

特集：産業向け最新鋭自家発電用ガスタービン

『産業向け最新鋭自家発電用ガスタービン』特集号に寄せて

岩間 秀司^{*1}
IWAMA Hideshi

キーワード：産業用ガスタービン、自家発電設備、日本ガスタービンユーザー会

Industrial gas turbine, Gas turbines for private power generation equipment,
Japan Gas Turbine Users Association

我が国の産業向けガスタービン発電設備の多くは、石油化学コンビナートなどの動力源及び、熱供給源として1990年代前後に活発に導入された。コンビナート内で得られる副生ガスなどの多様な燃料を利用して環境負荷軽減（低NOx）を担い、プラント稼働のベース電源としての信頼性を重視される設備へと改良を加えられて今日に至る。この改善努力には、ガスタービン自家発電設備を有するユーザーによって1991年に発足した、日本ガスタービンユーザー会の貢献が大きく寄与してきたものと自負している。

これらの活動の一部は、日本ガスタービン学会誌2015年9月号「ガスタービンのImprovement/Modification」特集号にて、日本ガスタービンユーザー会から『ガスタービンの自家発電設備の改善事例』として紹介させて頂いた。産業向けのガスタービン自家発電設備は、工場内の動力、熱源供給設備として計画外停止の回避が至上命令となるユーザーが多く、信頼性と経済性を両立することを強く要求される。しかし、設計段階では必要最低限の機能を装備させることが多いため、導入時や稼働後のフィードバックとして、信頼性向上や冗長化といった改良を行なうことが多い。ユーザーが機種選定するにあたっては、一般的に試算を行なうイニシャルコスト、メンテナンスコスト、ランニングコスト等のライフサイクルコストや運用に応じた省エネルギー性、環境負荷軽減効果等の技術的検討のほか、耐久性や信頼性についての評価方法が重要となってくる。本特集号に寄せられた各メーカーの開発プロセスを見ると、各社が保有するノウハウを基に丹念に耐久性や信頼性評価を積み上げてきた努力が見られる。しかし、設備を運用するにあたっては、コアとなるガスタービンの耐久性や信頼性は勿論のこと、2年連続運転を標準とする高温部品や補機・電装品の耐久性、負荷急変に追従する制御性（系統瞬停時の工場内

負荷制御含む）、ユーザー運用に応じた高温部品の使い切りや補修方法も重要なファクターとなる。ガスタービン開発メーカーは、是非これらの項目をユーザーと協働で解決し、発電設備の設計に反映して頂ければ幸いである。

昨今の米国シェールガス革命によって、日本国内の石油精製・石油化学のコンビナートでは、極めて厳しい環境下にあり、大手元売り会社の統廃合など、生き残りをかけた戦いを繰り広げている。また、産業を支えてきた稼働中のガスタービン設備の多くは、20年を超えており、老朽化による経済性や信頼性の低下懸念が顕在化しつつある。さらに、東日本大震災以降の自家発電の活用見直し（たとえば地域防災センターとしての活用）や、2016年からの電力小売り全面自由化を控えて、既存インフラを生かして発電事業に参画を目指す石油化学会社も多数見られる。

リーマンショックを挟んで原油高騰の追風を受けて、オイル&ガス業界の好調が続いたこともあり、オイル&ガス向けに産業用ガスタービンの開発が各ガスタービンメーカーによって行われてきたが、今回その代表機種を各メーカー別に紹介する機会を得た。新規導入や既設設備の更新を検討するユーザーにとって、既存のメーカー機種に捉われることなく、今回紹介されているような最新鋭（高効率・高信頼性）ガスタービンを含めた各機種の比較検討を行うのに、有益な企画と言える。

日本ガスタービンユーザー会の2016年度技術交流会は11月に開催予定であるが、リプレースを想定しているユーザー会員も増えており、今回紹介された最新鋭ガスタービン発電設備について特集として取上げる企画を考えている。

今後ともガスタービン自家発電設備ユーザーは、省エネルギーの推進、国内電源の更なる安定化や低コスト化に、益々貢献していく所存である。

原稿受付 2015年11月24日

*1 「日本ガスタービンユーザー会」会長
富士フィルム(株) 富士宮工場
〒418-8666 富士宮市大中里200番地

特集：産業向け最新鋭自家発電用ガスタービン

中小型ガスタービンH-25, H-50および事例紹介

松井 智之^{*1}
MATSUI Tomoyuki内藤 敬太^{*1}
NAITOU Keita大神 邦裕^{*1}
OGA Kunihiro荒木 秀文^{*2}
ARAKI Hidefumi

キーワード：ガスタービン，燃焼器，燃料多様化，コンバインドサイクル，熱電併給

Gas Turbine, Combustor, Fuel Flexibility, Combined Cycle, CHP

1. 緒言

三菱日立パワーシステムズ（以下、MHPS）の中小型ガスタービンであるHシリーズは30～40MW級としてH-25シリーズ、100～120MW級としてH-100シリーズがラインナップされている。H-25シリーズでは2014年に最新のH-25(42)⁽¹⁾を開発し、社内試験で性能、信頼性を実証した。また、燃料多様化に対応して2010年にバイオエタノール焚き燃焼器を開発した^{(2),(3)}。H-100シリーズは2010年に2軸型ガスタービンH-100(100) 初号機（当時の呼称はH-80）が運転し⁽⁴⁾、同ガスタービンの性能向上機として開発したH-100(110)⁽⁵⁾を2016年に出荷開始する予定である。40～60MW級としては、2012年にH-100の比例縮小設計をベースとした50MW級ガスタービンの実証試験を行い、同ガスタービンより性能向上を図ったH-50を現在開発中である。またH-50をコアGTとし、蒸気噴射による出力向上と水回収装置を用いた高効率ガスタービン発電システムS-AHAT (Simple heat and water recovery tri-generation Advanced Humid Air Turbine) を開発中である。H-100, H-50は発電機駆動だけでなく、2軸型ガスタービンという特徴から機械駆動用のドライバーとしても適用可能である。

本稿では、H-25シリーズ、H-50の基本仕様および最新の開発内容を紹介すると共に、バイオエタノール焚き燃焼器を適用した沖縄電力(株)の浦マルチガスタービン発電所への適用例と、S-AHATの特徴について紹介する。

2. H-25シリーズの開発

2.1 H-25シリーズガスタービンの概要

H-25シリーズは、MHPSが独自開発したガスタービンであり、1988年の初号機運転以降、国内外で合計171台の納入実績を有し、ほとんどのユニットが現在も継続運転している。

H-25シリーズの主な仕様を表1に、性能向上の推移

を図1に示す。H-25シリーズは1988年のH-25(28) (H-25(xx): xxは出力 [MW] を示す) 初号機運転から現在までに計3回、性能および信頼性の向上を行っている。2003年にH-25(28) から燃焼温度を40°C上昇させたH-25(32)⁽⁶⁾、2008年に高効率空気圧縮機を採用したH-25(35)を開発した。2014年には、タービン部の高効率化、冷却構造の改良および材質を改善した最新のH-25(42)を開発した。

H-25シリーズでは性能向上に加え、燃料多様化に対応した燃焼器も開発しており、2010年にサトウキビを原料としたバイオエタノール焚き燃焼器を開発し、社内実証試験設備での単缶試験により燃焼特性と信頼性を実証後^{(2),(3)}、H-25(35)に適用した。

2.2 H-25(42)における性能向上技術⁽¹⁾

H-25(42)では、燃焼温度および圧縮機をH-25(35)と同一とし、タービン部を中心に性能向上技術を適用した。図2にH-25(35)からの改良点を示す。H-25(42)ではTBC (Thermal Barrier Coating) やDS材 (Directionally Solidified Material)、ケーシング冷却装置などH-100(100)で適用実績のある技術と共に、Ni基ホイールやタービン静翼へのエンドウォールコンターリング⁽⁷⁾などの新技術も適用した。各適用技術については要素試験にて妥当性を確認し、MHPS日立工場の実負荷試験設備にて実機による実負荷試験を行い、性能向上効果と信頼性を実証した。その結果、H-25(42)はH-25(35)に対して出力で10.4%、効率で4.9%向上する試験結果を得た。また本結果より、コンバインド効率は53.6% (LHV, 2-2-1構成、ISO標準大気条件) となる。

Table 1 H-25 Gas Turbine Specification

Item	Specification
Gas turbine	Type
	Heavy duty design, single shaft, horizontal split casing, stacking rotor
Shaft speed	7,280 min ⁻¹
Compressor	Type
Turbine	17 stages axial flow type
	3 stages impulse type
Cooling	Air cooled 1 st and 2 nd stage nozzles and buckets
Combustor	Type
	10 cans, reverse flow type (Conventional / Low NO _x)

原稿受付 2015年11月11日

* 1 三菱日立パワーシステムズ(株) 日立ガスタービン技術部
〒317-0073 日立市幸町3-1-1

* 2 三菱日立パワーシステムズ(株) 電力計画部
〒220-8401 横浜市西区みなとみらい3-3-1

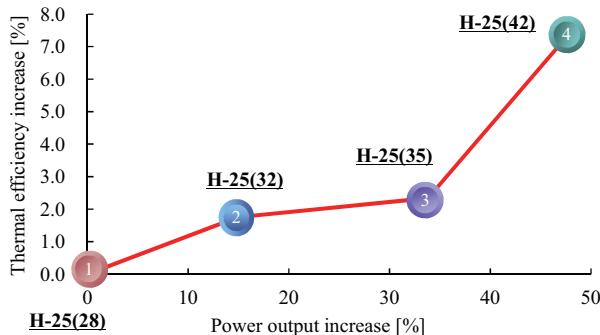


Fig. 1 H-25 gas turbine upgrade history

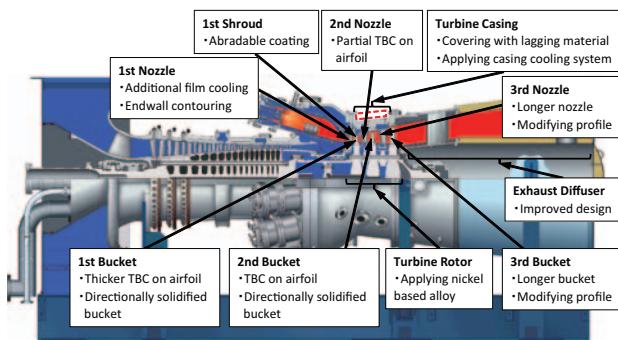


Fig. 2 Main design modification item of H-25(42)

2.3 バイオエタノール焚き燃焼器^{(2),(3)}

図3に開発したバイオエタノール焚き燃焼器の構造を示す。本燃焼器には拡散燃焼方式を採用しており、燃料ノズルから噴霧したバイオエタノールは燃焼室で空気と混合し燃焼する。燃焼室の上流側には水または蒸気噴射ノズルを取付け、燃焼室に水または蒸気を噴射することで火炎温度を低下させ、NOx排出量を低減する。

図4に燃料ノズルの構造を示す。燃料ノズルは液体燃料と気体燃料の供給が可能なデュアル燃料方式である。燃料ノズルには液体燃料流路、噴霧空気流路、気体燃料流路が形成された空気旋回器（Swirler）が設置されている。バイオエタノールは、液体燃料流路に設置したノズルチップによって旋回成分が与えられ燃焼室に噴射される。バイオエタノールを噴射する燃料ノズル出口部の外周側に噴霧空気流路から噴霧空気を高速で噴出させ、バイオエタノールと噴霧空気の速度差によるせん断力でバイオエタノールの微粒化を促進する気流微粒化方式を採用している。空気旋回器では空気に旋回成分を与えることで燃焼室に循環流を形成し火炎を安定化させている。

バイオエタノールは発熱量が低く、灯油と比較して流量が増加するため燃料ノズルの噴孔径を拡大し、燃料の供給圧力が従来の油焚きと同等になるようにした。また、バイオエタノール流量の増加に伴って噴射するバイオエタノールの粒径が拡大する傾向にあるため、噴霧空気の流路を拡大し噴霧空気流量を増加することでバイオエタノールの微粒化を図った。気体燃料は空気旋回器の流路内に設けた気体燃料噴孔から噴出し、燃料と空気の各々に旋回成分を与えて燃焼室に噴射することで、燃料と空

気の混合を促進している。

本燃焼器について、単缶試験設備にて燃焼性能を確認した結果、定格負荷条件の燃焼効率はバイオエタノール焚き、灯油焚き共に99.9%以上を達成した。

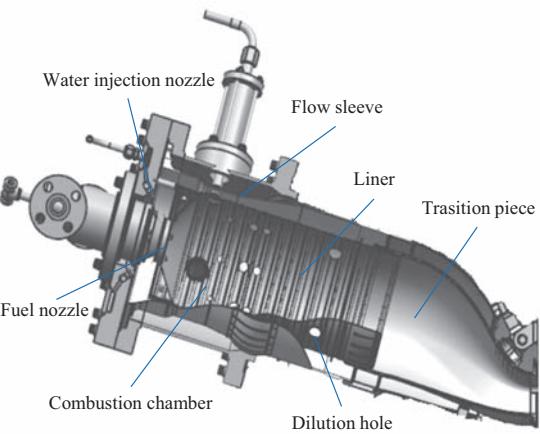


Fig. 3 Structure of the bio-ethanol fueled combustor

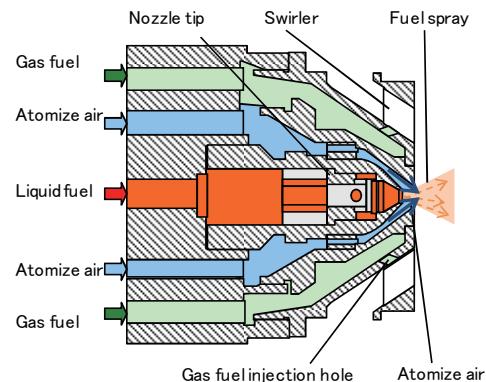


Fig. 4 Cross section of fuel nozzle

3. H-25の適用事例

3.1 吉の浦マルチガスタービン発電所

H-25(35) ガスタービンを用いたシンプルサイクル発電設備として図5に示す沖縄電力(株)吉の浦マルチガスタービン発電所が2015年3月20日より営業運転中である。本発電所は、吉の浦火力発電所 (LNGコンバインドサイクル251,000kW×2) 構内に併設されており、表2に示すように多様な燃料 (LNG, 灯油, バイオエタノール) で発電可能であることが特徴である。この特徴を生かし、吉の浦火力発電所のLNG燃料タンクの保安電源、および通常時の電力ピーク対応電源としての役割だけでなく、万一沖縄本島全域が電源喪失により停電した場合の系統立上げ電源としての役割も期待されている。

本発電所のH-25(35)は、燃料として気体燃料（ガス）および液体燃料（油）に対応した燃焼器を搭載したガスタービンである。ガスタービン点火前、もしくはガスタービン出力30%負荷以上にて燃料切替が可能である。

本ガスタービンは、気体燃料であるLNGを通常燃料

とするが、構内のLNGタンクから発生するBOG (Boil Off Gas) がLNGに混入した状態でも運転可能である。液体燃料においては、バイオエタノールもしくは灯油にて運転可能であり、マルチガスタービンと共に設置した200kLの燃料油タンクより供給される。燃料油の供給系統はバイオエタノールと灯油で共用となっており、合理的な燃料油系統にて構成されている。

また、NOx低減方法として水噴射方式を採用しているが、ガスタービン出力30%負荷以上にて投入可能であり、環境に配慮されたプラントである。



Fig. 5 Panoramic view of Yoshinoura multi GT (cited from Okinawa Electric Power Company⁽⁸⁾)

Table 2 Specification of Yoshinoura Multi GT

Item	Specification	
Gas turbine	H-25 (35) × 1	
Type of power plant	Simple cycle	
Power output	35,000 kW @23degC, LNG	
DeNOx	Water injection	
Fuel	Gas LNG	
	Oil Bioethanol, kerosene	

3.2 バイオエタノール燃料の特徴と対応

バイオエタノールは、サトウキビなど植物由来の燃料であり、再生可能な自然エネルギーとしても注目度は高く、CO₂低減効果も期待される燃料である。一方、バイオエタノールは、ガスタービン燃料として使用する燃料油と比較した場合、低カロリー、低引火点、低沸点、低動粘度な性質があり、これらを考慮した機器設計が必要となる。

表3に吉の浦マルチガスタービンで使用した燃料油の仕様を示す。発熱量は灯油の50%程度であり、灯油で運転する場合の約1.8倍の燃料油流量が必要となる。また、アルコールを95%含んだ燃料であることから揮発性が高く、沸点、引火点も灯油に対して低いため、バイオエタノールを気化させないこと、気化した場合でも機器および人体に危害を与えないことを考慮した燃料油供給システムの設計が求められる。

燃料油の動粘度が低い場合、燃料油供給系統に設置される回転機器の潤滑性に問題が生じる事が懸念される。燃料油の潤滑性向上には添加剤が有効であるが、バイオエタノールに添加剤を添加し潤滑性評価試験を実施したところ潤滑性向上は確認されなかった。そのため、燃

料油温度を下げることで必要な動粘度を確保する事とし、さらに燃料油ポンプは低動粘度に対応したスクリュー式を採用した。

ガス燃料による運転時でも燃料油配管には燃料油が残留しているため、特に高温となるタービン室内では配管内の燃料油温度上昇を防ぐ必要がある。そのため、燃料油配管には冷水配管を沿わせ、かつ外周に保温剤を巻く等の工夫を施してある。

バイオエタノールは揮発性が高く、沸点、引火点も灯油と比較し低いため、気化した場合には爆発を起こす可能性がある。そのため、着火失敗した場合の排油を回収する点火失敗排油タンクは屋外設置とし、その周辺は防爆範囲として設定した。また、バイオエタノールによる点火操作時には通常と異なり1回の着火失敗でガスタービンをトリップさせるインターロックとし、点火失敗排油タンク内の排油を回収することで安全面にも特段の配慮を施した。

Table 3 Specification of fuel Oil

Item	Unit	Bioethanol	Kerosene
Higher heating value (HHV)	kJ/kg	27,100	46,130
Lower heating value (LHV)	kJ/kg	24,000	43,000
Density @15degC	g/cm ³	0.814	0.797
Boiling point	degC	80	155
Flushing point	degC	16	43
Kinematic viscosity@30degC	cst	1.5	1.4
Alcohol content	vol%	95	-
Water content	mass%	7	-

3.3 バイオエタノールによる運転結果

燃料点火特性も灯油による点火時と同様に良好であり、計画最大負荷である35,000kWの発電機出力を得た。燃料油供給系統も計画通りの機能を実現し、バイオエタノールによりガスタービンが健全に運転可能であることを確認した。

4. H-50の開発

4.1 H-50ガスタービンの概要

H-50ガスタービンは、2012年にH-100の比例縮小設計をベースとして製作した50MW級ガスタービン（以下、先行機）の出力・効率向上を図ったガスタービンである。H-50はH-100と同様2軸ガスタービンであるため、発電所向けだけでなく、LNGプラント向けの圧縮機駆動用等、メカニカルドライブ用としても適用可能である。

表4にH-50ガスタービンの開発目標を示す。先行機に対し、燃焼温度の上昇、タービン翼冷却構造改良およびタービン翼材、ロータ材改善による冷却空気量削減により、出力を24.3%、効率を4.3%向上させる。またNOx排出濃度は15ppm以下を目標としている。

Table 4 Design targets of H-50 gas turbine

Item	Description
Simple cycle performance	Power output 57.4 MW
	Efficiency 37.8 % (LHV)
	Emission NOx < 15 ppm
Combined cycle performance	Power output 82.0 MW
	Efficiency 54.4 % (LHV)

4.2 H-50における性能向上技術

先行機に対して性能向上を図ると共に、高い信頼性を確保するため、燃焼器、タービン部を中心に図6に示す性能向上技術を適用した。主な手段として燃焼温度の上昇と材料の高温化により冷却空気量を削減し性能向上を図る。また、燃焼器には、マルチクラスタ燃焼器を適用し、低NOx化を図った。他に、H-25(42)と同様にTBC (Thermal Barrier Coating) や翼材のDS材 (Directionally Solidified material)、またNi基ホイールやタービン1段静翼シェイプトフィルム冷却などを適用した。さらに、大型ガスタービンなどで既に適用実績のあるTOBI (Tangential On Board Injection) システム⁽⁹⁾を適用し、冷却空気のポンピングロスを低減して性能向上を図った。

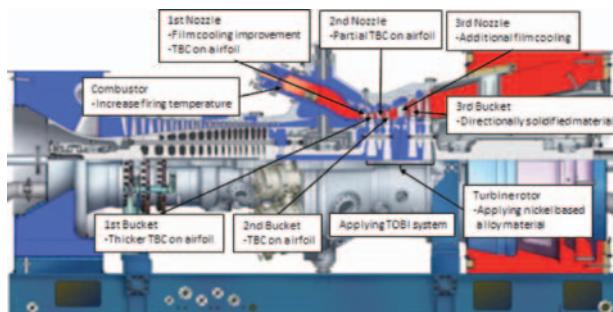


Fig. 6 Main design modification item of H-50

4.3 Ni基タービンホイールの適用

図7に示す通りガスタービンでは、タービンロータ外周側を圧縮機の抽気空気などにより冷却する必要あるが、冷却空気量が多いとガスタービン性能が低下する。H-50では冷却空気量削減の目的で、タービンホイールおよびスペーサの材質を先行機の12Cr鋼からIN718に変更した。IN718は析出強化型のNi基合金であり、12Cr鋼よりも優れた高温強度および粒界強度を有し、クリープ温度も高いため、タービンロータ外周側の制限温度を上げることができ冷却空気量を削減できる。

図8にタービンの1~4段ホイールおよびスペーサにIN718を適用した場合のタービンホイール外周側の冷却空気の削減量を示す。IN718の適用によってタービンロータ外周側の冷却空気を約4%削減している。

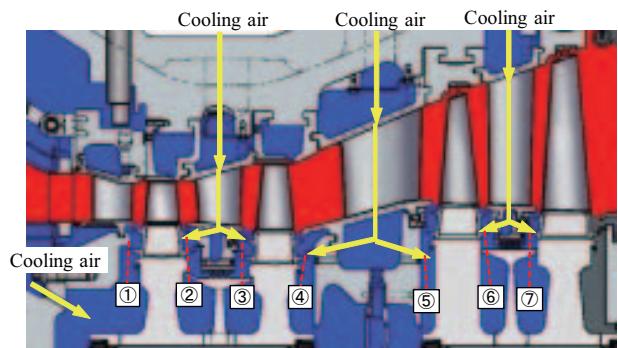


Fig. 7 Cooling of turbine rotor outer circumference

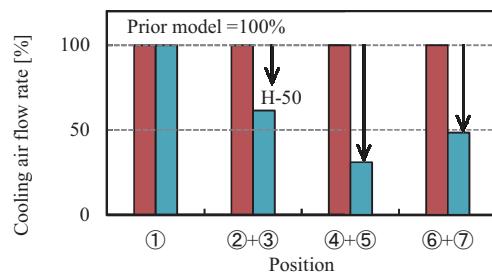
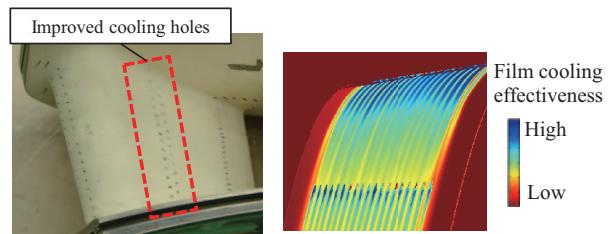


Fig. 8 Comparison of cooling air flow

4.4 タービン1段静翼フィルム冷却

タービン1段静翼については、熱負荷の高い前縁から腹側の冷却を強化する目的で、図9(a)に示す部分のフィルム冷却孔を、より冷却効果の高いシェイプト形状に改良した。同時に、翼背側および後縁部の冷却空気の流量配分を見直したことにより、1段静翼全体としては先行機に対して約15%以上の冷却空気を削減した。この改良を適用するにあたり、CFDにて前縁フィルム冷却の冷却孔位置を検討し、PSP (Pressure Sensitive Paint) を用いた翼列風洞試験により冷却性能を確認した。PSP試験とは酸素分圧に応じて蛍光強度が変化する塗料を使用して壁面の酸素分圧を計測する試験方法であり、酸素濃度の異なる主流ガスとフィルムガスを使用することで主流ガスとフィルムガスの混合割合を計測し、フィルム冷却効率を評価することができる。同図9(b)に翼面上のフィルム冷却効率の計測結果を示す。CFDにより決定したフィルム冷却孔位置において、計画通り前縁から腹側・背側にフィルム冷却空気が流れ十分に冷却されている。



(a) Improved cooling holes (b) Result of PSP test

Fig. 9 Improvement of the 1st nozzle cooling

5. H-50を適用したS-AHATシステム

5.1 S-AHATの概要

図10にS-AHAT (Simple heat and water recovery tri-generation Advanced Humid Air Turbine) の模式図を示す。S-AHATとは、高湿分対応ガスタービンであるAHAT (Advanced Humid Air Turbine)^{(10),(11)}向けに開発した技術のうち、高湿分燃焼器、水回収装置などの技術を先行適用し早期実用化を目指したシステムである。表5に、H-50を用いたS-AHATシステムの目標性能、特徴を示す。

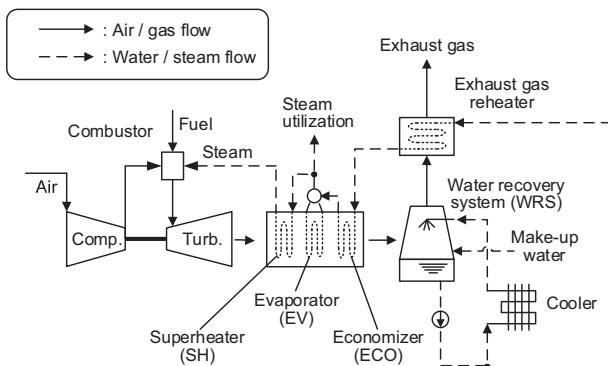


Fig.10 Schematic of the S-AHAT (Simple heat and water recovery tri-generation Advanced Humid Air Turbine)

Table 5 Expected features of the S-AHAT using the H-50 gas turbine

Item	Description
Performance	Power output 70 MW
	Efficiency 45 % (LHV)
Operational flexibility	Start-up time Hot start : 10-20 min Cold start : 30 min
	Load change rate 10-25 %/min
	Turn-down ratio 25%
	Ambient characteristics Flat ambient characteristics owing to variable comb. temp. and steam flow rate.
Environment	NOx emissions < 25 ppm (without De-NOx)
Economy	Water consumption Low water consumption owing to water recovery Maintenance cost Longer hot-parts life owing to lower comb. temp.

5.2 起動時間、負荷変化率

再生可能エネルギーの大量導入に伴い、ガスタービン発電システムには高効率だけでなく起動時間が速いことや負荷変化率が大きいことが求められている。

図11にS-AHATとガスタービンコンバインドサイクル(以下GTCC)のホット起動時の出力変化の概念を示す。

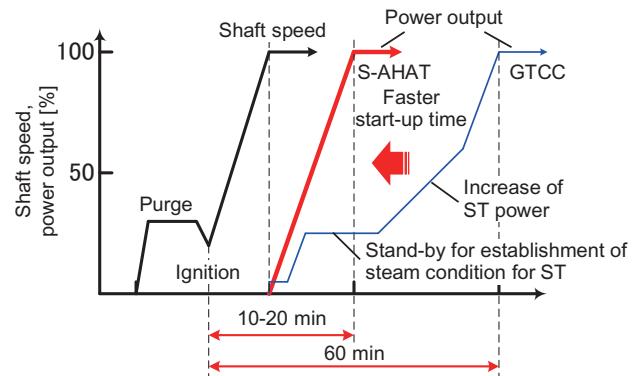


Fig.11 Concept of hot start-up of the S-AHAT

GTCCの場合、蒸気タービン（以下ST）のメタル温度とのマッチング上通気可能な条件まで待機する時間が必要であり、通気後もSTの負荷上昇率を制限する必要がある。S-AHATは、前記の様な制約がない為シンプルサイクル並みの高負荷変化率が期待できる。

5.3 大気温度特性

S-AHATは、加湿量の増大とともに圧縮機とタービンのマッチング圧力比が高くなることから、気温に応じて圧縮機のサージマージンを確保するよう燃焼ガス温度を制御する。図12(a)に示すように大気温度に応じて燃焼ガス温度と蒸気生成量が変化することにより同図(b)(c)に示すように、出力および効率がフラットな大気温度特性が実現可能である。同図において、GTCCは大気温度および冷却方式によってSTの復水器の真空度が変化する影響がでているが、S-AHATはこれらの影響を受けない特徴がある。

5.4 環境性、経済性、熱電併給

高湿分燃焼のためNOx排出濃度が低く環境性に優れ、燃焼ガス温度が低いことによりタービンの高温部品の交換頻度の低減が期待できる。水回収装置の排熱温度（約60°C）は、GTCCの蒸気タービンの復水器の排熱温度（約30°C）より高温のため放熱装置の伝熱面積が小型化できる。そのため空冷放熱を採用することが比較的容易であり、冷却水や温排水制約なしの運転が可能となる。

また、排熱回収で生成した蒸気は全量をガスタービンに注入することも可能であるが、プロセス蒸気や暖房用の蒸気として利用することも可能である。ガスタービンへ注入可能な蒸気量が多いことと、蒸気タービンへの最小抽気量の制約がないため、図13に示すようにGTCCで熱電併給運用する場合と比較して電力と熱需要の幅広い変化に適応可能であり、電力と熱の総合効率が最大85% (LHV) 以上となる運転が可能である。

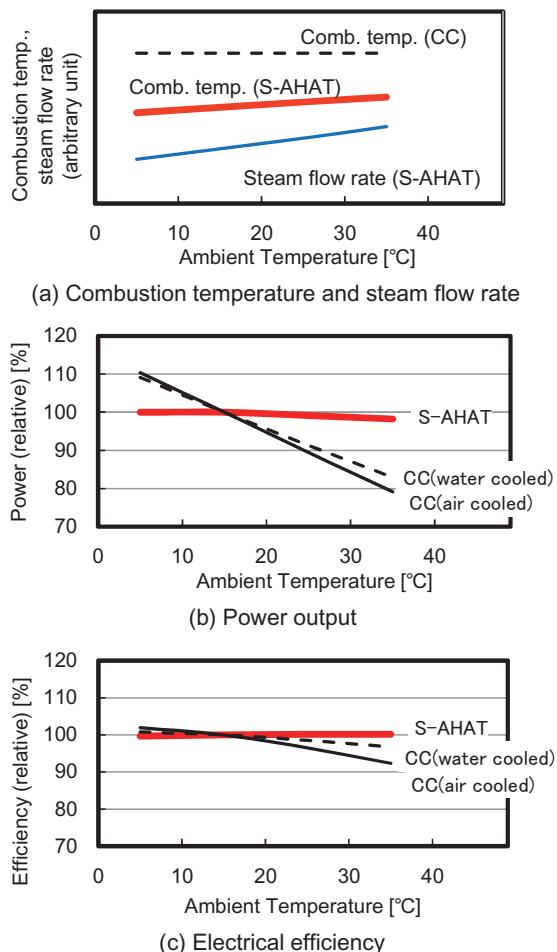


Fig.12 Ambient temperature characteristics of the S-AHAT and the combined cycle

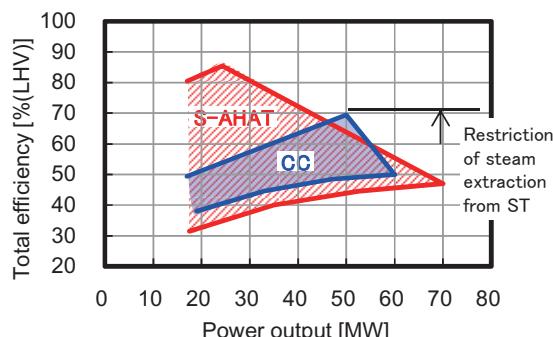


Fig.13 Comparison of total efficiency of CHP (combined heat and power) system between S-AHAT and CC (gas turbine combined cycle) using the H-50 gas turbine

6. 結言

H-25シリーズとH-50の仕様と最新の開発内容および各適用例として沖縄電力(株)吉の浦マルチガスタービン発電所とS-AHATを紹介した。

H-25シリーズでは、Ni基ホイールなど新技術を適用したH-25(42)を開発し、H-25(35)に対してガスタービン出力10.4%、同効率4.9%の性能向上を達成した。また、バイオエタノール焚き燃焼器を適用したH-25(35)を沖縄電力(株)吉の浦マルチガスタービン発電所に納め、

燃焼器および燃料供給システム共に計画通りの性能を達成した。

H-50はガスタービン出力57.4MW (ISO標準大気条件) を目標に開発中であり、Ni基ホイール等H-25(42)にて適用した性能向上技術と大型ガスタービンで実績のあるTOBIシステムを適用予定である。また、H-50をコアGTとして開発中のS-AHATシステムでは、シンプルサイクル並みの高負荷変化率と最大85% (LHV) 以上の高総合効率での運転が可能である。

MHPSでは、今後も更なる性能向上と信頼性向上のため技術開発を進め、電源の多様化、分散化の進む中、世界の電力安定供給と地球環境改善に貢献していく。

7. 参考文献

- 松井智之、秋山陵，“H-25(42) ガスタービンの開発と実機検証試験”，日本ガスタービン学会誌，Vol. 43, No. 5 (2015), pp. 13-18.
- 福里真吾、泉祐正、玉城陽、宮里敏功、関口達也、小泉浩美、平田義隆、吉田正平，“バイオエタノール焚きガスタービン燃焼器の燃焼特性”，平成23年度 火力原子力発電大会論文集 (2012-2), pp. 123-129.
- 関口達也、小泉浩美、平田義隆、吉田正平、福里真吾、泉祐正、玉城陽、宮里敏功，“バイオエタノール焚きガスタービン燃焼器に関する基礎研究”日本ガスタービン学会誌，Vol. 41, No. 5 (2013), pp. 414-419.
- 村田英太郎、齊藤希、岩本祐一、佐藤鑑三，“高効率ガスタービンH-80の開発”，日立評論，Vol. 92, No. 04 (2010), pp. 53-56.
- 三菱日立パワーシステムズ(株)，“世界最大級高効率2軸型ガスタービン (H-100)”，三菱重工技報，Vol. 52, No. 2 (2015), pp. 10-14.
- 荒井修、寺西光夫、永井信一、廣瀬俊一、鵜瀬真二、神野賢治，“日立H-25ガスタービンの特徴と適用例”，日立評論，Vol. 90, No. 02 (2008), pp. 34-39.
- Miyoshi, I., Higuchi, S., Kishibe, T., “Improving the Performance of a High Pressure Gas Turbine Stage Using a Profiled Endwall”, ASME Turbo EXPO 2013, GT2013-95148 (2013).
- 沖縄電力ニュースリリース, 2015年3月20日, https://www.okiden.co.jp/shared/pdf/news_release/2014/150320.pdf.
- Laurello, V., Yuri, M., Fujii, K., Ishizaka, K., Nakamura, T. and Nishimura, H., “Measurement and Analysis of an Efficient Turbine Rotor Pump Work Reduction System Incorporating Pre-Swirl Nozzles and a Free Vortex Pressure Augmentation Chamber”, ASME Turbo Expo 2004, GT2004-53090.
- 荒木秀文、岩井康、武田拓也、森崎哲郎、佐藤和彦，“高湿分空気利用ガスタービンシステムの40MW級総合試験および排ガスからの水回収試験”，第41回日本ガスタービン学会定期講演会 講演論文集 (2013), pp. 247-252.
- 阿部一幾、小金沢知己，“高湿分空気利用タービン (AHAT) の技術開発”，日本燃焼学会誌，Vol. 57, No. 179 (2015), pp. 27-35.

