

特集：至近の火力電源の運用・建設状況と将来火力発電技術の展望

至近の火力電源の運用・建設状況と将来火力発電技術の展望

Current Status of Operation and Construction of Thermal Power Plants and Future Prospects for Thermal Power Generation Technology



原 三郎^{*1}
HARA Saburo

火力発電は、日本の電力安定供給を支える主要電源として重要な役割を果たしてきている。同時に、地球温暖化対策のため、火力発電からのCO₂排出削減を目指した技術開発も着実に進められてきた。しかしながら、国の動きとして、昨年、今年と「2050年カーボンニュートラル（CN）」、「2030年度の温室効果ガス排出削減目標46%（2013年度比）」が表明されるなど、火力発電を取り巻く状況は、急速かつ大きく変化している。第6次エネルギー基本計画（案）で示された2030年度の電源構成では、天然ガス火力が20%程度、石炭火力が19%程度と一定の比率は維持されているが、再生可能エネルギーは36～38%（第5次エネルギー基本計画では22～24%）まで増加、さらに新たに水素・アンモニア発電が1%と示されている。

2030年度の電源構成や温室効果ガス排出削減目標、2050年CNに向けて火力発電に対しては、一層のCO₂排出削減を進めながら、再生可能エネルギー大量導入時の電力安定供給、系統安定化を支えるための調整力、慣性力としての役割が求められる。

火力発電からのCO₂排出削減は、これまで高効率化を中心に取り組まれてきたが、ガス火力の主力となるGTCCでは、ガスタービンの高温化を軸とする技術開発により着実に効率向上を果たしている。また、化石燃料の中では天然ガスよりもCO₂排出で不利となる石炭においても、蒸気条件の向上により微粉炭火力の熱効率の世界トップクラスであり、より高効率な石炭火力として、GTCC技術を活用した石炭ガス化複合発電（IGCC）についても、すでに商用段階にある。

これら我が国が保有する優れた高効率火力発電技術を基軸とし、今後さらなるCO₂排出削減を実現していくことになるが、その一方策として水素利用がある。液化水素に加え、アンモニアやメチルシクロヘキサンをキャリアとし、再水素化して利用するケースが考えられてお

り、混焼利用により初期導入が図られ、並行して専焼利用に向けた技術開発が進められよう。アンモニアに関しては、再水素化することなく直接利用することも可能である。微粉炭火力ではアンモニア直接利用による混焼技術は実証段階にきており、GTCCにおいてもアンモニア直接利用に対する技術開発が進んでいる。アンモニア直接利用の場合は、アンモニアに含まれるN分に起因するNO_x排出量の増大が懸念されるため、いかにNO_x排出を低減できるかが重要な開発項目となる。水素やアンモニアの利用を実現するには、いわゆるグリーンもしくはブルー水素／アンモニアが経済性を持ち、安全かつ安定して供給されなければならない。燃料として利用する発電部分だけではなく、製造・輸送・貯蔵に対する技術確立が必要不可欠であることは言うまでもない。

これに加え、回収CO₂の貯留だけではなく、有効利用も含めたCCUS／カーボンリサイクルが重要な技術として位置付けられる。発電分野におけるCO₂分離回収については、主として石炭火力を対象に技術開発が行われてきたが、GTCCへのCO₂分離回収技術の適用も必要となる可能性を考慮しなければならない。

再生可能エネルギー大量導入のためには、これら「高効率化」、「水素／アンモニア利用」、「CCUS／カーボンリサイクル」等の複数の技術オプションを組み合わせることでCO₂排出が削減された火力発電により、再生可能エネルギーの出力変動に対する需給調整力や周波数調整力を確保することが必要不可欠となる。

本特集では、GTCCに関する最新の状況や水素／アンモニア利用等今後の展開、IGCCも含めたCO₂分離回収技術、電力システムに関する現状と展望、優れた調整力を持つ航空機転用ガスタービン、熱電需要の変化に追従するコンバインドコージェネ等、重要な技術を広範囲にご紹介いただいている。火力発電の現状と展望に対する理解を深め、将来のエネルギー社会に適合する火力発電として進化させるために非常に有益なものであり、ご執筆いただいた方々に深く敬意を表する。

原稿受付 2021年10月4日

*1 （一財）電力中央研究所
エネルギー・トランスフォーメーション研究本部
〒240-0196 横須賀市長坂2-6-1
E-mail: hara@criepi.denken.or.jp

特集：至近の火力電源の運用・建設状況と将来火力発電技術の展望

至近におけるGTCCの運用状況と耐力向上に向けた取り組みについて About GTCC Operation Status and Efforts to Improve Proof Stress



小山 一直^{*1} 鎌田 嘉尚^{*1} 松村 龍志^{*2}
OYAMA Kazunao KAMATA Yoshinao MATSUMURA Ryushi

キーワード：ガスタービン，コンバインドサイクル，再生可能エネルギー，運用性，レジリエンス

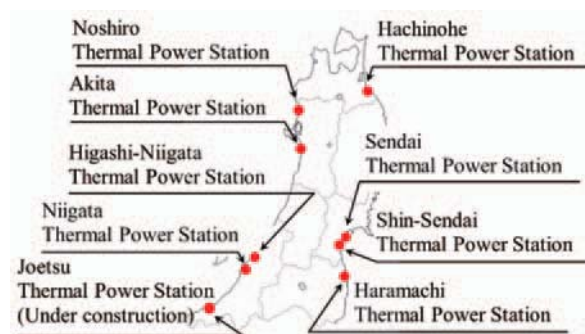
Key Words：Gas Turbine, Combined Cycle, Renewable Energy, Usability, Resilience

1. 緒言

世界的な脱炭素化社会の実現に向けて，太陽光発電（Photovoltaic power，以下PVと称す）等の再生可能エネルギーの導入量が大幅に増加している。再生可能エネルギーは，日照や風況等の気象要因により，日々・時々の出力変動が大きい特徴があることから，再生可能エネルギー導入拡大に対応した電力系統の同時同量達成のため，ガスタービンコンバインドサイクル（以下，GTCCと称す）等火力発電ユニットでの出力調整が必要であり，給電運用性の更なる向上が重要となっている。

また，当社火力電源が設置（Fig. 1）されている東北エリアは，2011年3月の東日本大震災，2021年2月の福島県沖地震によって，GTCC等火力発電ユニットの長期離脱が余儀なくされた。電力の安定供給のため，自然災害に対する設備耐力の強化が重要となっている。

本稿では，足元での再生可能エネルギー導入拡大に伴う東北電力㈱のGTCCユニットにおける給電運用性向上施策の紹介と共に，電力安定供給のため，東北エリアで経験した地震津波等の自然災害に対する設備耐力向上施策や降雪量の多い東北・新潟エリア特有の設備対策について紹介する。



Thermal Power Station (GTCC unit)	Output
Hachinohe No.5	416MW
Sendai No.4	468MW
Shin-Sendai No.3 train	1,046MW
Higashi-Niigata No.3 train	1,210MW
Higashi-Niigata No.4 train	1,750MW
Niigata No.5train	109MW
Joetsu No.1	572MW

Fig. 1 Placement of thermal power station

2. GTCCユニットの運用性向上の必要性について

2.1 再生可能エネルギー導入拡大に伴うGTCCの役割

時々刻々と変化する電力需給バランスを保つためには，PV等の再生可能エネルギーによる発電量の増減に対応して，火力発電ユニットの出力を調整する必要がある（Fig. 2）。昼間帯の日照状況によるPV出力の急峻な立上り，立下りをはじめ，再生可能エネルギー導入量の更なる拡大に伴う需給状況変化について，瞬動的な出力調整が可能な火力発電ユニット（主にGTCC）の重要性が増している。また，再生可能エネルギー導入拡大に伴い，電力需要量によっては，供給力の大部分が再生可能エネルギー発電量により占められ，電力系統運用上，火力発電ユニットを最低出力運転もしくは停止させる必要

原稿受付 2021年9月28日

- * 1 東北電力㈱ 発電・販売カンパニー 火力部（火力建設）
〒980-8550 仙台市青葉区本町一丁目7番1号
E-mail: oyama.kazunao.yn@tohoku-epco.co.jp
- * 2 東北電力㈱ 発電・販売カンパニー 火力部（火力運営）
〒980-8550 仙台市青葉区本町一丁目7番1号
E-mail: matsumura.ryushi.fp@tohoku-epco.co.jp

が生じる。一方で、PV出力が無くなる夜間においては、火力発電ユニットでの発電量が大部分を占めることから、当社では昼間・夜間における電力需要状況に対応すべく、起動・停止特性に優れたGTCCユニットにて、下記の運用性向上施策の更なる強化に取り組んでいる。

- i) 高頻度発停止運用
- ii) 最低出力低減
- iii) 出力変化率向上

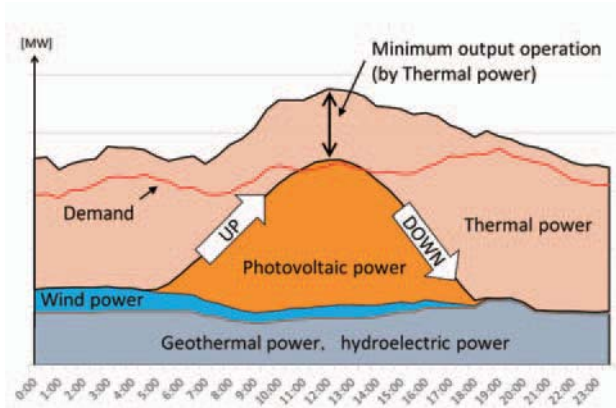


Fig. 2 Supply and demand structure

2.2 高頻度発停止運用による対応

昼間および夜間の電力需要状況に対応するため、主に出力追従性・起動停止特性に優れたGTCCユニットにて高頻度発停止（以下、DSSと称す）運用が行われており、電力需要が少ない時間に発電設備を停止し、需要ピークに合わせて起動している。設備起動にあたっては、通気時の蒸気タービン（以下、STと称す。）第一段内面メタル温度から起動モードが決定され、起動時間が短い順に「ベリーホット<ホット<ウォーム<コールド」のモードがある。再生可能エネルギー出力変動等の突発的な需給状況変化に応じて、柔軟な給電運用が可能となるよう、DSS時の起動時間短縮等の取り組みについて紹介する。

2.2.1 DSS運用のバリエーション 一般的には、電力需要ピークに対応するため、DSS運用について下記のバリエーションによって対応をしている。(Fig. 3)

1) ロングDSS

夕方から夜の電力需要ピーク後に発電設備を停止し、翌日午後の需要増加に合わせて起動する。停止時間は15～17時間程度であり、ウォーム～ホットモードでの起動となる。

2) 夜間帯DSS

夕方から夜の電力需要ピーク後に発電設備を停止し、翌日朝の需要増加に合わせて起動する。停止時間は8時間程度であり、ホットモードでの起動となる。

3) 昼間帯DSS

朝、PV出力の立上りに合わせて、発電設備を停止し、同日午後の需要増加に合わせて起動する。停止時間は4～8時間程度であり、ホットモードでの起動となる。

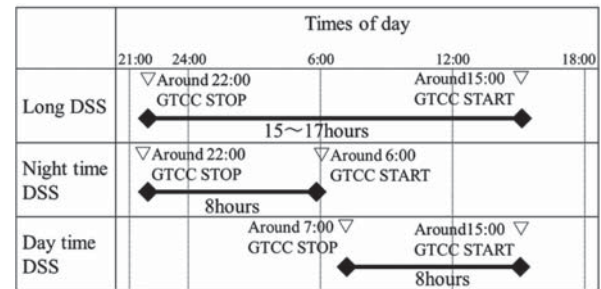


Fig. 3 Variation of DSS

2.2.2 八戸火力5号機における運用性向上施策 八戸火力5号機（GT×1台、ST×1台の別軸ユニットで構成）における運用性向上施策を紹介する。

本ユニットでは、過去のホット、ウォームでのDSS実績を踏まえ、更なる給電運用性向上のため、起動時間の短いホットモードの適用範囲を拡大する目的で、DSSにおける起動時間短縮確認試験を実施した。

STメタル温度の低下傾向、ST伸び差等の状況を詳細に分析し、ユニット停止時間に応じた起動モードを再設定することで、ホットモードの適用範囲を拡大した。

本試験によって、DSS運用時のロングDSSについて、従来ウォームモードでの起動としていた運用をホットモードとすることで、起動時間の短縮が図れ、突発的な需給変動に対して柔軟な給電運用が可能になると見込まれる（Table 1）。

今後は、実給電運用の中で設備健全性の確認を進める計画である。

Table 1 Hachinohe No.5 start up mode/stop time

Start up mode	Stop time	
	Before	After
Hot	～ 10h	～ 19h
Warm	10 ～ 16h	19 ～ 24h

2.2.3 東新潟火力4-1号系列における運用性向上施策 東新潟火力4号系列（GT×2台、ST×1台の多軸ユニットが4-1号系列、4-2号系列の2系列で構成）における4-1号系列の運用性向上施策を紹介する。

4-1号系列は、1999年営業運転開始以降、高効率ユニットとしてベースロード運用をしてきた。2019年に東日本大震災の際に供給力確保のため設置した緊急設置電源を廃止したことから、4-1号系列の更なる給電運用性の向上や廃止設備の有効活用等を目的に、緊急設置電源のGTを4-1号系列に転用する大規模工事（以下、GT転用工事と称す）を2020年に行った。

GT転用工事によって、4-1号系列は出力が826MWから877.9MWへ増加した。また、GT転用工事前の設備でDSS運用を行うためには、GT停止後の車室上下メタル温度差によるキャットバック変形や、GT排気室等の熱応力低減対策が必要であったが、それらの対策がなさ

れたGTを転用することにより、DSS運用が可能となった (Table 2)。

起動時間については、旧GTは燃焼器に蒸気冷却方式を採用しており、起動時に燃焼器へ供給する蒸気系統を予め加温する必要があった。しかし、転用GTの燃焼器は空気冷却方式であることから、蒸気での加温時間が不要となり、起動時間の短縮が可能となっている (Table 3)。

DSS実績 (2021年3月末) としては、転用工事後のDSS運用開始以降約1ヶ月で11回実施しており、今後、需要に対して再生可能エネルギー出力が大部分を占める時期においては、更なるDSS運用の増加が見込まれる。

Table 2 Higashi-Niigata No.4-1 specifications

	Before	After
Gas turbine	275MW×2	<u>298.8MW×2</u>
Steam turbine	276MW	<u>280.3MW</u>
Combined	826MW	<u>877.9MW</u>
DSS	×	○

Table 3 Higashi-Niigata No.4-1train startup time

Start up mode	Start up time(After)
Hot	<u>-55min</u>
Warm	<u>-75min</u>
Cold	<u>-80min</u>

2.3 最低出力低減による対応

再生可能エネルギーの導入拡大に伴う火力電源の下げ代確保を目的とした最低出力低減の取組みを紹介する。

2.3.1 東新潟火力3号系列における運用性向上施策

東新潟火力3号系列 (GT×3台、ST×1台の多軸ユニットが3-1号系列、3-2号系列の2系列で構成) における運用性向上施策を紹介する。

最低出力低減に伴い、主蒸気温度が大幅に低下することから、ST翼のエロージョンや応力腐食割れが懸念されたため、警報点の追加等により監視を強化し、2017年より最低出力低減試運用 (Table 4) を開始した。また、主蒸気温度変化幅の拡大に伴い、熱応力によるST寿命消費の進行が懸念されたが、試運用期間中における実績を踏まえ、将来10年間の寿命消費量を試算したところ、想定した寿命消費以下であることが確認できた。その後、2018年、2019年の点検においてSTの健全性を確認し、2020年2月より本運用に移行している。

Table 4 Higashi-Niigata No.3train specifications

	Unit configuration	Minimum output	
		Before	After
Higashi-Niigata Thermal power station No.3train (No.3-1unit)	GT×3 ST×1	300MW	230MW
	GT×2 ST×1	200MW	140MW
	GT×1 ST×1	120MW	

※Same as No.3-2unit

2.4 出力上昇率向上による対応

再生可能エネルギーの急峻な出力変化に対応するため、出力応答性の高いGTCC発電設備において、出力上昇率向上に取り組んでいる。GTCCユニットでは、最低出力から排ガス温度制御 (以下、TCRと称す) までの出力変化時に、GT入口温度 (以下、TITと称す) のオーバーシュート防止のため、TCR近傍の出力変化率を抑制する運転をしている。給電運用の柔軟性を向上させることを目的とした、出力上昇率向上の取組みについて紹介する。

2.4.1 新仙台火力3号系列における運用性向上施策

新仙台火力3号系列 (GT×1台、ST×1台の1軸が2ユニットで構成) における運用性向上施策を紹介する。

上述の目標出力 (TCR) までの到達時間を短縮するため、TCR近傍の出力変化率を抑制するタイミングを調整する試験 (Fig. 4) を行った結果、TITオーバーシュートやNOx、各部温度の状況、燃焼振動に問題が無いことを確認できたことから、2020年度より試運用を行っている。

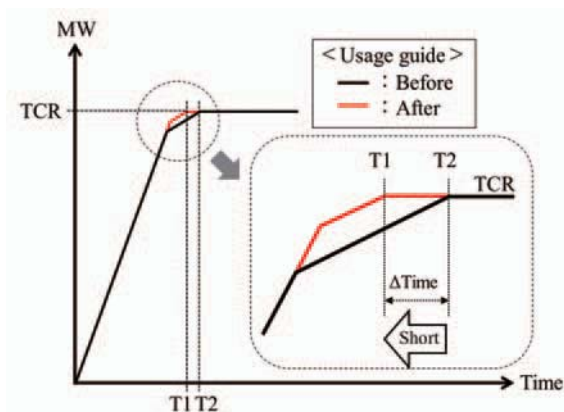


Fig. 4 Effect of output change test

2.5 運用性向上施策導入に伴う設備への影響

東北電力㈱では、各ユニットの経済的運用性を考慮した想定DSS回数を設定のうえ、GT高温部品寿命管理を行っている。今後DSSの多用により、GT等価運転時間の更なる進行が予測されるため、想定DSS回数の増加とGT高温部品の取替え周期の見直しを含めた経済性の再検討等が必要になる。

