

特集：高負荷変動への対応

再生可能エネルギーの大量導入を実現するガスタービン技術 Gas Turbine Technology for Renewable Energy Age



渡辺 紀徳^{*1}
WATANABE Toshinori

キーワード：ガスタービン，再生可能エネルギー，負荷変動，急速起動

Key Words：Gas Turbine, Renewable Energy, Load Fluctuation, Rapid Start-up

CO₂排出削減に向けて，太陽光や風力発電などによる再生可能エネルギー電力を大量に導入することが必須であり，国の方針にも示されている。周知の通り再生可能エネルギー電源は非常に不安定で，太陽光発電の場合は夕方から発電ができなくなる。すでに現段階でも大きな問題となり，地域によっては電力系統の安定運用のため太陽光発電を制限せざるを得ない状況となっている。

将来の再生可能エネルギー大量導入には，電力系統に負荷変動を補償する電源を設置することが不可欠である。これには信頼性の高い火力発電，中でも急速起動特性に優れ，CO₂排出が少ないガスタービン・コンバインドサイクル発電システムが現時点では最適と考えられる。

日本ガスタービン学会の「ガスタービンを考える会」での検討に基づき，NEDOの「エネルギー・環境新技術先導プログラム」に応募した「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」という調査研究が2014・15年度のプロジェクトとして採択された。学会では調査研究委員会を設置し，このプロジェクトを成功裡に完了させている⁽¹⁾。主な技術課題は急速起動性の大幅な向上と，部分負荷運転での効率維持である。関連各社・各機関が協力して調査研究を実施し，2030年に実現すべき目標性能を決定した。

その後2017年には「機動性に優れる広負荷帯高効率GTの開発」が再び採択され，要素技術の研究開発を行うほか，将来のプロジェクト案を作成した⁽²⁾。重点研究項目は，急速起動時のシステム過渡応答や燃焼器特性の検討，燃焼数値解析の高度化，翼端間隙の急速な変化の評価，新材料の適用検討などである。

これらの成果により，2018年度からは「機動性に優れる広負荷帯高効率GTCCの要素開発」が4年間のNEDOプロジェクトとして開始されたところである。

最初のプロジェクトでは大型だけでなく，中・小型，航空転用ガスタービンなども対象として調査を行った。

原稿受付 2018年12月15日

* 1 東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻
〒113-8656 文京区本郷7-3-1
E-mail: watanabe@aero.t.u-tokyo.ac.jp

小規模の電力系統に対して中・小型ガスタービンによる負荷変動対応が実現すれば，国外にも適用先が多く，産業競争力強化につながると期待される。

急速起動，負荷変動対応の特性は，効率を別としてジェットエンジンに備わっており，その技術を大型ガスタービンに適用すればよいと考えることもできるが，規模の違いは質の違いを包含する。例えば圧縮機急速起動時のサージや旋回失速回避には，従来の可変静翼と抽気による対応だけでは不十分で，新たな最適化手法や制御技術が必要となる。部分負荷時の効率維持にはジェットエンジンで実施されている翼端間隙の能動制御が必要になり，規模の大きさから新たな技術課題が生起する。このように高性能な負荷変動応答を実現するための技術課題は非常にハードルが高く，研究に伴って新しい解析技術なども開発される情勢である。

有効な電源システムは電力系統との整合性が必須であり，ユーザーや系統の専門家との共同作業が不可欠となる。また，電力制度にも改変が必要である。

電力インフラの情報はなかなか社会に行きわたらず，一般の理解を得ることの困難が痛感される。学会としても効果的な情報発信を立案・実施することが期待される。

本特集は時宜を得て企画され，多方面にわたる有益な情報が集約された，誠に興味深く意義深いものとなっている。会員各位だけでなく，学会外にも情報が発信される機会になれば幸いである。来るべき再生可能エネルギー大量導入に向けて，高度な性能を有する負荷変動対応ガスタービンが早期に実現し，将来のCO₂削減に大きく寄与することを願うものである。

参考文献

- (1) 日本ガスタービン学会調査研究委員会，調査研究委員会報告 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』について，日本ガスタービン学会誌，Vol. 44, No. 6, (2016), pp. 506-526.
- (2) NEDOホームページ <https://app5.infoc.nedo.go.jp/disclosure/SearchResultDetail> (参照日2018年11月19日)。

特集：高負荷変動への対応

電力システムの今後の課題と火力発電への期待 —太陽光発電や風力発電の大量導入への対応—

Emerging Challenges in a Power System and Thermal Power Generation—Coping with Large- Scale Penetration of Photovoltaic and Wind Power Generation



七原 俊也*1

NANAHARA Toshiya

キーワード：電力系統，太陽光発電，風力発電，火力発電，需給運用，系統安定性

Key Words：Electric Power System, Photovoltaic Power, Wind Power, Thermal Power, Generation System Operation, Power System Stability

1. はじめに

近年，電力系統は，電力システム改革や太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギー発電の急増など，未曾有の変革期にある。これに伴い，火力発電も大きな影響を受けると予想される。本解説では，これらのうち太陽光発電や風力発電（以下，太陽光・風力発電と略す）の増大が電力系統に与える技術課題とそれが火力発電に及ぼす影響について述べる。

デンマーク，ドイツなど欧州各国では20世紀末から風力発電容量が急増し，電力系統の需給運用や送電線の潮流などへの影響が顕在化してきた。一方，わが国では，Fig. 1に示すように，2011年3月の東日本大震災を契機に導入された再生可能エネルギーの固定価格買取制度に伴い，太陽光発電の導入量が急増した。これにより太陽光・風力発電が集中している地方では，これらの電源の電力系統，ひいては火力発電への影響が顕在化してきている。

一方，地球環境問題への対応等のため，たとえばEUでは2030年までに最終エネルギー消費の27%以上を再生可能エネルギーでまかなうという目標を提示している⁽¹⁾。電力系統で再生可能エネルギーの占める比率は，この場合，非常に高くなると予想される。このような背景も踏まえ，大規模な電力系統で100%再生可能エネルギーとなった場合も視野に入れた研究も行われるようになってきた⁽²⁾。この場合，大多数の電源がインバータを用いるため，雷撃などの事故時における電力系統の応動が変化することが予想される。実際，他国との交流連系線がなく風力発電の導入が急速に進んでいるアイルランドでは，風力発電の増大に伴い電力系統の回転している発電機（慣性）の減少が電力系統の安定性を損なうおそれが

あることを指摘している⁽³⁾。これは，これまでは当然のこととして見過ごされてきた火力発電等の在来型電源の価値を再認識させるものである。

以上を踏まえ，本解説では，2章で太陽光・風力発電が電力系統に及ぼす影響について概観する。そしてそれらの影響の中から，火力発電と関係が深い電力系統の需給運用への影響，および電力系統の事故時における電源の応動特性の変化について，それぞれ3章と4章で述べる。5章では，太陽光・風力発電が増大した電力系統での火力発電に期待される役割について私見を記すこととする。

なお汽力発電とガスタービン発電の役割を切り分けることが困難であるため，本解説では火力発電全般を対象とする。また電力自由化に関わる課題も関わりが深いが，ここではそれについては触れないこととする。

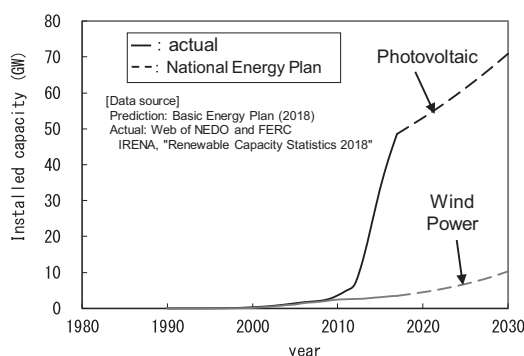


Fig. 1 Trend of installed capacity of photovoltaic wind power generation in Japan.

2. 太陽光・風力発電の増大が電力系統に及ぼす影響

2.1 太陽光・風力発電と在来型電源の違い

太陽光・風力発電が電力系統に多数連系された場合に電力系統への影響が懸念されるのは，以下のように，これらが在来型電源と異なる特性を有しているためである。

1) 在来型電源に比べ小容量の設備が電力系統の末端

原稿受付 2018年11月9日

*1 東京工業大学 工学院 電気電子系
〒152-8550 目黒区大岡山2-12-1, S3-17
E-mail: nanahara@ee.e.titech.ac.jp

に多数接続されることが多い。たとえば太陽光発電の多くは配電系統（高圧、低圧）に連系されるが、配電系統は電力系統の末端と考えることができる。一方、風力発電の多くは送電線に接続されるが、風が強い地域の人口密度は概して低いこともあり、公称電圧の低い送電線に、また往々にしてその末端に接続されることが多い。これにより連系点の電圧変動などが問題となることがある。また小規模な設備が分散して多数あることは、それら設備の制御や管理の面からも課題を呈する。

2) 太陽光・風力発電のエネルギー源は変動の大きい日射や風であるため、その出力は天気により大きく変動する。またその出力予測は、空間・時間解像度が高い天気予報を行うことに相当するため、高い予測精度を得ることは容易ではない。一方、電力系統では瞬時瞬時に需給バランスを取る必要があるため、火力発電などの電源で太陽光・風力発電の出力変動を補償する必要がある。火力発電等は太陽光・風力発電の大きな出力変動に対応する必要があるため、その的確な運用は一層困難になると考えられる。

3) 在来型電源がほぼすべて同期発電機を使っているのに対し、太陽光・風力発電では発電機としてインバータや誘導発電機を用いることが多い。すなわちFig. 2 (a) に例示するように、太陽光発電ではインバータを用いる。一方、風力発電には種々の方式があるが、最近Fig. 2 (b) に示すインバータで系統連系を行う方式と、インバータで二次励磁した誘導発電機（二重給電機）を系統連系する方式とが主流である。このように在来型電源と発電機の種類が異なるため、電力系統で事故などの

擾乱が起こった時の応動は在来型電源のそれとは大きく異なる。

2.2 太陽光・風力発電の増大の電力系統への影響

太陽光・風力発電は2.1節に述べた特徴を有しているため、大量に連系された場合には、Table 1に示すように、電力品質、系統保護、需給運用、安定性など様々な面で電力系統への影響が懸念される。Table 1では、これら影響を、電圧変動などの太陽光・風力発電の連系地点周辺への影響と、電力系統の安定性や需給バランスなどシステム全体への影響に大別して、上述した3つの要因との関係も含め示している。

またTable 2では、これらの影響を太陽光・風力発電の導入量と関連づけて整理している。すなわち導入量が小さいうちは太陽光発電の配電線の電圧変動への影響などローカルな影響が主であるが、導入量が増すにつれ送電線の混雑や電力システムの需給バランスへの影響などの電力系統大への影響も顕在化してきた。今後さらに導入量が増えれば、事故が起こった場合などにおける電力系統の応動特性が変化することが懸念される。

本解説では、これらの影響のうち、火力発電と関連が深いと考えられる電力系統の需給バランスへの影響と事故時における電力系統の応動特性の変化について述べる。

3. 電力系統の需給バランスへの影響

電力系統では瞬時瞬時に需給バランスを取る必要があるため、太陽光・風力発電の容量増大に伴い、電力系統の需給バランス維持において中核的な役割を果たしてい

Table 1 Impacts of large-scale penetration of photovoltaic and wind power generation on a power system.

Category	Challenges	Distributed generators	Intermittency	Generators
Local	Voltage	✓	✓	
	Harmonics			✓
	Islanding	✓		✓
	System protection	✓	✓	✓
	Transmission capacity	✓	✓	
System	Fault-ride-through			✓
	System stability	✓	✓	✓
	Supply-demand-balance		✓	

Table 2 Penetration of photovoltaic and wind power generation vs. impacts to be apparent in a power system.

Penetration	Prevalence	Typical Impacts
small ↓ large	Impacts are limited to local areas	• Power Quality: e.g. voltage fluctuation ↓
	Impacts expand to a whole system	• Load flow: Congestion due to PV or wind power • Generation-and-demand balance ↓
	Inherent features of a system are affected.	• Power System stability: e.g. change in system response to disturbances

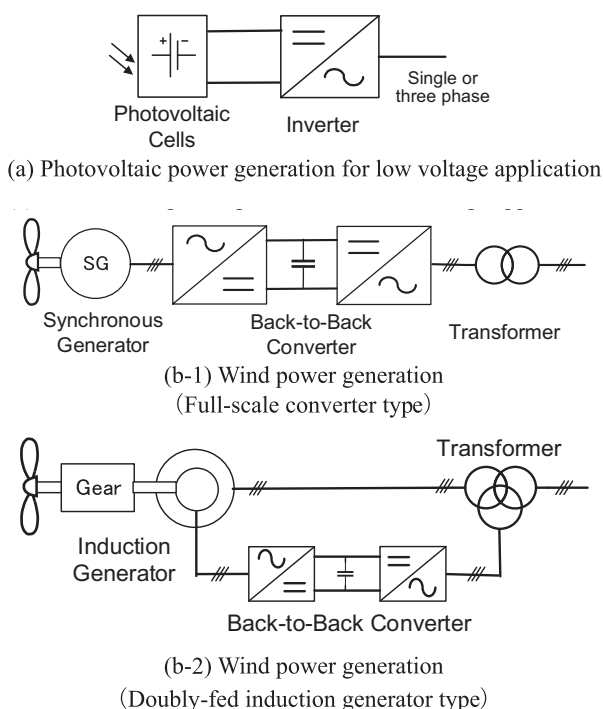


Fig. 2 Sample circuit configurations of photovoltaic and wind power generation.

る火力発電機の運用も大きな影響を受けるようになってきている。

3.1 火力発電の利用率低下

太陽光・風力発電の出力は、日射や風など天気によって左右されるが、天気の条件により風の弱い日、日射の少ない日の現れることは避けられない。太陽光・風力発電については導入量が増えると発電出力に平滑化効果が働き、出力変動が減少することが知られている⁽⁴⁾。しかし日スケールの出力変動は、高気圧や低気圧などの距離スケール1,000kmオーダの気象擾乱に起因する。このような現象については、国ないしは電力会社単位で見ても、平滑化効果はあまり期待できない。このため、たとえば2016年のドイツの風力発電の総設備容量は約5000万kWであったが、12月の風力発電出力が最も低下した時間帯の発電出力は定格出力の0.8%に留まったことが報告されている⁽⁵⁾。

太陽光・風力発電のこのような出力低下に対応するため、火力発電等の在来型電源が必要である。Fig. 2に

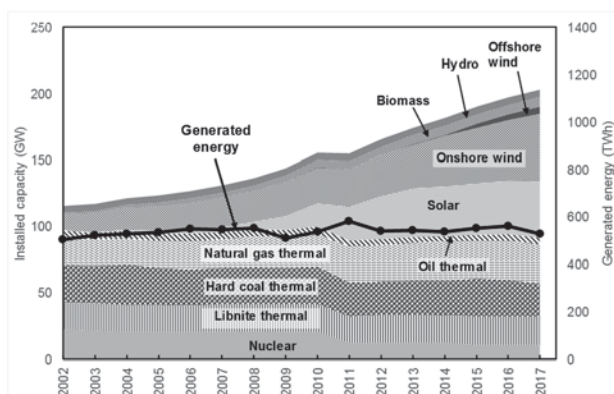


Fig. 2 Trend of installed capacity of generation plants and generated energy in Germany.

[Note] The author draws the figure based on the published data by FRAUNHOFER INSTITUTE FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS (ISE)⁽⁶⁾.

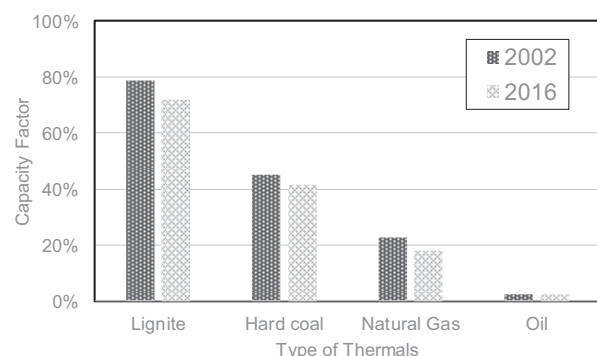


Fig. 3 Estimated annual capacity factor of thermals in Germany.

[Note] The author made the estimate based on the published data by FRAUNHOFER INSTITUTE FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS (ISE)⁽⁶⁾.

¹ ドイツにおける風力発電、太陽光発電の設備利用率（推定値）はそれぞれ2016年に18%、11%であった。

2002～2017年におけるドイツの電源設備容量の推移を示す。同図によれば、太陽光・風力発電の設備容量が急増している一方、火力発電の設備容量はほぼ一定であることが分かる。総発電電力量がほぼ一定であり、太陽光・風力発電容量が増大しているにもかかわらず、火力発電の設備容量が一定であるのは、上述のように太陽光・風力発電の出力が大きく低下する可能性に配慮したものと考えられる。

一方、太陽光・風力発電容量が増大すればその発電電力量は増加するため、電力需要がほぼ一定である場合には火力発電の設備利用率が低下する。Fig. 3にFig. 2と同時期に対するドイツにおける燃料種別ごとの火力発電の設備利用率の変化を示すが、火力発電の設備利用率は全般に低下しており、特に天然ガス火力で低下が顕著である¹。またスペインでは、風力発電が急増した21世紀初頭に石炭火力、コンバインドサイクル発電の発電電力量がそれぞれ47%、30%減少したとの報告もある⁽⁷⁾。

設備利用率の低下に伴い、電力自由化のもと火力発電の収益性が低下する恐れがある。一方、電力システムの信頼性維持の面からはこれらの火力発電は不可欠な設備であるため、これら電源の運転を継続するために各国で容量市場創設など新しい制度の検討が行われている。

3.2 太陽光・風力発電による余剰電力

電力システムでは常に需給バランスを維持する必要があるが、太陽光・風力発電の発電出力の出力変動は火力発電等の在来型電源で補償する必要がある。つまり火力発電等の在来型電源は、負荷曲線から太陽光・風力発電の発電出力を差し引いた需要に電力を供給する必要がある。

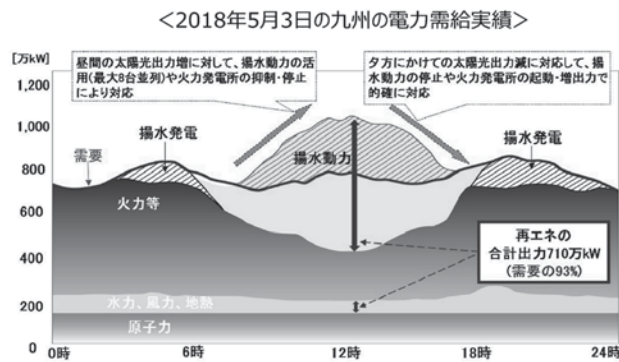
太陽光発電を例にとると、Fig. 4に示す九州地方の事例のように、その出力は日出から日没までの時間に限られ、正午頃に最大となる。このため差引需要は、午前と午後の2つのピークが現れ、正午頃に最小値が現れることが多い。これに伴い、これまで朝の需要立ち上がりに対応して起動することが多かったDSS（Daily start-up and shut-down）機を、午後の差引負荷のピーク等に対応して起動するなど、運転パターンの見直しが必要となっている。

またこれにより、以下の課題が現れる。

- ・ 軽負荷期に在来型電源の最低出力の合計が差引需要の最小値を上回り、余剰電力が発生する。
- ・ 需要の増加（減少）と太陽光・風力発電の出力減少（増加）が同時に起こった場合、差引需要の急峻なランプ変動への対応が必要となる。

ここで最低出力を減らすには火力機の並列台数を減らす必要があるが、これは火力発電の出力変化率の減少につながるなど、両者の間にはトレードオフの関係がある。

これらに対応するには揚水式水力も活用されるが、それだけでは限界もあるため、火力発電での対応が不可欠である。このためには、火力発電の最低出力の低下や出力変化率の増加など、火力発電プラント単体としての特

Fig. 4 Generation dispatch on May 3, 2018 in Kyushu Area⁽⁸⁾.

性改善が望まれる。

余剰電力への対策としては、2018年10月14日(土)に九州地方で、島嶼部を除けばわが国で初めて太陽光発電の出力抑制が行われた。また欧州では、たとえばドイツで、2017年には144時間、軽負荷時に負の電力市場価格が現れており、その発生時間数は増加傾向にある⁽⁹⁾。これも余剰電力の影響と考えられる。

3.3 太陽光・風力発電の発電出力の不確実性

太陽光・風力発電の出力変動があっても、正確に予測できれば、対応の難しさはかなり緩和される。このため近年、太陽光・風力発電の出力予測について多くの研究がなされている。しかし予測の基礎データである数値気象予報 (Grid Point Value, GPV) に誤差が避けられないことなどを考えると、大幅な精度向上は容易ではない。このため需給運用・計画に際しては、これらの出力予測に誤差があることを見込んで対応せざるを得ない。

Table 3に太陽光・風力発電の導入が進んでいるドイツの送電系統運用者 (TSO) である50Hz Transmission社の公表データ⁽¹⁰⁾から求めた、同社全体での太陽光発電、風力発電の予測誤差 (RSME: Root Mean Square Error. 設備容量比で表した値) を示す²。Table 3によれば、RMSEは風力発電、太陽光発電ともに設備容量の4%程度であるため、仮に出力の不確実性をRMSEの3倍で考慮するとすれば、需給運用では±12%程度の不確実さに対応することが必要となる。これは所要調整力の増加につながる。ここにTable 3では両者のRMSEはともに4%程度となったが、太陽光発電の出力は太陽高度の違いに伴い変化することを考えると、正午頃だけを対象とすれば予測誤差はさらに大きくなる。なお経験上、予測誤差にも出力変動と同様に平滑化効果が働き、導入量が多いほど定格容量比で表した誤差率は小さくなるため、Table 3に示す値を単純に予測誤差の大きさの代

² RMSEは、発電出力の実績値、予測値の両方が0 (MW) である時間帯は除いて計算している。

³ 風力発電装置では、二次巻線をインバータで交流励磁した誘導発電機を用いた方式も広く利用されている (Fig. 2 (b-2) 参照)。これも、事故時には、同期発電機よりインバータに類似した特性を呈する。

Table 3 RMSE of photovoltaic and wind power generation for a German TSO in 2012 - 2016.

	Wind power	Photovoltaic
RMSE (%)	4.20%	4.00%
Installed capacity in 2012 -2016	12,622 ~ 17,236 (MW)	7,354 ~ 9,749 (MW)

[Note] 1. The author evaluated RMSE for the published data of 50 Hz Transmission GmbH, Germany^{(10), (11)}.

2. RMSE is normalized with their installed capacity. The hours with zero output power for both actual and predicted values are excluded from the computation

表値と見なすことはできない。

このように太陽光・風力発電の出力予測に相当の不確実性が避けられない以上、これらの出力減少に備えて上げ方向の調整力を多く確保する必要がある。しかしこれは発電機の並列台数を増やすことになるため、下げ方向の調整力を減らし、太陽光・風力発電の出力増加時には余剰電力発生リスクを高める。今後の火力発電では、このように相反する制約条件を考慮したフレキシブルな運用、具体的には頻繁な起動停止が必要となると考えられる。そのために起動時間の短縮など起動停止特性の改良等が必要になろう。

4. 電力システムの安定性への影響

電力系統では、雷撃による送電線の停止、故障による発電機の停止など、様々な擾乱が避けられないが、電力系統はこのような事故があっても安定運転を継続する必要がある。このような事故への対応能力は、事故時に発電プラントないしは発電機がどのように応動するかによって左右される。

一方、太陽光・風力発電は基本的に発電機としてインバータを用いている³ため、従来の同期発電機とは事故時の応動特性が異なる。この違いは電力システムの同期、電圧、周波数安定性に悪影響を及ぼすおそれがある。

本章では、火力発電等の同期発電機は自然に備えているが、太陽光・風力発電 (本章ではインバータ電源と略す) には備わっていない事故時の応動特性について説明する。

4.1 電圧維持能力の低下

同期発電機は自身で電圧を維持する能力を有しているが、電力系統に連系されるインバータは基本的にはこの能力を具備していない。すなわちインバータでは通常、電力系統の電圧を検出し、それに基づき電流を注入するため、電圧源というより電流源として振る舞う。このため同期発電機のような電圧維持能力は望めない。

電圧維持能力が低い場合、当然、電力系統の電圧安定性に悪影響を及ぼす。また同期安定性も、事故中および事故後の系統各部における電圧に左右されるため、電圧維持能力の大小により影響を受ける。

電力系統は、古くより同期発電機 (電圧源) 中心のシ

システムとして構築されてきた。最近現れたインバータ電源は、このような電圧源主体のシステムの中で、電流源として振る舞うことで、両者の協調が図られてきた。

しかし両者の割合が同程度になった場合、さらにはこの割合が逆転した場合については、これまでの知見は少ない。小規模なシステムであれば、これまでもインバータ電源により電力供給を行った事例は相当数存在する¹²⁾。しかし大規模な電力システムで、同期発電機（電圧源）に代わってインバータ電源（電流源）が増えた場合、どのような現象が起こるか、それにどのような対策を講ずるべきかは、これから解明すべき研究課題と考えられる。

4.2 短絡電流の減少

電力システムで地絡・短絡故障が起こった場合、インバータは電力用半導体素子の保護のために電流を定格電流程度に制限する。このためインバータ電源では同期発電機を用いた電源より短絡電流が小さい。これによりインバータ電源が非常に増えた場合、保護リレーの動作に影響を及ぼす可能性がある。

またFig. 5に示すように、電気工学でよく知られたテブナンの定理によれば、ある地点の短絡電流が小さいことはその地点の背後に仮想できるインピーダンスが大きいことと等価である。背後インピーダンスが大きいと、その地点の電圧が変動しやすく、たとえばインバータの制御不安定などの技術課題を引き起こすことがある。

近年、短絡電流が小さいことに起因しているのではないかと考えられる異常現象を国内外で散見するようになった。たとえば直流送電線で連系された洋上風力において、洋上の交流系統は直流送電用インバータで電圧源として働く短絡電流の小さな系統の一例であるが、そこに接続する風力発電機には電気的な共振などのへの十分な配慮が必要なことが指摘されている¹³⁾。短絡容量の小さい電力システムの技術課題も今後の検討を要する課題と考えられる。

4.3 発電機慣性の減少

電力システムでは需要が供給を上回れば周波数が低下するが、同期発電機の回転数は周波数に比例するため、周波数（回転数）低下により回転体に蓄えられたエネルギー $I\omega^2$ (I : 慣性モーメント, ω : 角周波数) の減少分が電気出力として電力システムに放出される。この慣性は、Fig. 6に示すように、電源脱落時における周波数の変化を抑える効果を有する。しかしインバータ電源ではインバータ内にはわずかなエネルギーしか蓄えられていないため、また二次励磁型誘導発電機では高速な有効電力制御を行うため、このような効果は期待できず、周波数安定性に懸念を生ずる。

他国と交流連系線を持たないアイルランドでは風力発電が急増したことにより、慣性減少の問題を懸念している¹⁴⁾。すなわち分散形電源の単独運転防止用のリレーとして周波数変化率 (RoCoF, Rate of Change of Frequency) リレーが不要動作しないよう、需要に対す

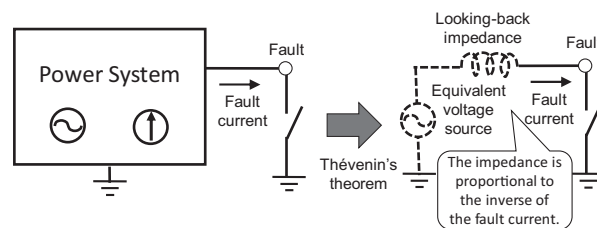


Fig. 5 Short circuit current and Thévenin's theorem.

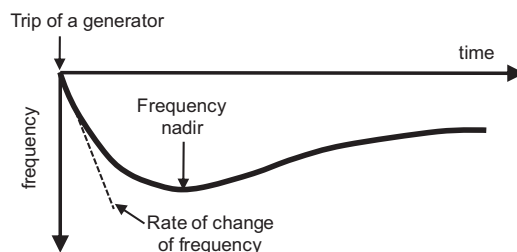


Fig. 6 Frequency decline due to a trip of generator.

る同期発電機以外の電源の比率（非同期電源比率）を55%以下とするなどの制約を設けて系統運用を行っている¹⁴⁾。

なお電力システムの慣性が減少した場合、発電機の加速・減速の速度が増すため、同期安定性の低下も懸念される。

4.4 周波数回復特性の低下

火力発電などでは調速機により、周波数は低下（上昇）した場合には発電出力を増加（減少）させ、Fig. 6に示すような周波数変動を抑制し、周波数を回復させる。

しかし太陽光・風力発電は基本的にはこのような機能は持たない。このため太陽光・風力発電の容量が増大し、並列される在来型電源が減少すると、瞬動予備力が不足するおそれがある。太陽光・風力発電が増大した場合に、これにどのように対策するかは今後の課題である。

太陽光・風力発電でも、制御系に調速機を模擬した特性を組み入れれば、上述のような周波数回復特性を備えることはできる。その場合、インバータで制御を行うため高速な制御が期待できるが、周波数低下時への対処が必要であることを考えると、常時の出力を日射や風から取得できる出力より小さくしておく必要が生ずる。

5. むすびに代えて：今後の火力発電に求められる役割

東日本大震災以降の太陽光・風力発電の増加は、著者が経験した中で、電力システムにおける最も急激かつ大きな変化であったように思われる。これは電力需給バランスの状況を大きく変貌させたとともに、これら電源の導入がさらに進めば従来の同期発電機主体の電力系統の特性を根本的に変える可能性すら有している。

以下、火力発電の門外漢が最近、感じていることを記し、むすびに代えたい。

5.1 需給バランス維持の面からの火力発電への期待

電力システムの需給バランスを維持するためには、大量導入された太陽光・風力発電の出力変動を補償する必要があるが、平滑化効果を考えると、在来型電源で太陽光・風力発電の数十分以上の周期を有する大きな出力変動に対処する必要がある。現在および近い将来の電源構成を考えれば、これを主として担うのは火力発電であろう。

火力発電がこれを担った場合、従来、ベースないしはミドル負荷電源として運転されていた火力発電プラントも、ミドル・ピーク負荷電源の色彩が濃くなっていくこととなろう。経年火力をミドル・ピーク負荷電源に転じていくことは以前より多くの事例があるが、今日の課題はこれら火力に従来以上のフレキシブルな運用が求められる点と考えられる。すなわち、理想的には、起動停止が容易で、短時間で起動可能な、出力変化率が大きく、最低負荷も低い火力発電が求められる。またこれによる熱効率低下や寿命消費を最小限にとどめる必要があろう。そもそも地球温暖化問題への関心の高まり等を考えれば、高効率であることは基本的な要件であろう。

ガスタービンを用いた発電方式は、熱効率が優れ、比較的高速な起動が可能な方式を実現できるなどの点で、上記の要件から見て有力な電源として期待している。

5.2 安定性維持の面からの火力発電への期待

もう約10年ほど前の話となるが、著者はアイルランドで発電機慣性の減少を懸念しているという報告を読み、非常に驚いた。再生可能エネルギー発電の急増により、電力システムの体質変化を考慮しなければならない状況になったことに対してである。最近、海外で廃止した大規模発電所の発電機を同期調相機に改造する事例を見かけるが³¹⁵⁾、これも同様の問題意識の現れであろう。電力システムにとっては、相当数の同期発電機が存在することがきわめて重要と考えられる。

最近の太陽光・風力発電の導入のテンポを考えると、また再生可能エネルギーに非常に野心的な目標を掲げている国や組織が多いことを考えると、電圧維持能力、短絡電流の供給能力、慣性、周波数回復能力などの基本的な体質が変化した場合に電力システムにどのような影響が現れるか、またそれにどのような対策があるか、そこに火力発電がどのような役割を果たすべきかについての研究の重要度が高まっていると考えられる。

5.3 火力発電だけではなく系統全体で

上述した火力発電への高い熱効率、頻繁な起動停止、低い最低出力などの要件は、お互いにトレードオフの関係にあり、すべてを同時に達成するのは困難である可能性が高い。これを考えれば、上述した電力システムの需給バランスや安定性の課題には他の電源も含めて対応する必要があるであろう。

たとえば最近の風力発電装置では出力抑制以外にも、発電出力の周波数ドロープ制御、系統事故時の無効電力供給など、様々な機能を実現できる。太陽光発電や風力

発電を電力システムから見ても主力電源とするには、可能な範囲で、これらの電源も需給バランスや安定性維持のための役割を果たすようにすることが重要と考えられる。また迅速な応動が可能でかつエネルギー貯蔵が可能な蓄電池など新技術の活用の途を探っていくことなども重要であろう。

本学・河辺賢一博士には本稿に貴重な意見を頂いた。また本学・荒井有美氏には、本稿作成に際しデータ整理をお願いした。ここにあわせて深く謝意を表する。

参考文献

- (1) European Commission < <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive> > (参照日 2018年11月6日)。
- (2) Thomas Ackermann, et al., "Paving the Way: A Future Without Inertia Is Closer Than You Think," IEEE Power and Energy Magazine, Vol: 15, No. 6 (2017) p. 61-69.
- (3) EirGrid, SONI, "All Island Tso Facilitation of Renewables Studies," April (2010).
- (4) 七原俊也, 「風力発電の系統影響対策技術の開発動向」, 電気学会論文誌B, vol.129, No.5, (2009) p.568-571.
- (5) Thomas Linnemann, Guido S. Vallana, "Wind energy in Germany and Europe," VGB Power Tech 8 (2017), p.70-79.
- (6) Fraunhofer ISE - Energy Charts < <https://www.ise.fraunhofer.de/en/renewable-energy-data.html> > (参照日 2018年11月7日)。
- (7) Eurelectric, "Flexible Generation: Backing Up Renewables," Oct. (2011).
- (8) 資源エネルギー庁, 「九州エリアの再生可能エネルギーの出力制御に向けた対応について」, 第17回系統WG資料(2018年10月)<http://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/shin_energy/keito_wg/pdf/017_03_00.pdf> (参照日 2018年11月21日)。
- (9) Fraunhofer ISE, "Power generation in Germany – assessment of 2017," < https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/publications/studies/Stromerzeugung_2017_e.pdf > (参照日 2018年11月7日)。
- (10) 50 Hz Transmission GmbH <<https://www.50hertz.com/en/Grid-Data/Wind-power/Archive-Wind-power>> <<https://www.50hertz.com/en/Grid-Data/Photovoltaics/Archive-Photovoltaics>> (参照日 2018年11月7日)。
- (11) 50Hz Almanac 2017 <<https://www.50hertz.com/en/Media/Publications>> (参照日 2018年11月7日)。
- (12) 古いものではたとえば 浅岡正久ほか, 「宮古島における太陽光発電・ディーゼル発電ハイブリッドシステム」, 三菱電機技報, Vol. 71, No. 5 (1997), p. 9-14.
- (13) CIGRE WG B4.55, "HVDC Connection of Offshore Wind Power Plant," May (2015).
- (14) EirGrid, "Operational Constraints Update 22/12/2016," (2016).
- (15) Bundesnetzagentur: "Bericht zum Zustand der leitungs-gebundenen Energieversorgung im Winter 2011/12," June (2013).