特集：産業向け最新鋭自家発電用ガスタービン

KawasakiガスタービンL30Aの運用実績と適用事例

谷口 智紀^{*1}
TANIGUCHI Tomoki田中 良造^{*1}
TANAKA Ryozo笠 正憲^{*1}
RYU Masanori中安 稔^{*2}
NAKAYASU Minoru合田 真琴^{*2}
GOUDA Makotoキーワード：L30A, ガスタービン, 効率, 信頼性, エミッション, メンテナンス, 水素
L30A, Gas turbine, Efficiency, Reliability, Emission, Maintenance, Hydrogen

1. 緒言

国内では臨海コンビナートを始めとして産業向けに多くの自家発電用ガスタービンが導入されてきた。近年は分散型電源の重要性が一層高まっていることもあり、各ガスタービンメーカーで継続的に開発が行われており、コンピュータ性能の著しい向上による設計の高度化や加工・製造技術の進歩なども相俟って、ガスタービンの効率は今も上昇を続けている。一方で、ユーザーの立場からは性能や信頼性だけでなく、メンテナンス期間の短縮や燃料の多様化など、ニーズが多岐に渡るようになっている。

当社は1983年に自社開発の産業用ガスタービンを用いたコジェネレーションシステムの販売を開始して以来、これまでに1万台以上のガスタービンを生産してきた。“L30A”は、これらの豊富な経験の中で培われ、信頼性が証明された技術をベースとしつつ、最新の設計・要素技術も駆使して新たに開発されたもので、Kawasakiガスタービンの中では最大の出力と効率を誇るだけでなく、市場ニーズに応えるために多様なラインナップも取り揃えている。本稿では、このL30Aの運用実績と適用事例を紹介する。

2. KawasakiガスタービンL30A

2.1 概要

L30Aを図1に、その主要諸元を表1に示す。L30Aは2軸型のガスタービンで、高圧タービンを含むガスジェネレータ(GG)モジュールと低圧タービンであるパワータービン(PT)モジュールに分けられる。GGモジュールはKawasakiガスタービンM7AやL20Aシリーズと同じ水平分割構造を採用しており、軸流14段の圧縮機、8

缶の燃焼器、軸流2段のタービンで構成される。M7Aシリーズはこれまでに納入実績150台以上で累積運転時間670万時間以上、L20Aシリーズは納入実績17台で累積運転時間70万時間を超える実績があるが、L30AのGGモジュールはこれらをベースとして設計されており、その信頼性が引き継がれている。一方、PTモジュールは軸流3段のフリータービンで、環状構造を採用することにより翼端隙間を最小化し、エンジン効率の向上を図って

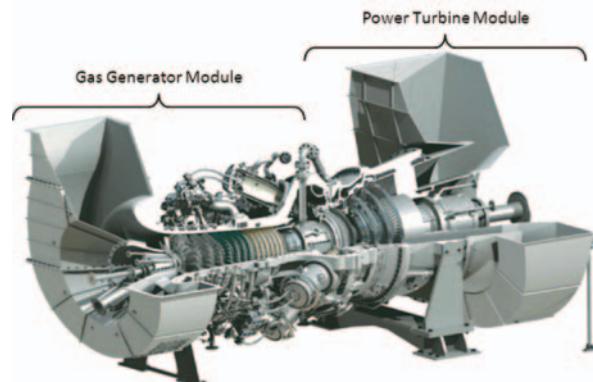


Fig. 1 L30A gas turbine

Table 1 L30A main specifications

Type	Simple open cycle twin-shaft
Electric output	30.1 MW
Thermal efficiency	40.1 %
Intake mass flow rate	86.5 kg/s
Pressure ratio	24.9
Exhaust gas temperature	470 deg.C
Compressor	Axial flow 14-stage
Combustor	8-can
Gas generator (GG) turbine	Axial flow 2-stage
Power turbine (PT)	Axial flow 3-stage
Emission (O ₂ =15%)	NOx<15ppm

ISO conditions, Generator end, Natural gas

原稿受付 2015年11月11日

* 1 川崎重工業(株) ガスタービンビジネスセンター
〒673-8666 明石市川崎町1-1* 2 川崎重工業(株) エネルギーソリューション本部
〒673-8666 明石市川崎町1-1

いる。環状構造は、当社の小型ガスタービンM1Fや国家プロジェクトで開発したSMGT (Super Marine Gas Turbine) でも採用されており、PTはそれらを元に設計された。オーバーホール間隔はGGが6年、PTが12年で、従来機種よりも長寿命化を達成している。

2.2 特長

L30Aの主な特長を以下に示す。

➤ 30MWクラスで世界最高効率

L30Aは当社で実績のある従来技術をベースとしつつ最新の要素技術を組み合わせることにより、この出力クラスでは世界最高の熱効率40.1% (ISO条件、発電端) を達成した。

➤ 低エミッション

エンジンの高効率化によるCO₂排出削減に加えて、M7AやL20Aシリーズで実績のある低NO_x乾式燃焼器を採用することにより、NO_x 15ppm以下 (O₂=15%) の低エミッションを実現した(図2)。DLE運転時にはパイロットバーナは最小限の保炎の役割をし、負荷が増加するにつれて追い焚きバーナの燃料割合を増加させ、低NO_xレベルを維持する。

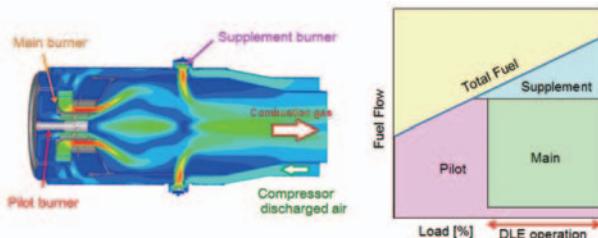


Fig. 2 DLE combustor and burner schedule

➤ 優れたメンテナンス性

ケーシングの各所に点検口が設けられており、ケーシングを開放することなくガスパス面全ての点検が行える。また、GGモジュールは水平分割構造を採用し、メンテナンス期間の短縮を図っている。さらに、GGとPTのモジュール構造とし、エンジン交換作業を容易にするなど、メンテナンス性に優れている。

3. L30A開発

L30Aの開発では、世界最高効率を達成するために最先端の解析技術やリグ試験を駆使した設計が行われたが、紙面の都合上、それらについては割愛する。詳細については引用文献を参照されたい。^{(1),(2),(3),(4)}

開発試験は、当社明石工場に新設された運転設備にて行われた(図3)。この運転設備は開発試験、量産機の領収試験のいずれにも用いられ、通常の運転制御に必要な計測の他に、温度や圧力、振動など合計で1,000点以上の特殊計測が可能である。試験期間中は、種々の計測技術を用いて、エンジン性能や各要素性能が細かく調べられた。さらに、耐久性確認試験では熱サイクル試験や

過速度試験、過温度試験などで様々なパターンの運転が行われた(図4)。試験期間中の総起動回数は100回を超え、負荷範囲50～100%で負荷の増減を繰り返す熱サイクル試験では500回以上のサイクルが繰り返された。試験終了後は全ての部品に対して目視検査と非破壊検査を行い、問題のないことを確認した。⁽⁵⁾

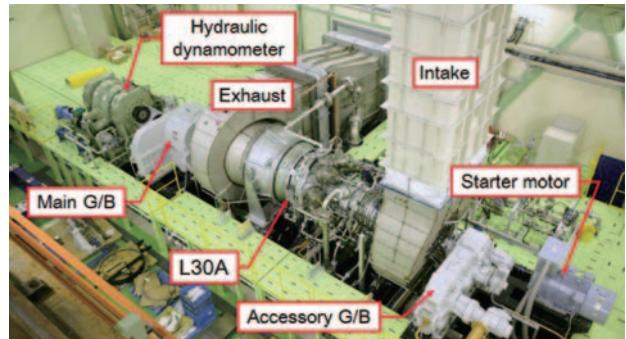


Fig. 3 Engine testing facility

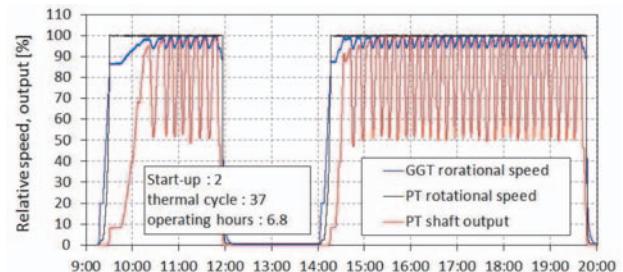


Fig. 4 Typical operating pattern during cyclic testing

4. 運用実績

社内での開発試験が完了した後、量産初号機は(株)ダイセル殿の網干工場にて実証運用を開始した(図5)。2012年7月より現地にて急負荷投入や急負荷遮断、系統連系を確認するための各種試験を行い、性能やエミッションが計画値を満足することを確認した後、2012年10月から商用運転を開始した。

2013年5月には実運転時間がGGのOH間隔(6年)の約10%である5,000時間に達したため、当社の長期実証試験規格に従ってオーバーホール点検を行った。GG、PTとも全ての部品について目視検査を行い、ガスパス部品と回転体部品については破壊検査や非破壊検査も行ったが、いずれの部品も損傷のない健全な状態であったため、破壊検査用に抜き取った一部の部品を除いて全て元の部品を再度組み込み、実証運用を再開した。

その後も順調に運用を続けた実証機は、2015年3月に実証運用評価のための2回目のオーバーホール点検を行った。運用開始からの実運転時間は約15,800時間、等価運転時間は約17,000時間で平均実負荷は約70%であった。GGは1回目の点検と同様に、全ての部品の目視検査、ガスパス部品と回転体部品の非破壊検査を実施した。さらに、圧縮機全段の動翼、燃焼器のチャンバとト

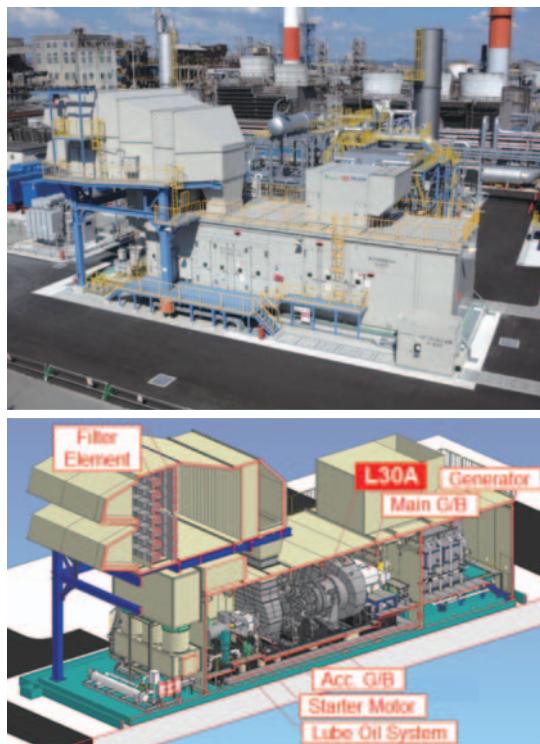


Fig. 5 L30A package PUC300

ランジションダクト、GGタービン全段の動静翼について、数個ずつを抜き取って破壊検査を行った。調査では切断した各部品に対して、拡散層厚さや酸化スケール厚さ、 γ' 相などのミクロ組織観察を行い、各部品の健全性や耐久性に問題がないかを詳細に調べた。調査を行った部位の数は、圧縮機の動翼は1枚当たり20点以上、燃

焼器のチャンバおよびトランジションダクトもそれぞれ20点以上、GGタービンの動静翼については1枚当たり50点以上に及んだ。調査した部品の中から代表的なものの外観を図6に、切断調査結果を図7～10に示す。

目視検査では、いずれの部品も目立った損傷はなく、良好な状態で、遮熱コーティングが施されている燃焼器のチャンバとトランジションダクト、GGタービン翼については、コーティングの剥離もほとんど見られなかった。通常、コーティングの剥離は運用開始後、短期間の起動・運転・停止で起こりやすいが、今回は等価運転時間で約17,000時間でも健全な状態にあることから、十分な剥離耐性を有していると考えられる。

破壊検査では、母材の硬度変化やミクロ組織から各部品の使用環境下での状態が推定されたが、いずれも温度や強度が想定値を超えているような兆候は認められなかった。さらに、遮熱コーティング施工品についてはその状態も重点的に調べられた。ボンド層表面に生成されるTGO層が厚くなるとコーティングの剥離に至ることが知られているが、観察した全ての部位においてTGO層はほとんど成長しておらず、このことからもコーティングの密着性や耐久性に問題がないことが証明された。

非破壊検査を行った部品についても、部品交換をするような有害な指示は全く見られなかったことから、オーバーホール点検は問題なく終了した。

ダイセル殿での実証運用はこのオーバーホール点検をもって完了したが、商用運用は現在も継続中であり、今後は通常のメンテナンススケジュールに沿った運用・点検が行われる予定である。

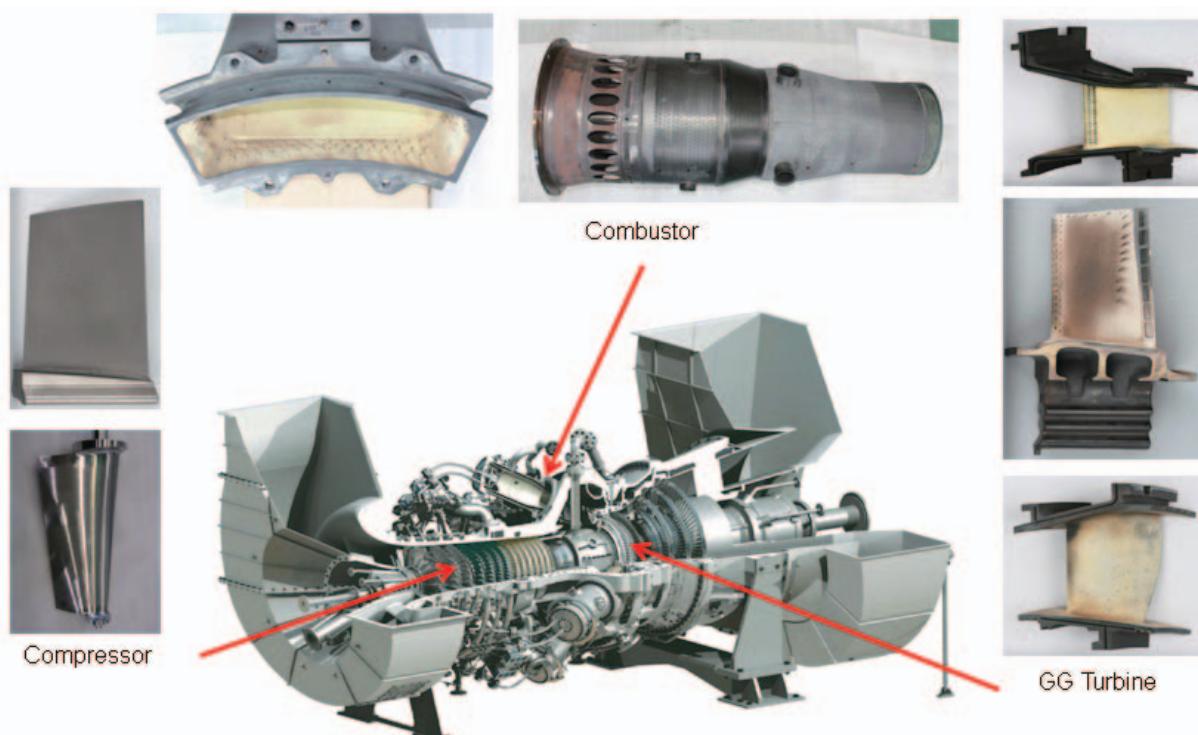
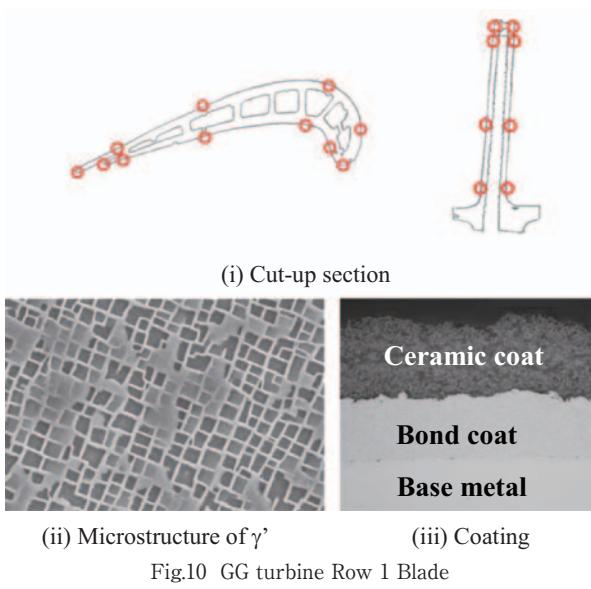
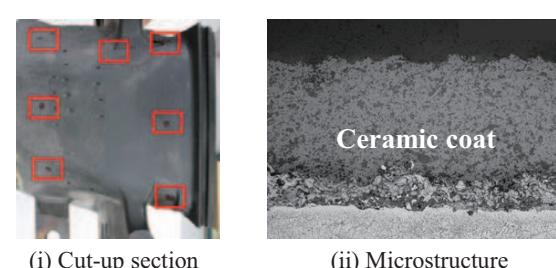
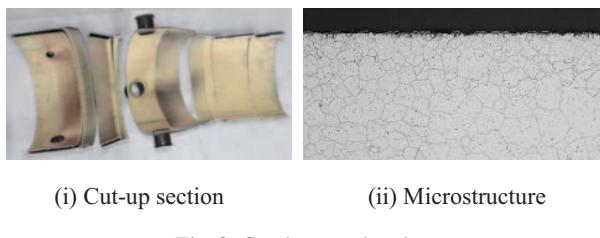
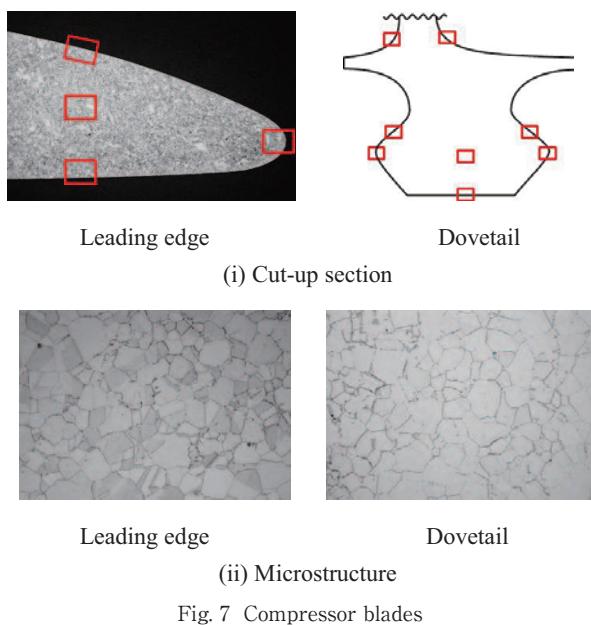


Fig. 6 Overhaul inspection after 15,800 hours



5. 市場ニーズへの対応

本章では多様化するユーザーの要望に対応するための当社の取り組みとL30Aを用いた代表的なシステム事例を紹介する。

5.1 ユーザー要望への対応

» メンテナンスの期間短縮・コスト圧縮

メンテナンスに伴うコストや長期間のエンジン停止は、ユーザーにとって大きな問題である。L30Aは2章でも述べた通り、点検や分解が容易に行える構造でメンテナンス性が優れていることから、メンテナンスに伴うエンジン停止期間を最小限にとどめることができる(図11)。また、オーバーホール間隔がGG6年、PT12年と長いことから、メンテナンスコストも抑えられる(表2)。さらには、L30Aの部品加工やエンジン組立は全て国内で行われており、また、当社は国内にサービス拠点を多く構えていることから、万が一のトラブルの際にも迅速な対応が可能であるなど、メンテナンスに関するメリットが非常に大きいエンジンとなっている。

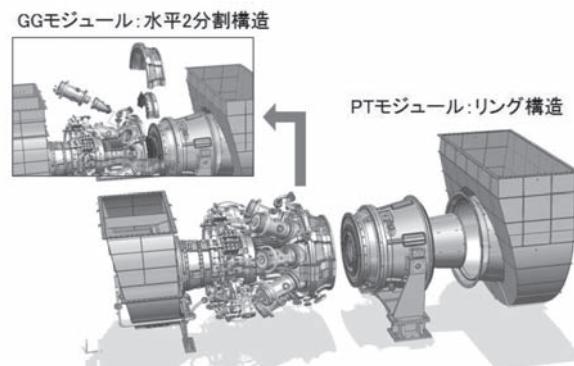


Fig. 11 Maintenance procedure

Table 2 Maintenance schedule

実運転時間 (×8,000時間)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Level C	●	●		●	●		●	●	●	●	●	
Level B			●						●			
Level A						●						●
名称											内容	
Level C	BSI: ボアスコープ点検											1年毎
Level B	HSI: 高温部開放点検											3年毎
Level A	O/H: トレードイン A1: 6年毎 A2: 12年毎											GG: トレードイン、PT: BSI点検 GG&PT: トレードイン

» 水素混焼燃焼器

近年、燃料コスト削減やCO₂排出量低減のために、工場で発生する副生水素をガスタービン燃料として使用したいという要望が増えてきている。それらに応えるために、当社では水素混焼DLE燃焼器を開発した。これは、希薄予混合燃焼を行うメインバーナは都市ガス焚きとし、追焚きバーナで水素燃焼させるという当社独自の技術で、水素の体積割合が0～60%という広い範囲での運用を実現している。(図12, 13)

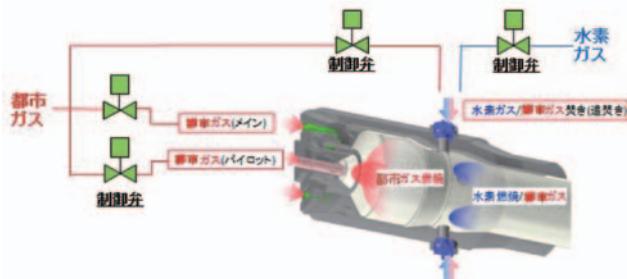


Fig.12 Hydrogen mix combustor

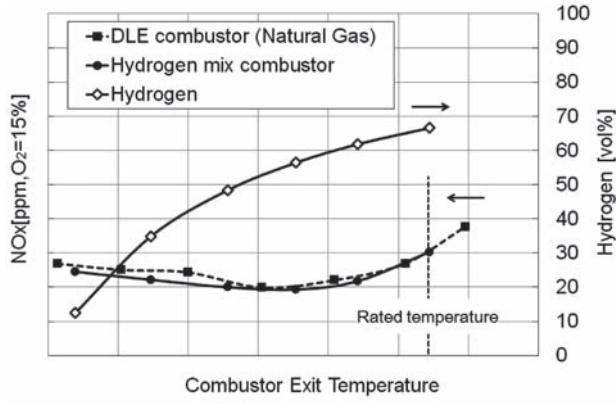


Fig.13 NOx emissions (Rig testing)

➤ リキッドスタンバイ燃焼器

L30Aは低NOxのガス焚きDLE燃焼器を標準仕様とするが、非常時には液体燃料でも運転可能なりキッドスタンバイ燃焼器（Dual Liquid Stand-by, DLS）もラインナップとして取り揃えている。DLS燃焼器は液体燃料での始動、負荷運転はもちろんのこと、運転中の燃料切り替えも可能で、ガス燃料での運用中に万が一、ガス供給がストップしても液体燃料に切り替えることにより、エンジンを停止せずに運転を継続できるという優れたシステムである（液体燃料での運転時は拡散燃焼）。

➤ 機械駆動用途

L30Aは2軸式ガスタービンのため機械駆動用としても用いることが可能である。発電用途ではPT回転速度は一定であるのに対して、機械駆動用途では幅広い範囲での運用が求められるが、開発試験では運用範囲全域にわたって信頼性に問題がないことを確認している。

5.2 システム事例

➤ コジェネレーションシステム

L30Aをコジェネプラントに導入したPUC300Dのシステムとプラント内での配置例をそれぞれ図14、15に示す。空気源設備は計装用空気や起動時の圧縮機への空気供給用であるが、客先から支給されるケースも多く、その場合は不要となる。コジェネ性能は表3に示す通り、飽和蒸気46.2t/hで出力28MW、総合熱効率は83.1%に達する。このシステムから発生する電力28MWを商用電源から購入し、蒸気46t/hをボイラから発生させるものとした場合、年間8,000時間の連続運転では、CO₂削減量は年間11.7万トン、原油換算で24万キロリットルの省エネ量

となり、省エネ効果が非常に高いシステムである。先述の水素混焼燃焼器を用いるとさらに3.5万トンのCO₂が削減される。（図16）

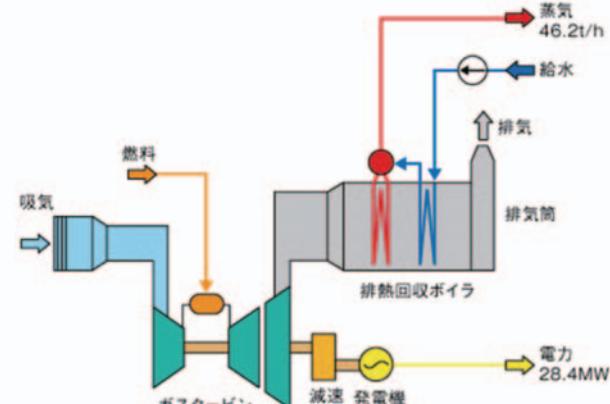


Fig.14 PUC300D Cogeneration system

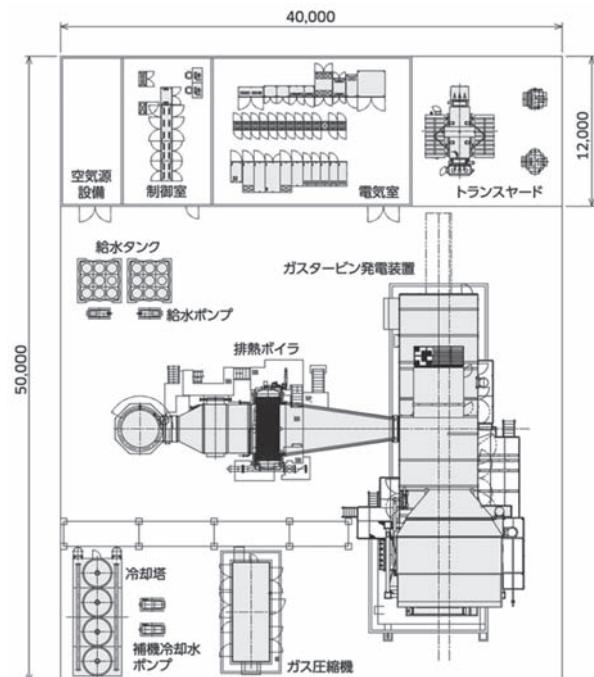
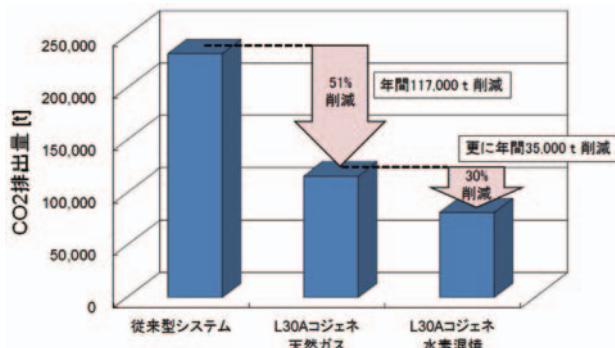


Fig.15 PUC300D arrangement

Table 3 L30A combined heat and power plant

Model	PUC300D
Electric power output	28.4 MW
Steam production	46.2 t/h
Heat rate	9,281 kJ/kWh
Total LHV thermal efficiency	83.1 %
Intake air temperature	15 deg.C
Intake / Exhaust loss	0.98 / 3.43 kPa
Fuel	Natural gas (LHV=40.6MJ/Nm ³)

Saturated steam (Pressure:0.83MPaG, Temperature:177deg.C)

Fig.16 CO₂ Reduction

▶ コンバインドサイクルシステム

L30A 1台と蒸気タービンを組み合わせたコンバインドサイクルのシステムと配置例はそれぞれ図17, 18のようになる。また、L30Aを1台と2台とした場合のプラント性能は表4に示す通りで、いずれの場合も総合発電効率は50%を超える高効率なプラントとなる。

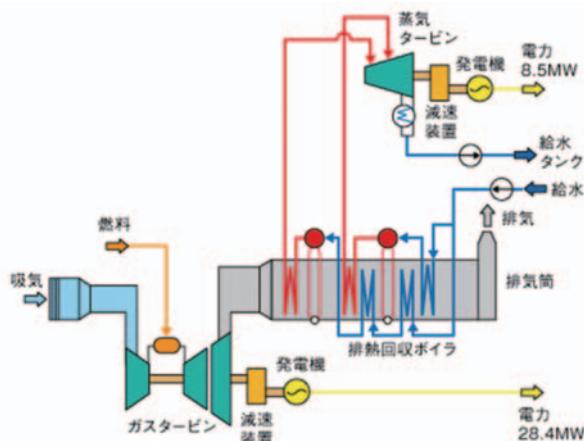


Fig.17 PUCCS400 combined system (L30A x 1+ST)

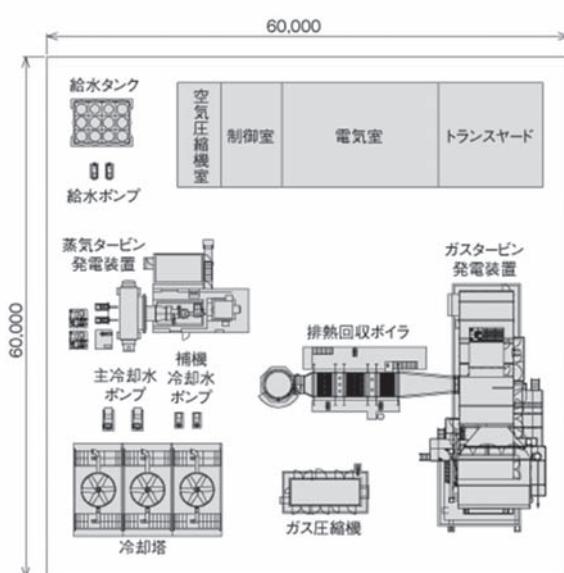


Fig.18 PUCCS400 arrangement (L30A x 1+ST)

Table 4 PUCCS400 arrangement (L30A x 1+ST)

Model	PUCCS400	PUCCS800
Number of GT	1×L30A	2×L30A
Net plant output	36.9 MW	74.7 MW
Heat rate	7,141 kJ/kWh	7,047 kJ/kWh
Net plant efficiency	50.4 %	51.1 %
Intake air temperature	15 deg.C	
Intake / Exhaust loss	0.98 / 3.43 kPa	
Fuel	Natural gas (LHV=40.6MJ/Nm ³)	

6. 結言

本稿ではKawasakiガスタービンL30Aについて紹介した。L30Aは30MWクラスで世界最高効率を誇るだけでなく、低エミッション、信頼性、メンテナンス性も兼ね備えたエンジンである。さらに、多様なユーザーニーズに応えるために豊富なラインナップを取り揃えている。

2015年度からは、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成を受けた新しい開発プログラムを開始しており、出力・効率をさらに向上させるとともに高速負荷応答性を目指したバージョンアップ機の開発が進行中である。

7. 引用文献

- (1) T. Ikeguchi, et al, "Design and Development of a 14-stage Axial Compressor for Industrial Gas Turbine," ASME GT2012-68524.
- (2) T. Sakurazawa, et al, "Development of the DLE combustor for L30A gas turbine," ASME GT2015-49204.
- (3) R. Tanaka, et al, "Development of high efficient 30MW class gas turbine, Kawasaki L30A," ASME GT2012-68668.
- (4) R.Tmai, et al, "Vibration Analysis of Shrouded Turbine Blades For a 30MW Gas Turbine", TBTS2013-2014.
- (5) T. Taniguchi, et al, "Kawasaki L30A Gas Turbine: Validation and Operating Experience of Turbine Components", POWER-GEN International, 2014, Florida, USA.

特集：産業向け最新鋭自家発電用ガスタービン

LM6000ガスタービン発電プラントの技術紹介

野原 隆樹^{*1}
NOHARA Ryuki

キーワード：LM6000, ガスタービン, 原動機, シンプルサイクル, コンバインドサイクル

LM6000, Gas turbine, Power systems, Simple cycle, Combined cycle

1. はじめに

近年の電力分散化、電力自由化の動きや、CO₂削減による環境負荷低減の要求から、ガスタービン発電が期待されている。当社はGE社製LM6000シリーズを用いた発電プラントを製品として提供しており、国内外に多くの納入実績を蓄積してきた。LM6000シリーズは、GE社の航空用エンジンCF6-80C2をベースに発電用として開発されたガスタービンであり、航空転用型のメリットである軽量コンパクト、高効率、高速起動の特長を有している。本稿では、その特長の詳細と最新動向を紹介する。

2. LM6000ガスタービンの特長

2.1 主要諸元

LM6000は出力や燃焼器の形態により5機種が販売されているが、主力機種であるLM6000 PFの諸元を表1に示し、図1にガスタービン外観図を示す。発電プラント性能の詳細は2.8項にて詳細を述べる。

2.2 改良の変遷

GE社は、1990年にLM6000シリーズの初期型LM6000 PAをリリースしてから今日まで、DLE (Dry Low Emissions) 型燃焼器の開発や低圧タービンなどの改良

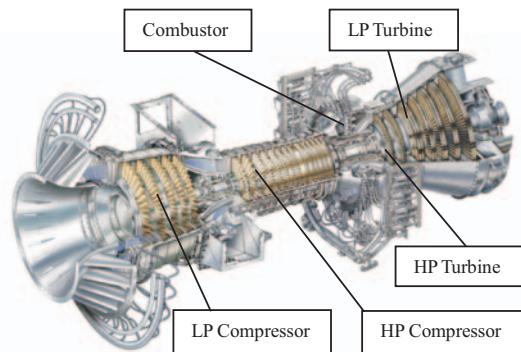


Fig. 1 Cross sectional image of LM6000 gasturbine

を加え、NOx低減、出力および効率向上を継続的に行っている。2009年にリリースされたLM6000 PG (拡散燃焼器型)、2010年にリリースされたLM6000 PH (DLE燃焼型)では、低圧軸の回転数を3600min⁻¹から3930min⁻¹に増加することで空気量を増やして出力を大幅に増強した。またCF6エンジンの最新形態であるCF6-80E1の技術を導入して、ローター構造や、タービンの改良が加えられている。

また、現在ではコンバインドサイクルでの発電効率向上を目的として全体圧力比の最適化や航空エンジンの最新技術を導入したLM6000 PF+の開発が行われている。

当社では、RSP (Revenue Sharing Partner) としてエンジンの開発に参画し、CRF (Compressor Rear Frame) などの部品製造を担当している。

2.3 航空転用型ガスタービンの特長

LM6000は航空転用型ガスタービンに分類される。以下にその特長を述べる。

(1) 軽量コンパクト

LM6000は航空エンジンCF6-80C2のコアモジュール (高圧圧縮機+燃焼器+高圧タービン) をベースとし、発電用に最適化した低圧圧縮機、低圧タービンを組み合わせた2軸式のエンジンである。図2にCF6-80C2エンジンとLM6000の断面の比較を示す。軽量化が要求される航空エンジンをベースとしており、コンパクト、軽量を特長としている。

Table 1 Specifications of LM6000 PF

Type	Open cycle gas turbine, Two-shaft	
Compressor	Low Pressure	5 stages Axial-flow
	High Pressure	14 stages Axial-flow
Turbine	Low Pressure	2 stages Axial-flow
	High Pressure	5 stages Axial-flow
Combustor	Annular type	
Power Output	42.5 MW	
NOx Emission	12.5ppm (at 16%O ₂)	
Exhaust Temperature	453°C	
Overall Pressure Ratio	30	
Rotor Speed	Low Pressure	3600 min ⁻¹
	High Pressure	10310 min ⁻¹

原稿受付 2015年11月10日

*1 (株)HI 原動機プロジェクト統括部
〒135-8710 江東区豊洲3-1-1

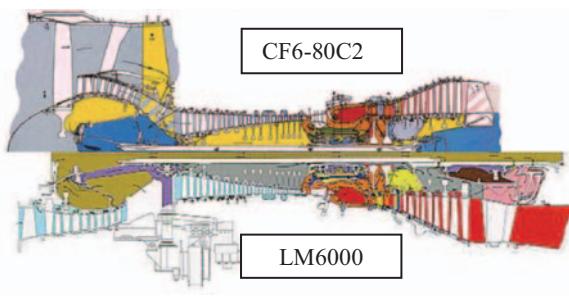


Fig. 2 Comparison between LM6000 and CF6 Aero engine

(2)高効率

LM6000は2軸式（低圧軸、高圧軸）の構造を有しており、1軸式では到達できない高圧力比を特長としている。

図3は、タービン入口温度（TIT）を一定にして圧力比を変化させた場合の発電効率の変化を試算した結果を示す。この図から、TIT 1200°C以上の場合は、圧力比の上昇が発電効率の向上に寄与できることが分かる。LM6000は低圧圧縮機と高圧圧縮機の組み合わせにより全体圧力比を約30とすることで高い発電効率を達成している。図4に、現在販売されている30～60MWクラスのガスタービンの圧力比と発電効率のトレンドを示す。LM6000は高圧力比によりガスタービン単体での発電効率は世界最高レベルを達成している。

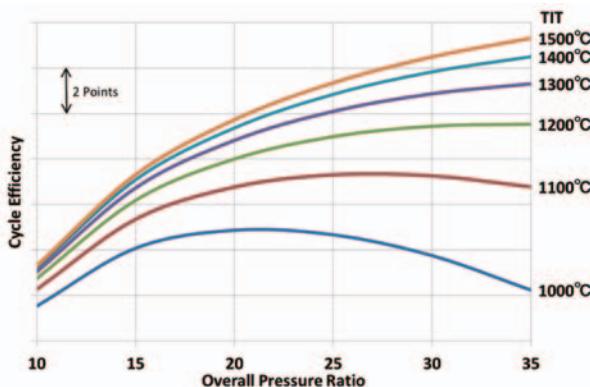


Fig. 3 Effect of overall pressure ratio on cycle efficiency

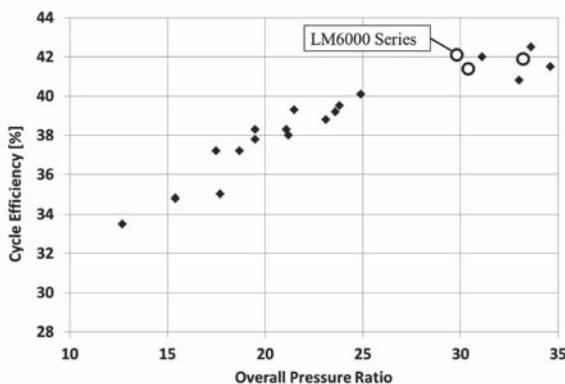


Fig. 4 Cycle efficiency versus overall pressure ratio⁽²⁾

(3)高速起動、高い負荷追従性

LM6000は航空エンジン用に設計された軽量ローター、ケーシングにより、非常用時の高速起動の要求や、負荷変動に対する高い追従性を有している。近年導入が増えてきた自然エネルギーによる発電を補完してグリッドを安定させる使い方にも注目されている。