また、最低出力低減や出力変化率の向上によって、蒸気流量・温度等の変化が顕著になることから、STの寿命消費や付属機器・配管類への影響が懸念されるため、今後も引き続き、運転監視・傾向監視を行い、適切な設備保守を行っていく。

3. 自然災害等に対する設備対策について

3.1 地震への対応

東日本大震災前後で建設されたGTCC発電ユニットの耐震設計の考え方について紹介する。

「仙台火力発電所（宮城県七ヶ浜町）」、「新仙台火力発電所（宮城県仙台市）」は、共に宮城県東部に設置されており、発電所間は直線距離で約5kmの距離にある。

2011年3月に発生した東日本大震災（最大震度：7）では、両発電所共に地震、津波の被害を受け、仙台火力4号機はタービン軸振動大により自動停止し、GT本体サポートボルト損傷の他、屋外に設置されているダクト等の損傷が確認された。また、後にリプレース工事を行った新仙台火力は1号機が需給停止中であり、2号機はタービン軸振動大により手動停止した。

以降、両発電所の耐震設計の考え方を示す。仙台火力4号機（2010年7月運転開始）は、「火力発電所の耐震設計規程（以下、JEAC3605と称す）等」に準じて耐震設計をしている。一方で、東日本大震災以降に建設された新仙台火力3号系列（3-1号：2015年12月、3-2号：2016年7月運転開始）は、「JEAC3605等」と共に、東日本大震災時に新仙台火力発電所で観測された実際の地震動（最大0.53G）を元に耐震設計をしている。設計当初は、仙台火力4号機と同様に「JEAC3605等」に準じて設計していたが、東日本大震災での観測地震動が発電設備等の耐震設計値を上回ったことから、耐震性能の再確認が必要と判断し、耐震設計を見直した。

2021年2月に発生した福島県沖地震（最大震度：6強）では、仙台火力4号機はタービン軸振動大で自動停止に至り、GT本体等の損傷やGTエンクロージャー換気ファンの倒壊が認められた（Fig. 5）。大きな被害を受けたGTエンクロージャー換気ファンについては、同規模の地震が発生しても設備被害を最小化、早期の復旧が可能となるよう、機器支持構造の変更等の対策を行っている。

新仙台火力3号系列においては、福島県沖地震によりタービン軸振動大で自動停止したが、東日本大震災を踏まえた耐震強化によって設備被害を最小限にすることが出来たため、設備健全性を確認後、再起動し、約16時間後、戦列に復帰した。



Fig. 5 Damage situation in Sendai thermal power station

3.2 津波への対応

東日本大震災では、地震後の津波による設備損壊が多く確認された。Fig. 6に仙台火力での津波襲来状況を示す。



Fig. 6 Sendai Thermal power station tsunami situation

津波への対応は、各地点の地理的要因に応じた想定津波高さに対して、「人命保護を最優先とした対策」および「被害の最小化を主眼とする減災の考え方による対策」を講じている。被災経験を踏まえた津波対策として、新仙台火力3号系列および上越火力1号機での取組みを紹介する。

3.2.1 新仙台火力3号系列における対策 津波対策における想定津波高さは、東日本大震災の被害実績よりT.P. (Tokyo Peil：東京湾平均海面) +6.3m (G.L. (Ground Level：地盤面) +3.0m) としている。新仙台火力3号系列は、想定津波高さでも機器への津波直撃を回避すること等により、人命保護、設備被害の最小化と早期復旧を可能とし、災害に強い発電所をコンセプトとしている。

対策の策定にあたっては、3.11津波断層モデルを使用した漂流物シミュレーションにより、対策を検討・実施した。以下、代表例を示す。新仙台火力3号系列の基準レベル他は（Table 6）のとおり。

i) 人員の安全確保

避難場所、避難経路の確保のため、3階建て以上の建物に屋外非常階段等を設置した。

例：サービスビル、LNG栈橋管理棟、LNG電気制御盤室

ii) プラント安全停止手段の確保

非常用電源系統等は、想定津波が襲来しても確実に機能を維持できるように津波で浸水しない配置とした。

例：潤滑油ポンプ、電動機類が2階面以上となるよう主油タンク基礎を嵩上げ

iii) 設備被害の最小化

機械・電気設備への津波直撃は防潮堤、建屋等により防護、受電設備は津波で浸水しない高さに配置した。

例：主要電気・制御設備を原則タービン建屋2階以上（G.L.+7.8m）に配置（Fig. 7）、発電所海側へ防潮堤（G.L.+3.3m）、土堰堤（G.L.+5m）を配置、開閉所設備は据付面を嵩上げ（G.L.+3.0m以上）（Fig. 8）

iv) 復旧資源の確保

専用非常用発電機により最低限の照明、情報通信機器などの機能を維持する。

例：屋外の電路をピット等で埋設、軽油タンクは津波の直撃を受けない高さ5mの土堰堤脇に配置、軽油ポンプは防潮堤（G.L.+3.0m）で包囲



Fig. 7 Important install equipment such as electrical equipment on the second floor and above



Fig. 8 Outdoor switchyard raised by 3m above the ground

3.2.2 上越火力1号機における対策 建設工事中である上越火力1号機（GT×1台、ST×1台の1軸ユニットで構成）の津波対策は、上越地点における既往最大津波および新潟県にて平成25年12月に公表された津波浸水想定を基に想定最大津波を設定、対策してきた。しかし

ながら、新潟県が平成29年11月に津波浸水想定を見直したことから、本見直しを基に上越火力発電所周辺の想定最大津波をT.P.+6.7m（G.L.+3.7m）とし、新仙台火力3号系列における思想を踏襲し、津波対策を検討した。新仙台火力3号系列との基準レベル他の比較を下記に示す（Table 5）。

Table 5 Comparison table of tsunami countermeasures between Shin-Sendai No.3train and Joetsu No.1

Power generation equipment (Commercial operation start date)	Shin-Sendai No.3train (No.3-1 : Dec,2015) (No.3-2 : July,2016)	Joetsu No.1 (Dec,2022)
Reference height	G.L.+0m = T.P.+3.3m	G.L.+0m = T.P.+3.0m
Assumed tsunami	G.L.+3.0m (T.P.+6.3m)	G.L.+3.7m (T.P.+6.7m)
Switchyard	Installed above G.L.+3.0m	G.L.+3.7m (T.P.+6.7m)
Recovery period	6 months	6 months
Tide protection measures	Seawall (G.L.+3.3m) Soil dam (G.L.+5m)	Planting around the equipment
Recovery resource measures	Equipment layout for water tanks and light oil tanks to avoid direct hits by tsunami	Water tanks and light oil tanks are planted to prevent damage from drifting objects

i) 人員の安全確保

発電所構内にいる人員の津波からの確実な避難を目的に対策を検討した。

例：取水口エリアの避難場所となる循環水ポンプ室レベルをG.L.+1.0mからG.L.+3.7mに変更

ii) プラント安全停止手段の確保

津波被災による機能停止により、プラントの安全停止が困難となり、復旧期間を長期化させる可能性がある設備について対策を検討した。

例：1階に設置されている油ポンプの嵩上げを実施。（G.L.+3.7m）

iii) 設備被害の最小化

新仙台3号系列と同様に被災後の早期復旧を可能とするため、設備被害の最小化を図ることを目的に対策を検討した。

例：GISの据付面をG.L.+0.3m からG.L.+3.7m以上に嵩上げ

iv) 復旧資源の確保

早期復旧のために必要な復旧資源（電源、水および燃料）を確保するための対策を検討した。

例：水タンクと軽油タンク周辺への植栽

3.3 降雪・着雪への対応

GTCC発電設備における降雪・着雪対策として、GT吸気系統への対策について紹介する。

3.3.1 新潟火力5号系列における対策 新潟火力5号系列（GT×1台、ST×1台の1軸が2ユニットで構成）は、GT・ST・発電機がコンパートメントにてパッケージ化された屋外設備となっており（Fig. 9）、GT吸気フィルタは屋外より直接吸気する仕様となっている。

2011年7月営業運転開始後、同年冬季運転中において、多量の雪が吸気フィルタ全面に着雪し差圧大警報を発報、応急対応として人力による吸気フィルタの除雪を行った経緯がある。

大雪等で人力による除雪が困難となった場合、吸気フィルタ差圧が上昇しパイパスダンパーが開となり、吸気フィルタを介さない空気がGT内部に流入することによって、空気中の粉塵がGT冷却空気孔を閉塞し損傷に至る恐れがあることから、冬季のプラント安定供給に万全を期すため、吸気フィルタの着雪対策を実施した。

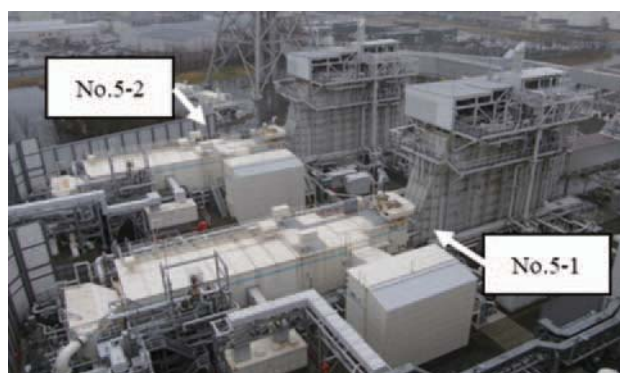


Fig. 9 View of Niigata No.5train

着雪対策は、当社GTCCユニットの実績と費用対効果から、吸気フィルタ上部および周囲を囲い、下部から吸気させる「GT吸気フィルタ周囲への雪囲い」の設置によって吸気装置への雪の直接の侵入を極力防止する対策とした（Fig. 10）。

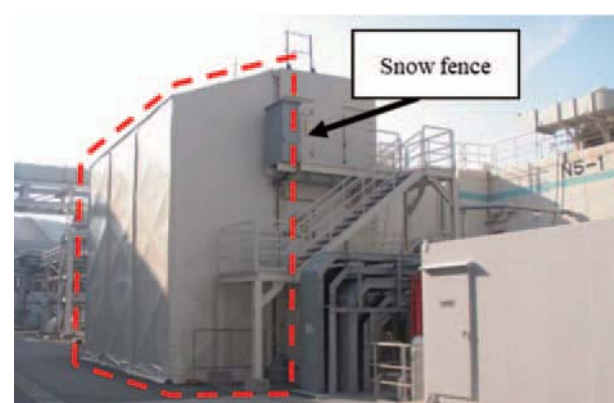


Fig. 10 GT intake filter snow fence

3.3.2 上越火力1号機における対策 上越火力1号機は当社火力発電所の中でも降雪量が多い新潟県の上越地域に建設中のプラントである。上越1号機の降雪対策は、前述の新潟5号系列や、同じ屋外吸気である仙台4号機および東新潟火力4号系列の屋内吸気の設備構成を基に検討した結果、費用対効果、当社GTCCの降雪対策の実績から、以下を組み合わせる対策とした（Fig. 11）。①防雪フード、②ウェザールーパー、③アンチアイシング装置。

これらの防雪設備は、降雪時にその効果を発揮し、着雪による吸気フィルターの目詰まりを防止することで、安定運転への寄与が期待される。

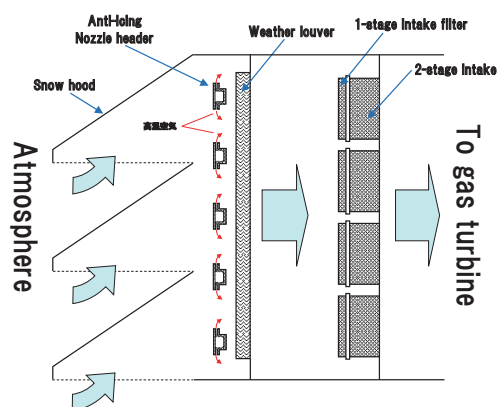


Fig. 11 Intake device configuration diagram

4. おわりに

本稿で紹介した取り組みは、GTCCが起動・停止特性、出力応答特性に優れることから、再生可能エネルギー導入拡大を踏まえた、更なる給電運用性の改善を目的に実施したものである。合わせて、今後展開されていく需給調整市場等での活躍の場拡大への寄与も期待されるため、引き続き、更なる運用性の改善検討を行っていく。

また、足元での需給バランスへの対応と共に、近年多発する異常気象や自然災害への対応として、これまでの被災経験を活かし、設備耐力の強化を図り、いかなる時にも安定供給が可能なよう対応を行っていく。

最後に、これら取り組みはプラントメーカーはじめ関係者の皆様の多大なる協力を得ながら着実に進めてきた経緯がある。この場をお借りして関係者の皆様へ感謝申し上げる。

特集：至近の火力電源の運用・建設状況と将来火力発電技術の展望

内陸型GTCCの建設と運用状況

Construction of the Inland Type GTCC & Operational Status



藤尾 明久^{*1}

FUJIO Akihisa



山本 晃^{*1}

YAMAMOTO Akira



木村 吉範^{*1}

KIMURA Yoshinori



荒川 勝仁^{*1}

ARAKAWA Katsuhito



秋山 勝哉^{*2}

AKIYAMA Katsuya



山極 伊知郎^{*3}

YAMAGIWA Ichiro

キーワード：内陸型発電所、ガスタービン、コンバインドサイクル、空気冷却式復水器

Key Words : Inland Type Power Station, Gas Turbine, Combined Cycle, Air Cooled Condenser

1. 緒言

2019年10月1日、栃木県真岡（もおか）市鬼怒ヶ丘、その丘陵地の工業団地において、(株)コベルコパワー真岡真岡発電所1号機が営業運転を開始した。日本初となる内陸に立地する大型ガス火力発電所の誕生であった。

発電所建設にあたっては、臨海部と異なる数多くの課題に直面した。これらの課題に対し、計画の初期段階から綿密な技術検討をおこなうとともに、建設上の課題についてはメーカーと連携して対策に取り組んだ。その結果、多くの難題に対し、過去に例のない手段も取りながら建設工事を進め、発電所を無事完成させることができた。

真岡発電所は、自然災害の多い日本において、エネルギーインフラ強靱化の観点から、臨海部に集中する電源のリスク分散にも貢献する貴重な電源と位置付けられる。

本発電所は、1号機に続いて2020年3月に営業運転入りした2号機を含め、現在2基体制で順調に操業を続けている。以下に建設経緯と発電所概要、主な技術課題と対応、運用状況について紹介する。

2. 建設経緯と発電所概要

2.1 建設経緯

当社は、長年培った自家発電所での知見を活かし、2002年より神戸発電所（総出力 140万kW）において電力供給事業を営んできた。そうしたなか、2011年3月11日に発生した東日本大震災により、臨海部に立地している多くの発電所が停止し、計画停電を余儀なくされた状況を目の当たりにした。そこで当社は、東日本地区に

において電力供給事業の可能性について検討を開始した。

まず、発電所の立地場所について、複数の候補地を検討した結果、当社真岡製造所に隣接した工業団地を建設用地に選んだ。この工業団地は、必要なインフラ（燃料供給、送電線）へのアクセスに恵まれていたためである。

Table 1 に現地調査から営業運転に至るまでの真岡発電所の建設に関わる主な経緯を示す。2011年の基礎調査では、送電線検討も含めて基本的なF/Sを進め、内陸立地に起因する課題を整理した。翌年東京本社にプロジェクトチームを編成し、各課題の明確化と掘り下げをおこない、発電所実現に向けて総合的な検討を開始した。

そして、2013年、環境アセスメントに着手し、翌年、東京ガス株式会社（以後東京ガスという）と電力供給契約を交わし、さらに建設計画を進めた。

地域の理解を得ながら、環境アセスメントを38ヶ月で完了させ、その後建設工事は、1号機営業運転まで40ヶ月、2号機営業運転まで45ヶ月で計画どおり完遂させた。

Table 1 History of Moka Power Station

2011/7	On-site investigation (Moka 5th Industrial Park)
	Basic study, starting F/S
2012/7	Project team established
2013/3	Environmental assessment started
2014/3	Basic agreement reached with TOKYO GAS Co., Ltd.
2014/4	Entered into EPC contract with Fuji Electric Co., Ltd.
2014/9	Power supply contract concluded with TOKYO GAS Co., Ltd.
2016/5	Environmental assessment completed (38 Months)
2016/6	Construction work started on site
2019/10	Commercial operation start of Unit 1
2020/3	Commercial operation start of Unit 2

2.2 発電所概要

真岡発電所は、東京ガスから都市ガスの供給を受け、最新鋭のガスタービン・コンバインドサイクル（以下

原稿受付 2021年9月10日

*1 (株)神戸製鋼所 電力事業部門 真岡発電所
〒321-4367 真岡市鬼怒ヶ丘1丁目12番1

*2 (株)神戸製鋼所 事業開発部
〒141-8688 品川区北品川5丁目9番12

*3 (株)神戸製鋼所 神戸総合技術研究所 機械研究所
〒651-2271 神戸市西区高塚台1丁目5番5

GTCCという) 発電方式によって、総出力約125万kW (624MW×2基) の発電をおこなう。発電端効率は、蒸気タービン系の復水器に空気冷却方式を採用しているものの、60%以上 (LHV) で、国内最高レベルを有する。発電した電力は、全量を東京ガスへ供給している。

Fig. 1 に発電所全景、Fig. 2 に発電所の主要施設および設備レイアウトを示す。発電所総面積は、約9万㎡である。



Fig. 1 Landscape of Moka Power Station (north side)

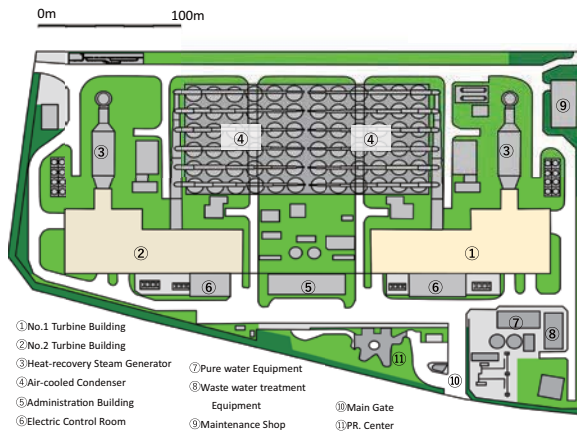


Fig. 2 Layout of main facilities and equipment

真岡発電所の特徴は、ガスタービン発電機と蒸気タービン発電機をそれぞれ個別に持つ2軸 (別軸) GTCCと、大型の空気冷却式復水器 (Air-Cooled Condenser, 以下ACCという) を有する設備構成としていることである。