特集：高負荷変動への対応

我が国のエネルギー計画に基づくガスタービン開発と 高負荷変動に対応するGTCCの課題

Development of Gas Turbine Based on Energy Planning of Japan and Issues on GTCC Contributing to Stability of Electric Power System



渡辺 和徳^{*1}

高橋 徹^{*2}

WATANABE Kazunori TAKAHASHI Toru

キーワード：ガスタービン，コンバインドサイクル，電力需給調整，効率，再生可能エネルギー

Key Words：Gas Turbiner, Combined Cycle, Power Supply/Demand balance, Efficiency, Renewable Energy

1. 緒言

我が国のガスタービン（以下，GT）技術は，世界（GE，Siemens）と勝負できる技術レベルとシェアを保有している。2040年頃までにおけるGTの世界市場は150兆円規模と想定されている中で，更なる技術力の向上を図ることで世界レベルを維持することは，国内の産業技術成長戦略として重要である。従来，高温化・高効率化を主眼に技術開発が進められてきており，現在も複数の高性能GT開発プロジェクトが国プロとして進められている。

一方，パリ協定の採択・発効を踏まえた世界的なCO₂排出量の大幅削減に向けて，我が国においても太陽光発電をはじめとする再生可能エネルギー（以下，再エネ）電源の導入が着実に進んでいる。九州電力管内では，2018年4月29日の13時～14時の1時間において，需要の81%（645万kW）を太陽光発電が占める状況となった。また，10月の週末には，電力系統安定のために，離島を除き初めて太陽光発電に対する出力制御が行われた。再エネ電源は，出力が天候により大きな影響を受ける特徴を有しており，系統安定のためには出力変動を補完する手段が不可欠となる。太陽光発電の場合，天候の急変による日射量の激変時や，日没前に生じる出力減とそれに並行して生じる電灯需要増への対応が必須となり，急激かつ大量の電力供給の変化への補完が必要となる。このような再エネ電源の大量導入が進む時代においては，これまで以上の需給調整能力の向上が火力発電に求められる。

本稿では，国が掲げるCO₂排出量削減に向けた方針の下で進められているGTの技術開発について整理するとともに，機動性向上を主眼とする開発の状況について，普及に向けた課題も含めて紹介する。

2. 我が国のエネルギー計画と技術開発施策

2.1 CO₂排出量削減に向けた国の方針

我が国のCO₂排出量削減目標として，「次世代火力発電の早期実現に向けた協議会」において，2030年度までに温室効果ガスを2013年度比で26%削減することが掲げられている。その内訳は，エネルギー起源CO₂が21.9%，吸収源対策が2.6%，その他温室効果ガスが1.5%となっており，エネルギー転換部門において約3割減（101→73百万トン・CO₂）が求められている。さらに，パリ協定の採択・発効を受け，我が国の「地球温暖化対策」には，長期目標として2050年までに温室効果ガス80%削減を目指すことが盛り込まれ，閣議決定されている。CO₂排出の多い電力分野におけるCO₂排出原単位の低減に向けた具体的な対策として，①火力発電の高効率化等，②安全が確認された原子力発電の活用，③再生可能エネルギーの最大限の活用，が挙げられている。

Fig. 1に，長期エネルギー需給見通し⁽¹⁾に示された2030年度の電力需要と電源構成を示す。省エネ効果も見据えて総需要約1兆kWhに対して，火力発電（LNG，石炭，石油）56%程度，原子力発電20～22%程度，再エネ（水力，太陽光，バイオマス，地熱）22～24%程度とされており，2030年度においても火力発電は過半を占める想定である。2018年に示された第5次エネルギー基本計画においてもその電源構成は堅持されたが，将来的には再エネ電源を主力電源化とする方向性が示された。また，「エネルギー供給事業者による非化石エネルギー源の利用及び化石エネルギー原料の有効な利用の促進に関する法律（高度化法）」には，2030年度に販売電力量

原稿受付 2018年11月19日

* 1 （一財）電力中央研究所

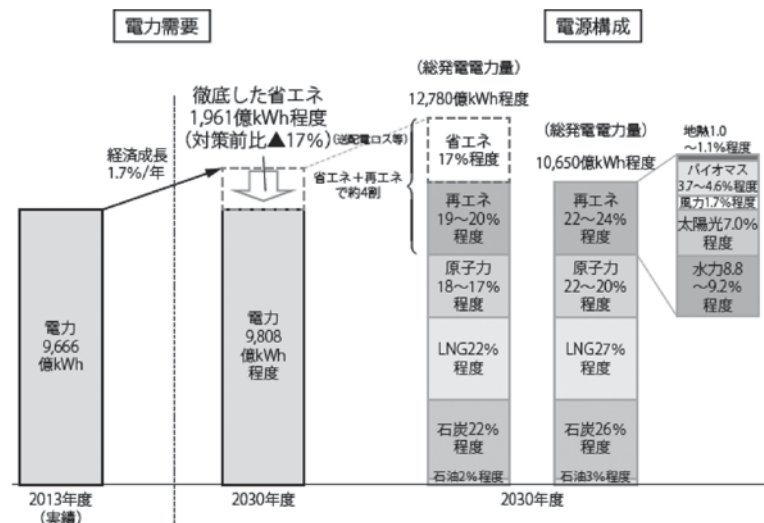
〒240-0196 横須賀市長坂2-6-1

E-mail: kazunori@criepi.denken.or.jp,

* 2 （一財）電力中央研究所

〒240-0196 横須賀市長坂2-6-1

E-mail: toru-tak@criepi.denken.or.jp

Fig. 1 Electric power demand and power supply composition in 2030⁽¹⁾

の44%を非化石電源とすることが規定された。すなわち、原子力の再稼動が不調の場合には、火力ではなく再エネで代替することを意味し、再エネの導入が加速化される可能性があることを示している。

2.2 ガスタービン技術の開発施策

火力発電の技術開発の方向性として、従来、省エネルギーの視点かつCO₂排出量の削減に向けた対応から、高効率化に向けた研究開発が進められてきた。火力発電の効率は、1980年代以降、ガスタービン複合発電（以下、GTCC）の登場によって飛躍的に向上し、1500℃級GTが実用化した2000年代には50%超（LHV）の時代を迎えた。今日では1600℃級GTの実用化に伴い、中部電力(株)西名古屋発電所において63.4%（LHV）が達成されている。

高度化法では、「エネルギーの使用の合理化等に関する法律（省エネ法）」に基づく発電効率向上に基づき、2030年度において発電事業者ごとの火力発電の全体平均発電効率を44.3%以上とすることが求められている。2030年度のエネルギーミックスとCO₂排出量削減目標の実現のためには、技術確立時期の近い石炭火力、LNG火力のさらなる高効率化に係る技術開発を加速し、実用化を促進していくことが重要である。そのような方針の下、経済産業省が設置した「次世代火力発電の早期実現に向けた協議会」において、2030年度をターゲットにした石炭火力、LNG火力の新技術と、2030年度以降を見据えたCCUS技術、水素発電技術の4つの分野を対象とする「次世代火力発電に係る技術ロードマップ」⁽²⁾（以下、技術ロードマップ）が策定された。Fig. 2に、技術ロードマップに示された早期確立、実用化に向けた工程表を示す。2030年度に向けた石炭火力、LNG火力に関する取り組みとして、単一タービンによるシングルサイクル（第1世代）からGTと蒸気タービンを組み合わせたコンバインドサイクル（第2世代）、さらに燃料電池を組み合わせたトリプルコンバインドサイクル（第3

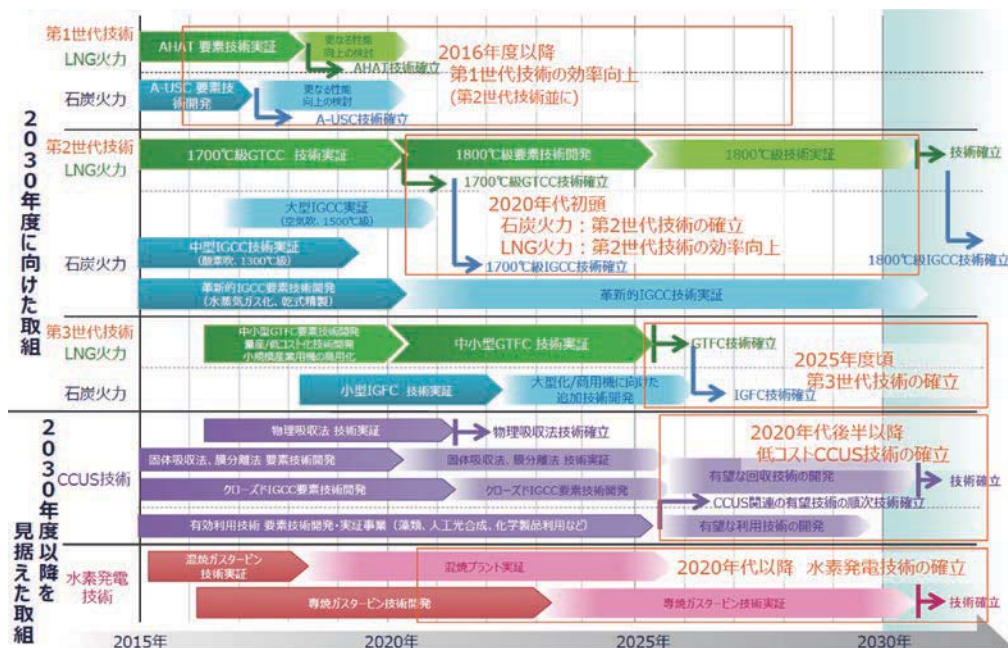
世代）へと、高効率化に向けて技術開発段階を進展させることが示されている。

また、我が国においては、これまでWE-NETプロジェクト（1993～2002）などで水素燃焼タービンの開発が進められてきたが、志半ばで中断された経緯がある。今般、我が国が世界をリードして水素社会を実現することを目指し、水素基本戦略⁽³⁾が閣議決定された。そこでは、2050年を視野に入れた水素社会実現に向けて将来目指すべき姿や、目標として官民が共有すべき方向性・ビジョンが示されている。電力分野の利用として、CO₂フリー水素により将来的にはガス火力代替を目指すシナリオが描かれている。Fig. 2の工程表には、2020年代以降の水素発電技術の確立に向けて、混焼あるいは専焼による水素利用GT開発が示され、研究開発が進められている。

一方、CO₂排出量の大幅削減に向けた再エネ電源の大量導入時を見据えて、電力系統運用の安定性を主眼とする別の視点が注目され始めている。Fig. 2の工程表には示されていないものの、技術ロードマップには、次世代技術開発を進めるに当たっての留意点として、LNG火力に対して「信頼性、経済性の課題解決を図りつつ、負荷追従性の向上など、再生可能エネルギーの拡大に対応する観点からの運用性の向上をあわせて追及する」と明示されている。それに対応する技術開発として、2015年より機動性の向上（起動時間の短縮、出力変化速度の向上、最低出力の低減）と部分負荷時の効率低下の抑制を実現するGTCC（以下、高機動GTCC）の開発に向けたフィージビリティスタディが進められ、2018年度より要素開発研究が開始されている。

3. 国プロによる発電用ガスタービンの開発

今日進められている技術開発のうち、高効率GT、水素利用GT、高機動GTCCの開発状況について、以下に整理する。

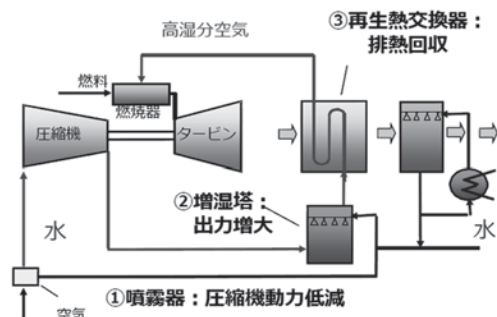
Fig. 2 Progress table for the early establishment and practical application of next generation thermal power technology⁽²⁾

3.1 高効率ガスタービンの開発

LNG火力発電技術に関する2030年度に向けた取り組みの中心となるGT技術開発として、2016年度に以下の方針が示された⁽⁴⁾。

・AHAT（高温分空気利用ガスタービン、Fig. 3）：

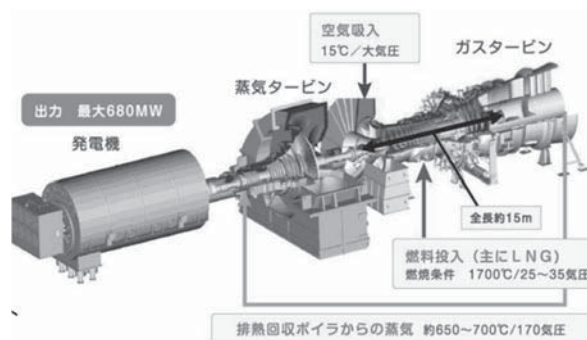
高温分空気を利用した日本オリジナルのGT単独発電技術である。コンバインドサイクルの蒸気タービン蒸気量に匹敵する湿分を増湿塔で燃焼器に加え、GT排熱を再生熱交換器で回収し、GTで再利用する。中小容量機（10万kW程度）向けのガスタービン発電技術で、コンバインドサイクルの効率を凌ぐことが可能とされる。2017年度技術確立、発電効率51%（HHV）、従来機並のイニシャルコストの実現を目標とする。2017年度に要素実証事業を終了し、技術確立する。将来的にGTFCの成果の活用も検討する。

Fig. 3 Schematic diagram of AHAT⁽⁵⁾

・超高温GTCC（1700℃級GTCC、Fig. 4）：

大型GTの高温化は日本が世界をリードしており、1600℃級の実用化に続き、1700℃級（目標熱効率57%、HHV）の技術開発を目指す。2020年度頃の技術確立、

量産後従来機並のイニシャルコストの実現を目標とする。2030年度頃に向けて段階的に高温化を図り、大型GTCCの効率の向上を進める。石炭ガス化複合発電への適用など、技術展開、波及効果も期待できる。

Fig. 4 Schematic diagram of super high temperature GTCC⁽⁶⁾

2016年度方針に対し、AHATおよび超高温GTCC（1700℃級）の研究開発は、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「次世代火力発電等技術開発」基本計画における研究開発項目②高効率ガスタービン技術実証事業、位置付けられ、研究開発が進められている。

先般、その中間評価分科会（AHATについては事後評価）が行われ、進捗状況と結果が報告された⁽⁷⁾。

AHATについては、排熱回収で生成した水蒸気的全量をGTに加湿し、水回収装置で全量回収、再び加湿に利用する実証機を建設して、起動回数100回以上、等価運転時間10,000時間以上の運転を行った。計画した試験・評価を成功裏に完了し、各機器の安定性、機械的信頼性を確認することで技術的な検証を行うことができた。

また、商用機スケールの概念設計を実施し、10万kWクラスのGTをベースとしたAHATシステムの系統構成、機器仕様、プラント配置について、想定される技術課題を考慮して検討が行われた。さらに、動特性解析結果から商用機スケールの起動時間（並列～定格負荷）はホット状態から15分、コールド状態から30分、また、50%～90%負荷では出力変化速度15%/分で追従可能であり、既存GTCCよりも機動性が高いことを示した。以上から、既存のGTCCと比較して、熱効率、環境性、運用性などに関して優位性を確認することができた。

1700℃級GTについては、低熱伝導率遮熱コーティング、高性能冷却システム、高性能タービン・圧縮機、燃焼技術など、現在開発中である13要素の多岐にわたる研究が計画通り進んでいる。各要素の成果を反映した1700℃級GTにより58%（HHV）を達成できる見込みが得られた。また、本プロジェクトによる技術検証を確実に実施することにより、1700℃級GTの信頼性が高められ、欧米の競合に対して確実なアドバンテージが得られている。

3.2 水素利用ガスタービンの研究開発

水素基本戦略の下、NEDOにおいて「水素利用等先端研究開発事業」^[8]が進められている。ガスタービンに関する技術開発として、研究開発項目②大規模水素利用技術の研究開発、研究開発項目③超高効率発電システム基盤技術研究開発が開始された。

大規模水素利用技術の研究開発においては、水素専焼対応型Dry Low NO_x高温ガスタービンの研究開発として、数百MW級の水素専焼ガスタービン燃焼器の開発、また、水素ガスタービン燃焼技術の研究開発として、2 MW級の水素専焼ガスタービン燃焼器の開発が進められている。

超高効率発電システム基盤技術研究開発においては、酸素水素燃焼によるクローズドガスタービンシステムの実現性が検討されており、発電効率75%を達成可能なシステムの技術成立性、経済性確保の見通しについて検討が行われている。

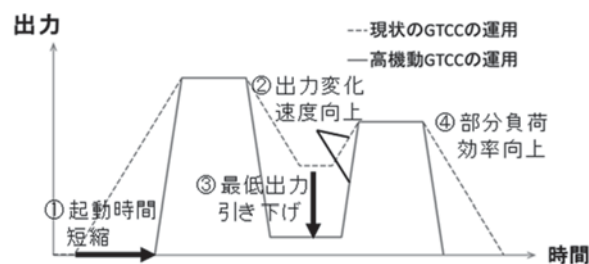
3.3 高機動GTCCの開発

再エネ電源は、出力が天候に大きく影響を受ける自然変動電源であり、基本的に出力が不安定であるため、その大量導入に際しては、電力系統を安定的に運用するための新たな対策や技術開発が重要な課題である。そのひとつとして、再エネ電源の出力予測技術の向上や蓄電池と言った電力貯蔵技術の開発等が進められている。しかしながら、前者においては予測精度の向上、後者においてはコスト低減、充放電損失改善、大容量化等、解決すべき課題は多い。また、電力系統においては、電力量のバランスだけでなく、周波数や電圧等を安定化させる必要がある。そのためには、火力発電のような同期機は不可欠な電源である。さらに、火力発電は燃料を供給する限りいつでも発電できることから、電力の安定供給、品質を維持する要と位置づけても過言ではない。

質を維持する要と位置づけても過言ではない。

火力電源の中でもLNGを燃料とするGTCCは、高効率かつクリーンであることに加えて、機動性に優れる特長を持つ。技術開発により、起動時間や出力変化速度等の機動力をさらに向上させると共に、幅広い負荷帯で高効率に運用可能なGTCCを実現できれば、Fig. 5に示すように、急激かつ大きな負荷変動に対応する電力系統安定化のための現実解として有望であると考えられる。

上記背景を踏まえて、日本ガスタービン学会に設けられた産官学連携委員会のWGである「ガスタービンを考える会」において、機動力を向上させた先進GT開発のプロジェクト立ち上げに向けた検討が行われた。そこでの検討結果を取りまとめ、2014-2015年度におけるNEDOエネルギー・環境新技術先端プログラム^[9]（以下、NEDO先端研究）にフィージビリティスタディとして応募し、採択された。本研究において、Table 1に示す2030年までに開発すべき目標性能を設定すると共に、技術開発課題を取りまとめた。



	項目	主な効果
①	起動時間短縮	再エネ発電量予測外れへの対応
②	出力変化速度向上	インバランスの解消
③	最低出力引き下げ	再エネの受け入れ拡大
④	部分負荷効率向上	燃料消費量、CO ₂ 排出量削減

Fig. 5 Main effects due to flexibility improvement

Table 1 Development goals of the GTCC

	起動時間 (ホットスタート)	出力変化 速度	1/2負荷における定 格からの効率低下 (相対値)	最低出力
開発目標	10分	20%/分	-10%	10% (一軸式)
(参考) 現状性能	60分	5%/分	-15%	45%程度

2016年度には、NEDOの調査委託研究^[10]として電力中央研究所（以下、電中研）が、系統の安定性、CO₂排出量の削減、コスト削減等の観点から、再エネ電源の負荷変動対策においてGTに求められる役割や性能を検討した。そこでは、東北エリアと九州エリアを対象に、Table 1で示したGTCCの機動性能向上によって得られる電源構成の変化（Fig. 6）、CO₂排出量削減効果やコスト低減効果（Fig. 7）、さらには再エネ出力の予測はずれ時に生じるインバランスの低減効果などについて、電力需給シミュレーションにより定量的に明らかにした。

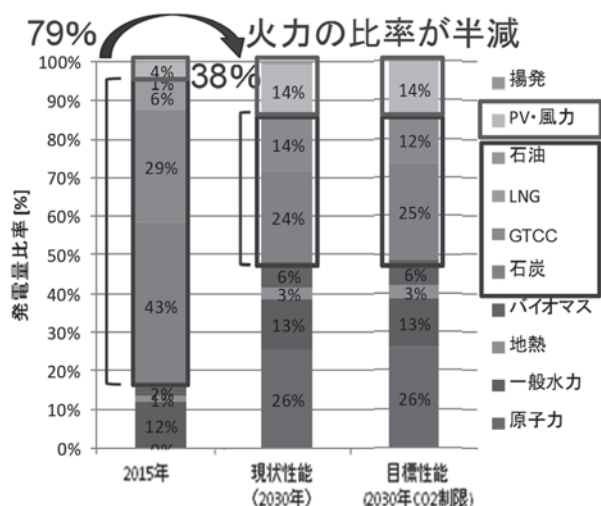


Fig. 6 Power generation ratio of various power supplies in Tohoku area

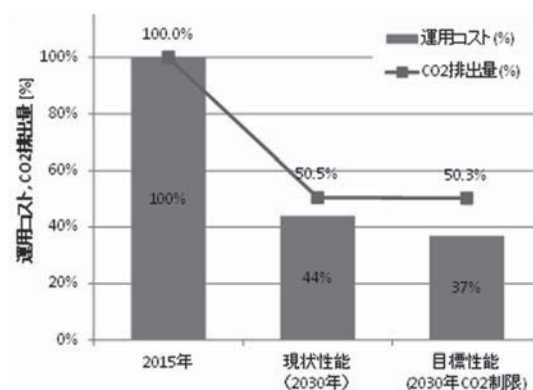


Fig. 7 Reduction of operational cost of thermal power plants and CO₂ emissions in Kyushu area

2017年度には、大型GTの本格的な開発国プロの実現に資するため、電中研を取りまとめ役とし、三菱重工業(株) (以下、MHI)、東京大学、京都大学、物質・材料研究機構で再度NEDO先導研究^[1]を実施した。本研究では、設計コンセプトの明確化と共にGT要素研究の一部にも着手した。研究項目と主な成果の概要は以下の通りである。

研究項目A：急速起動・急速負荷変動対応大型ガスタービン複合発電システムの概念設計

- ・先行研究で設定された目標性能を達成できるシステム構成と運転条件を明確化
- ・安定燃焼および失火耐性を確保可能なGT制御コンセプトを立案
- ・数値解析により逆火事象を再現

研究項目B：ロータ・動翼の軽量化技術の基礎検討

- ・高性能冷却構造・非定常熱応力低減・軽量化を同時に実現するGT動翼コンセプトを立案
- ・軽量新材料の適用可能性の明確化
- ・翼間・回転軸内部の熱流体解析と、構造温度分布・変

形の解析を強連成させる手法を開発

研究項目C：部分負荷運転時の効率向上に向けた翼周りの可変機構制御技術の検討

- ・翼環温度制御によるクリアランスコントロールのコンセプトを立案

さらに、具体的な開発プロジェクトにつなげるため、研究と並行して必要計画の策定にも取り組んだ。その結果、本技術の要素開発が、先述したNEDOの「次世代火力発電等技術開発」④次世代火力電基盤技術開発に盛り込まれるに至り、2018年度より「機動性に優れる広負荷帯高効率GTCCの要素開発」^[12]が開始された。本要素開発フェーズは、MHIと電中研が実施主体となり、先行研究より抽出された技術課題も踏まえて、中核機器であるGTの負荷応答性の向上、部分負荷効率の向上、最低負荷の低減など、負荷変動対応についての要素技術を確立し、実機に反映できる目処を付けることを目的としている。

4. 高機動GTCCの開発・普及に向けた課題

CO₂排出量の大幅削減に向けて、長期的には化石燃料による火力発電を少なくしていく方向に進むと予想されるが、再エネバックアップとしてのコストや大型の同期発電機による周波数安定など系統への効果等を考慮すれば、当面は高機動GTCCなしに電力の安定供給は維持できないと考えられる。高機動GTCCは、再エネ電源と共存しながら、同一設備から高効率のベースロード電源 (kWh)、大容量の再エネバックアップ電源 (kW)、機動性に優れる調整力 (ΔkW) のいずれの価値をも創出可能な電源設備である。しかしながら、発電電力量 (kWh) にしか料金がかからない電力料金制度下では、Fig. 6に示したようなGTCCによる発電機会が減少する時代においては、高機動GTCCを活用しても発電事業として成立しない懸念がある。さらに、稼働率の低下に加えて、再エネ電源の導入により卸電力価格が低下し、販売電力収入のみでは設備費の回収が困難になり、安定供給の維持に必要な供給能力 (アデカシー) の確保が困難になる可能性も指摘されている^[13]。このような事態を避けるためには、設備費の回収方策の整備が必要であり、調整力に対する収入を含めて設備費および運用費を回収可能とする仕組みが必要になる。費用回収の予見性に乏しければ、導入どころか開発のインセンティブも働かない。kWh, kW, ΔkWのいずれの価値をも創出可能な高機動GTCCを開発・普及させていくためには、それらの価値が適切に認められて料金収入が得られる、発電事業者が事業を成立できる仕組みができることが不可欠となる。

我が国においては、2016年度から調整電源の公募が開始されている。Table 2に調整力募集の概要を示す。一般送配電事業者が周波数制御・需給バランス調整に活用する調整力は、送配電事業者があらかじめ調整用に確保

するもの（電源Ⅰ＋電源Ⅰ'）と、小売事業者の供給力として用いながら送配電事業者の調整力としても活用するもの（電源Ⅱ）に区別される。電源Ⅰについては、周波数調整機能を有する電源等を電源Ⅰa、周波数調整機能を必須としない電源等を電源Ⅰbとして区分される。加えて、希頻度事象（10年に1回程度の猛暑・厳寒等）に対応する電源等として電源Ⅰ'が設けられ、整理されている。電源Ⅰの入札は、原則として容量価格（kW価格）で評価されるが、周波数制御・需給バランス調整に高く貢献できる電源等については、容量価格以外の評価項目（非価格要素）に加点される。しかしながら、非価格要素が占める割合は1割にも満たないうえ、各社の募集要項に示される性能も応札を広く行うために既存技術レベルにとどまるなど、高い調整能力を有する設備が導入されやすい仕組みにはなっていないのが現状である。2021年度には、需給調整力市場が設立され、電源の応動時間等による商品の細分化や広域での調達を進めていくことが計画されているが、適切な制度設計となるよう、制度の策定を進めている関係者に本技術の重要性を発信していくことが、技術開発と同様に重要な取り組みとなる。

Table 2 Outline of recruitment of adjustment

	周波数調整機能	役割	用途
電源Ⅰ'	必須としない	稀頻度対応	10年に一度の猛暑・厳寒
電源Ⅰ	電源Ⅰa	必須	予備力
	電源Ⅰb	必須としない	予備力
電源Ⅱ	必須	調整力	ゲートクローズ時点での余力を活用
電源Ⅲ	必須としない	ベース	小売事業者への供給力

料金制度だけでなく、実運用上でも制度変更の必要性が挙げられる。現状では、ガスタービンの起動過程においてガスパーズのプロセスが必須となっているが、それによって機動に要する時間が長くなってしまふ。これに対して米国では、同様の技術基準において、ガス検知器等の特別なシステムをつけることで、ガスパーズを省くことが可能な制度となっている。運用の柔軟性を向上させるためには、我が国においても同様の視点による規制緩和がなされることが必要となる。

5. まとめ

CO₂排出量の大幅削減に向けて再エネ電源の普及が進むと想定されるが、当面は火力発電が重要な電源であり続けることに変わりない。我が国のGT技術は世界をリードしており、国の開発方針の下、さらなる高効率化や機動性向上、将来の水素利用への対応など、新技術開発が進められている。

再エネ大量導入時において想定される急激かつ大きな

負荷変動に対応するGTCCの技術開発は、発電事業者の投資を抑えつつ電力系統安定とCO₂排出量削減を両立できる現実解として有望であり、着実に開発を進めておく必要があると考える。また、本技術が実用・普及するためには、発電事業として成立可能となる適切な制度の策定が不可欠である。

謝辞

3章で紹介した研究成果の一部は、NEDOからの委託事業の結果、得られたものです。

また、高機動GTCCの研究開発の立ち上げに向けて議論を重ねた日本ガスタービン学会の関係諸氏、ならびに共同で先導研究を推進した各機関の関係諸氏のご尽力に、御礼申し上げます。

参考文献

- (1) 高橋 毅, 図解 次世代火力発電, (2016), P151, 日刊工業新聞社
- (2) 次世代火力発電に係る技術ロードマップ, 次世代火力発電の早期実現に向けた協議会 (2016).
- (3) 水素基本戦略, 経済産業省 (2017).
- (4) 次世代火力発電に係る技術ロードマップ技術参考資料集, 次世代火力発電の早期実現に向けた協議会 (2016).
- (5) 次世代火力発電の早期実現に向けた協議会 (第1回) 資料2-5, 経済産業省 (2015).
- (6) NEDOホームページ「実用化ドキュメント」, <http://www.nedo.go.jp/hyoukaku/articles/201205mitsubishi_j/index.html> (参照日 2018年11月2日).
- (7) 研究評価委員会「次世代火力発電等技術開発／〔2〕高効率ガスタービン技術実証事業」(中間評価) 分科会資料5, NEDO (2018).
- (8) NEDOホームページ「水素利用等先導研究開発事業」基本計画, <<http://www.nedo.go.jp/content/100865995.pdf>> (参照日 2018年11月14日).
- (9) 平成26-27年度成果報告書, エネルギー・環境新技術先導プログラム「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」, NEDO (2016).
- (10) 平成28年度成果報告書, 調査研究「再生可能エネルギー大量導入時の電力系統安定化における火力発電の役割とガスタービンの負荷変動吸収能力の向上によるCO₂削減効果に関する調査研究」, NEDO (2017).
- (11) 平成29年度成果報告書, エネルギー・環境新技術先導プログラム「機動性に優れた広負荷帯高効率GTの開発」, NEDO (2018).
- (12) NEDOニュースリリース「機動性に優れた高効率ガスタービン複合発電の要素技術開発に着手」, <http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100996.html> (参照日 2018年11月2日).
- (13) 永井雄宇, 岡田健司, 電力システム改革におけるアデカシー確保の考察—長期エネルギー需給見通しにおける火力電源の収支分析—, 電力経済研究 No. 64 (2017).

特集：高負荷変動への対応

負荷変動に対応するMHPSのガスタービン技術

MHPS's Gas Turbine Technologies for Rapid Load Change



松見 勇^{*1} 川村 康太^{*2} 小森 豊明^{*3}
 MATSUMI Isamu KAWAMURA Kota KOMORI Toyoaki

キーワード：ガスタービン，コンバインドサイクル，急速起動，高速負荷変化

Key Words：Gas Turbine, Combined Cycle, Fast Start-up, Rapid Load Change

1. 緒言

今後も大量に導入が予想される風力発電や太陽光発電などの再生可能エネルギー（以下再エネ）は自然変動する不安定な電源である。これらが大幅に増加すると、電力系統に急激な周波数変動や負荷変動が生じる懸念があり、電力系統の安定性を維持するためには発電量が自然条件に左右されない火力発電を適切に組み入れていく必要がある。このため火力発電設備には、① 負荷変化率の向上、② 最低負荷の低減、③ 起動時間の短縮、④ 部分負荷効率の向上等といった機能が求められる。ガスタービン（GT：Gas Turbine）は原理的に負荷追従性が高く、この負荷調整のニーズに適した機器であることから注目されている。

本稿では三菱日立パワーシステムズ株式会社（以下MHPS）の発電設備供給者としての視点から、大型・中小型GT、航空機転用GTの最新の負荷変動対応技術について紹介する。

2. 大型GT

大型ガスタービンコンバインドサイクル（GTCC：Gas Turbine Combined Cycle）による発電システムは、これまで熱効率の向上が主要な課題であったため、GT入口温度の高温化による熱効率向上が進められてきた。しかし再エネの導入拡大に伴い、熱効率に加えて起動停止の運用性を改善していく必要がある。たとえば太陽光発電が大量に導入された場合、日没後は供給力が急激に低下するため、GTを短時間かつ急速に起動して電力

を供給する必要がある。（Fig. 1、いわゆるダックカーブ現象）。このように電力需給に合わせた柔軟な運用を行うためGT本体にはFig. 2に示すような技術課題がある。以下にこれらの課題への対応状況について述べる。

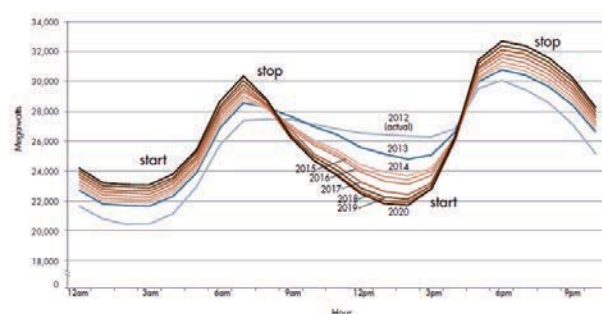


Fig. 1 Example of duck curve of net load for the January 11 study day for years 2012 through 2020.⁽¹⁾

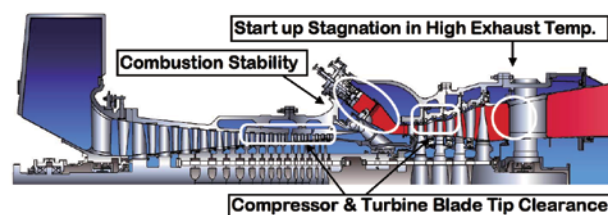


Fig. 2 Major problems of large-frame GT for rapid start-up.

2.1 急速起動に対応したGT構造

Fig. 3に示すM701F形GTを例に、急速起動に対応したGT構造について説明する。GTは圧縮機側ロータとタービン側ロータがボルトで結合された組立式構造で、軽量で熱容量が低減されている。起動時温度変化が特に大きいタービンディスク部は、カービックカップリング結合構造を採用している。この構造は、各ディスクが個々に熱膨張した際にも相互のディスク間に生じる拘束熱応力を緩和し、かつディスク間センターを保持する調芯機能を有しているため振動特性にも優れている。排気

原稿受付 2018年11月16日

- * 1 三菱日立パワーシステムズ株式会社 電力計画部
〒676-8686 高砂市荒井町新浜 2-1-1
- * 2 三菱日立パワーシステムズ株式会社 中小型ガスタービン技術部
〒676-8686 高砂市荒井町新浜 2-1-1
- * 3 三菱日立パワーシステムズ株式会社 PWPS事業推進室
〒220-8401 横浜市西区みなとみらい 3-3-1

軸受はタンジェンシャルストラット支持構造で、軸受箱は接線方向のストラットにより支持されている。このため、起動時の温度変化に対する熱伸びの影響をストラットの回転により吸収し、軸芯を常にその中心に保持するようになっている。一方、発電機を駆動する出力軸は熱的变化の少ない圧縮機駆動（コールドエンドドライブ）方式を採用しており、起動時の熱変化の影響を受け難く安定したトルクの伝達が可能である。静翼は車室に直接取付けずに円周二分割の静翼環に取付け、その静翼環を車室に取り付ける二重車室のような構造を採用している。このため急速起動時にも各部のクリアランスを最適に調整できる。

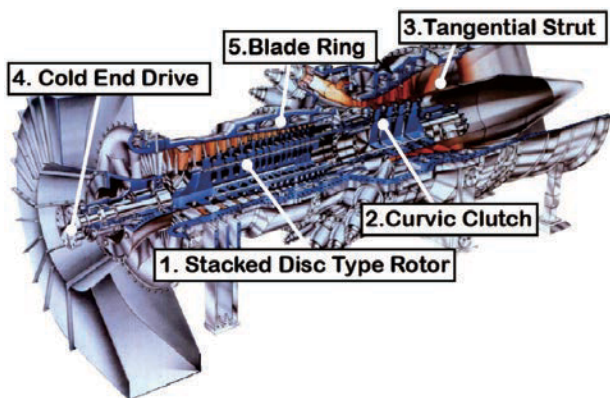


Fig. 3 Typical structure of large flame GT

2.2 昇速時の排ガス温度高への起動渋滞対策

起動時、GTは起動モータ等の起動装置と燃料による起動トルクにより昇速される。起動時間短縮のために燃料投入量を増加させ、昇速率を過度に上げると排ガス温度が制限値まで上昇することがあり、起動シーケンスの排ガス温度高起動渋滞を引き起こす。排ガス温度はGTで最も重要なGT入口温度に対応しており、GT高温部保護のために排ガス温度を制限値内となるように昇速していく必要がある。

排ガス温度高起動渋滞に対しては、起動装置容量の見直しと制御ロジックを最適化することにより対応する。起動装置の容量を増加すれば、燃料流量を増やすことなく起動時間を短縮可能であるので、排ガス温度高に対する懸念が少なくなる。一方大型GTは発電機を周波数変換装置により起動モータとして使用する起動方式が採用されており、起動装置の容量増加は周波数変換装置の電源設備容量の増加につながる。このため制御装置のロジック見直しや制御弁運用を最大限改善し、起動装置の容量増加を最小限に抑えている。

2.3 回転・静止部間クリアランスの確保

昇速・昇負荷時には、回転・静止部のクリアランスに留意が必要である。ディスク・動翼のロータ回転部と車室・静翼の静止部には熱容量差があり、起動時の非定常運転において両部の熱伸び差により回転部と静止部間の

クリアランスが減少する。

Fig. 4にタービンチップクリアランスの概念を示す。着火後動翼は急速に加熱され外周方向に向けて熱膨張するため、静止部とのクリアランスが急激に減少する。時間の経過に伴い静止部も加熱されて膨張し、回転部と静止部のクリアランスは増加する。このように昇速・昇負荷段階で一時的に最小クリアランスが発生する。GTの性能向上のためにはこの過渡的な最小クリアランスを排し、定格運転時のクリアランスを最小とする必要がある。これを実現するためのクリアランスコントロール技術を以下に示す。

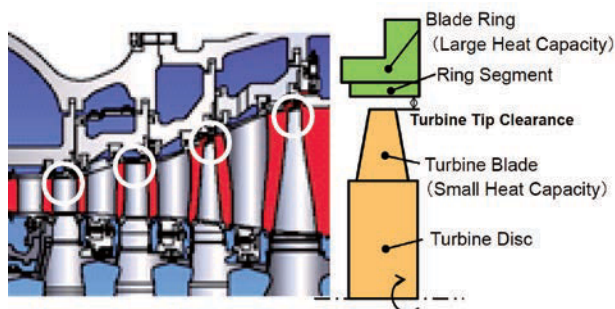


Fig. 4 Schematic view of turbine tips clearance

(1) 蒸気冷却型翼環

1997年に1,500℃級G形GTが開発され、蒸気冷却燃焼器が適用されたことで、Fig. 5に示すタービン部のクリアランス制御が可能となった。燃焼器に通じるタービン翼環冷却通路に蒸気を流してタービン車室側を暖めることで、GT起動時にはクリアランスを広げ、逆に負荷運転時には車室側を冷やすことでクリアランスが最小となる。

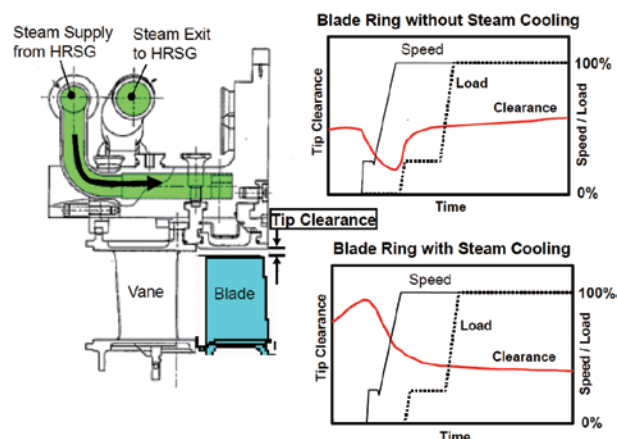


Fig. 5 Results of turbine tip clearance control with and without steam cooling for blade ring⁽²⁾

(2) 空気冷却型翼環

近年当社ではGTCCのさらなる高効率化と運用性改善を図るため、高いタービン入口温度を維持したまま燃焼器を空冷化する次世代GTCCに取組み、その中核技術である強制空冷システムを東北電力(株)との共同研究で開発

した。Fig. 6にその概略図を示す。本システムには燃焼器へ直接冷却空気を供給（翼環パイパス）する系統と、タービンクリアランス低減のためタービン翼環を通気した後供給（翼環冷却）する系統があり、負荷運転中でも三方切替弁（三方弁）にて変更が可能である。Fig. 7に負荷運転時の三方弁切替によるクリアランス挙動を示す。本システムにより急激な負荷変化時にもクリアランスコントロールが可能となり、従来の蒸気冷却以上の運用性向上が期待できる。

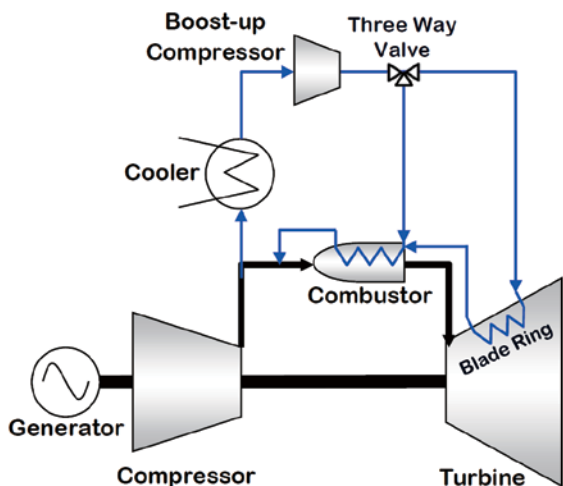


Fig. 6 Enhanced air cooling system⁽³⁾

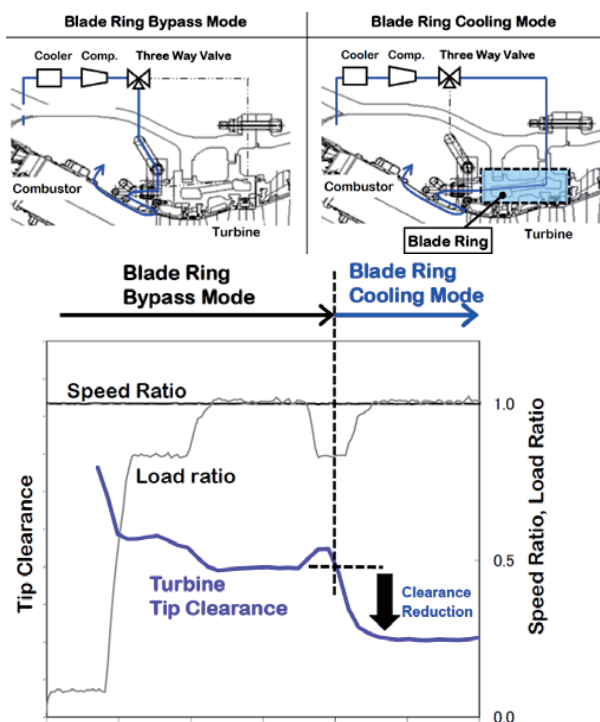


Fig. 7 Turbine tip clearance with three way valve changeover⁽³⁾

2.4 燃焼振動対策

最近のGTはNO_x低減のため予混合方式の低NO_x燃焼器（通称DLN燃焼器）を採用している。この燃焼器には全負荷帯での低NO_xと安定燃焼のために複数の燃料

系統がある。昇負荷率を上げると燃料制御弁の追従性等による燃焼不安定（燃焼振動）の発生が懸念されるので、燃焼振動も検討しておく必要がある。

DLN燃焼器にはそれぞれ1本のパイロットノズルと複数のメインノズルがあり、パイロットノズルの拡散火炎でメインノズルの予混合火炎を安定化させている。燃料系統もメインとパイロットの2系統から構成されており、燃料をパイロット比率（パイロット燃料流量／全体燃料流量の比）で分配している。パイロット比率は着火時に最も多いが負荷上昇と共に低下し、定格負荷では最低となりNO_xの排出量を抑えている。負荷変化率を早める場合、燃料制御弁の追従性に遅れが生じれば燃焼性が変化するため、燃焼振動が発生する恐れがある。この対応としてまずは制御弁の追従性を改善し、燃焼不安定に入らないようにすることが必要であるが、燃焼器そのものの構造を改良することで燃焼振動を抑制することも可能である。Fig. 8に音響ライナー構造による燃焼振動対策を示す。さらに制御性の改善については、燃焼振動の兆候を捉えて自動的にパイロット比率等の運転パラメータを調整し、燃焼振動の発生を抑える先進燃焼振動自動調整システム（A-CPFM：Advanced Combustion Pressure Fluctuation Monitoring）も実用化されている。Fig. 9にA-CPFMの概念を示す。