図5にLM6000の標準的な起動パターンと、6分で最大負荷に到達できる起動パターンを示す。起動回数による寿命低下を補正した等価運転時間による管理を行えば、さらなる急速起動にも対応可能である。

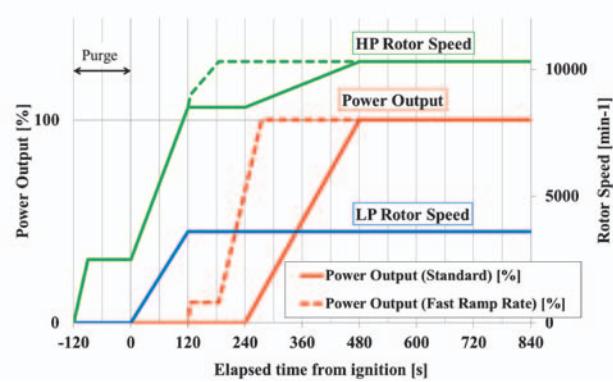


Fig. 5 Start-up profile of LM6000

2.4 燃焼器の特長

環境負荷低減のためNOx排出量の削減が国内外で要求されている。NOx排出量の低減には、主に以下の2つの手法が用いられるが、LM6000は両タイプの燃焼器を用意しており、要求に応じて選択することができる。

- ・拡散燃焼方式 + 水又は蒸気噴射 ⇒ SAC型燃焼器
- ・予混合燃焼（DLE）方式 ⇒ DLE型燃焼器

以下に、各燃焼器の外観図と特長を示す。

(1)SAC型燃焼器（拡散燃焼方式）

SAC (Single Annular Combustor) と称する航空エンジンに由来するアニュラーラー型燃焼器であり、ドーナツ状の空間に燃料を噴射して拡散燃焼させる。LNG、低カロリーガス、水素などのガス燃料や、灯油、ナフサなどの液体燃料など多種燃料に対応できる。図6に概観を示す。

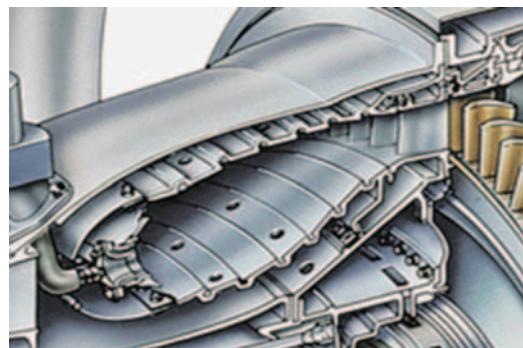


Fig. 6 SAC Combustor

このタイプの燃焼器は数百ppmのNOxを排出するため、水又は蒸気を燃焼器内に噴射して火炎温度を下げることでNOx排出量を21ppm (16%O₂換算) まで低減することができる。

(2)DLE型燃焼器（予混合燃焼方式）

DLE (Dry Low Emissions) 燃焼と呼称し、予混合燃焼（燃焼前に燃料と空気を混合させて火炎温度を均一化する）によりNOxを低減する。図7に概観図と、図8に燃料制御の概念図を示す。

3重の円環に区分された燃焼場（A, B, Cリング）を有し、周方向に30個の燃料ノズル（内側のCリングは15個）、合計で75個の燃料ノズルから燃料が供給される。各燃料ノズルは、燃料のオンオフを切り替えるステージングバルブに接続されており、燃料を供給するノズル本数の切り替えと、抽気弁による空気量の制御を組み合わせて空燃比を最適に制御する。この方式により広範囲の負荷帯でNOx排出量21ppm (16%O₂換算) を達成している。

また、LM6000 PFのDLE燃焼器は、燃料制御弁を5個に増やし、各リングの燃料配分を最適化できる改良を加え、NOx排出量 12.5ppm (16% O₂換算) が達成可能である。

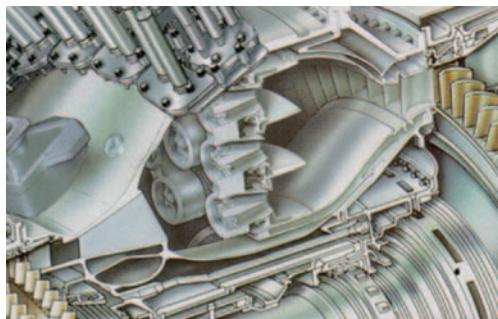


Fig. 7 DLE Combustor

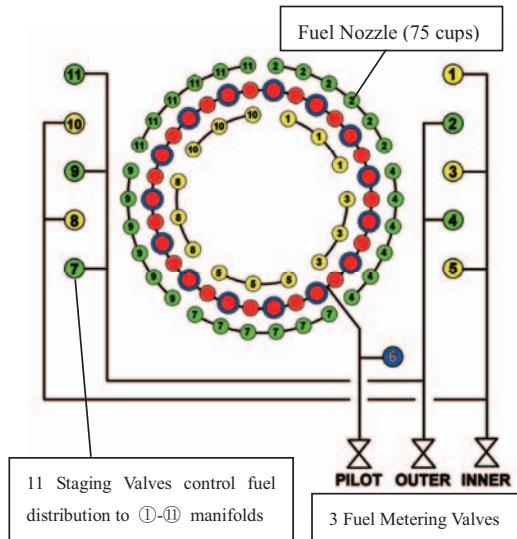


Fig. 8 Diagram of DLE control system

2.5 SPRINT™システム

LM6000は、純水を低圧圧縮機入口又は高圧圧縮機入口に噴霧し、大気温度が高い環境で出力を増強することができるSPRINTシステムをオプションで設置できる。主に東南アジアなどの高温地域で導入されている。図9にSPRINTシステムの概要図と、システム適用時の出力増加量を図10に示す。

また、ガスタービンは部分負荷の運転では発電効率が落ちるが、SPRINTシステムにより水噴射量を調整して発電量を調整することで、SPRINT運転中は負荷を下げても発電効率の低下を抑えることができる特長がある。図11に部分負荷での発電効率の変化を示す。

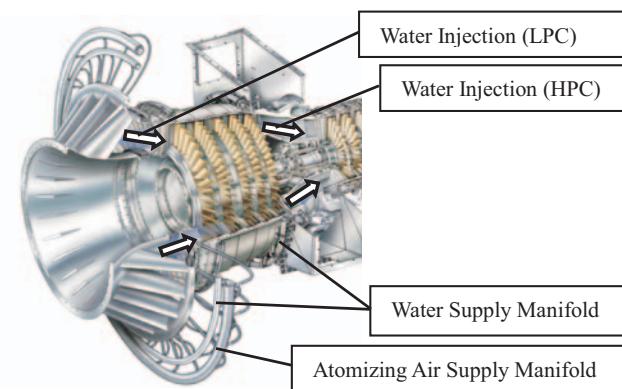


Fig. 9 SPRINT™ System

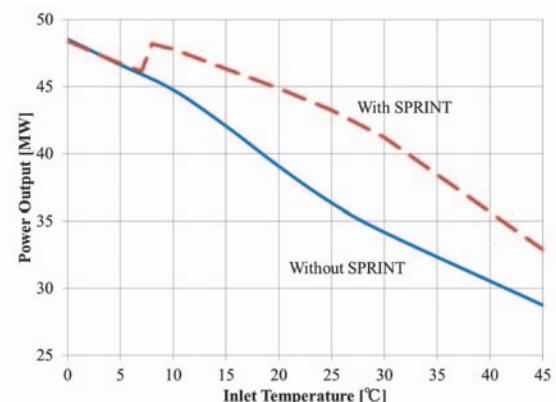


Fig.10 Power increment with SPRINT system

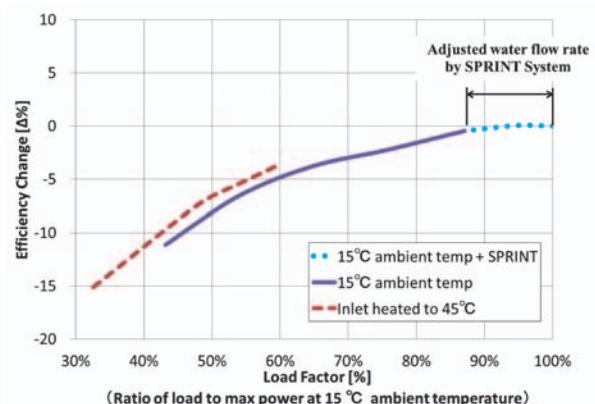


Fig.11 Efficiency in partial load

2.6 メンテナンス

(1)メンテナンス間隔の考え方

航空機用エンジンは繰り返しの離着陸により起動回数が多くなるため、低サイクル疲労に対して十分なマージンを考慮して設計している。LM6000においても起動回数に応じた等価運転時間の管理は必要なく、ガスタービン本体のメンテナンス間隔は実運転時間で計画する。

(2)ガスタービンメンテナンス間隔

標準的なメンテナンス間隔を以下に示す。

- ・高温部（燃焼器、高圧タービン）整備 25,000時間毎
- ・オーバーホール整備 50,000時間毎

これらの整備は、エンジン本体をパッケージから卸して、当社工場にて高い品質管理体制の下で実施している。

また、運転設備を有しており、必要に応じて整備後に出荷前の確認運転を実施している。当社工場はGE社の認定を受けており、当社が納めたプラント以外のLM6000ユーザーからも整備を受注している。

2.7 エンジン換装期間

航空エンジンをベースとしたLM6000の本体重量は8tと軽量であるため、約48時間（作業時間）でエンジン換装が可能であり、メンテナンスによるダウンタイムを最小限に抑えることができる。

2.8 発電プラント性能

LM6000を用いた発電プラント性能を表2に示す。

Table 2 LM6000 power plant performance

	Model		LM6000 PC		LM6000 PD/PF	
	Combustor type		SAC		DLE	
	Option		SPRINT		SPRINT	
Simple cycle	Power Output	MW	43.4	48.7	42.5	47.5
	Efficiency	%	40.1	40.3	41.2	41.3
Combined cycle GT:1 × ST:1	Power Output	MW	55.3	62.1	55.2	59.8
	Net Efficiency	%	51.0	51.3	53.3	52.7
Combined cycle GT:2 × ST:1	Power Output	MW	111.1	124.8	111.0	120.2
	Net Efficiency	%	51.3	51.5	53.6	53.0

LHV basis, ISO standard condition, with reduction gear and inlet/exhaust losses

(1)シンプルサイクル効率

図12に30～60MWクラスのシンプルサイクルの発電効率のトレンドを示す。2.3項で述べたように、高圧力比による熱サイクル効率向上への寄与が大きく、LM6000は高いシンプルサイクルの性能を有している。

(2)コンバインドサイクル効率

図12に30～60MWクラスのコンバインドサイクルの発電効率のトレンドを示す。近年、IPP (Independent Power Producer) 事業、SPP (Small Power Producer) 事業などを目的としてコンバインドサイクル発電プラントが建設されている。コンバインドサイクルの発電効率向上にはガスタービン単体の発電効率に加え、排熱回収ボイラにより生成された蒸気と蒸気タービンによる排ガ

スエネルギーの回収効率が重要になる。ガスタービン単体の効率が低い場合でも排ガスエネルギー回収により高い総合効率が期待できるため、各社とも性能改善を続けている。現在、GE社ではコンバインドサイクルのさらなる効率向上を目的として、ガスタービン全体圧力比の最適化や航空エンジンの最新技術を導入したLM6000 PF+の開発を進めており、2016年にリリースが予定されている。

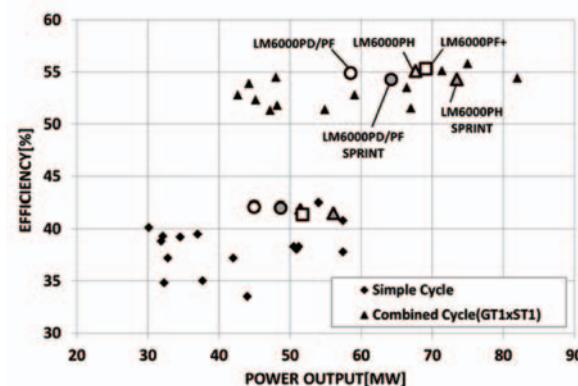


Fig.12 Efficiency of recent power plant (LHV basis)⁽²⁾

2.9 プラントシステム構成

(1)発電パッケージ

当社はLM6000発電パッケージメーカーとしてGE社の認定を受け、設計、製造からメンテナンスまでを行っている。図13にパッケージの概観を示す。

ガスタービン、減速機、始動油圧装置、潤滑油システムなどの関連機器をパッケージ内に収納しており、メンテナンス性を考慮して配置を最適化し、かつコンパクトにまとめている。パッケージは当社工場にて組立が行われ、高い品質管理のもとで製造管理される。

パッケージ周辺に補機類を設置しないため、設置スペースが小さく、現地の据付工事も簡素化されるため、短期間での設置が可能である。

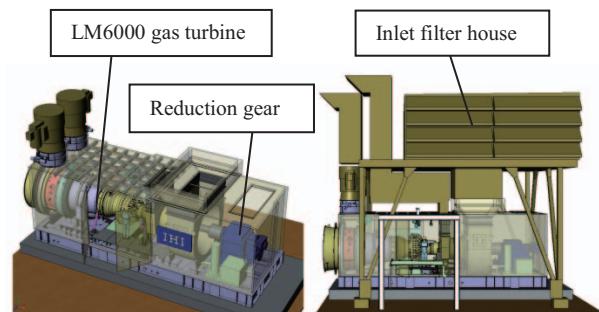


Fig.13 IHI Package for LM6000

(2)制御装置

当社では1980年代から制御装置を自社開発し、GE社の認定を受けている。これにより制御装置、制御ロジックはブラックボックスにはならず、ユーザーのニーズに

合わせた作りこみが可能であり、他パッケージメーカーには無い特色を持つ。最新の制御装置CSI-III+ (Control System of IHI) は、自動切替2重系による高い信頼性に加え、ガスタービンに加えてプラント全体の制御を可能としている。図14に当社制御装置の変遷を示す。

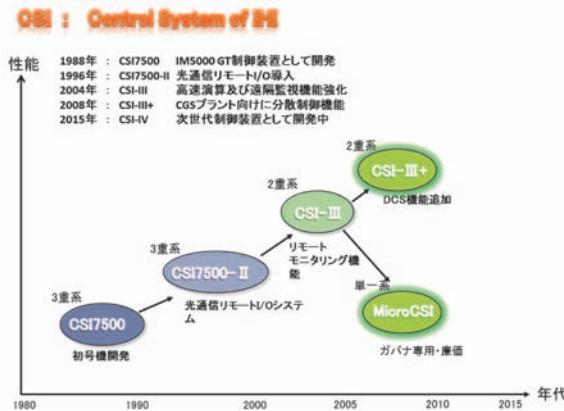


Fig.14 History of CSI (Control System of IHI)

(3) プラント配置

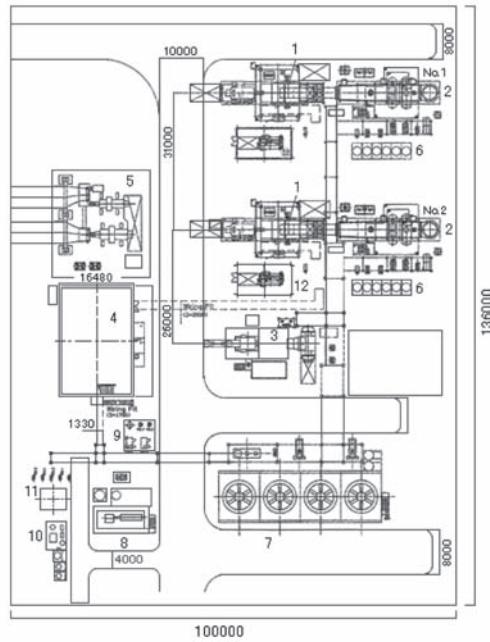
LM6000本体の発電効率が高いため、排熱回収ボイラおよび蒸気タービンは相対的に小型のもので済み、コンバインドサイクル全体の設備総重量と設置面積が小さくできる特長を有している。図15に当社の標準的なLM6000コンバインドサイクル発電プラントの配置図を示す。

(4) 吸気冷却、吸気加熱装置

ガスタービンの最大出力は吸気温度の上昇により落ちるため、大気温度が高い地域や季節では吸気冷却装置を用いてガスタービンの吸気を冷却して出力を増やす手法が用いられる。当社では冷水による吸気冷却装置の他、気化式の吸気冷却装置（エバポレータ）をユーザーの要求に合わせて設置している。また、LM6000では吸気冷却に加え、2.5項で紹介したSPRINTシステムによる出力増強も選択可能である。

一方、連続運転の中には、昼間の電力需要時（オンピーク）に最大電力量を供給し、夜間の低需要時（オフピーク）には出力を落とした運用パターンの要求がある。オフピーク運転での発電効率向上の手段として、吸気加熱装置を適用するケースが増えてきた。部分負荷の回転では圧縮機、タービン効率が低下するのに加え、DLE燃焼は、抽気量を増やして燃焼用空気量を調整するため効率低下が起きるが、吸気加熱により、オフピーク時に要求される電力量に対して、ガスタービンの最大負荷で電力供給が可能となり、効率改善に寄与している。図11に吸気加熱時の効率改善量を示す。

吸気冷却、吸気加熱は冷水、温水と伝熱コイルを用いた方式が一般的であるが、当社はボイラからの蒸気で加熱する方式を開発し、商用運転を開始した。蒸気を用い



Symbol	Equipment Name
1	Gas turbine generator
2	Heat recovery steam generator
3	Steam turbine generator
4	Electrical room/Control room
5	Transformer yard
6	Gas turbine cooling tower
7	Cooling tower
8	Fuel gas compressor
9	Air compressor
10	Water treatment unit and clean water supply unit
11	Deionized water tank
12	Chiller for inlet air cooling

Fig.15 Layout diagram of LM6000 combined cycle

た場合、温水に比べて急速に吸気温度を上昇することができる、オンピーク運転からオフピーク運転に速やかに移行することができる。

2.10 発電プラントのモニタリング

当社では、約20年前から、納入したガスタービン発電プラントの運転データを、遠隔監視システム（あいモニタ）を通して当社のサーバーに集約して運転状態を監視している。図16に概要を示す。トリップ発生時に、発生事象の把握から対策決定までを迅速に行うことができる。

さらに当社では予防保全システム⁽³⁾を開発し、ガスタービン各要素性能の変化や、各センサーの計測値の変

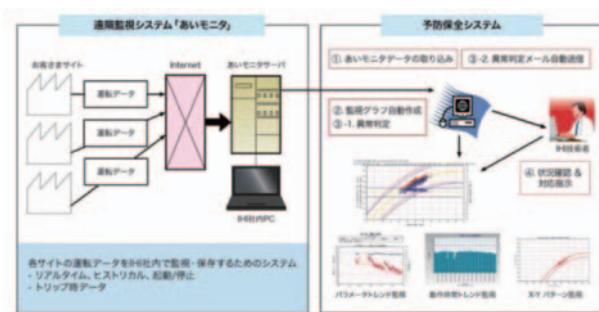


Fig.16 Process of abnormality Detection System

Fig.17 IHI Global Monitoring and Technical Service Center⁽⁴⁾

化から、トリップにつながる故障の予兆を捉えて予防保全的なメンテナンスを行っており、プラント稼働率の向上に寄与している。さらに、当社の豊洲本社にお客様運用支援センター⁽³⁾を設置して監視および支援体制を強化した。図17に写真を示す。

3. 納入実績

3.1 当社納入実績

当社はLM6000シリーズを用いたプラントを国内外に多数納めている。これまでにエンジン台数で67台の納入実績があり、プラント最適化のノウハウを蓄積してきた。図18に各国に納めたエンジン台数を示す。

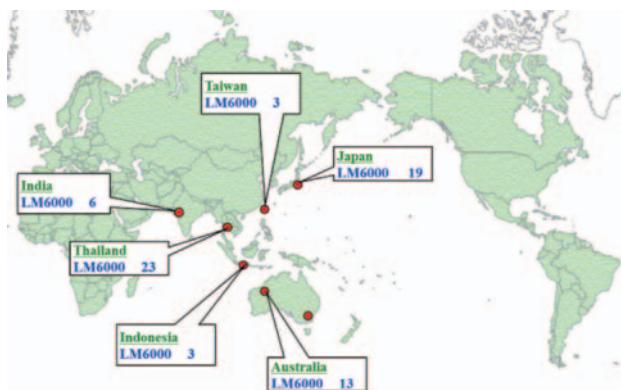


Fig.18 LM6000 power plants delivered by IHI

蓄積したノウハウから、ユーザーのニーズに合わせたプラント機器構成を提案しており、現在、国内外で6案件（エンジン台数で12台）の発電プラント建設が進行中である。

3.2 プラント事例の紹介

当社が納めた発電プラントの最新事例の中から（株）新中袖発電所のコンバインドサイクル発電設備を紹介する。

(1)（株）新中袖発電所コンバインドサイクル発電設備

千葉県袖ヶ浦市に、特定規模電気事業者（新電力、PPS）向けとして建設した出力100MWクラスのコンバインドサイクル発電プラントである。2014年9月より商用運転を開始した。本プラントは、2007年に稼働を開始

した（株）中袖クリーンパワー殿コンバインドサイクル発電プラントに隣接し、同クラスの発電プラントとして建設した。これまでの運用やメンテナンスで得られたノウハウを設計に反映した最新鋭のプラントである。

冷水による吸気冷却設備を用いて年間を通して約100MWの電力が供給可能である。主な機器を表3に示し、ガスタービンパッケージ、ボイラの外観写真を図19に示す。

Table 3 Specifications of combined cycle plant

Power Output	Approximately 100MW
Gas Turbine	LM6000PD (DLE) ×2 units
Fuel Type	City Gas
Heat recovery steam generator	2 units
Steam turbine	24MW × 1 unit
Steam condenser	Air cooled type × 1 unit
Chiller for inlet air cooling	Refrigerating machine × 2 units



Fig.19 LM6000 package for Shin-Nakasode power plant

4. おわりに

本稿ではGE社製LM6000ガスタービンおよび当社の発電プラントの特長を紹介した。今後も、ユーザーのニーズに答えるべく、LM6000のさらなる改良に加え、プラント機器構成の最適化、信頼性向上、メンテナンスのスピードアップ、コストダウンに継続的に取り組んでいく。

5. 参考文献

- 田中 敦士, “LM6000発電プラントの技術仕様および運用実績の紹介”, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 34, No. 1 (2006), p. 14-18.
- “Gas Turbine World 2014-15 Handbook”, 2014-15 GTW Combined Cycle Specs, p.84-93.
- 柴沼 徹, 水澤 実, 村山 達也, 山口 由裕, 井出 智広, 島田紀一, “発電量ガスタービンプラント信頼性向上の取り組み”, 日本ガスタービン学会誌, Vol.42, No. 2 (2014), p.25-30.
- IHI Webサイト,
<http://www.ihi.co.jp/powersystems/business/index.html> (参照 2015-11-10)

特集：産業向け最新鋭自家発電用ガスタービン

三井ソーラーガスタービンMSC65及びMSC130の紹介

西江 俊介^{*1}
NISHIE Shunsuke

キーワード：ガスタービン、コージェネレーション、コンバインド、高効率

Gas Turbine, Cogeneration, Combined, High Efficiency

1. まえがき

三井造船は、1949年にガスタービンの自社研究開発に着手し、これまでに発電出力1MW級のSB5から23MW級のSB120まで、幅広い出力レンジの産業用SBシリーズガスタービンを開発し、多数納入している。その後、クリーン燃料を用いた高効率のコージェネレーション用ガスタービンのラインアップを強化すべく、1996年に中型産業用ガスタービンの世界トップメーカーである米国ソーラータービンズ社（以下、Solar社）とパッケージング契約を締結し、三井・ソーラーガスタービンコージェネレーションシステム（MSC：Mitsui Solar Cogeneration）をシリーズとしてラインアップに追加した。図1に当社が取り扱うガスタービンの一覧を示す。本稿では、MSCシリーズの中で、出力が最も大きい14MWクラスのMSC130とその実施例を、また総合効率がクラス最高レベルの85%を達成する6MWクラスのMSC65を紹介する。

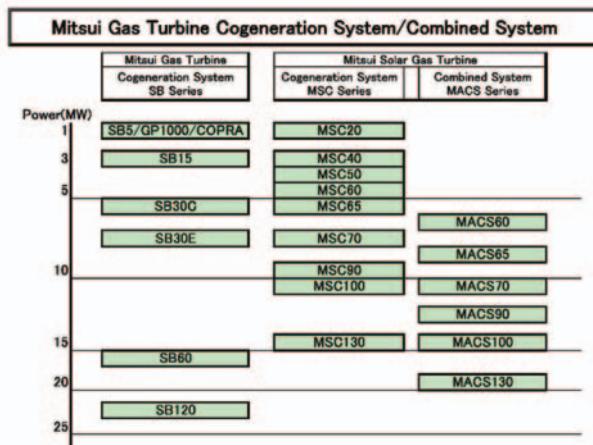


Fig. 1 Mitsui Gas Turbine Series

2. ガスタービン

MSCシリーズは、ガスタービン本体をSolar社から輸入し、その他の機器は全て当社にて設計・製作・組立を行い、発電パッケージとして販売している。表1にMSC130とMSC65の性能仕様を示す。また、図2にMSCシリーズの標準システムフローを示す。

Table 1 Specification of MSC65 and MSC130

システム	MSC65	MSC130
ガスタービン	Taurus65	Titan130
燃料	都市ガス	希薄予混合燃焼
Nox対策		
発電端出力(kW)	6,090	14,520
プロセス送気蒸気量(kg/h)	14,290	29,130
発電端効率(%)	32.2	34.5
蒸気回収率(%)	52.8	48.4
総合効率(%)	85.0	82.9

(注記)吸気温度15°C、プロセス送気蒸気0.785MPaG/175°C

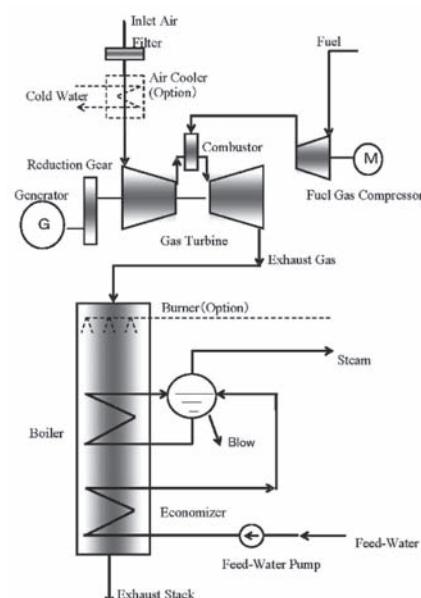


Fig. 2 MSC System Flow

原稿受付 2015年11月2日

*1 三井造船(株) 玉野事業所 機械・システム事業本部 機械工場
産業機械設計部 回転機グループ ガスタービン
〒706-8651 玉野市玉3-1-1

MSC130にはSolar社のTitan130ガスタービンを、
MSC65にはTaurus65ガスタービンを搭載している。
Titan130とTaurus65のガスタービン仕様を表2に示す。

Table 2 Specification of Taurus65 and Titan130

ガスタービン	Taurus65	Titan130
型式	単純開放1軸型	
圧縮機	軸流13段 (可変静翼機構付)	軸流14段 (可変静翼機構付)
圧力比	15:1	16:1
タービン	軸流3段	
タービン回転数 (50/60Hz)	14,944/14,951rpm	11,197/11,170rpm
燃焼器型式	アニュラー型	
噴射弁本数	10	14
燃焼方式	希薄予混合燃焼 (SoLoNOx™)	
起動方式	ACモータ	
NOx排出濃度	20ppm(残存酸素濃度=16%換算)	

2.1 Titan130

Titan130は機械駆動用の2軸型と発電機駆動用の1軸型の2つのタイプがある。当社では1軸型ガスタービンを発電パッケージとして販売している。図3にTitan130の鳥瞰図を示す。Titan130は多数の実績を有する7MWクラスのTaurus70ガスタービンのスケールアップにより開発されたガスタービンである。実績を積んだガスタービンをベースに、高温部品の温度レベル、応力レベル、寿命などを維持したままスケールアップを行い、信頼性を確保している。また、1300台以上の実績がある10MWクラスのMarsガスタービンと部品の共通化を図っている。販売実績は発電機駆動用の1軸型Titan130だけでも2014年12月末の時点で米国内外に550台販売されており、2軸型を含めると820台に達する。

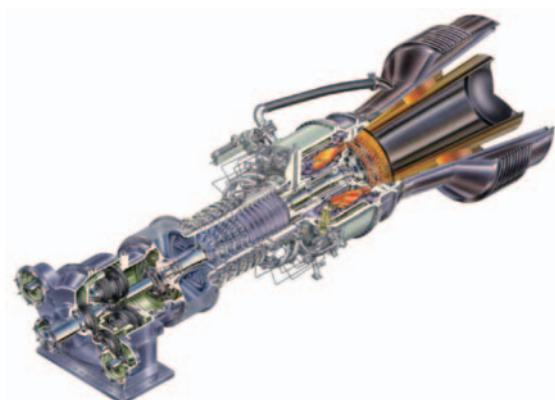


Fig. 3 Titan130 Gas Turbine

圧縮機は軸流14段構成で圧力比は16:1であり、前段側には可変静翼機構が備えられている。圧縮機の2段から14段にMarsと同一の翼列を採用しており、1段にTaurus70のスケールアップされた翼列を追加している。図4にSolar社の圧縮機の開発履歴を示す⁽¹⁾。このように既存機種のスケールアップと最適設計によって、開発時のリスクを最小限としている。

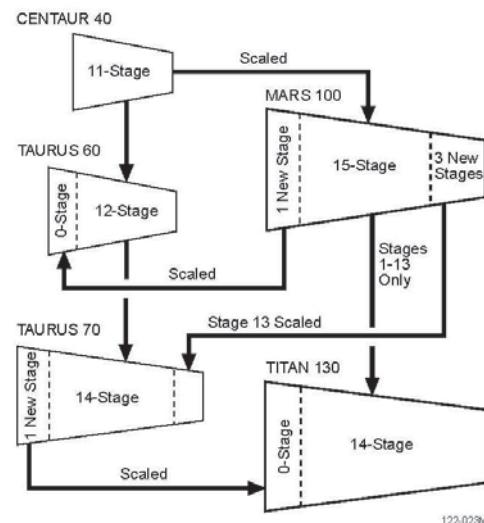


Fig. 4 Titan 130 Air Compressor Evolution

燃焼方式はSolar社独自のドライ型希薄予混合燃焼方式であるSoLoNOxシステムを採用している。図5に従来の拡散燃焼システムとSoLoNOxシステムの概念を示す。燃焼器の型式はアニュラー型であり、燃料噴射弁を14本配置している。燃焼器は初期設計の段階からオンサイトでのメンテナンス性を考慮して設計されており、燃料噴射弁を点検、清掃のために容易に取り外すことができる。また、燃料噴射弁を取り外したポートからはボアスコープにより燃焼器の内部とタービン1段静翼の点検も行うことができる。

タービンはTaurus70をスケールアップしており、軸流3段構成となっている。高温側には耐熱材料を用いており、1段動静翼と2段静翼には冷却空気による圧縮機吐出空気を使用する空冷翼を採用している。

Titan130は高効率・高出力化を図り、初期の設計に比べ燃焼ガス温度を上昇させている。そのため、タービンの冷却構造の改良、材質の改良が行われている。

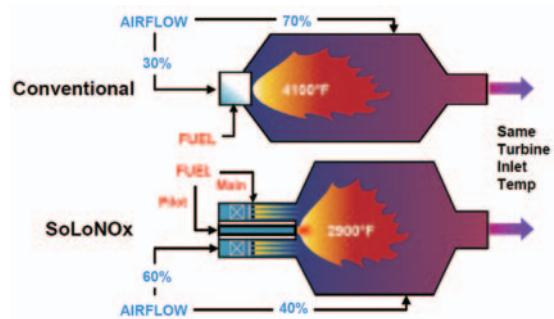


Fig. 5 Conventional System and SoLoNOx System

2.2 Taurus65

Solar社のガスタービン開発の流れは主に機械駆動用の2軸型ガスタービンを開発したのちに、その技術を1軸型に展開しているが、Taurus65には2軸型がなく、1軸型のみ開発が行われた。これはCGS (Cogeneration

System) での活用を主目的として開発されたためである。そのため、Taurus65を搭載したMSC65はクラス最高レベルの総合効率を達成している。図6にMSC65の出力及び総合効率と吸気温度の関係を示す。Taurus65の基本構造及び制御方式はその他の1軸型ガスタービンと大差はないものの、多数の実績を有する4MWクラスのCentaur50ガスタービンと5MWクラスのTaurus60ガスタービンをベースとして高い信頼性を維持し、Taurus70とTitan130に採用されている最新の各要素技術を適用した高効率のガスタービンである。図7にTaurus65の鳥瞰図を示す。

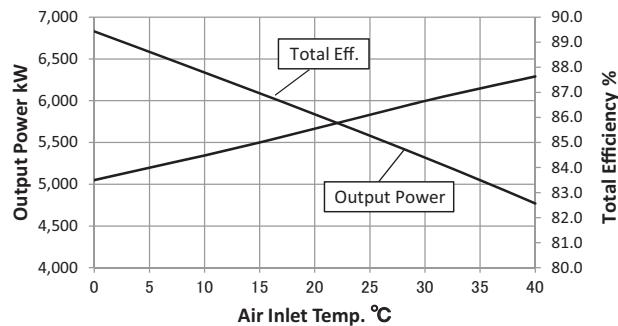


Fig. 6 MSC65 Performance Characteristic

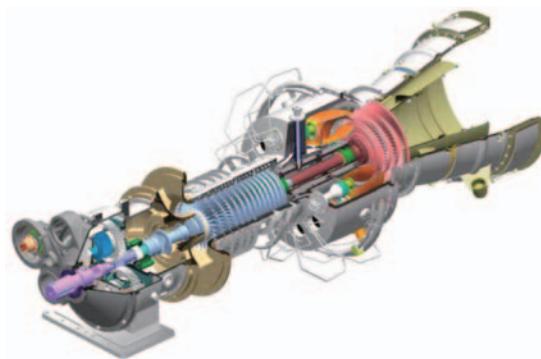


Fig. 7 Taurus 65 Gas Turbine

圧縮機は軸流13段構成で圧力比は15:1である。圧縮機の中間段にはCentaur50の翼列を採用し、その前後に多段CFD解析により最適化した新たな翼列を追加している。前段側には他機種と同様に可変静翼機構が備えられている。

燃焼方式はSoLoNOxシステムを採用している。燃焼器の型式はアニュラー型であり、燃料噴射弁を10本配置している。Taurus65はSolar社の単純1軸型ガスタービンの中で最高の燃焼温度になっている。よって、燃焼器はTBC (Thermal Barrier Coating) によってライナー表面を保護すると共に、図8に示すABC (Augmented Backside Cooled) ライナーを採用し、冷却性能を改善している。燃焼ガスの高温化と冷却性能の改善によりCGSに適した高い排熱回収が可能となっている。また、これらは開発段階からフルスケールのテスト装置によっ

て評価が行われ、信頼性が確認されている。

タービンの基本構造はTaurus70をベースとしており、軸流3段構成となっている。圧縮機と同様にタービンも多段CFD解析を行い、最適化した翼列を採用している。また、燃焼温度が高いことから、当時のSolar社で最も燃焼温度が高かった1軸型再生式のMercury50ガスタービンの経験によって冷却構造を改善しており、1段動静翼と2段静翼に空冷翼を採用している。

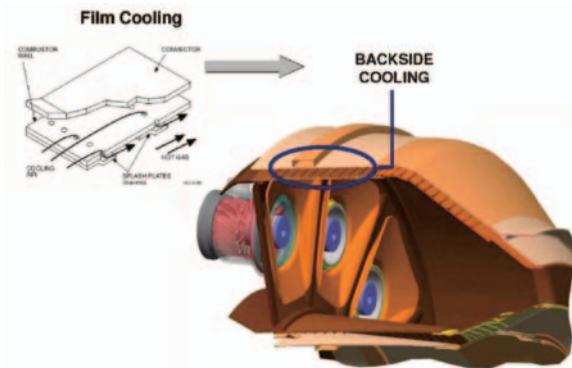


Fig. 8 ABC Liner

3. MSC発電パッケージ

MSCシリーズの主な特徴について以下に紹介する。図9にMSC130のCGSプラント全体図を示す。

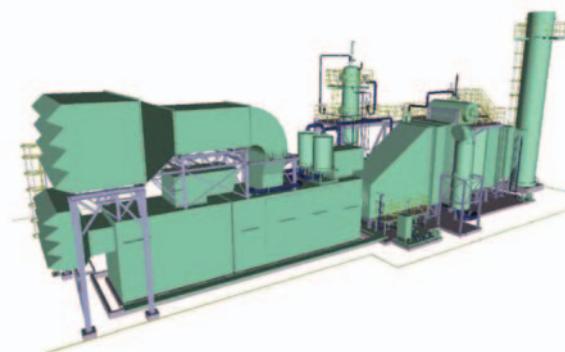


Fig. 9 MSC130 CGS Plant Outline Drawing

3.1 構成

鋼製台板上にガスタービン、減速機、発電機、燃料ガスユニット、潤滑油ユニットの全てが配置され、エンクロージャに納められる。MSC130は輸送の関係により、ガスタービン台板と発電機台板に分かれており、現地にて結合される。エンクロージャの防音性能は機側1mにおいて85dB (A) を標準仕様としているが、設置場所に合わせて更なる騒音低減が可能である。ガスタービンの性能低下を防止するため吸気系は3段高性能フィルタを標準仕様としており、使用するフィルタは設置環境に合わせて最適なフィルタを選定している。また、吸気冷却器を設置することで夏場の出力低下に対応して出力の確保が可能である。これらの他に燃料系統、潤滑油

