻生 武志（三菱日立パワーシステムズ），畑谷 岳志（三菱重工コンプレッサ）
浮体式LNG発電プラントの開発　青木 肇，佐藤 洋，長谷川 善幸，芝原 孝徳，前野 暢久，合田 真琴，田中 文康（川崎重工業）
IHI原動機中小型ガスタービンの適用事例　野原 隆樹（IHI原動機）
1MW級SB5Nガスタービンの開発とコージェネレーション設備の紹介　黛 健斗，西江 俊介，藤浪 賢，王 潞宇，山名 克己（三井E&Sマシナリー）
高効率・高性能を誇るシーメンス産業用ガスタービン SGT-750　服部 祐太（シーメンス）
Taurus70の最新技術動向紹介　内野 孝（IHI原動機）
アンモニアの燃料利用と小型ガスタービン　壹岐 典彦（産業技術総合研究所）

※タイトル，執筆者は変更する可能性があります。

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

会　告

○本会協賛行事○

主催学協会	会合名	協賛	開催日	会場	詳細問合せ先
日本陸用内燃機関協会	陸内協第3回技術者講習会	協賛	2020/1/29	日本陸用内燃機関協会4階会議室	URL：http://www.lema.or.jp
コージェネレーション・エネルギー高度利用センター	コージェネシンポジウム2020	協賛	2020/2/7	イイノホール	URL：http://www.ace.or.jp
日本陸用内燃機関協会	陸内協令和元年度講演会	協賛	2020/2/13	日本陸用内燃機関協会4階会議室	URL：http://www.lema.or.jp
日本マリンエンジニアリング学会	第64回特別基金講演会「GHG問題に対する燃料からのチャレンジ」	協賛	2020/3/6	三宮研修センター7階　会議室	URL：http://www.jime.jp

▷入会者名簿◁

〔正会員〕

藤原 基（ウッドワードジャパン）
小松 修治（DMG森精機）
坂野 孝彦（川崎重工業）
小林 慎一（本田技術研究所）
田中 昌希（ダイハツディーゼル）
高橋 孝一（三菱日立パワーシステムズ）

〔学生会員〕

荒井 直己（東京理科大学大学院）

◇2020年度会費納入のお願い◇

2020年度会費（2020年３月１日～2021年２月末日）を納入いただく時期となりました。会費は，下記の通りとなっておりますので，2020年４月30日までにお納め下さいますようお願い申し上げます。

なお，口座自動振替をご利用の方は，2020年３月23日にご指定の口座よりお引き落としさせていただきます。

＜2020年度会費（不課税）＞

正会員	8,000円
正会員（65歳以上*）	5,000円
学生会員	2,500円
賛助会員　１口	70,000円

（*2020年３月１日現在）

【納入先】

郵便振替：　00170-9-179578
銀行振込：　みずほ銀行　新宿西口支店
　　普通預金口座　1703707
いずれも口座名は，
シャ）ニホンガスタービンガッカイ です。
振込手数料は貴方にてご負担願います。

※会費の納入には，簡単・便利な口座自動振替をお勧め致します。自動振替をご利用されますと，振込手数料は学会負担となります。ご希望の方は巻末の「預金口座振替依頼書」にご記入の上，学会事務局までお送りください。

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

2019年度役員名簿

会長　渡辺 紀徳（東大）
副会長　識名 朝春（IHI）
法人管理担当執行理事　壹岐 典彦（産総研）（兼務），大石 勉（IHI），餝 雅英（川崎重工），寺本 進（東大），北山 和弘（東芝ESS）（兼務）
公益目的事業担当執行理事　伊藤 栄作（三菱重工），岡田 満利（電中研），岸部 忠晴（MHPS），北山 和弘（東芝ESS），佐藤 哲也（早大），高原 雄児（防衛装備庁），野崎 理（高知工科大），村田 章（東京農工大），山本 誠（東京理科大），壹岐 典彦（産総研）
理事　石井 達哉（JAXA），大塚 裕也（本田），黒瀬 良一（京大），千葉 秀樹（酒田共同火力発電），秡川 宏樹（JALエンジニアリング）
監事　筒井 康賢（元高知工科大），松崎 裕之（東北発電工業）