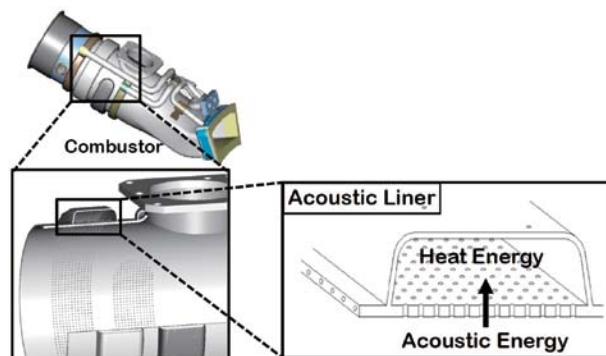


Fig. 8 Acoustic liner system for combustion fluctuation damping

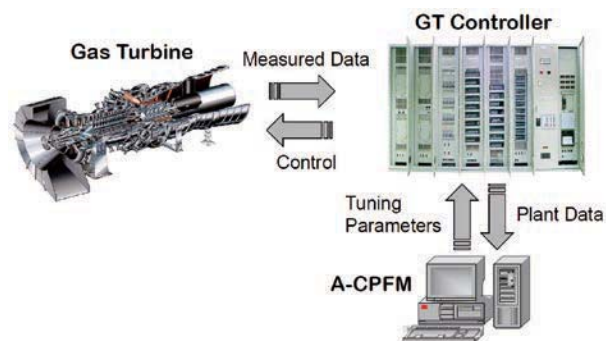


Fig. 9 A-CPFM System configuration

従来のM501GAC形GTに対してこれらの急速起動対応技術を適用したモデルがM501GAC FAST形GTである。Fig. 10にM501GAC FAST初号機を採用した

TransCanada Energy社のSouth West発電所の全景を示す。本発電所は現在建設・試運転中で、2019年1月に運転予定である。



Fig. 10 Combined cycle power plant with M501GAC FAST

3. 中小型GT

3.1 H-100形GTの概要

H-100形GT（以下H-100）は、全世界に170台以上の出荷実績のある当社H-25形GTをベースにスケール設計した、ヘビーデューティ形として世界最大容量の2軸型GTである。H-100シリーズには60Hz用と50Hz用があり基本仕様をTable 1に示す。Fig. 11にH-100の断面図と上半ケーシングを開放した写真を示す。H-100は高压ロータ（空気圧縮機および高压タービン：HPT）と低压ロータ（低压タービン：LPT）で構成され、高压ロータの定格回転数は4580rpm、低压ロータの定格回転数は60Hz用が3600rpm、50Hz用が3000rpmである。2009年に工場試験でH-100形（60Hz）の性能および設計を検証した後⁽⁴⁾、商用初号機が60Hz地域でのGTのリプレイスとして導入されて以降、着実に運転実績を積み重ねている。

60Hz用に続いてH-100形（50Hz）を開発した。50Hz用は60Hz用と比較して空気圧縮機風量および燃焼温度が増加している。空気圧縮機は17段の軸流圧縮機で、60Hz用からの風量増加に伴い圧力比 20に対応できる設計とした。燃焼器は多缶式10缶で、H-25形GT等で実績のある乾式低NO_x燃焼器をベースに、燃料ガスと空気の混合特性を改善することで更なる低NO_x化を実現している。タービンは軸流式2軸型4段（高压2段、低压2段）構造で、HPTは60Hz用の構造を踏襲し、LPTはタービン翼を3000rpm用として最適化設計することで高効率化を図っている。出力は118MW、GT単体熱効率は38.3%（LHV：Lower Heating Value）であり、ヘビーデューティ型のGTとしては、同クラスでトップクラスの効率となっている。H-100形（50Hz）も2016年に工場試験で性能および信頼性を検証している。

H-100は2軸機であることで発電用のみならず機械駆動用のドライバーとしても適している。駆動軸であるLPTは、HPTの回転数にとらわれることなく広い速度範囲で運転することが可能である。適用先として、大型

LNGプラントにおける主冷却系の圧縮機駆動用ドライバーとしての検討を進めている。

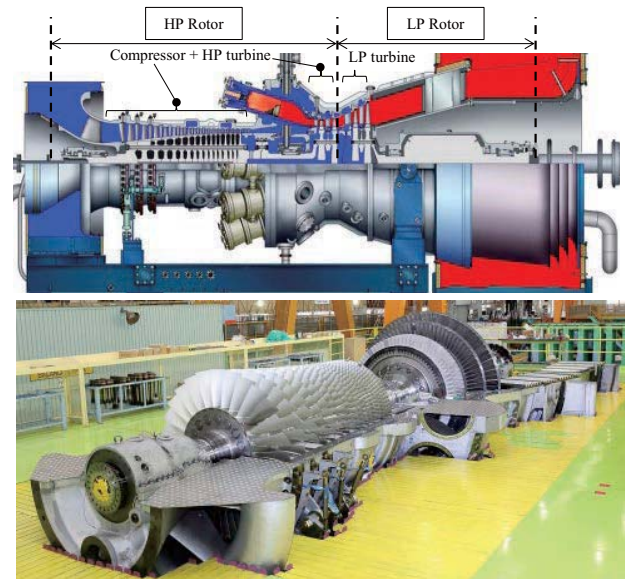


Fig. 11 H-100 series gas turbine

Table 1 Major specifications of H-100 series gas turbine

Item		H-100	
		60Hz	50Hz
Gas turbine	Type	2-shaft heavy duty	
	Rated rotation speed	4580/3600rpm	4580/3000rpm
Compressor	Type	Axial flow 17-stage	
Turbine	Type	Axial flow 4-stage (2-high pressure stages and 2-low pressure stages)	
Combustor	Type	Multi-can (10 cans)	
Simple cycle performance	Power output	105.8MW	118MW
	Efficiency	38.2% (LHV)	38.3% (LHV)
1on1 combined cycle performance	Power output	150MW	169.6MW
	Efficiency	55.1% (LHV)	55.8% (LHV)

LHV: Lower Heating Value

3.2 既設プラントの性能向上

本節では、既設プラントにおいてH-100にリプレイスしてプラント性能を向上した事例について紹介する⁽⁵⁾。

商業運転開始から約30年を経過した東京電力フュエル&パワー(株)富津火力発電所で、2号系列の1～7号（全7軸）のリプレイスに順次H-100形（50Hz）が採用された。既設の1,100℃級GTを短期間でH-100にリプレイスし、2018年10月現在、5軸のGT更新が完了し商業運転を開始している。Fig. 12に今回のリプレイス範囲を示す。リプレイスに当たって次の条件を考慮した。

- (1) H-100形（50Hz）は既設のGTスペースに設置して、周辺機器を流用する。
- (2) 既設設備は最大限流用し、更新範囲を最小範囲とする。排熱回収ボイラ蒸気タービンも流用する。
- (3) GT更新に伴い、制御装置を一部改造する。

GT更新初軸の試運転は2016年7月より開始された。Table 2に示すリプレイス後の計画定格出力159.4MWおよび計画熱効率54.3% LHV以上の性能を達成し、プラ

ントの高性能化およびCO₂排出量削減に貢献している。さらに重量物の運搬効率化や試運転の段取り改善を推進し、当初計画比約15%の工期短縮を実現している⁽⁶⁾。最新の5軸目のリプレイス工事では通常180日間（初軸実績）の工期を24日減らして156日で完了した。

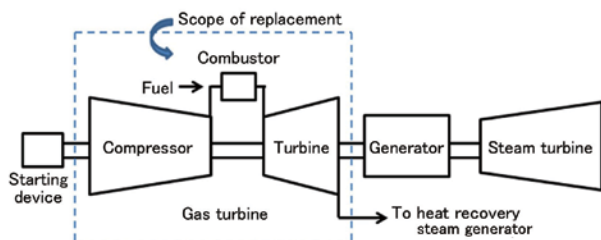


Fig. 12 Scope of replacement

Table 2 Plant performance after replacement

	Before replacement	After replacement	
	Planned value	Planned value	Actual value
Plant output	167.6MW (15°C)	159.4MW (15°C)	168.5MW (15°C)
Increase in output	Base	-4.91% (relative value)	+0.53% (relative value)
Plant efficiency	48.7%LHV (15°C)	54.3%LHV (15°C)	54.4%LHV (15°C)
Improvement in efficiency	Base	+5.62% (absolute value)	+5.74% (absolute value)

LHV: Lower Heating Value

Note: Plant performance after replacement is in new and clean condition.

(Bottoming deterioration has been compensated.)

3.3 急速起動，高速負荷変化

Table 3に1軸型GTと2軸型GTの比較を示す。2軸型GTであるH-100は、1軸型GTと同様に起動装置からの補助動力を用いて高压ロータを起動するが、HPTはLPTと独立しており起動時の要求トルクが小さく、起動装置の小容量化が可能である。そのため同容量の1軸型GTと比較して急速起動に有利である。

H-100の工場試験における急速起動時の計測結果をFig. 13に、高速負荷変化時の計測結果をFig. 14に示す。工場試験では、LPTの負荷として圧縮機を使用し定格負荷までの試験を実施し、GT出力は負荷圧縮機の動力で評価した。Fig. 13に示す通り点火から10分以内に定格負荷に到達することを確認し、Fig. 14に示す通り25%/分の負荷変化が可能であることを検証した。

Table 3 Comparison between 1-shaft and 2-shaft GT

Item	1-shaft gas turbine (e.g.: H-25(MHPS))	2-shaft gas turbine (H-100)
Shaft configuration		
Rotation speed characteristic	Constant speed	Variable speed
Required starting device	Large	Small

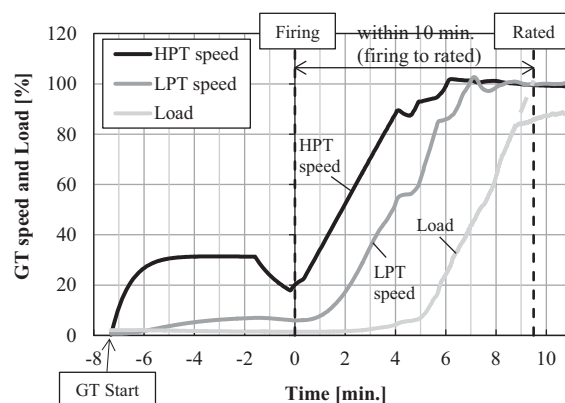


Fig. 13 H-100 shop test result (rapid start-up)

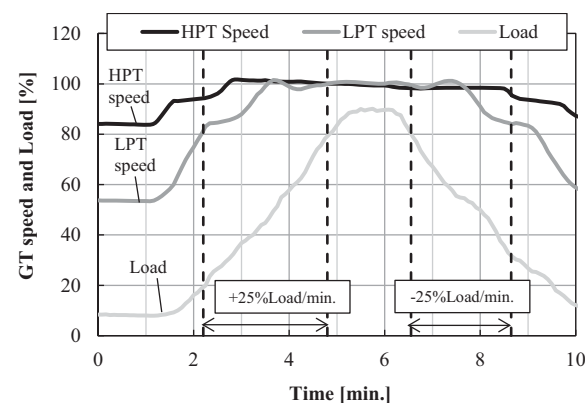


Fig. 14 H-100 shop test result (rapid load change)

4. 航空機転用型GT

4.1 PWPS製航空機転用型GTの特徴

PW Power Systems社（以下PWPS）は1961年設立の航空機転用型GT（以下Aero GT）の製造・販売会社である。PWPSは2013年に三菱重工業(株)が買収し、2017年からMHPSの100%子会社となっている。PWPSのAero GTは高効率（単体で40%）で薄肉軽量の構造により、急速起動（5分以内）、機敏な応答性、起動時のターニング不要という特長がある。さらに製品ラインナップに次の特徴がある。

(1) Twinpac：1台の発電機を2台のエンジンで駆動する軸構成で世界最大の発電容量140MWの設備である。コンパクトながら出力が大きいため、建設単価の削減や据付面積低減に大きなメリットがある。(Fig.15)



Fig. 15 140MW class FT4000 Twinpac

(2) Mobilepac : 30MWの世界最大容量級の移動電源設備である。GTと発電機が同一トレーラに収納されているため、移動の毎のカップリング・アライメント調整が不要である。さらに地耐力次第ではコンクリートの基礎工事也不要で、数日の超短期間で据付工事を完了することが可能である。(Fig.16)



Fig. 16 30MW class mobile power FT8 Mobilepac

4.2 負荷変動対応策

欧米では再エネ導入拡大に対する電力系統安定化を目的としたAero GTの普及率が高く、以下に適用事例を紹介する。

(1) スピニングリザーブ運転

天候の急変で再エネの出力が急減すると電力の供給力不足が生じ、系統周波数が変動する。系統周波数を適正に保持するには、予備電源等により供給力不足を迅速に補わなければならない。1分・1秒でも起動時間が早い火力が必要である。さらに起動前や停止後の運転操作が簡単で、補機が少ないことが好ましい。Aero GTは発電機を含めて完全空冷であるため起動特性に優れ、運転保守の面からもこのようなスピニングリザーブ(≒ピーカー)運転向きであり、欧米で多数導入されている。PWPS社のAero GTはFig. 17に示すようにPT(発電機駆動用パワータービン)がGG(Gas Generator)と切り離されたFree Turbine構成となっている。このためクラッチ無で発電機を同期電動機として電力系統に接続すると力率改善や電圧調整の調相運転が可能である。この特長を活かし、発電運転に加えて再エネ発電運転時には調相運転による系統安定化と1台で二役というメリットがある。

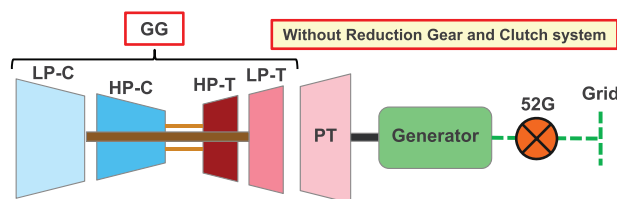


Fig. 17 Shaft configuration of PWPS/Aero GT

(2) ハイブリッドシステム (GT+蓄電池)

スピニングリザーブには、起動指令で瞬時に電力を供給する要求があり、このために常時最低負荷にてGTを待機運転しておく必要がある。その間燃料を無駄に消費するので非常に不経済であり、CO₂排出の点から環境

上にも好ましくない。GTと蓄電池を組み合わせたハイブリッドシステムはこの待機燃料をカットし、かつ瞬時電気供給可能なシステムとして最近注目されている。このシステムの基本構成をFig. 18に示す。



Fig. 18 Hybrid system configuration (GT + Battery)

本システムはAero GTと蓄電池(含むパワーコンディショナー)で構成され、制御装置に再エネ出力を左右する気象条件、電力単価、燃料単価の市場動向を取り込み、電力系統安定化に加えて経済性を踏まえてシステムの起動・停止操作を行う。Table 4にこのハイブリッドとGT/蓄電池単体システムとの比較を示す。既にこのシステムは米国で実用化されており、我が国の更なる再エネ導入拡大と電力系統安定化の両要求に対して有効である。今後蓄電池価格の大幅な低下が予想されており、ハイブリッドの導入がさらに早まる事が予想される。

Table 4 Comparison of Hybrid system and other systems

System	GT	Battery	Hybrid (GT+Battery)
1. OPEX	Base	Cheaper	Cheaper
2. Fuel for Reserve Operation	Necessary	None	None
3. CO ₂ Credit	No	Yes	Yes
4. Instantaneous Power Output	Yes under Loading operation	Yes	Yes
5. Response Speed	Base	Faster	Faster
6. Renewable Surplus Power Management	No	Yes (Battery)	Yes (Battery)
7. Condensing Operation	Yes	No	Yes
8. Continuous Operation	Yes	Not Feasible	Yes

5. まとめ

本稿では、再生可能エネルギー時代に求められる火力発電の柔軟性について、特に急速起動や高速負荷変化に対応する課題と最新の技術について紹介した。急速起動特性に優れたGTは、再生エネルギー拡大による電力系統安定化に適した発電方式である。

大型発電用GTは、急速起動への対策により中小型GT・航空機転用型GT並みの短時間起動が可能となる。一方昇負荷率が同等であれば、大型GTは単位時間あたりの出力変化量が大きいため、電力系統の安定化にはさらに貢献できる。中小型のH-100シリーズGTは高効率化の実現と運転実績の着実な積み重ねにより、新設発電用、既設リプレース用および機械駆動用と幅広い用途に対応できる。さらに急速起動と高速負荷変化特性に優れてお

り、電力系統の負荷調整のニーズにきめ細かく対応が可能である。航空機転用型GTの最新鋭のFT4000は、既に米国発電会社向けピーカー用に2台納入済みで、さらにイスラエル向けに6台を受注し、急速起動の機敏性で電力の安定供給に寄与している。

当社では幅広いGTラインナップと、これらの実績を踏まえて、今後拡大する再エネや分散電源に対して電力系統の安定化に貢献するとともに、更なる性能向上および負荷変動対応力の向上により、多様化するユーザの要望に応じていく所存である。

参考文献

- (1) What the duck curve tells us about managing a green grid
<https://www.caiso.com/Documents/FlexibleResourcesHelpRenewables_FastFacts.pdf>
(参照日2018年11月8日)
- (2) 福泉靖史, 潮成弘, 有村久登, 馬越龍太郎, 内田澄生, 大容量ガスタービンの最新技術動向, 三菱重工技報, Vol. 40, No. 4 (2003), pp. 194-199.
- (3) 福泉靖史, 小森豊明, 上田慎太, 富田康意, 平原悠智, 住吉泰生, 火力プラントの柔軟性向上による電力系統の安定化, 火力原子力発電, Vol. 66, 11月号 (2015), pp. 676-691.
- (4) 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.
- (5) 三菱日立パワーシステムズ(株), 東京電力フュエル&パワー(株)富津火力発電所2号系列 H-100形ガスタービン換装工事, 三菱重工技報, Vol. 54, No. 3 (2017), pp. 32-33.
- (6) 三菱日立パワーシステムズ(株)ニュースリリース, 2018年8月6日発行 第222号,
<<http://www.mhps.com/jp/news/20180806.html>>

特集：高負荷変動への対応

再生可能エネルギー増大に向けたシーメンスガスタービンの対応

Siemens Gas Turbines Responding on Renewable Energy Increase



大築 康彦*¹
OTSUKI Yasuhiko

キーワード：ガスタービン，負荷柔軟性，最低運用負荷，起動性，バッテリーハイブリッド

Key Words：Gas Turbine, Load Flexibility, Turndown, Start Up, Battery Hybrid

1. はじめに

昨今，CO₂削減と言った社会的な要請および固定価格買取制度（FIT）と言った政策的な支援の増大により，再生エネルギーによる発電が増加傾向にある。経済産業

省の2030年に向けたエネルギーミックスでも22～24%の電源を再生エネルギーが賄う計画となっている。⁽¹⁾加えて，2040年には全世界の約70%の電力需要を水力も含めて再生エネルギーを賄う予測もでている（Fig. 1）。⁽²⁾

再生エネルギーの中でも，特に太陽光，風力発電といった自然の力を利用して発電を行うものは，天候に左右されやすく，現時点では，デマンドレスポンスと言った電力需要側でコントロールすることも限界があり，どうしても電力供給側でのコントロールが期待されている。その期待に応える火力発電，特にガスタービンに対する負荷応答性，起動/停止柔軟性への期待は大きい。

一方，シーメンスではFig. 2のように再生エネルギーの占める電力供給割合による電力市場状況の予測を行っている。

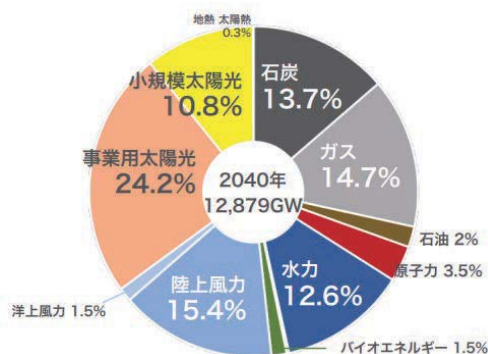


Fig. 1 Worldwide Power Generation Forecast in 2040⁽²⁾

Increasing share of renewables in energy/power supply				
<10%	20+%	40+%	60+%	80+%
Traditional System - Fossil (coal, oil, gas) - Nuclear - Hydro power - Biomass (solid)	Interfered System - Fossil (coal, gas) - Nuclear/Hydro - Wind (onshore) - Solar PV	System Integration - Fossil (gas, CHP) - Wind (on/offshore) - Solar PV/Storage - Grid expansion	Market Integration - Flexible power (gas peaker) - Wind/Solar PV - Storage systems (power, thermal, chemical)	Decarbonized System - Heat pumps - Electrolyzer/Synfuels - Hydrogen economy - Seasonal storage/cross-regional system balance
- Local fuel resources - LCoE optimization - Efficiency - Availability/reliability - Central generation	- RE support schemes - Preferred feed-in for RE - Lowering of wholesale price - Decreasing thermal plant loads	- Regional grid constraints - First storage applications (Start of DSM) - Introduction of capacity markets - Electrification of all end-user sectors starts	- Electrification of all end-user sectors - Sector-coupling approach - Highly interlinked central/decentral/self-supply generation	- Broad electrification of all end-user sectors - Hydrogen/synfuel infrastructure established - Regional energy system integration - Highly decarbonized energy systems

Fig. 2 Energy Market Transformation per renewable share

原稿受付 2018年11月12日

* 1 シーメンス(株)パワー&ガス事業本部
〒141-8644 品川区大崎1-11-1
E-mail: yasuhiko.otsuki@siemens.com

現在、日本における再生エネルギーの割合は約15%であり、この予測から見ると、再生エネルギー促進をするために、政府からの補助金や固定価格買取制度を受けながら再生エネルギーが加速している状況とみている。これからさらに再生エネルギーが増大していくと、分散電源化の加速や電力貯蔵システムへの注目等の変化が進んでいくが、十分な電力貯蔵システムが確立するまでは、依然、火力発電設備によるピーク運用もしくは系統安定目的の負荷変動が必要となるとみている。こういった将来予測に基づいて、シーメンスではガスタービンの開発を推進している。

本稿では、再生エネルギーが増大していく社会に対して、シーメンスのガスタービン開発においてどのような配慮がなされているのかといった点において、大型事業用ガスタービンを中心にご紹介させて頂く。加えて、ガスタービン単体だけではなく、バッテリーを交えたソリューションについても紹介する。

2. シーメンスの大型事業用ガスタービン

2.1 ガスタービンラインアップ³⁾

シーメンスは、産業用、航空機転用、事業用大型といった様々なガスタービンをFig. 3の通り、これまで世界各国に約7,000台出荷してきた。5 MW級の低負荷のガスタービンから事業用大型ガスタービンまでのラインアップも有しており、Fig. 4の通り、幅広い種類のガスタービンのサプライヤーである。ガスタービン単機で567MWまでの出力規模の機種を保有しており、この最大出力のガスタービンにて1軸コンバインド化をすると、約850MWの出力に達する。

他社と比較して特筆すべき点として、これまで起動性及び負荷柔軟性を配慮し、蒸気冷却方式をガスタービンに採用してこなかった。理論的に蒸気冷却により熱を回

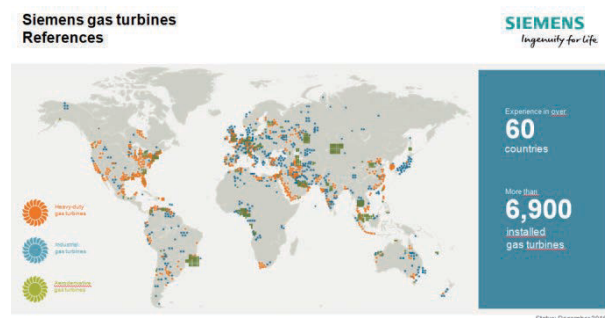


Fig. 3 Siemens Gas Turbine References &Footprint

収し蒸気タービンへのエネルギーとして活かすことは熱効率向上の視点から理に適っているが、部品点数の大幅増、蒸気タービン側との運転のマッチングによる起動及び負荷変化への制約の観点からその様な判断を下してきた。特に事業用ガスタービンは、一度導入すると、30年近くは使うことになるものであり、30年後の電力市場を思い描いて開発する必要がある。シーメンスでは、太陽光・風力発電の増大を見越し、将来的なガスタービンの役割を検討した上で、蒸気冷却方式の採用をしていない。そういう意味では、シーメンスは早い段階から再生エネルギーの動向に関心を持って、開発を進めてきたと言えることができる。

現在は最新鋭機種としてHLシリーズの開発を進めており、この主要な設計コンセプトとして

- 送電端効率65%達成可能な設計
- コンバインド運転で最低運用負荷40%まで可能
- 負荷変化率最大で85MW/分
- 着火からコンバインド定格負荷まで30分
- 定格負荷から停止まで25分

となっており、高効率化だけではなく、世界全体のトレンドとなっている再生エネルギーの増大に極力配慮した

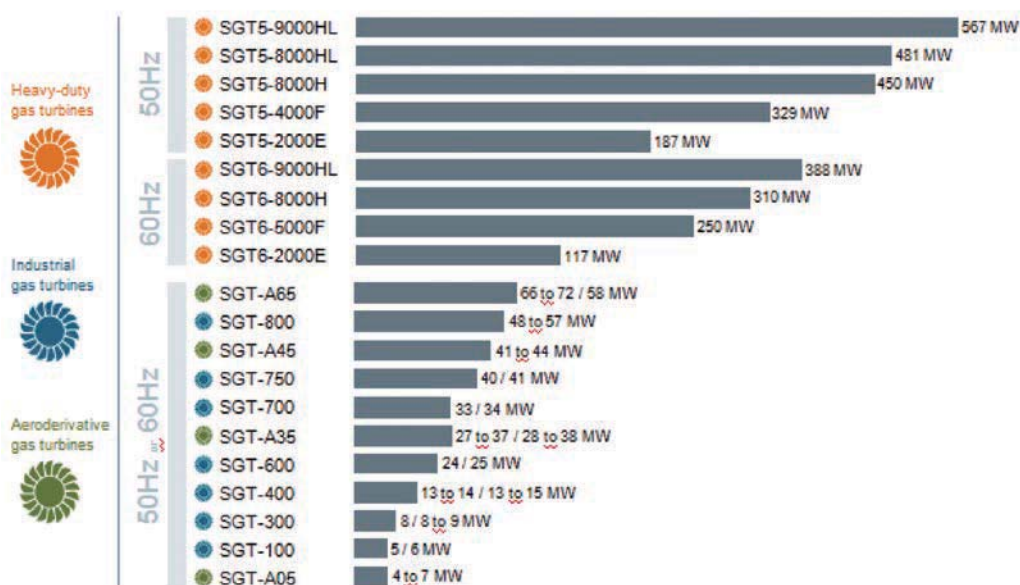


Fig. 4 Siemens Gas Turbine Line-up

**The new HL-class:
An evolutionary development step from proven H-class design**

SIEMENS
Ingenuity for life

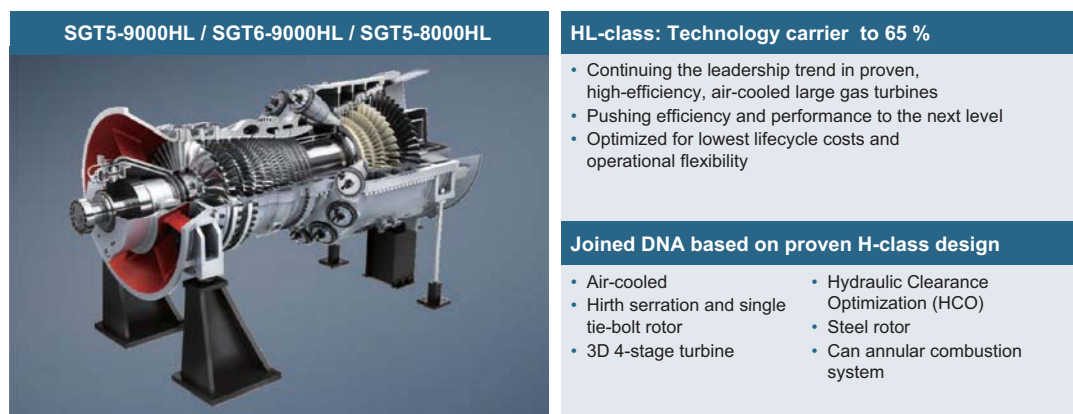


Fig. 5 Siemens Gas Turbine HL series design concept

設計となっており (Fig. 5参照), 負荷変化率は事業用ガスタービンの中でも最速クラスとなっている。

負荷変化率を含めた再生エネルギー増加と言う市場に適用するために配慮した設計内容を以下に紹介する。

2.2 ロータ

負荷変化や起動停止によるガスタービンへの大きな影響の一つとして熱的なサイクリックな変化から生まれる熱応力, ひいては, 低サイクル疲労が挙げられる。このため負荷変化や起動停止に伴う熱的变化により生まれる熱応力を極力緩和する設計が肝要である。シーメンスでは, これに適したセンタータイボルト方式のロータ構造を採用している。ロータディスクはFig. 6にあるハースセレーションと言う, 放射状に山形の歯を隣接したディスクとの接触面に切っておくことで, 各ディスクにおける芯出し, トルク伝達, 起動停止における熱的なディスク膨張・収縮による熱応力を逃す構造となっている。



Fig. 6 Hirth Serration Design

再生エネルギー増加により, 負荷変化だけではなく, ベース運用からミドル・ピーク運用への変化が生まれ, 年間起動停止回数も増加することが想定されているが, このロータ構造により, 等価起動回数で5,000回まで一切ロータ分解点検が不要であり, 長期間大きな点検を実

施することなく, 現地で容易に作業ができる構造になっている。Fig. 7に, 参考までにHLシリーズの標準点検インターバルを示す。

2.3 油圧式クリアランスコントロール

ガスタービンの起動時には, 燃焼ガスが流れる流路にあるタービン動静翼といったものが先に加熱され熱的膨張をしてしまうが, ケーシングは外部にあることもあり, 温度上昇が遅れる。この温度差により翼のチップが外周と接触してしまう可能性がある。この可能性は素早い起動を行う程増大する。シーメンスでは, この起動時はチップクリアランスの裕度をとっておき, 定格負荷に到達し熱的安定になった時点で, ロータを圧縮機方向に一定距離動かすことで, チップクリアランスを詰める方式をとっている。(Fig. 8参照) この駆動はスラスト軸受内にパッドを油圧シリンダにて, 適正な距離動かすことで, 行っている。この際, 圧縮機側のクリアランスが極力増大しないように, 圧縮機ケーシングは円筒形上, タービン側はクリアランスが詰められる様に円錐形状になるように設計をしている。加えて, 一軸型コンバインドの場合には蒸気タービンとはクラッチで連結しているため, 蒸気タービンロータは, 軸方向に移動することではなく, 蒸気タービンのチップクリアランスには影響を与えないようになっている。

これにより負荷変化等の過渡的な運用に柔軟性を持たせることができ, 万が一トリップした後もガスタービンに異常が無いことを確認した後, 制約なく再起動をかけることが可能である。

2.4 部分負荷効率への配慮 - VGV

当然, 再生エネルギーが増加することで, ガスタービンはベース運用からミディアム, ピーク運用へと用途が変遷していく。これにより, ガスタービンが部分負荷で運用されている時間も長くなり, 部分負荷効率を高く維持できるかと言う点も無視できない要素になっていく。

そこで近年用いられているのがVGV (可変静翼) で

Continuation of competitive & flexible maintenance concepts with 33kEBH or 1250 ES interval

SIEMENS
Ingenuity for life

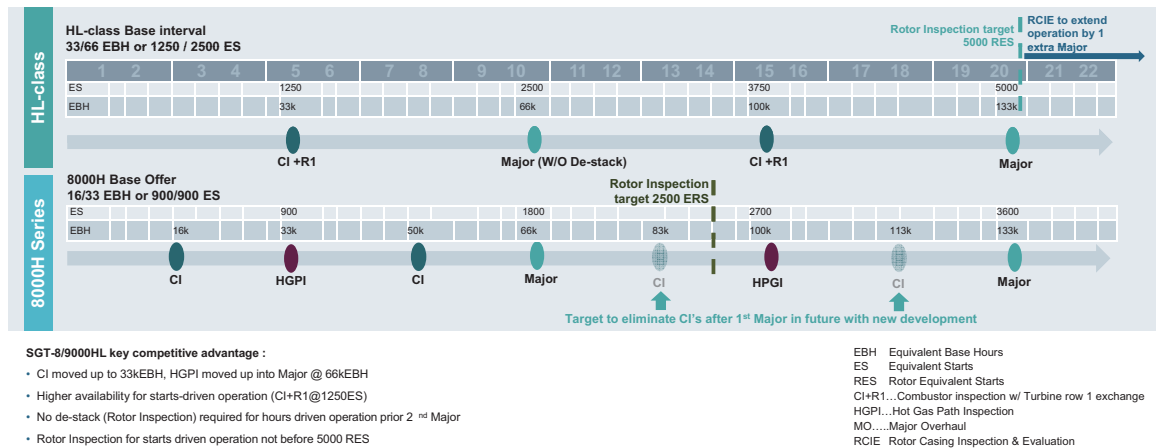
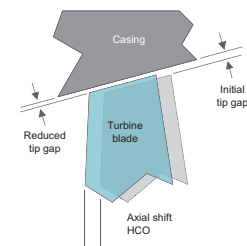
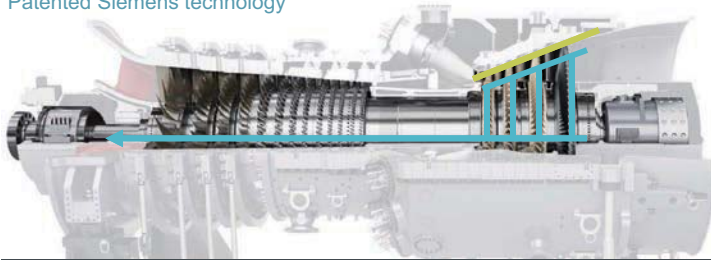


Fig. 7 Standard Siemens gas turbine inspection interval

Siemens Hydraulic Clearance Optimization (HCO): Fast starts and high load gradients w/o penalty

SIEMENS
Ingenuity for life

Patented Siemens technology



Hydraulic rotor shift to control turbine clearances

- High operational flexibility (fast starts) at low degradation
- Simple, fail-safe and validated – since 2004
- Enabling state of the art operational flexibility without burdening life-time (reduced degradation)

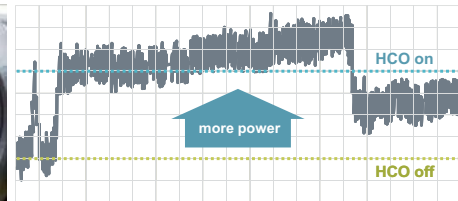


Fig. 8 Hydraulic Clearance Optimization (HCO) design

ある。元来、ガスタービン入口空気流量を制御するためにIGV（入口案内翼）を圧縮機入口に設けていたが、上流の複数段静翼を可変にし、部分負荷時の圧縮機効率低下を防ぐ役割をさせている。HシリーズではIGV加えて4段となっており、75%負荷でもガスタービン効率は5%低下に留まり（Fig. 9参照）、高い効率を維持することが可能である。HLシリーズでは3段を設置することで計画している。

2.5 プラント起動

事業用大型ガスタービンは蒸気タービンとのコンバインドサイクルで用いられることが通常であり、コンバインドサイクルとして負荷変動への応答、早期の起動／停止を考慮することが重要である。



Fig. 9 Variable Guide Vanes (VGW)

シーメンスの標準的な一軸式コンバインドサイクルでは、蒸気タービンとはクラッチで連結しており、ガスタービンの回転上昇時は、蒸気タービンはターニング状態を維持している。これにより、ガスタービンは蒸気タービン及びボイラの運用性の制約を受けることなく

起動が可能である。また、一般的にガスタービン並列後、蒸気タービンへの蒸気通気するまでにガスタービンは負荷上昇を一旦留めておく必要があったが、長期間負荷をホールドすることなく、起動プロセスを進めることが可能としている。この起動を実現するために大きなボトルネックは、HRSGの高肉厚部位熱的低サイクル疲労であり、Benson式の貫流ボイラもしくはNEM社製Drum Plus技術⁽⁴⁾のHRSGを用い、薄肉化することで、時間短縮が可能になった。これにより、Fig. 10のように、当社のこれまでの起動時間50分から30分に大幅な削減が可能となった。これは、起動時間が早くなることによる応答性への貢献だけではなく、起動時に用いるエネルギーの削減に繋がっている。実際のSGT 5-8000Hガスタービンコンバインドプラントの起動カーブをFig. 11に示す。この運転実績では約25分での起動を達成している。