また、真岡発電所は内陸立地であることから、電源の分散化による電力インフラの強靱化に資する事業として、2015年に、内閣官房と関東経済産業局から、それぞれ「国土強靱化」と「エネルギー基盤強靱化」の民間取組事例に選定され、社会的意義の深い発電所であるといえる。

2.2.1 主要設備 真岡発電所では、EPC請負契約を富士電機株式会社 (以下富士電機という) と締結した。ガスタービンは、ドイツ SIEMENS ENERGY社の高効率モデルSGT5-8000Hを国内で初めて採用した。Fig. 3にそのガスタービン構造を示す。

Fig. 4 にガスタービン建屋内状況を示す。ガスタービンと発電機はともに1階フロア基礎上に設置している。設備選定の2014年時点では、当ガスタービンは商用機と

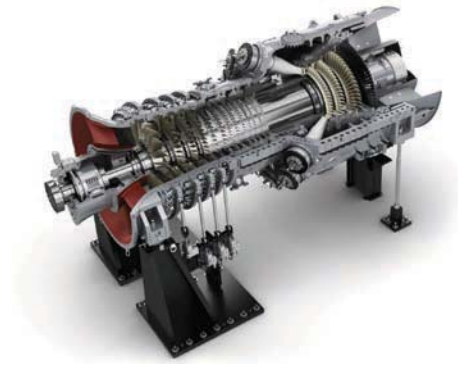


Fig. 3 Gas turbine

して、発電効率でギネス記録を持つ機種であった。当社として、性能を含め経済性など総合評価し、採用した。

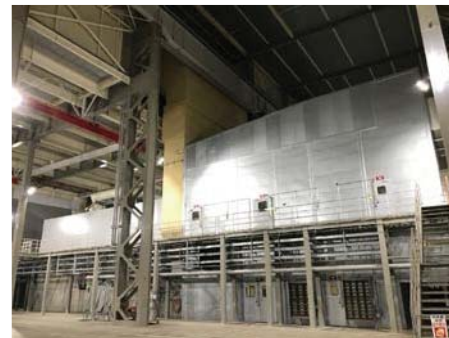


Fig. 4 Inside-scape of No.1 gas turbine building
「Gas turbine enclosure (right side),
Generator case (left side)」

Fig. 5 に排熱回収ボイラーを示す。排熱回収ボイラーは、韓国 BHI社製でアンモニア吹き込みによる脱硝装置を備え、ガスタービンの低NO_x燃焼器との組み合わせにより、NO_x濃度5 ppm (O₂=16%換算値) 以下での安定運転ができています。

蒸気タービンは、富士電機製であり、タービン本体は発電機と共に1階フロア基礎上に設置している。

Fig. 6 に蒸気タービン建屋内状況を示す。写真左側に



Fig. 5 Heat recovery steam generator

見える水平ダクトが蒸気タービン出側の排気蒸気ダクトであり、後段のACC入側の分岐管位置まで約8mの大口径としている。



Fig. 6 Inside-scape of No.1 steam turbine building
「Exhaust steam duct (left side), Generator case (right side)」

Fig. 7 にACCの全景を示す。今回、蒸気タービン系統の復水冷却方式としては、工業用水である地下水の制約より、水冷方式がとれず、ドイツ ENEXIO社製のACCを採用した。ACCは、地上27～41mの位置にファンと熱交換器を多数組み合わせた大型構造物となっている。

蒸気タービンからの排気蒸気は、ACC東側または西側の大口径ダクトを経て、その後6列に分配され、ACC上方から各熱交換セルに送られる。ACCにおける排気蒸気系統は、各号機ごとに独立しているが、ACCとしては1、2号機間デッキを連結し、外観上一体構造物の設備としている。ACC全体サイズは、高さ約41m×横幅約190m×奥行約90mで、所内で最も大きい構造物である。



Fig. 7 Landscape of Air-Cooled Condenser (ACC)

Fig. 8 に建設中の1号ACCを示す。ACC構造としては、ファン上部に熱交換器を両側から斜め山形に突合せ接続したAフレーム型である。ファンのブレードはFRP製で、6枚羽根根としている。

ACCは、セル毎にファンと熱交換器を持つ構造となっており、各セルは仕切られ、他セルからの空気の流入は

ない。真岡発電所のACCは、ユニットあたり36セルで、1、2号機合わせて72セルの集合体としている。



Fig. 8 No.1 ACC under construction

Fig. 9 にACC熱交換器のフィン部を示す。熱交換器としては、フィンチューブ型で、蒸気は長方形断面のジャケット内を流れ、空気はジャケット間のフィン部を流れる。蒸気側流路のジャケット材質は鉄で、空気流路側のフィンはアルミニウムを採用している。

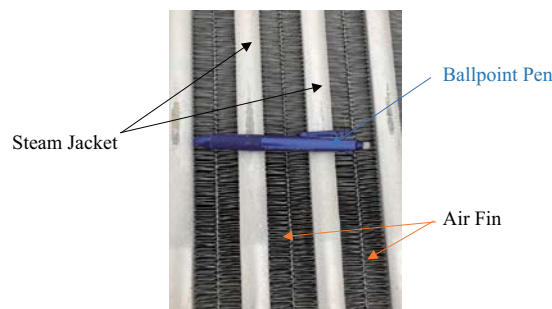


Fig. 9 Heat exchanger parts of ACC

Fig. 10 にガスタービン用変圧器を示す。2軸GTCCに対応して4台の発電機があるが、各系統変圧器はすべて発電所北側の住宅に近い場所に配置することから、騒音対策として壁で囲んだ構造としている。変圧器本体は、富士電機製で、相分離母線は、チェコ EGE社製を採用した。



Fig. 10 Gas turbine transformer

3. 発電所実現に向けた課題と対応

発電所検討に伴い、内陸立地に起因するさまざまな課題に直面した。これらの課題は、1) 環境と設備性能に関わるもの、2) 建設工事に関わるものに大別される。

前者の環境と設備性能に関わる課題としては、①ACC温風影響予測と対策、②騒音影響予測と対策であった。

また、後者の建設工事に関わる課題としては、①各機材・装置搬送方法と効率良い現地工事、②搬送不可能な大型機器の現地製作であった。以下に要点を記載する。

3.1 環境と設備性能に関わる課題と対応

真岡発電所は、敷地が9万m²で広いとは言えないうえに、工業団地北端エリアに位置し、敷地北側には住居地区が隣接する。このため、計画当初より特に環境上の課題に対しては、十分な配慮をして詳細な検討をおこなった。

また、今回、蒸気タービン系復水器においては、水冷方式で無く空気冷却式を採用した。そのため発電所周辺へのACC温風影響予測や騒音影響予測をおこない、住居地域への環境負荷を定量化しながら計画検討を進めた。

これらの課題解決のために、設備計画の早い段階から、3次元熱流動解析および3次元騒音解析を実施した。まず、プロジェクトチームにより、発電所の1/500 立体紙モデルを作成し、各設備と建屋の基本配置を3次元イメージで検討した。その後、当社機械研究所にて3次元解析モデルを作成・活用し、各種影響予測をおこなった。

このように、自社で計画の初期段階から詳細に各種検討をおこなったことにより、早期に最適な設備配置等仕様を確定し、プロジェクトを円滑に進めることができた。以下に検討事例を紹介する。

3.1.1 ACC温風影響予測と対策 ACCでは、熱交換に使用された空気は、周辺大気よりも温度の高い温風となってACC上部から排出される。

このACC温風影響を評価するにあたり、真岡市における過去の気象データや環境アセスメントの現況調査結果を参考とした。当社研究所にて3次元熱流動解析モデルを用いて、多種の風向、風速、気温など各種条件にてシミュレーションをおこない、住宅地側への影響を予測した。

解析結果の一例として、南風10m/s時のACC東西中心位置での南北断面における温度分布図をFig. 11に、空気流れの速度ベクトル図をFig. 12に示す。温度分布図における表示温度レンジは、2℃としている。

各種解析結果から、より強い南風時でも後流の北側住居地域の地上へ与える影響は軽微であることが確認できた。なお、当解析では、乱流モデルとして、k- κ - ω モデル及びk- ϵ モデルを用いて流れ場の検証をおこなった。

また、本稿では示していないが、西風と東風の場合、ACC東西方向の後流側では温風再循環量が増加し、熱交換量が低下する。そこで、その温風再循環量をミニマム化するために、ACCと北側のタービン建屋および将

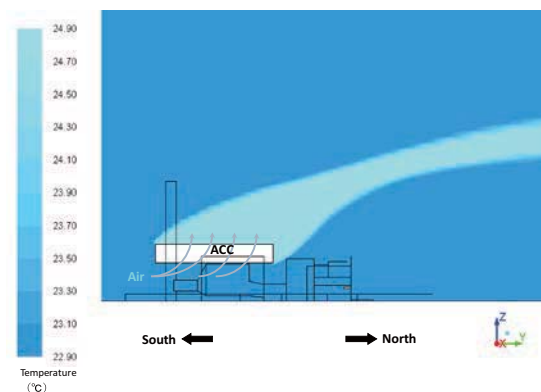


Fig. 11 Cross-sectional temperature distribution by CFD

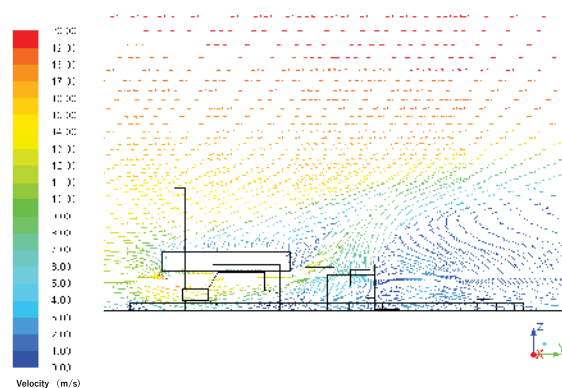


Fig. 12 Velocity vector diagram of air flow by CFD

来建設可能性のある南側隣接地の仮想の他社工場建屋との相対位置も変化させて、各種予測をおこなった。結果、西風、東風の場合でも温風再循環量が少なく、熱交換性能低下が最小となるように敷地内でACC配置を最適化できた。

3.1.2 騒音影響予測と対策 発電所北側の隣接住居地域に対し、特に騒音対策は、万全を期す必要があった。当社機械研究所にて3次元騒音解析モデルを用いて、発電設備への騒音対策をはじめとして、建屋および防音壁、さらには設備仕様までも含めて検討をおこなった。

Fig. 13に3次元騒音解析結果の一例として、騒音対策後の地上1m高さにおける発電所周辺音圧レベルを示す。

このように、各種条件にて騒音シミュレーションを実

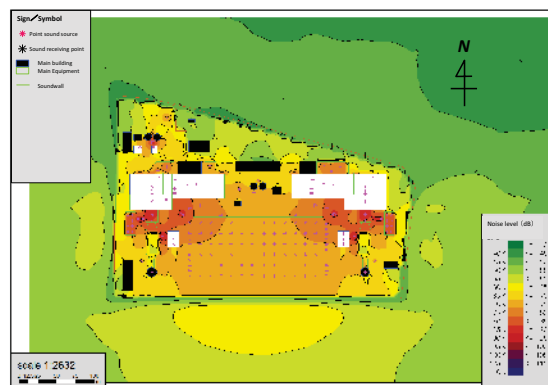


Fig. 13 Result example of three-dimensional noise analysis

施し、発電所北側の住宅地域に対して、環境保全の基準等の確保に支障がないよう検討を進めた。その解析結果をもとに、発電所主機への騒音対策をはじめ、設備仕様やタービン建屋形状、対応する音源機器の防音仕様、ACC等各種防音壁仕様を決定した。

なお、建屋や防音壁はデザインに統一感を持たせると同時に、近隣の景観とも調和するよう、栃木県の景観アドバイザー制度を利用し、アドバイザーの意見を参考にさせていただいた。Fig. 14 に地上から見た発電所の外観を示す。



Fig. 14 Landscape from the ground (northeast side)

3.2 建設工事に関わる課題と対応

当発電設備は、海外製作比率が高い。このため、海上輸送される資機材の多くは、茨城県日立港で荷揚げをおこない、真岡発電所建設地まで一般道にて約100kmの距離を内陸輸送する必要があった。大量の輸送品を如何に効率良く運ぶかという課題に加えて、①大型重量物を滞りなく確実に建設現場まで運び込む方法、②日本の道路交通法では搬送不可能なガスタービン用大型発電機をどのようにして発電所に設置するか、というかつて経験のない建設上の課題に直面した。

さらに、搬入し終えた資機材の保管や地組み場の確保、各装置部品等品質管理の徹底も大きな課題であった。

以下に主要な建設上の課題と対応について記載する。

3.2.1 内陸輸送 主要機器であるガスタービンや発電機、変圧器などは完成品の状態で輸送し、現地据え付けをおこなうのが一般的である。しかしながら、今回は建設地が内陸であり、機器の陸送には工夫が必要となった。すなわち、輸送機器寸法を道路交通法制限内（幅3.5m以下、高さ4.7m以下<歩道橋高さ制約あり>、長さ26m以下）に収め、輸送重量はすべての橋梁において、耐荷重を満足する必要があった。

このため主要機器は、当初から分割輸送をする方向で計画を練り、ガスタービン本体はケーシングまでも分割式とした。そして、通過するすべての橋梁の耐荷重評価・確認をおこない、輸送計画を練った。

ただし、機器の中には分割できない大型機器が一定数

あり、これらに対しては道路交通法の下、深夜時間帯（0時～5時）における低速輸送を計画した。

このような低速輸送が必要な機器のなかでも、8泊9日を要する超大型機器（160t）輸送が数回必要となった。これらへの対応としては、特殊車両にて超低速（5～10km/h）輸送をおこなうことにし、より綿密な計画を練った。そして、沿線に予備地も含め10箇所の特殊輸送車仮泊地を準備し、緊急時にも配慮した輸送計画を策定したうえで、特殊輸送のプロチームにより、運搬がおこなわれた。

その際、輸送ルート100km区間においては、片側一車線道路比率が3割を占めた。その区間をどのように渋滞回避をするか、また途中の交差点左右折時に、如何にスムーズかつ確実に回転・通過するかが課題であった。Fig. 15 に大物輸送時の特殊トレーラー荷姿例（全長38m）を示す。



Fig. 15 Huge trailer and large equipment

ここでは、メーカーと運搬会社の綿密な輸送計画・準備と輸送現場での運搬プロチームの秀逸な輸送技量が発揮された。結果として、最重量機器搬送は、2日間短縮でき、すべて6泊7日で搬送し終えた。

3.2.2 主機の現地製作 ガスタービン本体と同様に、ガスタービン用発電機（出力：470MVA）についても、輸送制限以下への分割を検討した。しかしながら、建設計画初期の段階で、その大型の発電機固定子は分割して輸送することが物理制約上（重量、形状）困難であることがわかり、固定子は現地製作で対応する決断をした。

このクラスの発電機を現地製作するのは国内初の試みであった。現地製作に関しては、メーカーである富士電機が有する独自の技術が採用された。ここではその詳細を紹介しないが、発電機製作工場の代替として、まず発電所敷地内に、先行して2号タービン建屋を建設し、その建屋内部にメーカー側でクリーンルームを設置することなどにより、大型発電機の現地製作が実現した。

3.2.3 資材ヤード確保と品質管理の徹底 今回の発電所建設には、発電所敷地とほぼ同等の資材ヤードが必要となることがわかった。幸い、発電所建設エリアの南側には、真岡市所有の土地（約8万㎡）があり、工事期間である約4年間、この土地を真岡市より借り受けること

ができた。これによって、地組品や資機材の横持を円滑におこなうなど、工事進捗に合わせて効率的に資材置き場を運用することができた。

上述のとおり、主要機器や資機材等は分割輸送が主であり、現地組み立てと溶接比率の高い工事であった。このため、現地工事の品質確保に努めるとともに、海外の製作工場に検査員を派遣し、品質保証体制を徹底した。こうした取り組みによって、現地での手直し工事の撲滅をはかり、工程順守に努めた。Fig. 16 に地組み場で組立後の大物設備の構内輸送状況例を示す。



Fig. 16 Transport of assembled equipment in construction area (ACC Fan Ring)

4. 運用状況

4.1 操業状況

前述したように、真岡発電所1号機は、2019年10月1日から営業運転に入り、2号機においては、5ヶ月後の2020年3月1日から営業運転を開始した。両機とも営業運転以降順調に操業を継続している。1号機においては、稼働後約2年が経過するが、設備性能として、蒸気タービン出側のACC蒸気真空度も計画値を維持しており、発電端効率も安定して60%以上(LHV)の運転を継続できている。

また、1号機については、すでに2021年春、定期検査を完了しており、2号機についても2021年後半に定期検査を計画中である。

4.2 地域との共生

真岡発電所では、見学のお客さまに向けて、PR施設「みらいん (Me-Line)」を併設、開館している。この施設は、近隣の皆さまに発電所に対する理解を深めてもらい、身近な存在として感じていただくことを目指している。

Fig. 17 に「みらいん」外観を示す。「みらいん」は、発電所の正門横に位置する白い建物で、名称の頭文字Mをイメージした曲線のデザインを特徴とするユニークな形状をしている。この建物は、2020年度に栃木県「マロニエ建築賞優良賞」を受賞した。

館内は近未来をイメージし、展示物は一切なく、各エリアすべてを映像での紹介としている。また、お客さまにはタブレット端末を使って、楽しみながら発電所を理解してもらい学習の場となるよう工夫をしている。

現在、見学は事前予約制としており、今後新型コロナウイルスの感染が落ち着いた段階で、一般の皆さまへ本格的に公開していく予定である。



Fig. 17 PR Center

5. 結言

本書では、真岡発電所の概要と発電所の建設に至る課題と対応について紹介した。この特徴ある内陸発電所の完成までには、幾多の困難があったが、プロジェクトチームの強い信念とメーカーである富士電機との連携を通して、愚直にハードルを繰り返し乗り越え、内陸大型発電所を実現させた。

2号機完工までの45ヶ月にわたる建設工事期間中、延べ40数万人の方々に工事に従事していただき、大型機器や資材搬入のための運搬回数は、1800回以上にも及んだ。この間、プロジェクトに関わっていただいた数多くの方々には心から感謝申し上げたい。

真岡発電所は、「電力インフラ強靱化」に寄与する発電所であるとともに、二酸化炭素排出削減にも貢献できる発電所である。今後も大型内陸発電所として、国内最高レベルの発電効率の維持に努めるとともに、その効果を最大限発揮していきたいと考えている。

そのため、今後はデジタル化推進や世界的な潮流であるカーボンニュートラルに向けた新技術に対応できるよう、最新技術情報の収集とともに技術研鑽に励み、真岡発電所のさらなる「価値向上」に取り組んでいく所存である。

参考文献

- (1) 藤尾明久, 山本晃, 神戸製鋼技報, Vol. 70, No. 1 (2020), pp. 108-112.
- (2) 内閣官房国土強靱化推進室, 国土強靱化 民間の取組事例集, (2015), pp. 61-63.
- (3) 関東経済産業局, エネルギー基盤強靱化事例集, (2015), pp. 12-15.