系統や排ガスボイラを含む吸排気系統は全て当社にて設計・製作を行い、操作性・メンテナンス性を考慮しつつコンパクト化を狙った設計にすると共に標準化を図ることで高い信頼性を実現している。図10にエンクロージャを取り外した状態のMSC130の外観を示す。



Fig. 10 MSC130 Package without Enclosure

3.2 燃料システム

MSC65は現時点ではガス燃料のみ使用可能であるが、MSC130を含めその他の機種は燃料噴射弁を選択することにより、ガス燃料と液体燃料のどちらでも使用することができる。また、デュアルフェュエルインジェクタを使用することにより、ガス燃料と液体燃料を運転中に切り替えることも可能である。標準NOx排出量は20ppm (O₂濃度16%換算値、以下同じ) としているが、オプションとして脱硝装置無しでも12.5ppm以下を達成することができる。

MSCシリーズの実績の多くは常用発電設備としてACモータ起動によるガス燃焼運転であるが、非常用発電設備としてエアモータ起動による灯油燃焼運転も可能である。図11に当社玉野事業所内のエアモータ起動による試運転設備を示す。当社にて製作した空気槽に溜められた圧縮空気によってエアモータを駆動し、所内にある灯油の貯留タンクから燃料を供給し、運転を行うことができる。

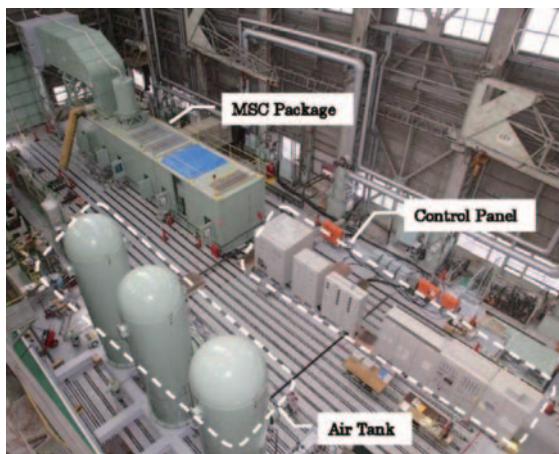


Fig. 11 Facility Test

3.3 制御システム

制御システムはSolar社の標準制御システムに加え、ガスタービンの自社開発で培ったノウハウを適用した当社独自の制御システムを採用している。これにより、低NOx燃焼（希薄予混合燃焼）の短所であるガスタービンの負荷変動時の失火予防はもちろんのことながら、自立運転時でも低NOx燃焼を安定して維持することができる。また、系統連系や自立運転などユーザのニーズに合わせた運転モードに設定できる。

MSCシリーズはガスタービン停止後、すぐに再起動を行うホットスタートも可能であり、DSS (Daily Start Stop) やWSS (Weekly Start Stop) の運転も対応可能である。

3.4 監視装置

当社がTitan130のパッケージングを行うに当たり、(株)OGCTSと当社にて共同で信頼性向上プロジェクトを発足させた。本プロジェクトにより主要機器と計器の調査を行い、冗長化を積極的に採用することによってMSC130の高い信頼性が実現されている。ここで得られた経験はMSC130だけでなく、全てのMSCシリーズに展開されている。

運転制御室に設置されるCGS設備の制御パネルには、液晶タッチパネル方式を採用しており、日常の運転状態の監視を容易にしている。また、遠隔監視システムも標準で装備しており、インターネットや携帯通信網などを利用して運転データや異常モードを取得し、それらをもとに本社（東京）および玉野事業所（岡山県玉野市）に開設しているカスタマーサポートセンターで性能診断や傾向分析を行い、診断結果を保守履歴とともに電子カルテとして保管するとともに、ユーザが日常の運転保守管理を効率よく行えるように、消耗品交換時期の連絡や予備品購入の推奨などタイムリーなメンテナンスサポートを提供している⁽²⁾。

3.5 メンテナンス

ガスタービン本体については、全ての機種で30,000時間毎にエンジン交換方式によるオーバーホールサービスを行い、ガスタービンのオーバーホール時にあらかじめ用意された新品同様に整備されたガスタービンと交換を行う。これにより、従来長時間必要であった設備の停止時間を大幅に短縮することができる。図12にMSC130のエンジン交換の様子を示す。



Fig. 12 MSC130 Engine Exchange

3.6 燃料ガス圧縮機ユニット

多くのサイトでは燃料ガスは0.5MPaG程度の中圧ガスとしてバッテリーリミットに供給され、燃料ガス圧縮機により昇圧し、ガスタービンに高圧ガスを供給している。当社では英国ハウデンコンプレッサー社からスクリュー式のガス圧縮機を輸入しており、自社にてパッケージングを行い、燃料ガス圧縮機ユニットとして販売している。また、制御システムも当社独自のシステムを採用することによって、ガスタービンのあらゆる運転に対応した制御を実現可能としている。

3.7 コンバインド型コージェネレーションシステム

当社ではシンプルコージェネレーションシステムの他に蒸気タービンを組み合わせた熱電可変型のコンバインド型コージェネレーションシステムとしてMACS (Mitsui Advanced Cogeneration System) シリーズもラインアップしている。本システムは、蒸気タービンメーカーでもある当社の回転機械技術ならびに熱回収システム技術を融合させたコージェネレーションシステムである。表3にMACS130の標準性能を示す。また、図13にMACSパッケージの機器配置を示す。

Table 3 MACS130 Performance Specification

システム	MACS130	
ガスタービン	Titan130	
燃料	都市ガス	
Nox対策	SoLoNOx	
運転モード	電力最大	プロセス送気最大
発電端出力(kW)	19,020	14,520
プロセス送気蒸気量(kg/h)	0	26,330
発電端効率(%)	45.1	34.5
蒸気回収率(%)	0	44.2
総合効率(%)	45.1	78.7

(注記)吸気温度15°C、排ガスボイラ発生蒸気1.863MPaG/348°C
プロセス送気時に減温注水にて0.785MPaG/185°C

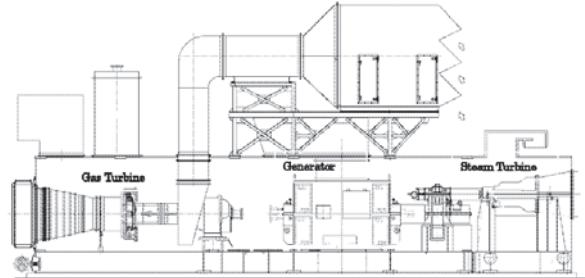


Fig. 13 MACS Package

4. MSC130の実施例紹介

当社が国内に納入したMSC130のうち2基が奈良県の三和澱粉工業(株)本社工場に納入されている。以下に本サイトの実施例を紹介する。図14にサイトの据付状態を示す。



Fig. 14 MACS130 Installation

4.1 設備導入経緯

三和澱粉工業(株)はコーンスター(とうもろこし)を原料に、甘味料・糖化製品・工業用でんぶんなど、各種でんぶん加工品を製造している。本サイトでは既に8MW級のBTG (Boiler Turbine Generator)と5MW級のCGSを保有しており、工場全体の電力の約8割を自家発電で賄っていた。その後、老朽化したBTGを新たなCGSへ変更し、省エネルギー・CO₂の削減を目的として、2006年に2系列のMSC130を導入した。また、1系列の復水蒸気タービンも有している。設備導入後は工場に必要な電力が全量賄えるようになり、更にそれを上回る電力が作れることから、余剰分を電力会社に売電している。本サイトは奈良県でも最大規模の自家発電能力を有している。

4.2 CGS設備の構成

本サイトでは天井はないものの、騒音規制を順守するために四方が壁または防音壁に囲まれている準屋内に設置されている。また、敷地面積が狭かったため4階建ての立体配置を採用している。主要機器としては1階にガ

スタービンパッケージと燃料ガス圧縮機ユニット、2階に吸気フィルタ室、3階に排ガスボイラ、4階に冷却塔が設置されている。図15にCGS設備の立面図を示す。また、図16にヒートバランスを示す。

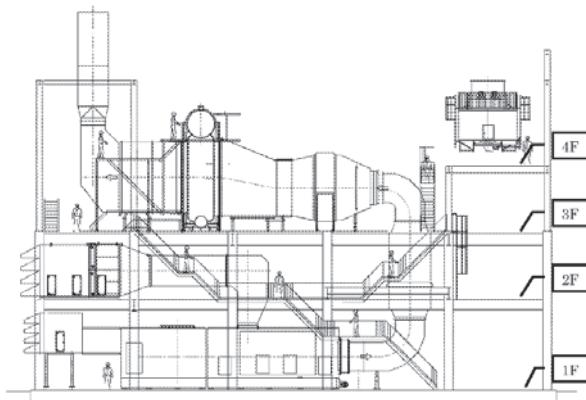


Fig. 15 Elevation of MSC130 CGS Plant

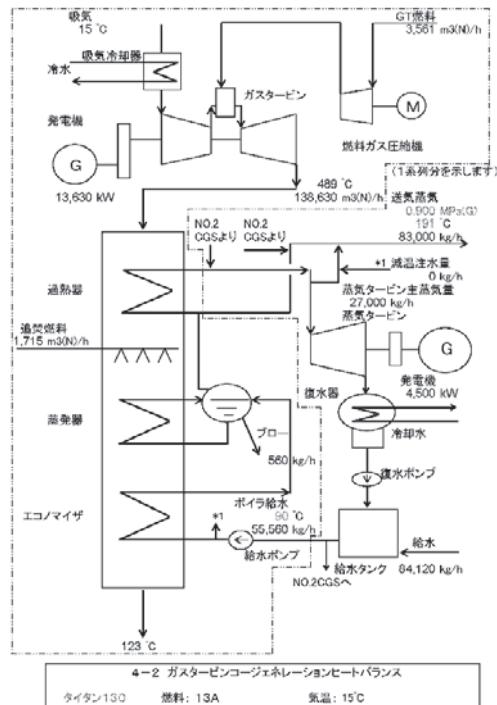


Fig. 16 Heat Balance of MSC130

4.3 排ガスボイラ

排ガスボイラは自然循環横型水管式のボイラを採用している。ダクトバーナーを使用することにより、1系列当たり発生蒸気量55t/h級（1.21MPaG/350°C:13.5t/h及び0.9MPaG/飽和:41.5t/h）の能力を有している。

4.4 燃料ガス圧縮機ユニット

燃料ガス圧縮機ユニットは当社標準ユニットを採用しており、スクリュー式のガス圧縮機によって燃料ガスを吸込圧力0.49MPaGから吐出圧力2.75MPaGまで昇圧し、ガスタービンユニットに高圧ガスを供給している。図17に燃料ガス圧縮機ユニットの外観写真を示す。



Fig. 17 Fuel Gas Compressor Unit

4.5 運転状況

本設備は2006年から営業運転を開始しており、これまでにガスタービンに関連するトラブルによって2回の緊急停止が発生した。いずれも電気計装品のトラブルであったが高信頼性のものに変更し、2010年からは緊急停止を伴うトラブルの発生は無く、現在も順調に稼働している。

5. おわりに

当社の一番の強みはガスタービンの自社開発によって得たエンジニアリング技術であり、MSCシリーズはこのエンジニアリング技術とSolar社のガスタービンを融合させ高効率・高信頼性を実現した発電設備である。今後もお客様のニーズに合わせたシステムを提案していくと共に、環境に配慮したガスタービン発電設備を提供していくことで社会に貢献していきたい。

6. 謝辞

実施例紹介に関し、三和澱粉工業株式会社様と大阪ガス株式会社様にご協力を頂いた。ここに厚くお礼を申し上げます。

7. 引用文献

- (1) G. Rocha and C. J. Etheridge, "EVOLUTION OF THE SOLAR TURBINES TITAN 130 INDUSTRIAL GAS TURBINE", ASME 98-GT-590.
- (2) 浅野光晴, 有田和弘, 桑田和正, "ガスタービンコージェネレーション発電設備の遠隔監視システム", 日本ガスタービン学会誌, Vol. 42, No. 2 (2014), pp. 93-98.

特集：産業向け最新鋭自家発電用ガスタービン

50MW級ガスタービンSGT-800の最新開発動向

渡邊 孝之^{*1}
WATANABE Takayuki藤井 麻喜^{*1}
FUJII Maki大築 康彦^{*1}
OTSUKI Yasuhiko

キーワード：ガスタービン、性能向上、出力向上、実機検証、冷却空気量

Gas Turbine, Power Improvement, Efficiency Improvement, Verification, Cooling air flow rate

1. はじめに

現在、シーメンスでは図1にある通り、大型発電事業用から中小型の産業用、航空機転用型に至るまで、出力として4MWから400MWまで、広範囲にガスタービンを取り揃えており、様々なお客様にご利用頂いている⁽¹⁾。産業用ガスタービンとしては、4~60MWクラスの範囲に、12もの機種を揃えており、お客様の細かい出力ニーズに対応できるようになっている。このうち3機種は航空機転用型を2014年にロールス・ロイス社の産業用ガスタービン部門から買収したもので、ピーク運用及びシンプルサイクル運用を希望されているお客様へさらに適切な対応が可能となった。

本稿では、弊社の産業用ガスタービンラインアップとして主力商品であり最大出力となるSGT-800について、その性能・特徴をご紹介するとともに、近年の実績、開発状況について説明させて頂く。特に現在、SGT-800は47.5MW/50.5MW/53.0MWと3つのバージョンを販売しており、このバージョンアップに施された技術開発に関して説明するものである。

2. SGT-800の特徴

2.1 技術的特徴

図2に、SGT-800の外観を示す。ティルティングパッド軸受を使用した一軸式のロータ構造である。定格回転数は6608rpmであり、ギアボックスにて発電機と結合することで、50Hz/60Hz両周波数に対応している。圧縮機は溶接構造ロータにて3段落可変静翼を含めた15段にて圧力比 約21を作り出している。圧縮機ケーシングは半割れ構造になっており、ロータを取り出すことなくセグメント化された静翼及び動翼交換が可能である。燃焼器はアニュラー式を採用し30個の低NOx燃焼器が周方向に配置されている。ガス/液体のデュアル燃料にて乾式低NOx燃焼が可能なDLE燃焼器である。また、必要燃料供給圧も2.7~3.0MPaと非常に低い圧力で対応可能な燃料供給システムを有している。タービンは3段であり、1、2段にはTBCを施し空冷式であり、3段は無冷却となっており、ディスク積層タイプのボルト締結ロータ構造となっている。ケーシングは一体構造となっており、分解の際は、排気方向から軸方向に抜き出す方式となつ

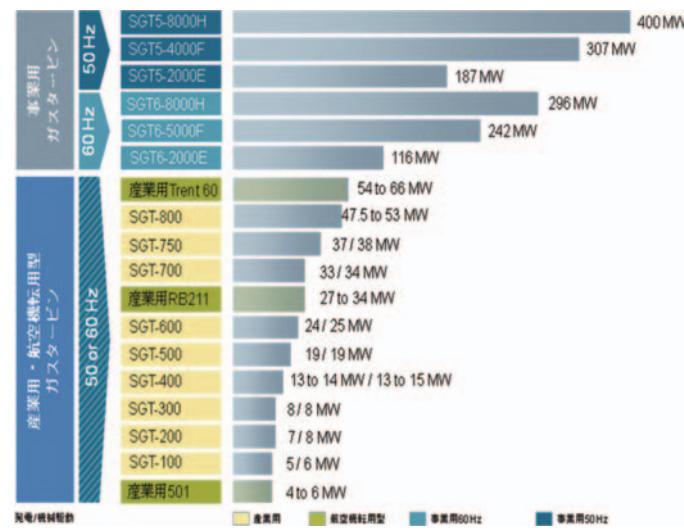


Fig. 1 Siemens gas turbine line-ups

原稿受付 2015年11月10日

*1 シーメンス(株) パワー & ガス事業本部
〒141-8641 品川区大崎 1-11-1



Fig. 2 SGT-800 gas turbine

ている。

起動性、負荷応答性についても様々なオプションを有しており、一例として、図3に起動カーブを示すが、着火（図にて2と指示）から定格負荷（図にて5と指示）まで10分で到達可能である。（FSNL(3)まで3.8分、FSNL(3)から定格負荷(5)まで5.8分）また、起動から定格負荷まで全ての燃料系統を使用しており、系統間の切替が無くスムースに急激な負荷変化に対応することが可能である。

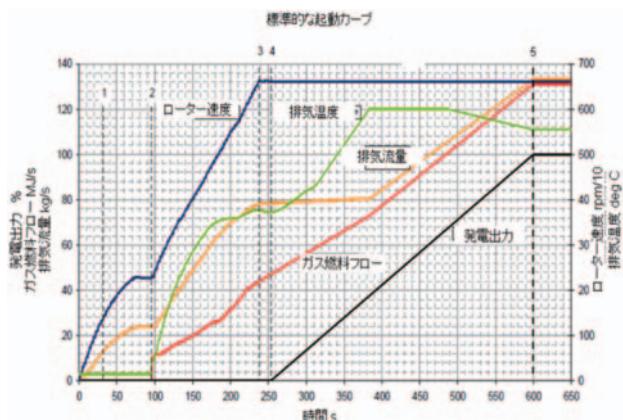


Fig. 3 Simple cycle SGT-800 start-up curve for a 10 minutes start

2.2 開発の変遷とこれまでの実績

SGT-800は1995年から開発をスタートし、1998年に当時はGTX-100の名称で発表された⁽³⁾。この時の定格出力は43.0MW、ここから約20年の歳月を経て、段階的に53.0MWにまで出力向上が図られている。図4にこれまでの開発経緯を示すが、約3～4年ごとにバージョンアップを図り、競争力向上を図っている。これまで、受注台数270台、累計等価運転時間は330万時間にまで実績を積み重ねており、稼働率/信頼性とともに高い値を維持し、安心してお使い頂ける機種に仕上がっている。運用方法としてはコンバインドサイクルが主流であるが、シンプルサイクルやコジェネレーション運用もそれぞれ數十台のオーダーで実績があり、顧客の目的により様々な形で使用されている。

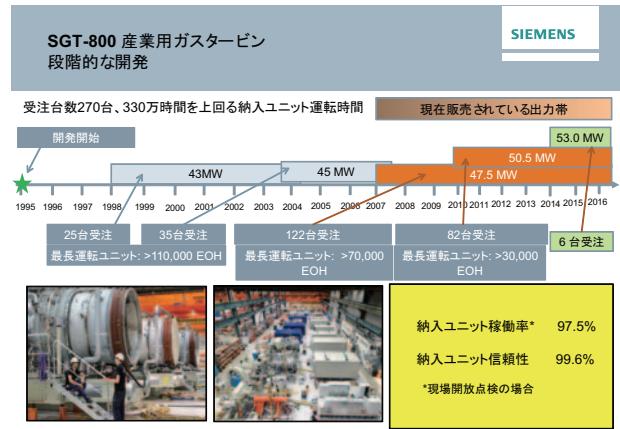


Fig. 4 SGT-800 Evolutionary Development

53.0MWバージョンは2015年にリリースしたばかりであり、50.5MWバージョンにおける最長運転ユニットは純運転時間で30,000時間を超えており、図5に20,000等価運転時間における高温部品点検結果を示すが、異常な高温酸化、TBCの剥離等も見られず、非常に良好な状態で運転できていることを確認している。



Fig. 5 Condition at 20,000EOH operation

2.3 GT性能

前述の通り継続的な開発を行っているSGT-800であるが、現在はこのうちの47.5MW/50.5MW/53.0MWの3つバージョンを販売している。これらは2.1項に示した技術的特徴は維持しつつ、タービン入口温度を上げることなく、空力性能、冷却性能を向上させることでバージョンアップを図ってきた。

表1に、現在のバージョンの性能要項を示すが、吸込み空気流量を増やしながら出力向上を図り、タービン入口温度一定のままで、圧力比を上げながらも排ガス温度も維持していることが見て取れる。これにより、GT単体として発電端効率にて39.0%、2 on 1のコンバインドで出力150MW、送電端効率56%超と、この出力クラスで最高レベルを作り出している。また、このバージョンアップは、50.5MWバージョンに適用可能であり、

Table 1 Technical Specification of current version SGT-800^②

	47.5 MW Version	50.5 MW Version	53.0 MW Version
Simple Cycle			
Power output	47.5 MW(e)	50.5 MW(e)	53.0 MW(e)
Frequency	50/60 Hz	50/60 Hz	50/60 Hz
Electrical efficiency	37.7 %	38.3 %	39.0 %
Heat rate	9,547 kJ/kWh	9,389 kJ/kWh	9,231 kJ/kWh
Turbine speed	6,608 rpm	6,608 rpm	6,608 rpm
Compressor pressure ratio	20.1:1	21.0:1	21.4:1
Exhaust gas flow	132.8 kg/s	134.2 kg/s	137.2 kg/s
Exhaust gas temperature	541°C	553.0°C	551°C
Combined Cycle 2on1 ^③			
Net Plant Output	135.4 MW(e)	143.6 MW(e)	149.9 MW(e)
Net Plant Efficiency	54.7 %	55.4 %	56.2 %
Net Plant Heat Rate	6,583 kJ/kWh	6,494 kJ/kWh	6,406 kJ/kWh

53.0MWバージョンへUpgradeすることが可能である。

3. SGT-800のバージョンアップ開発

SGT-800の最新開発動向として、47.5MWから50.5MWへのバージョンアップに関わる設計変更内容を紹介させて頂く。47.5MWバージョンまでの設計変更は文献4を参照されたい。図6に主要な設計変更内容を記すが、吸込み空気流量を増すことにより、圧力比を向上させているが、タービン入口温度を変えることなく、冷却空気流量を極力削減することで、コンバインド化した場合の主蒸気温度に適した排ガス温度を維持することで出力/効率向上を図るための技術施策を盛り込んでいる^⑤。(表2参照)

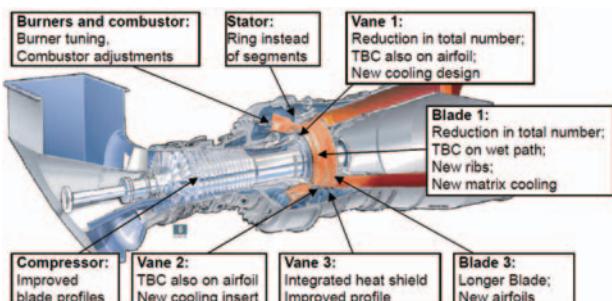


Fig. 6 Main design modification from 47.5MW to 50.5MW

Table 2 50.5MW versus 47.5MW design

Parameter	Change
Turbine inlet total temperature	0%
Turbine inlet total pressure	4.4%
Compressor inlet mass flow	1.4%
Coolant mass flow	-17.2%

3.1 圧縮機

3次元流体解析モデルを用いて最適化を行うことで既存の吸込み形状ながら吸込み流量を1.4%増加することができた。これに伴い、各段落の翼形状も最適化を行い、圧縮機効率としても0.4%程改善した。圧縮機の検証試験において、サージマージンが十分あることを確認しつつ、起動時の旋回失速についても確認し、最適なVGV開度スケジュールを設定している。

加えて、高大気温度時の出力低下を極力減らすことを念頭にHot Ambient Match Versionを開発し、大気温度が50°CまでIGVをフルオープンの状態で運転できる圧縮機を選定することも可能となっている。図7に標準仕様とHot Ambient Match Versionの比較を示すが、大気温度30°C近傍まで若干出力/効率は落ちるもの高大気温度域では急激に出力/性能向上が得られ、大気温度50°Cにて出力で26%、燃料消費率で5.8%の改善が可能である。中東などの大気温度が高く、吸気冷却に必要な水の入手が困難な地域では非常に有効な手段となっている。

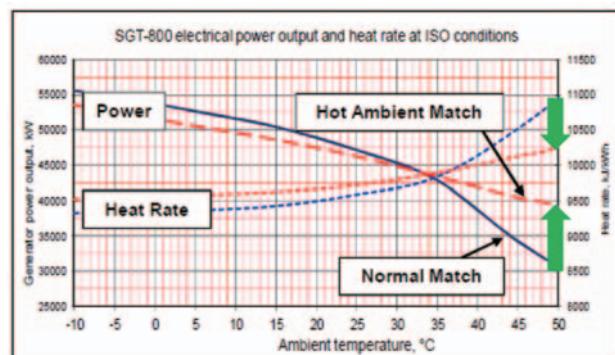


Fig. 7 Performance Comparison between normal and hot

3.2 燃焼器

図8に両バージョンの燃焼器断面図を示す。燃焼器高温部の冷却は全て対流冷却のみで対応すること可能とした。これにより、全ての空気が燃焼器バーナーを通じて燃焼に使われることとなり、冷却用空気がバイパスして燃焼器内に流れ込むことが無い。これにより、タービン入口での温度分布不均一を極力減らすことが可能となる。また、バイパスプレート追設、フロントパネルのインピングメント冷却の改善、ライナーのリブの小型化を

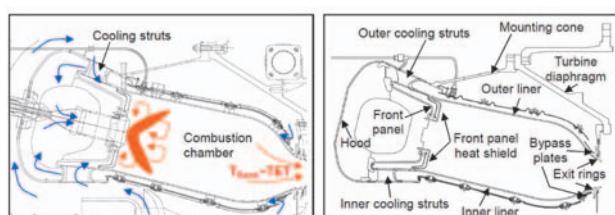
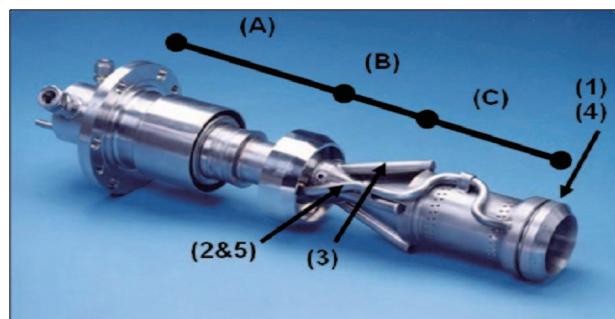


Fig. 8 Cross section of SGT-800 annular combustor: 47.5MW design including main flow paths and recirculation zones (left) and up-rated 50.5MW design including naming convention (right)

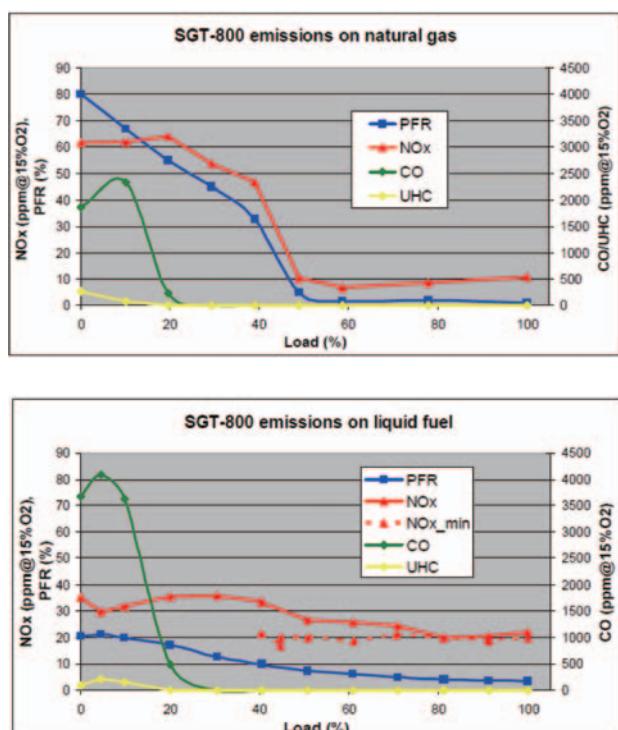
図り、燃焼器圧損を低減している。また、燃焼振動低減対策としてダンピング機構を設けて、燃焼安定性を向上させている⁽⁶⁾。

図9に燃料バーナーの外形を示す。3ガス燃料系統と2液体燃料系統の計5系統の燃料系統で乾式低NOx化可能であり、非常にシンプルな構造となっている。各系統とも起動から定格負荷まで常時使用しており、燃料系統の切替をする必要もなく、非常にスムーズに負荷変化に対応が可能である。また、100%負荷遮断でも速やかに燃料配分を動かすことで、オーバースピードは105%



(A): Fuel transfer section
 (B): Swirl-generator section
 (C): Mixing tube section
 (1): Pilot gas injection
 (2): Central gas injection
 (3): Main gas injection
 (4): Pilot liquid injection
 (5): Main liquid injection

Fig. 9 Dual Fuel Burner



(PFR : Pilot Fuel Ratio)

Fig.10 Engine test of measured emissions versus power and PFR for natural gas (upper) and liquid fuel (lower)

以下で対応可能である。

図10に各負荷における燃焼特性を示すが、ガス燃料では15%O₂換算でNOx濃度15ppmを50%負荷以上で実現している。液体燃料では組成によりバラツキはあるものの同じ負荷帯でNOx濃度25–42ppmの範囲に収まるこことを確認している。

この出力クラスは様々な燃料条件で運用されることも多く、許容できる燃料性状については、表3の通り幅広く範囲で対応している。現在もさらに広い範囲で燃焼可能な様に開発を進めており、水素に関しては32%まで燃焼可能なことを確認している⁽⁹⁾。燃料の可燃性は、条件により更に対応可能なることも多く、是非、ご連絡頂き、ご確認させて頂ければと思う。

Table 3 SGT-800 gas fuel capability

Gas Fuel Constituent	unit	Max	Remarks
CH4	mol%	100	
C2H6	mol%	100	Certain conditions, apply above 30%
C3H8	mol%	100	Certain conditions, apply above 30%
Alkenes, C4+	mol%	15	
H2 + CO	mol%	15	With condition, higher levels may be accepted
Inert gas, N2/CO2	mol%	50/40	

3.3 タービン

今回のバージョンアップにおける設計変更は、静翼構造の変更、タービン翼の空力的改善、冷却性能向上による冷却空気削減の3つに大きく集約できる。

3.3.1 静翼構造の変更

従来の設計では静翼キャリアは、数個のセグメントに分割されて一周分の静翼を保持する構造であった。セグメント構造の場合はセグメント間の冷却に配慮が必要であり、メンテナンス時の組立工数増と言ったデメリットがあった。50.5MWバージョンでは静翼キャリアの全周で一体化することとした。これにより、冷却空気の削減、真円度向上によるチップクリアランスの精度向上、部品点数削減等様々なメリットが生まれている。

3.3.2 タービン翼の空力的改善

大きな変更を施したのは、1段動静翼及び3段動翼である。まず、1段静翼であるが、翼枚数を24%削減した。この削減に伴い、高温ガスに接触している表面積が減ることで大幅な冷却空気の削減を可能とし、飲み込み流量も増えることとなる。また、翼枚数を減らしたことで、翼当たりの負荷が増加していることから、翼厚さを増し、翼形状の再設計を行っている。3次元のCFD計算を用いて、最適なフィルム冷却孔のアレンジを決定している。(図11参照)

1段動翼に関して、1段静翼と同様に翼枚数を9.2%削



Fig.11 SGT-800 guide vane 1 of the 47.5MW (left) and 50.5MW (right) designs

減した。これにより、冷却空気量を削減すると共に、翼形状についても、図12の通り、翼前縁腹側の剥離領域を減らすべく、微調整を行っている。また、動翼内部冷却構造として、後縁部にマトリクス構造^⑦を採用し冷却性能向上を図っている。

3段動翼は47.5MWバージョンの翼形状を踏襲しつつ、9%長翼化を図った。排気損失を極力減らすべく、動翼後縁による速度せん断を軽減し、スワールも従来通り極力無くすることで、排気ディフューザにおける全圧分布不均一を低減している。



Fig.12 Recirculation zones on pressure side tip regions of blade 1 for 47.5MW (left) and 50.5MW (middle) and continuous matrix cooling at TE (right)

3.3.3 冷却性能向上

前述の通り、翼枚数の削減により、冷却空気流量の削減を達成しているが、それに加えて、冷却性能向上による削減も行っている。1段静翼においては、静翼内の冷却流路を2流路から3流路に増やすことで冷却性能を向上させ、今までプラットフォームのみだったTBCを翼部にまでコーティングすることとした。これにより1段静翼にて消費する冷却空気量が20%削減することが可能となった。1段動翼は図12の右にある通りのマトリクス構造の内部冷却流路に持ち伝熱性能向上を図っている。

3.3.4 性能改善の検証

これらの設計変更の検証は、まず部品レベルでの試験を行った上で、実機試験にて確認を行っている。実機試験では、このタービン部の検証のために、1710個の感温液晶^⑧、1528個のメタル温度計測、176個のガス温度計測、6個の冷却空気温度計測、及びサーマルペイントによる追加計測を行っている。図13に感温液晶にて計測した結果にCFD計算結果を合わせこんだ結果である。図にある赤い点が感温液晶計測点であるが、相当数の計測を行うことで、精度良い温度分布が確認でき、潜在的な冷却

空気量削減の可能性についても見出すことが可能となつた。

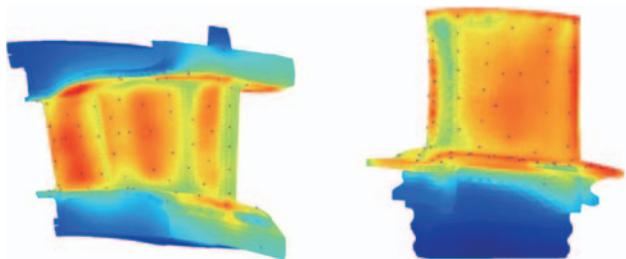


Fig.13 Vane #1 and blade #1 metal temperature distribution calibrated by thermo-crystals (crystal positions are shown)

4. 53.0MWバージョンに向けた設計改善について

これらの50.5MWバージョンの検証結果及び実績を基に微調整を施し、53.0MWバージョンを2015年にリリースした。主要設計変更点を図14に示すが、50.5MWバージョン開発と同様に、燃焼温度は従来通りの値を維持しながら、圧縮機空気流量向上（約3kg/s増）、冷却空気流量削減により更なる高出力、高効率化を実現しているものである。今回施した設計変更は50.5MWバージョンに適用可能な変更であり、燃焼温度を上げることはせずに行っていることもあり、非常に無理の無い設計改善のよる向上となっている。現在、この53.0MWバージョンは6台の受注を頂いており、順次出荷をしていく予定である。

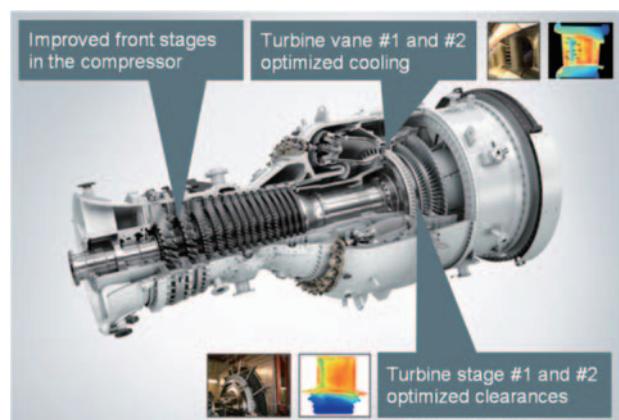


Fig.14 Main design modification from 50.5MW to 53.0MW

5. まとめ

本稿では、シーメンス製の産業用ガスタービンの一つであるSGT-800の開発動向を説明させて頂いた。1998年の販売開始以来、この出力クラスとしては最も販売実績の多い機種となっている。

産業用ということで、幅広い燃料性状への対応及び運転信頼性が重要な要素と考え、3.2項の様な燃焼器開発を進めながら、信頼性への大きなリスクとなる燃焼温度向上に頼ることの無い出力向上、性能向上を弛みなく進

めており、2 on 1 の構成で送電端コンバインド効率56%超にまで到達している。

また、一般的な純粹な発電用途として運用されることも鑑み、負荷変化柔軟性及び部分負荷時の高効率運用を可能にするためEconoFlexTMと言う複数台のSGT-800を用いたプラントもご提案させて頂いている⁽¹⁰⁾。EconoFlex6のアレンジを用いると最低運用負荷10%，負荷変化率75MW/minという非常に柔軟性の高い発電所を実現することが可能であり、昨今の再生エネルギーによる発電量の増加に対する電力供給安定化への一つのソリューションになるとを考えている。

シーメンスとしては、今後共、顧客ニーズ、エネルギー市場の動向を常に注視しながら、高出力、高効率化を進めていき、これからも顧客の期待を超える開発を進めていく所存である。

6. 引用文献

- (1) シーメンスホームページ
<http://www.energy.siemens.com/hq/en/fossil-power-generation/gas-turbines/> (2015-11-10参照)
- (2) シーメンスホームページ
<http://www.energy.siemens.com/hq/en/fossil-power-generation/gas-turbines/sgt-800.htm#content=Gas%20turbine%20SGT-800%20for%20power%20generation> (2015-11-10参照)
- (3) Gudmundsson, B., Nilsson, U., Linder, U., Shukin, S., Afanasiev, I., Kostege, V. "Experience from the joint development of the GTX 100 turbine blading", ASME 98-GR-201.
- (4) Shukin, S., Annerfeldt M. and Björkman, M., "Siemens SGT800 industrial gas turbine enhanced to 47MW design modifications and operation experience", ASME GT2008-50087, 2008.
- (5) Lorstad D., Wang L., Axelsson S., and Bjorkman M. "Siemens SGT-800 industrial gas trbine enhanced to 50MW: design modification ad operation experience" PowerGen S Europe, Vienna, Austria, 2013.
- (6) Lörstad, D., Pettersson, J. and Lindholm, A.; "Emission reduction and cooling improvements due to the introduction of passive acoustic damping in an existing SGT-800 combustor", ASME GT2009-59313, 2009.
- (7) Annerfeldt M., Shukin A. and Shukin S., "Blade or vane for a turbomachine", Patent number: US20070172354, 2007.
- (8) Annerfeldt M., Shukin S., Bjorkman M., Karlsson A., Jonsson A., Svistounova E., "GTX100 turbine section measurement using a temperature sensitive crystal technique, A comparison with 3D thermal and aerodynamic analysis", PowerGen Europe, Barcelona, Spain, 2004.
- (9) Larfeldt J., Larsson A., Andersson M., "Co-firing hydrogen in Siemens industrial gas turbines", SGC report, Sweden, 2013. <http://www.sgc.se/> (2015-11-10参照)
- (10) Nilsson L., Joecker M., and Bjorkman M. "Siemens EconoFlexTM SGT-800" PowerGen Europe, Cologne, Germany, 2014.