2019年度委員名簿（順不同）

2019年12月13日現在
○は委員長

倫理規定委員会　○餝 雅英（川崎重工），壹岐 典彦（産総研），大石 勉（IHI），寺本 進（東大），山本 誠（東京理科大）
自己点検委員会　○餝 雅英（川崎重工），壹岐 典彦（産総研），大石 勉（IHI），寺本 進（東大），山本 誠（東京理科大）
運営委員会　○寺本 進（東大），壹岐 典彦（産総研），大石 勉（IHI），餝 雅英（川崎重工），北山 和弘（東芝ESS），酒井 義明（東芝ESS），佐藤 哲也（早大），塚原 章友（MHPS），松沼 孝幸（産総研），山本 誠（東京理科大）
企画委員会　○壹岐 典彦（産総研），太田 有（早大），餝 雅英（川崎重工），北山 和弘（東芝ESS），佐藤 哲也（早大），塚原 章友（MHPS），寺本 進（東大），安田 聡（MHPS），山本 誠（東京理科大），輪嶋 善彦（本田）
国際委員会　○船崎 健一（岩手大），伊藤 優（東大），岡井 敬一（JAXA），北山 和弘（東芝ESS），小森 豊明（MHPS），佐藤 眞一郎（本田），谷 直樹（IHII），都留 智子（川崎重工），福田 雅文（高効率発電システム研究所），山根 敬（JAXA），山本 誠（東京理科大）
学術講演会委員会　○渡邊 裕章（九大），今野 晋也（MHPS），岡嶋 芳史（三菱重工），尾関 高行（電中研），糟谷 宏樹（東芝ESS），北村 英二郎（本田），富永 純一（JFEエンジニアリング），中山 健太郎（川崎重工），野崎 理（高知工科大），姫野 武洋（東大），平川 香林（IHI），平野 孝典（拓殖大），藤原 仁志（JAXA），松沼 孝幸（産総研），山形 通史（富士電機）
集会行事委員会　○山本 誠（東京理科大），安藤 友香（防衛装備庁），伊藤 栄作（三菱重工），伊藤 祐太（本田），小沢 寛二（IHI），金澤 直毅（川崎重工），河上 誠（日立），小島 充大（富士電機），澤 徹（東芝ESS），泰中 一樹（電中研），西村 英彦（MHPS），秡川 宏樹（JALエンジニアリング），黛 健斗（三井E&Sマシナリー），吉田 征二（JAXA）
ガスタービン技術普及委員会　○岡田 満利（電中研），石田 克彦（川崎重工），垣内 大紀（IHI），窪谷 悟（東芝ESS），鈴木 正也（JAXA），高橋 康雄（MHPS），谷岡 忠輝（MHPS），長谷川 晃（JALエンジニアリング），村田 章（東京農工大），山本 誠（東京理科大）
学会誌編集委員会　○佐藤 哲也（早大），荒木 秀文（MHPS），壹岐 典彦（産総研），石井 達哉（JAXA），岩井 裕（京大），大塚 裕也（本田），加藤 千幸（東大），金子 雅直（東京電機大），黒瀬 良一（京大），渋川 直紀（東芝ESS），高橋 俊彦（電中研），田尻 敬次（荏原エリオット），多田 暁（JALエンジニアリング），千葉 秀樹（酒田共同火力発電），辻田 星歩（法政大），寺澤 秀彰（東京ガス），寺本 進（東大），中野 賢治（IHI回転機械），新関 良樹（徳島文理大），野原 弘康（ダイハツディーゼル），八田 直樹（三井E&Sマシナリー），原 浩之（MHPS），北條 正弘（JAXA），松崎 裕之（東北発電工業），松田 博和（川崎重工），宮入 嘉哉（防衛装備庁），村上 秀之（物材研），室岡 武（IHI），森澤 優一（東芝ESS），山下 一憲（荏原製作所）
論文委員会　○村田 章（東京農工大），青塚 瑞穂（IHI），壹岐 典彦（産総研），小田 剛生（川崎重工），田頭 剛（JAXA），寺本 進（東大），中谷 辰爾（東大），姫野 武洋（東大），山田 和豊（岩手大），山根 敬（JAXA），山本 武（JAXA），山本 誠（東京理科大），吉岡 洋明（東北大）