Power Supply
Start-stop operation – Co-Start

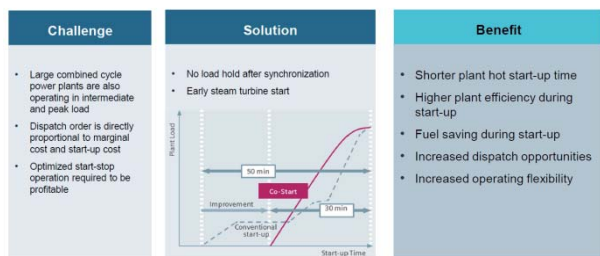


Fig. 10 Faster Start up - Co-Start Concept

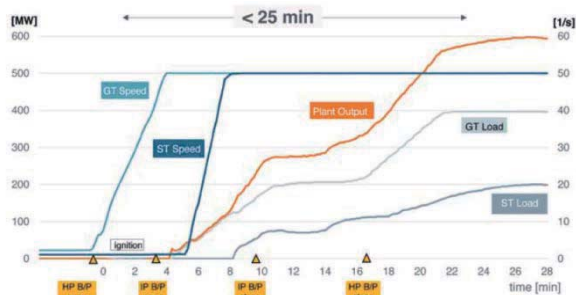


Fig. 11 Example - Hot CoStart in Practical⁽⁵⁾

2.6 プラント停止

コンバインドサイクル停止時も起動と同様に蒸気タービンを停止にかける際にこれまではガスタービン負荷を保持する必要があったが、Fig. 12にあるように、この保持を省略することで定格負荷から停止までの時間を50分から25分に短縮することが可能である。これにより、停止時に用いる燃料量の低減を図ることが可能である。加えて、停止作業中に再起動指令を受ける時間も短くなることにより、さらに柔軟な運用を実現することが可能となっている。

3. バッテリーソリューション⁽⁶⁾

しかしながら、ガスタービンという機械的な機器だけで、高速な負荷応答・起動停止に対応するのは限界があ

Just in Time Power Supply
Start-stop operation – Quick Stop

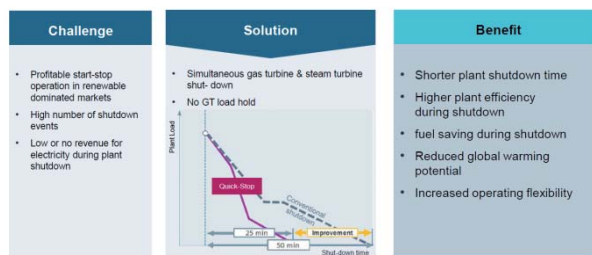


Fig. 12 Faster Shut Down - Quick Stop Concept

る。シーメンスではリチウムイオンバッテリーと一緒に制御することで見かけ秒単位レベルの負荷応答・起動停止が対応可能となるFig. 13にあるようなSIESTARTTMというソリューションを展開している。これは、MWhクラスのバッテリーを同じ発電所に配置し、ガスタービンと同調をとりながら制御することで、様々な電力系統安定に寄与する発電システムである。

SIESTARTTM – The performance of conventional power plants combined with instant & reliable Battery Energy Storage Systems

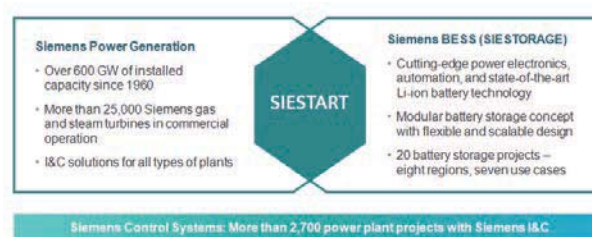


Fig. 13 SIESTARTTM concept

このソリューションを用いることで、数秒でガスタービン定格負荷出力を供給することも可能となる (Fig. 14)。このバッテリーの充放電を利用することで

- 周波数変動への応答
- さらに低い最低運用負荷
- 瞬時の負荷応答
- 一時的な過負荷運転
- 安定したアイランド運転
- 停電時の非常用電源

を実現することが可能となり、ガスタービン単体では出来ないような再生エネルギー変動への応答が可能とな

SIESTARTTM: Optimized performance and new opportunities – for grid and ancillary services and turbine operation

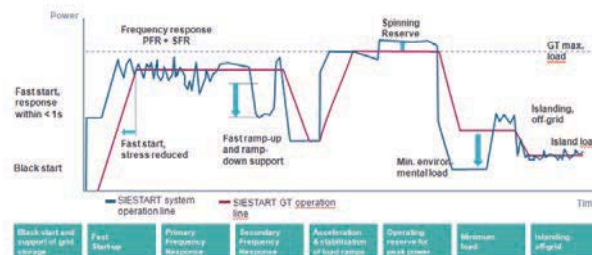


Fig. 14 Enhance load change & grid support capability

ている。

50MWクラスのガスタービンであるSGT-800に10MWhのバッテリーを組み合わせたプラントレイアウトをFig. 15に示す。バッテリーにより若干の敷地面積を取ることにはなるが、このバッテリーにより、瞬時に50MWの電力を起こすことが可能で、バッテリー放電される前にガスタービンが定格負荷に到達して、電力供給のバトン渡し、システムをサポートすることが可能になる。

現時点では、バッテリー価格の問題もあり、経済性に見劣りするが、最近の世界的なバッテリー開発の加速、調整力市場への注目を考えると、そう遠くない時期に標準的なソリューションの一つになるのでは無いかと考えている。

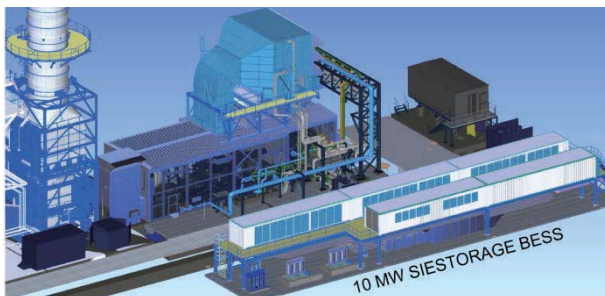


Fig. 15 Plant Layout - SGT-800 with 10MWh Battery

4. まとめ

シーメンスのガスタービンにまつわる負荷応答性への配慮についてご紹介をした。前述の通り、シーメンスでは負荷応答性、起動/停止柔軟性を以前より重要な項目の一つと考えており、高効率とメンテナンス性を加えた3本柱の一つと言う位置づけで設計に配慮を進めてきたこともあり、非常に高い性能を有している。現在開発しているHLシリーズ初号機となるガスタービンは、この優れた起動停止/負荷変化特性が認められ、ピーク運用のプラントとしてDuke EnergyのLincoln Countyの発電所に納入される予定である。2020年初頭から試運転を開始する予定で、現在開発スケジュール通りに進行している。

一方で、ガスタービンに今後の再生エネルギー増大による電力系統への影響を全て託すと言うのは限界がある

と考えており、あまり急速な負荷応答への配慮はガスタービンそのもののコスト高や効率低を導く可能性もある。加えて、急速な負荷応答に対応するとガスタービンの寿命消費や部分負荷での運用の強制と言った運用面でのコスト増も懸念され、このような負荷応答に対するインセンティブをどの様に評価し設定するのかといった議論が必要であると考えます。

シーメンスは、世界における調整力市場の動向を見越しながら、これまで通り、適正な経済性を維持したガスタービン開発を進めていく。その一方で、ガスタービンに無理のある負荷変化はバッテリーや電解装置による水素貯蔵といったものと複合させたソリューションで臨むことも一つの方策と考えており、複線的に開発を進めている。

シーメンス日本法人としても、このような製品群、ソリューション群の提案を通じて、日本国内市場において電力系統安定に貢献していけるように努力する所存である。

参考文献

- (1) 資源エネルギー庁 <<http://www.enecho.meti.go.jp>> (参照日 2018年10月30日)。
- (2) 外務省 気候変動に関する有識者会合 <https://www.mofa.go.jp/mofaj/ic/ch/page4_003622.html> (参照日2018年10月30日)。
- (3) シーメンスホームページ <https://www.siemens.com/global/en/home/products/energy/power-generation/gas-turbines.html#> (参照日2018年10月30日)。
- (4) DrumPlus™ for Panda's Hummel project on Modern Power Systems <<https://www.modernpowersystems.com/features/featuredrumplustm-for-pandas-hummel-project-4893263/>> (参照日2018年10月30日)。
- (5) James Varley, Fortuna: demonstrating a role for flexible CCGT with cogeneration, Modern Power Systems, May 2016 Vol. 36 No. 5
- (6) シーメンスホームページ <<https://www.siemens.com/global/en/home/products/energy/power-generation/power-plants/siestart-hybrid-solutions.html>> (参照日2018年10月30日)

特集：高負荷変動への対応

航空転用型ガスタービンによる対応の現状

Contribution of Aero-derivative Gas Turbine on the Electrical Grid with Renewable Energy



米澤 克夫^{*1} 井上 靖浩^{*2} 中野 英彦^{*2} 鈴木 武雄^{*2}
YONEZAWA Yoshio INOUE Yasuhiro NAKANO Hidehiko SUZUKI Takeo

キーワード：ガスタービン，航空転用型，再生可能エネルギー，LM6000TM，LMS100TM，高速起動

Key Words：Gas Turbine, Aero-derivative, Renewable Energy, LM6000TM, LMS100TM, Fast Start

1. 緒言

航空転用型ガスタービンとは，航空機用エンジンであるターボファンエンジンやターボプロップエンジン，ターボシャフトエンジンなどを発電や回転機械駆動などの陸上設備用に転用したものである。この航空転用型ガスタービンによる発電設備が，近年問題となっている再生可能エネルギー大量導入に伴う高負荷変動に対して電力系統の安定化の一助となる。これは，例えば1990年代後半の電力自由化に始まり，再生可能エネルギーによる発電が普及拡大してきているアメリカにおいて，航空転用型ガスタービンによる発電設備が多数導入され，系統安定に貢献していることより明白である。日本においては，再生可能エネルギーの普及は進んでいるが，航空転用型ガスタービンの特性を生かした普及はあまり進んでいないのが実情といえる。本稿では，アメリカの状況の振り返りと，日本の電力系統の公開情報を分析することで，航空転用型ガスタービン貢献の可能性について議論する。

2. 航空転用型ガスタービン発電設備⁽¹⁾

航空転用型ガスタービンは一般的に，エンジン単体で高効率，小型軽量，保守が容易，高速起動，繰り返し発電能力などに優れるといった特徴を持つ⁽²⁾。

また，航空転用型ガスタービンの出力は航空機用エンジンの最大サイズから50MW程度が最大だが⁽³⁾，航空機用エンジンと重構造ガスタービンの設計手法を組み合わせ

せて開発された航空転用型ガスタービンの柔軟性を持つ100MW級の発電用ガスタービンエンジンも開発，市場投入されている⁽⁴⁾。

2.1 航空転用型ガスタービンの特徴

2.1.1 構造・制御⁽¹⁾ 航空機用エンジンは大推力・軽量が求められており，その派生型の航空転用型ガスタービンも出力に対して小型・軽量である。また，飛行中の周囲の環境や離着陸時などに高速かつ大レンジに出力を変更する必要がある，かつ起動停止を繰り返す運用に対応する必要がある。従って，航空機用エンジンは薄肉構造となっており，その技術を踏襲した航空転用型ガスタービンも重構造ガスタービンと比較すると全体的に薄肉構造となっている。

航空転用型ガスタービンエンジンは，航空機用エンジンのコア部分を転用し発電機駆動用のフリーパワータービンを追加した構造となっていることが多いが⁽⁵⁾，機種によっては，発電機がガスタービンのタービンまたは圧縮機に直接接続されるものもある⁽²⁾。

航空機用エンジンは効率よく大推力を得るために高負荷・高圧力比圧縮機が採用されており，この圧縮機が航空転用型ガスタービンにも利用されているためシンプルサイクルでのサイクル効率が高くなっている⁽⁵⁾。航空機用エンジンは液体燃料が用いられるが，発電用のエンジンでは液体燃料に加え，ガス燃料も用いられるため，燃焼器は航空転用型ガスタービン用に開発され⁽⁶⁾，航空機用エンジンとは異なる仕様となっている。また，航空機用エンジン特にターボジェット，ターボファンエンジンでは推力を得ることを目標に設計されているが航空転用型ガスタービンでは推力ではなく軸動力を得る必要から発電機や機械駆動軸につながる出力タービンは航空転用型ガスタービン専用が開発されている。

航空機用エンジンではエンジンの稼働率を向上させる

原稿受付 2018年12月11日

*1 (株)IHI 資源・エネルギー・環境事業領域
〒135-8710 江東区豊洲3-1-1 豊洲IHIビル

*2 (株)IHI 資源・エネルギー・環境事業領域
陸用原動機プラントSBU
〒135-8710 江東区豊洲3-1-1 豊洲IHIビル

ために、エンジン全体を交換およびエンジンをモジュール化しモジュール交換整備できるように設計されており、航空転用型ガスタービンも同様の構造を有することで高稼働率を実現している⁽⁷⁾。

航空転用型ガスタービンのもつ負荷変動への追従性や急速起動性能の高さ、応答速度の速さという特徴を十分に活かすために、制御装置にも高速性が求められる。

また、近年はNO_x等に対する厳しい排気ガス成分の規制に対応するため、希薄な予混合気を燃焼させて高温火炎の形成を防ぎNO_x生成を抑える乾式低エミッション型(DLE; Dry Low Emissions)燃焼器が多く用いられている。DLE燃焼方式は、安定燃焼と火炎温度を保つために、圧縮機出口の空気温度や燃空比、燃料の発熱量といった各種パラメータから火炎温度を高速計算し、燃料供給量や配分を適切に制御する^{(8),(9)}ことで成立している。

2.1.2 LM6000™とLMS100™⁽¹⁾ 本稿では、航空転用型ガスタービンの代表機種として、GE社製のLM6000™と、LM6000™をベースとした100MW級のLMS100™の2機種に注目する。

Fig. 1にLM6000™ガスタービンのカット図を示す。このLM6000™ガスタービンは航空機用ターボファンエンジンであるGE社のCF6-80C2を陸上設備用に転用したもので、1990年に発電用ガスタービンとして登場し、以来現在まで1,200台以上が生産されている。総運転時間も40,000,000時間を超える。北米大陸(アメリカ・カナダ)への設置数は約500台であり、うち400台以上がアメリカに展開されている。これらの大部分はピークカットや再生可能エネルギーによる系統変動抑制用などの調整電源として使用されている。

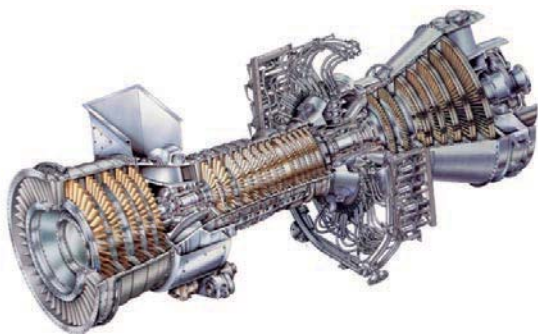


Fig. 1 LM6000™ Gas Turbine

再生可能エネルギーによる変動性はその規模が大きいため、LM6000™ガスタービン発電機の2倍の発電能力を持つLMS100™ガスタービン発電機も市場に投入されている。LMS100™はLM6000™ガスタービンを核として、航空転用型ガスタービンの高い機動性を維持しながら、重構造ガスタービン6FAの圧縮機を低圧圧縮機として利用しインタークーラ技術を取り入れて高出力化を実現したガスタービンである(Fig. 2)。シンプルサイクルにおいて最高で44%という熱効率を達成し、103MWの出力が可能である。タービンは3軸の設計で、高圧

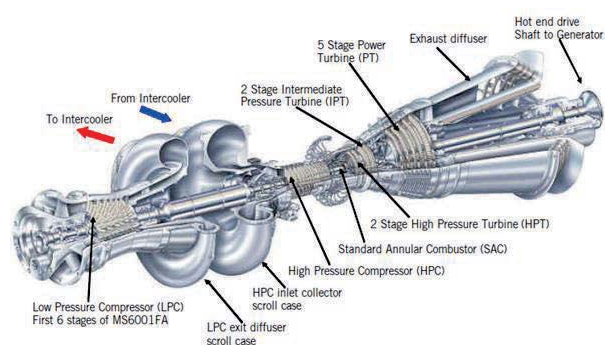


Fig. 2 GE LMS100™ Gas Turbine

タービンは高圧圧縮機、中圧タービンは低圧圧縮機を、低圧タービンは出力タービンとして発電機を駆動する。また、インタークーラにより交換された熱を利用することで、より効率的なエネルギー利用が可能になる。

Fig. 3にLMS100™によるシンプルサイクルパッケージの外観を示す。LMS100™の仕様や構造については文献⁽⁴⁾に詳しい。LMS100™は2004年に登場し、2013年末までに62台が生産されている。

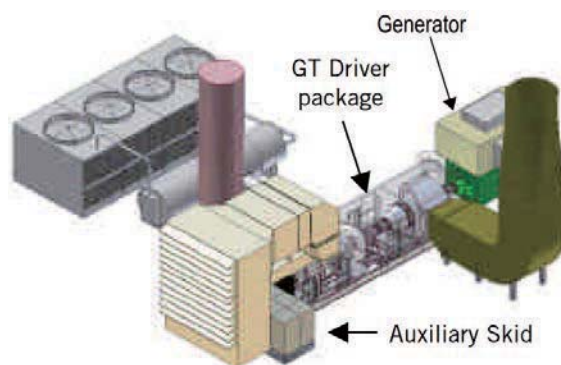


Fig. 3 GE LMS100™ Simple Cycle Gas Turbine Package

2.2 高速起動と負荷追従

LM6000™は、暖機運転時間の削減や負荷上昇スピード制限の見直しにより、10分起動シーケンスを確立している。これは、停止状態から最大定格出力まで到達することができる時間である。点火前のパージ時間については、案件要求による排気ダクト形状や設置国の法規制などにより左右されるが、最小ボリュームの排気ダクトとしたシンプルサイクル発電設備、あるいはパージ・クレジットと呼ばれるルールを適用することによって高速起動を実現している。起動には油圧モータを使用している。

着火後、自立速度を通過し高圧軸のコアアイドル到達、低圧軸(出力軸)回転数の最低回転数到達をまって、低圧軸をシンクロアイドル回転数まで加速・到達させる。この一連の流れが、2分という非常に短時間で終わる。シンクロアイドル到達後、暖機運転を2分行い、発電機の系統接続、負荷上昇となる。10分起動設定時の負荷上昇率は、12.5MW/minである。従って発電機同期後、無負荷から約4分で定格出力に到達することになる。

さらに近年、超高速起動として5分起動シーケンス

も提示されている。これは、パージ・クレジットと合わせて、点火前モタリングの短縮、シンクロアイドル到達後の暖機運転を1分に短縮し、さらに負荷上昇率を50.0MW/minまで引き上げ、約1分で定格出力へ持っていくことで実現した。Fig. 4に5分起動の概略トレンドを示す。なお、適切なクリティカルパーツの余寿命管理を行うことで、負荷増減率については、最大80.0MW/min (200%/min)まで上げることができるとされる。一方、LMS100™についても起動指令から10分以内で停止状態から最大出力まで達するという起動特性を有している。

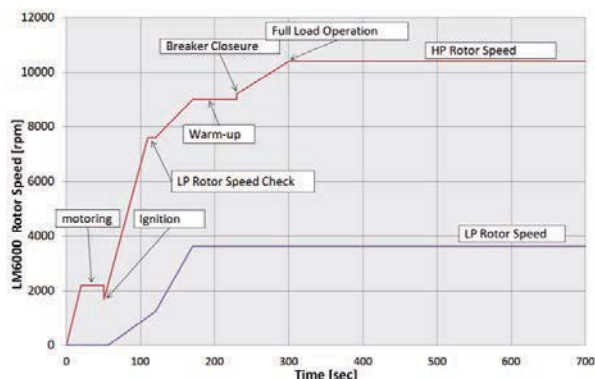


Fig. 4 LM6000™ Fast Start (5 minutes) Trend

LM6000™を2機と蒸気タービン1機を用いて構築する110MWクラスのコンバインドサイクルプラントは、LM6000™だけでプラント全体の約85%の出力を占める。従って貫流式ボイラ (OTSG) の採用、あるいはバイパススタックなどを併用することによって、ガスタービンの高速起動によりプラント容量の大半を短時間のうちに送電可能とすることができる。

あるいは、近年普及し始めているバッテリーシステムと組み合わせることで、給電指令に対して更に高速な応答が可能である。Fig. 5にそのイメージを示す。給電指令に対し、まずはバッテリーシステムが数秒から数分のオーダーで放電を開始し、その後5分から10分でガスタービンに切り替わっていくというものである。

負荷追従性についても、バッテリーシステムとの組み合わせによる更なる運用改善が可能である (Fig.6)。細

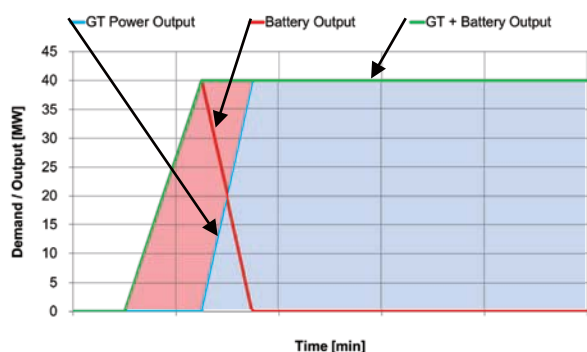


Fig. 5 Fast Start with Battery System

かな負荷変動をバッテリーシステムに吸収させ、大きな負荷増減にはガスタービンが応じるというものである。更に稼働中の発電設備では不足が生じる場合には、停止待機していた航空転用型ガスタービン発電設備のバッテリー併用超高速起動により対応することができる。

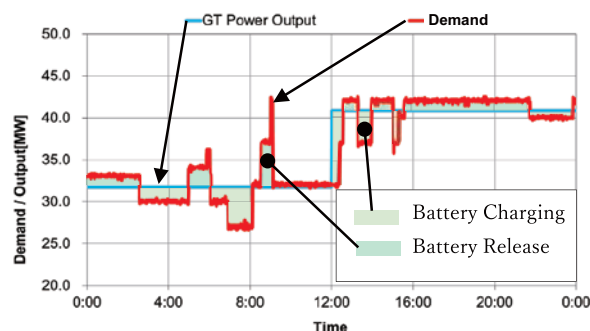


Fig. 6 Demand Response Sharing

3. 航空転用型ガスタービン発電設備の活用分析

3.1 アメリカの状況

航空転用型ガスタービンが多数導入されている北米大陸の電力系統について概観する。北米大陸西部地区には、太陽光発電が普及しているカリフォルニア州がある。CAISO (California Independent System Operator; カリフォルニア州独立系統運用機関) が、カリフォルニア州1日の電力需要変動予測を示す有名なダックカーブを発表したのは2013年である⁽¹⁰⁾。発表当時に予測した2014年以降の傾向に対し、CAISOが公表している⁽¹¹⁾日々の電力需要と発電量の実績から、一例として2018年4月13日の電力需要、並びに再生可能エネルギー (太陽光、風力、地熱等) とそれ以外 (火力、水力、原子力等 = Net demand) の発電量をFig. 7に示す。ダックカーブ2020年予想プロファイルを上回る再生可能エネルギー (太陽光) の普及が進行しており、夕方18~20時頃までの時間帯に発生する需要の急激な増加と、午前9~15時の間に起こりうる過剰発電 (供給が需要を上回る状態; overgeneration) という2つの問題が深刻化していることが読み取れる。過剰発電への対応は簡単ではないが、需要の急増減に対しては、各電力会社は航空転用型ガス

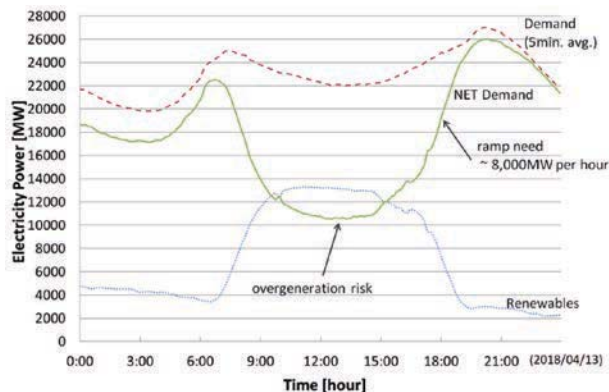


Fig. 7 Electricity Demand in California (2018/4/13)

タービンの高い機動性を活用する対策を政策レベルで推進している。

また、より短時間の時間軸で見たとき、風力発電等の出力は、3～4分周期での激しい変動を引き起こすため、調整電源側が正確に追従しなくてはならない。さらに、系統は電力安定だけでなく、電圧安定も求められ、SSSクラッチを備えてシンクロナスコンデンサの機能を持たせた設備も多数導入されてきた。

3.1.1 Sentinel Energy発電所^{(1),(2)} カリフォルニア州に属しCAISO管理下にあるSentinel Energy発電所は、3,000基の風力タービンを有する広大な風力ファームの中にある。出力100MWの航空転用型ガスタービンLMS100TMを原動機とする発電機を8台所有する公称定格発電出力800MWのシンプルサイクル発電所である。CAISOおよび電力会社（SCE; Southern California Edison）から各発電機の自動発電制御（Automatic Generation Control, AGC）が要求されており、電力計が各発電機出力端に設けられ必要な通信機器と制御装置も設置されている。これにより各発電機の正味発電量がSCE社とCAISOに通信で送られ、発電機毎に遠隔制御できるようになっている。発電所の運転員はSCE社の要請に基づき起動・停止操作を行うだけでよい。ため、運転員は通常1名、2シフトで運用しており、LMS100TMの10分起動や高速負荷追従特性を最大限に活用して、ピーク需要と広範囲の出力要請（50から800MW）に応え、間欠性・変動性の再生可能エネルギー発電を支える系統を安定化するための、スピニングリザーブ、クイックスタートリザーブ、レギュレーション増減など、様々なアンシラリーサービスを提供している。

各発電機の運転負荷契約は最低46MW・最大91MWで、その間で発電を行っている。8台のLMS100TMガスタービン発電機を適切に組み合わせて運転することで、発電所全体では約50～800MWの間で出力を調整している。各出力帯における発電所全体の正味の発電効率は、各発電機が定格負荷で発電している状態ならば、100～800MWの出力領域で効率は41.6～42.1%となりほぼ変化がない。部分負荷と定格負荷のユニットが混在している場合、1台のみ運転した最低負荷運転時には効率33%となるが、電力需要が増加し複数台運転とした場合、各ガスタービンの部分負荷率も高めになるよう台数を調整することで、おおむね3台以上で発電している場合には、発電効率はおおよそ40～41.5%を維持できる。

発電機の起動回数について、2013年7月以来、2015年8月までに全発電機の累積で4,834回起動しており、平均すると1台当たり5～6回/週となる。なお、Sentinel Energy発電所ではSCE社との取り決めにより発電機の起動回数を1日2回までに制限している。1回の起動における平均発電運転時間は、大体4時間程度となっており、ピーク対応用の利用が主であることが伺える。

Sentinel Energy発電所は、すでに大量の再生可能エ

ネルギー源が存在する南カリフォルニア地域において、目論見通り、高効率かつ高速負荷変動対応、およびピーク対応を担い、地域の風力および太陽光発電のバックアップ電源としての役割を果たしている。

3.1.2 Kearny発電所⁽¹⁾ ニュージャージー州に位置するKearny発電所はPJM ISO（Pennsylvania, Jersey, Maryland ISO）管理区域に所属しPSE&G（Public Service Electric & Gas）という電力会社が運営している。LM6000TMガスタービン発電機を合計10台所有し、公称446MWの発電設備容量を有する発電所となっている。PSE&GはKearny発電所を含め州内に4ヶ所の発電所を有し、重構造ガスタービン発電機5台、LM6000TMガスタービン発電機14台を所有している。これらLM6000TM発電機のうち、12台がシンクロナスコンデンサ仕様である。10分起動が可能なLM6000TMにSSSクラッチを備えた形態が、PJMの電力市場においてSynchronous Reserveとして登録可能であったための選択と推測できる。Kearny発電所のLM6000TMガスタービン発電機には、ページ・クレジットが適用されており、前回の停止から8日以内であればリークチェックを条件として点火前のページは発電所独自基準の1分でよいことになっている。また、発電機にはAGCが採用されており、周波数調整市場への参入も可能である。以上のように、Kearny発電所はPJMのアンシラリーサービス市場において高速起動性を予備力市場に、負荷追従性能を周波数調整市場にと航空転用型ガスタービンの特長を最大限に活かしている。無効電力供給による電圧調整能力も持たせ、制度に沿った様々なサービスを提供している。

3.2 日本における寄与の可能性考察

2018年秋の九州エリアにおける太陽光発電の抑制については記憶に新しい。四国エリアでは、再生可能エネルギーが電力需要に対して最大100%以上に達するケースが出てきたとの報もある。ダックカーブが発表されたのは2013年であるが、日本においても同様の状況となっていることを示す例と考えられる。そこで、九州・四国エリアの電力利用状況公開データを素材に、日本国内の電力系統の安定に対する航空転用型ガスタービンの寄与の可能性を考察してみた。

3.2.1 九州エリア 九州エリアにおいては、再生可能エネルギーのほとんどが太陽光発電によるものである。かろうじて太陽光発電の抑制を免れた2018年5月3日（Fig. 8）と発電抑制を実施した2018年10月13日（Fig. 9）の状況を概観してみる。データは、参考文献(13)より得た。太陽光発電量については、両日ともほぼ同程度で日中の最大発電時に約5900MWであるが、原子力発電については、状況が異なっていた。今夏の原因の再稼働により、原子力発電のベースロードが春の1100MWレベルから秋には4100MWレベルに増加している。そのため、火力発電は24時間平均値で5100MWから3500MWに落としている。

日中の火力発電低負荷運転は約4時間で、朝夕の負荷の増減にそれぞれ約4時間、そして夜間の12時間が火力発電の高負荷運転時間となっている。日中の太陽光発電最盛時に火力発電を抑制し、連系線による本州側への送電や揚水稼働などを利用することで春はバランスできたが、秋には2.9%程（電力量にして約350MW）の過剰発電となり、太陽光発電の抑制に踏み切った模様である。

原子力発電は、ベースロード発電として高負荷状態で安定した運転状態を維持しておきたい設備である。従って、負荷の変動はおのずと火力発電で吸収する必要がある。火力発電においても、発停にかかる時間やコストを考えると、負荷率を下げた状態で、一定数の運転台数を確保しておくことが、系統安定上必要となってくる。

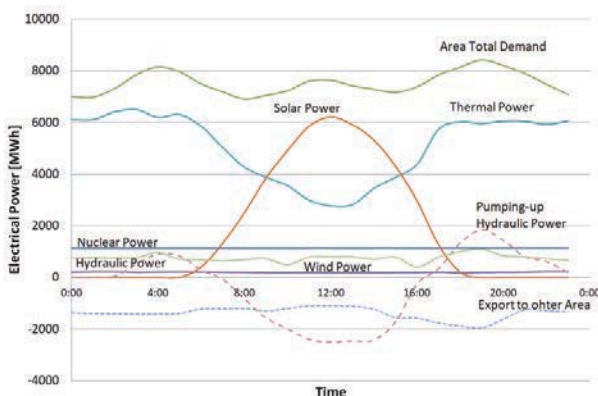


Fig. 8 Electrical Power Balance at Kyushu Area (2018/5/3)

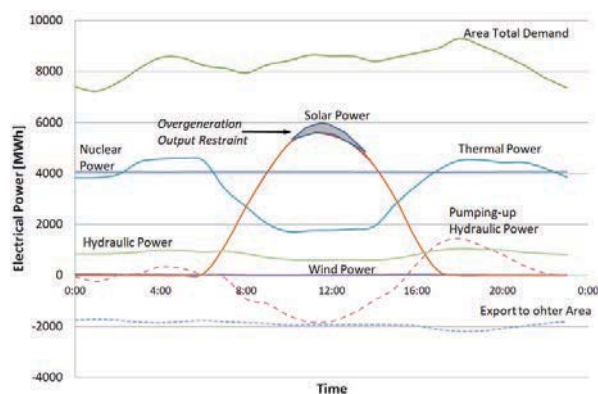


Fig. 9 Electrical Power Balance at Kyushu Area (2018/10/13)

春秋のデータから、この時期の火力の最低負荷は1700～2000MW程度で計画されていたと推察される。一方、ダックカーブの特徴である日出や日没時の発電ソースの急速な切り替え時間には、揚水発電と火力により調整をかけており、総量でおよそ5500～6000MWの増減（すなわち太陽光発電の総量分）となっている。揚水発電は、揚水による電力消費（-）から発電（+）まで約-2500～+1800MWの幅でデマンド変化に対応しており、火力はシーズン平均で1500～7000MWの幅で行われている。

九州電力が有する主要な火力発電所8カ所27機の当時の稼働数と稼働率については確認できていないが、春の

時点では火力の設備容量全体で見たときに、65%前後の平均出力で25～85%の幅で出力を振ったことになる。これが原子力によるベースロードの底上げの影響で、秋には、平均43%で15～70%の変動幅となっている。

エネルギーミックスの観点からも多様な発電方式を採用していく中で、出力調整機能については、火力発電の利するところが大きい。低負荷運転はプラント効率の低下を意味する。また、大規模火力になればなるほど、原子力発電と同様、ベースロード運用を行えるほうが有利である。九州電力の主要火力発電ユニットのサイズは、500MW以上のものが11機（合計6400MW）、200～500MWが10機（2850MW）、100～200MWが6機（690MW）である。この構成で最低負荷が15%（約1500MW）というのは、かなり低負荷だったといえるだろう。また、負荷調整幅が55%（約5500MW）あり、14時から18時の4時間で変化させている。繰り返し発停回数の制限や起動時間を考えると、どうしても効率の悪い低出力運転で日中を維持し、夕方の負荷上昇に備えておかなければならない。将来的に火力発電の低負荷低効率運転時間を減らしつつ、負荷変動調整幅を大きくとるためには、高速起動特性を有するユニットの運転台数・発停制御に対応していくことが一つの解となりうる。再生可能エネルギーを用いた発電所の規模は、これまでの火力発電設備に比べると小規模であるが、設備設置数は多く設置箇所も分散している。これら分散電源の普及と、電力の地産地消型未来像が語られる流れにあっては、火力発電も航空転用型ガスタービンによる40～100MWクラスの発電設備を分散配置し、こまめな発停制御を用いて小規模エリア単位でバランスをとることに優位性が出てくるだろう。

3.2.2 四国エリア 四国エリアでは現在、原子力発電は行われていない。2018年5月20日10時から12時には、再生可能エネルギーによる発電量がエリア内の需要に対して100%を超えた。この時、太陽光がエリア内需要の74%を賄い、水力・風力が残り26%を発電、日中の火力による発電は、すべて揚水ポンプ駆動と連系線によるエリア外への送電に充てられた形であった。しかも、昼夜の太陽光の発電量差を、揚水ポンプとエリア外への送電でバランスさせることができたため、火力発電の負荷率をほぼ一定に保った運転を行えている（Fig. 10：データは参考文献(14)より得た）。エリア外に受け入れがあったことで、火力は一定負荷で運転できているが、エリア内でバランスさせる必要が出てきた際には、太陽光発電1700MWのうち揚水ポンプが消費する600MWを除いた1100MW分を調整する必要が出てくることになる。四国エリア4つの火力発電所の設備容量3736MWのうち、平均1733MW（設備容量の46%）で当時運転されていたものが、設備容量の約17%程度まで負荷を下げないといかない計算になる。

航空転用型ガスタービンを導入することで、発電設備

の発停を伴う調整方法を容易にとることができ、より高効率に低負荷から高負荷まで短時間の幅広い需要変化に応えることが可能となる。台数こそ多くなるが、設置場所を分散させることから小エリア単位でバランスがとれ、遠隔地間高圧送電の維持負担軽減も期待できる。再生可能エネルギーの設備容量がエリア内の需要とバランスしつつある四国エリアでは、連系線を除くと24時間ベースロード発電機と呼べるものがなくなり、発停を伴う火力での調整が求められる段階に入ったと考えられる。

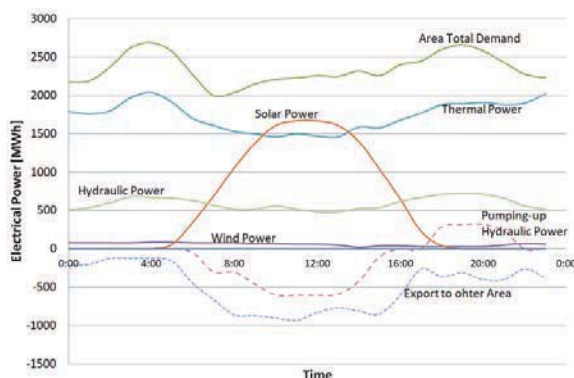


Fig. 10 Electrical Power Balance at Shikoku Area (2018/5/20)

4. 結言

航空転用型ガスタービンは冷態からの5～10分起動が可能であるため、停止待機状態は運転予備力として扱うことができる。また、負荷追従性に関しては最大200%/minでの負荷変化が可能であり、小容量ではあるが系統間での負荷周波数制御(LFC; Load Frequency Control)用調整電源としての適性が非常に高い。変動性再生可能エネルギーの大量導入に伴い、運転予備力・瞬動予備力の必要量が増加するが、水力・揚水発電の新規建設は難しい。完全停止した冷態状態でも運転予備力として活用できる航空転用型ガスタービンは運転予備力の容量確保に有用である。また、その負荷追従性能の高さから、小さい容量でも高いLFC調整力を有するため、予備力の保有目標値自体も下げる。

日本の電力系統において、高効率・大出力の大型重構造ガスタービンのコンバインドサイクル発電設備と、起動性・負荷追従性が優れる高効率の中規模航空転用型ガスタービンシンプルサイクル発電設備を適切に組み合わせることで系統全体を構成することが、将来の再生可能エネルギーとの共存、あるいは再生可能エネルギーへ主力発電をシフトさせるための過渡期には必要と考えられる。航空転用型ガスタービンは、設備容量から電力系統への接続先として地域供給系統や配電系統といった系統末端部、消費地周辺が効果的である。電力系統に対する主な役割として、系統末端における潮流変動補償や電圧調整機能が求められるであろう。アメリカでは、これら特徴を生かし多数の航空転用型ガスタービンが既に稼働している。

日本国内への導入課題としては、予備力や容量市場、

アンシラリーサービス市場の制度設計や、余剰電力系統逆潮流等の制度設計で、設備導入に一定のインセンティブを持たせる必要性があげられる。

参考文献

- (1) 西田怜美,高村薫, 平成26年度～平成27年度成果報告書 エネルギー・環境新技術先導プログラム 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, (2016), pp. 217-255, 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).
- (2) 田中敦士, “LM6000発電プラントの技術仕様及び運用実績の紹介”, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 34, No. 1 (2006), pp. 14-18.
- (3) Soares, C., “Gas Turbines: A handbook of Air, Land and Sea applications”, Second Edition (2015), p. 20, Elsevier.
- (4) Walker, T. B., Horstman, M. J., 福岡 伸行, “100MW級最新型ガスタービンLMS100™の開発”, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 34, No. 1 (2006), pp. 8-13.
- (5) Soares, C., “Gas Turbines: A handbook of Air, Land and Sea applications”, Second Edition (2015), p. 17, Elsevier.
- (6) Røkke, P. E., Hustad, J. E., Røkke, N. A. and Svendsgaard, O. B., “Technology Update on Gas Turbine Dual Fuel, Dry Low Emission Combustion Systems”, ASME Proc., GT2003-38112 (2003), pp. 1-11.
- (7) Soares, C., “Gas Turbines: A handbook of Air, Land and Sea applications”, Second Edition (2015), p. 5, Elsevier.
- (8) Leonard, G. and Stegmaier, J., “Development of an Aeroderivative Gas Turbine Dry Low Emissions Combustion System”, ASME Proc., 93-GT-288 (1993), pp. 1-6.
- (9) Schlein, B. C., Anderson, D. A., Beukenberg, M., Mohr, K. D., Leiner, H. L. and Wolfgang Träptau, “Development History and Field Experiences of the First FT8 Gas Turbine With Dry Low NOx Combustion System”, ASME Proc., 99-GT-241 (1999), pp. 1-8.
- (10) Flexible Resources Help Renewables Fast Facts 2013 CAISO.
- (11) California ISO-Todays Outlook
<<http://www.caiso.com/TodaysOutlook/Pages/default.aspx>> (accessed on 31 October, 2018).
- (12) Thomas Mastronarde, Mark McDaniels, Val Madden, “Design Features Enhance Operating Flexibility of CPV’s 800 MW Sentinel Energy Project”, Power-Gen International November 12-14, 2013 Orange County Convention Center Orlando, Florida, USA, (2013).
- (13) 九州電力 でんき予報 (電力のご使用状況)
<http://www.kyuden.co.jp/power_usages/pc.html> (accessed on 30 November, 2018).
- (14) でんき予報 (四国エリアの電力使用状況) - 四国電力
<<http://www.yonden.co.jp/denkiyoho/index.html>> (accessed on 30 November, 2018).