特集：産業向け最新鋭自家発電用ガスタービン

FT4000 Aero-derivative Features Overview and Operational Experience

David J. Maher^{*1}Peter T. Corliss^{*2}

1. The Market's Newest Aero-Derivative

The FT4000® industrial gas turbine is a 60 to 140 MW class aero-derivative design, introduced from PW Power Systems, Inc in 2015. Featuring a two-spool gas generator with a free power turbine, it can be packaged in a 60-70 MW SWIFTPAC® 60 or 120-140 MW SWIFTPAC® 120 configuration. The gas generator's high-spool core is a derivative of Pratt & Whitney® PW4000™ aircraft engine family while the low-spool is an all-new design.

Performance and emissions are enhanced by application of the Pratt & Whitney® high-speed compressor and TALON combustor technologies.

2. Industrial FT4000®; Strong Aero Lineage

The FT4000® 120 MW class aero-derivative industrial gas turbine from PW Power Systems, Inc., entered commercial service in July, 2015. Featuring a two-spool gas generator with a free power turbine, it can be packaged as a single unit (one gas turbine driving one 60-70 MW generator) or a dual unit (two gas turbines driving one 120-140 MW generator) configuration. The gas generator's high-spool core is derived from the Pratt & Whitney® PW4000™ aircraft engine family, which has 32 million hours on more than 850 operating engines for the Airbus A330 and Boeing 777-series aircraft. The low-pressure spool is an all-new high speed design featuring advanced aerodynamics while a new industrial style free power turbine, is available in configurations optimized for both 50 and 60 Hz operation.

3. Redesign for Industrial Use

The FT4000® industrial gas turbine maintains the core from the Pratt & Whitney® PW4000™ aircraft engine family, with greater than 90% commonality with the high pressure spool and combustor module. Changes to the core targeted necessary modifications to meet all industrial power generation requirements, including development of a new fuel injector offering dual fuel capability with water injection

technology for NOx emissions capability. The Power Turbine architecture of the FT4000® industrial gas turbine leverages PW Power Systems, Inc. experience from its legacy FT4 and FT8® industrial gas turbine products. Utilizing a free power turbine in which there is no mechanical connection between itself and the gas generator, the FT4000® industrial gas turbine can be packaged in a SWIFTPAC® 120 configuration, utilizing 2 gas turbines to drive a common electric generator from both ends, providing a wider, more flexible range of power generation capability. Identical power turbine configurations, differing only in direction of rotation, enable this unique product capability.

The FT4000® low spool is a new high efficiency design that operates at twice the speed of its PW4000™ aero equivalent. A rotating airfoil has an optimum tip speed for best performance and efficiency. Due to blade tip speed constraints in the design process, the rotational speed of a bladed rotor decreases as its outer diameter increases. In the conventional PW4000™ flight engine, because its fan diameter is fixed to a much smaller diameter low pressure compressor module (LPC), the rotational speed must be a compromise between the two. While the fan speed is faster than optimal, and the LPC is lower than would be required for best performance. The latest technology Pratt & Whitney® geared turbofan engines utilize a gearbox to properly ratio speed between both the LPC and fan, allowing each to operate at its optimum design speed. The FT4000® industrial gas turbine architecture achieves the same effect by having no mechanical connection between the low pressure spool drive shaft and electric generator, allowing the low spool to operate at its optimum speed for maximum efficiency, without compromise.

The power output and efficiency of the FT4000® industrial gas turbine can also be augmented with use of inlet fogging and wet compression systems. Use of these established technologies involves the introduction of a very fine controlled mist of water injected into the engine inlet, resulting in evaporative cooling and corresponding higher power output at given ambient temperature conditions.

原稿受付 2015年12月17日

* 1 PWPS Vice President, FT4000 Program

* 2 PWPS Program Manager, FT4000 Program

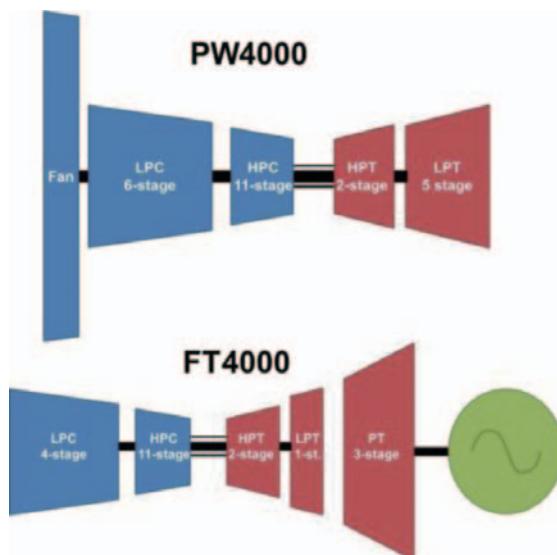


Fig. 1 Aero / Industrial Configuration Diagram

4. Enabling Technology for Industrial Market

4.1. Demonstrated Aero High Compressor Capability

The high pressure compressor (HPC) module is largely common with the largest variant of the Pratt & Whitney® PW4000™ aircraft engine, featuring an advanced 3D aerodynamic design. There are key operational differences between the flight and industrial requirements necessitating certain modifications to properly optimize the aero design for an industrial application. Whereas a flight engine spends just a few minutes at its maximum power condition, occurring at take-off, an industrial gas turbine operates continuously at its maximum power output. While the chosen rated temperature capability established for the industrial FT4000® is within the operational experience of its flight equivalent, the extended time at elevated temperatures necessitated improved solutions for creep, such as improved material capability within the high compressor rotor system. In addition, as design weight is much less a concern in an industrial application, the compressor outer casings were changed from titanium to steel, for lower cost. Similarly, the steel casings are stiffer than titanium, and in the absence of maneuver loads in an industrial application, facilitate tighter control of blade tip clearances, providing an added performance enhancement in the industrial application.

4.2 Advanced Low Compressor Aerodynamics

The low pressure compressor (LPC) module is a new high efficiency design for the FT4000® industrial gas turbine, incorporating the latest wide-chord 3D airfoil design technology from Pratt & Whitney, providing the same low compressor compression ratio as the PW4000™ flight engine, with 30% fewer stages. The FT4000® industrial gas turbine LPC also utilizes 2 variable stages supporting stability while optimizing performance across the module's operating range.

The key to this dramatic reduction in both stage and airfoil count is higher rotational speed, which increases efficiency and stage loading.

Case and vane material construction in the LPC are made of steel to help lower cost, while blades are made from titanium to reduce weight and lower structural loads on the rotor system at the higher rotational speeds. Rub strips or abradable outer air seals used in traditional PW4000™ low compressor casing designs, were eliminated and replaced with a hard wall casing design for the FT4000® industrial gas turbine, in an effort to maintain performance retention and elimination of rubstrip erosion during use of wet compression. The steel "hardwall" cases incorporate horizontal split lines, similar to the utilized in the HPC, that facilitate in-situ maintenance of the LPC airfoils.

* In-situ maintenance

Maintenance accomplished with the gas turbine in-place at the customer site and not in an overhaul shop environment. Items typically include things as minor repairs, such as local blending of airfoils, accomplished in-place in order to reduce maintenance cost.

4.3 RQL Combustor Design for Low NOx

The FT4000® industrial gas turbine combustor is derived from the Pratt & Whitney® latest Talon IIB™ low-emissions combustor used in the PW4170™ Advantage 70™ engine that powers the Airbus A330. This is a Rich-Quench-Lean combustor, where fuel air ratio in the forward and aft regions of the combustor is controlled to suppress NOx formation.

In order to create low NOx in a rich-quench-lean (RQL) aero-derivative combustor, water injection is used to reduce the flame temperature and therefore reduce the thermal NOx. Lowering flame temperature, however, decreases the CO conversion to CO2 and therefore increasing total CO emissions. Achieving superior mixing of water and gas within the quench zone where thermal NOx formation occurs, without overwatering cooler regions responsible for CO formation, is paramount in achieving both low NOx and CO.

The FT4000® industrial gas turbine fuel nozzle liquid water injection is pre-mixed with the liquid fuel, resulting in ideal

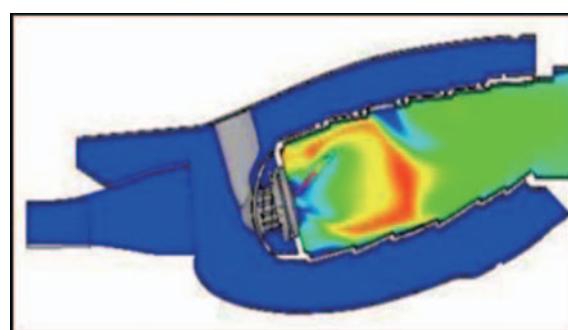


Fig. 2 PW4000™ RQL Combustor CFD Mixing Results

fuel, water, and air mixing. For gas fuel, however, the liquid water is injected in a different location in the fuel nozzle than the fuel. In order to obtain the mixing in the high temperature region of the combustor and not over-water cooler regions, aerodynamic mixing at the exit of the fuel nozzle is necessary.

For this combustor, the liquid axial momentum is greater than the axial gas momentum in the swirling air or gas stream, and therefore the swirl of the liquid water needed to be increased in order to assure adequate mixing within the quench zone. Increasing the swirl of the liquid was done aerodynamically as a mechanical change to the liquid passage would affect the liquid performance. This was accomplished by introducing a large swirl on the gas fuel, thereby shearing the liquid water flow at the nozzle exit. The shearing swirl allows angular momentum from the gas fuel to be imparted to the water, enabling mixing to begin very near the nozzle tip. The amount of swirl imparted was sufficient to bring the water to the hottest regions in the flame, but not so high to create a cold zone outside of the hottest fuel-air-ratio (FAR) mixture, ensuring low CO and low NOx.

The FT4000® industrial gas turbine combustor also utilizes the Pratt & Whitney® demonstrated Floatwall technology for durability, maintainability as well as low emissions. This two layer combustor construction, consists of a series of inner liner panels and an outer shell needed to carry the associated structural loads. The shell supports 144 thermal panels in a floating manner which permits relative thermal expansion without incurring high stress. Cooling air passes through openings in the shell and impinges against the cold side of the liner panels. The flow then passes both upstream and downstream behind the panel with respect to the gas flow in the combustor. A smooth flow exits from the downstream end of each panel passing smoothly over the gas side surface of the downstream panel.

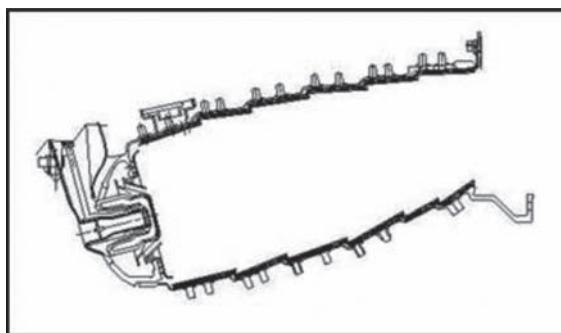


Fig. 3 PW4000™ Talon II Floatwall Combustor Design

The upstream passing flow cools the upstream portion of the panel, turns and mixes with the flow exiting from the upstream panel. This achieves effective cooling of the liner panels with the minimum flow.

Low turbulence is desired to minimize the mixing of the hot gas with the surface cooling flow, which would increase the temperature of the gas adhering to the panel surface. A ceramic thermal barrier coating insulates the panel from flame heat loads for improved durability.

These features combine to minimize wall cooling flow and greatly increase the gas temperature near the wall. This reduces the quenching effect where combustion reactions are truncated at the cold wall, which otherwise would cause high CO and unburned hydrocarbon emissions. Also, materials for the thermally stressed floatwall panels and cooler structural shell can be independently optimized, improving durability. Maintenance is performed simply by unbolting and replacing distressed panels.

4.4 Demonstrated Aero High Turbine Capability

The 2-stage high pressure turbine (HPT) module, similar to its compressor drive, is largely common with the largest variant of Pratt & Whitney® PW4000™ aircraft engine. All airfoils utilize high temperature single crystal materials with advanced coating systems. Airfoil coatings and cooling have been upgraded to meet the industrial mission requirement while maintaining base material and casting commonality with the PW4090.

Abradable coatings applied to the blade outer air seals are utilized to maintain tight clearances and assure high turbine efficiency in the FT4000® industrial gas turbine. The design also takes advantage of the lack of maneuver loads to further minimize and control clearance, resulting in blade tip clearances in the FT4000® industrial gas turbine that are comparable to the PW4000™ aircraft engine, without the added cost and complexity of an active clearance control system.

4.5 Advanced Single Stage Low PressureTurbine Design

The low pressure turbine (LPT) module is a new design for the FT4000® industrial gas turbine, featuring an all nickel alloy rotor and case construction. To lower part count and help control cost, a single stage design was required. As a result, its flow path diameter as well as the work split between both the high and low turbine had to be carefully optimized to enable the single stage design to meet its efficiency targets.

To enable the use of counter rotating free turbines as described above in the SWIFTPAC® 120 configuration, it was required that the flow angle entering the free turbine inlet vane be zero, allowing the vanes to turn the flow in either direction required. This could have been accomplished with the use of turning vanes incorporated within the transition duct existing between low turbine and free turbine, the resultant complexity and associated duct losses with that approach were neither optimum nor desired.

4.6 Industrial Free Turbine Design

The FT4000® industrial gas turbine completes the transition from aero to fully industrial design practices and material construction with the introduction of this new module. The heavy-duty casing designs utilize low carbon sand cast steel structures. The rotor system in turn, made from high carbon rotor-grade steel forgings, is supported by an aft-mounted bearing housing assembly incorporating high-capacity journal bearing construction to handle the associated radial and thrust loads. Both casings and rotor systems are cooled with engine provided bleed air, externally cooled through and air-to-air heat exchanger. All airfoils are a solid non-cored design made from an industrial standard nickel alloy. The turbine blades are a “long neck” design, referring to the distance between the inner platform and the blade attachment to the rotor. This distance insulates the critical disk attachment area from the hot gas path, providing a cooler environment which helps enable the use of steel construction in this highly durable, lower cost design.

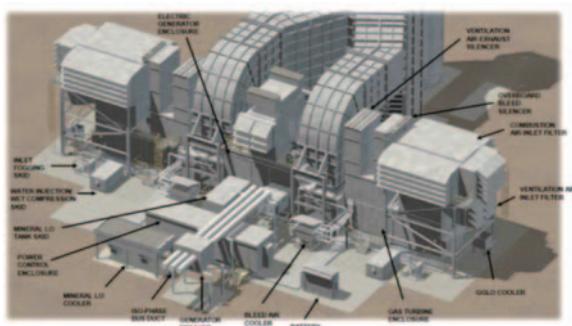


Fig. 4 FT4000™ SWIFTPAC® 120W/Catalyst Reduction System

The free turbine module has been optimized for both 60 Hz and 50 Hz design performance. The 60 Hz design was fully validated in May 2015 while plans for the 50 Hz validation are now underway and planned for late 2016.

5. Installation Offering Operational Flexibility

The layout of the FT4000® industrial gas turbine SWIFTPAC® 120 is illustrated as follows:

Each gas turbine unit is installed at site within its own enclosure assembly, orientated with the inlet outboard from the centrally mounted 120 MW electrical generator. The counter-rotating free turbines are mated to the electric generator through a drive-shaft/coupling arrangement. Each engine and free turbine has its own set of ancillary support skids and is capable of cold start to full load in less than 10 minutes with restriction or penalty.

6. FT4000® ; In Commercial Service Operation

The FT4000® industrial gas turbine entered initial commercial service at Exelon’s Perryman 6 plant, a SWIFTPAC® 120 configuration, located in Perryman, Maryland, USA, in July 2015. As of November 2015, the plant has accumulated a combined 2,000 hours and 200 cycles of successful operation on its two installed engines.

A second FT4000® industrial gas turbine installation, also entered commercial service at Albarini’s SWIFTPAC® 60 plant in Frias, Argentina in December 2015.

Copyright © 2015 PW Power Systems, Inc. All rights reserved. Does not contain technical data subject to the EAR or the ITAR.

特集：第43回定期講演会（米子）特集

第43回日本ガスタービン学会定期講演会 全体報告

西澤 敏雄^{*1}
NISHIZAWA Toshio

姫野 武洋^{*2}
HIMENO Takehiro

1. 市民フォーラム

定期講演会の前日9月8日、米子工業高等専門学校の図書館2階アカデミックシアターにおいて、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、当学会の活動対象としているガスタービンおよびエネルギー関連技術について、一般の方々に広く知って頂くことを目的としており、今回は、米子高専機械工学科の早水康隆准教授の全面的なご協力のもとで実施された。

今回の市民フォーラムの講演は、宇宙航空研究開発機構の福山佳孝氏による、「進化を続けるジェットエンジン－技術開発の最前線－」であった。米子高専で機械工学などを学ぶ学生の熱心な参加もあり、計121名の参加者を得た。学生向けに平易な説明を交えて講演頂き、関連技術の基礎から最先端の研究開発事例まで分かり易く知ることができたと思われる。一般の研究者・技術者にとっても、ジェットエンジンを中心とする最新の情報もあり、大いに刺激を受けた。講演後に学生からの質問も続き、今回も有意義なイベントになったと思われる。



Fig. 1 Participants in the open forum.

2. 定期講演会

市民フォーラムに続き、9月9日および10日に、鳥取県米子市の米子コンベンションセンター（Big SHip）にて、「第43回日本ガスタービン学会定期講演会」を開催した。JR米子駅から徒歩で約5分という、参加者にとって大変便の良い場所での開催であった。開催当日は台風

原稿受付 2015年10月23日

* 1 (国研) 宇宙航空研究開発機構 aFJRプロジェクトチーム
〒182-8522 調布市深大寺東町7-44-1

* 2 東京大学大学院工学系研究科 航空宇宙工学専攻

の突然の本州接近による悪天候が心配されたものの、講演会には一般参加者を含め150名と、過去最高規模の多くの参加者を得ることができた。

講演会1日目午後には、特別講演が行われた。今回は、お隣の島根県安来市にある和鋼博物館の特別研究員の三奈木義博氏による「たたら製鉄と日本刀」であった。三奈木氏より、中国山地は良質の砂鉄と豊富な森林に恵まれていたため古くから製鉄が盛んで、江戸時代後半には国内生産量の8割を占めていたこと、足踏み式の天秤ふいごを用いた「たたら製鉄」という伝統的匠技が限られた職人から職人に長年伝承されてきたこと、日本刀を芸術品として仕上げるにはたたら製鉄で作られた最高品質の「玉鋼」が欠くことのできない素材であること、などが紹介された。講演中には、たたら製鉄を国の重要有形民俗文化財として現在も伝承し、実際に製鉄する様子を記録したビデオも紹介されるとともに、三奈木氏自身が日立金属安来工場にて長年ガスタービンを含む材料技術開発に従事された実績もあり、専門技術的な説明も交えた内容だったため、参加者にもたいへん興味のある講演であったと思われる。

講演会2日目午前には、先端技術フォーラム「プラント診断技術の最前線」が行われた。九州大学の渡邊裕章准教授を座長とし、前半が講演会形式、後半が全体討議の形で進められた。講演会形式では、先ず診断技術の中心的話題として「ガスタービン高温部品の損傷評価」が愛媛大学吉岡洋明教授より紹介され、その後ユーザ側取り組み紹介として、中国電力の西田秀高氏から「ガスタービン高温部品長寿命化技術開発」と電中研の福地哲生氏から「TBCの非破壊検査技術の開発」が紹介された。続いて水力発電所との比較として同じく電中研の小野田崇氏より「火力発電所の運転データからの異常予兆発見研究について」が紹介された。さらにMHPS三上尚高氏から「発電用大型ガスタービンの異常診断」およびGEエナジージャパン渡部匠氏から「ガスタービン監視データを有効活用した状態変化早期検知システムの紹介」の講演が行われた。全体討議では、部品保守管理について、メーカーとユーザのそれぞれの立場から、本音を交えた真剣な議論が行われた。本号の特集では、このうち4件の講演について講演内容を紹介する。

講演会2日目最終セッションでは、「再生可能エネルギー大量導入時代の系統安定化対応先進ガスタービン発電設備の研究開発」と題して当学会の調査研究委員会か

らの報告が行われた。先ず座長である東京大学の渡辺紀徳教授から、本セッションはガスタービン学会の調査研究委員会が平成26年度から実施しているNEDOプロジェクトの中間報告であるとの主旨の紹介があり、続いて三菱重工業の佃嘉章氏より基調講演が行われ、プロジェクトの背景から将来展望に至る全体概要が説明された。さらに、同プロジェクト担当各社である電中研の高橋徹氏、産総研の壹岐典彦氏、三菱重工の伊藤栄作氏、MHPGの岸部忠晴氏、IHIの米澤克夫氏、川崎重工の合田真琴氏、東芝の齊藤大蔵氏から、それぞれの実施状況と今後の計画について報告が行われた。後半はパネルディスカッション形式で、本プロジェクトの課題と方向性について会場からの質疑も含めた活発な意見交換が行われた。

一般講演は48件の発表件数を集めた。その内訳は、空力：16件、多重スケール：9件、サイクル：7件、材料：5件、燃焼：4件、伝熱：4件、GTシステム：3件であった。内訳を見ても分かるとおり、今回は空力分野の発表が多い傾向にあった。各セッションは小ホールを含む3室並列で実施され、各室とも多くの参加者を得て、大変熱心な議論が交わされていた。今回も、学生登壇者からの事前のエントリーがあった11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、早稲田大学大学院の山本姫子君に受賞が決定し、懇親会にて田沼唯士会長より授与された。詳細については本誌に別記の通りである。

今回の定期講演会では、新たな取り組みとして会場内のホワイエを利用した小規模の展示会を実施した。事前の公募により関連企業等3社（株式会社キグチテクニクス、SUSANOO、パルステック工業株式会社）の出展が行われ、休憩時間や昼休みを利用し、展示パネルや展示物の説明が足を止める参加者に対して行われた。



Fig. 2 Discussion on the project “Investigation about the advanced power plant corresponding to load fluctuations of power system.”

3. 懇親会

懇親会は、会場からほど近いワシントンホテルプラザにて開催された。田沼唯士会長の挨拶、佃嘉章元会長による乾杯の挨拶で始まり、米子の特産物や銘酒に舌鼓を打ちつつ、会員同士の交流が図られた。学術講演会委員長から次回は山形県酒田市で開催する旨の報告、IGTC2015の準備状況の報告などがあり、坂田公夫元会長による中締めの挨拶で散会となった。

4. 見学会

今回の見学会は、34名の参加者があり、山陰本線安来駅のすぐ北側に位置する日立金属株安来工場、和鋼博物館などを巡るコースであった。日立金属株安来工場は、航空機・エネルギー機器の材料を含む鋼鉄材を製造する同社の主力工場である。今回訪れた安来工場（山手工場）では、工場の概要説明を受けた後、大型プレス設備、線材ミル、タンデム圧延機など、鋼鉄材の熱間加工や冷間加工を行う設備群が実際に稼動しているところ見学させて頂き、参加者は熱心に見入っていた。最後に全体質疑にも対応いただき、素材の品質管理方法などについて活発な質疑応答がなされた。和鋼博物館では、特別講演講師の三奈木義博氏の案内により、砂金採掘所の模型や炉の構造模型などとともに、実物の炉や天秤ふいご等の製鉄用具、実際に生産された玉鋼などの素材、見事な日本刀を見学することができた。



Fig. 3 Participants in the technical tour(at Hitachi Metals, Ltd. site).

5. 謝辞

市民フォーラムの開催に多大なご協力を頂いた早水康隆准教授をはじめとする米子高専の方々、定期講演会の開催に多大なご協力を頂いた講演者、参加者および学術講演会委員会の方々、見学会の開催にご協力を頂いた日立金属株式会社および和鋼博物館他の関係各位に御礼申し上げます。最後に、本講演会は、公益財団法人とつとリコンベンションビューローの助成事業として開催されたことをここに記して感謝の意を表します。

特集：第43回定期講演会（米子）特集

ガスタービン高温部品の損傷評価技術

吉岡 洋明 *1
YOSHIOKA Yomei

Key words : ガスタービン, 寿命診断, 材料劣化, 損傷, 組織

Gas turbine, Life assessment, Degradation, Damage, Microstructure

1. 緒言

近年、コンバインドサイクル発電用ガスタービンは、高温・高効率・大容量化が図られた結果、タービン入口温度は1600°C級に、また、ガスタービン単体の熱効率は40%、出力も300MWを超えるまでに至っている。図1に1984年来導入されたガスタービンの機種別累積出力の変遷を示す。

この高温・大容量化が、ガスタービンの高温部品の材料劣化・損傷に与えた影響は非常に大きく、運転後の比較的早い時期から顕著な表面損傷が認められている。このため、点検毎に補修・再生処理を繰り返し施し、管理寿命まで用いる処置が採られていることから⁽¹⁾、点検・補修・再生の諸技術に加えて、適切な部品の点検および交換時期を診断する技術が非常に重要なものとなっている。

ガスタービンの保守管理は、設計段階で策定した解析ベースの寿命評価に基づく管理基準に対して、運転形態、使用燃料、部材等により分類したグループの先行機の点検情報を基に見直しを掛ける方法が採られてきた。しかし、近年、より合理的な診断手法に基づき、製品毎あるいは部品毎に個別管理が可能な評価診断手法の開発が求められるようになってきている。

ここでは、ガスタービンの損傷事例を概説するとともに、このような損傷事例を基に開発された実践的な評価

手法について、その基本的な考え方および開発した材料劣化評価技術と部品損傷評価技術についてその適用事例も交え概説する。

2. ガスタービンの損傷形態

図2に、燃焼ガス温度が1300°C級の低NOx燃焼器を用いたガスタービンを、ベース運転、LNG燃焼で用いた場合の高温部品の主な損傷事例を、その主要部の基材およびコーティングの組織の変化とともに示す。

き裂や変形、摩耗や酸化減肉といった1100°C級ガスタービンと共に通の損傷形態が、その程度の差こそあれ、高温化に際し材料あるいは設計の高度化が図られたにもかかわらず認められており、その損傷量は増す傾向すら認められている。また、非破壊あるいは破壊調査の結果では、運転時間とともに組織的な変化と高温強度の低下が、ここでも同様に認められている。

これらの劣化・損傷形態は、大きく、定格時の運転時間に依存するクリープ変形やき裂、あるいは摩耗や酸化減肉と、起動停止回数に依存する熱疲労に起因する表面き裂に分類できる。前者は、トランジションピースや2段、3段動翼の翼先端シュラウド部あるいは2段静翼の変形およびき裂であり、後者では、初段静翼の表面き裂が代表的な事例として挙げられる。

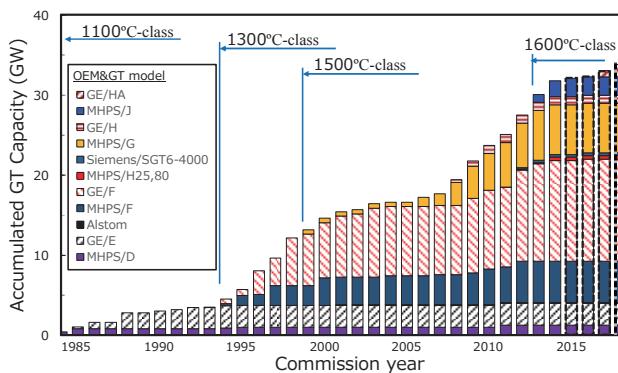


Fig. 1 Gas turbine capacity for electric utilities in Japan.

原稿受付 2015年11月4日

*1 愛媛大学

〒790-8577 松山市文京町3番

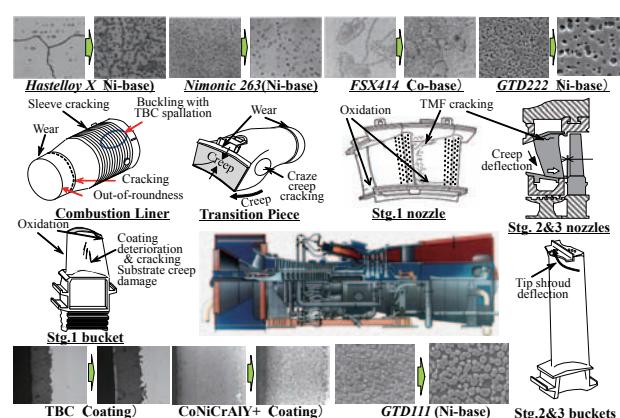


Fig. 2 Typical surface damages and microstructure degradations of GE FA.01/03 model gas turbines hot-gas-path components.

なお、前者のクリープに関しては、組織変化と变形あるいはクリープ寿命の低下に相関が認められるのに対して、後者の熱疲労に関しては組織変化との相関はほとんど認められず、その構造に依存していることが特徴として挙げられる。

これらの劣化・損傷は、機種の成熟とともに局所的な過度な損傷は平準化され、軽減はされてくるが、総じて高温化とともにその損傷の度合いは増加する傾向が認められている⁽²⁾。

3. ガスタービンの寿命およびその診断技術

火力発電プラントの耐用年数を規定する法的な寿命制限は日本にはない。建屋的には60年程度という説もあるが、実績的には休止プラントを除けば40年程度であり、ガスタービン本体に関しては、ロータの推奨交換寿命およびケーシング等の寿命を考慮すると20年程度と考えるのが妥当と考えられる。燃焼ガスの通路部にあたる高温部品の場合は、更に短く5～10年が推奨交換寿命となっていることから⁽¹⁾、寿命延伸の可能性も含めた診断を行う場合、高い診断精度を有する手法の開発が求められる。

寿命評価法としては、解析を用いた間接評価法と非破壊あるいは破壊調査による直接的な評価法がある。通常、解析手法により得た結果を寿命評価のための基本情報とし、特定した評価部位の非破壊あるいはその部位から採取した試験片による破壊調査の結果を、解析にフィードバックをかける、あるいはその結果から直接寿命を評価する手法がとられている。

しかし、ガスタービンの場合、高温部品は複雑な冷却構造を有する薄肉構造物であり、部品内でも隣接する部位ですら損傷の程度は大きく異なっている。加えて表面損傷も激しいことから、評価可能な試験材の採取は限定的となるにもかかわらず、動静翼に関しては鋳造品であり、ある範囲のデータのばらつきも考慮する必要があるといった課題を有していた。

また、ガスタービンの場合、高温の燃焼ガスを駆動流体として用いており、また、複雑な冷却方式を採用していることもあり、メタル温度を精度良く解析で求めることは難しいという、本質的な課題も有していた。

ここでは、この課題の解決策として開発を行った評価手法のうち、2つの実践的手法を次章で紹介する。一つは、クリープが寿命支配因子となる部品に適用可能な、組織変化からその部品の実体温度を評価するとともにクリープ余寿命も併せて評価する材料劣化評価手法であり^{(3),(4),(5),(6)}、もう一つは、組織変化に先行し表面損傷が発現する事象あるいは部品に対する手法で、その損傷量を定量化し、損傷の変化傾向を解析することにより、その時点での損傷度を評価するとともに次回点検以降の損傷の進行具合を予測する部品損傷評価技術である⁽³⁾。これらを実機に適用した事例に加え、実際に実機で生じている現象の解析に用いた事例も併せて紹介する。

4. 材料劣化・損傷評価技術

ここでは、実機部品の劣化・損傷度をより合理的、定量的に評価する手法として、組織を量化し、その変化量から部材の履歴温度の平均値を求める手法および組織から機械的性質およびクリープ寿命を求める評価手法を述べる。また、材料劣化でなく熱疲労き裂に代表される表面損傷が部品寿命を支配するタービン静翼に代表される部品に有効な部品損傷評価手法についても合わせて以下に述べる。

図3に1100℃級ガスタービン動翼に用いられている代表的なNi基合金IN738LCの主強化相 γ' の平均粒径の熱時効試験における変化の時間依存性と温度依存性を、推定精度検証結果とともに示す^{(7),(8),(9)}。非常に良い相関が実運用時間および実機メタル温度の範囲で認められており、この成長則を温度と時間で数式化することにより、運転時間と組織変化量からその運転期間のメタル温度を部位毎に求めることが可能となる。動翼に代表される高温部品の場合、複雑な高温ガスの流れ場で用いられ、酸化等による熱伝達率の経年変化も考慮する必要があることから、これらを加味した評価が可能な本手法を用いた解析温度の補正は非常に有効といえる。

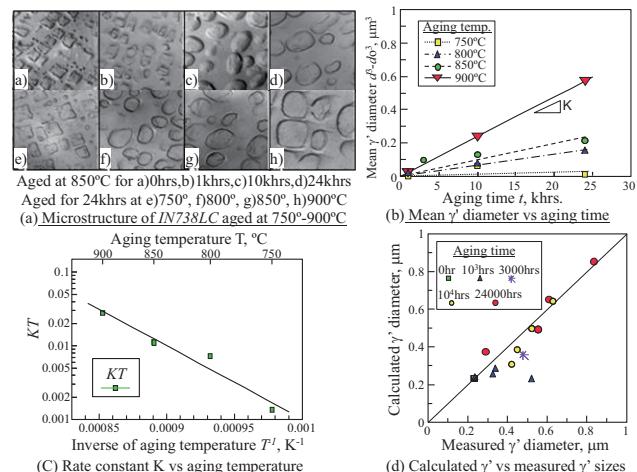


Fig. 3 Change of mean γ' diameter with aging up to 24,000 hours at 750-900°C in IN738LC.

図4に、実機で運転した1100℃級ガスタービン初段動翼の翼有効部50%スパン部断面表層部の温度分布およびその分布の経時的な変化を、上記組織からのメタル温度推定手法を用いて求めた例を示す。運転初期の段階では比較的平坦な温度分布を示していたが、その後、前縁部、後縁部および腹側部において相対的にメタル温度は高くなっている。前縁部においては、その後も継続して温度の上昇が認められている。温度が上昇した部位は表面粗度の増加が認められており、これに伴う熱伝達率の上昇が生じていたものと考えられる^{(10),(11)}。このように、安定した運転条件下においても基材の負荷状態は変化しており、経年的な状態量の変化を考慮した評価・診断が必要

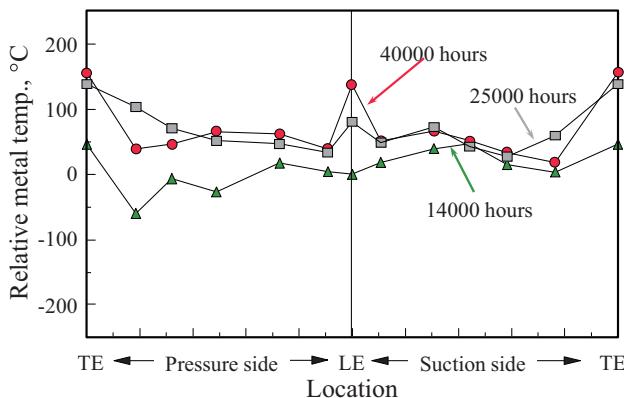


Fig. 4 Microstructure based stg.1 bucket surface metal temperature distribution at 50% airfoil span location after 14,000, 25,000, and 40,000 hours operations.