ガスタービン統計作成委員会　○太田 有（早大），赤澤 弘毅（川崎重工），井田 真澄（ターボシステムズユナイテッド），恵比寿 幹（三菱重工エンジン&ターボチャージャ），後藤 裕一（IHI），佐々木 慎吾（MHPS），澤 徹（東芝ESS），藤澤 信道（早大），山上 展由（MHPS），米田 幸人（ヤンマー）
産官学連携委員会　○岸部 忠晴（MHPS），壹岐 典彦（産総研），岡崎 正和（長岡技術科学大），及部 朋紀（防衛装備庁），金津 和徳（IHI），幸田 栄一（電中研），佐々木 隆（東芝ESS），野崎 理（高知工科大），原田 広史（物材研），二村 尚夫（JAXA），松崎 裕之（東北発電工業），吉田 英生（京大），笠 正憲（川崎重工），輪嶋 善彦（本田），渡辺 紀德（東大）
広報委員会　○高原 雄児（防衛装備庁），壹岐 典彦（産総研），尾関 高行（電中研），酒井 義明（東芝ESS），谷 直樹（IHI），長谷川 晃（JALエンジニアリング），姫野 武洋（東大），吉田 征二（JAXA）
表彰委員会　○識名 朝春（IHI），壹岐 典彦（産総研），佐藤 哲也（早大），餝 雅英（川崎重工），山本 誠（東京理科大）
調査研究委員会　○川岸 京子（物材研），岡崎 正和（長岡技術科学大），長田 俊郎（物材研），筧 幸次（首都大学東京），金久保 善郎（IHI），貴志 公博（三菱重工航空エンジン），岸部 忠晴（MHPS），東部 泰昌（川崎重工），日野 武久（東芝ESS），福山 佳孝（JAXA），輪嶋 善彦（本田）
将来ビジョン検討委員会　○高橋 徹（電中研），小田 豊（関西大），賀澤 順一（JAXA），酒井 義明（東芝ESS），柴田 貴範（三菱重工），柴田 良輔（本田），多田 和幸（東北電力），寺本 進（東大），仲俣 千由紀（IHI），姫野 武洋（東大）
男女共同参画推進委員会　○都留 智子（川崎重工），旭 睦（IHI），川岸 京子（物材研），川澄 郁絵（本田），森川 朋子（MHPS）
IGTC実行委員会　○西澤 敏雄（JAXA），猪亦 麻子（東芝ESS），太田 有（早大），北山 和弘（東芝ESS），渋川 直紀（東芝ESS），鈴木 正也（JAXA），塚原 章友（MHPS），寺本 進（東大），仲俣 千由紀（IHI），中村 恵子（IHI），牧田 光正（JAXA），安田 聡（MHPS），山根 敬（JAXA），吉田 征二（JAXA）
IGTC総務委員会　○山根 敬（JAXA），伊藤 優（東大），佐藤 眞一郎（本田），泰中 一樹（電中研），吉田 征二（JAXA）
IGTC論文委員会　○寺本 進（東大），壹岐 典彦（産総研），井上 智博（九大），大北 洋治（JAXA），岡井 敬一（JAXA），小田 豊（関西大），齋藤 敏彦（三菱重工），酒井 英司（電中研），柴田 貴範（三菱重工），鈴木 正也（JAXA），田頭 剛（JAXA），高橋 聰（IHI），谷 直樹（IHI），都留 智子（川崎重工），福田 雅文（高効率発電システム研究所），北條 正弘（JAXA），堀川 敦史（川崎重工），山本 誠（東京理科大）
IGTC展示委員会　○安田 聡（MHPS），赤澤 弘毅（川崎重工），高崎 恭子（本田），仲真 幸洋（GEガスパワー），藤木 貴子（IHI），分銅 克（東芝ESS），水野 拓哉（JAXA），山形 通史（富士電機），安形 友希子（MHPS），小森 豊明（MHPS），谷岡 忠輝（MHPS），塚原 章友（MHPS），渡部 丈（MHPS）
IGTC行事委員会　○仲俣 千由紀（IHI），石川智貴（東芝），長田 俊郎（物材研），川澄 郁絵（本田），高田 和正（MHPS），玉井 亮嗣（川崎重工），中村 恵子（IHI），南條 華子（IHI）
IGTC財務委員会　○渋川 直紀（東芝ESS），猪亦 麻子（東芝ESS）
エキスパート委員会　○船崎 健一（岩手大），田沼 唯士（帝京大），二村 尚夫（JAXA），山脇 栄道（アイ・エヌ・シーエンジニアリング）