特集：至近の火力電源の運用・建設状況と将来火力発電技術の展望

1650℃級JAC形ガスタービンの現状と今後の展開

Current Status of 1650℃ Class JAC Gas Turbine and Future Development

高田 和正^{*1}
TAKATA Kazumasa

森本 一毅^{*1}
MORIMOTO Kazuki

若園 進^{*1}
WAKAZONO Susumu

片岡 正人^{*1}
KATAOKA Masahito

由里 雅則^{*1}
YURI Masanori

キーワード：ガスタービン，コンバインドサイクル，タービン入口温度，AM，水素，アンモニア

Key Words：Gas Turbine, Combined Cycle, Turbine Inlet Temperature, AM, Hydrogen, Ammonia

1. 緒言

近年，地球環境保全の観点からCO₂排出量削減の重要性が高まり，政府も2050年に温暖化ガス排出量を実質ゼロにする目標を掲げ，脱炭素社会の実現を目指すことを表明している。そのために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）の大量導入が計画されているが，自然変動の避けられない不安定電源であること，また電力系統に急激な周波数変動や負荷変動が生じること等の懸念もある。この観点から，脱炭素化の世界的な流れの中で，再生可能エネルギーの積極導入や水素/アンモニア導入によるCO₂排出ゼロ技術の確立を目指しつつ，火力電源の段階的な低炭素化を進めていくことも現実的には極めて重要である。ガスタービンを主機としたコンバインドサイクル（GTCC）発電は，地球環境保全の観点から化石燃料を利用する発電設備の中でも最も高効率かつクリーンな発電設備であり，従来火力と比べCO₂排出量が約6割少なく，優れた負荷追従能力や運用性から電力需給のバランスを保つための調整電源としての需要が増してきている。

GTCCの高効率化にはガスタービンの高温化が重要な役割を果たしており，三菱重工業（以下当社）は1980年代の1150℃級大容量ガスタービンM701D形開発を皮切りに，タービン入口温度1350℃のM501F形，1500℃のM501G形，1600℃のM501J形を開発し（Fig. 1），高いプラント熱効率と信頼性及び低公害性を実証してきた⁽¹⁾。J形ガスタービンは燃焼器に蒸気冷却方式を採用しているが，高いタービン入口温度を維持したまま空冷化できれば，更なる高効率化と運用性改善が期待できる。その中核技術である強制空冷システムを次世代高効率ガス

タービンJAC形（J-Air-Cooled）に適用しタービン入口温度1650℃の高温化を達成した。JAC形ガスタービンは，長期実証に向け，高砂工場内に複合サイクル発電所第2号発電設備（以下第二T地点）で検証，2020年7月1日より商業運転を開始し，順調に運転実績を積み重ねている。

本稿では，このJAC形ガスタービンの検証状況と更なる性能向上への取り組みを報告するとともに，脱炭素化の切り札である水素/アンモニア燃焼ガスタービンの開発についても紹介する。

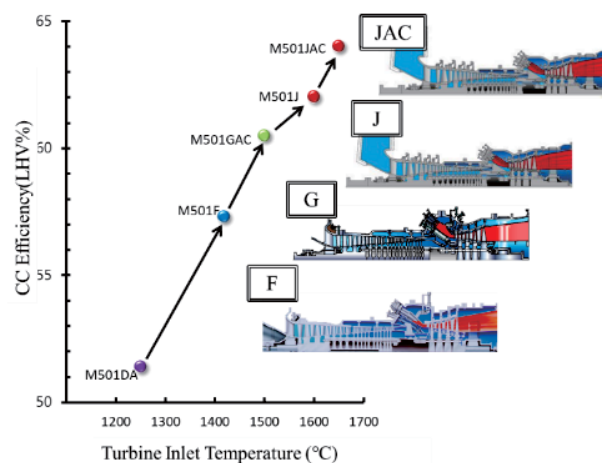


Fig. 1 Large frame gas turbine development

2. 1650℃級JAC形ガスタービンの開発コンセプト

J形ガスタービンの蒸気冷却燃焼器を高いタービン入口温度を維持したまま空冷化することで，コンバインドサイクルの更なる高効率化と運用性改善が期待できる。そのため，2015年春に当社高砂工場内のガスタービン複合サイクル発電プラント実証設備（以下既設T地点）にて高温ガスタービンの空冷化を達成する強制空冷システムを導入・検証したのち，多くの実績を持つJ形ガスタービンをベースとして，この強制空冷システムや超厚

原稿受付 2021年9月16日

^{*1} 三菱重工業(株) エナジーソリューション&パワー事業本部
GTCC事業部 ガスタービン技術部
〒676-8686 高砂市荒井町新浜2-1-1
E-mail: kazumasa.takata.4d@mhi.com

可能 (Flexible Mode) である。一方後者では負荷ホールド運転中にクリアランスを詰めることができ、定常運転時の性能を最大化 (Performance Mode) できる^{(5),(6)}。Fig. 6に負荷運転時の三方弁切り換えによるクリアランス挙動を示す。本システムにより性能を最大化したまま従来以上の運用性向上が可能であることを最終確認した。

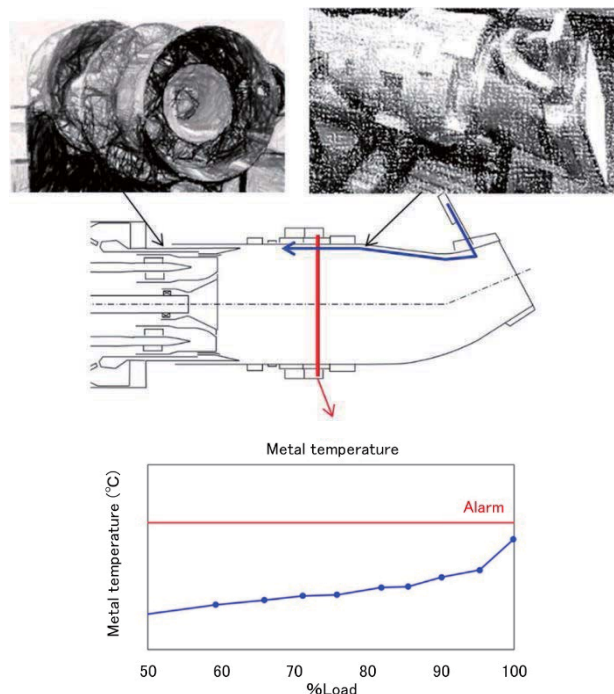


Fig. 5 Measurement results of enhanced air-cooled combustor metal temperature

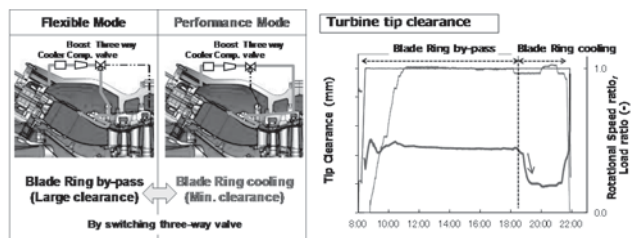


Fig. 6 Turbine tip clearance control by enhanced air-cooled system

3.2 タービン翼メタル温度

1650℃級JAC形ガスタービンは、J形タービン入口温度に対し+50℃となり、高性能化と信頼性を両立させるために超厚膜化TBCを採用している。前述の通り、超厚膜化TBCはT地点で長期検証し健全性を確認済である。このTBCを適用し冷却設計を最適化したJAC形タービン1段静翼の特殊計測メタル温度分布をFig. 7に示す。1段静翼は最も熱負荷の厳しい翼となり冷却構造も複雑となるが、局所的な高温部もなく、いずれの部位も設計許容温度以下であり、入口ガス温度1650℃条件での健全性を確認し、運転後の点検でも健全であることを確認した。

タービン1段動翼についてはテレメータ計測による翼

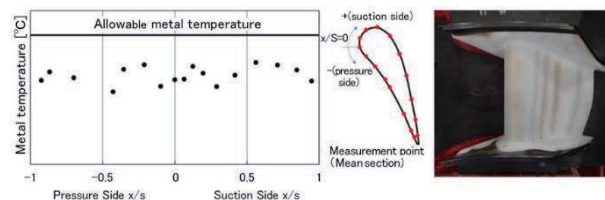


Fig. 7 Turbine row 1 vane metal temperature distribution and inspection results after operation

面メタル温度/振動応力の確認に加え、T地点で導入実績のあるパイロメータ計測を実施した。燃焼器車室及びタービン1段静翼に挿入孔を設け、計測時にパイロメータを待機ポジションからガスパス内に挿入することで特に熱負荷の高くなる翼面前縁周囲の翼表面温度分布の健全性を確認し、運転後の点検でも健全であることを確認した (Fig. 8)。

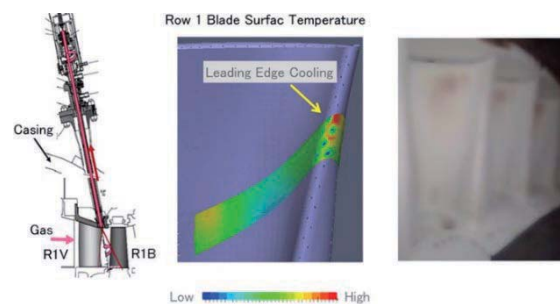


Fig. 8 Turbine row 1 blade surface temperature distribution and inspection results after operation

3.3 高圧力比圧縮機

1650℃級JAC形ガスタービンの圧縮機は、圧力比をJ形の23から25へ上昇させているが、高圧力比圧縮機は出口流路面積を相対的に絞った設計とすることから、圧力比の低い起動中には流量が低下し、旋回失速が相対的に悪化する懸念がある。前述の通り、同様に圧力比25のH形の圧縮機を既設T地点にて検証・確認済みであるが、JAC形でも詳細な特殊計測を実施し、起動特性、翼の振動応力や空力性能が良好であることを最終確認した。(Fig. 9)。

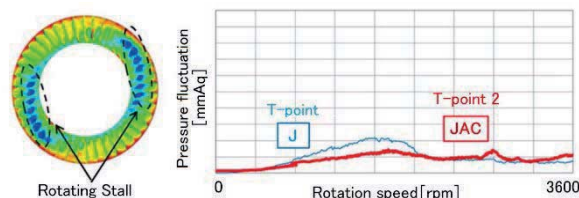


Fig. 9 High pressure ratio compressor stability during start up

3.4 1年間運転後のガスタービンの状況

2020年1月より試運転を開始し、同年7月1日に商業運転を開始してから、約1年間の給電運転及び検証試運転を実施した。2021年3月にガスタービン各部の点検を実施し、Fig. 10に示す通り、圧縮機、燃焼器、タービン、

吸排気構造など機器として健全であり、長期信頼性に問題ないことを確認した⁽⁷⁾。

2021年春の検証試運転完了後は、再び給電運転を継続し、運転時間/起動回数を重ねるとともに、長期信頼性の継続確認を実施していく。

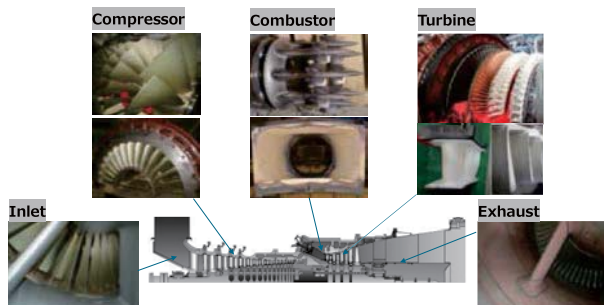


Fig. 10 Overview of JAC gas turbine inspection results in March 2021

4. JAC形ガスタービンの今後の展開

先に述べた通り、GTCCは、地球環境保全の観点から化石燃料を利用する発電設備の中でも最も高効率かつクリーンな発電設備である。当社では脱炭素社会の実現に向け、このGTCCの更なる高効率化による段階的な低炭素化を進めつつ、CO₂排出ゼロの切り札である水素／アンモニアガスタービンを開発していくロードマップを描いている（Fig. 11）。本項では最新鋭GTCCの高効率化、すなわちJAC形ガスタービン性能改善のための技術の一つである金属AM（3D積層造形：Additive Manufacturing）技術開発状況、及び水素／アンモニアガスタービンの開発状況について述べる。

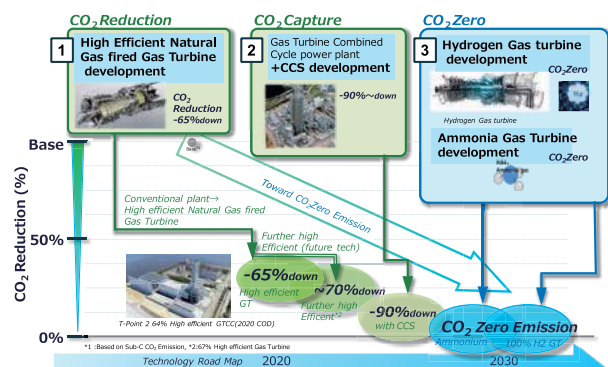


Fig. 11 Technologies for carbon neutral society

4.1 更なる性能改善への取り組み - AM技術の適用

GTCCの高効率化においては、ガスタービンの高温化の他に、高温部品を冷却するための空気をいかに削減するかも重要であり、少ない冷却空気量で効率よく冷却する先進的な冷却構造が求められる。金属AM技術であれば、現行の加工技術では成立困難な複雑内部冷却通路設計も可能であり、製造技術も含めて実現に向けた開発を進めている（Fig. 12）。

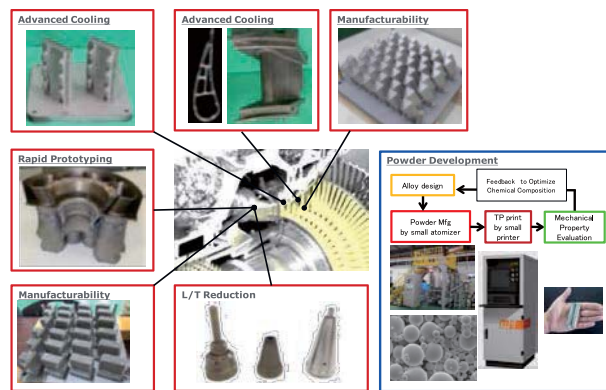


Fig. 12 Example of application of AM to gas turbine

現在、高温部品の一つである分割環に対して、温度モニタリング、変形シミュレーション、材料組成改良、熱処理条件の適正化に取り組み、要求品質（強度、形状精度）を確保することができたため、当社の実証発電設備で実機環境下での信頼性評価も行った（Fig. 13）。今後、金属AMならではの複雑内部冷却構造を組み込んだ分割環やタービン静翼の設計、製造検討に取り組む予定である⁽⁸⁾。



Fig. 13 Verification of AM blade rings

4.2 水素／アンモニアガスタービンの開発状況

大容量・高効率の発電用ガスタービンにおける水素利用には以下に示す環境的・経済的メリットがある（Fig. 14）。

1つは、既設のガスタービン設備を最小限の改造で、低炭素化あるいは脱炭素化することが可能なことである。ガスタービン用燃焼器と燃料供給系統以外の大規模なリニューアルを必要とせず投資コストを抑制でき、水素転換へのコストのハードルを下げて水素社会へのスムーズなシフトを促すことが期待される。

次に、液体水素のみの利用にとどまらず、メチルシクロヘキサンやアンモニアといった水素キャリアで輸送されたものを水素化し、燃料として利用できるため、キャリアへの柔軟性があることや、燃料電池車等に比べて、低純度な水素の利用が可能であり、水素コストの低減に貢献できる。

最後に、水素焼きガスタービンは1つの発電設備で燃料電池車200万台相当の水素を必要とするため、大規模な水素需要が喚起され、サプライチェーンの拡大、水素コストの削減を促進することも期待される。

以上のように、大容量・高効率の発電用ガスタービンにおける水素利用には脱炭素社会を実現するために、欠かすことのできない重要な役割があると考えられる。

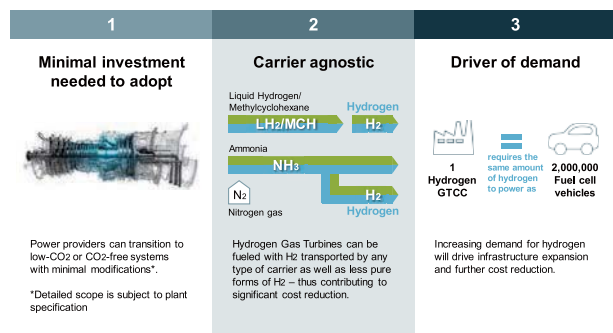


Fig. 14 Benefits of hydrogen gas turbines

水素焼きガスタービンの開発におけるキーポイントは、ガスタービンの心臓部である燃焼器、燃焼技術の開発である (Fig. 15)。当社では、水素を含む燃料に対応した燃焼器の開発を1970年代から手掛けており、すでに30台以上の納入実績を有している。近年においてはJAC形ガスタービンをはじめする大型高効率ガスタービン用の高温低NO_x燃焼器に対応すべく、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) にご支援を頂き、その開発に取り組んでいる。