なことを示している。

動翼材で用いられている一方向凝固材 CM247LC材のクリープ中断材および破断材の組織観察結果を図5に示す¹²。組織変化と負荷応力の関係を調べた結果であるが、負荷応力に垂直な方向に γ' 相が成長するラフティング現象が生じている。この垂直方向に伸びた γ' 相のアスペクト比と温度、応力の関係をまとめた結果を図6に示す。この結果からアスペクト比は、温度との相関はないが、応力との間には非常に良い相関があり、この組織変化から応力の推定が可能であること、加えて、その成長方向から主応力方向を求めることが可能なことを示しており、複雑な冷却構造を有する動静翼等の応力解析結果の検証に有効な技術といえる。

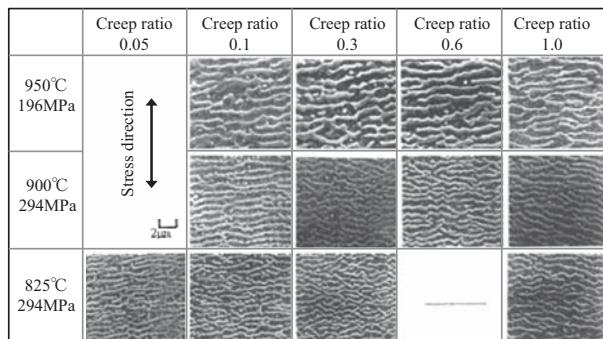


Fig. 5 Change of γ' phase morphology during creep tests in DS CM247LC.

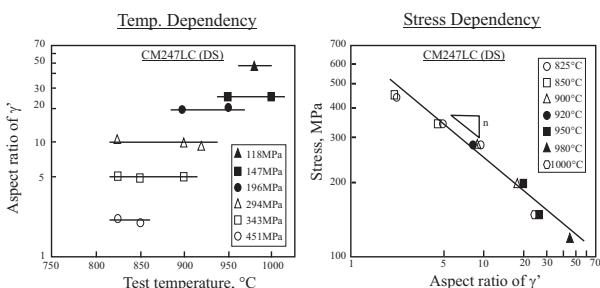


Fig. 6 Effect of creep test temperatures and stresses on the aspect ratio of rafted γ' phases in CM247LC (DS).

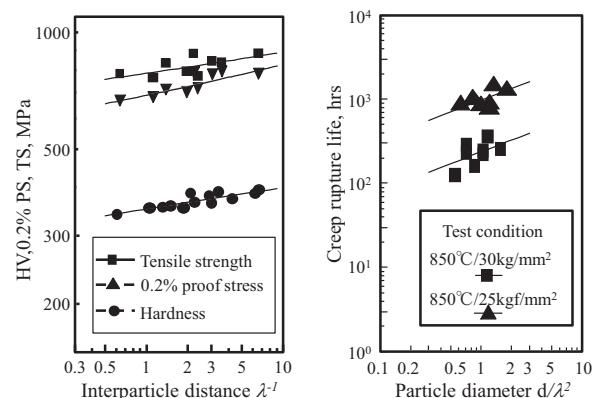


Fig. 7 Relationship between the function of interparticle distance and size of γ' precipitates on the hardness, yield stress, and tensile strength of IN738LC.

図7は、 γ' 相と強度の相関を見たもので、変化した組織から強度およびクリープ破断寿命が、転位論を用いたモデルにより評価可能なことを示している^{(3), (13), (14), (15)}。解析結果の検証あるいは破壊試験で評価できないような部位の評価に有効な技術といえる。

次に、部品損傷評価手法について述べる。図8に1100°C級ガスタービン初段静翼の表面き裂の解析事例を、その評価システムとともに示す¹⁶。点検毎に収集したき裂データは、部品、部位、運転・補修履歴とともにデータベース化することにより、損傷の進展予測が可能であり、例えば、図4(c)のようなマスターカーブを作成することにより次回の点検時の状態を予測し、保守管理に反映させることができとなる。また、入力した領域情報を基に損傷の激しい部位の特定とその程度および範囲の把握、加えて判定規準の見直しにも活用可能な技術といえる。

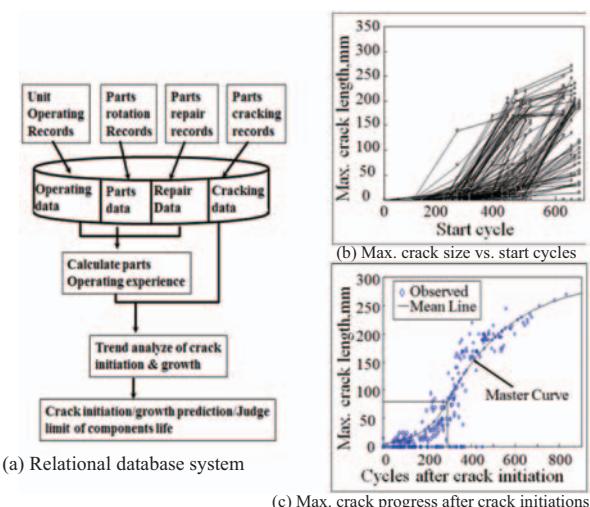


Fig. 8 Statistical analysis method for the component damage assessment by using relational database system and the results.

4. 結言

ガスタービン高温部品の材料劣化および部品損傷の事例を紹介するとともに、その評価法として、組織変化を用いた材料劣化診断技術と損傷量を定量化しその変化傾向を解析する部品損傷評価技術について、それを用いて評価した事例とともに概説した。今後、ガスタービンの高温化とともに、機器の置かれている環境は益々厳しくなってくことから、そこで生じる現象を正確に把握し、それを保守に結びつける技術として、これらの技術の活用の場は益々広がる事が予想される。これらの技術の今後のさらなる進化を期待するところである。

参考文献

- (1) D. Balevic, R.Burger, D.Forry : Heavy-Duty Gas Turbine Operating and Maintenance Considerations, GER-3620L (2009), pp.1-53.
- (2) 吉岡洋明：発電用ガスタービンの高温化に伴う損傷形態および補修技術の変遷，日本ガスタービン学会誌, vol.32, No. 3 (2004), pp.178-182.
- (3) Y.Yoshioka, D.Saito, K.Fujiyama, H.Kashiwaya, T.Kondo, J.Ishii, T.Homma : Life Assessment Technique for Gas-Turbine Hot-Section Components, Materials for Advanced Power Engineering 1998 Part III (1998), pp.1411-1420.
- (4) 吉岡洋明, 斎藤大蔵, 藤山一成, 岡部永年 : Hastelloy Xのクリープ特性に及ぼす析出形態の変化の影響, 鉄と鋼, vol.80, No.10 (1994), pp.55-60.
- (5) 吉岡洋明, 斎藤大蔵, 藤山一成, 岡部永年 : ガスタービントランジションピースノ劣化・損傷予測法の検討, 日本ガスタービン学会誌, vol.23, No.91 (1995), pp.66-72.
- (6) S.Imano, S.Nakamura, A.Kamaya, J.Kazumoto, H.Watanabe : Relationship between residual creep life and microstructure of strengthened Ni-base alloy for gas turbine combustor parts, ASME 97-GT-349.
- (7) C.Wagner : Theorie der Alterung von Niederschlangen durch Umlosen (Ostwald Ripening), Zeitschrift Fuer Elektrochemie, 65 (1961), pp.581-591.
- (8) L.Lifshitz, VV.Slyozov: Kinetics of Precipitation from Supersaturated Solid Solutions, J. Phys. Chem. Solids, Pergamon press, vol.19, Nos.1/2 (1961), pp.35-50
- (9) 吉岡洋明, 岡部永年, 斎藤大蔵, 藤山一成, 岡村隆成 : 組織変化に基づくガスタービン動翼の運転温度推定法の検討, 材料, vol.45, No. 6 (1996), pp.699-704.
- (10) 岡村隆成, 古閑昭紀, 油谷好浩, 吉岡洋明, 藤山一成, 岡部永年 : 時効による組織変化を利用したタービン動翼の翼面熱伝達率の解析, 日本機械学会論文集 (B編), vol.61, No.583 (1995-3), pp.1085-1092.
- (11) 岡村隆成, 古閑昭紀, 吉岡洋明, 岡部永年 : ガスタービン運転下でのタービン冷却翼の翼面熱伝達率とメタル温度に及ぼす面粗度の影響, 日本機械学会論文集 (B編), vol.65, No.631 (1999-3), pp.1040-1046.
- (12) 山本浩喜, 吉岡洋明 : Ni基一方向凝固合金のクリープ変形中の組織変化, 耐熱金属材料第 123 委員会研究報告, vol.39, No. 1 (1998), pp.17-22.
- (13) E.Orowan : Discussion in "Symposiuminternal stresses", Institute of Metals, (1947), onp.451.
- (14) G.S.Ansell, J.Weertman: Creep of a Dispersion-Hardened Aluminum Alloy, Trans. Metall. AIME (1959), pp.215-83.
- (15) Y.Yoshioka, D.Saito, K.Fujiyama, N.Okabe : Effects of Material Degradation on Mechanical Properties of Cast Ni-base Superalloy IN738LC, proceeding for ASM 1993 Materials Week"93, October 17-21, 1993, pp.53-58.
- (16) 藤山一成, 村上格, 斎藤大蔵, 吉岡洋明, 岡部永年 : ガスタービン高温部品の損傷傾向解析・予測システム, 日本ガスタービン学会誌, vol.22, No.85, (1994), pp.76-82.

特集：第43回定期講演会（米子）特集

TBCの非破壊検査技術の開発

福地 哲生^{*1}
FUKUCHI Tetsuo福富 広幸^{*2}
FUKUTOMI Hiroyuki尾関 高行^{*3}
OZEKI Takayuki岡田 満利^{*3}
OKADA Mitsutoshi藤井 智晴^{*3}
FUJII Tomoharu

キーワード：遮熱コーティング、非破壊検査、テラヘルツ波、アクティブ・サーモグラフィ、光ルミネッセンス、渦電流法

Thermal barrier coating, Nondestructive testing, Terahertz waves, Active thermography, Photoluminescence, Eddy current testing

1. はじめに

燃焼器やガスタービン翼などの高温部品には、セラミックス製のトップコートと合金製のボンドコートから成る遮熱コーティング（TBC）が施工されている^{(1),(2)}。健全なTBCの模式図を図1(a)に示す。トップコートにはイットリア部分安定化ジルコニア（YSZ）が一般的に用いられており、その厚さは200～600 μm程度である⁽³⁾。ボンドコートにはNiCrAlY, NiCoCrAlYなどが用いられ、その厚さは100 μm程度である。経年使用によるTBCの主たる損傷劣化として、図1(b),(c)に示すトップコートの減肉（膜厚減少）とトップコートのはく離が挙げられる。減肉は熱抵抗の低下による基材表面温度の上昇、はく離はトップコート脱離による熱抵抗の喪失を引き起こす。また、図1(d)に示す基材表面き裂は部品の機械強度を低下させるため、早期の発見が不可欠である。

従来、TBC施工部品は一定の供用時間後に補修がなされ、TBCは除去された後再施工される。しかしながら、供用後にその健全性が評価できれば補修をせずに再供用

が可能となり、補修コストの低減が期待できる。よって、TBC施工部品の健全性評価には減肉・はく離・基材表面き裂の非破壊検査技術が不可欠である。

2. TBCの非破壊検査法の概要

2.1 トップコート膜厚測定法

トップコート膜厚はTBCの遮熱性能を決める重要なパラメータである。トップコートは、燃焼ガス流の影響を受けて減肉することがあり、健全性評価には膜厚を高精度に測定する必要がある。TBC断面の顕微鏡観察、即ち破壊検査によるトップコート膜厚測定精度は約10 μmであることから、非破壊検査においても同等の測定精度が望まれる。

塗膜などの膜厚測定には光学計測法（干渉法・光コヒーレンストモグラフィ）・超音波・電磁膜厚計が用いられている。光学計測法は高空間分解能を有するが、トップコートが強散乱媒質であるため、光の到達深さが100 μm程度に制限され、適用が困難である。超音波に関しては、高周波数（5, 10MHz）においては高空間分解能が確保できるが、トップコート中の減衰が大きく、測定が困難である。一方、低周波数（<1 MHz）は比較的透過するが、空間分解能が不十分である。電磁膜厚計もTBCへ適用可能であるが、測定精度が不十分である。

従来の膜厚測定法に替わる測定法として、トップコートを比較的よく透過し、かつ十分な空間分解能が確保できるテラヘルツ時間領域反射法の有用性を示した⁽⁴⁾。テラヘルツ波とは、図2に示すように、光波と電波の中間の周波数領域（0.1～1.0THz）の電磁波であり、セラミックス、高分子材料、塗料、プラスチック、木材などを比較的よく透過することから、様々な非破壊検査応用が期待されている⁽⁵⁾。

トップコート膜厚を求めるための反射測定においては、テラヘルツ波パルスをTBCへ垂直入射し、トップコ

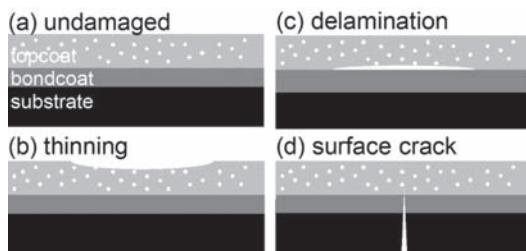


Fig. 1 TBC damage: (a) undamaged TBC, (b) topcoat thinning, (c) topcoat delamination, (d) surface crack on substrate surface

原稿受付 2015年11月12日

* 1 (一財)電力中央研究所 電力技術研究所
〒240-0196 横須賀市長坂2-6-1

* 2 (一財)電力中央研究所 材料科学研究所
* 3 (一財)電力中央研究所 エネルギー技術研究所

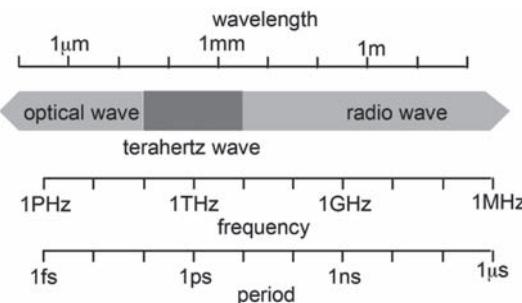


Fig. 2 Frequency spectrum of electromagnetic waves showing the range of terahertz waves (0.1-10 THz)

ト表面からの反射波S, トップコートとボンドコートの界面からの反射波R1, およびトップコート内を複数回往復する多重反射波R2, R3, ...を測定する。これらを図3に模式的に示す。

SとRの到達時間差 Δt はテラヘルツ波がトップコートを1往復するのに要する時間に対応するため、トップコート膜厚を d 、屈折率を n （トップコート中の伝搬速度は c/n , c は光速）とすると、距離=時間×速度の関係から式(1)が成り立つ。

$$d = \frac{c\Delta t}{2n} \quad (1)$$

屈折率 n はトップコート材料の透過測定で求めることができるが、S, R1, R2の周波数解析を行うことで反射測定でも求めることができる⁽⁶⁾。この場合、トップコートの表面粗さが誤差要因となることから、表面粗さに対する実効反射率の依存性に基づき補正を行い、この誤差を低減することができる⁽⁷⁾。

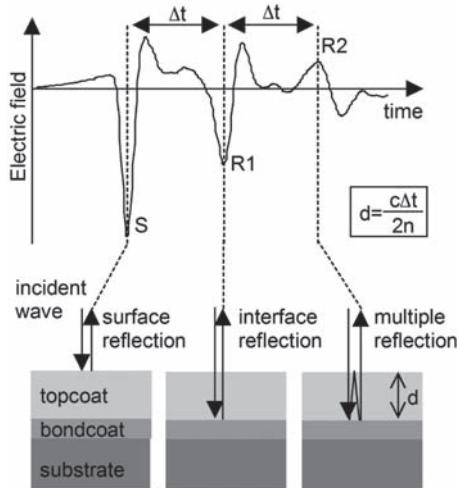


Fig. 3 Schematic diagram of topcoat thickness measurement using terahertz waves

本測定法をTBC施工動翼に適用した。測定部位a～eを図4に、部位aにて得られた反射波形の例を図5に示す。図5では反射波S, R1, R2が明確に現れている。

テラヘルツ波を用いた測定後、翼を高さ30%, 70%, 90%の位置で切断し、部位a～eにおける断面を顕微鏡

で観察した。部位aにおける観察結果例を図6に示す⁽⁴⁾。

部位a～eにおけるテラヘルツ波を用いたトップコート膜厚測定結果と切断面の顕微鏡観察結果を表1に示す。両者は概ね10 μm以内で一致し、その妥当性が確認され⁽⁴⁾。また、テラヘルツ波の入射角度の起因する膜厚測定誤差を評価した結果、動翼表面の曲率は有意な誤差要因とならないことを示した⁽⁷⁾。

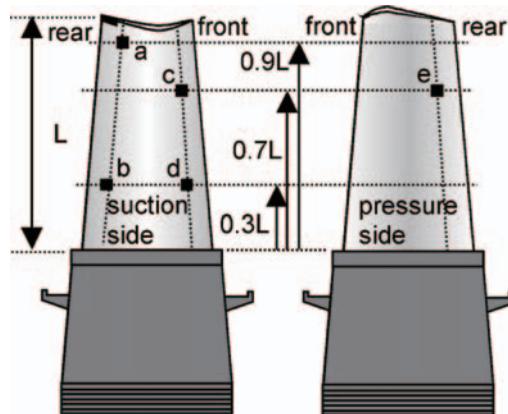


Fig. 4 Topcoat thickness measurement positions of rotor blade⁽⁴⁾

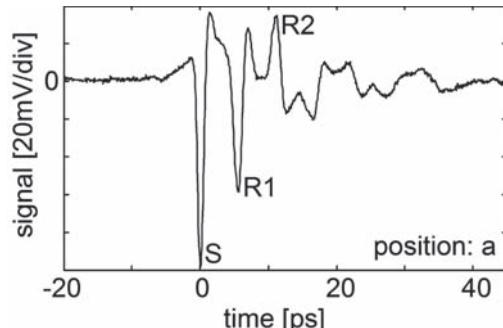


Fig. 5 Example of reflected terahertz wave signal, obtained at position a⁽⁴⁾

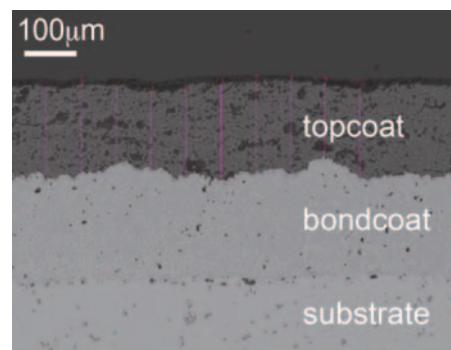


Fig. 6 Microscopic observation result of the cross section at position a⁽⁴⁾

Table 1 Measurement result of topcoat thickness of TBC applied to a rotor blade by terahertz wave and microscopic observation of the cross section⁽⁴⁾

position	terahertz wave measurement ^{*1} [μm]	microscopic observation ^{*2} [μm]	relative difference
a	177±4	173±13	2.3%
b	204±5	195±60	4.6%
c	266±6	260±10	2.3%
d	254±6	243±10	4.5%
e	200±5	189±11	5.8%

*¹ Error is standard deviation of 100 measurements

*² Error is standard deviation of 10 measurements

2.2 トップコートはく離検査

トップコートのはく離は、レーザ加熱を用いたアクティブ・サーモグラフィ法によって検出できる⁽⁸⁾。レーザ加熱は従来のランプ加熱よりも熱流束が大きいため、はく離部と健全部でより大きい温度差が得られ、はく離検出感度が高い。本手法では加熱用レーザをTBC表面に照射しながら走査し、トップコート表面温度分布を赤外線サーモグラフィで測定する。レーザがはく離部に照射された場合、健全部に比べてトップコートから基材方向への熱伝達率が小さいため、表面温度が相対的に高くなる。また、レーザ照射終了後のはく離部は健全部に比べて冷えにくいため、レーザ走査時において「残熱像」として残る。この概念図を図7に示す。

広域を均一に加熱するランプ加熱の場合、トップコートの表面に付着した汚れなどが表面温度変化として現れ(実際は温度ではなく放射率の違い)、はく離の誤検出要因となる可能性があるが、残熱像に注目することによってこれを排除できる。

アクティブ・サーモグラフィに基づくはく離検出システムの概念図と写真を図8に示す。本システムは、X線

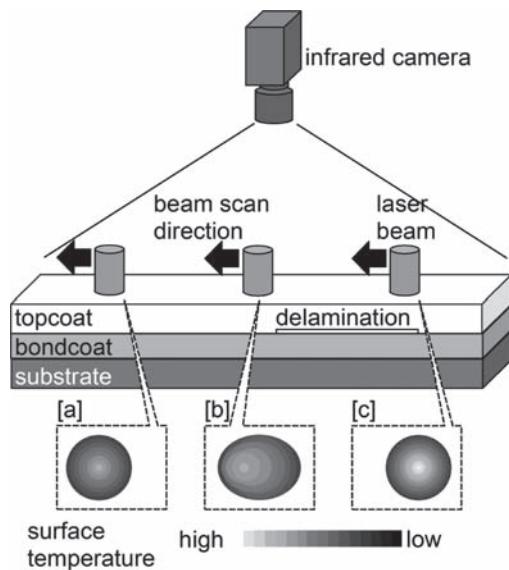


Fig. 7 Schematic diagram of topcoat delamination detection using active thermography with laser heating

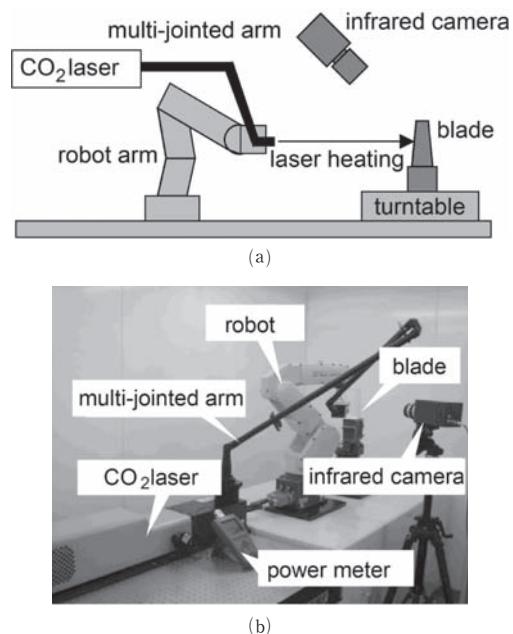


Fig. 8 Topcoat delamination detection system based on active thermography: (a) schematic diagram of the system, (b) photograph of the system

CT等で得られた翼の変位分布データに基づきロボットアームを制御し、アーム先端に取り付けられたヘッド部から多関節アームで伝送された加熱用CO₂レーザ光を照射する。翼表面とヘッドの距離を一定に保つことにより、熱流束を一定とする。

本手法を用いて、模擬はく離を導入したTBC試験体を対象とした実験を行った。試験体は直径25mmで、厚さ3mmの基板上に厚さ150μmのボンドコート厚さ400μmのトップコートが施工されており、中心部に横幅2.2mm、最大間隙95μmの模擬はく離がある。加熱レーザの移動速度を5mm/sとして試験体直径に沿って走査した際の温度分布画像を図9に示す。画像はそれぞれはく離部に対して(a)通過前、(b)直上、(c)通過直後、(d)通過

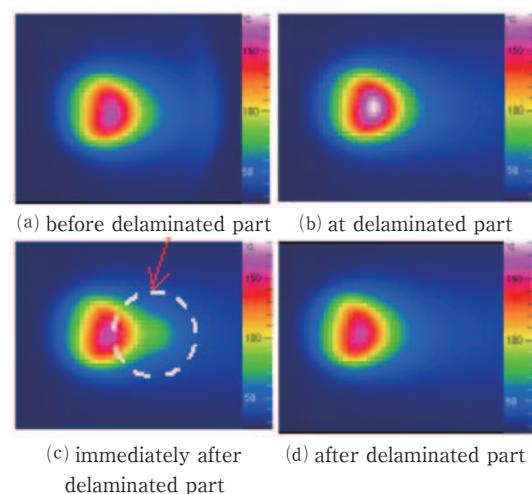


Fig. 9 Detection result of artificial topcoat delamination using active thermography with laser heating

後の表面温度分布である。(a)と(d)ははく離のない健全部に対応する。(b)でははく離部のトップコート表面温度が10°C程度高くなっている。(c)では残熱像(白破線で囲った領域)が現れている⁽⁸⁾。

温度ピーカーのみで評価した場合、表面の汚れなどによって温度が高くなり、誤検出する可能性があるが、残熱像も併用することにより誤検出の少ないはく離検出が可能となる。

以上の結果から、レーザ加熱を用いたアクティブ・サーモグラフィがトップコートはく離検出に有効であることを示した。

2.3 界面酸化層検出

前述のはく離検出システムは加熱用レーザの照射点を翼表面上を走査し、表面温度分布に基づきはく離箇所を検出する。しかしながら、全表面積に対するはく離箇所の面積の割合は通常小さいため、はく離の可能性の高い箇所を予め特定できれば、検出の効率化が期待できる。

トップコートはく離箇所はトップコートとボンドコートの界面に形成される界面酸化層を伴う場合が多い。界面酸化層はボンドコートを構成する金属元素が熱酸化した酸化金属の層で、TBC施工部品を高温で継続使用すると成長する。よって、界面酸化層を簡易検出できればトップコートはく離の可能性の高い箇所を抽出できると考えられる。

一般的に用いられるボンドコート材料はNiCrAlY、CoCrAlY、NiCoCrAlYなどである。Alは酸化傾向が強いことから、界面酸化層はAl₂O₃を多く含み、CrはこれにCr³⁺として混在する。Al₂O₃中のCr³⁺は、図10に示したエネルギー準位図から分かるように、青色光又は緑色光を吸収し(4A₂→4F₁、4F₂)、赤色光を発する(2E→4A₂)性質を有し、赤色光は主にR₁(波長694nm)、R₂(波長693nm)の二つの顕著な輝線から成る⁽⁹⁾。よって、TBCに青色光又は緑色光を照射した際の赤色の発光強度を測定することにより界面酸化層を検出できる。本手法は光ルミネッセンス法と称される。

従来、光ルミネッセンス測定には大型・大出力のレーザが用いられていたため、その適用は実験室環境に限られていたが、小型レーザを用いても測定が可能であることを明らかにし、現場適用が可能な可搬型装置の構築の見通しを得た⁽¹⁰⁾。

この結果に基づき、小型連続発振レーザ(波長532nm、最大出力200mW)と小型分光器を用いた可搬型の界面酸化層検出装置を試作した⁽¹¹⁾。本装置の構成を図11に示す。本装置は小型プローブで受送光を行うため、任意形状の表面の検査が可能である。

本装置を用いてTBC試験体の測定実験を行った。測定結果を図12に示す。図中aは試験体なし(ノイズレベル)、bは非加熱の試験体(溶射のままの状態)、cとdは空気中で1000°Cで加熱した試験体、eとfは空気中で1100°Cで加熱した試験体の測定結果であり、b～fはそ

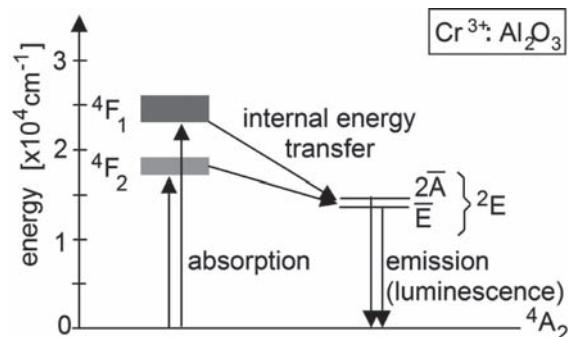


Fig.10 Energy level diagram of Cr³⁺ in Al₂O₃

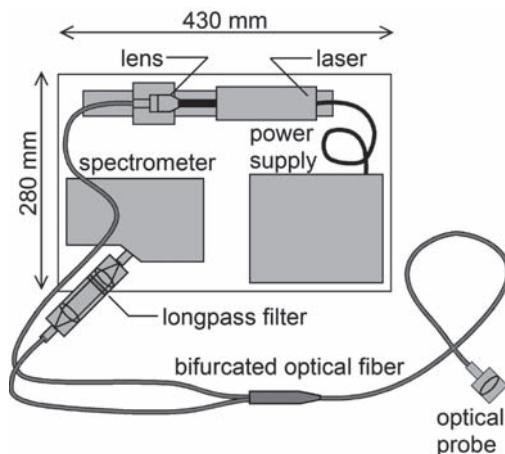


Fig.11 Schematic diagram of the portable device for detection of the thermally grown oxide layer⁽¹¹⁾

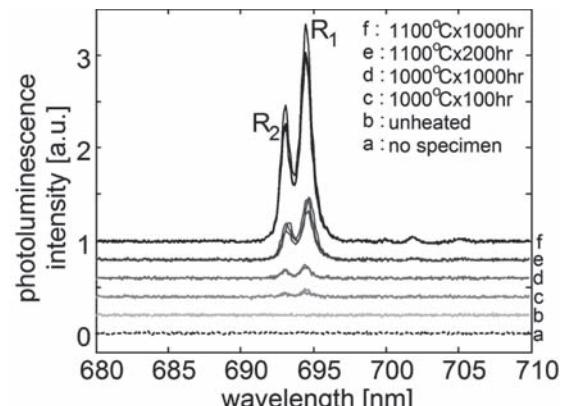


Fig.12 Photoluminescence measurement result of TBC specimens heated in air and unheated specimen⁽¹¹⁾

れぞれ3回の測定結果を重ね描きした。加熱した試験体からはCr³⁺の発光が確認され、加熱時間・温度とともに増加する傾向が見られた。一方、非加熱の試験体から発光は観察されなかった⁽¹¹⁾。

以上の結果から、本装置はトップコート上から界面酸化層を簡易検出できることを示した。本装置はトップコートはく離の可能性が高い箇所を特定するのに有効であると考えられる。

また、レーザ光と光ルミネッセンスはトップコート中において減衰するため、測定される光ルミネッセンス強

度はトップコート厚さに依存する。これまでに、トップコート中の減衰係数に基づき、厚さ補正が可能であること、トップコート厚さが約700 μm であっても光ルミネッセンス法が適用可能であることを明らかにした¹²。

2.4 基材の表面き裂検出

基材表面に発生したき裂は部品の機械強度低下を来たす可能性があるため、確実に検出する必要がある。TBC施工部品においては、基材表面き裂がTBCを貫通し、トップコート表面まで開口しない限り目視では確認できない。一方、渦電流法を用いればTBC下にある表面き裂を検出できる。渦電流法による表面き裂検出の概念図を図13に示す。

コイルに交流電流を印可して交流磁束を発生させると、基材表面に渦電流が発生する。基材表面にき裂が存在すると電流の妨げとなるため、渦電流に変化が生じる。渦電流によって生じる磁束はコイルの応答電流として検出され、き裂の有無によって異なる。本手法はコイルと基

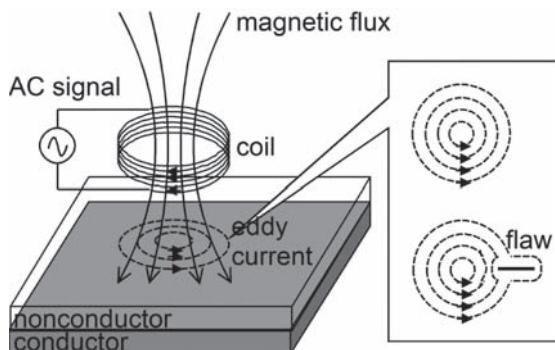
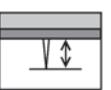
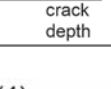


Fig.13 Schematic diagram of surface flaw detection by eddy current testing

Table 2 Specimens with artificial crack on the substrate surface¹³

specimen	crack depth [mm]	bondcoat thickness [mm]	topcoat thickness [mm]	
(1)	1	0	0.3	
(2)	2	0.2	0.3	
(3)	3	0	0.3	
(4)	3	0.2	0.3	

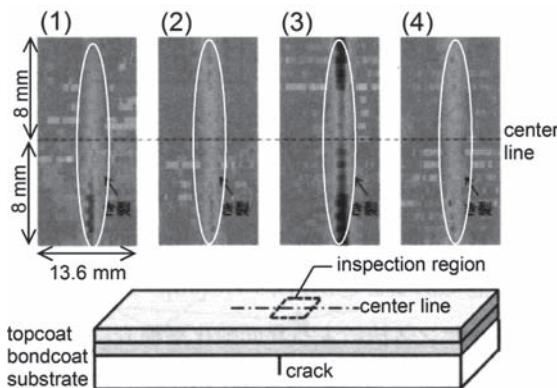


Fig.14 Measurement result of artificial crack on the substrate surface by eddy current testing¹³

材表面間にトップコート（絶縁体）が存在しても適用可能である。

模擬き裂を入れた基材上にTBCを施工した試験体(1)～(4)を作製し、渦電流法によるき裂検出実験を行った。各試験体の諸元を表2に、検査結果を図14に示す。試験体(2)と(4)ではき裂上に厚さ0.2mmのボンドコート（導電体）が存在するが、ボンドコート内に発生する渦電流による影響はほとんどなく、き裂の検出が可能であった¹³。

3. 検査フロー

以上の非破壊検査法を取り入れた、TBCが施工された高温部品の検査フローを図15に示す¹³。ここでは、渦電流法によって基材のき裂の有無を検査し、き裂がない場合は光ルミネッセンス法を用いた簡易検査とアクティブ・サーモグラフィを用いた精密検査でトップコートはく離を検出する。さらに、減肉検査が必要な場合はテラヘルツ波を用いた膜厚測定、熱抵抗検査が必要な場合はこの膜厚測定値に基づく検査を行う（大規模なはく離の発生がない場合、このステップは省略しても良いと考えられる）。以上の検査結果から基材の温度上昇と応力を評価し、許容温度・応力（経験値または数値解析値）との比較から補修の要否を判断する。また、許容温度・応力の替わりに、メーカ推奨補修基準を用いても良い。なお、フロー中に示した検査を全て行う必要はなく、必要なものを選択して個別に実施することも可能である。

この検査フローで合格した部品は継続使用が可能であると考えられるため、補修（TBCのリコーティング）周期の延長が図れる。即ち、一定の供用時間に基づき補修周期を設定するTBM（Time Based Maintenance）から、健全性評価に基づき補修周期を決定するCBM（Condition Based Maintenance）への移行が期待できる。

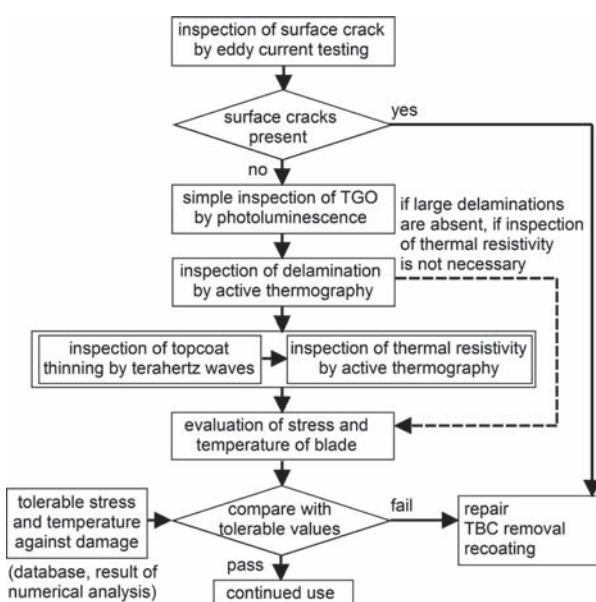


Fig.15 Proposed inspection flow of TBC based on nondestructive inspection technologies¹³

4. まとめ

TBCの非破壊検査技術として、テラヘルツ波を用いたトップコート膜厚測定、アクティブ・サーモグラフィを用いたトップコートはく離検査、光ルミネッセンス法を用いた界面酸化層検出、渦電流法を用いた基材表面き裂検出について概説し、これらを活用したTBCの検査フローを提案した。今後、これらの非破壊検査技術を活用することによって合理的な補修（リコーティング）周期の確立が期待される。

今後のTBCのリコーティング周期の合理化には、各損傷劣化の進展を予測する技術の開発が必要である。例えば、実機を模擬した実験データや実機での実測データを蓄積することによって、現在のTBCの状態に基づき、今後どの程度の運転時間又は起動停止回数でトップコートはく離に至るのかを予測することが可能となると考えられる。これに基づき、定期点検時における非破壊検査結果と次回点検までに予定されるガスタービンの運転条件などから、次回点検までの損傷の進展状況をある程度予測することが可能となる。

謝 辞

テラヘルツ波を用いたトップコート膜厚測定に関する研究は独立行政法人情報通信研究機構との共同研究で行いました。ご支援・ご協力頂いた情報通信研究機構の福永香氏、水野麻弥氏、および電力中央研究所の布施則一氏に謝意を表します。

参考文献

- (1) S. Bose: "High Temperature Coatings", Butterworth-Heinemann, Burlington (2007).
- (2) M. Boyce: "Gas Turbine Engineering Handbook", pp. 509-514, Butterworth-Heinemann, Waltham (2012).
- (3) 児島慶享:「ガスタービン遮熱コーティング開発の最新技術動向」、日本ガスタービン学会誌, Vol. 38, No. 2, pp. 85-90 (2010).
- (4) 福地哲生, 他:「テラヘルツ波を用いたガスタービン用遮熱コーティングのトップコート膜厚測定技術の開発」、電力中央研究所報告H08 (2015).
- (5) D. Mittleman (ed.): "Sensing with Terahertz Radiation", Springer, Berlin (2010).
- (6) 福地哲生, 他:「テラヘルツ波の反射測定による遮熱コーティングのトップコート屈折率・膜厚測定」、電気学会論文誌A, Vol. 132, No. 9, pp. 702-708 (2012).
- (7) 福地哲生, 他:「テラヘルツ波を用いたガスタービン翼遮熱コーティングのトップコート膜厚測定」、電気学会論文誌A, Vol. 133, No. 7, pp. 395-401 (2013).
- (8) 藤井智晴, 他:「ガスタービン用遮熱コーティングを対象としたはく離の非破壊検出手法の開発」、電力中央研究所報告M12002 (2013).
- (9) R. Powell: "Physics of Solid-State Laser Materials", pp. 237-253, Springer-Verlag, Berlin (1998).
- (10) 福地哲生, 他:「光ルミネッセンス法によるガスタービン用遮熱コーティングの界面酸化層検出技術の開発」、電力中央研究所報告H12011 (2013).
- (11) 福地哲生, 他:「光ルミネッセンス法によるガスタービン用遮熱コーティングの界面酸化層の可搬型検出システムの開発」、電力中央研究所報告H14006 (2015).
- (12) 福地哲生, 他:「遮熱コーティングの界面酸化層検出におけるトップコート透過率測定と感度評価」、電気学会論文誌A, Vol. 135, No. 4, pp. 191-197 (2015).
- (13) 藤井智晴, 他:「ガスタービン動翼のコーティングを対象とした非破壊検査手法の開発」、電力中央研究所報告M14006 (2015).