特集：高負荷変動への対応

高速負荷応答性を備えた高効率中小型ガスタービンの開発

Development of Small and Mid-sized Gas Turbine
with High Efficiency and Fast Demand Response田中 良造^{*1}
TANAKA Ryoza谷口 智紀^{*1}
TANIGUCHI Tomoki玉井 亮嗣^{*1}
TAMAI Ryoji武藤 吉彦^{*1}
MUTO Yoshihiko高見 聡^{*1}
TAKAMI Satoshi笠 正憲^{*1}
RYU Masanori野村 嘉道^{*2}
NOMURA Yoshimichi川野 明人^{*2}
KAWANO Akihito根上 将大^{*2}
NEGAMI Masahiro

キーワード：ガスタービン，コンバインドサイクル，効率，信頼性，エミッション，再生可能エネルギー

Key Words：Gas Turbine, Combined Cycle, Efficiency, Reliability, Emission, Renewable Energy

1. 緒言

近年，不安定な再生可能エネルギーの利用拡大に伴い，工場，地域冷暖房などの分散型電源・熱源として利用されることの多い中小型ガスタービンについて，ローカルグリッドからの要求として負荷応答性，また同時に発電効率を上げることが求められている。

そのような背景のもと，2015年度より3年間，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「戦略的省エネルギー技術革新プログラム」において，負荷応答性と発電効率を向上させるための要素技術の研究，及びこれらを適用した高速負荷応答性を備えた高効率中小型ガスタービンの開発を実施した。

当社は1977年に自社開発の産業用ガスタービンの納入を開始し，現在は発電端出力150kW級から30MW級までの幅広い出力レンジを取り揃えている。今回の開発では対象機種として30MW級ガスタービンL30Aを選定した。

L30Aは低環境負荷エネルギー製品として分散型発電へのニーズに応えるべく，ガスタービンコジェネレーションシステム，コンバインドサイクル発電プラント（CCPP）に最適なコア・エンジンとして開発された30MWクラスの高効率ガスタービンである^{(1),(2),(3),(4),(5)}。L30AをFig. 1に，その主要緒元をTable 1に示す。

本稿では，L30Aに対して実施した開発プログラム“高速負荷応答性を備えた高効率中小型ガスタービンの開発”について紹介する。

2. 開発プログラム概要

本開発プログラムは“高速負荷応答性を備えた高効率中小型ガスタービン”の実機開発を目的としておりエン

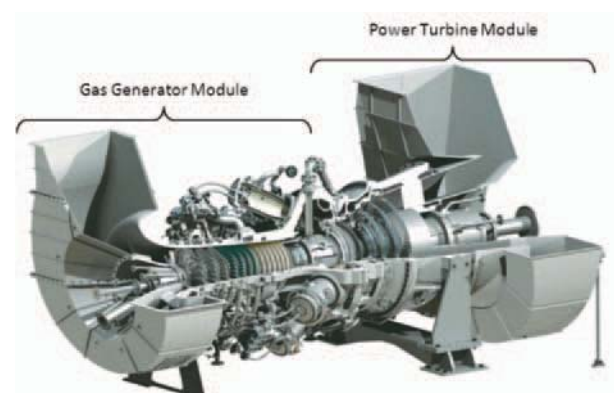


Fig. 1 L30A gas turbine

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%)	NO _x <15ppm

ISO conditions, Generator end, Natural gas

ジンそのものの開発とそれを達成するための要素技術開発を含んだ包括的なプログラムである（Fig. 2）。

【1】高効率率中小型ガスタービンの開発，で対象とする主要技術を分類し，

出力変化速度を高める技術として

【2】高速負荷変動対応DLE（Dry Low Emission）燃焼器

【3】高速負荷変動時のエンジン部品応力シミュレーション技術

原稿受付 2018年11月19日

* 1 川崎重工業(株) エネルギー・環境プラントカンパニー
〒673-8666 明石市川崎町1番1号
E-mail: tanaka_r@khi.co.jp

* 2 川崎重工業(株) 技術開発本部
〒673-8666 明石市川崎町1番1号
E-mail: nomura_ym@khi.co.jp

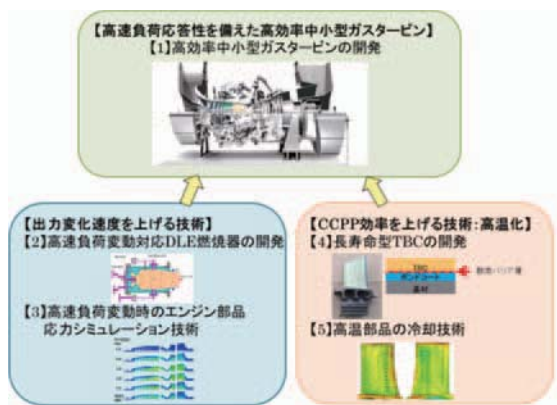


Fig. 2 Outline of Development Program

発電効率を高めるためのタービン高温化技術として

【4】長寿命型TBC (Thermal Barrier Coating)

【5】高温部品の冷却技術

の開発を実施した。これら技術の集積により、ガスタービンの負荷応答性は、従来機の10%/分から20%/分となり無負荷状態から全負荷運転まで5分で到達が可能となるとともに、従来機よりすでに世界最高水準であったガスタービン単体効率を向上させた。

CCPPシステムとした場合の発電効率は、同クラスの高効率ガスタービンを用いた100MW級CCPPとして世界最高水準の55.2%/54.4% (100MW/90MW) を達成している。

3. 開発プログラム実施概要

開発は開発要素毎に各種リグ試験及び計算シミュレーション、実機試験が必要な項目については当社明石工場内のL30A専用運転設備にて実機試験が行われた (Fig. 3)。この運転設備は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。またテレメータによる回転部品の振動・温度計測、パイロメータによるタービン動翼温度計測、DLE燃焼器のエミッション測定も可能な設備となっている。

以下、開発要素毎に結果を示す。

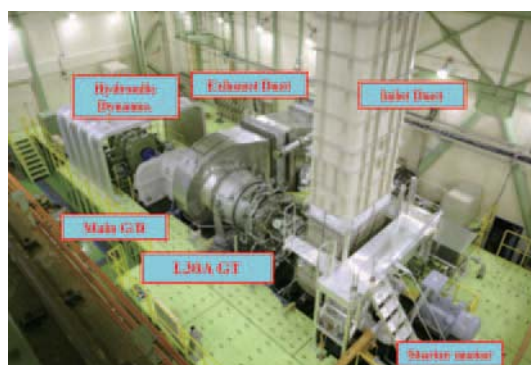


Fig. 3 Engine testing facility

3.1 高速負荷応答性を備えた高効率中小型ガスタービン

2016年度に試験を開始、高速負荷変動試験、DLE燃焼器試験、テレメータによる過渡応力計算用校正データ取得試験、パイロメータによる高温部品温度計測試験を含む一連の試験を実施した。Table 2に取得した性能、他を示す。尚、負荷応答速度20% FL/分は本プログラム (戦略的省エネPG) で設定された特定技術課題であり、2014年度に国から出された指針である。本開発では20% FL/分を開発目標として設定した。

Table 2 Measured Gas Turbine Performance

	This program	Current model
Electric output	34.1 MW	30.1MW
Thermal efficiency	40.2 %	40.1%
Exhaust mass flow rate	91.5 kg/s	88.7 kg/s
EGT	503 deg.C	470degC
Demand Response rate	20%FL/min.	10%FL/min.
NOx (O ₂ =15%)	NOx<15ppm	NOx<15ppm
W/O losses ISO condition : Gen. end		

3.2 高速負荷変動対応DLE燃焼器の開発

NOx性能の確認については2015年度に実圧リグ試験を実施、社内に試験設備がないため独)アーヘン工科大学で実施、数種類の燃焼器を試し、仕様を決定した。実機試験では、NOx値は目標値に対し十分低い結果となった (Fig. 4)。

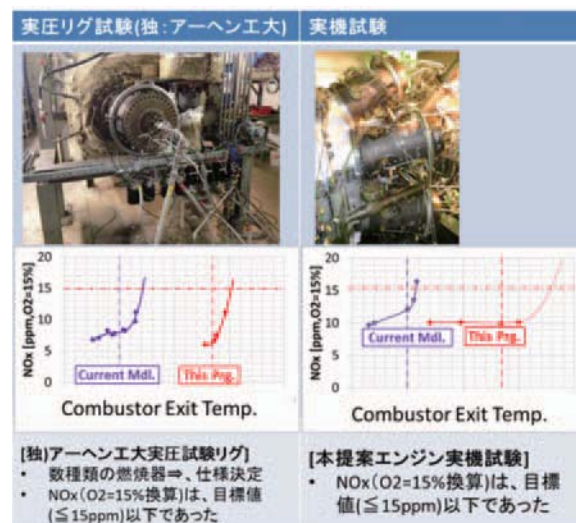


Fig. 4 DLE Combustor emission measurement results

負荷応答性の確認試験では実際に負荷を目標値である20%/分で増減させ、負荷追従性 (逆火・失火・燃焼振動等がないこと)を確認している (Fig. 5)。

3.3 高速負荷変動時のエンジン部品応力シミュレーション技術

高速負荷応答時にエンジン部品に発生する応力を推定するために、以下のステップで検討を行った。

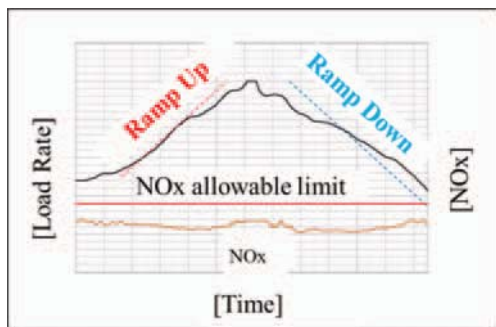


Fig. 5 DLE Combustor Demand Response test result

- ① 種々の起動パターン時のロータの過渡温度をテレメータ計測
- ② FEM解析による過渡応力計算モデルの構築，境界条件は計測及び相関式で計算される時刻依存の熱伝達率 (HTC₀)
- ③ GA (遺伝的アルゴリズム) により①の実測結果に合うよう②のHTC₀に対する補正係数 c のチューニングを実施
- ④ ③でチューニングされたHTC ($=c \times \text{HTC}_0$) をFEM解析に反映することで任意の運用条件で応力を推定できる「過渡応力シミュレータ」を開発

今回テレメータ計測により3ケースの起動パターンについて過渡温度の計測を実施 (Fig. 6), GAによる補正係数 c のチューニングを行った結果3ケースとも解析値と計測値が良く一致している (Fig. 7)。尚，補正係数 c は3ケースとも共通である。

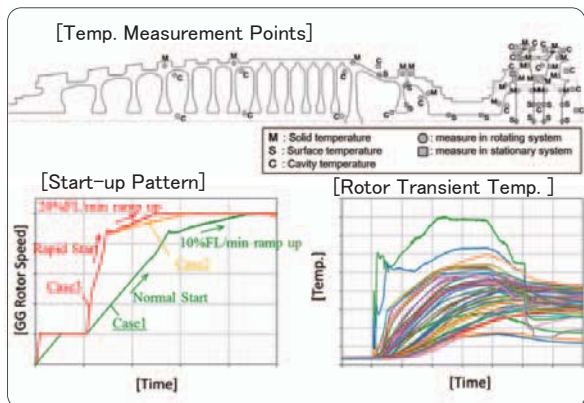


Fig. 6 Rotor transient temp. measurement results (typ. case)

本プログラムで定めた以下の簡略パターンを想定し，過渡応力シミュレータを用いた発生応力の推定を行なった (Fig. 8)。

- ・再生可能エネルギーはPVを想定，昼間に11回の変動
- ・ガスタービンは50%～100%の負荷を30分毎に往復，負荷変化速度は20%FL/min.

今回検討したパターンでは，起動直後に通常運用と同じレベルの最大応力に到達した後は，負荷変動による応力の変動はあるもののピーク値，応力振幅とも十分許容

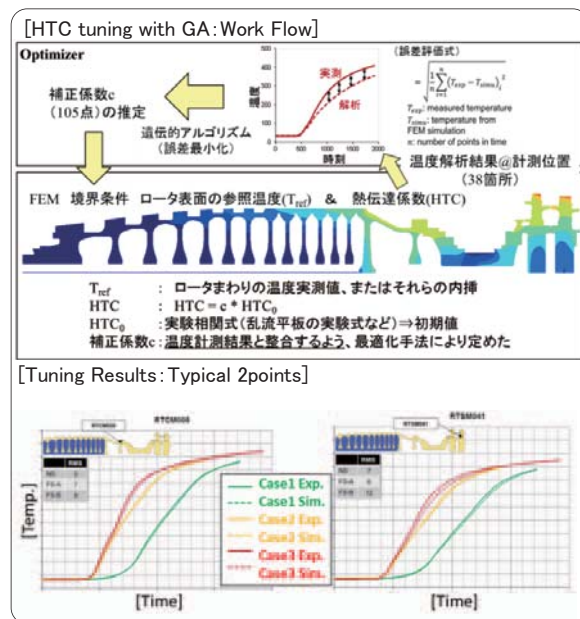


Fig. 7 HTC tuning with GA (Genetic Algorithm)

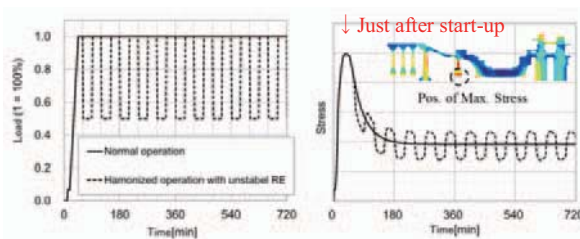


Fig. 8 Stress simulation with typical operation pattern

できるレベルであった。但し，GTに要求される運用パターンはグリッドサイズ，再生可能エネルギーの導入量，気候天候により変わるため，導入サイト毎の事前検討が必要であると考えられる。これは今後の課題である。

3.4 長寿命型TBC (Thermal Barrier Coating) の開発

本開発では，タービン高温化のための技術として，長寿命型TBC (Thermal Barrier Coating) のリグ試験による寿命評価及び製造条件の最適化を実施した⁽⁶⁾。

[長寿命型TBC (メカニズム) について]

TBC (Thermal Barrier Coating) のトップコート (セラミック系) とボンドコート (メタル系) の間に堅牢な酸化被膜 (アルミナ) による酸素バリア層を形成，コーティング剥離寿命の決定因子であるボンドコート表面の酸化速度を50%以下に抑制することでTBCの剥離寿命が約2倍となる。Fig. 9に模式図をFig. 10にリグ試験結果を示す。

[最適施工条件の確立]

電子顕微鏡観察 (TEM)，放射光によるX線回折 (@SPRing-8 : Fig. 11) を実施，酸素バリア層の形成条件，ミクロ構造，結晶構造について分析し，形成条件と原理をおおむね解明することができた。それによると熱酸化処理時の酸素分圧が適切であれば堅牢な α -アルミナの

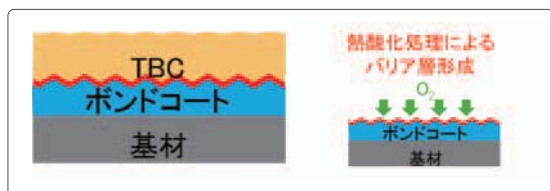


Fig. 9 Schematic figure of highly durable TBC

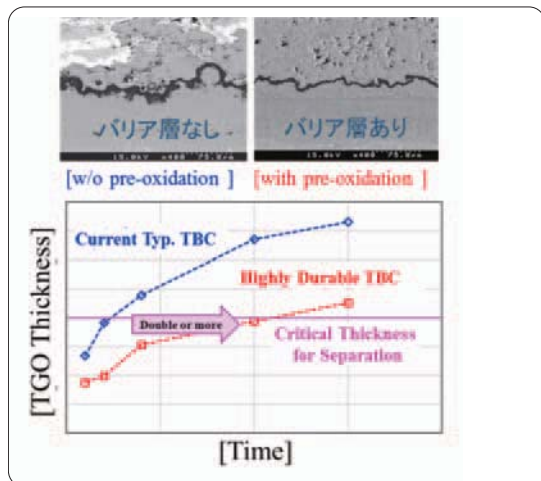


Fig. 10 Isothermal oxidation test result

バリア層が形成される。酸素分圧が低いとバリア層の形成が不十分、また高いと α -アルミナ以外の酸化物が支配的となり堅牢なバリア層にはならないことが分かった (Fig. 12)。



Fig. 11 External view of SPring-8

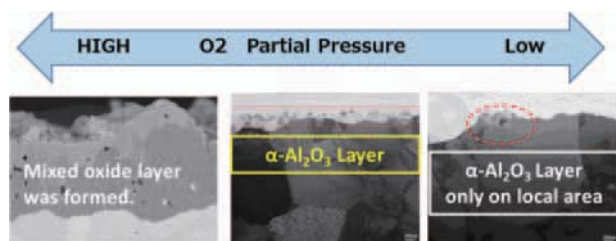


Fig. 12 Relation between oxides and PO2

3.5 高温部品の冷却技術

設計に際してはCHT (Conjugate Heat Transfer) 解析 (外部・内部流体解析・メタル部の伝熱一体解析) を実施した (Fig. 13)。

実機計測としては、パイロメータ (赤外線温度計測) /サーモクリスタル (埋め込みチップ: UCTS) /熱電対 (T/C) を使用した温度評価を実施, 設計結果と良く一

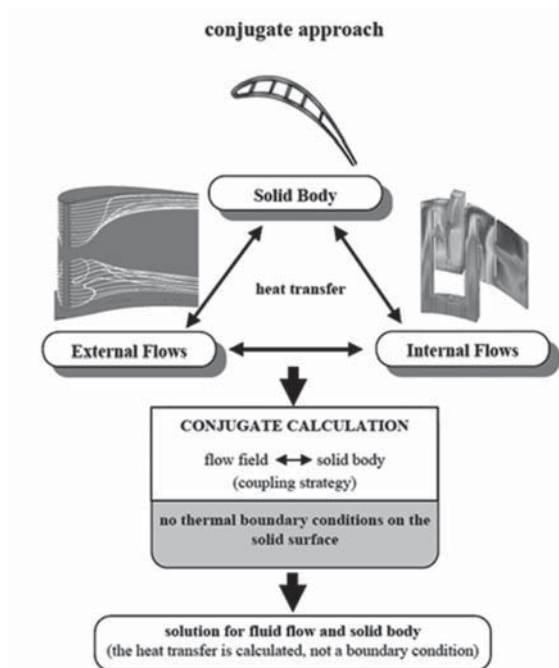


Fig. 13 Conceptual diagram of CHT analysis

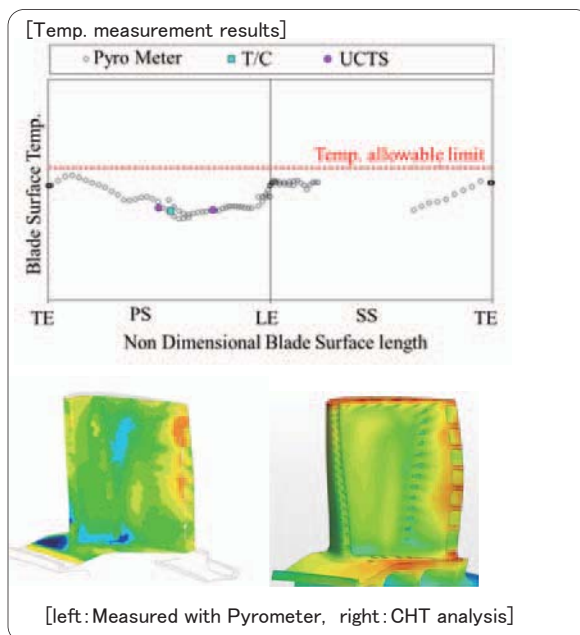


Fig. 14 Temp. Measurement results of GGT 1st rotor blade

致することを確認した。例としてGGT1段動翼の計測結果を示す (Fig. 14)。

4. システム事例

排気エネルギー (排ガス温度及び排ガス流量) の大きいガスタービンL30Aは, 排熱が利用できるシステムのコアとしての使用を念頭に開発された。以下に本開発プログラムの成果を反映した場合の代表的なシステム事例を紹介する。

[コージェネレーションシステム: CHP]

ガスタービンの出力は発電用に, また排ガスを熱源

としてプロセスに使用するシステムである。Table 3にL30Aをコジェネプラントに導入した場合のコジェネ性能を示す、飽和蒸気54.1t/hで出力32MW、総合熱効率は85.1%に達する。

Table 3 L30A Cogeneration System Performance

Model	PUC300D
Electric Output	32.16MW
Steam (saturated)	54.1t/h
Efficiency	39.1%
【Condition】	
Inlet Temp.	: 15 deg.C
Inlet/outlet losses	: 0.98 / 3.43 kPa
Fuel	: 13A (LHV=40.6MJ/Nm ³)

【コンバインドサイクルシステム：CCPP】

ガスタービンの出力は発電用に、また排ガスを熱源として高圧蒸気を発生させ蒸気タービンによる発電を同時に行うシステムである。

L30A 2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をFig. 15, Fig. 16に示す。また、プラント性能はTable 4に示す通りで、総合発電効率は54%を超える高効率なプラントとなる。

Table 4 L30A Combined Cycle System Performance

Configuration	1 on 1	2 on 1
Num. of GT	1×L30A	2×L30A
Total Output	44.5MW	89.4MW
Total Efficiency	54.1%	54.3 %
【Condition】		
Inlet Temp.	: 15 deg.C	
Inlet/outlet losses	: 0.98 / 3.43 kPa	
Fuel	: 13A (LHV=40.6MJ/Nm ³)	

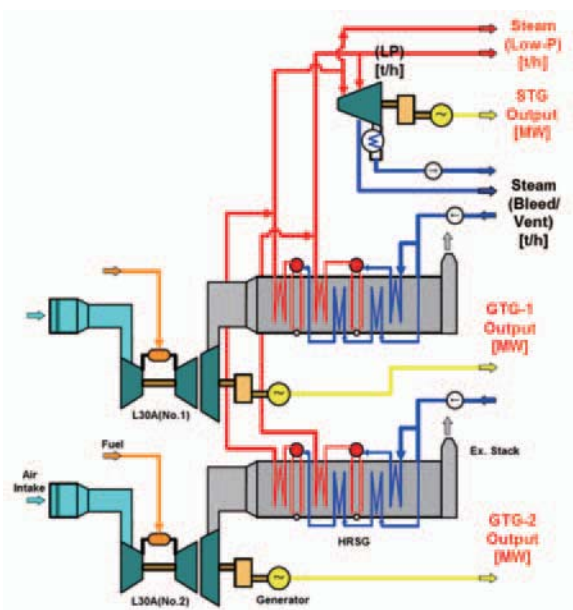


Fig. 15 Conceptual diagram of CCPP system

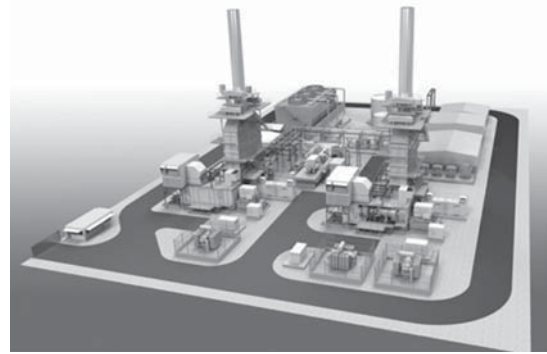


Fig. 16 Architect's conception of CCPP system

6. 結言

本稿では、2015年度から3年間、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）の助成を受けて実施した開発プログラム“高速負荷応答性を備えた高効率中小型ガスタービンの開発”について紹介した。

本プログラムの成果をKawasaki L30Aに反映することにより、低エミッション、信頼性、メンテナンス性といった特長はそのままに、出力・効率がさらに向上し、かつ高速負荷応答性を備えた製品とすることができた。

また排ガスエネルギーを利用することで、今回紹介した世界最高水準の総合発電効率を持ったCCPPシステムに代表されるシステムバリエーションを取りそろえ、多様なユーザーニーズに応えることが可能である。

謝辞

本研究開発の一部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）の助成を受けて実施したものである。

参考文献

- (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.
- (6) Negami, M., Hibino, S., Kawano, A., Nomura, Y., Tanaka, R., Igashira, K., 2017, “Development of highly durable thermal barrier coating by suppression of thermally grown oxide”, ASME-paper GT2017-64046

特集：高負荷変動への対応

コンバインドサイクルボトムリングサイクルにおける課題と対応

Issue and Adaptation for Bottoming Cycle of Gas Turbine Combined Cycle (GTCC)



平山 龍^{*1} 程島 岳^{*1} 太田 行俊^{*1}
HIRAYAMA Ryu HODOSHIMA Gaku OTA Yukitoshi

キーワード：ガスタービン，コンバインドサイクル，ボトムリングサイクル，効率，運用性

Key Words：Gas Turbine, Combined Cycle, Bottoming Cycle, Efficiency, Operability

1. はじめに

ガスタービンコンバインドサイクル (GTCC) 発電は，ガスタービン (GT) 自身による発電に加えて，GT から排出される高温の排ガスを用いて排熱回収ボイラ (HRSG) にて蒸気を発生させ，発生した蒸気を蒸気タービン (ST) へ供給し発電を行う。HRSGとSTから構成される水および蒸気サイクルがボトムリングサイクルと呼ばれており，GTの排熱を有効利用し，高い発電効率を実現させる。Fig. 1にガスタービンコンバインドサイクルのT-S線図を示す。

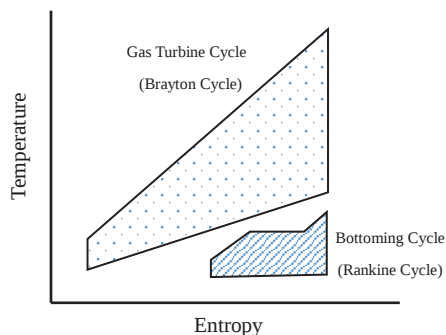


Fig. 1 Gas Turbine Combined Cycle T-S Diagram

温度の高い領域の熱エネルギーを使って発電を行うガスタービンサイクル (ブレイトンサイクル) と温度の低い領域の熱エネルギーを使って発電を行うボトムリングサイクル (ランキンサイクル) の2つの領域で発電を行う。Fig. 2にボトムリングサイクルの概略系統を示す。

東芝では長年GTCC発電設備へ取り組んでおり，本稿ではボトムリングサイクルにおける課題とその対応について紹介する。

原稿受付 2018年11月30日

*1 東芝エネルギーシステムズ株式会社
〒230-0045 横浜市鶴見区末広 2-4
E-mail: ryu.hirayama@toshiba.co.jp (代表)

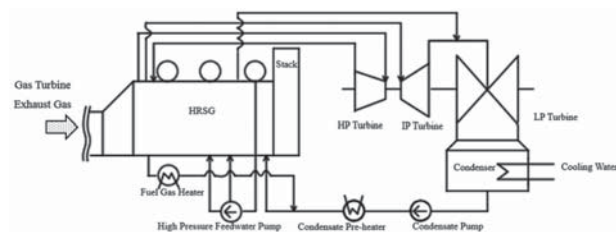


Fig. 2 Example of Bottoming Cycle Flow Diagram

2. GTCCの大容量・高効率化への課題と対応

2.1 GTの大容量・高温化

発電用GTは現在も大容量かつ高効率化が進んでおり，ボトムリングサイクルにおける課題としては，GTから排出される排ガス流量の増加と排ガス温度の高温化への対応が求められる。Fig. 3にGT排ガス条件の変遷を示す。

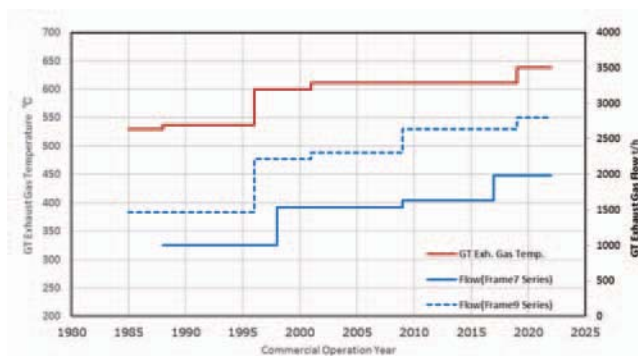


Fig. 3 GT Exhaust Gas Historical Change

2.2 ボトムリングサイクルの高圧・高温化

GTの大容量・高温化による排ガス流量の増加および排ガス温度の高温化に伴い，HRSGへの入熱量が増加したため，ボトムリングサイクル発電設備も大容量化が進んでいる。

2000年以降，HRSGは再熱器を装備し，蒸気ドラムを3基備える再熱三重圧式の技術が確立され，最近の

GTCC案件に適用されている。

最近では、GTCC発電設備全体としての熱効率向上の流れに合わせ、HRSGにて発生される蒸気の蒸気条件としてはこれまで主流であった566℃級から、近年のGT排ガス流量増加、高温化に伴う最適化目的で、600℃級のボトムリングサイクル発電設備が稼働するようになっている。Fig. 4に、当社におけるHRSGの高圧主蒸気温度圧力の変遷を示す。

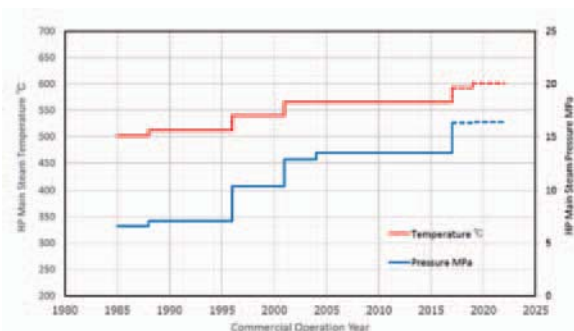


Fig. 4 HRSG Steam Condition Historical Change

2.3 GTCC発電設備の大容量・高効率化の実例

大容量および高効率化への対応の一例として当社は、中部電力(株)西名古屋火力発電所7号系列向けに多軸型(3on1)GTCC発電設備一式(定格出力1,188.2MW×2ブロック)を納入し、2018年3月に総合運転が開始された。本GTCC発電設備は震災以降の最新鋭火力として高稼働率運用の高効率設備が求められた。高効率化を図るため、General Electric社(GE社)の最新鋭1600℃級GTである7HA.01およびHRSGそれぞれ3基とST1基で構成される3on1の多軸型を採用し、発電効率63.08%(注1)を達成し世界最高効率のGTCC発電設備として認定された。

1600℃級GTを採用することによりGT単機容量の大容量化・高効率化するとともに、排ガス流量は1900ton/hr強、排ガス温度は630℃強となった。高温で大流量の排ガスに対応する為、以下Table 1に示すHRSG設備を採用した。

HRSGは1600℃級GT排ガス状態値にマッチングさせ、さらに高効率化と経済性を重視し、排ガス圧損の低減やピンチ・アプローチの縮小など設計パラメータを決定し、大型HRSGを採用した。

据付工事は、ケーシング、鉄骨、伝熱面、配管などを現地で組み立てるのが一般的な手法であるが、本設備向けの大型HRSGは合計6基のHRSG製造および据付工事となることから、並行して現場でのHRSG周辺工事も実施可能とすべく、HRSGについてはFig. 5に示す大型モジュール制作サイトにて準完成状態まで組み立てた後に一体で輸送する大型モジュール化工法を採用した。

STの仕様をTable 2に示す。STについては、GTおよびHRSGの大型化による発生蒸気流量の増加とHRSG3

(注1) 燃料を燃焼させた際に発生する水蒸気の蒸発熱を発熱量に含まない低位発熱量ベース

Table 1 Specification of HRSG

高圧蒸気	流量	ton/hr	280
	最高使用圧力	MPa	18.5
	最高使用温度	℃	597
中圧蒸気	流量	ton/hr	54
	最高使用圧力	MPa	4.5
	最高使用温度	℃	330
低圧蒸気	流量	ton/hr	39
	最高使用圧力	MPa	0.97
	最高使用温度	℃	280
再熱蒸気	流量	ton/hr	357
	最高使用圧力	MPa	4.4
	最高使用温度	℃	588
HRSGガス通路部寸法	高	m	28
	幅	m	27
	長	m	10
HRSG総乾燥重量		ton	3,750



Fig. 5 HRSG Super Module Assembly Site

Table 2 Specification of Steam Turbine (TC4F-48)

型式		くし形3車室 4流排気(48インチ)再燃式
定格出力	kw	415,200
設計真空度	kPa	-97.1

台分の発生蒸気量を供給する3on1構成による大型化スケールメリットによる高効率化を図っており、最終段翼には世界最大級の48インチチタン製長翼を採用し高効率化に寄与している。

さらに、本GTCC発電設備では、低圧蒸気タービンからの抽気蒸気蒸気を熱源とした給水加熱器を採用し、HRSGへの給水加温(再生サイクル化)や、ガスタービ

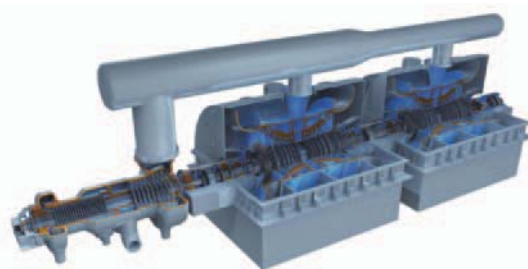


Fig. 6 3D Model of TC4F-48" Steam Turbine and Generator



Fig. 7 TC4F-48" Steam Turbine and Generator

ン燃料加温システムの高温・低温多段熱回収による最適化により、高効率化を図っている。

3. 運用性向上への課題と対応

3.1 調整火力に向けた課題

2018年7月に閣議決定した第五次エネルギー基本計画によると、再生可能エネルギーは重要な低炭素の国産エネルギー源と位置付けられ、2030年のエネルギー比率で22～24%を目指し、さらに2050年には主力電源化を目指す指針が発表されている。今後の再生可能エネルギーの大量導入に伴い、自然界の特性である気候・季節・時間の影響により発電量に大きな変動があり、この大きな発電量変動に対応することが今後の課題となる。電力の安定的な供給を実現するためには、電力の需給のバランスを保つことが大切であり、2030年に向けた対応として急な発電量の変動に対しては、火力発電の調整力確保が必要とされている。

今後、再生可能エネルギーのメリットを最大限に活かすには、火力発電の以下3項目の柔軟な運用性が必要であると考えられている。

- 1) 最低連続運用負荷の低減（出力変化量の増大）
- 2) 応動時間の短縮（負荷変化時間と起動時間の最短）
- 3) 部分負荷運用での熱効率向上

以下に、それぞれの対応について説明する。

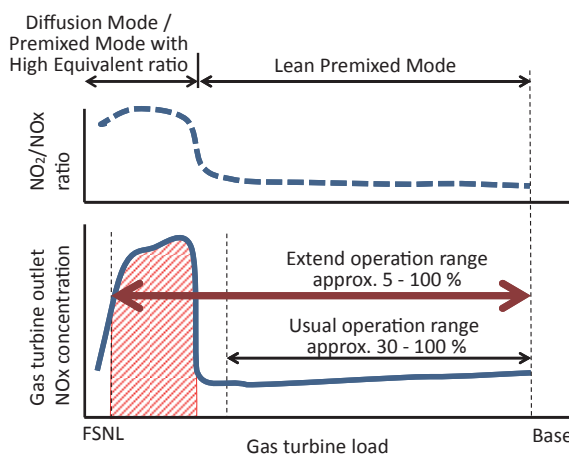
3.2 調整火力への対応

3.2.1 最低連続運用負荷の低減への対応 GTCC発電設備では、以下二つの理由で高負荷運用されることが一般的であった。①低負荷運用にてGTCC熱効率が低下する。②NO_x排出濃度が高くなる。近年GTの開発により①は改善されてきている（後述説明参照）。今後は②に関する対応が重要となる可能性がある。低負荷にてNO_x排出量が増加するのは、ガスタービン燃焼器にて

- i) 予混合燃焼に移行できず、拡散燃焼での排出NO_x濃度が増加する為。
- ii) 全予混合燃焼器を採用した場合での複数バーナのうち、高当量比でシングルバーナを焚いたことにより排出NO_x濃度が増加する為。

- iii) 一般的に低負荷では低い火炎温度とならざるを得ないため、NO₂/NO_x比が増加する為。

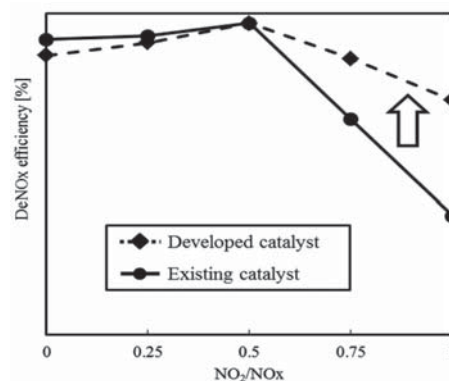
このようなガスタービン排ガスNO_x特性の一例をFig. 8に示す。

Fig. 8 Typical NO_x emission characteristics vs GT load, typical NO₂/NO_x ratio vs GT load

従来はGTCCプラントの運用負荷帯はガスタービン負荷が30～40%より高く、この領域ではNO_x量はNOが殆ど（NO₂/NO_x比0.1程度）であり、脱硝触媒もここでの使用を前提としていた。一方、NO₂/NO_x比が0.5を超えると脱硝反応機構が変化し、これに伴い脱硝触媒の特性も著しく変化するため、従来型の触媒では同程度の性能を発揮できない。また、制御方式についても反応速度が遅くなり、対処し切れなくなっている。

そこで、当社はイビデンと共同で高NO₂/NO_x比での脱硝高効率化を実現した改良型の脱硝触媒を開発した。Fig. 9に示す通り、脱硝触媒での反応が進みにくくなるNO₂/NO_x比が0.5を超える領域において、従来触媒と比べて高い脱硝率を得ることができた。これより、高NO₂領域でも高脱硝率を発現することができるため、NO₂の割合が多くなりやすいガスタービン低負荷運転における排ガスにも対処可能となった。