天然ガスと水素の混焼用燃焼器 (H₂, 30% vol) においてはすでに開発を完了しており、専焼用燃焼器については大崎クールジェンに使用しているIGCC用マルチクラスタ燃焼器をベースに現在鋭意開発中である⁽⁹⁾。

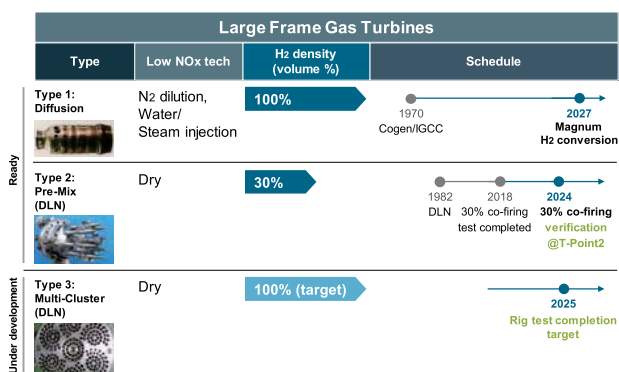


Fig. 15 Range of H₂ combustion technology

また、アンモニア利用においては、ガスタービン発電の燃料としてアンモニアを100%直接利用する4万kW級ガスタービンシステムの開発に着手している。アンモニアの直接燃焼では、燃料中の窒素が燃焼により酸化することで発生する窒素酸化物 (NO_x) 低減への対応が課題であり、Fig. 16に示す当社のH-25形ガスタービン (出力4万kW級) を対象に、NO_x排出量を低減する燃焼器の開発と脱硝装置を組み合わせたガスタービンシステムを構築し、2025年以降の実用化を目指している⁽¹⁰⁾。

当社では、これら水素／アンモニアを利用したガスタービンシステムの開発により、カーボンフリー発電シ



Fig. 16 H-25 gas turbine

ステムのラインアップをさらに拡充していく。

5. 結言

脱炭素化の世界的な流れの中で、当社はGTCCの更なる高効率化による段階的な低炭素化を進めつつ、CO₂排出ゼロの切り札である水素／アンモニアガスタービンを開発していくロードマップを描いている。GTCCの高効率化には、ガスタービンの高温化が重要な役割を果たしており、当社は実績あるJ形をベースに、燃焼器強制空冷システム、超厚膜TBC、高圧力比圧縮機を中核技術として適用した次世代1650℃級JAC形ガスタービンを開発した。JAC形ガスタービン長期実証のため、高砂工場内に複合サイクル発電所第二号発電設備 (第二T地点) を建設、2020年1月から試運転を開始し、約2800点にも及ぶ大規模の特殊計測を実施して、1650℃運転でのJAC形機器信頼性、性能等の健全性を最終確認した。その後2020年7月1日より商業運転を開始し、約一年間の運転後の各構成要素は健全であり、長期高信頼性を有することを確認している。現在、このJAC形ガスタービンの更なる性能改善を目指し、そのための技術の一つである金属AM技術を開発中である。すでに一部の高温部品では当社の実証発電設備で実機環境下での信頼性評価も実施しており、今後、金属AMならではの複雑内部冷却構造を組み込んだタービン翼等の設計、製造検討に取り組む予定である。

GTCCの高効率化と並行して、水素／アンモニアガスタービンの開発も進めている。水素焼きガスタービンの開発におけるキーポイントは、ガスタービンの心臓部である燃焼器、燃焼技術の開発であり、天然ガスと水素の混焼用燃焼器 (H₂, 30% vol) においてはすでに開発を完了、専焼用燃焼器についても現在鋭意開発中である。また、アンモニア利用については、ガスタービン発電の燃料として100%直接利用する4万kW級ガスタービンシステムの開発に着手している。

当社は今後もJAC形ガスタービンの中核とするGTCCの更なる高効率化を進めつつ、水素／アンモニアガスタービンの開発にも取り組み、脱炭素社会の実現に貢献していく。

参考文献

- (1) 塚越敬三, 発電用ガスタービンの高温・高効率化の進展と将来展望, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 41 No. 1 (2013), pp. 53-58.
- (2) 高村啓太, 飯島高善, 若園進, 羽田哲, 由里雅則, 片岡正人, J 形ガスタービンの運転実績踏まえた1650℃級JACガスタービンの開発, 三菱重工技報 Vol. 56 No. 3 (2019), pp. 1-9.
- (3) 若園進, 森本一毅, 松村嘉和, 由里雅則, 片岡正人, 藤村大輝, 最新鋭1650℃級JAC形ガスタービンの実機実証, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 48 No. 6 (2020), pp. 357-362.
- (4) Yamazaki, H., Nishimura, Y., Abe, M., Takata, K., Hada, S., and Masada, J., Development of Next Generation Gas Turbine Combined Cycle System, ASME Turbo Expo, GT2016-56322 (2016).
- (5) 高田和正, 阿部雅宏ほか, 次世代ガスタービンコンバインドサイクル発電設備の開発, 第43回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集 (2015).
- (6) 松見勇, 川村康太, 小森豊明, 負荷変動に対応するMHPSのガスタービン技術, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 47 No. 1 (2019), pp. 14-20.
- (7) 森本一毅, 松村嘉和, 鈴木健太郎, 若園進, 片岡正人, 由里雅則, 1650℃級JAC形ガスタービンを有する第二T地点実証発電設備での運転状況, 三菱重工技報 Vol. 58 No. 3 (2021), pp. 1-9.
- (8) 北村仁, 谷川秀次, 伊藤竜太, 小牧孝直, 本山宜彦, 片岡正人, ガスタービン部品の金属3D積層造形技術の開発, 第48回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集 (2020).
- (9) 野勢正和, 川上朋, 中村聡介, 黒木英俊, 片岡正人, 由里雅則, 脱炭素社会に向けた水素・アンモニア焼きガスタービンの開発, 三菱重工技報 Vol. 58 No. 3 (2021).
- (10) 三菱パワー株式会社, プレスリリース, 世界初となるアンモニア焼き4万kW 級ガスタービンシステムの開発に着手 カーボンフリー発電のラインアップを拡充, 2025年以降の実用化を目指す, (2021)(参照日 (2021年9月16日)) <https://power.mhi.com/jp/news/20210301.html>.

特集：至近の火力電源の運用・建設状況と将来火力発電技術の展望

CO₂分離・回収型酸素吹IGCCの開発状況と今後の展望について

Development Status of Oxygen-blown IGCC with CO₂ Capture and Future Prospects



柴田 彰*1
SHIBATA Akira

キーワード：石炭ガス化燃料電池複合発電，石炭ガス化複合発電，実証試験，CO₂分離回収設備

Key Words：IGFC，IGCC，demonstration test，CO₂ capture unit

1. 緒言

エネルギー政策の基本は3E+Sであり，安全性のS (Safety) を前提とした上で，エネルギーの安定供給 (Energy Security) を第一とし，経済効率性の向上 (Economic Efficiency) による低コストでのエネルギー供給と同時に環境への適合 (Environment) が必要とされる。

2018年7月に政府が策定した「第5次エネルギー基本計画」において，石炭は供給安定性や経済性に優れ，重要なベースロード電源の燃料として評価されているが，再生可能エネルギー導入拡大に伴い適切に出力調整を行う必要性が高まると見込まれている。また，石炭は他の化石燃料に比べ発電電力量当たりのCO₂排出量が多く，高効率なクリーンコールドテクノロジー開発の重要性は非常に高くなっている。

Fig. 1の次世代火力発電技術の見通しに示す通り，高効率な石炭ガス化複合発電 (IGCC, Integrated Coal Gasification Combined Cycle) に対する期待は高く，2016年6月に経済産業省が策定した「次世代火力発電に係るロードマップ⁽¹⁾」には，超々臨界圧 (USC, Ultra Super Critical) よりもCO₂排出量を低減可能な技術として，IGCCやIGCCに燃料電池を組み込んだ究極の高効率発電技術である石炭ガス化燃料電池複合発電 (IGFC, Integrated Coal Gasification Fuel Cell Combined Cycle)，さらにCO₂分離回収技術の確立が掲げられている。

このような状況の下，当社が行う大崎クールジェンプロジェクトは，IGFCとCO₂分離回収技術を組み合わせた革新的低炭素石炭火力発電の実現を目指し，2012年度から経済産業省の補助事業として開始し，2016年度からは国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発

機構 (NEDO: New Energy and Industrial Technology Development Organization) の助成事業として行われている。

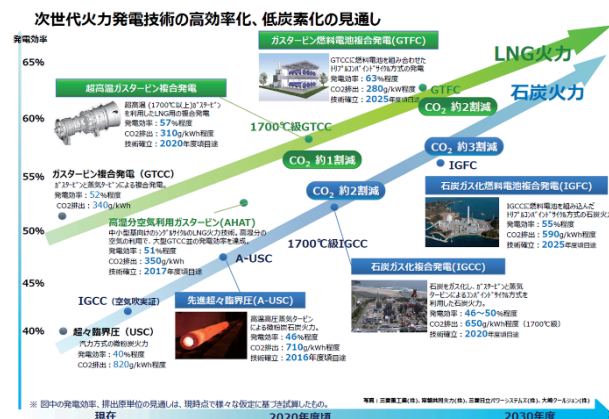


Fig. 1 Thermal power generation technology outlook in future⁽¹⁾

さらに経済産業省では，気候変動問題の解決及び新たな資源の安定的な確保に向け，CO₂を資源として回収・再利用する「カーボンリサイクル⁽²⁾」を推進しており，鉱物化や人工光合成，メタネーションによる素材や燃料への再利用等とともに，大気中へのCO₂排出を抑制していくとしている。さらに，2019年9月に公表された「カーボンリサイクル3Cイニシアティブ⁽³⁾」においては，CO₂が得られる広島県大崎上島を実証研究の拠点として整備することが示された。

これを踏まえて，NEDOでは「CO₂有効利用拠点化における技術開発」を立ち上げ，大崎上島の実証研究拠点化及び本拠点でのカーボンリサイクル技術開発を支援している。当社では，大崎上島の実証研究拠点化を行う「CO₂有効利用拠点化推進事業」を受託し，2020年7月より事業を開始した。

本稿では，これら大崎クールジェンの取組みについて紹介する。

原稿受付 2021年9月13日

* 1 大崎クールジェン(株) 技術部保守グループ
〒725-0301 豊田郡大崎上島町中野6208番地 1
E-mail: shibata@osaki-coolgen.jp

2. 大崎クールジェンプロジェクト

2.1 会社概要

大崎クールジェン(株)は、国のクリーンコール政策に則り、革新的低炭素石炭火力発電の実現を目指す目的で、中国電力(株)と電源開発(株)の共同出資によるプロジェクト実施事業主体として2009年7月に設立された。社名には、国のクリーンコール政策である「Cool Gen計画」を実現し、広島県の大崎上島から世界に発信することを目指すという主旨が込められている。

2.2 プロジェクト概要

大崎クールジェンプロジェクトは、石炭火力発電から排出されるCO₂を大幅に削減させるべく、究極の高効率発電技術であるIGFCとCO₂分離回収技術を組み合わせた革新的低炭素石炭火力発電の商用化を目指した実証試験を実施している。Fig. 2にプロジェクト全体計画、Fig. 3に実証試験設備配置図を示す。

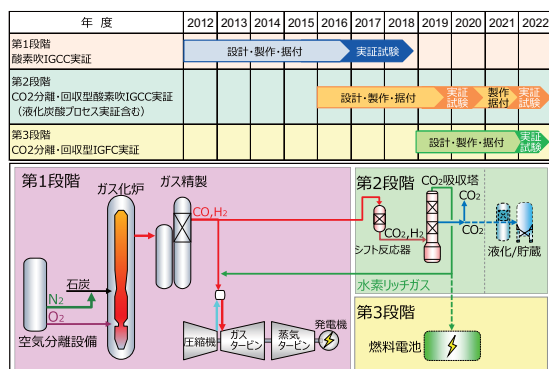


Fig. 2 Outline of Osaki CoolGen project



Fig. 3 Layout of demonstration test facilities

実証試験は3段階に分けて計画され、第1段階ではIGFCの基盤技術である酸素吹IGCC実証試験を実施し、第2段階では酸素吹IGCCにCO₂分離回収設備を付加したCO₂分離・回収型IGCCの実証試験を実施する。そして第3段階として燃料電池と組み合わせたCO₂分離・回収型IGFCの実証試験を計画している。

3. 第1段階実証事業

3.1 酸素吹IGCC実証試験の設備概要

Table 1に酸素吹IGCC実証試験(第1段階)の主要設備概要、Fig. 4に試験設備の概略フロー図を示す。

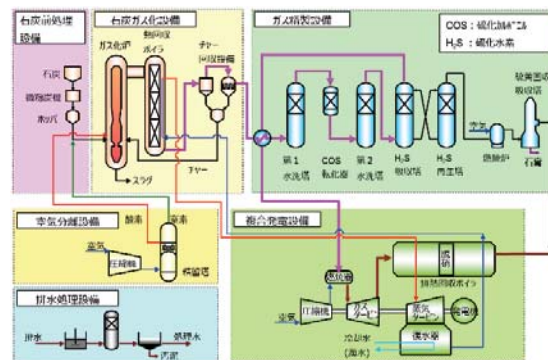


Fig. 4 Schematic flow of Oxygen-blown IGCC

第1段階の主要設備は、石炭ガス化設備、ガス精製設備、空気分離設備、排水処理設備、複合発電設備で構成されている。

燃料である石炭は微粉炭機で粉碎され、空気分離設備(ASU)により分離された窒素によってガス化設備に搬送される。ガス化炉ではASUで製造された酸素により、一酸化炭素と水素を主成分とする石炭ガス化ガスを生産する。この石炭ガス化ガスは、熱回収ボイラ(SGC)で熱回収され、ガス精製設備で硫黄分等の不純物を除去した後にガスタービン(GT)燃焼器へ送られる。硫黄分は硫黄回収システムに送られ、石膏として固定化・回収される。

ガス精製設備から出る排水は、排水処理設備にて処理し海域へ放流される。GT燃焼器では圧縮空気により石炭ガス化ガスを燃焼させ、GTを駆動させる。GT駆動後の燃焼排ガスは排熱回収ボイラ(HRSG)で熱回収された後、煙突から放出される。

また、SGC及びHRSGの熱回収によって発生した蒸気で、蒸気タービン(ST)を駆動させ、GTとSTとの複合発電を行うことにより、従来の微粉炭火力を上回る発電効率の達成が可能となる。

Table 1 Main facilities Outline of oxygen-blown IGCC

主要機器		設備仕様	
石炭ガス化設備		酸素吹1室2段旋回型噴流床方式（EAGLE炉） 石炭使用量：1,180 t/日	
ガス精製設備		硫黄除去設備：湿式化学吸収法 硫黄回収設備：湿式石灰石石膏法	
空気分離設備		深冷分離方式	
排水処理設備		低塩系（既設）	高塩系
複合発電設備	ガスタービン 蒸気タービン	コンバインドサイクル発電方式（出力：166MW） ガスタービン：開放サイクル型 蒸気タービン：再熱復水型	
	排熱回収ボイラ	再熱複圧自然循環型	
	発電機	全閉横置円筒回転界磁型同期発電機	
	排煙脱硝設備	乾式アンモニア接触還元法	
	煙突（既設）	鋼製自立型（高さ：200m）	

3.2 ガスタービンの選定

IGCC用GTは石炭ガス化ガスを燃料ガスとして用いることから、LNGと比べ発熱量が低く燃料流量が多くな

るなどの特異性を考慮する必要がある。実証試験設備として、既存GTのラインナップから同出力規模で最高効率である1,300℃級GT（三菱パワー社H-100シリーズ）を選定し、燃料流量増による冷却用空气の減少に対してはタービン翼にフィルム冷却などを採用し、最適冷却構造とすることでメタル温度低減を図った（Fig. 5）。

また、燃焼器は同社マルチクラスターバーナ型低NO_x燃焼器を選定した（Fig. 6）。GT設備仕様をTable 2に示す。

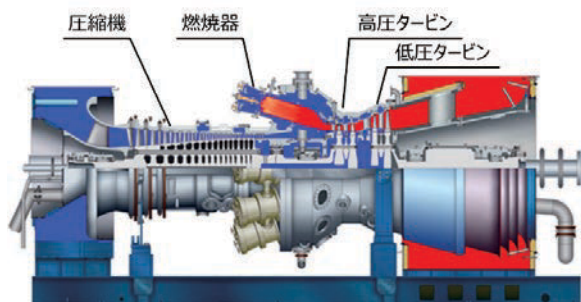


Fig. 5 H-100 series gas turbine

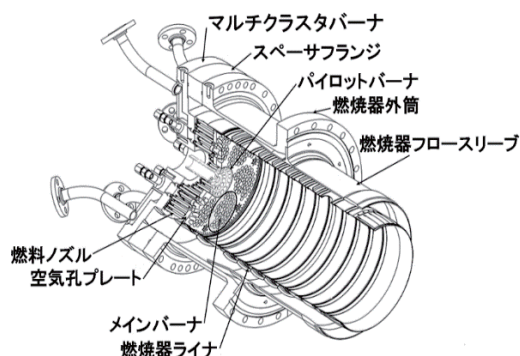


Fig. 6 Multi-cluster burner type low NO_x combustor

Table 2 Technical specification of gas turbine facility

項目	設備仕様
GT	型式：ヘビーデューティ型、2軸形
	定格回転速度：高压：4,580rpm、低压：3,600rpm
空気圧縮機	型式：軸流式17段
	圧力比：17
タービン	型式：高压：2段軸流形、低压：2段軸流形
	冷却方式：空気冷却式（1～3段静翼、1,2段動翼）
燃焼器	型式：リバースフロー形、乾式低NO _x 燃焼器
	缶数：10缶

マルチクラスターバーナは、中カロリーの石炭ガス化ガスとCO₂分離回収実証試験で発生するH₂リッチガスに対応可能であること、燃料ガスと空气の急速混合による希薄燃焼と噴出方向調整による火炎の形成位置の適正化により、従来の拡散燃焼器と比べ、低NO_x化と安定燃焼が可能となる。