特集：第43回定期講演会（米子）特集

火力発電所の運転データからの異常予兆発見研究について —水力発電所における異常予兆発見のアナロジーとして—

小野田 崇*1
ONODA Takashi

キーワード：外れ値検出，サポートベクトルマシン，水力発電所，火力発電所

Outlier Detection, Support Vector Machine, Hydroelectric Power Plant, Thermal Power Plant

1. はじめに

近年、電力会社では機器の効率的な保守および保守費用の削減を目指して、メーカに推奨された保証期間前に機器を修理交換するという従来の時間計画保全から、機器をその劣化状態等によって修理交換するという状態監視保全への移行を模索し始めている^{(1)~(3)}。

状態監視保全を実践するためには、機器の正常状態のデータ、異常状態のデータ、および正常状態から異常状態へ移行途中のデータなどの収集が重要となる。状態監視の精度向上により、保守費用を削減するためには、どれだけ保守管理に利用できるデータを収集できるかが鍵となってくる。一方、従来から時間計画保全を実施してきた電力会社に蓄積されているデータには偏りがある。例えば、腕金錆びの画像に基づく腕金の再利用判別、ブレーカ汚れの画像に基づく洗浄可能/不可能の判別などで利用されている画像データの蓄積は十分にあり、その識別についてもある程度のノウハウが蓄積されている。しかし、発電プラントの運転データについては、正常状態のデータ数が多いものの、異常状態および正常状態から異常状態へ移行過程のデータの蓄積は殆んどなく、また、異常状態に関するデータの測定は容易ではない。

設備保守管理の中でも、特に、発電プラントの運転情報からの異常予兆の発見では、異常予兆の発見に必要なデータは、極めて稀な確率でしか発生しないことから、実際の運転中に異常や異常予兆の情報を収集することは難しく、また、実験による異常状態の生成も困難である。そのため、現状の設備で異常状態のデータが蓄積できるまで、膨大な正常運転状態のデータのみに基づいて設備異常の予兆を検知できる方法が必要となる。

設備異常の予兆を発見する方法の一つとして、運転情報と異常が起こっては困るような部位の振動などとの因果関係を明確にしていくというアプローチが考えられ

る。しかしながら、各部位の動き、温度などと各種センサデータとの因果関係は複雑であること、異常が起きた際のセンサデータが存在しないことなどが原因となって、各部位の動き、温度、異常とセンサデータとの因果関係の明確化は非常に困難である。

本稿では、参考文献(4)で述べられている水力発電所における異常予兆発見支援ツールの開発の概要を述べるとともに、そこで述べられている異常予兆発見アプローチの火力発電所における異常予兆発見への適用可能性について述べる。

以下、2章で水力発電所データ用に開発した発電プラント異常予兆発見方法について紹介し、3章で実際の水力発電所運転データに開発した方法を適用した結果について報告する。4章では、開発した異常予兆発見方法の火力発電所運転データへの適用可能性、および、火力発電所運転データからの異常予兆発見研究の今後について検討する。

2. 異常予兆発見のアプローチ

参考文献(4)で提案されている水力発電所の異常予兆発見アプローチのイメージを図1に示す。提案されたアプローチは主に、「例外状態データ抽出機能」と「異常予兆候補データ発生追跡機能」の二つの機能と、発見された例外状態データの中から現場技術員が発電所にとって異常予兆の候補となるデータ（これが、異常予兆候補データ）を選定するフェーズで構成される。一般に、水力発電所において異常事象はほとんど起こらない。そのため、異常事象の予兆を表す事象もほとんど起こらないということになる。そこで、我々は異常事象が滅多に起こらない水力発電所における異常予兆を次のように考えることとした。

異常予兆=異常予兆候補データが増加傾向
上記の考えによる異常予兆を発見するには、以下の二つの機能を実現しなければならない。

(1)異常事象を含まない正常状態データからの異常予兆候補データの選定。

原稿受付 2015年11月10日

*1 (一財)電力中央研究所
システム技術研究所
〒201-8511 狛江市岩戸北2-11-1

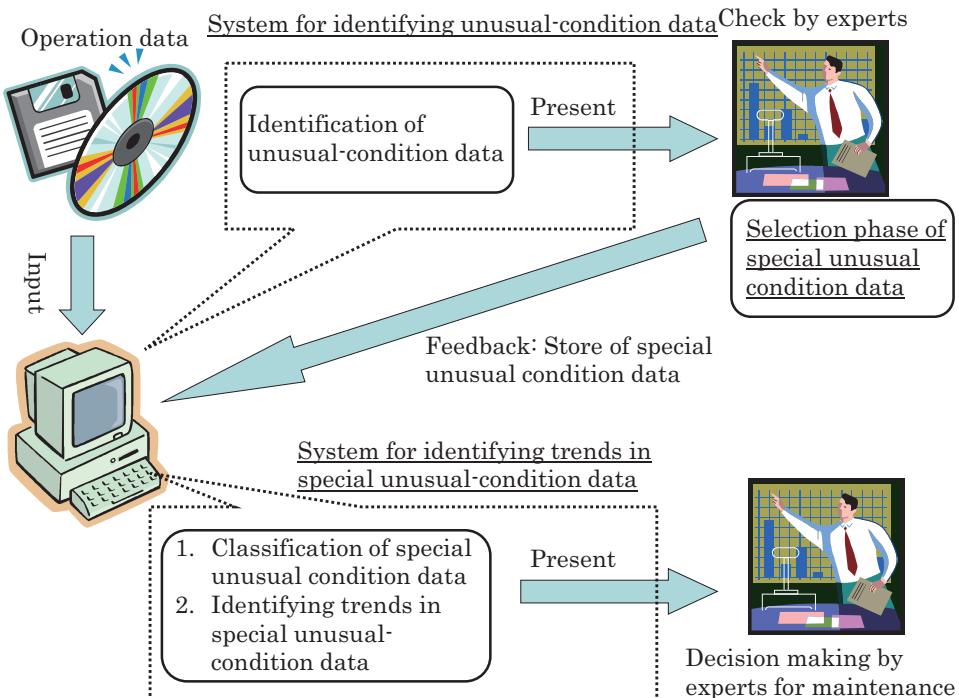


Fig. 1 Image of Special Unusual Condition Data Detection

(2)オンラインで新たに収集される運転データ中の異常予兆候補データの類似データの発生数の把握。

上記(1)を実現するためには、大量にある正常状態データ中から存在確率が低く、水力発電所の異常予兆を表すようなデータを抽出する外れ値検出アルゴリズムが必要となる。また、上記(2)を実現するには、(1)が実現された後に得られる異常予兆候補データと通常状態データ（正常状態データから異常予兆候補データを除いたデータ）とを精度高く分類できるアルゴリズムが必要となる。つまり、開発アプローチの利用イメージとしては、異常事象を含まない正常状態データ1年分から異常予兆候補データを開発ツールと現場技術員とで選定し、翌年以降の運転データに異常予兆候補データに類似したデータがどれくらい現れるかによって、水力発電所の異常予兆を把握するものである。例えば、異常予兆候補データに類似したデータの発生率が毎月変わらないなら、異常の予兆はないと判断し、急にその発生率が増加したら何らかの異常予兆を表していると判断するのである。

以下では、上記(1)を実現する「例外状態データ抽出機能」と上記(2)を実現する「異常予兆候補データ発生追跡機能」について述べる。

2.1 例外状態データ抽出機能

今迄に収集された水力発電所の運転データについては、異常や故障時のデータ（以下、異常状態データ）が存在しないと仮定する。そのため、水力発電所の軸受関連センサデータからの異常予兆の発見において、異常事象時のデータと正常状態データとの比較分析に基づき、異常予兆を表す特異な現象を抽出・特定することは不可能である。そこで、正常状態データを、通常状態のデータと

この通常状態データから外れ、異常予兆を表すようなデータ（例外状態データ）で構成されているとする。正常状態データから例外状態データを抽出するイメージを図2に示す。図2中、灰色の円領域が覆う領域にあるデータは、全て正常状態データである。図2中の数字は例を示している。例外状態データ抽出機能にとっては、この正常状態データから例外状態データを抽出する方法の実現が重要となる。例外状態データ抽出方法としては、例えば図2にあるように、正常状態データの99.99%を覆う円を発見し、その領域を通常状態データとして、この通常状態データ領域から外れた0.01%のデータを例外状態データと考えるという方法が考えられる。この通常状態データと例外状態データとの境界を見つける方法として、参考文献(4)では1-クラス サポートベクトルマシンが用いられている^{(5),(6)}。

2.2 異常予兆候補データ発生傾向追跡機能

発生傾向追跡支援のイメージを図3に示す。この機能

- Unusual condition data detection in usual condition data

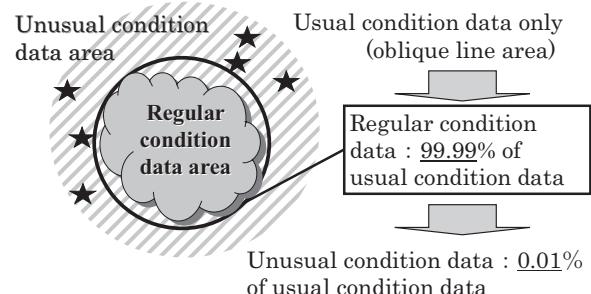


Fig. 2 Image of unusual condition data detection

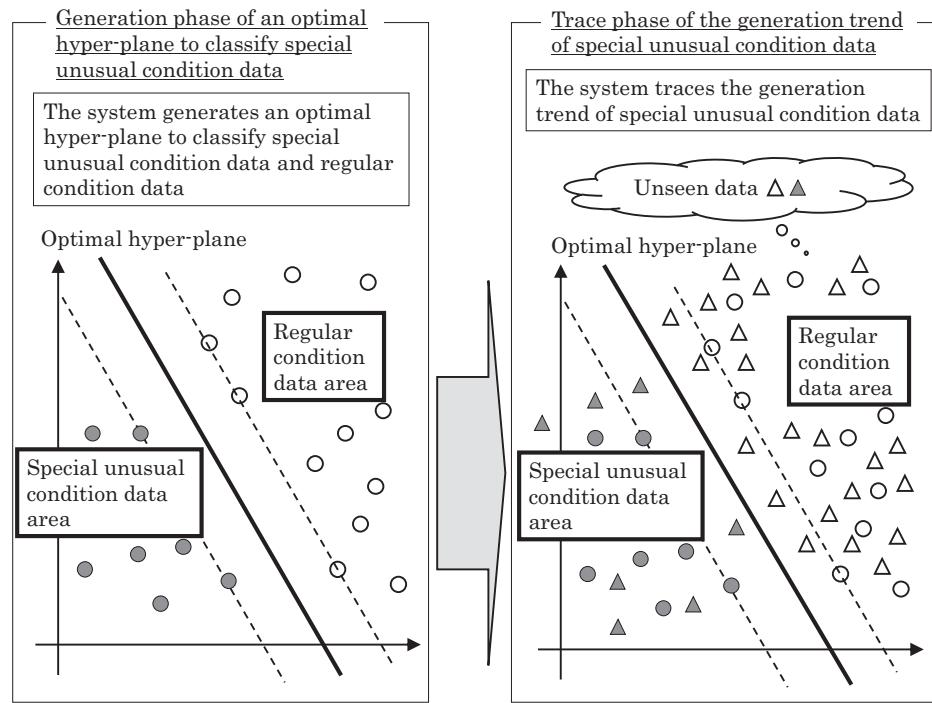


Fig. 3 Trace of the generation trend of special unusual condition data: Circles are selected trouble condition sign candidates. Gray circles are special unusual condition data and white circles are regular condition data. Grey triangles are unseen data classified as special unusual condition data. White triangles are unseen data classified as regular condition data.

は、図3の左側にある異常予兆候補データを識別する関数の生成時と図3の右側にある発生傾向追跡時の二つの工程で構成される。異常予兆候補データを識別する関数の生成時とは、現場技術員が決定した異常予兆候補データと通常状態データ（正常状態データ-異常予兆候補データ）に基づき、異常予兆候補データと通常状態データとを識別する関数を生成する工程を表す。また、発生傾向追跡時とは、次々計測されるセンサ情報が異常予兆候補データに類似するかどうかを識別し、異常予兆候補データと類似するデータの件数を計数して、提示する工程を表す。異常予兆候補データ類似データ発生傾向追跡機能では、異常予兆候補データと通常状態データとを精度高く識別することが重要となる。参考文献(4)では、この識別器にサポートベクトルマシン（SVM）を採用している^{(6),(7)}。SVMとは、Vapnikによって提案されたマージン最大化とカーネル法に基づく高性能パターン識別手法である。

2.3 異常予兆候補データ発生傾向追跡方法

異常予兆候補データ発生傾向追跡方法は、最初に例外状態データ機能で抽出した例外状態データの中から、現場技術員によって選定された異常予兆候補データと、通常状態データとを分離する判別関数を前述した線形SVMで求める。例外状態データ抽出機能が観測空間上で例外状態データを抽出するため、抽出された例外状態データに含まれていた異常予兆候補データと、通常状態データとは観測空間上で完全に分離できる。その様子を示したのが図4の左側である。新たな運転データが観測

された場合、そのデータは観測空間上にマップされ、判別関数を境界として異常予兆候補データ領域に入るか、通常状態データ領域に入るのかが決定される。図4の右側では、灰色の三角は新たな運転データで異常予兆候補データ領域に入るデータを表し、白色の三角は新たな運転データで通常状態データ領域に入るデータを表す。このようにして、異常予兆候補データ発生傾向追跡方法は、新たなセンサデータに対する異常予兆候補データの発生数、発生率を計算することが可能であり、それらの情報を現場技術員に提示することができる。

この提案アプローチを使うことにより、例えば、最初1年間は運転データを収集し、その1年分のデータから異常予兆候補データを選定し、翌年以降はこの異常予兆候補データに類似したデータの発生傾向を現場技術員に示すことにより、異常予兆の発見を支援することが可能となる。

3. 水力発電所の実データによる異常予兆発見の実験

ここでは、九州電力(株)宮崎電力所で収集された2006、2007年度の二つの水力発電所の運転データに、提案した異常予兆発見支援方法を適用した結果について述べる。

3.1 観測データ

参考文献(4)で提案されたアプローチの有効性検証の対象とした水力発電所のデータは、A発電所およびB発電所の2006年度から2007年度の運転データである。提案アプローチの有効性検証の対象としたデータは、2006年6月14日から2008年1月31日まで収集されたA発電所の運

転データと、2006年4月1日から2008年1月31日まで収集されたB発電所の運転データである。この運転データは、両発電所に設置されているセンサにより、測定間隔5秒で測定された値がオンラインで九州電力宮崎電力所に送られ、収集されたデータである。A発電所の一つの運転データは、48個のセンサの値で構成され、B発電所のそれは、44個のセンサの値で構成されている。

A発電所、B発電所とも様々なセンサが付けられているが、水力発電所では軸受に関連する異常予兆を発見することが非常に重要である。軸受以外の異常については機器の交換等で対処できるものの、軸受の異常は対象水力発電所全体の再構成に直結するため、軸受に関連する異常予兆を発見することが非常に重要となる。有効性検証に用いるデータは、軸受に関連し、両発電所に共通するセンサデータ項目で構成することとした。具体的には、現場技術員の軸受の振動に関する知見に基づき、両発電所について、以下の項目から構成されるデータを有効性検証のために用意した。

利用するデータ属性：

「発生電力」、「回転速度」、「上部軸受油温」、「オイルクーラー入口空気温度」、「水車軸受油温」、「スラスト軸受温度」、「下部油槽油温度」、「下部軸受入気温度」、「水車軸振(X軸)」、「上部振動(垂直)」、「上部振動(水平)」、「下部振動(垂直)」、「下部振動(水平)」、「水車振動(垂直)」、「水車振動(水平)」の14項目。

5秒間隔で測定される上記の各センサデータ項目の値(センサ値)が入力となる。

また、運転データには四つの異なる運転状態、起動時、並列時、解列時、停止時があるため、運転データを運転状態ごとに分類した。全てを同じ条件のデータとして扱うと、データ数が相対的に少なく、軸受の振動が大きい起動時、解列時のデータのみが例外状態データとして抽出されてしまうためである。

3.2 適用条件

参考文献(4)で提案されたアプローチの有効性検証の実験には、2006年6月14日から2008年1月31日までのA発電所運転データと2006年4月1日から2008年1月31日までのB発電所運転データを使用した。実際は、異常予兆候補データを選定するために、2006年6月14日から2007年5月31日までのA発電所運転データと2006年4月1日から2007年3月31日までのB発電所運転データを使用し、異常予兆候補データ類似データ発生状況の追跡実験のために、2007年6月1日から2008年1月31日までのA発電所運転データと2007年4月1日から2008年1月31日までのB発電所運転データを使用した。このような期間の運転データを「起動時」、「並列時」、「解列時」の3つの運転状態に分けて、各状態の運転データに開発ツールを適用した。ただし、「停止時」には軸受が回転状態にないため、当該運転状態データに対する開発ツールの適用は行わなかった。また、「起動時」、「解列時」は5

秒間隔の測定値をそのまま利用し、「並列時」は、収集データが非常に多かったので、15秒間隔の測定値を利用した。

3.3 異常予兆候補データの選定実験

A発電所の2006年6月14日から2007年5月31日までの「起動時」、「並列時」、「解列時」状態の各運転データとB発電所の2006年4月1日から2007年3月31日までの「起動時」、「並列時」、「解列時」状態の各運転データに提案アプローチの例外状態データ抽出機能を適用した。例外状態データ抽出の割合は、18件程度の例外状態データを抽出するように調整した。この例外状態データ抽出件数の18件は、B発電所の2005年4月1日から2006年3月31日までの運転データによる予備実験で次のように決定した。少ない例外状態データ抽出件数から徐々に抽出件数を増加させ、データを抽出するごとに現場技術員にそのデータを提示して、追加抽出されたデータを現場技術員が通常状態データであると判断できた時点で抽出をやめ、通常状態データと判断できたデータの一つ前までの抽出件数を今後の例外状態抽出件数とする。つまり、異常予兆とも、通常状態データとも現場技術員が判断できない例外状態データのみを含んでいる状況のおおよその件数である。

3.4 異常予兆候補データ発生傾向の追跡

A発電所の2006年6月14日から2007年5月31日までの運転データから抽出した異常予兆候補データが、2007年6月1日から2008年1月31日までの運転データ中にどの程度発生しているかを追跡するため、開発ツールの異常予兆候補データ発生傾向追跡機能を適用した。また、B発電所の2006年4月1日から2007年3月31日までの運転データから抽出した異常予兆候補データが、2007年4月1日から2008年1月31日までの運転データ中にどの程度発生しているかを追跡するため、提案アプローチの異常予兆候補データ発生傾向追跡機能を適用した。

3.5 A発電所における実験結果の考察

2007年4月1日から2008年1月31日までの並列時運転データに異常予兆候補データ発生傾向追跡機能を適用し、そのデータ中の異常候補データ類似データの発生率を計算した。並列時運転データにおける各月の異常予兆候補データ類似データの発生数、発生率ならびに2006年4月1日から2007年3月31日における例外状態データ抽出率を表1に示す。

一般的に、参考文献(4)で提案されているアプローチは翌年の異常予兆候補データに類似したデータ発生率は、前年の例外状態データ抽出率とほぼ同じくらいか、やや大きめの値になる。しかし、表1から、A発電所では2006年度の例外状態データ抽出率の平均値より2007年度の異常予兆候補データ類似データ発生率の平均値(Average)が小さいことがわかる。これは、A発電所の2006年度正常状態運転データに、一般的な年度には現れないような非常に特殊な例外状態データが含まれてい

Table 1 Generation rate of special unusual condition data in the parallel condition for "A" hydroelectric power plant

Month	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.
No. of generation data	0	7	0	0
No. of data	64250	155195	79328	83496
Generation rate (%)	0.0000	0.0045	0.0000	0.0000
Detection rate (%)	0.0000	0.0085	0.0034	0.0010
Month	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.
No. of generation data	1	0	0	0
No. of data	74536	80453	99714	61580
Generation rate (%)	0.0013	0.0000	0.0000	0.0000
Detection rate (%)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Average				
No. of generation data	1.00			
No. of data	873919.00			
Generation rate (%)	0.0007			
Detection rate (%)	0.0016			

たと考えられる。

そこで、A発電所の2006年度並列時運転データ中から抽出された例外状態データを現場技術員に提示し、計算機には入力されない運転状況や修繕作業実績等を調査した結果、開発ツールが抽出した例外状態データの発生した時点と軸受から油漏れを発見した時点とが一致していることが確認できた。上記の結果は、開発ツールが「例外状態データ抽出機能で抽出する例外状態データを現場技術員に提示することにより、現場技術員が修繕の必要ありと判断するような状況を見落とすリスクを回避できることを示している。

3.6 B発電所における実験結果の考察

2007年4月1日から2008年1月31日までの並列時運転データに異常予兆候補データ発生傾向追跡機能を適用し、そのデータ中の異常予兆候補データ類似データの発生率を計算した。並列時運転データにおける各月の異常予兆候補データ類似データの発生数、発生率ならびに2006年4月1日から2007年3月31における例外状態データ抽出率を表2に示す。

発電所の2006年度のデータに対する例外状態データ抽出率と異常予兆候補データ類似データ発生率の平均値を比較すると、表2より、例外状態データ抽出率より異常予兆候補データ類似データ発生率の方が大きいことがわかる。さらに、表2から、7月に異常予兆候補データ類似データの発生率が非常に高いことがわかる。この2007年度7月の運転データを詳細に分析した結果、異常予兆候補データに類似するデータの発生が7月15日に集中していることが確認できた。このときの異常予兆候補データに類似するデータは、温度に関するセンサ値が高く、振動に関するセンサ値も大きいデータであった。7月15日の水車振動（垂直）の時間変化をグラフにすると図4のようになる。図4の10時から11時くらいまでの水車振動

Table 2 Generation rate of special unusual condition data in the parallel condition for "B" hydroelectric power plant

Month	Apr.	May	Jun.	Jul.
No. of generation data	1	0	1	177
No. of data	86485	154839	113963	168666
Generation rate (%)	0.0012	0.0000	0.0018	0.1168
Detection rate (%)	0.0088	0.0000	0.0000	0.0011
Month	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.
No. of generation data	6	0	1	0
No. of data	168599	129222	64788	47352
Generation rate (%)	0.0030	0.0000	0.0015	0.0000
Detection rate (%)	0.0006	0.0006	0.0000	0.0000
Month	Dec.	Jan.	Average	
No. of generation data	0	0	20.50	
No. of data	22438	51209	100756.10	
Generation rate (%)	0.0000	0.0000	0.0112	
Detection rate (%)			0.0011	

July 15th in 2007

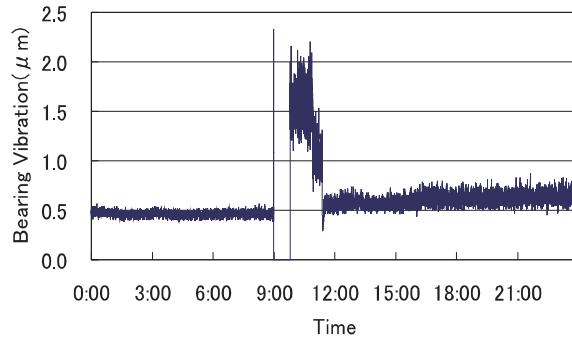


Fig. 4 Vibration of waterwheel on 15th of July in 2007

July 3rd in 2007

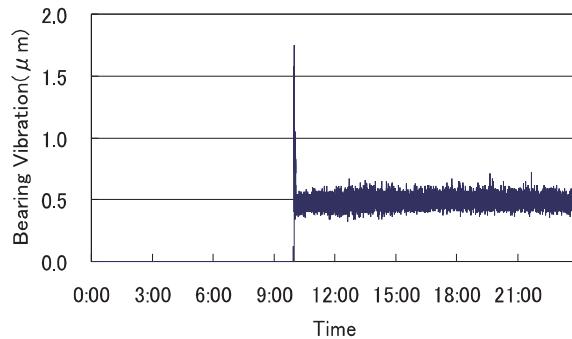


Fig. 5 Vibration of waterwheel on 3rd of July in 2007

（垂直）が大きい箇所約190点が異常予兆候補データ類似データと判断されていた。通常の起動時から並列時へ移行する際の水車振動（垂直）の様子を図5に示す。図4と図5を比較すると、7月15日の水車振動（垂直）は明らかに通常状態とは異なっている。この結果は、開発方法により通常状態からは外れた異常予兆の候補の一つを見つけることができる示している。

4. 火力発電所運転データからの異常予兆発見について

本章では、水力発電所用に開発した異常予兆発見方法の火力発電所運転データへの適用可能性、および、火力発電所運転データからの異常予兆発見研究の今後について述べる。

2. 3章で紹介した水力発電所用の異常予兆発見方法は、以下の仮定が成り立つことを前提としている。

異常予兆＝異常予兆候補データが増加傾向

これは、水力発電所において異常事象はほとんど起こらず、異常事象の予兆を表す事象もほとんど起こらないため、起こったことの無い異常予兆を、今までとは異なるデータが増加してきたら異常予兆と考えるということを表している。実際には、この仮定の「異常予兆候補データが増加傾向」には、水力発電所では10数年間に一回のオーバーホールの頻度であり、発電所の状態が10数年間変わらないことを仮定している。

一方、火力発電所は通常、1年または2年に一回の頻度でオーバーホールが実施される。そのため、発電所の状態が少なくとも2年に1回は変わってしまう。これは、一年分のデータから異常予兆候補となるデータを選択できても、翌年以降にこの異常予兆候補データと同じ値をとるデータが異常予兆候補データとなるとは限らないことを意味する。つまり、簡単にはここで紹介した方法は使えないということである。

しかし、ここで開発した方法が全く使えないというわけではない。水力発電所の異常予兆を発見するために、まず一年分のデータが必要な理由は、水温等が軸受振動に影響するため、四季の温度差によって、異常と判断することができないようにするためにあった。これは10数年間に1回のオーバーホールを行うという水力発電所の特性を考えての選択である。火力発電所において、ここで紹介した方法を利用するには、異常予兆発見における外気温等の影響を抑えるために、外気温等に依存しない計測データのみを利用するか、あるいは、外気温等に依存する計測データを、外気温等との相対的な値とするという方法がある。このような計測データを対象とすることで、1ヶ月ほどのデータの傾向から、残り11ヶ月のデータ中から異常予兆の発見が可能となる。

原子力発電所がベース電源として稼働していない現在、火力発電所は従来にない過酷な状況での運転を行っている。このような状況下で蓄積される各種計測データである運転データも従来にないパターンの運転データになっているに違いなく、なかなか過去の経験が活かしにくい状況にある。しかし、現在は非常に詳細な運転データを短い間隔で計測・収集することが可能となっており、今後は、この大量の運転データに基づく、火力発電所の特性を考慮した異常予兆の発見を可能とする方法の研究開発が重要となってくるであろう。また、大量の運転データが利用できる環境では、観測された大量のデータをい

かに利用するかが重要となる。特に、大量のデータを利用して、平均的な状態からのずれを考えるのか、大量データの境界の状態を考えるのかによって、異常に対するリスクの考え方方が大きく異なる。今後はリスクと利用する方法との関係についても十分考慮する必要がある。

火力発電所は大きく汽力発電とコンバインドに分けられる。さらに、汽力発電がその燃料の違いにより、重油、LNG、石炭火力に分けられ、コンバインドはコンバインド、ACC、MACC、MACC IIに分けられる。各火力発電で運転中に特に注視すべき箇所が異なると考えられるため、注視すべき箇所を特定し、その箇所での異常予兆の発見が可能な方法の開発が重要である。例えば、石炭火力発電所においては、従来にない運転を行っているために脱硫装置の目詰まりによって、出力低下が余儀なくされるなど、各火力発電で安定した運転を継続するための注視箇所を特定することが重要である。

5. まとめ

本稿では、我々が開発した水力発電所の異常予兆発見アプローチを紹介するとともに、その火力発電所への適用について議論した。また、火力発電所運転データからの異常予兆発見研究の今後について検討した。

6. 引用文献

- (1) M. Yamana, H. Murata, T. Onoda, T. Oohashi & S. Kato: Comparison of pattern classification methods in system for crossarm reuse judgement on the basis of rust images, Proceedings of Artificial Intelligence and Applications 2005, pp. 439-444 (2005).
- (2) Jardine AKS: Repairable system reliability: Recent developments in CBM optimization, Proceedings of 19th International Congress and Exhibition on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management (COMADEM), Luleå, Sweden (June 13-15, 2006).
- (3) Tsang AHC, Yeung W K, Jardine AKS & Leung P K, Data management for CBM optimization, Journal of Quality in Maintenance Engineering, 12, pp.37-51 (2006).
- (4) 小野田崇, 伊藤憲彦, 是枝英明, “水力発電所における異常予兆発見支援ツールの開発”, 電気学会D部門論文誌, Vol. 131, No. 4, pp.448-457, 2011.
- (5) D. M. J. Tax, A. Ypma, & R.P.W. Duin: Support vector data description applied to machine vibration analysis, Proceedings of 5th Annual Conference of the Advanced School for Computing and Imaging, pp. 398-405 (June 15-17, 1999).
- (6) 小野田崇:「サポートベクターマシン」, オーム社 (2007)
- (7) V. N. Vapnik, Statistical Learning Theory, Wiley, New York (1998).

特集：第43回定期講演会（米子）特集

ガスタービン監視データを有効活用した 状態変化早期検知システムの紹介 —履歴データによるガスタービン状態モデル化解析技術—

田邊 悟^{*1}
TANABE Satoru渡部 匠^{*1}
WATANABE Takumi

キーワード：Gas Turbine, Condition Monitoring, Early Warning System
ガスタービン、状態監視、早期検知システム

1. はじめに

ガスタービンは他の回転機械と比較して構造が複雑で、さまざまな起動・負荷条件下にて運転される為、設備異常の早期検知が難しいとされている。また、何らかの異常が顕在化した時には、部品の破損が生じているなど、機械を緊急停止せざるを得ない場合が多い。通常、ガスタービンでは、プラントヒストリヤンシステムなどを用いて設備状態データを常時監視、履歴の蓄積をしているが、蓄積したデータの活用の観点では課題が多い。プラントヒストリヤンシステムなどに長期間蓄積された履歴データを活用して、ガスタービンの設備状態をモデル化する技術に加え、多数の監視パラメータを同時解析できるソフトウェアを組み合わせ、ガスタービンの早期状態変化の検知を可能とした最新ガスタービン監視システムの概要を紹介する。

2. システムの概要

本システムの基本機能は、ガスタービン運転履歴のモデル化と異常兆候を検知した際の解析機能である。ガスタービン運転履歴のモデル化とはプラントヒストリヤンに蓄積されている計測パラメータの履歴情報を用いガスタービンの過去の運転状態をモデル化することである。このガスタービン毎に作成される固有モデルにより予測された値と現在の運転状態での値との比較を行う。もしモデル値と現在値との間に差異があれば、異常の早期兆候として警報が出力される。もう1つの基本機能である解析機能とは、異常兆候を示しているパラメータを解析し、検知されている異常兆候の推定要因を示し、ガスタービンの重故障発生以前に対策の実施を可能とする。

2.1 ガスタービン運転履歴のモデル化

多変数モデル化技術は多く存在しているが、その中で本システムではSimilarity Based Modeling (SMB) を採

用している。SMBは多種・大量のデータをモデル化する場合に、特にモデルの予測精度に関して他の方法と比較して優位性がある。ガスタービンの異常検知では、ガスタービン本体のみならず、潤滑油供給システム等のサブシステムも含めて監視する必要があるため、非常に多くのセンサからの情報を取り扱う事になる。さらに、すべてのセンサからの情報を運転履歴データとして長期間蓄積されると膨大な情報量となるため、SMBは最適なモデル化手法であると言える。

ガスタービン運転履歴のモデル化には、モデル精度を向上させるために長期間の履歴データを対象とすることが望ましい。その反面、モデル化完了まで、より多くの時間、労力も必要となることから、1つのガスタービン運転履歴モデルを作成する負担も大きくなる。弊社では、ガスタービンメーカーとしての知見を活かし、ガスタービン特有の故障モードに関連性の強い計測パラメータおよび相関関係のある計測パラメータをグループ化することにより体系的にモデル化を行い、効率化を図っている。尚、一度作成されたガスタービンの運転モデルは、設備自体に大幅な設備改造がない限りにおいては継続して使用することが出来る。定期開放点検前後の差異については、かつてはモデルの再調整の必要があったが、現在のシステムでは自動調整機能によりモデル調整の必要はない。

ガスタービンは、起動条件、運転負荷がガスタービンの設備状態に影響を与える為に、諸条件を考慮した監視が望まれる。しかしながら、従来の監視手法では、個々の計測パラメータに対して、すべて運転条件に共通した警報設定値が設定されている。この為、警報管理による異常早期検知が難しい。本システムのガスタービン運転履歴モデル化では、各運転条件における過去の傾向に加え、関連パラメータとの相関を考慮した変動許容範囲を導き出す。これをダイナミックバンドアラームと呼ぶ。

2.2 ガスタービンの異常早期検知・解析機能

本システムの運用開始後には、監視対象となっている

原稿受付 2015年12月7日

*1 GEエナジージャパン(株)

〒104-6023 中央区晴海1-8-10

全ての計測パラメータに対してダイナミックバンドアラームが設定され、これらを基準として全計測パラメータが同時監視される。システム上、ダイナミックバンドアラームを超過したパラメータが認識されると5段階の深刻度と共に警報が出力される。これが、ガスタービンの異常早期検知を示す警報となる。警報の深刻度の決定には、複数の基準を設けており、例えば、モデル値と実測値の差分の大きさ、乖離の継続時間、相関グループ内の複数のパラメータにてモデル値と実測値に乖離が見られる場合などを考慮している。最も深刻度の高い警報が出力された場合においても、十分な時間的余裕を持って要因調査、対策実施が可能である。過去の実績では、異常が顕著化する数週間から数ヶ月以前には、システム上で異常兆候を検知可能であった。

警報が出力された際には、システム上に警報深刻度と共に警報の検知された箇所および推定要因が示される。解析ロジックは弊社のガスタービンに対する知見を基にマトリックス化しており、警報を検知したパラメータの種類および数を解析マトリックスに照会して推定要因を推測する。尚、解析用マトリックスは、タービン機種別に準備されており、機種別の構造的違い、標準的な計測パラメータの違いを考慮している。

通常、解析結果に従い対策を実施後、実施した対策についての効果、有効性の検証が必要となる。本システムでは、履歴モデル基準による監視は警報出力後にも継続していることから、警報を検知した計測パラメータが対策実施後に、ダイナミックバンドアラーム範囲内にて再び推移している事が確認できれば、設備状態としては連続運転可能な状態に復帰していると評価できる。

3. システム運用

本システムの運用方法は、ユーザによる自主管理運用方法と弊社にてデータ管理、監視業務を担当する委託管理型運用方法がある。運用方法の違いによりシステムの構成、サポートサービス内容も異なり、ユーザの要望に合わせて選択可能である。

3.1 自主管理型運用方法

システムサーバをユーザのサイトに設置。日常監視、警報が出力された際の対応すべてユーザによる自主管

理に基づく運用方法。ガスタービンの運転履歴モデル化を行う際にのみプラントヒストリヤンに蓄積されている履歴データを弊社まで提供いただくが、モデル化完了後、システムをサイトに導入以降は、システムサーバがプラントヒストリヤンから直接データを取得し監視する。サイト内にてデータの受け渡しが完結する為に、非常にデータ管理の厳しい環境においては、こちらの運用方法が選択される。尚、ユーザによるシステムの自主管理が基本となることから、システムの教育、日常管理などユーザにて負担しなければならない。

3.2 委託管理型運用方法

データ管理、日常監視、警報が出力された際の対応をすべて弊社が委託管理する運用方法。システムサーバはユーザの状況によりサイトに設置する場合と、クラウドサービスを使う場合がある。クラウドサービスを用いた場合にはクラウド上にプラントヒストリヤンのデータ送信する方法となるため、サイトにはシステムハードウェアを設置しない。委託管理型運用では、警報が出力した際には専門技術者による速やかなスクリーニングが可能であることと、事象の改善に向けたサポートサービスを提供することが可能である。ユーザの負担を軽減し、本システムを最大限有効活用いただける運用方法であると考えている。

4. まとめ

本システムは、すでに導入実績も多数あり、高度なモデル化技術および優れた解析機能は世界中の多くのユーザにご支持いただいている。

ガスタービン運転履歴データの有効活用は、非常に注目されており、今後は更に成長が期待される分野である。製品機能の継続的な改善、サービスの向上に努め、ガスタービンの安全で、計画的な運用に貢献できれば幸いである。

参考文献

- 1) David Adams: SmartSignal Presentation at Korean Rotating Equipment Machinery Association (KRMEA) 2014.