あるガスタービン運転条件における低負荷条件を模擬し、脱硝率の測定を行った測定結果をFig. 10に示す。改良

Fig. 9 DeNO_x efficiency vs NO₂/NO_x ratio

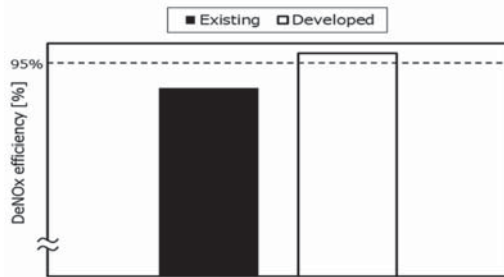


Fig. 10 Performance of developed catalyst

触媒は、高NO₂領域において95%以上の高い脱硝率を得ることができ、ガスタービン低負荷側での環境規制値を満足する高脱硝率技術として期待できるようになった。

3.2.2 応動時間の短縮への対応 急激な出力変動が発生し需給のバランスが崩れた場合、系統周波数保持が難しくなる。周波数安定化調整のために火力発電所ではガバナフリー運転（GF）や負荷周波数制御運転（LFC）と呼ばれる出力調整の運用が行われる。ガバナフリー運転では発電設備自らが発電機の回転数の変化に対して加減弁を操作し投入エネルギーを制御し出力調整する運転であり、数秒から数分で敏速な応動ではあるが調整幅は限定される。一方、負荷周波数制御運転では中央給電所にて算出された調整量に従い、規定の負荷変化率にて数分から数十分かけて出力調整する。この対応に優れているのが、ガス焼き火力発電となる（GTシンプルサイクル運転およびGTCC運転）。石炭火力発電の運転では、時定数が大きく負荷変化速度が遅く、一般的に負荷変化率3%/min程度で運用されており、一方でGTCC発電では現状は負荷変化率5%/minで運用されている。頻繁で短時間での起動と急速な負荷変化率運用の要望に対応すべく火力設備の疲労劣化の検討が進められ応動時間の短縮改善が進んでいるが、その検討一例を以下に紹介する。

3.2.3 起動時間短縮への対応 ボトムリングサイクルにおける起動時間の短縮は、STの寿命消費の抑制が課題の一つとして挙げられる。

STの寿命消費に関係する指標である、STの熱応力による低サイクル疲労（LCFI: Low Cycle Fatigue Index）が大きくなる原因としては、流入する蒸気温度とST内部メタル温度のミスマッチ温度が大きく関係する。

Fig. 11にGTCCの一般的な起動カーブを示す。GT着火、GT回転上昇、GT負荷上昇開始させ、GT部分負荷保持にてHRSGでSTへの通気蒸気を発生させる。通気条件の準備と同時にSTが起動開始し、ST回転上昇、STへの通気、ST負荷上昇となる。

STへ流入した瞬間のミスマッチ温度差、および蒸気温度変化速度が大きい場合でのミスマッチ温度拡大により熱応力が発生し、寿命消費の原因となる。

ST起動では、STへの通気から定格負荷までの負荷上昇の過程において、GTの負荷上昇によりHRSGから発生する蒸気温度も徐々に上昇する。STの寿命消費を抑

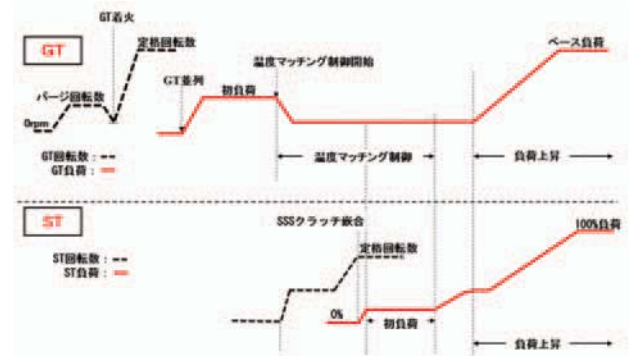


Fig. 11 Typical Start up Curve for GTCC

制するために、蒸気温度とST内部メタル温度のミスマッチを小さくした状態で蒸気温度を上昇させることが重要となる。

STへの通気条件を如何に早く準備するか、もしくは熱応力の発生を低減する構造とするかがボトムリングサイクルへの課題となる。

DSS（Daily Start and Stop）では、ST内部メタル温度降下は小さいため、熱応力の観点からすると影響は小さいが、WSS（Weekly Start and Stop）や長期停止時はこのようなST熱応力への対応が求められる。

近年のGTでは排ガス温度が従来よりも高いこともあり、蒸気温度としては定格蒸気温度条件となりやすいが、STメタル温度の方が低い状態で温度が高い蒸気を通気した場合においても、熱応力の発生へつながる。

適切な温度の蒸気を生成する方法としては、GTの部分負荷にて排ガス温度を意図的に下げ、蒸気温度を調整する方法や、HRSG過熱器に配置する減温器、もしくはST側で別途減温器を設置し蒸気温度を調整する方法、電気ブラケット保温にてST内部メタル温度降下防止などプラントメーカーによりいくつか方法が提案されている。

3.3 GTCC発電設備の運用性向上の実例

運用性向上への対応の一例として、当社は北海道電力(株)石狩湾新港1号向けに1on1の一軸型GTCC発電設備（定格出力569.4MW×1ブロック）を建設中であり、2019年2月の営業運転開始を予定している。

3.3.1 運用性の紹介 北海道では、道内の発電設備のみで全域の電力需給のバランスを保つ必要があり、系統の安定化が非常に重要となる。

既設経年火力を代替していく同発電所1号機には、石油火力と同等以上の調整力が必要とされるとともに、部分負荷から定格負荷まで、より高効率のGTCC発電設備が要求された。

GTは、GE社製の1600℃級最新鋭50Hz向けとなる9HA.01を採用しており、本機は中部電力(株)西名古屋火力発電所7号系列向けの7HA.01と相似設計のGTである。

運用性の向上の特徴として、本GTCC発電設備ではCC15%負荷（GT負荷5%程度）を運転可能な最低負荷として設計としたが、この低負荷運転には、GT部分負荷時の高NO_x排出への対応が必要となる。

脱硝性能を向上させる一般的な方法として、触媒量を増加させることが挙げられるが、これは同時にGT排ガス領域の圧力損失の増加の原因となり、結果としてGT性能が低下する。

プラント高効率を実現させるため、前述した改良型脱硝触媒を採用することで、低負荷時の高脱硝効率と低圧損を実現することができ、GTの高性能を維持した状態でGTCCの低負荷運転が可能となった。

本脱硝触媒は、既に営業運転開始されているGTCC発電設備への適用も可能と考えており、触媒を交換することで排ガス領域における圧力損失低減によりGT性能の向上や運転最低負荷の引き下げも期待できる。

また、Table 3にST仕様を示しており、計測された主蒸気温度とSTメタル温度のミスマッチ温度より起動時間の調整を行う制御手法を採用し、ST長寿命化と起動特性を確保することができる。

3.3.2 部分負荷効率の向上 採用した最新鋭高性能のGTである9HA.01は、タービン入り口温度高温化によりCC熱効率が向上しているが、調整火力運用時の熱効率を維持するために圧縮機入口部に可変静翼を3段落に設置した。これにより、部分負荷における定格主蒸気温度を広い運用範囲で保持することができ、より高効率な部分負荷運転が可能となった。

Fig. 12にGTCC部分負荷効率特性を示す。縦軸は部分負荷効率比率としており、100%負荷時の効率に対する部分負荷効率を比率で算出している。100%に近ければ近いほど、部分負荷において100%負荷効率と近く、部分負荷性能が良いと評価される。

3.3.3 軸構成について Fig. 13に示す通り、一軸型パワートレインはGT-発電機-SSSクラッチ-STという軸構成で、SSSクラッチにてGTとSTの縁切りが可能なシステムを採用したことで、SSSクラッチを採用しない一軸型パワートレインよりも起動時間の短縮や補助蒸気量低減のメリットがある。

従来の一軸型パワートレインの起動では、GT回転上昇とともにSTも回転上昇が始まり通気前に空回しの状態となる。ST内は風損による温度上昇を防止するために補助蒸気による冷却（クーリング）が必要であった。

SSSクラッチの採用により、GT起動を先行し、HRSGでのST通気蒸気の発生に合わせてSTを後発で起動させることが可能となり、冷却蒸気が不要となる。必要補助蒸気の低減により、構内設置の所内ボイラ容量を低減できるメリットがある。さらにSTの性能向上の一つとして、復水器の高真空化を採用し、STの高効率を図っている。

4. おわりに

コンバインドサイクルのボトムリングサイクルにおける課題と対応についてその概要を紹介した。今後は電力の安定供給のため、フレキシブルな負荷変動や低負荷運用に追従できるよう貢献して行きたい。

Table 3 Specification of Steam Turbine (TCDF-48)

型式		くし形2車室 2流排気(48インチ) 再燃式	
定格出力		kw	197,400
設計真空度		kPa	-98.0
高圧蒸気	流量	ton/hr	354
	定格圧力	MPa	16.0
	定格温度	℃	600
中圧蒸気	流量	ton/hr	53
	定格圧力	MPa	3.6
	定格温度	℃	445
低圧蒸気	流量	ton/hr	45
	定格圧力	MPa	0.54
	定格温度	℃	245
再熱蒸気	流量	ton/hr	392
	定格圧力	MPa	3.4
	定格温度	℃	600

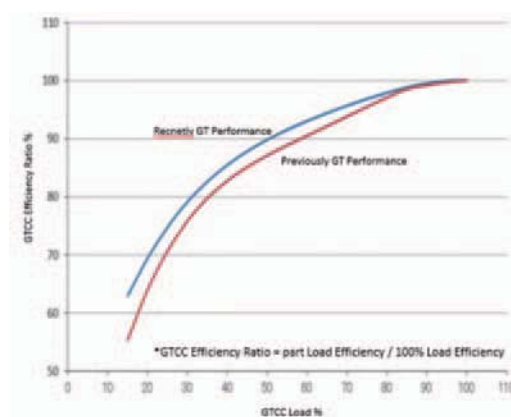


Fig. 12 Part Load Efficiency characteristics vs GTCC Load

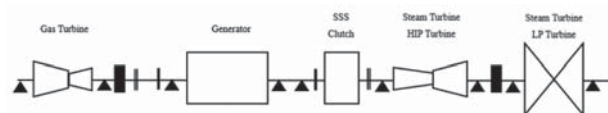


Fig. 13 Power Train Configuration
(1on1 Single shaft GTCC)

参考文献

- (1) 服部祐太, 俵盛勝博 高効率コンバインドサイクル発電システムの最新技術, 東芝レビュー, Vol. 68, No. 11 (2013), pp. 8-11.
- (2) 島田秀顕, 伊東正雄, 清水佳子, 春日貴史, 野呂俊平 GTCCプラント脱硝技術の高度化への取組み, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 45, No. 3 (2017), pp. 140-145.
- (3) 島田秀顕, 木村賢一, 中村啓一 HRSG (排熱回収ボイラ) の概要, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 46, No. 2 (2018), pp. 8-13.
- (4) 奥山知視, 佐藤健二 GTCCにおけるボトムリングサイクルの熱交換器, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 46, No. 2 (2018), pp. 44-46.
- (5) 立石学, 木村賢一, 渡邊聡十郎 世界最高効率の発電効率63.08%を実現した中部電力(株)西名古屋火力発電所7号系列の総合運転開始, 東芝レビュー, Vol. 73, No. 4 (2018), pp. 51-54.

特集：高負荷変動への対応

ガスタービンの急速負荷変動に対応する材料の課題

Material Issues on Rapid Load Fluctuation for Gas Turbine



齊藤大蔵*¹ 坂本 昭博*² 北山 和弘*³
SAITO Daizo SAKAMOTO Akihiro KITAYAMA Kazuhiro

キーワード：ガスタービン，負荷変動，材料，再生可能エネルギー，損傷

Key Words：Gas Turbine, Load Fluctuation, Material, Renewable Energy, Damage

1. はじめに

7月3日に閣議決定された日本の第5次エネルギー基本計画は、2030年の長期エネルギー需給見通しの実現と2050年を見据えたシナリオの設計で構成されている。2030年のエネルギーミックスの確実な実現へ向けた取り組みのさらなる強化を行うとともに、新たなエネルギー選択として2050年のエネルギー転換・脱炭素化に向けた挑戦が揚げられている。また、太陽光や風力等の再生可能エネルギーは主力電源として位置づけられている。2030年の総発電電力量（10,650億kWh程度）の内、これらの太陽光や風力等の再生可能エネルギー等の割合については現状の10%から22～24%程度という目標値が示された。

電力供給と需要が一致しないと周波数が乱れ、停電が発生しやすくなるため、発電事業者は需要の増減に合わせて発電機の出力を時々刻々、調整している。今後、さらに再生可能エネルギーが電力系統の中で大きな割合を占めると、この電力供給と需要の時間的なギャップが非常に大きくなり、系統における電力の品質が担保できなくなることが懸念されている。このような電力需給ギャップを解消し、再生可能エネルギーの導入を推進する有効な手段として、出力調整が容易なコンバインドサイクル発電システムが有望である⁽¹⁾。

近年のコンバインドサイクル発電において、起動、停止が日に2回となる運用もみられ、出力調整のために負荷変動が繰り返し行われると、特にガスタービンの燃焼

器、静翼や動翼などの高温部品の損傷が顕著になり、中でも熱疲労による損傷が懸念される。従って、負荷変動に対応するガスタービンの高温部品には熱疲労特性に優れた材料が必要になると考えられる。

このような熱疲労特性に優れた材料開発には損傷メカニズムの解明が重要であり、ここではそのメカニズム解明のために行われている材料評価技術について述べる。

2. 基材に関する評価技術

クリープ特性および高温酸化特性等を重視したこれまでのガスタービン構造材料は高負荷変動となる運用になると、付加的な損傷を受けて破損する確率が高くなるため、このような環境下では熱疲労特性に優れた材料が求められる。燃焼器、静翼および動翼等の高温部品の基材にはNi基およびCo基超合金が用いられ、とりわけ使用環境が厳しい第1段動翼では主として高強度なNi基超合金が用いられている。このNi基超合金は高温、遠心応力場での環境に鑑みて、近年ではクリープ強度に優れた一方向凝固材や単結晶材が広く採用されている。

一方、負荷変動が大きいガスタービンの使用環境において、高温部品では高温から低温、そして高温というような熱サイクルを高頻度で繰り返し受ける。ガスタービンの起動、定格、停止における動翼の前縁部の外表面にはFig. 1に示すような温度変動とともに、歪みが生じる⁽²⁾。起動後は温度が上昇するに従い、圧縮の歪みが増大し、定格でも材料に圧縮歪みが保持され、停止時は歪みが引張に転じる挙動を示す。ここで、起動を通常より早めた場合、発生する歪みの程度は起動側では圧縮の歪みが大きくなり、停止側では引張の歪みが大きくなり、ガスタービンの運転により材料に与えるその負荷状況が異なってくる。このように高負荷変動下では材料に蓄積する疲労損傷が増大することが懸念され、これに耐えるための高強度な材料が要求される。このような実機の動

原稿受付 2018年12月11日

*1 東芝エネルギーシステムズ(株) エネルギーシステム技術開発センター

〒230-0045 横浜市鶴見区末広町2-4

*2 京浜事業所 原動機部

〒230-0045 横浜市鶴見区末広町2-4

*3 火力・水力事業部

〒212-8585 川崎市幸区堀川町72-34

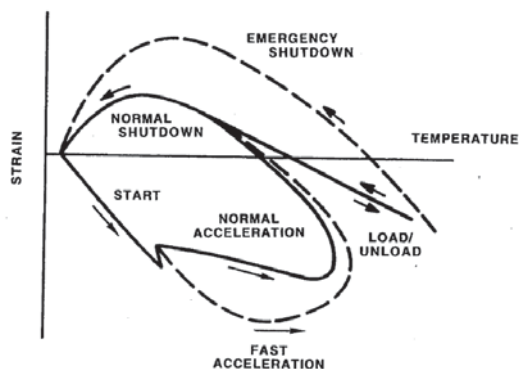


Fig. 1 Schematic of Thermo-Mechanical-Fatigue cycle simulating the leading edge of the bucket⁽²⁾

翼で生じている履歴を模擬するために熱機械疲労試験が行われている。熱機械疲労試験では疲労寿命に及ぼす温度・ひずみの波形や保持時間、化学成分および組織因子等の影響について検討されている。特にひずみ保持時間の影響が大きく、保持時間を6分とした疲労寿命は保持時間がないものの約45%まで低下する⁽³⁾。Ni基単結晶合金ではAl, Co, Ruの添加量が熱疲労寿命を増大させ、主強化相の γ' 相の体積率が影響を及ぼすことが示唆されている⁽⁴⁾。

材料劣化に関する因子については、ガスタービンの動翼に用いられているNi基超合金“IN738LC”の低サイクル疲労寿命に及ぼす材料劣化の影響を把握した。Fig. 2に長時間時効後の組織を時効前の組織と比較して示す。時効前の組織は立方体状の γ' 相 $[\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})]$ と微細な球状の γ' 相が認められるのに対し、750℃および900℃時効材では γ' 相の凝集粗大化が認められる。その凝集粗大化の程度は時効温度が高いほど、時効時間が長い程、顕著である。

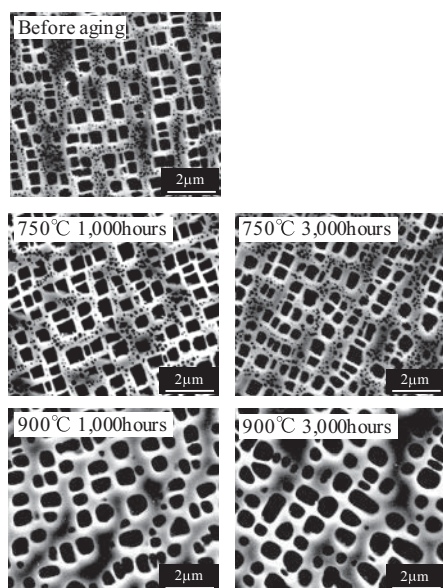


Fig. 2 Microstructures of materials before and after long-term aging

Fig. 3はこれらの3,000時間までの長時間時効材を用いて、10分間の圧縮保持付きの低サイクル疲労試験で得られた破損繰返し数に及ぼす材料劣化の影響を示す⁽⁵⁾。なお、破損繰返し回数は時効前の材料の破損繰返し数で規格化している。破損繰返し数は時効時間が長くなるに従い増加した。試験温度900℃、全歪み範囲が1%の試験条件においては、材料劣化により低サイクル疲労寿命は向上した。その要因は長時間時効により生じた軟化が試験中の最大応力を低下させたためと考えられる。本試験条件においては材料劣化により低サイクル疲労強度はむしろ向上することから、このような特性を把握した上で実機翼の寿命評価への反映が必要となる。

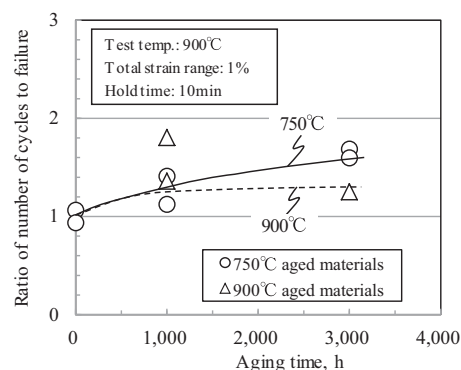


Fig. 3 Effect of aging on number of cycles to failure⁽⁵⁾

3. コーティングに関する評価技術

動翼には高温強度に優れたNi基超合金が用いられるが、燃焼ガスの高温化に伴って、過度な温度上昇を抑制するための遮熱コーティング（Thermal Barrier Coating）が用いられている。この遮熱コーティングはFig. 4およびFig. 5に示すようにボンドコートとトップコートで構成されている。一般に基材の表面に耐高温酸化に優れた合金からなるボンドコート（厚さ100～200 μm ）、その上に熱伝導率が小さいセラミック（厚さ200～600 μm ）が形成されている。表面のセラミック層が低熱伝導のため熱流が遮られ、セラミック層内で大きな温度勾配が生じる。この温度勾配は厚さ250～300 μm で60～170℃程度と確認されている⁽⁶⁾。

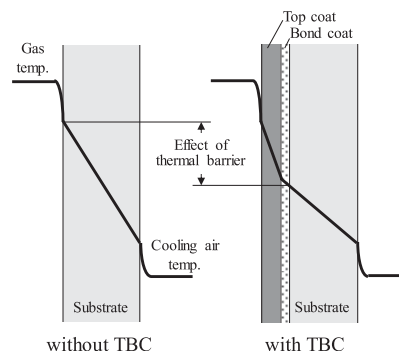


Fig. 4 Temperature gradient with and without TBC

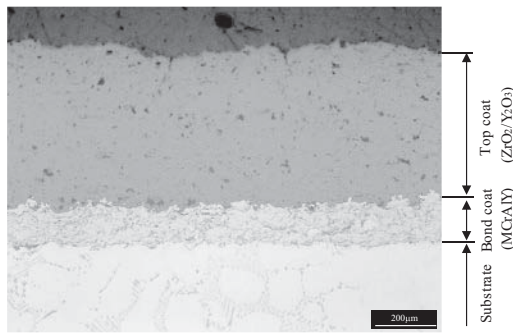


Fig. 5 Typical microstructure of conventional TBC

このような温度勾配，さらに負荷変動に対応するために起動停止の回数が増加すると，剥離寿命評価が重要となる。この特性を評価する手法としては，等温場熱サイクル試験および温度勾配下熱サイクル試験がある⁽⁷⁾。等温場熱サイクル試験法はヒータにて試験片を加熱するもので，工業規格化された試験法である^{(8),(9)}。この試験では長時間の酸化に主眼をおいた評価が主体となる。一方，温度勾配下熱サイクル試験法はコーティング内に意図的に温度勾配を生じさせる方法で，熱流束を測定でき，高精度で遮熱性および耐熱性を評価できるとともに熱サイクルによる剥離寿命が評価できる試験法である。Fig. 6にレーザを加熱源にした遮熱コーティングの耐久性を評価する熱サイクル試験設備の基本構成を示す。試験片の表面に遮熱コーティングを施工し，裏面を水冷することで温度勾配をつけている。加熱源をバーナとした試験方法⁽¹⁰⁾やアーク加熱，プラズマ加熱，レーザ加熱，赤外線ランプ加熱とした試験方法があり，実機をさらに模擬した試験法として，荷重負荷バーナ加熱試験法^{(11),(12)}も提案されている。

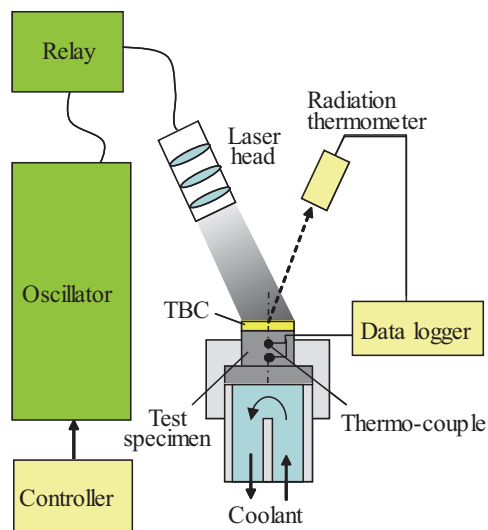


Fig. 6 Schematic illustration of thermal cycle test facility

4. おわりに

これまでのガスタービン発電設備は主に長時間の定格運転を前提として熱効率の向上を図ってきたが，昨今のガスタービン発電設備では従来の技術を基盤としながら，始動性や負荷追従性を重視し，過渡応答性に優れ，繰返し負荷に耐えることが重要となる。急速な負荷変動に対応できるガスタービン設備では種々の要素技術が求められ，材料に関する要素技術も欠くことはできない。具体的にはクリープ特性を重視したこれまでの材料から，より熱疲労特性に優れた材料が必要となる。そのために熱疲労特性を低下させるメカニズムをこれまでに述べた試験手法を駆使して解明するとともに高温疲労支配型の寿命評価技術を開発することが望まれる。

※本論文記載の商品名称は，それぞれ各社の登録商標として使用している場合があります。

参考文献

- (1) 渡辺和徳，機動性に優れる広負荷帯高効率ガスタービン複合発電の開発プロジェクト，第46回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集，(2018)。
- (2) Henry L. Bernstein, Timothy S Grant, Craig McClung, James M. Allen, "Prediction of Thermal-Mechanical Fatigue Life for Gas Turbine Blades in Electric Power Generation", ASTM Special Technical Publication, ASTM STP 1186 (1993), pp. 212-238.
- (3) 緒方隆志,山本真人:Ni基超合金IN738LCの熱疲労寿命評価法の提案, 材料, Vol. 51, No. 3 (2002), pp. 307-313.
- (4) 大島宏文,横川忠晴,小林敏治,呂芳一,原田広史:Ni基単結晶合金の重回帰分析による熱疲労寿命予測, 日本金属学会誌, Vol. 70, No. 3 (2006), pp. 246-249.
- (5) 齊藤大蔵,北山和弘,酒井義明:日本ガスタービン学会誌, Vol. 45, No. 6 (2017), pp. 38.
- (6) 吉葉正行:日本ガスタービン学会誌, Vol. 25, No. 98 (1997), pp. 80.
- (7) 岡田満利:日本ガスタービン学会誌, Vol. 45, No. 6 (2017), pp. 14.
- (8) 金属材料の高温連続酸化試験方法, JIS Z2281-1993.
- (9) 金属材料の高温繰返し酸化試験方法, JIS Z2282-1996.
- (10) 高木健太,脇拓郎,川崎亮,渡辺龍三:紛体および粉末冶金, Vol. 44, No. 8 (1997), pp. 734-739.
- (11) 久保貴博,日野武久,亀田常治,伊藤義康:日本機械学会2002年度年次大会講演論文集 (II), (2002), pp. 331-332.
- (12) 武野和馬,鳥越泰治,岡嶋芳史, 高効率ガスタービン用遮熱コーティングの開発状況, 第46回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集, (2018)。

特集：第46回定期講演会（鹿児島）報告

第46回日本ガスタービン学会定期講演会 全体報告

Report of the 46th GTSJ Annual Conference Kagoshima

松沼 孝幸^{*1}

MATSUNUMA Takayuki

1. 市民フォーラム

定期講演会の前日10月9日(火)、鹿児島大学郡元キャンパスの稲盛会館ホールにおいて、ガスタービン市民フォーラムを開催した。このフォーラムは、当学会の活動対象であるガスタービンおよびエネルギー関連技術について、学生や一般の方々に広く知っていただくことを目的としており、鹿児島大学の錦慎之助先生の全面的なご協力のもとで実施された。

参加者は、たくさんの鹿児島大学の学生さんや、近隣の高校生・高専生・大学生や教員の方、一般の方、GTSJ会員の方であり、合計146名という大人数になった。

今回の講演は、貴志公博氏（三菱重工航空エンジン株式会社）による「MRJ用PW1200エンジンと関連技術」であった。航空エンジンの構造が分かる動画から始まり、航空エンジンの市場動向・技術動向、組立・整備事業と主要顧客、民間航空機用エンジン事業の特徴、MRJ用PW1200Gの構造上の特徴、エンジン開発試験のビデオ上映（MRJ用PW1200GおよびB787用Trent1000）、MRJ用PW1200Gプロジェクトの取り組み、部品加工と品質



Fig. 1 Inamori Auditorium, Kagoshima University



Fig. 2 Open forum

管理、設計・製造技術、修理技術など、盛りだくさんの内容を学生・一般向けに具体的で分かりやすい説明が行われ、将来を担う学生さんには航空エンジンの基礎から最先端の技術開発にまで触れる新鮮な機会になったと思われる。

2. 定期講演会

市民フォーラムに続き、10月10日(水)および11日(木)に、鹿児島市のかごしま県民交流センターにて、「第46回日本ガスタービン学会定期講演会」を開催した。かごしま県民交流センターは、2003年に県庁跡地に建てられた地上6階・地下2階の立派な建物である。講演会は、2階の大ホール（2室に分割）・中ホールの3室を使って行われた。隣接した広い部屋であったため、移動が楽で使いやすい会場であった。



Fig. 3 Kagoshima Prefectural Citizens Exchange Center

講演会の参加者は183名であった。昨年に記録した過去最高人数194名よりは若干少なかったものの、ACGT開催年であることを考慮すれば、かなり多くの方々に参加していただけたと思う。

一般講演は69件の発表件数を集めた。その内訳は、空力：17件、材料：13件、伝熱：10件、燃焼：10件、性能：10件、タービン：5件、構造・潤滑：4件である。例年通り空力分野が一番多いが、材料・伝熱・燃焼分野も増える傾向があった。どのセッションにも多くの参加者があり、熱心な質疑応答が行われていた。

講演会1日目の午後には、「設計利用に向けた産学連携による解析技術開発の最前線」の企画セッションが開催された。古川雅人氏（九大）と富永純一氏（JFEエンジニアリング）を座長として、まず講演会形式で、青塚瑞穂氏（IHI）から「将来航空推進システム技術創成社会連携講座における非定常空力解析技術について」、松岡右典氏（川崎重工）から「軸流圧縮機の大規模流れ解

原稿受付 2018年11月2日

*1 国立研究開発法人 産業技術総合研究所
〒305-8564 つくば市並木1-2-1

析と設計利用」, 齊藤圭司郎氏(三菱重工)から「ガスタービン燃焼器開発におけるCFDの適用」が発表された。その後の全体討論では, 講演者3名に, 立石敦氏(東大), 古川雅人氏(九大), 黒瀬良一氏(京大)を加えた6名をパネリストとして, 大学で開発した最新の解析技術を企業の実機ガスタービンの設計にどのように活用するかなどについて議論が行われた。詳細は, 本誌の別記事に解説されている。



Fig. 4 Organized session

講演会1日目夕方には, 鹿児島大学農学部 焼酎・発酵学教育研究センター 焼酎文化学部門の客員教授である鮫島吉廣先生による特別講演「目からウロコの焼酎の話～歴史・文化・飲み方・・・～」が一般にも公開される形で行われた。

1時間20分の講演では, 焼酎の歴史・鹿児島での芋焼酎誕生の風土的背景・西郷隆盛と焼酎・仕込み方法の変遷・本格焼酎の技術・日本人と酒など, 様々な内容が説明された。特に終盤の「飲み方」の部分では, お湯が先か焼酎が先か・芋焼酎に血糖値抑制効果がある・本格焼酎には糖質やプリン体が含まれていなくて健康に良いなど, 焼酎を飲むうえでの豆知識が豊富であった。最後は, 適正飲酒で「切り上げ時を忘れずに」という教訓で笑いを取りながら講演が終了した。まさに焼酎の歴史・文化・飲み方を知ることができる興味深い講演であった。



Fig. 5 Special lecture

今回も, 学生登壇者からのエントリーがあった24件の講演を対象として学生優秀講演賞の審査が実施された。講演会1日目から2日目午前まで学生の発表が行われ, 全ての発表が終了した講演会2日目のお昼休みに審査委員会が開催された。厳正な審査の結果, 伊藤流石さん(九州大学大学院)と林優人さん(東京理科大学大学

院)が受賞された。講演会2日目午後の初めに学生優秀講演賞審査結果報告が開催され, 渡辺紀徳副会長より賞状が授与された。選考結果は, 本誌の別記事に報告されている。



Fig. 6 Best student presentation award
(left: Mr. Hayashi, right: Mr. Ito)

続いて, 講演会2日目の午後には, 「ガスタービン関連技術開発プロジェクトの最新状況と展望」と題して, 先端技術フォーラムが開催された。

初めの講演会形式では, 渡辺紀徳氏(東大)を座長として, 渡辺和徳氏(電中研)から「機動性に優れる広負荷帯高効率ガスタービン複合発電の開発プロジェクト」, 西澤敏雄氏(JAXA)から「JAXAの研究開発プロジェクト: 高効率軽量ファン・タービン技術実証(aFJR)」が紹介された。

続く全体討論では, 渡辺和徳氏と西澤敏雄氏をパネリスト, 渡辺紀徳氏を座長として, 技術開発プロジェクトの成果の発信や今後の動向などについて議論され, 活発な意見交換が行われて盛り上がった。こちらも, 本誌の別記事に詳細が解説されている。



Fig. 7 Advanced technology forum

3. 懇親会

懇親会は, 鹿児島市の繁華街である天文館地区のホテル・レクストン鹿児島において, 講演会1日目の夜に開催された。油谷好浩会長の挨拶, 川口修元会長による乾杯で始まり, 会員同士の交流が図られた。鹿児島県にゆかりのある参加者による挨拶, 学術講演会委員長からの次回開催地の発表, 西澤敏雄IGTC実行委員長からの開催案内, 都留智子女性参画推進委員長からの活動報告などがあり, 渡辺紀徳副会長による中締めの挨拶で散会となった。



Fig. 8 Banquet

4. 見学会

見学会は講演会翌日の10月12日(金)に実施され、33名の参加者があった。指宿市山川にある九州電力株式会社の山川発電所、鹿児島市七ツ島にある株式会社IHIのバイオマス関連施設などを巡るコースであった。

山川発電所は、発電出力30,000kWの地熱発電所である。開聞岳の眺望が美しく、海岸に近い田園に囲まれた平坦地に立地し、九州で3番目・全国で7番目に建設された地熱発電所で、1995年に営業運転を開始した。タービン形式は、6段の単気筒単流衝動-反動型復水タービンで、第1段にはチタン翼を採用している。蒸気井の深さは最大2,100メートルで、蒸気の使用量は1時間に225トン(蒸気圧力0.98MPa)であり、余剰熱は蒸気として農家に無償提供して、園芸用ハウスの空調熱源に活用するなどして、地域共生を図っている。

同じ敷地内には、2018年2月に運転を開始した発電出力4,990kWの山川バイナリー発電所が建っている。熱供給者が九州電力株式会社、発電事業者が九電みらいエナジー株式会社、主機メーカーが富士電機株式会社である。バイナリー発電は、温度が低い地熱流体を、低沸点媒体

のノルマルペンタン(沸点36.1度)と熱交換して、この媒体の蒸気で効率的にタービンを回す発電方式である。

株式会社IHIのバイオマス関連施設では、まず会議室でバイオ燃料用の藻類とバイオマス発電所についての説明を受けた。バイオマスの藻はボツリオコッカスで、実際のサンプルを見学した。バイオマス発電所(七ツ島バイオマスパワー合同会社)は、49,000kWのBTG復水方式の発電で、使用する燃料はPKS(パームヤシ殻)・木質ペレット・間伐材である。続いて、2018年11月に運転開始予定で、ちょうど領収試験期間中のバイオマス発電所の設備外観を、バス車内から見学した。

その後、隣接する七ツ島メガソーラー発電所(鹿児島メガソーラー発電株式会社)の周りをバスで走行した。2013年に運転を開始した発電出力70MW、面積約127万 m^2 、パネル枚数約29万枚(京セラ製)の国内で6番目に大きい太陽光発電所である。パネルがずらりと並んでいて壮観であった。

どの見学先でも、見学後の全体質疑では活発な質疑応答が行われ、発電技術への参加者の関心の高さが伺えた。



Fig. 11 Nanatsujima Biomass Power LLP

5. 来年度の開催

来年度の第47回定期講演会は、北海道函館市で開催する。会場は「函館アリーナ」で、湯の川温泉の近くに2015年にオープンした新しい施設である。開催日は2019年9月18日(水)と19日(木)である。来年もたくさんの方に参加していただき、講演会や懇親会を思う存分楽しんでいただけることを祈っている。

6. 謝辞

定期講演会の準備全般に多大なご協力をいただいた鹿児島観光コンベンション協会様、市民フォーラムの開催に多大なご協力をいただいた鹿児島大学の錦慎之助先生、学生の皆様、定期講演会の講演者・参加者の方々、企画セッションと先端技術フォーラムの座長・講演者の皆様、見学会の開催にご協力をいただいた九州電力株式会社と九電みらいエナジー株式会社と株式会社IHIと七ツ島バイオマスパワー合同会社の関係各位に、心より御礼申し上げます。

(学術講演会委員会委員長)



Fig. 9 Yamagawa Geothermal Power Station



Fig. 10 Yamagawa Binary Power Station

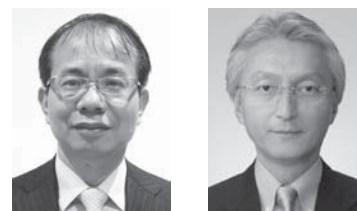
特集：第46回定期講演会（鹿児島）報告

オーガナイズドセッション

「設計利用に向けた産学連携による解析技術開発の最前線」

Organized Session

“The Latest Progress of Numerical Simulation Development Collaborated between Industry and Academia for Design Use”



富永 純一*¹ 古川 雅人*²
TOMINAGA Junichi FURUKAWA Masato

キーワード：数値シミュレーション，産学連携，設計，ファン，圧縮機，燃焼器

Key Words：Numerical Simulation, Industry and Academia Collaboration, Design, Fan, Compressor, Combustor

1. はじめに

鹿児島で開催された第46回定期講演会では、「設計利用に向けた産学連携による解析技術開発の最前線」と題した企画オーガナイズドセッションを実施した。近年、「京」に代表されるスーパーコンピュータを用いて産学連携によって翼列の流体構造連成や燃焼器のLESなどの解析が行われ、新たな知見が得られるなどの成果が報告されている。また、2020年には「京」の100倍の計算性能を有するポスト「京」の運用開始が計画されており、そこで重点的に取り組むべき社会的・科学的課題が検討されている。本オーガナイズドセッションでは、実機開発や設計への活用という視点で、現状の産学連携で行われている解析事例を産業界側から発表して頂き、その後、連携するアカデミア側のパネリストも交えて、設計活用での課題や前述のコンピュータの進展に伴う今後の産業界のニーズとアカデミアの展望について、パネル形式でディスカッションを実施した。本稿では、本オーガナイズドセッションの講演および総合討論の概要を報告する。

2. 講演発表

講演発表は産業界からIHIの青塚瑞穂氏、川崎重工の松岡右典氏、三菱重工の齊藤圭司郎氏にお願いした。講演会の座長は筆者ら両名で行い、はじめに座長から本オーガナイズドセッションの趣旨を説明した後に、上記の順で講演を進めた。

IHIの青塚氏からは、「将来航空推進システム技術創成社会連携講座における非定常空力解析技術について⁽¹⁾」と題して講演を頂いた。東京大学に設置された掲題の社

会連携講座の取り組みを説明し、3つの分野の研究課題の内、環境適合技術の研究成果としてガスタービン・ジェットエンジンのフラッター解析技術について紹介して頂いた。IHIのリグ試験用ファンに対して東京大学で開発した流体構造連成コードを用いた解析を実施し、試験より低回転で生じるフラッターについてはLESによる詳細流れ場の検討に取り組んでいることが報告された。また、流体構造連成やLESなどの企業の研究の枠内では難易度が高い技術で重要な知見が得られ、航空分野の人材育成への貢献という点においても産学連携の意義を示して頂いた。