3.3 第1段階実証事業の成果

第1段階は2019年2月に実証試験を完了した。第1段階実証試験の目標と実績をTable 3に示す。

Table 3 Demonstration targets and results in the first step

項目	目標	第1段階実績
効率	送電端効率：40.5% (HHV※1)	送電端効率：40.8% (HHV※1)
環境性能※2	SO _x ：8 ppm NO _x ：5 ppm ばいじん：3 mg/m ³ N	SO _x ：8 ppm未満 NO _x ：5 ppm未満 ばいじん：3 mg/m ³ N未満
多炭種適用性	炭種性状適用範囲の把握	・4炭種試験し良好な適合性を確認 ・運転を継続しながら炭種切替を行い安定したプラント状態を確認
信頼性	5,000時間の長期耐久試験により商用機レベルの年利用率70%以上となる見通しを得ること。	・長時間耐久性試験：5,119時間 ・連続運転：2,168時間
運用性	事業用火力プラントとして必要な運用特性、制御性（負荷変化率：1～3%/分）	・非常停止試験において安全停止を確認 ・負荷変化率：増16%/分、減15%/分を確認 ・送電端出力0 MWで安定運転を確認 ・送電端出力制御で良好な運用性を確認 ・コールド起動時間（GT起動～定格負荷）7時間以内の見通しを得た
経済性	商用機レベルで発電単価が微粉炭火力と同等以下となる見通しを得ること	商用機レベルで発電原価が微粉炭火力と同等になる見通しを確認

※1：高位発熱量基準、※2：O₂16%換算

基本性能である送電端効率の目標40.5%は17万kW級規模としては世界最高レベルの性能となる。実証試験の実績は送電端効率40.8%であり、1,500℃級ガスタービンを採用した商用機においては、「次世代火力発電に係る技術ロードマップ」で掲げられたIGCCの送電端効率約46%を実現できる見通しを得ることができた。

また、環境性能は新規微粉炭火力と同等レベルを目標に設定し、SO_x、NO_x、ばいじん全ての項目で目標を達成した。これは我が国の厳しい環境規制にも対応可能な環境性能を有するものである。

多炭種適用性では、性能設計炭（亜瀝青炭）での基本性能等の確認に加え、低発熱量炭の適合性や脱硫性能、スラグ排出性を確認するため、亜瀝青炭1炭種と瀝青炭2炭種（Table 4）を用いて試験を行い、以下のとおり炭種性状適用範囲を把握した。

- ① IGCCに適した低灰溶融点炭かつ低発熱量炭から微粉炭火力に適合可能な石炭で試験を実施。単味で安定した運転を行い、良好な適合性を確認した。
- ② プラントを運転し出力を維持しながら炭種を切り替え、安定した運転状態を確認するとともに、監視方法を確立した。

- ③ 2種類の異なる性状の石炭の比率を変えて混炭し、安定した運転状態を確認した。

Table 4 Test coal of variety compatibility demonstration

No.	分類	特徴	評価項目
1	亜瀝青炭（設計炭）	低発熱量炭	基本性能、設備容量
2	亜瀝青炭（設計炭）	低発熱量炭、低灰融点炭	低発熱量炭適合性
3	瀝青炭（設計炭）	高硫黄炭	脱硫性能
4	瀝青炭	高灰融点炭、高灰分炭	スラグ安定排出

設備信頼性としては、石炭火力として求められる微粉炭火力と同等の信頼性を目標に、長時間耐久試験によって検証した。

実証試験結果、連続運転時間は最長で2,000時間を超える連続運転を行い、累積運転時間は目標とする5,000時間以上を達成した。

負荷変化率向上試験結果をFig. 7に示す。目標を大幅に上回る負荷変化率16%/分（増負荷時）を達成し、酸素吹ガス化炉の負荷追従性の高さを示した。これはGTで先行して発電負荷を変化させ、応答性の良い酸素吹ガス化炉を追従させることや系統内のガスボリュームが圧力変動を抑制することにより実現した。Fig. 8に高負荷変化率を可能とする酸素吹IGCCの特徴を示す。

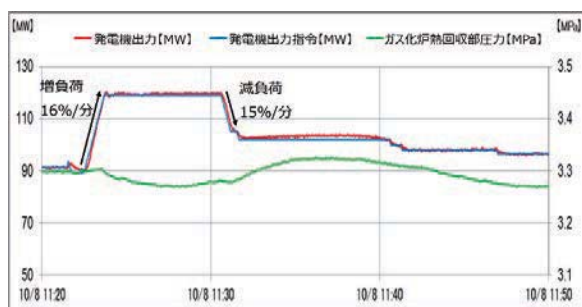


Fig. 7 Result of flexibility improving test

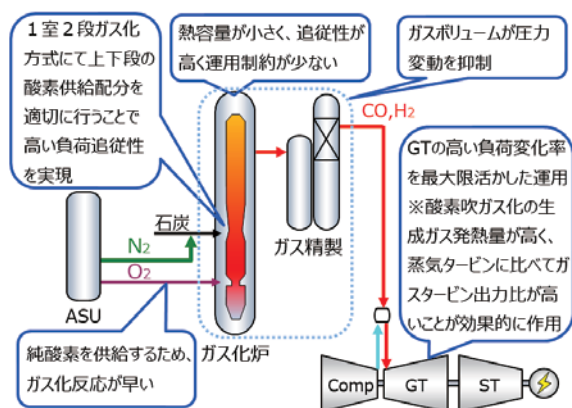


Fig. 8 Characteristic of Oxygen-blown IGCC

再生可能エネルギーの導入拡大に伴い、火力発電による調整力が求められる状況において、酸素吹IGCCが高い運用性を備えていることを実証した。また、送電端出

力を安定して制御可能であること、送電端出力0MWで運転可能なこと、さらに連続した増減負荷運転（V字型）におけるプラントの安定運転を確認している。

制御システムはIGCCシステム全体をカバーするものとして本プロジェクト用に新規に構築したものであるが、プラント起動・停止を含むあらゆる運転において高い信頼性と安定性を有することが確認された。

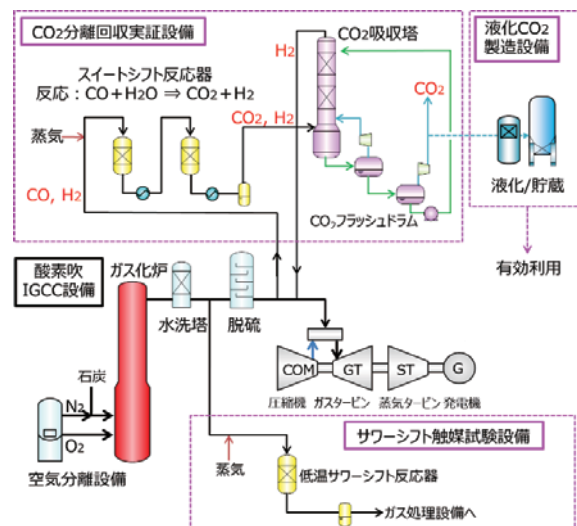
経済性については、実証試験の結果を踏まえ、酸素吹IGCCの建設費や発電コストを試算し評価した結果、商用機レベルで発電原価が微粉炭火力と同等になる見通しを得た。

4. 第2段階実証事業

4.1 CO₂分離・回収型酸素吹IGCC実証試験の設備概要

CO₂分離・回収型酸素吹IGCC実証試験（第2段階）では、第1段階の酸素吹IGCCにCO₂分離回収設備を追加したCO₂分離・回収型酸素吹IGCCの実証試験及び低温作動型サワーシフト触媒試験を実施する。

Fig. 9にCO₂分離・回収型酸素吹IGCC実証試験設備の概略フロー図を示す。CO₂分離回収設備は、酸素吹IGCCで発生した脱硫後の石炭ガス化ガス中のCOをスイートシフト反応器でCO₂に転化する「COシフト系統設備」及びCO₂をCO₂吸収塔で分離回収する「CO₂吸収再生系統設備」で構成しており、本実証試験は、石炭火力発電から排出されるCO₂を大幅に削減するため、商用スケールでの実用化を目指すものである。

Fig. 9 Schematic flow of IGCC with CO₂ capture

CO₂分離回収設備でのCO₂回収率を90%以上とする計画としており、商用化に向けた実証に必要な規模として、石炭ガス化ガスの約17%を導入する設備を設置した。これはIGCCプロセス全体で発生する炭素成分の15%相当量を分離回収できる規模である。

従来の石炭火力からのCO₂分離回収方式は、ボイラでの燃焼後ガスから行う「燃焼後回収」であるのに対し、

IGCCにおいては、GT燃焼器に導入する前の石炭ガス化ガスからCO₂を分離回収する「燃焼前回収」が適用される。これは他の方式と比べて加圧下でCO₂を回収できるため、処理ガス量が少ないこと、ガス中のCO₂が高濃度で分圧が高いことから、最も効率的にCO₂を分離回収できる方式である。

CO₂分離回収技術については、化学産業等でアミン等のアルカリ溶液を用いた化学吸収法や、エーテル等を用いた物理吸収法が商用化されている。これらの特徴をFig. 10に示す。化学吸収法はアルカリ溶液にCO₂を化学反応によって吸収させ、吸収液を加熱することによりCO₂を放出して回収するのに対し、物理吸収法はポリエチレングリコール等の吸収液にCO₂を吸収させ、その後減圧することによりCO₂を放出して回収する方式である。本実証試験では、高圧プロセスであるIGCCに優位であり、分離回収に伴う発電効率低下が小さく、将来的に更なる回収エネルギーの低減が見込まれる物理吸

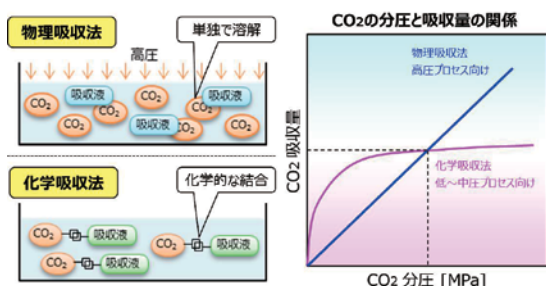


Fig. 10 Physical absorption and Chemical absorption



Fig. 11 CO₂ capture unit

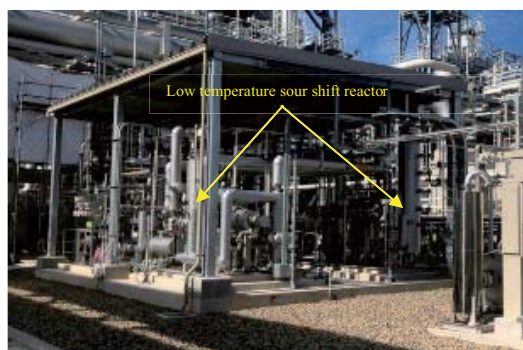


Fig. 12 Low temperature operating sour shift catalyst facility

収法を採用した。

一方、サワーシフト触媒試験設備は、脱硫前の石炭ガス化ガス中のCOを低温サワーシフト反応器でCO₂に転化する試験設備である。

Fig. 11, Fig. 12にCO₂分離設備及びサワーシフト触媒試験設備を示す。

4.2 第2段階実証事業の成果

第2段階は2016年4月より事業を開始し、2019年12月に実証試験を開始した。CO₂分離・回収型酸素吹IGCC実証試験では、CO₂分離回収設備の性能以外にIGCCとの連系も含め火力発電システムとしての運用性、経済性、環境性能及びCO₂分離回収設備の追設による発電効率への影響等を検証する計画としている。Table 5に第2段階実証事業の目標と実績を示す。

Table 5 Demonstration targets and results in the second step

項目	目標	第2段階実績
基本性能	CO ₂ 回収率90%以上 回収CO ₂ 純度99%以上	CO ₂ 回収率92.7% 回収CO ₂ 純度99.3% 目標達成
効率	新設商用機において、CO ₂ を90%回収しつつ、発電効率40% ^{※1} （送電端、HHV ^{※2} ）程度の見通しを得る。	<ul style="list-style-type: none"> CO₂分離回収に必要なエネルギーを低減するため、運転パラメータ最適化試験を行い、運転データを取得 新設商用機における発電効率は今後評価 検証中
運用性信頼性	発電所特有の負荷変動等に追従すべく、CO ₂ 分離回収設備の運用手法を確立し、信頼性について検証する。	<ul style="list-style-type: none"> 起動停止時の手順を確立 性状の異なる炭種の運転データを取得 CO₂設備負荷変化時の運転データを確立 目標達成 長時間信頼性の検証は今後評価 検証中
経済性	商用機におけるCO ₂ 分離回収の費用原単位について、技術ロードマップに示された費用原単位（回収CO ₂ 量当りの分離回収コスト）をベンチマークとして評価する。	上記試験の成果を踏まえて今後評価 検証中

※1 発電効率には分離回収プロセスまでを含む（貯留に係る動力は含まない）

※2 高位発熱量基準

CO₂分離回収設備の基本特性確認試験では、CO₂回収効率92.7%、回収CO₂純度99.3%と目標達成するなか、世界で初めて石炭ガス化ガス由来の水素リッチガスをGTへ返送し、IGCC設備とCO₂分離回収設備の連携に成功した。

CO₂分離回収設備の運転パラメータ最適化試験では、設備全体のエネルギー消費が最小となる各種データを取得した。今後、取得したデータを基に新設IGCC商用機（1,500℃級IGCC）においてCO₂を90%回収した際の発電効率を評価する。

運用性については、CO₂分離回収設備からのH₂リッチガスを全量IGCC設備に返送することで起動を完了させ、CO₂分離・回収型酸素吹IGCCの制御手法を確立し

た。停止時についても同様に制御手法を確立した。また、起動完了後、負荷変化率5%/分までの発電機出力変化試験を行い、GT燃焼器メタル温度、燃焼振動、NO_x排出濃度等の各種データに異常がないことを確認し、CO₂分離・回収型酸素吹IGCC実証設備の高い負荷追従性を確認した。

今後、第3段階実証試験にてCO₂分離回収設備及びサワーシフト触媒試験設備の運転を行い、長期設備信頼性を継続して確認する。

5. 第3段階実証事業

5.1 CO₂分離・回収型IGFC実証試験の設備概要

CO₂分離・回収型IGFC実証試験（第3段階）では、事業向け固体酸化燃料電池（SOFC, solid oxide fuel cell）の最小構成単位となる燃料電池モジュールを並べ、CO₂分離後の水素リッチガスを分岐してSOFCへ導入し、CO₂分離・回収型IGFCに関する試験を行う。

また、高効率IGFC開発に向けたガスクリーンナップ技術の検証として、IGCCから脱硫後の石炭ガス化ガスを分岐し、吸着剤について評価試験を行う。

Fig. 13にCO₂分離・回収型IGFC実証試験設備の概略フロー図を示す。

Fig. 14に示すNEDO委託事業のガスタービン燃料電池複合発電（GTFC：Gas Turbine Fuel Cell combined cycle）技術開発にて、小型GTFC用に開発されたSOFC

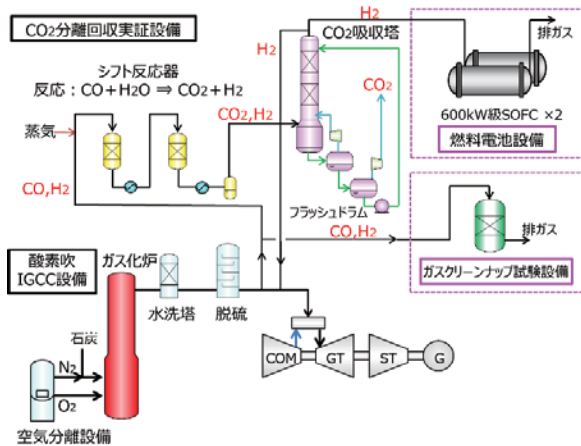


Fig. 13 Schematic flow of IGFC with CO₂ Capture



Fig. 14 MW class SOFC half module
(Provided by Mitsubishi Power, Ltd.)