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

編集後記

皆さんあけましておめでとうございます。IGTC 2019も成功裏に終わって迎えた令和最初のお正月は，いかがお過ごしでしたでしょうか。

昨年は元号が令和となり，我が国も歴史の一つの節目を迎えました。そんなお祝いムードに水を差したのが，年々過激化する自然災害でしょうか。特に台風15号，19号が与えた大きなダメージは，自然災害にある程度備えているはずの我が国にあっても，インフラが当初想定しているレベルを一旦超えたときの脆弱性を痛感させられました。16才の環境保護活動家グレタ・トゥーンベリさんの発言や活動が世界の多くの人の心を捉えるように，異常気象は地球規模で激化しているように思えます。このような状況を背景に欧州を中心とした各国は温室効果ガス排出抑制の早期具体化に向けて急速に舵を切っています。折悪しく，原発への依存が難しくなった我が国としては火力に期待するところが大きいのですが，世界の目はなかなか厳しいようです。日本の存在をアピールするためにも，我々に対しても従来の考え方にとらわれない発信が期待されていることを感じます。

さて，本号では「発電機」を特集してみました。ガスタービンや蒸気タービンが発電用として用いられる場合には必ずペアを組むことになる重要な機器です。しかしながら，おそらく多くの読者諸氏は「発電機」の具体的な構造や技術についてあまり深くはご存知ないかと思います。むしろ，「発電機」は同じ回転機械でありながら，我々とはちょっと違う世界で作られている，というイメージを持っている方も多いのではないでしょうか。実は編集子もその一人でした。編集子が勤めていた会社でも，元々の成り立ちが異なることもあって，発電機の部隊とは文化，あるいは考え方そのものが異なっているな，と感じることがありました。

今回編集を担当していてその思いを新にしたのが，多くの図の中で使われていた「p.u.」という表記です。我々の世界ではあまり使わないと思いますが，単位法（Per Unit method）と呼ばれる表記法で，ベース値に対する相対値を示したものらしいです。

このように，世界が異なる「発電機」の特集に際して，最初に全体を概説する記事を一本準備したかったのですが，残念ながら今回かなわず，その点編集子としては申し訳なく思っています。しかしながら，執筆いただいた方々のご努力によって，読み応えのある記事を揃えることができたと思います。お忙しい中ご執筆いただきました皆様には深く感謝申し上げます。

今回の「発電機」特集で，異なる文化の一旦に触れ，何か次のステップの発想のきっかけを得ることにでもなれば望外の喜びです。（新関 良樹）

●１月号アソシエイトエディター
新関 良樹（徳島文理大学）
●１月号担当委員
原 浩之（三菱日立パワーシステムズ）
松田 博和（川崎重工業）
室岡 武（IHI）
金子 雅直（東京電機大学）