続いて川崎重工の松岡氏から、「軸流圧縮機の大規模流れ解析と設計利用⁽²⁾」について講演を頂いた。産業用30MW級ガスタービンの14段の軸流圧縮機の前段7段と2段の遷音速軸流圧縮機を解析対象として、それぞれDESによる全周非定常解析を実施した事例を紹介して頂いた。前者では6段静翼を起点として旋回失速の初生と急速に発達する様子が得られ、後者では非定常で複雑な流動現象と各現象の損失発生過程を詳細に分析し、これらの設計利用の方向性として解析で現象を把握して課題を明確にすることで設計改良の指針が得られるとした。その一方で今回の2つの解析事例では格子セル数が数億、数十億で「京」を利用してようやく実行できる規模であり、数多くの設計候補や条件を変更して繰り返し解析を行うことが求められる製品開発では、ハードとソフトの両面の高速化と適切なモデル化が必要との意見を頂いた。

最後に三菱重工の齊藤氏から、「ガスタービン燃焼器開発におけるCFDの適用⁽³⁾」という題目で講演を頂いた。ガスタービン燃焼器の高温化においてNOxの低減、フラッシュバックの防止、燃焼振動を特に大きな技術課題として挙げて、そのために実際のガスタービン燃焼器を用いた大気圧燃焼試験とLES燃焼解析を実施して、火炎位置の特定と周囲の流れ場の正確な評価を行い、設計

原稿受付 2018年11月20日

- * 1 JFEエンジニアリング株式会社
〒230-8611 横浜市鶴見区末広町2-1
- * 2 九州大学
〒819-0395 福岡市西区元岡744番地

に活用していることが説明された。また、燃焼振動のURANS解析事例では安定・不安定領域のマップを得て、燃焼不安定を発生させる位置を特定し、燃焼器の改良に繋がっていることが紹介された。

3. 総合討論

総合討論では、産業界側のパネリストとして3名の講演者に登壇して頂いて、アカデミア側からはIHIと産学連携を行っている東京大学の立石敦特任助教、三菱重工と行っている京都大学の黒瀬良一教授に登壇して頂き、また、川崎重工と行っている九州大学から筆者の古川が座長とパネリストを兼ねて総合討論を進行した。

まずは産業界側パネリストの講演発表に対して会場から質疑やコメントを頂き、筆者らで予め用意した関連する討論内容についてパネリストから意見を頂いた。

3.1 シミュレーションの検証

会場の龍谷大学の金子教授と帝京大学の田沼教授から、青塚氏が講演したフラッター解析について検証方法や試験翼の形状、特に前縁形状へのフィードバックについて質問があった。青塚氏からは、様々なメカニズムに応じた検証が必要であり、前縁廻りについてはフィードバックができていないため、改めて翼列試験に立ち戻りデータを取る活動を始めているとの説明があった。

この質疑応答に関連して、実機への反映に欠かせない検証について、他のパネリストから意見を頂いた。

斉藤氏からは、実機で検証試験を行うまでに、予測し、メカニズムがわかり、その対策を行い、対策の効果として燃焼振動やNOxが低減するなどのエビデンスを揃えて関係部門を説得するというプロセスがあって、燃焼器の場合は物理現象がわかる予測ができるかということが検証のスタートであることが説明された。

松岡氏からは、圧縮機の基礎的なモデルでは検証した上でシミュレーションを利用しているが、実際の設計では色々な要素が絡み合っているため、切り分けて評価することが重要であるというコメントを頂いた。

黒瀬教授からは、燃焼は中身が見えないため実機での詳細な検証は現状難しく、スケールモデルなどでレーザーによる可視化、詳細計測を行って解析コードを検証し、その解析コードを用いて行った実機シミュレーションと出口温度やNOxの計測結果などを比較して、研究者と技術者が現象を理解して合わせこむことが大事であるとの意見を頂いた。

立石特任助教からは、検証のためには実機環境特有の境界条件や製造公差、翼の1個1個の違いなどの詳細なデータを把握した上で、解析を繰り返す必要があると考えているとのコメントを頂いた。

筆者の古川からは、ターボ機械協会の産学連携ではサージの予測を8社が参画するコンソーシアムで、検証用の実験もしながら大規模シミュレーションを行っていることを紹介し、1対1ではなく複数で行うことでリス

クを低減できることから、このような取り組みをもっと行っていくことを勧めた。

3.2 産業界側の注力すべき中長期的な課題とニーズ

会場の東北大学の山本教授から、大規模なシミュレーションは設計利用で短期的に使うことができずに中長期的に行わなければならないため、このような中長期的な視野で行うアカデミアの研究者に対する産業界側のサポートについて質問があり、本趣旨に沿って産業界側のパネリストから中長期的な視点で今後の注力点や方向性について意見を頂いた。

斉藤氏からは、産業界側からニーズと実機に近いデータを提供できることを表明して頂いた。そして、アカデミア側に中長期的な視野で取り組んで頂きたいこととして、シングルフィジックスがコンバインされた複雑現象を新しい現象として予測できるモデルを創り、小さなモデル試験で良いので知恵を出して検証まで考えて実施して頂きたいとの要望があった。具体的には、燃焼に関して温度上昇による高効率化に伴って燃焼振動やフラッシュバックといった課題に対する海外の大学での取り組みは見受けられるが、国内ではあまりないとの指摘を頂いた。

松岡氏からは、産業界にとっても圧縮機の乱流のモデル化など長期的に取り組む課題は多く残っており、実機設計の課題を産学連携の中でテーマとして提供していくことが表明された。

青塚氏からは、実機では流体、構造、伝熱の全てが連成し、それぞれ単独で解析する場合の境界条件とは少しずつズレが生じて合わなくなると考えられ、境界条件をどのように取り扱うのか、流体も構造も含めたシミュレーションを行うのか、もしくは適切なモデル化が必要なのか、設計者が相対評価0.1ポイントの厳しい数値を要求するため、設計に活用する上ではこのようなヒントを頂きたいとの要望があった。

3.3 コンピュータの更なる高速化に伴うアカデミア側の展望

アカデミア側のパネリストに更にコンピュータが速くなった場合に、実施したいシミュレーションについて意見を頂いた。

黒瀬教授からは、燃焼に関するコンソーシアムでポスト「京」が供用された際に必要となるシミュレーションを産学で議論しており、そこで挙げられた以下の3つの方向性を示して頂いた。

- ① 解析のスケールアップ：実機そのままのシミュレーションを、メッシュの制限を受けずに計算結果が変わらないことを検証した上で行っていく。
- ② マルチフィジックス：燃焼と構造を連成させたシミュレーション、例えば、石炭燃焼では灰が溶けて落ちる現象があり、固気液三相に構造をプラスした複雑化した現象のシミュレーションを行っていく。
- ③ スピードアップ：燃焼器では実機丸ごと解析した場

合、現状では数万並列で1週間の規模となるため、スピードアップして夜に流して朝に結果がでるといのが好ましい。

立石特任助教からは、ファンや圧縮機などの翼列流れで壁乱流を全て解けるようなLESもしくはDNSを実施すること、そして、研究者が検証に利用できるようにデータを公開することが表明された。また、翼列フラッターでは乱流のように時間スケールの短い現象と翼振動のように長い現象があり、これらの現象を組み合わせたマルチスケールの課題についてはアカデミアで取り組むべきとの意見を頂いた。

筆者の古川からは、マルチフィジックス、マルチスケールが共通したキーワードで、前述のコンソーシアムで行っている圧縮機のサージでは、時間スケールがサージの直前までは動翼通過周波数で、サージになると10Hz、100Hzオーダーで周期が3桁異なるため、現状では「京」でも解析ができない課題であること、また、産業界で活用する場合、実機の複雑形状を格子生成する必要がある、これを人間で行うのは大変であるため、人工知能を積極的に使用することをアカデミア側で進めていかなければならないと提言した。

3.4 設計活用の課題

最後に、非定常のシミュレーション結果を産業界の設計にいかん落とし込んでいくのか、パネリストが必要と考えていることや解決すべき課題について意見を述べて頂いた。

齊藤氏からは非定常データの重さの問題を提起して頂いた。産業利用という観点では大規模のデータを早く処理することやハンドリングする技術は極めて重要で、総合的なリードタイム短縮という点で研究要素を見出して改善してもらいたいとの要望があった。

松岡氏からは重さの問題に加えて、非定常のデータから何を抽出し、どういった結果を引き出すのかを、工夫しながら考えて導き出していくべき課題であるとの意見を頂いた。

青塚氏からは、設計点だけではなく部分負荷や作動点以外で非定常シミュレーションを行い、設計に有効なデータを抽出してフィードバックすることは、現在のポスト処理技術とスピードでは不可能であろうとの指摘があった。人間が手を使わずとも非定常データから設計改善の方向性を示すことができる解析技術があれば設計に有効との意見を頂いた。

黒瀬教授からは、データ量の問題は特に非構造格子が

深刻で理化学研究所でも検討が進められているとのコメントを頂くとともに、非定常現象は乱流によるものと速度自体の変動によるものとはケースバイケースで統計的な処理が異なることを課題として挙げて頂いた。

立石特任助教からは、非定常データを設計に応用する前に時間平均した流れについてRANSとURANS、LESの相違をみて特有の現象を考察することが重要で、また、適切な計算手法を考える上でも意味があると提言頂いた。

筆者の古川からは、現象を抽出する際の着目点や処理方法はそれぞれの問題で異なり、ノウハウがあるため、AIの活用などで後処理の省力化が設計に反映する上で必要になりつつあるとの意見を述べた。

4. おわりに

本オーガナイズドセッションでは、産学連携で行われている流体構造連成やLESなどの非定常シミュレーションの成果を、解析を担っているアカデミア側ではなく産業界側から発表して頂き、主に設計への活用という視点で両者によるディスカッションを行ったことは有意義であったと考える。今回のディスカッションでは、コンピュータの進展によって非定常で複雑な現象を解明できるようになり、設計に活用する上での着目点や方法論、また、ハードとソフトのそれぞれについて課題が挙げられた。これまでに産業界で解析技術が実用されて、製品の性能や信頼性が大きく向上した。今後、コンピュータの更なる高速化が見込まれ、産学連携の取り組みで新しい解析モデルや手法の適用を進めるとともに、設計活用に向けたこれらの課題を解決して、最終的なアウトプットの一つである産業界での設計利用そして製品の実現に寄与していきたいと考える。

最後に、パネリストの皆様と当日オーガナイズドセッションにご参加頂いた皆様に深く感謝申し上げます。

参考文献

- (1) 青塚瑞穂, 将来航空推進システム技術創成社会連携講座における非定常空力解析技術について, 第46回日本ガスタービン学会定期講演会(鹿児島)講演論文集, (2018).
- (2) 松岡右典, 軸流圧縮機の大規模流れ解析と設計利用, 第46回日本ガスタービン学会定期講演会(鹿児島)講演論文集, (2018).
- (3) 齊藤圭司郎, ガスタービン燃焼器開発におけるCFDの適用, 第46回日本ガスタービン学会定期講演会(鹿児島)講演論文集, (2018).

特集：第46回定期講演会（鹿児島）報告

先端技術フォーラム「ガスタービン関連技術開発プロジェクトの最新状況と展望」

Advanced Technology Forum “Current Status and Perspective of Gas Turbine Technology R&D Projects”



渡辺 紀徳*1
WATANABE Toshinori

キーワード：ガスタービン，ジェットエンジン，研究開発プロジェクト

Key Words : Gas Turbine, Jet Engine, R&D Project

1. はじめに

日本ガスタービン学会定期講演会では、2日目の午後に講演会参加者全員が出席する企画セッションを実施するのが通例となっている。テーマには当該年度に話題になっている技術項目や、学会活動に関連した内容などが時宜に応じて選ばれているが、近年はガスタービン・ジェットエンジンの技術開発プロジェクトに関連する話題が多く取り上げられて来た。第46回定期講演会でもこの流れに沿って、学術講演会委員の渡辺裕章先生（九州大学）と一緒に「ガスタービン関連技術開発プロジェクトの最新状況と展望」という題目で先端技術フォーラムを企画した。

フォーラムでは2件の講演をお願いした。まず当学会のガスタービンを考える会および調査研究委員会で行った検討に基づき、昨年度まで実施されたNEDOの負荷変動対応ガスタービンに関する先導研究プロジェクトについて、電力中央研究所（電中研）の渡辺和徳氏にお話を伺った。続いてJAXA航空技術部門の西澤敏雄氏から、昨年度終了したターボファンエンジンの低圧系に関する技術開発プロジェクトについてご紹介いただいた。講演後の討論ではこれらの研究開発プロジェクトで経験された企画運営の苦労や、今後のプロジェクトに向けての教訓などについて、様々なお話を伺った。ここではフォーラムの概要を報告する。

2. 企画の背景

当学会では以前からガスタービン関連技術の共同研究開発プロジェクトを検討して来ている。プロジェクトの遂行にはその内容とともに、複数機関の共同体制の確立と維持、その体制における研究立案・運営など、マネー

ジメントも重要な要素であるが、学会での検討においてもこの面でプロジェクトの企画運営に様々な困難が感じられているところである。

近年、NEDOのエネルギー・環境新技術先導プログラムの中で、当学会における活動が契機となった負荷変動対応ガスタービンの研究開発プロジェクトが2期にわたって実施され、昨年度までに成功裡に終了した。第1期のプロジェクトはガスタービンを考える会および産官学連携委員会の活動が発端となって、NEDOの上記プログラムの中で「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」プロジェクトが実現したものである⁽¹⁾。この調査研究プロジェクトは2014年度末にスタートし、2016年2月に完了した。実施に当たっては産官学連携委員会が臨時委員会として調査研究委員会を組織し、プロジェクトの契約先5社・2機関および再委託先5機関からメンバーが出て研究を遂行した。また、NEDOの委員会として研究開発推進委員会が設置されたが、ここでは調査研究委員会のメンバーに、電力5社および電事連から委員が参加し、ユーザーの意見を取り入れながら研究を進めた。学会の関連分野に参画する多くの機関の共同体制が実現した画期的なプロジェクトであった。その後、様々な動きがあったのち、第2期の先導研究として、NEDOの同じプログラムで「機動性に優れる広負荷帯高効率GTの開発」というプロジェクトが2017年度に実施された。第1期を引き継いでより具体的なガスタービン技術開発を目指すプロジェクトであったが、実現にあたって実施機関を絞り込むこととなり、1社・1機関の委託先で実施された⁽²⁾。このプロジェクトも成功裡に終了したことを受け、今年度からは要素開発を実施する4年間のNEDOプロジェクトがスタートしたところである。

また、航空エンジンではJAXAのaFJR（Advanced Fan Jet Research）プロジェクトで低圧系の様々な要素技術が多岐にわたって研究開発され⁽³⁾、こちらも昨年度

原稿受付 2018年11月20日

* 1 東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻
〒113-8656 文京区本郷7-3-1
E-mail: watanabe@aero.t.u-tokyo.ac.jp

末に成功の裡に終了した。現在はこれに引き続き、燃焼器と高圧タービンを中心とするコアエンジンの要素技術開発プロジェクトが始まったところである。今後の高圧系要素技術の飛躍的な進展が大いに期待される。

本フォーラムではこのような時期に鑑み、これら2件のガスタービン技術に関する研究開発プロジェクトの実施経験や得られた成果をまとめて紹介いただくとともに、今後のプロジェクト設計に対する注意点や課題を討論して、これからのプロジェクト立案に有益な情報を共有する機会とすることを目的とした。

そこで、負荷変動対応ガスタービンの先導研究で研究開発責任者を務められた電中研の渡辺氏と、aFJRプロジェクトでプロジェクト・マネージャを務められたJAXAの西澤氏に登壇していただき、経験談と研究成果をご紹介いただいた。また、プロジェクト遂行における課題などについて討論を行った。

3. 講演

3.1 機動性に優れる広負荷帯高効率ガスタービン複合発電の開発プロジェクト

今後のCO₂排出の大幅削減に向けて、再生可能エネルギーの大量導入が国の方針となっている。しかしながら再生可能エネルギーは出力が天候に大きく影響を受けるなど、基本的に不安定な電源であり、この変動の対策が重要課題となっている。系統では電力量だけでなく、周波数や電圧を安定化させる必要があり、負荷変動に対応する電源としてはLNGを燃料とするガスタービンコンバインドサイクル発電が高効率かつクリーンであり、起動性に優れることから、もっとも有望と考えられる。そこで機動力を最大限向上させた先進ガスタービン実現のため、本プロジェクトを立ち上げて検討を進めた。2014～2015年度の第1期では2030年に実現すべき目標性能をまとめ、課題を整理した。例えば大型ガスタービンコンバインド発電システムでは起動時間10分（ホットスタート）、出力変化速度毎分20%、50%負荷時の効率低下10%、最低出力10%（一軸）などの目標性能がまとめられた。

2016年度には電中研によりNEDO委託事業として調査研究「再生可能エネルギー大量導入時の電力系統安定化における火力発電の役割とGTの負荷変動吸収能力の向上によるCO₂削減効果に関する調査研究」が行われ、負荷変動対応ガスタービンの導入によるCO₂削減効果やコスト低減効果などの定量的な評価が需給シミュレーションによって実施された。

2017年度には先導研究の第2期となる「機動性に優れる広負荷帯高効率GTの開発」が実施され、要素技術開発の一部に着手するとともに課題を明らかにし、並行して将来の技術開発プロジェクトの基本計画を検討した。この結果、本技術の要素開発がNEDOの「次世代火力発電等技術開発」基本計画に盛り込まれることとなり、本

格的な開発フェーズにつながった。

以上の経緯を経て今年度開始されたNEDOプロジェクト「機動性に優れる広負荷帯高効率GTCCの要素開発」では、今後4年間で急速起動性の向上と部分負荷時の効率維持を目指した要素技術開発が本格的に行われ、また、既設設備のレトロフィットによる技術実証も計画される予定である。

このような技術の有効な利用・普及には、発電電力量だけでなく、調整力などの価値も電力料金体系に組み込まれる必要がある。今後はこのような制度設計にも十分な検討が必要である。再生可能エネルギーと共存し、安定した電力供給を行いつつCO₂排出量を削減する火力電源の実現に向けて、本技術開発を進めて行く計画である。

講演後、帝京大学の田沼教授からコメントがあった。超臨界圧蒸気タービンシステムを用いることでGTCCの運用性能が向上するとの話があったが、今回の一連のプロジェクトでは蒸気タービンの研究開発を行ってはいない。その点を明確に表明しておいて欲しい、とのことだった。

3.2 高効率軽量ファン・タービン技術実証 (aFJR)

JAXAでは1970年代から1980年代にかけてFJR (Fan Jet Research) プロジェクトを実施し、我が国のターボファンエンジン技術の開発にとって大きな成果を上げた。その後、種々のエンジン技術の基礎的な研究開発を進めてきたが、要素技術の社会実装を強く意識した方向性の技術開発として、環境適合技術を中心に据えた低圧系の技術開発「高効率軽量ファン・タービン技術実証 (aFJR) プロジェクト」を2013年度から2017年度まで実施した。国際共同開発への参画を目指す国内企業等との連携強化が非常に重要と認識されている。

技術目標は以下の3項目と設定した。

- 1) ファン空力効率向上1 pt. (JAXAクリーンエンジン比)
- 2) ファン軽量化0.9% (現行機エンジンV2500重量比)
- 3) 低圧タービン軽量化9.1% (同上)

このための要素技術として、以下の技術を選定し、研究開発を実施した。

- 1) 高効率ファンブレード技術 (層流ファン設計)
- 2) 軽量ファンブレード技術 (中空CFRP翼設計)
- 3) 軽量メタルディスク技術 (加工シミュレーションベース設計)
- 4) 軽量吸音ライナ技術 (樹脂製ハニカム構造設計)
- 5) 軽量タービンブレード技術 (CMCブレード設計)

各要素技術について達成度確認を行い、更にそれら要素技術を搭載した供試体を製作し、地上実証試験を実施した。その結果、開発目標を全て達成することができた。開発した技術を将来型高バイパス比エンジンに適用した場合を想定してJAXAの性能評価システムで推算したところ、当初の見込みを上回る燃料消費性能の改善が期待

されることが分かった。また、開発した樹脂製吸音ライナにより、軽量化の目標を達成するとともに、騒音低減とコスト低減の目標を両立できることも確認された。

なお、このプロジェクトと直接関係することではないが、技術の国際競争力を高めるためにはエンジンシステムレベルでの技術実証が不可欠であることから、対潜哨戒機P1に搭載されているF7エンジンをJAXAに導入し、技術実証エンジンとして2019年度から使用する計画で準備が進められているところである。

4. 討論

講演を踏まえ、司会から講演者に質問する形式を中心に討論を行った。主としてプロジェクトの運営面での話を伺った。

まず渡辺氏に、多くの企業が参加したプロジェクトをまとめていく過程で苦労したことをお聞きした。これに対して渡辺氏からは、参加機関の間で長い準備期間を共有してプロジェクトを設計したため、十分な話し合いを踏まえて機関ごとに役割をうまく分担して研究を行ったため、取りまとめ役として苦労はしなかった、との認識が示された。苦労をあえて挙げるなら、NEDOの報告書を作成する際に、各機関から提出された原稿の体裁を整えるのに手間がかかったとのことだった。

また、複数の機関が参加した中で、知財に問題は生じなかったか伺ってみたところ、NEDOの下で行う複数の機関が参画するプロジェクトについては知財合意書を作成することになっており、現在のプロジェクトは参加企業が1社だが、複数の企業が参加する際は知財の取り扱いについて調整が必要になるとのことだった。関連して第1期から第2期にプロジェクトが進行するとき、参画機関が絞り込まれたことに対して、当初は要素開発まで体制を維持したいと考えていたので、絞らざるを得なくなったことは申し訳なく思っている、とのコメントがあった。

西澤氏にも同様の質問として、aFJRはJAXA内部でのプロジェクトではあるが、複数の研究者をまとめる上

で苦労したことはあるかどうか伺った。プロジェクトを始めた当初はより幅広い技術を取り扱うことが提案されていたが、JAXA内の議論で絞り込んで行った。その過程で企業や大学と時間をかけてプロジェクトの内容を深く検討した。航空エンジンでは開発の機会が少ないので、目標と計画の立案が非常に重要であり、今回はこれがうまく行ったと思うとのことだった。渡辺氏の見解も総合すると、プロジェクトの設計段階で参画機関の間で十分な議論・検討を行い、目標と計画を具体的かつ的確に設定することが、プロジェクトの成功に極めて重要との共通項が得られた。

他方、筆者からはJAXA内の評価システムが非常に大変そうに見えたので、評価プロセスの最適化について意見をお持ちか伺ってみた。西澤氏は、aFJRは複数の技術研究の集まりであるため、個々の技術に対して評価を行う必要があり、評価プロセスが複雑になった、ロケットのようなシステムレベルの開発であれば、評価プロセスは簡素化されると思う、との見解だった。

学会の油谷会長から西澤氏に質問があった。研究開発には将来に向けたものと、企業の目の前のニーズに対応するものがある。後者は純粋な研究にならないことがあるが、これをしっかり行う仕組みがないと、研究開発が将来に向けた社会への実装につながらないように思われるがいかがか、との内容であった。西澤氏からは、個々の研究者が研究成果を社会実装につなげることは難しく、組織の上層部が研究成果を吸い上げて社会実装のフェーズに持ち上げることが重要ではないかとの回答があった。

続いて成果の発信方法についての意見をお二人に伺った。渡辺氏はプロジェクトの経験から、研究の価値を異分野の人々に理解していただくのが重要だが、困難を感じたとのことだった。また、西澤氏は所轄機関に対する成果説明を地道に行っていること、またJAXAではプロジェクトの開始時と終了時のプレス会見や、JAXA主催のシンポジウムにおいて一般向けの成果報告を行う機会があり、それらがWEB上で閲覧可能になっていることを指摘された。



講師の西澤氏と渡辺氏



会場の様子

最後に西澤氏に、来年度から技術実証エンジンとしてJAXAに整備される予定のF7エンジンの状況について聞いてみた。現在は設備側の準備は完了しており、F7エンジン導入の手続きを行っているところだそうで、今後は地上の設備で運転するための確認作業を行っていく予定とのことだった。エンジンを改造して試験を行っていくことになるので、その方法について今後検討を行う。メーカーに幅広く利用していただきたいと考えている、とコメントされた。

5. おわりに

近年実施され、重要な成果を挙げた発電用ガスタービンと航空エンジンの技術開発プロジェクトを取り上げ、先端技術フォーラムを開催した。それぞれのプロジェクトの技術的な成果を紹介いただくとともに、プロジェクト遂行にあたって注意した点や苦心した点など、運営上の経験も知ることができた。

昨年度の定期講演会におけるパネルディスカッションでも披露した通り、ガスタービンを考える会では今後の航空エンジン研究開発プロジェクトの実現に向けて、現在具体案を練っているところである⁽⁴⁾。本フォーラムではプロジェクトを計画して行く上でも大変参考になるお話を伺うことができた。得られた知見を生かして行きたい。

フォーラムは定期講演会のプログラムの最後に行われ

たにも関わらず、多くの方々が参加して下さり、盛況であった。講演者のお二人と、企画を実現していただいた学術講演会委員会をはじめとする関係者の方々、およびご参加いただいた皆さんに深くお礼を申し上げたい。

謝辞

本稿の執筆にあたり、学会誌編集委員を務めておられる東京電機大学の金子雅直先生がまとめて下さったフォーラムの記録を大いに参考にさせていただいた。ここに記して深甚なる謝意を表する。

参考文献

- (1) 日本ガスタービン学会調査研究委員会，調査研究委員会報告 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』について，日本ガスタービン学会誌，Vol. 44, No. 6 (2016), pp. 506-526.
- (2) NEDOホームページ
〈<https://app5.infoc.nedo.go.jp/disclosure/SearchResultDetail>〉（参照日2018年11月19日）.
- (3) JAXAホームページ
〈<http://www.aero.jaxa.jp/research/ecat/afjr/>〉（参照日2018年11月19日）.
- (4) 渡辺紀徳，パネルセッション「航空エンジン技術開発プロジェクトの展望」，日本ガスタービン学会誌，Vol. 46, No. 1 (2018), pp. 39-43.

特集：第46回定期講演会（鹿児島）報告

市民フォーラム 「MRJ用PW1200Gエンジンと関連技術」 Public Lecture on PW1200G Engine for MRJ and Related Technologies



貴志 公博^{*1}
KISHI Kimihiro

本年度の市民フォーラムは第46回定期講演会の前日10月9日(火)夕刻に鹿児島大学郡元キャンパスの稲盛会館ホールにおいて開催され、鹿児島大学の教授や学生の他、近隣の大学や高校生、教員の方々、この分野の企業や大学関係の専門家など、多くの方々が参加されました。

今回は、現在注目を集めている国産ジェット旅客機MRJ用PW1200Gエンジンを題材として、航空機やエンジンの市場動向や技術動向、ジェットエンジンの原理や構造、PW1200Gエンジンの特徴などについて説明しました。また当社で取り組んでいる航空機用エンジン事業の紹介、部品加工や品質管理、関連する設計技術や製造技術の開発の一端を紹介しました。

まず、航空機・エンジンの市場動向では、旺盛な航空輸送需要により今後20年間に世界の航空輸送は年平均5%程度のペースで伸長し、現在の約2.4倍の旅客規模になる見通しを説明しました（Fig. 1）。この需要を支えるために、航空機やエンジンも同期間に開発の機会や生産が増大し、航空機では33,000機以上、エンジンでは78,000基以上の大きな市場を形成すると推定されています（Fig. 2）。

その一方で航空機の増加は環境への負荷も増すことになり、騒音（Fig. 3）やエミッション規制（Fig. 4）の動向、航空機から排出されるCO₂の推移（Fig. 5）に

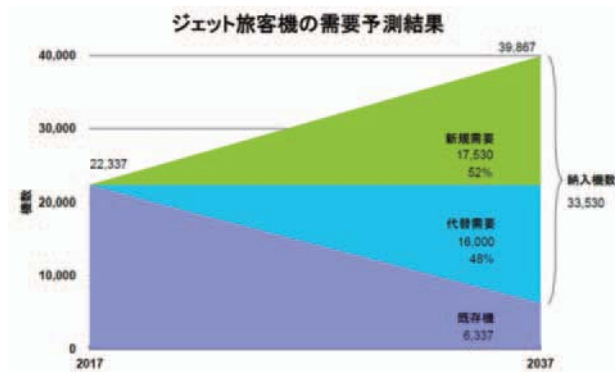


Fig. 2 ジェット旅客機の運航機材構成予測⁽¹⁾

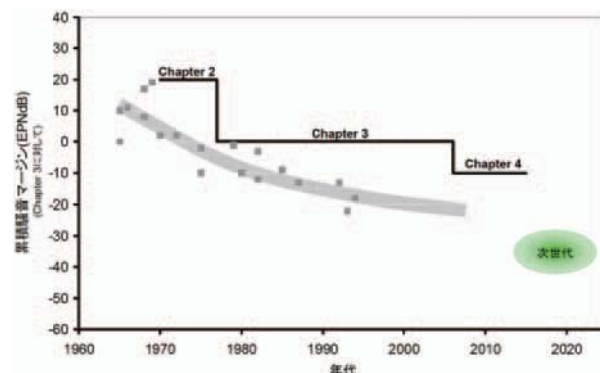


Fig. 3 騒音規制の推移⁽²⁾

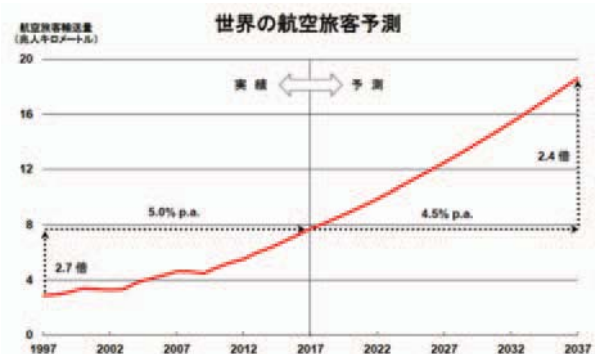


Fig. 1 世界の航空旅客予測⁽¹⁾

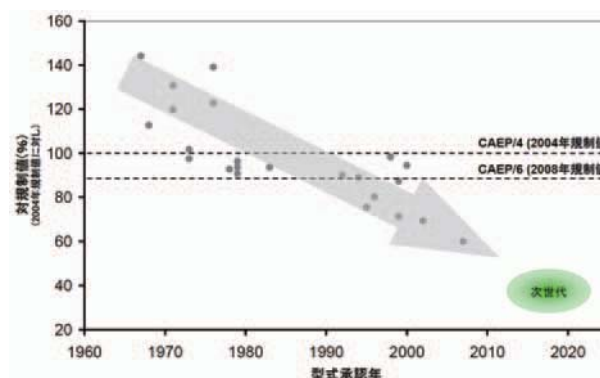


Fig. 4 エミッション規制（NO_x）の推移⁽²⁾

原稿受付 2018年11月15日

* 1 三菱重工航空エンジン(株) 民間エンジン事業推進部
〒485-0826 小牧市東田中1200番地
E-mail: kimihiro_kishi@aeroeng.mhi.co.jp

についても説明しました。特にCO₂削減（燃費向上）とエミッション（NO_x）削減は相反関係にあり（Fig. 6）、今後も継続的に環境適合性や性能向上に向けた取り組みが必要であることも理解していただきました。

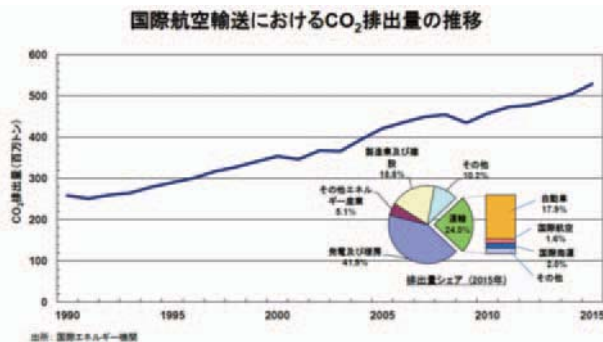


Fig. 5 国際航空輸送におけるCO₂排出量の推移⁽¹⁾

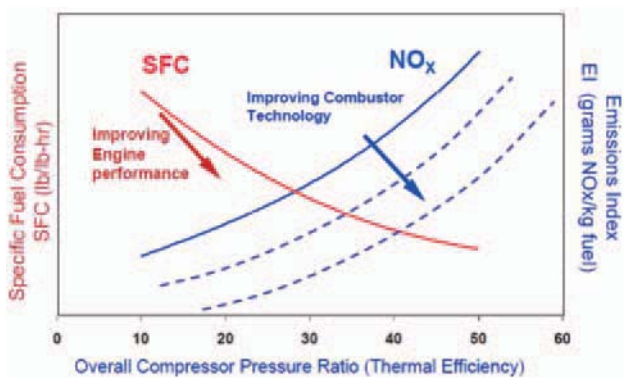


Fig. 6 燃費低減（SFC）とNO_x低減の関係⁽³⁾

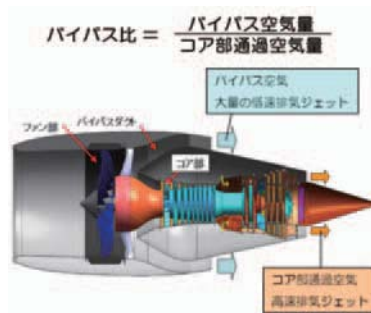


Fig. 7 バイパス比の定義

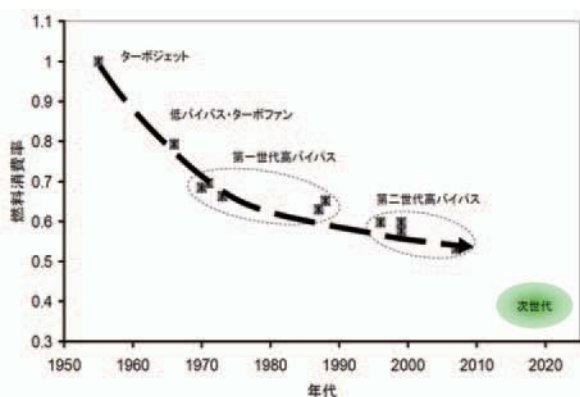


Fig. 8 高バイパス比化と燃料消費率の推移⁽²⁾

技術動向に関しては、まずジェットエンジンの原理について紹介し、性能向上の取り組みとして、高バイパス比化（Fig. 7）、高温・高圧力比化のトレンドと技術開発の要点を説明しました（Fig. 8）。また、新材料や革新的な製造技術の概要についても紹介しました。

次に、このような市場動向や技術動向の中で、当社が取り組んでいる航空機エンジン事業やその特徴を簡単に紹介した上で、MRJ用PW1200Gエンジンについて紹介しました。PW1200GはGTF（Geared Turbo Fan）と呼ばれる次世代エンジンであり、その構造や性能上の特徴について説明しました（Fig. 9）。その最大の特徴であるファン・ドライブ・ギアシステムの構造を説明し（Fig. 10）、30年近くに及ぶ開発の経緯（Fig. 11）についても紹介し、技術開発には絶え間ない努力が必要であることも理解していただきました。

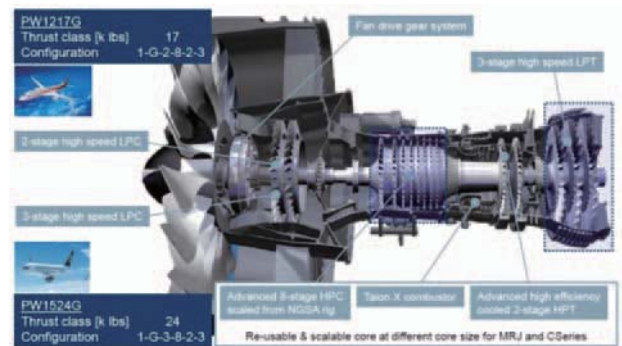


Fig. 9 GTF（Geared Turbo Fan）の構造⁽⁴⁾

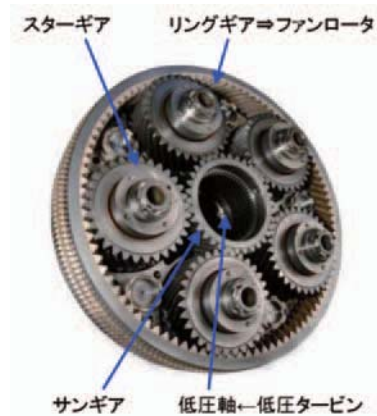


Fig. 10 ファン・ドライブ・ギアシステム⁽⁵⁾

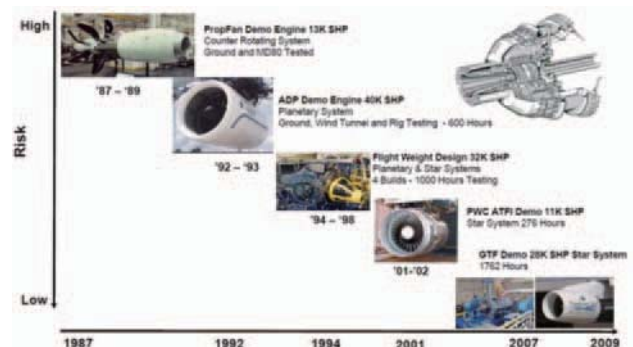


Fig. 11 ファン・ドライブ・ギアシステム開発の歴史⁽⁴⁾

高効率化の点では、GTFのメリットであるファンと低圧タービンがそれぞれ最適回転数（ファンは低速、低圧タービンは高速）で作動する（Fig. 12）ことで熱効率と推進効率を向上させることができ（Fig. 13）、低圧タービンの段数削減により軽量化にも寄与できています。

一方、高バイパス比化は燃費低減と騒音低減に効果がありますが、重量と空気抵抗も増えるため、バイパス比の最適化が重要となります（Fig. 14）。

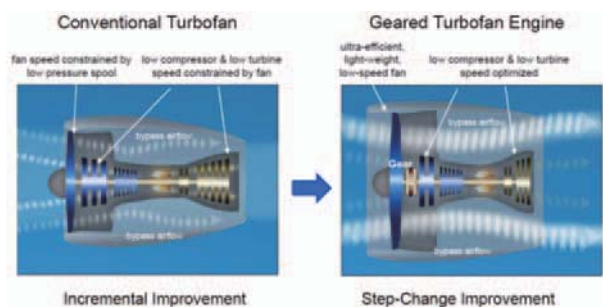


Fig. 12 従来型エンジンとGTFとの比較⁽⁵⁾

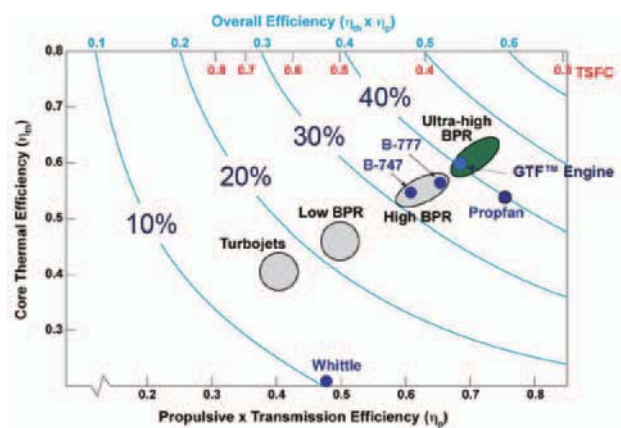


Fig. 13 総合効率と熱効率・推進効率の推移⁽⁵⁾

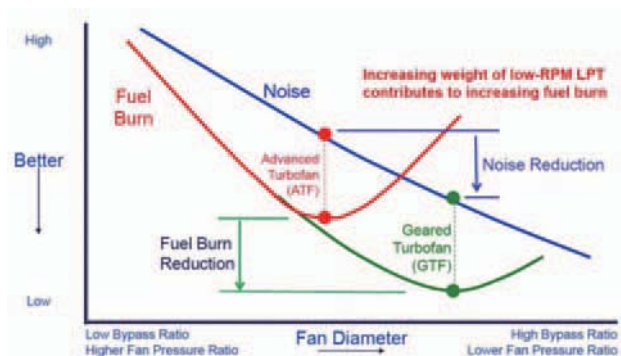


Fig. 14 ファン径と燃料消費・騒音特性の関係⁽⁵⁾

さらに、実際の要素試験やエンジン開発（Fig. 15）、飛行試験（Fig. 16）など動画を上映し、その内容を解説することで、具体的なエンジン開発のイメージを掴んでいただきました。