モジュール⁽⁴⁾を2台並列に接続し、酸素吹IGCCとCO₂分離回収設備に燃料電池を組み合わせた火力発電システムとしての基本性能、運用性、信頼性の検証と実現に向けた検討を行う。Table 6に第3段階の実証試験目標を示す。

Table 6 Demonstration targets in the third step

実証試験目標
CO ₂ 分離・回収型IGFC商用機（500MW級）として、CO ₂ 回収率90%の条件で、発電効率47% ^{*1} （送電端、HHV ^{*2} ）程度の見通しを得る。

※1：発電効率には分離回収プロセスまでを含む（貯留に係る動力は含まない）。

※2：高位発熱量基準

5.2 第3段階実証事業の進捗状況

第3段階は2019年3月に事業を開始し、設備の詳細設計を経て2021年3月に建設工事を着工した。実証試験は2022年3月から開始する計画である。Fig. 15にSOFCモジュールの水切り及びFig. 16に現在の建設状況を示す。



Fig. 15 Landing SOFC module (August, 2021)



Fig. 16 Third step construction status (August, 2021)

6. CO₂有効利用に向けた取り組み

当社では現在、第2段階で回収したCO₂を液化・輸送し、有効使用するカーボンリサイクル実証の検討を進めている。なお国内においても、すでにCO₂有効利用は実施されており、例として、電源開発㈱が北九州市でカゴメ株式会社と共同運営しているトマト菜園や微細藻類からバイオ燃料を生産する研究、中国電力㈱などが開発した環境配慮型コンクリート「CO₂-SUICOM」がある⁽⁵⁾。今後こうした利用先に対し、CO₂有効利用の可能

性を追求していく所存である。

また、2022年度には、CO₂分離回収・液化プロセス実証試験を実施する計画である。この実証試験は、カーボンリサイクルの普及に向け、石炭火力由来CO₂の液化・供給を視野に入れた「物理吸収法+CO₂液化プロセス」の最適システムの検討を目的としている。現在、2022年度の実証試験開始に先立ち、CO₂分離・回収型酸素吹IGCC設備への液化CO₂製造設備の追設 (Fig. 9) に向け、機器製作、据付準備を行っている。

7. CO₂有効利用拠点化推進事業

現在、大崎上島の実証研究拠点においては、複数の企業や大学等が、CO₂有効利用コンクリートや化成品、バイオプロセス、微細藻類といったカーボンリサイクル技術の実証試験を実施することとなっている。⁽⁶⁾

当社は、研究拠点化に向けた土地整備や、CO₂分離回収設備からのCO₂など各種研究に必要なユーティリティの供給を行う計画である。本事業は2020年7月に開始し、研究拠点に係る設計を経て、2021年4月に整地工事を着工した。Fig. 17にCO₂有効利用拠点の実証エリアを示す。今後は研究事業者と調整を行いながら、拠点整備を進めていく。



Fig. 17 Demonstration area for effective use of CO₂

8. 今後の展望

本プロジェクトは、クリーンコールテクノロジーの1つであるIGCC / IGFC及びCO₂分離回収の実現に向けた取組みである。現在実証試験中である第2段階のCO₂分離・回収型酸素吹IGCCにより、燃焼前CO₂分離回収技術を確認することで、カーボンリサイクル技術やCO₂回収貯留 (Carbon dioxide Capture and Storage) との組み合わせにより、ニアゼロエミッション火力の実現や水素製造への活用が期待される。特にカーボンリサイクル技術については、「カーボンリサイクル技術ロードマップ⁽⁷⁾」が策定されており、今後は様々な技術の開発、及び普及を目指していくこととなる。当社においても、大崎上島の実証研究拠点化及びCO₂分離回収設備からのCO₂供給を通じて、カーボンリサイクル研究の推進に貢献していく所存である。

さらに、第1段階の酸素吹IGCCは、高い発電負荷運

用性による再生可能エネルギーとの調和、第3段階のCO₂分離・回収型IGFCは、CO₂を分離回収しつつ更なる高効率発電の実現を可能とする技術であり、これは「3E+S」を基本とする日本のエネルギー政策にも貢献できると考えている。また、電源開発(株)は2030年で運転開始後50年を迎える松島地点において、既設発電所に新たにガス化設備を付加するアップサイクルを行うことを目指しており、本プロジェクトを通じて実証した成果を初めて商用化する考えを表明している⁽⁸⁾。

今後も大崎クールジェンプロジェクトの完遂、及び大崎上島のCO₂有効利用拠点化に向け、安全・品質の確保を第一とし、環境保全に万全を期しながら、着実に進めていく所存である。

謝辞

本プロジェクトは、EAGLEパイロット試験、NEDO共同研究の「燃料電池対応型石炭ガス化複合発電最適化調査研究」の成果を反映したものであり、経済産業省、NEDO、その他多数の関係各位のご支援、ご指導に深く感謝の意を表すとともに、引続きご支援、ご指導をお願いしたい。

参考文献

- (1) 次世代火力発電の早期実現に向けた協議会、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、<https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/jisedai_karyoku/pdf/004_02_00.pdf> (参照日 2021年8月27日)。
- (2) 経済産業省、カーボンリサイクルについて、<https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/carbon_recycling/> (参照日 2021年8月27日)。
- (3) 経済産業省、カーボンリサイクル3Cイニシアティブ、<<https://www.meti.go.jp/press/2019/09/20190925005/20190925005-1.pdf>> (参照日 2021年8月27日)。
- (4) 富田 和男, 河戸 希美, 小林 大悟, 加藤 芳樹, 末森 重徳, 浦下 靖崇, SOFC-MGTハイブリッドシステムの市場導入に向けた取り組みについて, 三菱重工技報, Vol.55, No.4 (2018)。
- (5) 電源開発(株), 中国電力(株), 次世代石炭火力発電所から回収したCO₂有効利用に向けた検討について <<https://www.energia.co.jp/assets/press/2019/p190605-1a.pdf>> (参照日 2021年8月27日)。
- (6) カーボンリサイクル産学官国際会議2020, カーボンリサイクル実証研究拠点の整備・運用及び実証研究に関する取り組みについて <<https://carbon-recycling2020.go.jp/movie/r-info-1.pdf>> (参照日 2021年8月27日)。
- (7) 経済産業省、カーボンリサイクル技術ロードマップ <<https://www.meti.go.jp/press/2019/06/20190607002/20190607002.html>> (参照日 2021年8月27日)。
- (8) 電源開発(株), GENESIS松島計画の環境影響評価実施に向けた準備開始について <https://www.jpower.co.jp/news_release/2021/04/news210416_2.html> (参照日 2021年8月27日)。

特集：至近の火力電源の運用・建設状況と将来火力発電技術の展望

CO₂分離回収設備の商用化に向けた最新動向

Latest Trends in Commercialization of Carbon Capture Plant.



長谷川 圭介^{*1} 千葉 典子^{*1}
HASEGAWA Keisuke CHIBA Noriko

キーワード：CO₂分離回収技術，CCS，CCU

Key Words：Carbon Capture Technology，Carbon Capture and Storage，Carbon Capture and Utilization

1. 緒言

地球温暖化は世界共通の重要課題であり，2015年12月にパリで開催されたCOP21を経て地球温暖化対策をめぐる包括的な合意（パリ協定）が2016年11月に発行された。パリ協定では世界の平均気温上昇を産業革命前と比較し，2度未満に抑えることが挙げられている。

この目標達成のためには，温室効果ガスの排出削減が必要であり，火力発電所や産業分野で発生する排ガスに含まれるCO₂を分離回収して地中に隔離・貯留するCCS（Carbon dioxide Capture and Storage）及びCO₂を有効利用するCCU（Carbon dioxide Capture and Utilization）が注目されている。

東芝エネルギーシステムズ(株)は，これらCCSやCCUで重要な役割を果たす，排ガスからのCO₂分離回収技術の開発と実用化を進めている。ここでは，当社のCO₂分離回収技術の取り組みを紹介する。

2. CO₂分離回収技術

2.1 CO₂分離回収方式

火力発電所で発生する排ガスに含まれるCO₂を対象とした場合のCO₂分離回収技術は，Fig. 1に示す燃焼後回収方式，酸素燃焼方式及び燃焼前回収方式の三つに大別され，当社は，排ガスからCO₂を回収する燃焼後回収方式を採用している。この方式は，新設設備と既設設備の双方に対して適用できること，火力発電所で発生する排ガスのみならず産業分野で発生する排ガスにも適用できることや排ガス中CO₂の一部だけを回収できるといった柔軟な運用が可能であるなどの多くの利点を有する。

2.2 化学吸収法による燃焼後回収方式

燃焼後回収方式によるCO₂分離回収技術にはFig. 2に

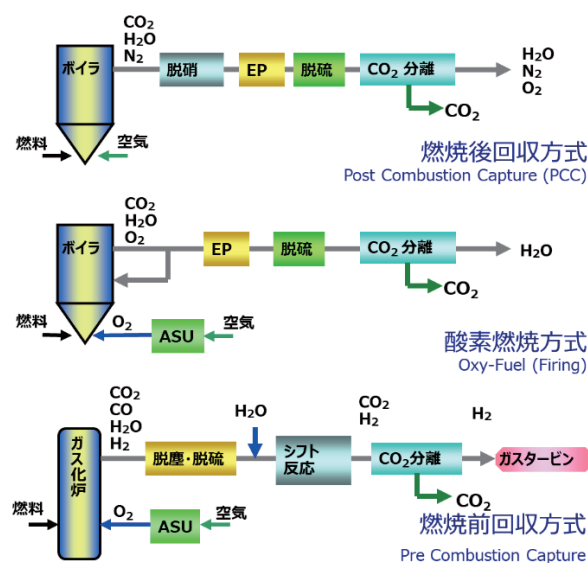


Fig. 1 Comparison of CO₂ capture technologies applied to thermal power plants

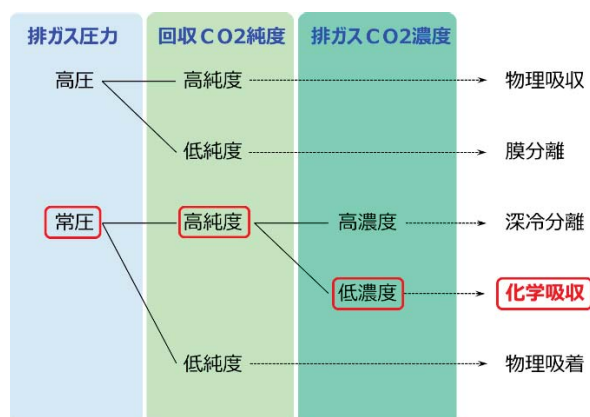


Fig. 2 Principal method of CO₂ capture

示すようにいくつかの方式があるが，CO₂濃度が比較的低く，常圧の排ガスからのCO₂分離回収に適した化学吸収法を当社は採用しており，アミン吸収液を用いている。Fig. 3にアミン吸収液の特性を示す。低温環境下

原稿受付 2021年 9月24日

^{*1} 東芝エネルギーシステムズ(株)
パワーシステム事業部 ヒートサイクル計画・技術部
CO₂分離回収開発・拡販グループ

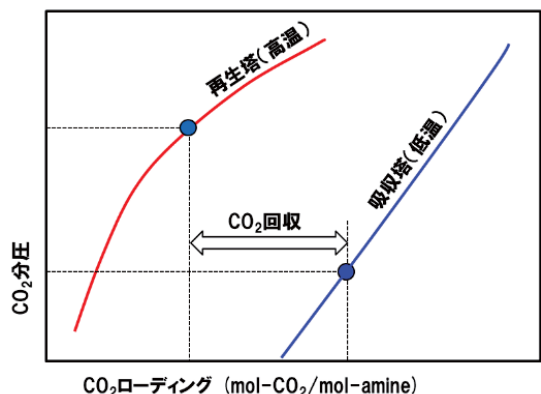
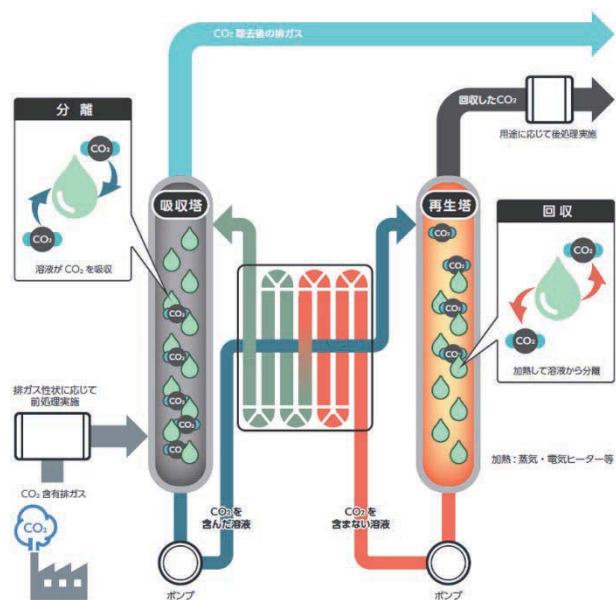


Fig. 3 Characteristics of amine solvent

では主にCO₂を選択的に回収し、高温環境下ではCO₂を乖離するというアミン吸収液の特性を生かすことで排ガスからCO₂を選択的に分離回収することが出来る。

ここで、化学吸収法のフローをFig. 4に示す。

Fig. 4 Flow diagram of CO₂ capture system

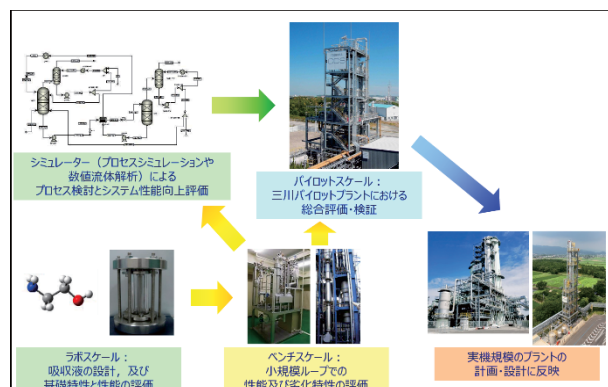
CO₂を含んだ排ガスは吸収塔下部から導入され、吸収液は上部から供給される。塔内では両者が気液接触し、低温でCO₂を吸収するアミン系吸収液の特性によりCO₂が気相から液相に移行する。CO₂を含んだ吸収液は再生熱交換器と称する熱交換器で昇温され再生塔に移送される。再生塔では、高温で放出反応が起こるアミン系吸収液の特性により、CO₂が液相から気相に移行する。この反応は吸熱反応なので、反応熱を供給し続ける必要がある。この熱源として蒸気等を用いる。CO₂を放出した吸収液は再生熱交換器で冷却されて吸収塔に送られる。

このように、吸収液はプラント内を循環しCO₂の分離回収を連続的に行う。

3. 東芝エネルギーシステムズの取り組み

3.1 パイロットプラントについて

当社のCO₂分離回収技術の開発・検証・適用のフローをFig. 5に示す。

Fig. 5 Flow of processes for development, verification, and application of CO₂ capture technologies

プロセスシミュレーションや数値流体解析を適宜活用しながらラボスケールからベンチスケール、パイロットスケールへとスケールアップし、得られた知見を反映して実機のプラントの設計を行っている。ここで、福岡県大牟田市にある(株)シグマパワー有明 三川発電所内に設置したパイロットプラントの外観をFig. 6に示す。



Fig. 6 Carbon capture pilot facility at Mikawa Power Plant

このパイロットプラントは2009年より運転開始しており、発電所の排ガスの一部を処理して一日あたり10トンのCO₂を分離回収する能力がある。このパイロットプラントを用いて、システム性能や実排ガス条件下における運転性・運用性・保守性などを検証し、その結果を実機規模のプラントに適用している⁽¹⁾。

例えば、再生塔で反応に必要な熱を供給するために、一般的には発電用蒸気の一部を抽気して熱源として用いるが、処理する排ガス量が膨大なので必要な供給熱量も

非常に大きく、発電効率を低下させる原因となる。これを抑制するために、反応熱の小さい吸収液を開発するとともに、熱回収プロセスの採用や再生熱交換器の最適設計によって、プラント内での回収熱量の増加を図っている。

また、アミン系吸収液を用いた化学吸収法では、吸収塔から大気へ排出されるCO₂回収後の排ガスに吸収液由来の微量のアミン成分が含まれ、これが環境に影響を与える可能性が指摘されており、この排ガスの実態調査及び排出されるアミン成分量を削減する技術の開発を行っている。

3.2 発電所への展開

3.2.1 環境省・環境配慮型CCS実証設備について 当社は、三川発電所の隣接地に、この発電所の排ガスからCO₂を分離回収する大規模実証設備を建設し、2020年より運用を開始した (Fig. 7)。この実証設備と三川発電所の関係をFig. 8に示す。



Fig. 7 Carbon capture demonstration facility at Mikawa Power Plant

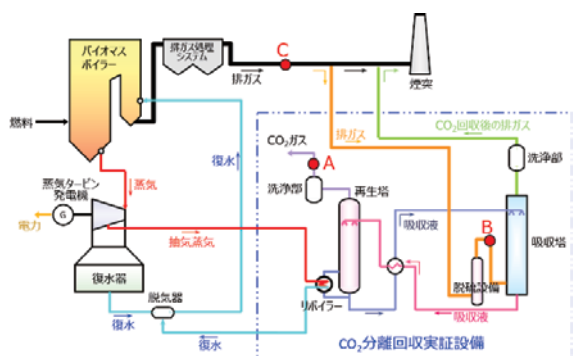


Fig. 8 Interaction between Carbon capture demonstration facility and Mikawa Power Plant

これは、環境省の「環境配慮型CCS実証事業」として、みずほリサーチ&テクノロジーズ㈱を取りまとめ機関とする複数の法人で採択された事業の一環として実施したものであり、CO₂分離回収実証設備の設計・建設・運用を当社が担当した。

この実証設備の特徴は、以下の2点である。

まず、回収するCO₂の量が、火力発電所から排出されるCO₂量の50 %以上にあたることであり、これは、世界的にも数少ない高い値である。このような高い回収率でCO₂を分離回収する際は、必然的に大量の発電用蒸気をかなりの割合で抽気することになり、火力発電システムへの影響が大きい。

次の特徴は、三川発電所はパーム椰子殻 (Palm Kernel Shell) を燃料としたバイオマス発電を行っているが、本設備はバイオマス火力発電所の排ガスからCO₂を分離回収する世界初の大規模設備であることである。

化石燃料である石炭などの燃焼に伴って発生するCO₂を分離回収して貯留することは、地中に存在していた炭素成分が燃焼により気相中に一旦移行し、これを回収して地中に戻すことになるので、炭素循環の観点から見ると“カーボンニュートラル”になる。一方、大気中のCO₂を光合成で固定化したバイオマスを燃焼し、これに伴って発生するCO₂を分離回収して貯留すれば、大気中に存在していた炭素成分を地中に隔離することになり、過去に排出された大気中に蓄積したCO₂を除去する”ネガティブエミッション”を実現することになる。

後者の手法はBECCS (Bio-Energy with CCS) と呼ばれ、IPCC (気候変動に関する政府間パネル) が発行した第5次評価報告書では、地球温暖化抑制のために重要な役割を果たせる技術の一つとして位置付けられている。

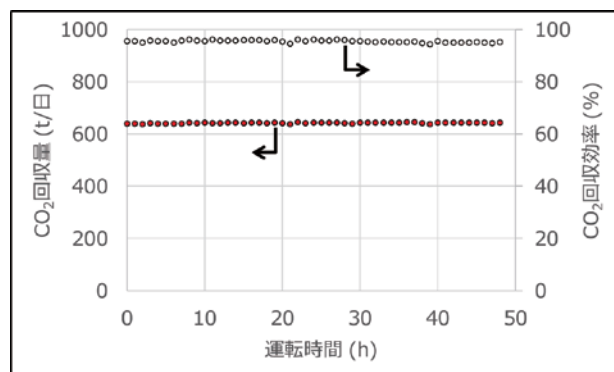
この実証設備の設計においては、三川パイロットプラントなどで得られた知見を十分に反映している。2018年2月より機器の納入・据付を行い、試運転を経て2020年10月から運用を開始した⁽²⁾。

1) 運用結果 (CO₂の安定回収)