（表紙写真）
今回の表紙については，【論説・解説】の著者より流用およびお借りしています。
詳細については，下記記事をご参照ください。

・「大型・中型ガスタービン用発電機の開発と異常予兆検知・診断技術」…… (P.2 ～ 7)
・「大容量水素間接冷却タービン発電機の高効率化・高信頼性化の最新技術」…… (P.8 ～ 13)
・「コンバインドサイクル向け両軸駆動650MVA水素間接冷却タービン発電機の開発」…… (P.14 ～ 19)
・「タービン発電機向け精密点検ロボットの開発」…… (P.20 ～ 25)
・「内陸火力発電所に適した発電機の納入事例」…… (P.26 ～ 32)
・「４極突極形タービン発電機の開発事例紹介」…… (P.33 ～ 38)

☘事務局だより✉☘

新年明けましておめでとうございます。本年もよろしくお願い申し上げます。

昨年は４年に一度の国際会議（IGTC2019Tokyo）が11月に開催され，おかげさまで滞りなく無事に終了いたしました。みなさま，ご協力ありがとうございました。前回2015年の国際会議のときには，消費税増税（５％から８％）の時期がずれていたためIGTC2015の参加登録費等には影響しなかったのですが，今回の国際会議は消費税増税開始の10月１日が参加登録受付期間に重なったため，参加登録費などの数字を確認するにも毎回指さし確認して作業をしておりました。アナログです・・。

そして，消費税増税のタイミングで，学会事務局の近くにあった創業50年の喫茶店が閉店となりました。私はお店に入ったことはないのですが，お店の前にはコーヒーの樽が置いてあり，マスターはいつも白いワイシャツに黒の蝶ネクタイという装いで，昔ながらのザ・喫茶店というお店でした。チェーン店が多い中，街の小さなお店がなくなるのは寂しいですね。毎朝，窓際の同じ席でスポーツ紙を読んでいた常連のおじいさんは毎日どうしているのだろうと事務局で勝手に心配しています。喫茶店の後には新しく餃子がメインの居酒屋さんが入るようです。趣がまったく変わり，そして毎日餃子の匂いの中，帰宅するのかと思いつつ，一度は事務局全員で餃子弁当を食べましょう（来客のない日に），と話をしています。（中村 優美）

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.

学会誌編集および発行要領（抜粋）

2018年７月13日改定

1．本会誌の原稿はつぎの３区分とする。

A．依頼原稿：学会誌編集委員会（以下，編集委員会）がテーマを定めて特定の人に執筆を依頼する原稿。執筆者は本学会会員（以下，会員）外でもよい。

B．投稿原稿：会員から自由に随時投稿される原稿。執筆者は会員に限る。

C．学会原稿：本学会の運営・活動に関する記事（報告，会告等）および会員による調査・研究活動の成果等の報告。

1.2．技術論文の投稿については，「技術論文投稿要領」による。

1.3．英文技術論文の投稿については，Instruction to Authors, JGPP（International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems）による。

2．依頼原稿および投稿原稿は，論説・解説，講義，技術論文，寄書（研究だより，見聞記，新製品・新設備紹介），随筆，書評，情報欄記事の掲載欄に掲載することとし，刷り上がりページ数は原則として以下のとおりとする。

論説・解説，講義	6ページ以内
技術論文	「技術論文投稿要領」による
寄書，随筆	3ページ以内
書評	1ページ以内
情報欄記事	1/2ページ以内

3．原稿の執筆者は，本会誌の「学会誌原稿執筆要領」に従って原稿を執筆し，編集委員会事務局（以下，編集事務局）まで原稿を提出する。編集事務局の所在は付記１に示す。

4．依頼原稿は，編集委員会の担当委員が，原稿の構成，理解の容易さ等の観点および図表や参考文献の書式の観点から査読を行う。編集事務局は査読結果に基づいて，執筆者への照会，修正依頼を行う。