学校で習わない英語 (3)

吉中 司*1

YOSHINAKA Tsukasa

—B—章 (続き)

〔英語〕 : Where is the beef?

〔意味〕 : 「重要なものは何処にある?」, 「中核になるべきものは何処にある?」

〔説明〕 : この言葉の歴史は非常に浅く、1984年に誕生しました。アメリカの、或る後発ハンバーガー・チェーンのテレビのコマーシャルで、モデルが競争相手のハンバーガーを手に持って、「一体、何処にビーフが入ってんのよ。」と不満を言う、という筋書きです(参考資料1)。これがヒットして、流行語になったのです。そして、ビーフがビーフでなくなり、何か大切なものの、例えば話の本旨とか、計画の中核とか、の意味に使われるようになりました。

ですから、重要な点の抜けた、下手に書かれたレポートを読みながら、「一体、こいつ、何を言いたいんだ。」と感じる場合、“Where is the beef?”と、不平を言えるのです。

〔英語〕 : Passing the buck

〔意味〕 : 「責任や役目を逃れる」

〔説明〕 : 「バック」には、幾つか意味がありますが、よく使われるのは二つ。その一つはアメリカドルの事で、もう一つは牡鹿です。しかし、今の場合は、そういう意味ではなく、ポーカー・ゲームでディーラーの役を示す印です(参考資料1)。ですから、“Passing the buck”は、その印を隣のプレーヤーに渡すという意味になります。

上の話からの転用で、会話では「責任や役目を逃れる」意味に使われます。例えば、職場の中とか、同好会の仲間同士で、誰は何をすると役割を決める際に、「いや、一寸このところ多忙なもんで…」とか、「最近、一寸身体をこわしていて…」と言って断る人がいますが、こういう際に、「あいつ、責任逃れをしやがって…」と感じる時に、英語で“He is passing the buck.”と言えます。

この言葉、断る理由が正当な場合でなく、何とか理屈をつけて責任を回避する際にのみ、使われるようです。

〔英語〕 : To hit a bull's eye

〔意味〕 : 「的に命中する」

〔説明〕 : 洋の東西を問わず、弓や射撃、ひいてはパブにあるダーツの的は、黒と白(又はカラー)で画かれた同心円で、その中心に小さい黒の真円があります。これこそ目的です。これが牡牛の眼に似ているところから、英語では“a bull's eye”と言われます。

この言葉は、文字通りすると、「的に命中する」となりますが、日常での使い方は、弓、射撃、ダーツなどには限りません。例えば、先生の質問に対して、或る生徒が正しい答えを簡潔・明快にした場合、先生は非常に満足され、「正解だ。文句の付けようがない。」と仰ることでしょう。これを英語で、“You hit a bull's eye.”と言えるのです。

ところで、この“Bull's eye”，名詞ですが、形容詞として使われる場合もあります。例えば、或る実験用ロケットの回収カプセルが、打ち上げ数時間後に、予定領域の真に中に着水しました。これを報告した業界誌に、“The recovery capsule made a bull's-eye splash in the Pacific Ocean.”とありました(参考資料3)。

参考資料

1. QPB (Quarterly Paper Book Club) Encyclopedia of Word and Phrase Origins", by Robert Hendrickson, published by Facts On File, 2nd Edition, (2004).
3. "Aviation Week eBulletin" Aviation Week.com/awst, December 8, 2014.

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

2015年9月8日(木)、9日(木)に鳥取県米子市の米子コンベンションセンターで開催されました第43回日本ガスタービン学会定期講演会で実施いたしました「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：4件、多重スケール関係：4件、サイクル関係：3件の合計11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。

- 早稲田大学大学院 基幹理工学研究科 修士課程2年 山本 姫子君
講演題目：「弱旋回燃焼器における燃焼振動の音響モード解析」

授賞式は、当日の夜に開催された懇親会にて行われ、田沼唯士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11編の発表はいずれも素晴らしい、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

弱旋回燃焼器における燃焼振動の音響モード解析

早稲田大学基幹理工学研究科専攻
山本 姫子

この度、第43回ガスタービン学会定期講演会にて学生優秀講演賞をいただきましたことを大変光栄に思います。

今回の講演では、弱旋回燃焼器で発生する燃焼振動を対象に計測実験や理論解析を行い、音響モード形状や振動発生条件に着目した支配モードの特定や、モードホッピング現象に着目し解析の妥当性を評価した結果を報告させていただきました。今回の受賞を励みに、今後も研究活動に邁進していきたいと思います。

最後に、今回の研究結果をまとめにあたり、ご指導いただいた宇宙航空研究開発機構の立花繁様や佐藤哲也教授をはじめ、日々の研究活動でお世話になっている方々に、心より御礼申し上げます。



学術講演会発表助成について

表彰委員会

2015年9月8日(木)、9日(木)に鳥取県米子市の米子コンベンションセンター開催されました第43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（大学院生も含む）に対して、本人からの申請に基づき、交通費の助成を行った結果についてご報告いたします。

本助成制度は、ガスタービン学会定期講演会で講演する学生発表に対して、往復交通費の半額相当の旅費を助成することで、ガスタービン関連分野の若手人材の育成と技術の発展を奨励することを目的としたものです。今回の講演会では本人より申請があった10名に対して、表彰委員会で慎重審議を行い、「学術講演会発表助成に関する内規」に則り、以下のように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5名（東京大学2名、早稲田大学2名、法政大学1名）に対しては各1万6千円、金沢地区からの参加者3名（金沢工業大学）に対しては各1万5千円、新潟地区からの参加者1名（新潟大学）に対しては2万1千円、東北地区からの参加者1名（東北大学）に対しては3万円。

本助成制度を有効に活用して頂き、来年度以降のガスタービン学会定期講演会においても、学生諸君の日頃の研究成果について積極的な講演発表を期待しております。

International Gas Turbine Congress 2015 Tokyo 開催速報

IGTC2015実行委員会
委員長 渡辺紀徳

1. はじめに

2015年11月15日(日)から20日(金)まで、International Gas Turbine Congress 2015 Tokyo (IGTC2015 Tokyo) が虎ノ門ヒルズで開催された。関係各位のご尽力、ご協力により、論文数がこれまで最多となるなど、盛会の裡に無事終了することができた。実行委員会の活動は最終報告書の取り纏めまで継続中であるが、ここでは会期中の実施概要を速報する。

2. 参加者

事前登録と当日登録を合わせ、569名の参加があった。外国人は27か国から155名、日本人は414名であった。外国人はこれまでのIGTCで最も多くなり、国際会議として定着してきた感がある。ドイツからの参加者が43名と突出しており、他に中国23名、米国16名、英国12名、韓国10名などが多くいた。アジア・中東地域への広がりも見られ、インド6名、イラン4名、インドネシア3名などの他、エジプト、クウェート、マレーシア、オマーン、シンガポール、台湾、タイ、トルコなどからも参加があった。

3. 講演会

(1)論文発表

アブストラクトの投稿は261件にのぼり、最終的にこれまで最多の213件の論文を採択した。国外は98件、国内は115件であった。論文発表セッションが従来の6室では収まらなくなり、7室のパラレルセッションとせざるを得なかった。No-showが2件（ロシアおよび英国）あり、発表数は211件であった。

(2)招待講演

外国から3名、国内から1名の講演者を招待した。NASAグレン研究所所長のFree氏がNASAの航空技術の歴史と展望、スペシャルメタルズ社（米国）のPatel氏がニッケル基超合金の展望、ドレスデン工科大学（ドイツ）のVogeler教授がターボ機械設計への確率論的解析の応用、三菱重工の佃嘉章氏が高炉ガス焚きGTCCへの挑戦というテーマでそれぞれ講演された。いずれも参加者が多く、活発な質疑が行われた。

(3)パネルディスカッション

3つのテーマでパネルディスカッションが行われた。「次世代航空推進技術の挑戦」ではジェットエンジン関連の研究機関、メーカー、ユーザー、および官庁からパ

ネリストが登壇し、広い視野で次世代航空推進の議論が行われた。「アジア諸国の電力・エネルギー供給の現状と将来戦略」ではこれまでのIGTCやAsian Congress on Gas Turbinesで行われてきた日中韓の情報交換に加え、インドとタイからパネリストが加わり、アジアのエネルギー事情が広範に紹介された。「エネルギー戦略：将来のエネルギーネットワークにおけるガスタービンの役割」は講演会最終日午後の最後のセッションであったが、多くの出席者があった。パネリスト間で活発な討議がなされ、参加者からは参考になったとの感想が多く聞かれた。

(4)フォーラム

今回のIGTCでは論文のない発表・討論セッションをフォーラムと名付け、3件を実施した。「航空機電動推進の展望」は将来の航空推進システムとして近年話題となっている電動化のフォーラムで、参加者多く、活発な質疑が行われた。「航空エンジン技術におけるCFRP」はこれまで航空エンジン分野に関わりの薄かった複合材分野の研究者が参画するフォーラムで、興味深い発表と質疑が行われた。「GTSJ-IGTIジョイントフォーラム：付加製造（3Dプリンティング）」では初めてASME/IGTIとの合同フォーラムが行われた。注目を集める分野の内容ということもあり、議論が非常に活発であった。

4. 展示

38社・機関が虎ノ門ヒルズ4階・5階の展示会場にブースを出展した。ガスタービン・ジェットエンジンの本体や模型、部品などのハードウェアが展示されたほか、ソフトウェアの展示ブースにも多くの人が集まっていた。ASME/IGTIも展示ブースを設け、事業や出版物の紹介を行った。当学会も2014年からASME Turbo Expoに出展しており、この出展は相互交流の意味も持っている。来場者数は延べ1,570名とカウントされた。また、今回は会場でアンケート調査を行ったが、配布したアンケート用紙は800枚であった。アンケートは今後集計を行い、意見を次回以降に反映できるよう資料を纏める。大学の関連研究室による展示も6件行われ、会場4階の会議受付デスク付近にA0サイズのポスターが掲示された。

5. 行事

初日の夕方から参加登録が開始され、夕刻に歓迎レセプションが開催された。95名の参加があり、旧交を温め

合う人たちや、初めて出会う人たちで賑わった。

11月18日(木)のセッション終了後にはバンケットが実施され、多数の参加者で大変盛況であった。当初は180人の出席を想定して準備していたが、ウェブでの事前参加登録が始まると参加希望者が急速に増加したため、部屋を拡大して220名収容可とした。しかし希望者はもっと多かった模様である。握り寿司や利き酒のコーナーが非常に好評だったほか、早稲田大学日本舞踊研究会による演技は大変盛り上がり、踊りを披露してくれた学生さんたちと写真撮影をする出席者が殺到していた。

11月20日(金)にはプラント・ツアーが2つのコースで行われ、事故もなく無事終了した。また、講演会会期中の昼休みに虎ノ門ヒルズのコーチェンネシステムを見学するバックヤード・ツアーも実施された。

6. 関連イベント

(1)市民フォーラム

11月15日(日)の午後1時から2時30分まで、虎ノ門ヒルズの会場で「市民フォーラム」を開催した。中学生、高校生を含む一般の方々に、ジェットエンジンやガスターインおよびエネルギー技術について理解を深めていただくことを目的に、東京大学の姫野武洋先生に講演をお願いした。小学生を含む約60名の参加があり、分かりやすい話だったと好評を博した。企画運営は技術普及委員会に担当してもらった。



講演会場

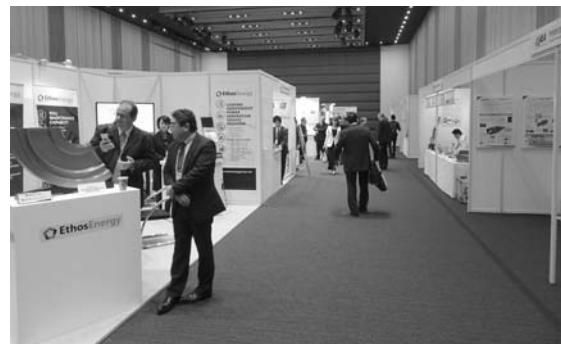
(2)女性の会

IGTCに参加する女性に呼びかけ、11月17日(火)のセッション後に虎ノ門ヒルズ内で会合を開催した。14名の参加があり、女性エンジニアのコミュニケーションが大いに促進されたとのことである。今後はIGTCに限らず、学会として女性の参画を推進する活動につなげて行くこととなり、その後の理事会で女性参画推進委員会の発足が決まった。

7. おわりに

IGTC2015が盛会で終了できたのは、関係各位のご努力と、助成・協賛をいただいた諸団体のご支援のおかげである。実行委員会委員各位には、多忙な中、献身的なご尽力をいただいた。心よりお礼を申し上げる。また、学会事務局のみなさん、田沼会長、久山副会長をはじめとする学会理事各位にも、大変なご協力をいただき、深く感謝申し上げたい。強力にサポートして下さった会議事務局のイーサイド社と、虎ノ門ヒルズ関係者各位にもお礼を申し上げる次第である。海外からの参加を促進して下さったInternational Advisory Committeeの委員各位にも大変お世話になった。そして最後に、会議に参加していただいた全ての方々と、査読に貢献していただいた皆さんに深く感謝し、速報を締めくくりたい。

なお、会議の詳細については、実行委員会の活動終了後に改めて学会誌で報告する予定である。



展示会場

2015年度第1回見学会報告

佐藤 哲也
SATO Tetsuya

2015年10月16日(金)、福島県郡山市にある国立研究開発法人産業技術総合研究所(産総研)の福島再生可能エネルギー研究所(FREA)において、本会主催の見学会と技術懇談会が開催された。東北地方での開催であったが、全国から16名の方々にご参加いただいた。最初に、FREAが設置されている再生可能エネルギー研究センターの古谷博秀氏から、設立の経緯と関連施設における研究活動についての概要説明があった。産総研では2011年7月に出された政府の「東日本大震災からの復興の基本方針」などを受けて2014年4月にFREAが設立され、世界に開かれた再生可能エネルギーの研究開発の推進、および新しい産業の蓄積を通じた復興への貢献を使命として研究活動が行われている、ということであった。

概要説明の後、再生可能エネルギー統合実証フィールド、展示スペース、太陽電池一貫製造ライン、水素キャリア実験施設を見学することができた。再生可能エネルギー統合実証フィールド内にある太陽光発電システム実証エリアでは、各製造メーカーの太陽電池モジュールの性能評価や、パワーコンディショナの制御技術に関する研究開発について説明があった。また、日本型風車設計基準の検証と風車制御技術の高度化を目的として設営された300kW級風車を望みながら、ナセル搭載型LIDARの開発による風車上流側の風況計測技術の開発についての説明があった。次に、本実証フィールド内に設営されているアンモニア直接燃焼ガスタービン実証施設に移動し、内閣府SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)のもとで行われているアンモニアの直接燃焼技術に関する概要説明があり、研究担当者と見学者の方々の間で活発な意見交換が行われた。また、定格50kWの小型ガスタービンを用いたアンモニア燃焼実験の稼働中の様子を間近で見学することができた。

その後、展示スペースで各研究トピックスのデモンストレーションを体験し、結晶シリコン型太陽電池一貫製造ラインの施設に移動した。この施設では高効率・低コスト・高信頼性を兼ね備えた太陽電池モジュールの量産化技術を開発しており、中でも薄型結晶シリコン型太陽電池セルを使った軽量モジュールに参加者から驚きの声があがった。

水素キャリア実験施設では、有機ハイドライド、アンモニアなどの高効率製造技術や低エネルギーでの触媒合成技術について研究担当者から詳しい説明があり、水素着脱反応触媒評価装置が設置された実験室内では、本技術の実用化に向けた取り組みについて質疑応答があった。

見学終了後には技術懇談会を実施し、FREA所属の研究者と参加者で再生可能エネルギー技術に関する活発な意見交換が行われた。

最後に、本見学会を実施するにあたり多大なご尽力・ご協力をいただいた国立研究開発法人産業技術総合研究所・福島再生可能エネルギー研究所の皆様、そしてご参加いただいた皆様に、心より御礼を申し上げます。

(集会行事委員会委員)



太陽光パネル前での集合写真



技術懇談会の様子

訃報

ご逝去の報に接し、謹んで哀惜の意を表すとともに、ご冥福をお祈り申し上げます。

名誉会員 澤田 照夫 氏

2015年10月7日逝去（享年93歳）

[本会関係略歴]

入会 1972年5月

理事 (GTSJ11,12期)

評議員 (GTCJ 1,3,4期) (GTSJ 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,13,15,16期)

1993年4月名誉会員

[略歴]

1945年9月 大阪帝国大学工学部航空学科卒業

1946年4月 大阪府立堺中学校（現：三国丘高校）教授嘱託

1951年7月 大阪府立浪速大学（現：大阪府立大学）

1964年11月 大阪府立大学教授

1986年4月 大阪府立大学名誉教授

1986年4月 岡山理科大学教授

1994年3月 同 退職

次号予告 日本ガスタービン学会誌2016年3月号 (Vol.44 No.2)

特集「燃焼現象」

巻頭言 川口 修（慶應大学元教授）

化学反応 丸田 薫, 中村 寿（東北大学）

火炎詳細構造 溝渕 泰寛（宇宙航空研究開発機構）

旋回流中での火炎の挙動 下栗 大右（広島大学大学院）

噴霧燃焼（群燃焼中心） 三上 真人（山口大学）

詳細反応解析 森井 雄飛（宇宙航空研究開発機構）, 寺島 洋史（東京大学）

噴霧燃焼のレーザー計測 赤松 史光（大阪大学大学院）

デトネーション 笠原 次郎（名古屋大学大学院）

※タイトル、執筆者は変更する可能性があります。

○本会協賛行事○

主催学協会	会合名	共催/協賛	開催日	会場	詳細問合せ先
日本機械学会	No.15-133講習会「シミュレーションのV&VとCFDのベンチマーク動向」	協賛	2015/12/15	日本機械学会会議室	日本機械学会 TEL:03-5360-3507
日本機械学会 関西支部	第342回講習会「事例に学ぶ流体関連振動（トラブル事例相談会付き）」	協賛	2016/1/25-26	大阪科学技術センター	日本機械学会関西支部 URL: http://www.kansai.jsme.or.jp/
日本非破壊検査 協会	第10回放射線による非破壊評価シンポジウム	協賛	2016/2/4-5	(地独) 東京都立産業 技術研究センター 青海本部	日本非破壊検査協会 学術課 TEL:03-5609-4015, FAX:03-5609-4061
IMechE (Institution of Mechanical Engineers)	12th International Conference on Turbochargers and Turbocharging	協賛	2016/5/17-18	Emirates Stadium (London)	URL: http://www.imeche.org/turbo
日本機械学会	No.16-10第21回動力・エネルギー技術シンポジウム	協賛	2016/6/16-17	横浜市開港記念会館	URL: http://jsme.or.jp/pes/Event/symposium.html
可視化情報学会	可視化情報全国講演会 (日立2016)	協賛	2016/10/8-9	茨城大学日立キャンパス	URL: http://vsj2016.cis.ibaraki.ac.jp/vsj2016_hitachi.html



▷ 入会者名簿 ▷

〔正会員〕

長橋 裕明(三菱日立パワーシステム(株))	藤原 直人(三菱日立パワーシステムズ(株))	大塚 裕也(株)本田技術研究所
長井 利尚(株)長井精機)	石原 信哉(川崎重工業(株))	西田 拓展(川崎重工業(株))
小坂 智哉(東北電力(株))	岸 栄(日本電産(株))	大西 陽一(アドバンスソフト(株))
森 和重(白鶴(株))		

〔学生会員〕

松崎 悠(東北大学)	宇多田 悟志(早稲田大学)
------------	---------------



◇2016年度会費納入のお願い◇

2016年度会費（2016年3月1日～2017年2月末日）の納入をお願い申し上げます。つきましては、2016年4月30日までに以下の通り納入くださいますようお願い致します。

なお、すでに口座自動振替をご利用の方は、2016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。

<2016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
(*2016年3月1日現在)	

【納入方法】

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。

2015年度役員名簿

会長 田沼 唯士（帝京大）

副会長 久山 利之（川崎重工）

法人管理担当執行理事 伊東 正雄（東芝），木下 康裕（川崎重工），鈴木 健（IHI），安田 聰（MHPS）

公益目的事業担当執行理事 壱岐 典彦（産総研），小森 豊明（三菱重工），佐藤 哲也（早大），西澤 敏雄（JAXA），姫野 武洋（東大），藤井 智晴（電中研），細川 哲也（JALエンジニアリング），山本 誠（東京理科大），吉田 英生（京大）

理事 野崎 理（高知工大），原田 広史（物材研），松崎 裕之（酒田共同火力），輪嶋 善彦（本田技術研），渡邊 啓悦（荏原）

監事 坂田 公夫（SKYエアロスペース研），渡辺 康之（元IHI）

2015年度委員名簿（順不同）

2015年12月16日現在

○は委員長

倫理規定委員会 ○木下 康裕（川崎重工），伊東 正雄（東芝），佐藤 哲也（早大），鈴木 健（IHI），西澤 敏雄（JAXA），安田 聰（MHPS）

自己点検委員会 ○木下 康裕（川崎重工），伊東 正雄（東芝），佐藤 哲也（早大），鈴木 健（IHI），西澤 敏雄（JAXA），安田 聰（MHPS）

運営委員会 ○鈴木 健（IHI），壹岐 典彦（産総研），伊東 正雄（東芝），木下 康裕（川崎重工），酒井 義明（東芝），佐藤 哲也（早大），塚原 章友（MHPS），西澤 敏雄（JAXA），原田 純（川崎重工），伊東 恵一郎（東電），安田 聰（MHPS），渡辺 紀徳（東大）

企画委員会 ○安田 聰（MHPS），壹岐 典彦（産総研），木下 康裕（川崎重工），佐藤 哲也（早大），鈴木 健（IHI），塚原 章友（MHPS），西澤 敏雄（JAXA），渡辺 紀徳（東大）

国際委員会 ○仲俣 千由紀（IHI），岡井 敬一（東大），太田 有（早大），小森 豊明（三菱重工），葉狩 智子（川崎重工），福田 雅文（高効率発電システム研），船崎 健一（岩手大），松田 寿（東芝），三好 市朗（MHPS），山根 敬（JAXA），山本 誠（東京理科大），渡辺 紀徳（東大）

学術講演会委員会 ○西澤 敏雄（JAXA），姫野 武洋（東大），小熊 英隆（三菱重工），楠田 真也（IHI），酒井 英司（電中研），渋川 直紀（東芝），武田 淳一郎（富士電機），玉井 亮嗣（川崎重工），平野 孝典（拓殖大），藤原 仁志（JAXA），堀内 康広（MHPS），松沼 孝幸（産総研），渡邊 裕章（九大）

集会行事委員会 ○佐藤 哲也（早大），鈴木 正也（JAXA），泰中 一樹（電中研），木村 武清（元川崎重工），澤 徹（東芝），瀬川 武彦（産総研），西江 俊介（三井造船），西村 英彦（MHPS），浜辺 正昭（IHI），平野 篤（防衛省），藤井 達（日立），細川 哲也（JALエンジニアリング），山形 通史（富士電機），吉田 征二（JAXA），輪嶋 善彦（本田技術研）

ガスティン技術普及委員会 ○藤井 智晴（電中研），横山 喬（MHPS），石田 克彦（川崎重工），賀澤 順一（JAXA），齊藤 大藏（東芝），中村 恵子（IHI），花井 直人（JALエンジニアリング），檜山 貴志（MHPS），福山 佳孝（JAXA），村田 章（東京農工大），屋口 正次（電中研），山本 誠（東京理科大），渡辺 紀徳（東大）

学会誌編集委員会 ○壹岐 典彦（産総研），荒木 秀文（MHPS），杉本 富男（三井造船），石川 揚介（東芝ジーイー・タービンサービス），加藤 千幸（東大），阪井 直人（川崎重工），佐藤 哲也（早大），潮崎 成弘（MHPS），辻田 星歩（法政大），寺澤 秀（IHI）

秀彰（東京ガス），寺本 進（東大），中野 賢治（IHI），中野 剛（JALエンジニアリング），新関 良樹（東芝），野崎 理（高知工大），野原 弘康（ダイハツディーゼル），原田 広史（物材研），北條 正弘（JAXA），服部 旭倫（東電），松崎 裕之（酒田共同火力発電），齋木 正則（中部電力），山下 一憲（荏原），山根 喜三郎（防衛省），吉野 展永（IHI），渡辺 和徳（電中研），渡邊 啓悦（荏原）

論文委員会 ○寺本 進（東大），壹岐 典彦（産総研），小田 剛生（川崎重工），加藤 大（IHI），柴田 貴範（MHPS），田頭 剛（JAXA），中谷 辰爾（東大），姫野 武洋（東大），山根 敬（JAXA），山本 武（JAXA），山本 誠（東京理科大），吉岡 洋明（愛媛大）

ガスティン統計作成委員会 ○小森 豊明（三菱重工），恵比寿 幹（三菱重工），澤 徹（東芝），野村 藤樹（ターボシステムズユナイテッド），村上 麻里子（川崎重工），山上 展由（MHPS），山上 舞（IHI），吉田 知彦（MHPS），米田 幸人（ヤンマー）

産官学連携委員会 ○渡辺 紀徳（東大），壹岐 典彦（産総研），岡崎 正和（長岡技科大），金津 和徳（IHI），幸田 栄一（電中研），佐々木 隆（東芝），武 浩司（川崎重工），二村 尚夫（JAXA），岸部 忠晴（MHPS），赤城 正弘（防衛省），福泉 靖史（三菱重工），藤岡 順三（物材研），船崎 健一（岩手大），古川 雅人（九大），本阿弥 真治（東京理科大），吉田 英生（京大）

広報委員会 ○吉田 英生（京大），村田 章（東京農工大），酒井 義明（東芝），姫野 武洋（東大），吉田 征二（JAXA），山根 敬（JAXA），荒木 秀文（MHPS）

表彰委員会 ○久山 利之（川崎重工），西澤 敏雄（JAXA），壹岐 典彦（産総研），木下 康裕（川崎重工），児玉 秀和（IHI），佐藤 哲也（早大），姫野 武洋（東大）

調査研究委員会 ○壹岐 典彦（産総研），松沼 孝幸（産総研），伊藤 栄作（三菱重工），岡崎 正和（長岡技科大），寛 幸次（首都大），岸部 忠晴（MHPS），黒瀬 良一（京大），合田 真琴（川崎重工），齊藤 大藏（東芝），高橋 徹（電中研），寺島 洋史（東大），原田 広史（物材研），米澤 克夫（IHI），渡辺 和徳（電中研），渡辺 紀徳（東大）

IGTC2015Tokyo実行委員会 ○渡辺 紀徳（東大），姫野 武洋（東大）

（総務委員会） ○西澤 敏雄（JAXA），牧田 光正（JAXA），小見 淳介（IHI），沼田 祥平（MHPS），安田 聰（MHPS），塚原 章友（MHPS）

（論文委員会） ○太田 有（早大），寺本 進（東大），茨木 誠一（三菱重工），岡井 敬一（東大），小田 豊（関西大），幸田 栄一（電中研），田頭 剛（JAXA），玉木 秀明（IHI），辻田 星歩（法政大），仲俣 千由紀（IHI），新関 良樹（東芝），西岡 卓宏（日立），葉狩 智子（川崎重工），長谷川 武治（電中研），檜山 貴志（MHPS），福田 雅文（高効率発電システム研），三浦 信祐（元防衛大），三好 市朗（MHPS），山根 敬（JAXA），山本 誠（東京理科大），山本 武（JAXA），吉岡 洋明（愛媛大）

（展示委員会） ○松田 寿（東芝），北山 和弘（東芝），石川 智貴（東芝），井上 俊彦（川崎重工），猪亦 麻子（東芝），岡村 直行（東芝），岡田 智之（GE），福川 英紹（MHPS），原田 純（川崎重工），藤木 貴子（IHI），牧野 敦（JAXA），山形 通史（富士電機），吉國 孝之（IHI），吉田 知彦（MHPS）

（行事委員会） ○大石 勉（IHI），山上 舞（IHI），岡村 直行（東芝），酒井 英司（電中研），藤本 秀（IHI），堀川 敦史（川崎重工），吉田 征二（JAXA）

（財務委員会） ○井上 洋（MHPS），後藤 仁一郎（MHPS），中田 淳一（MHPS），廣川 順一（IHI）

日本ガスタービン学会入会のご案内

日本ガスタービン学会は、「エネルギー」をいかにして効率よく運用し、地球規模の環境要請に応えるかを、ガスタービンおよびエネルギー関連分野において追求する産学官民連携のコミュニティーです。

会員の皆様からは、「ガスタービン学会に入会してよかったです」との具体例として次の様な声が寄せられています：

- ・タテ（世代）とヨコ（大学、研究機関、産業界）の交流・人脈が広がった。
- ・学会誌が充実しており、学会・業界・国外の専門分野の研究動向や技術情報が効率的に得られた。
- ・ガスタービンに熱い思いを持った人達と、家族的雰囲気で階層を意識せず自由な議論ができ、専門家の指導を得られた。

学会の概要（2015年3月現在）

会員数：2,068名（正会員 1,995名、学生会員 73名） 賛助会員：102社

会員の出身母体数：企業・研究機関・官公庁等 約300、学校 約100

会員のメリット

個人会員（正・学生会員）：

学会誌無料配布（年6回）、学術講演会の論文発表・学会誌への投稿資格、本会主催の行事の参加資格と会員参加費の特典、本会刊行物の購入資格と会員価格の特典、調査研究委員会等への参加
賛助会員：

学会誌の無料配布、学会誌広告・会告掲載（有料）、新製品・新設備紹介欄への投稿、本会主催行事参加および出版物購入について個人会員と同等の特典

入会金と会費

会員別	入会金	会費（年額）	後期入会時 会費（初年度のみ）
正会員	500円	8,000円	4,000円
正会員（65才以上※）	500円	5,000円	2,500円
学生会員	500円	2,500円	1,250円
賛助会員	1,000円	一口 70,000円とし、一口以上	一口 35,000円

※当該年度3月1日現在

後期・・・9月1日～翌2月末まで

入会方法

学会ホームページにて入会手続きができます（<http://www.gtsj.org/index.html>）。

学会事務局にお電話いただいても結構です。申込書を送付致します。



公益社団法人
Gas Turbine Society of Japan

日本ガスタービン学会

〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-5-13 第3工新ビル402

電話番号：03-3365-0095

E-mail: gtsj-office@gtsj.org

新年明けましておめでとうございます。今年のお正月は全国的に好天が続き、会員の皆様におかれましては、穏やかな新年を迎えたことと拝察いたします。

さて、昨年は、国産ジェット旅客機MRJの初飛行成功や、テレビドラマ「下町ロケット」が高視聴率を記録するなど、我が国の高い技術力が注目された年であったと思います。技術屋の端くれとして、一般の方から関心を寄せられるようなインパクトを持ったイベントが絶え間なく続き、日本が世界に誇る高度な技術が今年も更に発展していくよう、願ってやみません。

今月号の特集企画は、「産業向け最新鋭自家発電用ガスタービン」と、昨年9月に開催されました「第43回定期講演会」の二つを取り上げました。中小型ガスタービンについては、単発記事は取り上げられてきたものの、まとめた特集が組まれたのは2012年の1月号以来になります。ただ、東日本大震災直後の企画でしたので、産業用というよりも非常用の視点が強かった感がありました。その前となると2006年1月号まで遡りますから、久しぶりの特集となっています。ジェットエンジンや発電用大型ガスタービンに目が行きがちですが、本特集には産業を支える最新の中小型ガスタービンがラインナップされていますので、ぜひご一読ください。

また、1月号恒例となりました定期講演会特集ですが、これは会員サービスの一環として一昨年より開始された企画であり、一般の講演発表ではなく企画セッション等を中心に会議に取り上げて紹介しているものです。今年で3回目になりますが、過去2回の定期講演会特集に対しては、直接参加できない会員の方より、このような形で紹介して頂いてありがたいとの感想を頂戴しており、編集委員会としては今後も継続していきたいと考えています。

なお、誌面では取り上げませんでしたが、定期講演会では調査研究委員会報告として、NEDOプロジェクト「再生可能エネルギー大量導入時代の系統安定化対応先

進ガスタービン発電設備の研究開発」の進捗状況報告と会場とのディスカッションも実施いたしました。本プロジェクトの推進にあたり、日本ガスタービン学会は直接表には出ないものの、調査研究委員会の場を通じて、再委託先を含めた参画13機関の横串を通す大事な役割を果たしています。今年2月に終了する本プロジェクトの成果を受けて、今年は本格的な開発プロジェクトを国に提案する、非常に重要な年になります。実現すればムーンライト以来の大型開発プロジェクトになる可能性もあり、実施者各位のご尽力に感謝申し上げますとともに、会員の皆様のご支援・ご協力をよろしくお願ひいたします。

(渡辺和徳)

● 1月号アソシエイトエディター
渡辺 和徳 (電力中央研究所)

● 1月号担当委員

加藤 千幸 (東京大学)

寺澤 秀彰 (東京ガス)

中野 賢治 (IHI)

中野 剛 (JALエンジニアリング)

(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。

- ・「KawasakiガスタービンL30Aの運用実績と適用事例」 (P.8 ~ 13)
- ・「LM6000ガスタービン発電プラントの技術紹介」 (P.14 ~ 19)
- ・「第43回日本ガスタービン学会定期講演会 全体報告」 (P.36 ~ 37)

だより
 事務局  

明けましておめでとうございます。
2016年が皆様方にとりまして、より良い年でありますよう、心よりお祈り申し上げます。

本年もよろしくお願ひいたします。

昨年の9月から日本ガスタービン学会で働き始めた河野（こうの）と申します。初めて経験することが沢山あり、戸惑うことや自信をなくすことの多い毎日ではありますが、衰え始めた我が脳みそを活性化できるいい機会であると思い働いております。事務局においで際は、お声をかけていただければ嬉しいです。

私は生まれも育ちも北海道で、大学から東京で暮らし

ています。東京に住む北海道人で冬が好きな人は少ないのではないかと思っています。今はそれほど雪が降らなくなつたようですが、私が子供だった頃の北海道の冬は「しばれる」とか「吹雪く」という言葉が表す通り、寒くて雪が多かったものです。冬というとその時のことがよみがえり、そのせいなのか寒いのが苦手になりました。そのためお正月には帰省しなくなりました。それでも矛盾していますが、この冬の厳しさが北海道の良さであると密かに思っております。

今年は暖冬だと言われていますが、暖冬は気温の変化が激しいのだそうです。どうぞお体に気をつけてお過ごしください。

(河野美雪)

学会誌編集および発行要領（抜粋）

2015年4月23日改定

1. 本会誌の原稿はつきの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：会員から自由に随时投稿される原稿。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。
2. 依頼原稿および投稿原稿は、論説・解説、講義、技術論文、速報（研究速報、技術速報）、寄書（研究により、見聞記、新製品・新設備紹介）、隨筆、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
速報	4ページ以内
寄書、隨筆	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. 依頼原稿の執筆者は、本会誌の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引用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、本学会の事務局（学会事務局）から原則として謝礼（図書カード）を贈呈する。
8. 依頼原稿および投稿原稿の執筆者には、抜刷を10部贈呈する。
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）
ニッセイエプロ（株）企画制作部
学会誌担当：山田 紗子
〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4
TEL：03-5733-5158
FAX：03-5733-5167
E-mail：eblo_h3@eblo.co.jp

技術論文投稿要領（抜粋）

2015年3月10日制定

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こと。
 - 1) 主たる著者は本学会会員であること。
 - 2) ガス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) 原稿執筆要領に従って執筆された、モノクロの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、1ページにつき16,000円の著者負担で4ページ以内の増ページをすることができる
3. 著者がカラー1ページあたり50,000円を負担する場合には、カラー印刷とすることができます。
4. 投稿者は、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、所定の論文表紙および英文アブストラクト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、論文査読に関する内規に従って査読を行い、論文委員会が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.44 No.1 2016.1

発行日 2016年1月20日
発行所 公益社団法人日本ガスタービン学会
編集者 壱岐 典彦
発行者 田沼 唯士
〒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
(普) 1703707
印刷所 ニッセイエプロ（株）
〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4
Tel. 03-5733-5158 Fax. 03-5733-5167

©2016, 公益社団法人日本ガスタービン学会

複写をご希望の方へ

本学会は、本誌掲載著作物の複写に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。

本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は、一般社団法人学術著作権協会に許諾を受けて下さい。但し、企業等法人による社内利用目的の複写については、当該企業等法人が公益社団法人日本複写権センター（一般社団法人学術著作権協会が社内利用目的複写に関する権利を再委託している団体）と包括複写許諾契約を締結している場合にあっては、その必要はございません（社外頒布目的の複写については、許諾が必要です）。

権利委託先 一般社団法人 学術著作権協会
〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル3F
FAX: 03-3457-5619 E-mail: info@jaacc.jp

複写以外の許諾（著作物の引用、転載、翻訳等）に関しては、（社）学術著作権協会に委託致しておりません。直接、本学会へお問い合わせください。