Fig. 15 PW1200G地上試験⁽⁶⁾



Fig. 16 PW1200G飛行試験⁽⁶⁾

このPW1200Gエンジンは2017年5月にFAA（米国連邦航空局）の型式証明を取得していますが、当社では量産に向けた準備を着々と進めています。当社は従来の部品生産に加え、新製エンジンとしての最終組立とエンジン試験も担当することとなっており、その一端として最終組立ラインでの組立進捗に見える化の取り組みを紹介しました（Fig. 17）。

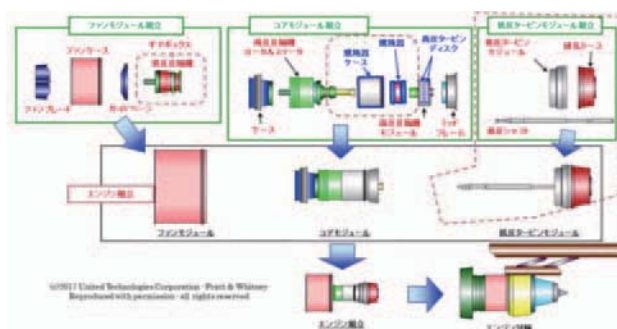


Fig. 17 モジュール構造とエンジン全体組立の概要^{(7),(8)}

航空エンジン事業では、効率的かつ高精度で低コストな部品加工と高度な品質管理が求められますが、その具体的な取り組みについても紹介しました。エンジン部品は高温高压に耐える必要があります、ニッケル合金やチタン合金など高価で難削材が用いられています。また、燃焼器ケースやディスクなど大型部品もありますが、軽量のために薄肉構造となっています。そのため、加工途中での変形、加工ひずみ、熱影響による加工変質層などを抑制する工法や精密な品質検査が必要となります。その具体的な事例についても紹介しました。また、航空宇宙分野特有の品質マネジメントシステムについても紹介しました。⁽⁹⁾

最後に、航空エンジンの開発や生産を支える設計・製造技術についても一端を紹介しました。製造技術としては難削材の燃焼器ケースの先進切削技術や燃焼器ライナの冷却孔を穴明けする高速レーザ加工技術 (Fig. 18)、設計技術としては燃焼器CFDやリグ試験、低圧タービンの空力、構造設計やリグ試験を動画付きで紹介しました。また、セラミック基複合材、TiAlタービンプレード、3D金属積層による燃焼器パネル施策の他、エンジン部品修理技術や単結晶補修技術なども紹介しました。当社では独自技術開発に取り組む一方、産官学の枠組みも活用して革新的な技術開発を進めていることも説明しました⁽¹⁰⁾。



Fig. 18 燃焼器と高速レーザ加工^{(7),(8)}

講演後には、会場からは大学生からの質問も寄せられ、この分野への関心の高さを感じることができ、将来を担う若い世代への期待感が高まる機会となりました。また、その後の懇親会等でも同様の講演を依頼されるなど、参考にしていただける内容であったかなと感じました。

最後に、講演を準備していただいた学術講演会の皆様、聴講していただいた方々に感謝いたします。

参考文献

- (1) (一財) 日本航空機開発協会「民間航空機に関する市場予測 2018-2037」2018年3月。
〈http://www.jadc.jp/files/topics/140_ext_01_0.pdf〉(参照日2018年11月9日)。
- (2) 文部科学省ホームページ 航空科学技術委員会 (第34回) 資料, 平成22年3月。
(一財) 日本航空機エンジン協会「民間航空機用エンジンの動向と展望等について」(2018年11月9日)。
〈http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/004/shiryu/_icsFiles/afiedfile/2010/06/08/1292853_2.pdf〉(参照日2018年11月9日)。
- (3) Overview of NASA's Environmentally Responsible Aviation, 〈www.aeronautics.nasa.gov/pdf/asm_2010_collier_508.pdf〉2015.2) (参照日2018年11月9日)。
- (4) THE PW1000G PURE POWER NEW ENGINE CONCEPT AND ITS IMPACT ON MRO, P&W, Av Week Engine MRO Forum, December 1, 2010.
- (5) A VIEW INTO THE NEXT GENERATION OF COMMERCIAL AVIATION (2025 TIME FRAME), AIAA Aerospace Today & Tomorrow, June 2013.
- (6) Pratt & Whitney社ホームページ
〈<http://www.purepowerengine.com/photos.htm>, 2015.2) (参照日2018年11月9日)。
- (7) 三菱重工技報 Vol. 54 No. 4 (2017) 航空宇宙特集「MRJ用エンジンPW1200Gの開発・量産への取り組み」〈<https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/544/544010.pdf>〉(参照日2018年11月9日)。
- (8) MRJ用エンジンPW1200Gの開発・量産への取り組み公益社団法人日本航空技術協会, 月刊航空技術2018年09月号。
- (9) 三菱重工技報 Vol. 51 No. 4 (2014) 航空宇宙特集「世界中で活躍する三菱重工航空エンジン(株)の民航エンジン製品」〈<https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/514/514016.pdf>〉(参照日2018年11月9日)。
- (10) 三菱重工技報 Vol. 53 No. 3 (2016) 交通・輸送特集「民航エンジン事業における産業クラスターの形成・活用」〈<https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/533/533006.pdf>〉(参照日2018年11月9日)。

第31回ガスタービン教育シンポジウム報告

西村 英彦

NISHIMURA Hidehiko

2018年11月1日(木)、2日(金)の二日間にわたり、第31回ガスタービン教育シンポジウムが、兵庫県高砂市の三菱日立パワーシステムズ株式会社(MHPS)高砂工場にて開催された。

この教育シンポジウムは学生や若手技術者などガスタービン初学者を対象に、ガスタービンの基礎知識を学んで頂く目的で、第一線で活躍されている各専門家による講義と、実際のガスタービンとその関連の製造及び研究開発施設等の見学を併せた企画である。今回も、1日目に講義4テーマを実施し、2日目に講義2テーマと特別講義および高砂タービン工場などの見学を実施した。

今年度は7月に東芝エネルギーシステムズ(株)京浜事業所タービン工場でも教育シンポジウムを開催しており、関東方面からの参加者はほとんど無く、参加者数は56名(学生10名、社会人46名)と、例年と比べると学生の参加者がやや少なかった。

1日目は集会行事委員会の谷村理事による開会挨拶の後、ガスタービン関連の4テーマの講義、(1)ガスタービン概論(柴田貴範氏)、(2)ガスタービンと流体工学(三戸良介氏)、(3)ガスタービンと材料工学(上村好古氏)、(4)ガスタービンと制御工学(黒坂聡氏)が行われた。

講義終了後、高砂社員クラブ内の洋室にて懇親会が行われた。シンポジウム出席者の7割以上の方が懇親会に参加し、会場の各所で参加者同士の活発な議論と相互交流がなされ、参加者の方には有意義な時間を過ごしていただけたと思う。

2日目は、前日に引き続き2テーマの講義と特別講義、(5)ガスタービンと伝熱工学(都留智子氏)、(6)ガスタービンと燃焼工学(小田剛生氏)、(7)三菱日立パワーシステムズにおけるガスタービンの開発(由里雅則氏)が行

われた。その後、官学参加者は二班に分かれて、(a)基礎技術の研究・開発を行っている高砂研究所、(b)ガスタービンプレードの製作を行っているブレード工場、およびガスタービンの組立を行っている組立工場、(c)実際に発電しながら長期実機検証を行っている実証発電設備(T地点)の見学を行った。一方、企業参加者はMHPSの会社紹介のビデオ、および4件の技術講演を聴講した。

それぞれの講義ではガスタービンの基礎から最新の技術動向までを専門家の立場から説明がなされ、受講者にとって今後の研究・仕事などを進める上で多いに役立つ内容となっており、熱心な聴講・質疑応答が行われた。

全講義終了後、2日間の講義に出席した参加者に受講証が手渡された。また、参加者には、今後の教育シンポジウムの運営及び教材に関するアンケートに御協力頂いた。アンケート結果は次回以降の企画及び教材の改訂に反映する予定である。

本シンポジウムでは昨年改訂された「ガスタービン工学」を教材として用いており、これに沿った講義を講師の方をお願いしている。「ガスタービン工学」は学会ホームページから購入することができ、今回の参加者のうち事前に教材を購入し受講していた方もいた。講義では時間の都合もあり、教材の一部しか扱うことができなかったが、参加された皆様にはこの教材を有効に活用し、ガスタービンの知識をさらに深めるのに役立てて頂ければ幸いである。

最後に、講義、資料等の作成・準備にご尽力頂いた講師の先生方々に感謝すると共に、会場の提供、見学会及び懇親会についてご協力を頂いた三菱日立パワーシステムズ株式会社/三菱重工業株式会社の関係者各位に深く感謝いたします。

(集会行事委員会委員)



講義風景



懇親会風景

2018年度 第2回見学会報告

小沢 寛二
OZAWA Kanji

2018年11月16日(金)の午後に、株式会社IHIキャスティングス相馬工場において、本会主催の見学会が開催された。今回の見学先は仙台駅から電車とバス（貸し切りバス）を乗り継いで約1時間20分の距離にあり、当日は寒い中ではあったが、大学、研究機関、電力会社およびメーカーから23名の参加があった。

工場に到着し会議室に案内されたあと、はじめに、株式会社IHIキャスティングス 生産技術部部長の佐藤茂征氏よりご挨拶と、会社について以下のようなご説明を頂いた。(1)IHIキャスティングスは航空機用ジェットエンジン、産業用ガスタービンおよび車両用過給機などに使用される耐熱合金精密鑄造品を取り扱っており、現在、航空機用ジェットエンジンと産業用ガスタービンの部品が約70%を占めている。(2)主力製品は、高温環境下に耐えるようにニッケルなどを主成分とした耐熱合金を適用したタービン翼である。(3)近年のエンジンの高熱効率化に伴うタービン入口温度上昇に対応するために、一方向凝固（DS：Directional Solidification）や単結晶（SC：Single Crystal）と呼ばれる結晶を制御する技術を適用したり、タービン翼に冷却特性をもたせる必要性から複雑な中空冷却構造を形成する技術を適用したり、多数のタービン翼が生産されている。

これら説明を受けた後に、二つのグループに分かれて工場内の見学をさせて頂いた。見学は鑄造方法（ロストワックス製法）をなぞるように実際の現場を訪れ、案内担当の方から懇切丁寧な説明を受けた。蠟型を製作する現場では、中空構造を形成する中子（セラミックコア）を入れて射出成形で蠟型を作っていく作業の流れを、鑄型を作る工程では、自動化を取り入れている様子を見学できた。また、鑄型を取り除いた後の製品の状態や、そ

の後の表面仕上げの工程、三次元計測器での寸法検査、X線検査や蛍光浸透探傷検査での欠陥の有無の確認など、品質保証を図る様子も見学させて頂いた。

見学後は会議室に戻り、全体での質疑応答を行った。その中では、実際に今見てきた生産管理についての質問、翼の材質に関する質問や、見学コースにはなかったシミュレーション技術の活用に関する質問など幅広い質問が続いた。最後は時間切れで質問を打ち切るかたちとなってしまったが、充実した質疑応答となった。

最後に、本見学会を開催するに当たり、ご多忙の中、見学会の手続きと準備から当日の案内まで多岐に渡ってご尽力・ご協力頂いた生産技術部部長の佐藤氏をはじめ株式会社IHIキャスティングス相馬工場および株式会社IHI相馬工場の関係各位には厚く御礼を申し上げます。

（集会行事委員会委員）



工場入口前での集合写真

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

2018年10月10日(水)、11日(木)に鹿児島県かごしま県民交流センターで開催されました第46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：12件、燃焼関係：5件、性能関係：5件、材料関係：2件の合計23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。

- ・九州大学大学院工学府機械工学専攻修士2年 伊藤 流石君
講演題目：「子午面流動解析に基づく逆解法を用いた遷音速遠心圧縮機羽根車の二次流れ抑制」
- ・東京理科大学大学院工学研究科機械工学専攻修士2年 林 優人君
講演題目：「低圧タービンにおける翼列フラッタの検知-力学系理論の導入-」

授賞式は講演会第2日の午後に行われ、渡辺紀徳副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23編の発表はいずれも素晴らしく、積極的にご参加頂いた学生の皆様に感謝申し上げますと共に、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

子午面流動解析に基づく逆解法を用いた遷音速遠心圧縮機羽根車の二次流れ抑制

九州大学大学院工学府機械工学専攻修士2年
伊藤 流石



この度は、日本ガスタービン学会学生優秀講演賞に選出いただき、誠にありがとうございます。ご指導いただきました九州大学古川雅人教授ならびに岩手大学山田和豊准教授には深く御礼申し上げます。受賞に際し、当該研究を評価していただけたことに喜びを感じるとともに、この結果に慢心することなく、研究に対し鋭意邁進して参りたいと考えております。最後に、選出していただいた日本ガスタービン学会関係者様、研究に際してご指導いただきました先生方に重ねて御礼申し上げます。

低圧タービンにおける翼列フラッタの検知-力学系理論の導入-

東京理科大学大学院工学研究科機械工学専攻修士2年
林 優人



この度、第46回日本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て、大変光栄に思います。講演では、航空用エンジンの低圧タービンで発生する翼列フラッタに対して、力学系理論の視点から事前検知を行い、その結果を発表させていただきました。今回の受賞に当たり、常日頃よりご指導くださる後藤田先生をはじめ、共同研究者である宇宙航空研究開発機構の西澤様、賀澤様、お世話になっている全ての方にこの場を借りて深く感謝申し上げます。

学術講演会発表助成について

表彰委員会

2018年10月10日(水)、11日(木)に鹿児島県かごしま県民交流センターで開催されました第46回日本ガスタービン学会定期講演会に参加して講演を行った学生に対して、本人からの申請に基づき、交通費の助成を実施した結果についてご報告いたします。

本助成制度は、定期講演会で講演する学生に対して、往復交通費の半額相当を助成することで、ガスタービン関連分野の若手人材の育成や技術の発展を奨励することを目的として設置されたもので、自ら講演する学生であることに加え、日本ガスタービン学会または関連学協会の会員であり、会費の滞納がないことなどが助成の条件になっております。今回の講演会では、9月1日を期限として応募者の募集を行ったところ、16名の募集がありました。表彰委員会内で慎重に審議を行い、「学術講演会発表助成に関する内規」に則り、以下のような助成を行うことを決定いたしました。

東京地区からの参加者12名（法政大学4名、東京大学3名、首都大学東京2名、東京理科大学2名、早稲田大学1名）に対しては各1万1千円、岩手地区からの参加者2名（岩手大学）に対しては2万5千円、新潟地区からの参加者1名（新潟大学）に対しては2万3千円、高知地区からの参加者1名（高知工科大学）に対しては1万1千円。

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

第47回日本ガスタービン学会定期講演会・見学会のお知らせ

第47回日本ガスタービン学会定期講演会を、以下の日程で開催いたします。

講演会開催日 2019年9月18日(水)、19日(木)
 講演会開催場所 函館アリーナ
 〒042-0932 北海道函館市湯川町1-32-2
<http://www.zaidan-hakodate.com/arena/>
 見学会 2019年9月20日(金)

講演申込要領は、学会誌3月号、学会ホームページ(<http://www.gtsj.org>)に掲載いたします。奮ってご応募くださいますようお願い申し上げます。

講演申込締切 2019年5月17日(金)予定
 講演採否連絡 2019年6月21日(金)予定
 論文原稿締切 2019年7月29日(月)予定

参加申込方法は、学会誌7月号、学会ホームページに掲載する予定です。



◇2019年度会費納入のお願い◇

2019年度会費(2019年3月1日～2020年2月末日)を納入いただく時期となりました。会費は、下記の通りとなっておりますので、2019年4月30日までにお納め下さいますようお願い申し上げます。

なお、口座自動振替をご利用の方は、2019年3月25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。

<2019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
(*2019年3月1日現在)	

【納入先】

郵便振替: 00170-9-179578
 銀行振込: みずほ銀行 新宿西口支店
 普通預金口座 1703707

いずれも口座名は、
 シャ)ニホンガスタービンガッカイです。
 振込手数料は貴方にてご負担願います。

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

International Gas Turbine Congress 2019 Tokyo 講演募集

IGTC2019実行委員会

既にご案内しておりますように、『International Gas Turbine Congress 2019 Tokyo (IGTC2019)』は、虎ノ門ヒルズを会場として、2019年11月17日(日)～22日(金)の日程で開催されます。

アブストラクトの申込み締切が2019年1月末に迫っておりますので、会員の皆様からの講演申込みを心よりお待ちしております。

また、国内外の関係者の方にもご案内いただけましたら、幸甚に存じます。

記

1. 会議名 : International Gas Turbine Congress 2019 Tokyo

2. 会議場所 : 虎ノ門ヒルズ フォーラム (虎ノ門ヒルズ 4階・5階)
<http://toranomonhills.com/facilities/forum.html>

3. 会期 : 2019年11月17日(日)～22日(金)

4. ホームページ : <http://igtc2019.org/>

5. 重要日程 (論文関係):

2019年1月31日 アブストラクトの締め切り

2019年2月28日 採択通知

2019年4月30日 ドラフト論文提出

2019年8月31日 最終論文提出

6. 申し込み方法:

以下の申し込みページより、500word以内のアブストラクトPDFをアップロードしてください

(1) IGTCのホームページ (<http://igtc2019.org/>) にアクセス

(2) IGTCロゴ下の“SUBMIT AN ABSTRACT”をクリック

(3) ページ下の表“First Submission”の“Submit”をクリック

(4) 既にPIN (PaperCept用ID) を取得している場合を除き、主著者、共著者全員のPIN^(※)を取得

(5) 必要事項を記入し、次ページでPDFをアップロード

(注※) IGTC2019では、電子投稿・査読システム (PaperCept) を採用しています。講演申込に際しては、共著者を含む著者全員にPersonal Identification Number (PIN) を取得して頂く必要があります。代表著者が、共著者のPINを代理登録することも可能ですが、PINは一人一つが原則ですので、共著者のPINを登録する際は、共著の方がすでにPINを取得されているかどうか、確認いただくをお願いします。

○ 本会共催・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
日本伝熱学会	日本伝熱学会関東支部セミナー「分野外の技術者にもわかる伝熱工学 - 最新の数値解析と実験計測の研究事例 -」	協賛	2019/1/23	新有楽町ビル2階Y202室	URL : http://www.htsj.or.jp/announcement/1780.html
日本陸用内燃機関協会	陸内協第1回技術者講習会	協賛	2019/2/7	一般社団法人日本陸用内燃機関協会 4階会議室	URL : http://www.lemma.or.jp
コージェネレーション・エネルギー高度利用センター	コージェネシンポジウム2019	協賛	2019/2/7	イイノホール	URL : http://www.ace.or.jp
精密工学会	第400回講習会「次世代の内燃機関を支える精密加工技術」	協賛	2019/2/22	東京理科大学 葛飾キャンパス 講義棟6階607教室	URL : http://www.jspe.or.jp/wp/wp-content/uploads/course/400.pdf
日本航空宇宙学会	第59回航空原動機・宇宙推進講演会	共催	2019/3/6-8	長良川国際会議場	URL : http://www.jsass.or.jp/propcom/
日本非破壊検査協会	第3回アジア赤外線サーモグラフィコンファレンス (QIRT-Asia2019)	協賛	2019/7/1-5	東京工業大学 大岡山キャンパス 大岡山西9号館ほか	URL : https://qirtasia2019.com/



▷ 入 会 者 名 簿 ◁

〔正会員〕

安西 慶祐 (IHI)

石井 良夫 (創価大学)

田畑 創一朗 (三菱日立パワーシステムズ)

鈴木 武雄 (IHI)

中嶋 誠 (東北電力)

李 昌桓 (三菱日立パワーシステムズ)

佐伯 浩子 (住重フォーGING)

高田 裕治 (物質・材料研究機構)

武藤 昌也 (名城大学)

〔学生会員〕

萩峯 大貴 (関西大学)

米田 悠希 (関西大学)

岡 優介 (高知工科大学)

黒川 将志 (東京大学)

次号予告 日本ガスタービン学会誌2019年3月号 (Vol.47 No.2)

特集 ガスタービンのMRO最新動向

論説・解説

巻頭言 藤山 一成 (名城大学)

ガスタービン自家発電設備の改善事例 (続編) (日本ガスタービンユーザー会) 筆頭執筆者 萩原 一雄 (川崎天然ガス発電)

ガスタービン高温部品の寿命延伸技術 初山 直城 (東芝エネルギーシステムズ)

産業用ガスタービンにおける診断・修理技術 細川 恭史 (川崎重工業)

市場のニーズに合わせたメンテナンス最適化への取り組み 佐藤 洋一 (三菱日立パワーシステムズ)

航空機エンジンのモニタリングとメンテナンス 高橋 篤弘 (JALエンジニアリング)

東北電力におけるGTCC導入の歴史と運用性向上への取り組み 清野 幸典 (東北電力)

研究だより

長崎大学工学部機械工学コース坂口研究室における多目的最適化設計を用いたターボ機械の開発

坂口 大作 (長崎大学)

新製品紹介

自動車用マイクロガスタービン単体試験装置 中川 正義 (丸和電機)

※タイトル, 執筆者は変更する可能性があります。

2018年度役員名簿

会長 油谷 好浩 (東芝)

副会長 渡辺 紀徳 (東大)

法人管理担当執行理事 大石 勉 (IHI), 寺本 進 (東大), 福泉 靖史 (三菱重工), 北山 和弘 (東芝エネルギーシステムズ) (兼務)

公益目的事業担当執行理事 黒瀬 良一 (京大), 高原 雄児 (防衛装備庁), 谷村 聡 (MHPS), 辻田 星歩 (法政大), 福山 佳孝 (JAXA), 松岡 右典 (川崎重工), 山本 悟 (東北大), 山本 誠 (東京理科大), 壹岐 典彦 (産総研) (兼務)

理事 大塚 裕也 (本田), 川岸 京子 (物材研), 高橋 俊彦 (電中研), 千葉 秀樹 (酒田共同火力発電), 萩川 宏樹 (JALエンジニアリング)

監事 田沼 唯士 (帝京大), 佃 嘉章 (三菱重工)

2018年度委員名簿 (順不同)

2018年12月13日現在
○は委員長

倫理規定委員会 ○福泉 靖史 (三菱重工), 壹岐 典彦 (産総研), 大石 勉 (IHI), 寺本 進 (東大), 山本 誠 (東京理科大)

自己点検委員会 ○福泉 靖史 (三菱重工), 壹岐 典彦 (産総研), 大石 勉 (IHI), 寺本 進 (東大), 山本 誠 (東京理科大)

運営委員会 ○寺本 進 (東大), 壹岐 典彦 (産総研), 大石 勉 (IHI), 北山 和弘 (東芝エネルギーシステムズ), 酒井 義明 (東芝エネルギーシステムズ), 塚原 章友 (MHPS), 辻田 星歩 (法政大), 松沼 孝幸 (産総研), 福泉 靖史 (三菱重工), 山本 誠 (東京理科大)

企画委員会 ○壹岐 典彦 (産総研), 太田 有 (早大), 北山 和弘 (東芝エネルギーシステムズ), 塚原 章友 (MHPS), 辻田 星歩 (法政大), 寺本 進 (東大), 福泉 靖史 (三菱重工), 安田 聡 (MHPS), 山本 誠 (東京理科大), 輪嶋 善彦 (本田)

国際委員会 ○船崎 健一 (岩手大), 井上 智博 (九大), 岡井 敬一 (JAXA), 北山 和弘 (東芝エネルギーシステムズ), 小森 豊明 (MHPS), 谷 直樹 (IHI), 都留 智子 (川崎重工), 福田 雅文 (高効率発電システム研究所), 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 ○松沼 孝幸 (産総研), 今野 晋也 (MHPS), 岡嶋 芳史 (三菱重工), 尾関 高行 (電中研), 糟谷 宏樹 (東芝エネルギーシステムズ), 北村 英二郎 (本田), 黒瀬 良一 (京大), 武田 淳一郎 (元 富士電機), 富永 純一 (JFEエンジニアリング), 中山 健太郎 (川崎重工), 浜辺 正昭 (IHI), 姫野 武洋 (東大), 平野 孝典 (拓殖大), 藤原 仁志 (JAXA), 渡邊 裕章 (九大)

集行事委員会 ○山本 誠 (東京理科大), 小沢 寛二 (IHI), 金澤直毅 (川崎重工), 佐久間 康典 (東大), 澤 徹 (東芝エネルギーシステムズ), 泰中 一樹 (電中研), 谷村 聡 (MHPS), 長野 啓明 (本田), 西江 俊介 (三井E&Sマシナリー), 西村 英彦 (MHPS), 萩川 宏樹 (JALエンジニアリング), 藤井 達 (日立製作所), 山形通史 (富士電機), 山田 誠一 (防衛装備庁), 吉田 征二 (JAXA)

ガスタービン技術普及委員会 ○福山 佳孝 (JAXA), 石田 克彦 (川崎重工), 岡田 満利 (電中研), 垣内 大紀 (IHI), 齊藤 大蔵 (東芝エネルギーシステムズ), 鈴木 正也 (JAXA), 高橋 康雄 (MHPS), 谷岡 忠輝 (MHPS), 長谷川 晃 (JALエンジニアリング), 村田 章

(東京農工大), 山本 誠 (東京理科大), 渡辺 紀徳 (東大)

学会誌編集委員会 ○辻田 星歩 (法政大), 荒木 秀文 (MHPS), 壹岐 典彦 (産総研), 岩井 裕 (京大), 大塚 裕也 (本田), 加藤 千幸 (東大), 金子 雅直 (東京電機大), 川岸 京子 (物材研), 阪井 直人 (川崎重工), 佐藤 哲也 (早大), 渋谷 直紀 (東芝エネルギーシステムズ), 杉本 富男 (三井E&Sマシナリー), 高橋 俊彦 (電中研), 田尻 敬次 (荏原エリオット), 多田 暁 (JALエンジニアリング), 千葉 秀樹 (酒田共同火力発電), 寺澤 秀彰 (東京ガス), 寺本 進 (東大), 中野 賢治 (IHI回転機械), 新関 良樹 (徳島文理大), 野原 弘康 (ダイハツディーゼル), 馬場 勝 (IHI), 原 浩之 (MHPS), 北條 正弘 (JAXA), 松崎 裕之 (東北発電工業), 森澤 優一 (東芝エネルギーシステムズ), 山下一憲 (荏原製作所), 山根 喜三郎 (防衛装備庁)

論文委員会 ○姫野 武洋 (東大), 青塚 瑞徳 (IHI), 壹岐 典彦 (産総研), 小田 剛生 (川崎重工), 柴田 貴範 (三菱重工), 田頭 剛 (JAXA), 寺本 進 (東大), 中谷 辰爾 (東大), 山根 敬 (JAXA), 山本 悟 (東北大), 山本 武 (JAXA), 山本 誠 (東京理科大), 吉岡 洋明 (東北大)

ガスタービン統計作成委員会 ○松岡 右典 (川崎重工), 赤澤 弘毅 (川崎重工), 荒井 慎吾 (ターボシステムズユニテッド), 恵比寿幹 (三菱重工), 後藤 裕一 (IHI), 澤 徹 (東芝エネルギーシステムズ), 山上 展由 (MHPS), 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), 及部 朋紀 (防衛装備庁), 金津 和徳 (IHI), 岸部 忠晴 (MHPS), 幸田 栄一 (電中研), 佐々木 隆 (東芝エネルギーシステムズ), 武 浩司 (川崎重工), 野崎 理 (高知工科大), 藤岡 順三 (物材研), 二村 尚夫 (JAXA), 松崎 裕之 (東北発電工業), 吉田 英生 (京大), 輪嶋 善彦 (本田)

広報委員会 ○高原 雄児 (防衛装備庁), 壹岐 典彦 (産総研), 酒井 義明 (東芝エネルギーシステムズ), 姫野 武洋 (東大), 村田 章 (東京農工大), 山根 敬 (JAXA), 吉田 征二 (JAXA)

表彰委員会 ○渡辺 紀徳 (東大), 壹岐 典彦 (産総研), 辻田 星歩 (法政大), 福泉 靖史 (三菱重工), 山本 誠 (東京理科大)

調査研究委員会 ○川岸 京子 (物材研), 長田 俊郎 (物材研), 岡崎 正和 (長岡技科大), 笈 幸次 (首都大学東京), 金久保 善郎 (IHI), 貴志 公博 (三菱重工航空エンジン), 岸部 忠晴 (MHPS), 齊藤 大蔵 (東芝エネルギーシステムズ), 東部 泰昌 (川崎重工), 福山 佳孝 (JAXA), 輪嶋 善彦 (本田)

女性参画推進委員会 ○都留 智子 (川崎重工), 旭 睦 (IHI), 川岸 京子 (物材研), 川澄 郁絵 (本田), 森川 朋子 (MHPS)

ACGT2018実行 ○山根 敬 (JAXA), 井上 智博 (東大), 谷 直樹 (IHI), 谷口 英夫 (岩手大), 都留 智子 (川崎重工), 船崎 健一 (岩手大), 古澤 卓 (東北大), 三好 市朗 (MHPS), 山田 和豊 (岩手大)

IGTC2019実行委員会 ○西澤 敏雄 (JAXA), 太田 有 (早大), 北山 和弘 (東芝エネルギーシステムズ), 齊藤 大蔵 (東芝エネルギーシステムズ), 渋谷 直紀 (東芝), 鈴木 正也 (JAXA), 塚原 章友 (MHPS), 寺本 進 (東大), 仲俣 千由紀 (IHI), 中村 恵子 (IHI), 牧田 光正 (JAXA), 安田 聡 (MHPS), 山根 敬 (JAXA), 吉田 征二 (JAXA)

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と思えること」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，家族的雰囲気ですら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（2018年3月現在）

会員数：2,057名（正会員 1,993名，学生会員 64名） 賛助会員：113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

日本ガスタービン学会

Gas Turbine Society of Japan

〒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

編集 後記

皆さんあけましておめでとうございます。残すところ数か月となった平成最後のお正月はいかがお過ごしでしたでしょうか。

昨年、平成30年もいろいろなことが起きた年だったと思います。今年の漢字に「災」が選ばれるほど、これまで考えられなかったような自然災害を経験し、今後発生するであろう、さらに大きな災害に備える必要があることを痛感させられました。振り返ってみると、昨年は平成を象徴する年だったかもしれません。30年余りの平成は日本の元号では歴代4番目の長さとなるそうですが、この間、日本では戦争も無くその意味では平和な時代でした。一方で多くの地震や津波、豪雨など多くの自然災害を経験しました。そのなかでも東日本大震災は、原子力発電の安全性に対する認識を根本的に覆すきっかけとなり、日本のみならず世界の電力バランスのありかたに強いインパクトを与えました。

一方、地球温暖化については、昨年末にCOP24がポーランドで開催されましたが、日本のメディアにはあまり大きく取り上げられなかったように思います。パリ協定の具体的な進め方について一歩前進したと思いますが、中国に次ぐ世界第2位の二酸化炭素排出国である米国が参加していないこともさることながら、わが国の存在感が希薄なばかりか、むしろ消極的な印象を世界に与えているように見えるのはちょっと残念でした。

太陽光や風力などの再生可能エネルギーの発電コストは、過去の予測を大幅に上回るペースで低下していて、二酸化炭素排出の問題を抜きにしても商業的に十分な競争力を得つつあり、世界的にも原子力や火力に代わって今後これらが電力のベースロードになる世界が現実となってきています。そんな中で今回は「高負荷変動対応」を特集にとりあげました。今現実化している再生可能エネルギーに大きく依存の電力システムは、需給バランスや系統の安定性の観点からは多くの問題が発生します。負荷変動への対応力の高いガスタービンを中心とした火力発電に対する期待は非常に高く、巻頭言で渡辺先

生にもご指摘いただいたように、NEDOプロジェクトも具体的なフェーズに移行するところで、タイムリーな企画と考えたのですが、タイムリー過ぎてこのタイミングでは公表できない内容もあって当初企画案の全てを盛り込むことができなかったのは残念だったのですが、執筆いただいた方々のご努力によって、読み応えのある記事を揃えることができたと思います。お忙しい中ご執筆いただきました皆様には深く感謝申し上げます。

これからの電力システムを支えるこの技術で日本の存在感をアピールできればと思います。関係される方のご活躍を祈念するとともに、会員の皆様のご支援、ご協力もよろしくお願い申し上げます。（新関 良樹）

● 1月号アソシエイトエディター

新関 良樹（徳島文理大学）

● 1月号担当委員

金子 雅直（東京電機大学）

渋谷 直紀（東芝エネルギーシステムズ）

北條 正弘（宇宙航空研究開発機構）

森澤 優一（東芝エネルギーシステムズ）

（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。

- ・「負荷変動に対応するMHPSのガスタービン技術」…………… (P.14～20)
- ・「再生可能エネルギー増大に向けたシーメンスガスタービンの対応」…………… (P.21～26)
- ・「航空転用型ガスタービンによる対応の現状」…………… (P.27～32)
- ・「高速負荷応答性を備えた高効率中小型ガスタービンの開発」…………… (P.33～37)

だより

♣事務局



新年あけましておめでとうございます。平成最後の年明けを皆様どのように迎えられましたでしょうか。私は、年の瀬に家族が緊急入院し、あわただしい年末ではありましたが、元気になってお正月を迎えることができたことに感謝しつつ、健康のありがたみを実感した年明けでした。今は、先送りしてしまった大掃除をどうしようかと悩んでおります・・・。

平成の時代もいよいよ残り3か月余りとなってしまいましたね。テレビではこの30年間を振り返る特番なども目にするようになりました。世界的には西暦が標準ですが、日本では元号でその時代の世相や自分の人生を振り返ることができますよね。昭和生まれの私としては、平成の時代になってからの出来事は、つい最近のこと、という感覚ですが、世の中は着々と進歩しています。この

先、新しい時代が来たときに、昭和の古い考え方と言われないよう、自分自身のアンテナをいつもしっかり磨いておきたいと思っています。

さて2018年度の学会行事も、間もなく開催されるガスタービンセミナーを残すのみとなりました。今年度は、学会史上まれにみる行事の多い1年で、息切れしそうな時期もありましたが、関係者の皆様のご協力と事務局全員のチームワークで、なんとかここまで乗り切ることができました。無事に年度末を迎えたら、事務局みんなで何か美味しいものでも食べに行きたいな、と画策中です。そして、今年はいよいよ4年に一度の国際会議、IGTC2019の開催年であります。GTSJにとってのオリンピックイヤー、2019年もどうぞよろしくお願いいたします。（山本 由香）

学会誌編集および発行要領（抜粋）

2018年7月13日改定

1. 本会誌の原稿はつぎの3区分とする。
 - A. 依頼原稿：学会誌編集委員会（以下、編集委員会）がテーマを定めて特定の人に執筆を依頼する原稿。執筆者は本学会会員（以下、会員）外でもよい。
 - B. 投稿原稿：会員から自由に随時投稿される原稿。執筆者は会員に限る。
 - C. 学会原稿：本学会の運営・活動に関する記事（報告、会告等）および会員による調査・研究活動の成果等の報告。
- 1.2. 技術論文の投稿については、「技術論文投稿要領」による。
- 1.3. 英文技術論文の投稿については、Instruction to Authors, JGPP (International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems) による。
2. 依頼原稿および投稿原稿は、論説・解説、講義、技術論文、寄書（研究だより、見聞記、新製品・新設備紹介）、随筆、書評、情報欄記事の掲載欄に掲載することとし、刷り上がりページ数は原則として以下のとおりとする。

論説・解説、講義	6ページ以内
技術論文	「技術論文投稿要領」による
寄書、随筆	3ページ以内
書評	1ページ以内
情報欄記事	1/2ページ以内
3. 原稿の執筆者は、本会誌の「学会誌原稿執筆要領」に従って原稿を執筆し、編集委員会事務局（以下、編集事務局）まで原稿を提出する。編集事務局の所在は付記1に示す。
4. 依頼原稿は、編集委員会の担当委員が、原稿の構成、理解の容易さ等の観点および図表や参考文献の書式の観点から査読を行う。編集事務局は査読結果に基づいて、執筆者への照会、修正依頼を行う。
5. 投稿原稿のうち技術論文以外のものは、編集委員会が審査し、本会誌への掲載可否を決定する。
6. 投稿原稿のうち技術論文の審査、掲載については、「技術論文投稿要領」に従う。
7. 依頼原稿の執筆者には、学会事務局から原則として「学会誌の執筆謝礼に関する内規」第2条に定めた謝礼を贈呈する。
8. 非会員の第一著者には掲載号学会誌1部を贈呈する。
9. 本会誌に掲載された著作物の著作権は原則として本学会に帰属する。本学会での著作権の取扱いについては別途定める「日本ガスタービン学会著作権規程」による。
10. 他者論文から引用を行う場合、本会誌に掲載するために必要な事務処理及び費用分担は著者に負うところとする。

付記1 原稿提出先および原稿執筆要領請求先（編集事務局）
 ニッセイエブロー(株) 企画制作部
 学会誌担当：高橋 邦和
 〒105-0003 東京都港区西新橋1-18-17 明産西新橋ビル 6F
 TEL：03-5157-1277
 FAX：03-5157-1273
 E-mail：eblo_h3@eblo.co.jp

技術論文投稿要領（抜粋）

2018年7月13日改定

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

日本ガスタービン学会誌
Vol.47 No.1 2019.1

発行日 2019年1月18日
 発行所 公益社団法人日本ガスタービン学会
 編集者 辻田 星歩
 発行者 油谷 好浩
 〒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 ニッセイエブロー(株)
 〒105-0003 東京都港区西新橋1-18-17
 明産西新橋ビル 6F
 Tel. 03-5157-1277 Fax. 03-5157-1273

©2019, 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より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製権センター（一般社団法人学術著作権協会が社内利用目的の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2F
 TEL：03-3475-5618 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。