5．投稿原稿のうち技術論文以外のものは，編集委員会が審査し，本会誌への掲載可否を決定する。

6．投稿原稿のうち技術論文の審査，掲載については，「技術論文投稿要領」に従う。

7．依頼原稿の執筆者には，学会事務局から原則として「学会誌の執筆謝礼に関する内規」第２条に定めた謝礼を贈呈する。

8．非会員の第一著者には掲載号学会誌１部を贈呈する。

9．本会誌に掲載された著作物の著作権は原則として本学会に帰属する。本学会での著作権の取扱いについては別途定める「日本ガスタービン学会著作権規程」による。

10．他者論文から引用を行う場合，本会誌に掲載するために必要な事務処理及び費用分担は著者に負うところとする。

付記１　原稿提出先および原稿執筆要領請求先（編集事務局）
ニッセイエブロ㈱ 企画制作部
学会誌担当：高橋 邦和
〒105-0003 東京都港区西新橋1-18-17 明産西新橋ビル
TEL：03-5157-1277
FAX：03-5157-1273
E-mail：eblo_h3@eblo.co.jp

技術論文投稿要領（抜粋）

2018年７月13日改定

1. 本学会誌に技術論文として投稿する原稿は次の条件を満たすものであること。
   1）主たる著者は本学会会員であること。
   2）ガスタービン及びエネルギー関連技術に関連するものであること。
   3）「学会誌原稿執筆要領」に従って執筆された，日本語原稿であること。
   4）一般に公表されている刊行物に未投稿であること。ただし，以下に掲載されたものは未投稿と認め技術論文に投稿することができる。
      - 本学会主催の学術講演会・国際会議のプロシーディングス
      - 特許および実用新案の公報，科学研究費補助金等にかかわる成果報告書
      - 他学協会の講演要旨前刷，社内報・技報，官公庁の紀要等の要旨または抄録
2. 原則として刷り上がり８ページ以内とする。ただし，「学会誌の掲載料に関する内規」第２条に定めた金額の著者負担で４ページ以内の増ページをすることができる。
3. カラー図は電子版と本学会ホームページ上の「技術論文掲載欄」に掲載し，冊子体にはモノクロ変換した図を掲載する。著者が「学会誌の掲載料に関する内規」第３条に定めた金額を負担する場合には，冊子体もカラー印刷とすることができる。
4. 投稿者は，「学会誌原稿執筆要領」に従って作成された印刷原稿または原稿電子データを，技術論文原稿表紙とともに学会誌編集事務局に提出する。
5. 投稿された論文は，論文委員会が「論文査読に関する内規」に従って査読を行い，掲載可否を決定する。
6. 論文内容についての責任は，すべて著者が負う。
7. 本技術論文の著作権に関しては，「学会誌編集および発行要領（抜粋）」９.および10.を適用する。

日本ガスタービン学会誌
Vol.48　No.1　2020.1
発行日　2020年１月27日
発行所　公益社団法人日本ガスタービン学会
編集者　佐藤 哲也
発行者　渡辺 紀德
〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-5-13
第３工新ビル402
Tel. 03-3365-0095　Fax. 03-3365-0387
郵便振替 00170-9-179578
銀行振込 みずほ銀行 新宿西口支店
㊐ 1703707
印刷所　ニッセイエブロ㈱
〒105-0003 東京都港区西新橋1-18-17
明産西新橋ビル
Tel. 03-5157-1277　Fax. 03-5157-1273

©2020，公益社団法人日本ガスタービン学会

複写複製をご希望の方へ
公益社団法人日本ガスタービン学会では，複写複製に係る著作権を一般社団法人学術著作権協会に委託しています。当該利用をご希望の方は，学術著作権協会（https://www.jaacc.org/）が提供している複製利用許諾システムを通じて申請ください。

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/08.