この実証設備を運用した際の、CO₂回収量とCO₂回収効率の推移をFig. 9に示す。CO₂回収量は、Fig. 8の再生塔出口のA点において得られた計測データから算出した。またCO₂回収率は、吸収塔入口のB点での計測データから実証設備に流入する排ガス中のCO₂量を算出し、式(1)により求めた。

$$\text{CO}_2 \text{ 回収効率} = \frac{\text{CO}_2 \text{ 回収量}}{\text{実証設備流入CO}_2 \text{ 量}} \times 100 \quad (1)$$

各プロットは1時間平均値であり、例えば回収量が600t/日の場合は、1時間あたり25tのCO₂を回収していることになる。この48時間においては、平均して640t/日のCO₂を三川発電所の排ガスから安定して回収できていること、およびCO₂回収効率は平均で95 %に達していることが確認でき、前述のパイロットプラントや当社が納入した佐賀市清掃工場向けCO₂分離回収プラント⁽³⁾における10t/日の回収量からの約60倍のスケールアップを達成することができた。

Fig. 9 Trend of CO₂ capture quantity and CO₂ capture rate

また、式(2)により算出されるCO₂回収率は平均で54%となり、火力発電所から排出されるCO₂量の50%以上を回収するという当初の目標を達成できた。

$$\text{CO}_2\text{回収率} = \frac{\text{CO}_2\text{回収量}}{\text{発電所排ガス中CO}_2\text{量}} \times 100 \quad (2)$$

なお、上式における発電所排ガス中CO₂量は、Fig. 8のC点において得られた計測データから算出した。

2) 運用結果（アミン成分排出量の削減）

3.1節に記載のように、吸収塔から大気へ排出されるCO₂回収後の排ガスに吸収液由来の微量のアミン成分が含まれ、これが環境に影響を与える可能性が指摘されているが、この量を削減すべく、Fig. 8のように吸収塔の出口に洗浄部を設置する。この実証事業においては、スプレー洗浄方式によるアミン成分排出量削減の技術開発を行い、この洗浄機構を実証設備の吸収塔出口に設置した洗浄塔に組み込んだ（Fig. 10）。

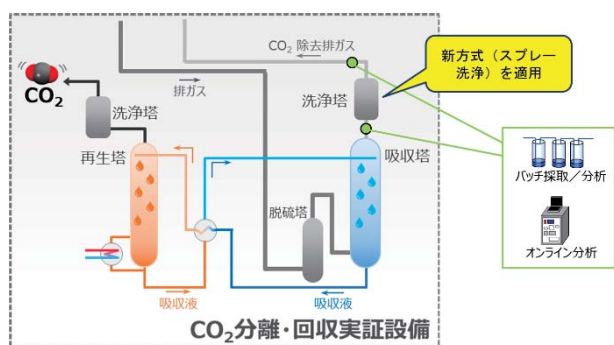


Fig. 10 Washing tower installed after absorber and measuring point of amine concentration

運用の結果を三川パイロットプラントの場合と比較してFig. 11に示す。双方において洗浄部入口のアミン成分濃度を1として規格化を行った。三川パイロットプラントにおいては、排ガスが洗浄部を通過する際にアミン成分濃度が入口の6割程度にしか低下しないのに対し、実証設備においては1割以下にまで低下することがわかる。

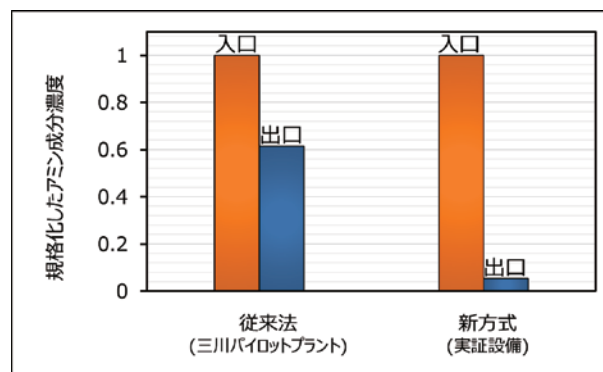


Fig. 11 Comparison of absorber washing tower performance between conventional method and new method

3.2.2 コンバインドサイクル発電への適用について

化学吸収法を使用したCO₂分離回収技術は、ガスタービンコンバインドサイクル火力発電所にも適用することが可能である。ガスタービンコンバインドサイクル発電設備にCO₂分離回収設備を設置した場合のイメージ図をFig. 12に示す。

3.2.1項で紹介したバイオマス火力発電所や石炭火力発電所では排ガス中のCO₂濃度が約12～14%であるのにし、天然ガス焚きのガスタービンコンバインドサイクル火力発電所では排ガス中のCO₂濃度が約4%であり、前者と比較して排ガス中のCO₂濃度が低いことが特徴である。

排ガス中のCO₂濃度が低い場合は、濃度が高い場合と比較して、高いCO₂回収効率を達成するためには再生塔により多くの熱エネルギー（単位CO₂回収量あたり）を投入する必要がある。

また、ガスタービンコンバインドサイクル発電設備の排ガス中のCO₂濃度が低いため、仮に石炭火力発電所に設置したCO₂分離回収設備と同程度のCO₂回収量をガスタービンコンバインドサイクル発電所で達成しようとする場合は、石炭火力発電所に設置する場合と比較してより多くの排ガスをCO₂分離回収設備に通気する必要があるため、吸収塔をはじめとした各塔やフィードガスブロワ等の各種機器の寸法が大きくなり、設備のコストや必要敷地面積が大きくなることが課題となる。

一方で、天然ガスを燃料とするガスタービンコンバインドサイクル発電設備の排ガス中には硫黄分が含まれている場合もあるが、無視しうるほどの極微量である。この点はCO₂分離回収設備の設計上のメリットとなる。

石炭を燃料とする発電設備では排ガス中の硫黄分除去のために脱硫設備が設置されているが、吸収液の劣化低減、性能維持のために、吸収塔の上流側に脱硫設備を追加で設置する必要がある。これに対してガスタービンコンバインドサイクル発電設備の排ガスよりCO₂を分離回収する場合には、吸収塔上流側に脱硫設備の設置は不要と考えており、本設備に係る建設コストや運転コスト、設置エリアが不要になる。

ただし、ガスタービンコンバインドサイクル発電設備では排ガス中のCO₂濃度が低くなる一方でO₂濃度が高くなるため、これが吸収液の劣化に与える影響は考慮する必要がある。

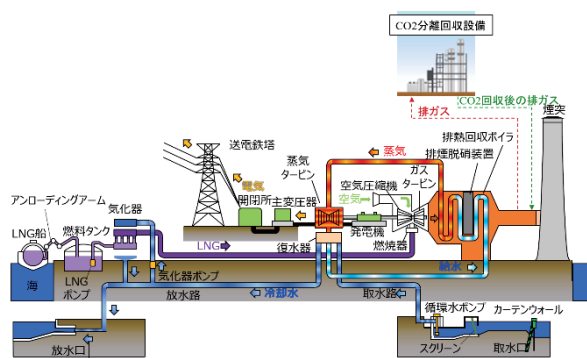


Fig. 12 Application of carbon capture facility for gas turbine combined cycle plant

3.3 佐賀市清掃工場向けCO₂分離回収設備

当社は、清掃工場由来CO₂の有効活用を検討するための、佐賀市「清掃工場バイオマス利活用促進事業」に2013年から参画し、2013年10月にCO₂回収量が10～20kg/日の小型実験プラントを佐賀市清掃工場に納入した⁽³⁾。その外観をFig. 13に示す。



Fig. 13 Small pilot and test system at Saga waste incineration plant

佐賀市の清掃工場でのこの運用を通じて、回収したCO₂の純度が高く、農業などに提供可能であることがわかった。一方で、清掃工場排ガスについては、これまで当社が取り扱ってきた火力発電所排ガスとは異なる成分を含有しており、特にごみ中の塩化物由来の塩化水素(HCl)が、排出基準値内ではあるが数十mg/Nm³の濃度で排ガス中に含まれるため、吸収液劣化対策のみならずプラント構成部材の腐食対策が必要となることがわかった。また、火力発電所とは異なり排ガス中CO₂濃度の変動が非常に大きいことも明らかになった。

この小型実験プラントの運用で得られた知見と、前述の、種々の濃度のCO₂含有排ガスをテスト可能な三川パイロットプラントでの知見を組合せることにより、清掃工場排ガスから一定量のCO₂を安定して分離回収できる見通しが得られた。佐賀市は環境省の「二酸化炭素回収機能付き廃棄物発電検討事業」に採択され、また当社は佐賀市の公募に対して回収量10t/日のCO₂分離回収商用プラントを提案し、これの受注に至った。

2016年8月から稼働を始めた本プラントは、清掃工場で商用利用される世界初⁽⁴⁾のCO₂分離回収プラントであり、回収したCO₂は藻類の培養などに活用するために、佐賀市が事業者売却している。Fig. 14にこのプラントの外観を示す。



Fig. 14 CO₂ capture system at Saga waste incineration plant.

本プラントは、排ガス中の塩化水素を主に除去する排ガス前処理設備、CO₂の分離回収を行うCO₂分離回収設備、CO₂の圧縮と貯蔵を行って適宜必要量を需要家に供給するためのCO₂貯留設備から構成される。清掃工場からは、Fig. 15に示すように、排ガスに加えて蒸気の供給を受けて、CO₂放出反応に必要な熱量を確保している。

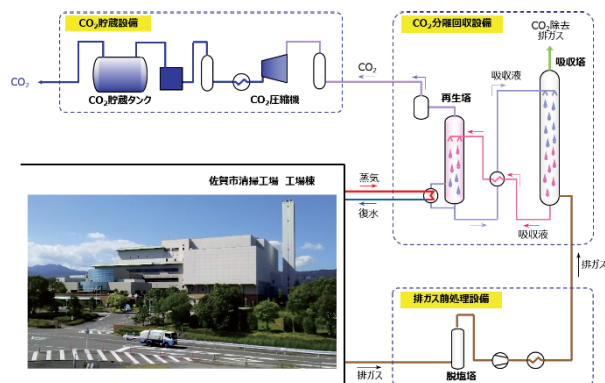


Fig. 15 Outline flowchart of CO₂ capture system at Saga waste incineration plant

次に、上述の特徴を有する清掃工場排ガスへの対策および運用実績について具体的に述べる。

第一は、清掃工場排ガスに含まれる腐食成分への対策である。小型実験プラントの運用において、排ガス中に存在するHClが配管に影響を与え、排ガス配管の腐食が確認された。この結果は、回収量10t/日のCO₂分離回収商用プラントの設計に反映し、高耐食性の配管を採用することで、問題を解決した。

第二は、排ガス中CO₂の大きな濃度変化への対策である。Fig. 16に運転実績の一例を示す。このように清掃工場排ガスでは、排ガス中のCO₂濃度が短周期的で上下に大きく変動していることが分かる。このCO₂濃度変化に追従し、CO₂を一定量に回収する為に、本プラントでは、運転自動化によるプロセス設計を行った。この図によれば、CO₂濃度の大きな変動にも関わらず、回収CO₂流量はほぼ一定の値を示していることがわかる。これにより、運転員の負荷軽減及びプラント安定化を達成することが出来た。

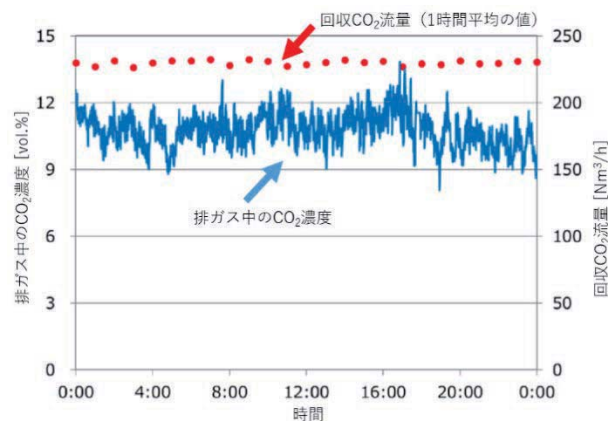


Fig. 16 Trend of CO₂ concentration in the exhaust gas and flow rate of captured CO₂.

また、Fig. 17には、排ガス中CO₂濃度と回収CO₂流量の実績値の一例を示す。上述のようにプラント運転の自動化を図ったことで、排ガス中CO₂濃度が大きく変動した場合でも、目的のCO₂回収量を容易に維持することが出来た。

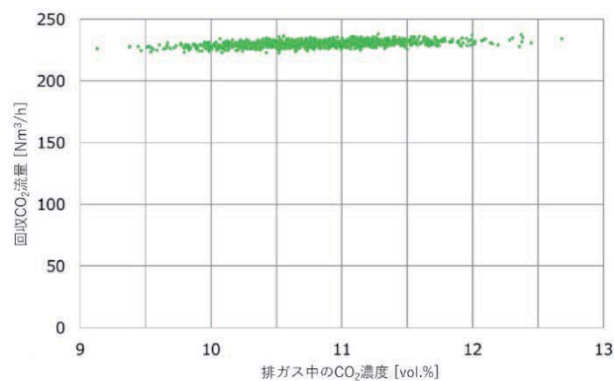


Fig. 17 Captured CO₂ flow rate

4. あとがき

当社のCO₂分離回収技術やその適用事例を環境省の委託事業で建設した実証設備および佐賀市清掃工場向けに納入した商用設備を例に挙げて述べた。また、コンバインド火力発電所への適用する場合のメリットや課題等について述べた。

今後も地球温暖化抑制に寄与するために、CCSやCCUの早期実現に向けて、当社が開発した化学吸収法によるCO₂分離回収技術をこれらのCO₂排出源に適用していくとともに、さらなる技術開発・実証を進めていく。

参考文献

- (1) 北村英夫, 江上法秀, 大橋幸夫, 石炭火力発電所排ガスからのCO₂分離回収パイロットプラント試験, 東芝レビュー, Vol. 65, No. 8 (2010), pp. 31-34.
- (2) 東芝エネルギーシステムズ, “大規模CO₂分離回収実証設備の運転開始について”, プレスリリース&ニュース, <https://www.toshiba-energy.com/info/info2020_1031.htm> (参照2021-09-02).
- (3) Toshiba Clip, 佐賀市発で世界初 最先端のCO₂分離回収プラント, <<https://www.toshiba-clip.com/detail/3646>> (参照2021-09-02).
- (4) ニュースリリース (2016-08-10) 佐賀市清掃工場向け二酸化炭素分離回収プラントが稼働を開始, <<https://www.global.toshiba.jp/news/corporate/2016/08/pr1001.html>> (参照2021-09-02).

特集：至近の火力電源の運用・建設状況と将来火力発電技術の展望

次世代電力システムの展望と高効率火力発電への期待

Overview of Next Generation Power System and Expectations for High-Efficiency Thermal Power Generation



岸岡 伸和*1
KISHIOKA Nobukazu

キーワード：分散エネルギー、電力ネットワーク、アセットマネジメント、小型原子炉、タービン発電機

Key Words：Distributed Energy System, Power Network, Asset Management, Small Modular Reactor, Turbine Generator

1. 緒言

1990年代後半から日本の電力システムは、旧一般電気事業者による垂直統合型から、競争原理の導入による経済合理性・効率性を求める電気事業改革が進められ、2016年4月に小売全面自由化を達成、2020年4月には旧一般電気事業者の送配電部門の法的分離が完了した。

しかしその間、2011年に東日本大震災での東京電力福島第一原子力発電所事故、2018年以降は北海道胆振東部地震をはじめ、豪雪や豪雨、台風被害が頻発、大規模停電や長期間の停電が発生した。さらに世界的に低炭素化・脱炭素化に向けた取組みが強化され、2015年12月パリでの国連気候変動枠組条約第21回締約国会議(COP21)を経て、2020年10月菅内閣による2050年カーボンニュートラルが宣言された。

今後日本の電力システムは、安全最優先・安定供給を大前提に、電力制度の継続的改革による経済的合理性・効率性を維持・発展させながら、電力システムの強靱化向上と2050年カーボンニュートラルを達成することが求められる。

本稿では、次世代電力システムの展望として、現在行われている具体的な取組みを、国の動きを述べながら、当社の取組み紹介も交え概説する。最後に火力発電への期待を述べる。

2. 電力システムの状況と今後求められること^{(1),(2),(3)}

2.1 電力自由化の確実な進展

1995年に電気事業法が改正され発電事業への新規参入が可能となり、2000年3月に契約電力2,000kW以上の「特別高圧」を対象に電力小売が自由化された。以降、自由化領域を順次拡大、2004年から2005年にかけて契約電力50kW以上の「高圧」、そして2016年4月に「低圧」

が自由化され小売全面自由化を達成した。2020年4月には旧一般電気事業者の送配電部門の法的分離が完了した。2021年7月30日時点で登録小売り電気事業者数は729者となっている。

電力を取引する市場も順次開設、日本卸電力取引所(JEPX)が2003年に創設され、2005年4月から取引を開始、電力需要に必要な電力量(kWh価値)を対象に、一日前市場(スポット市場)、当日市場(時間前市場)、先渡市場で取引が行われている。

2020年には国全体に将来必要な供給力(kW価値)を取引する容量市場の初回オークションが開始され、2021年4月からは需給ギャップを埋める調整力(Δ kW価値)を取引する需給調整市場が開設されている。

2.2 電力システム強靱化への要求

2018年2月の福井県での豪雪、7月の西日本豪雨、9月の北海道胆振東部地震では道内全域に及ぶ大規模停電が発生した。さらに2019年9月の台風15号、10月の台風19号による送電設備の被害で大規模停電且つ停電復旧期間の長期化が発生するに至り、自然災害激甚化に対する電力システムのレジリエンス(強靱性)向上の重要性が改めて認識された。

総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 持続可能な電力システム構築小委員会などで対応が検討され、その検討結果は第201回通常国会に「エネルギー供給強靱化法案」として提出され、2020年6月に電気事業法などの一部を改正する法律(エネルギー強靱化法)が成立した。

同法案は、送配電網の強靱化として電力広域的運営推進機関に、将来を見据えた広域系統整備計画策定業務を課すことや、一般送配電事業者に対して既存設備の計画的な更新(アセットマネジメント)を義務化すること、災害に強い分散型電力システムを構築することなどを求めている。

原稿受付 2021年9月9日

*1 三菱電機(株) 電力システム製作所開発部長
〒652-8555 神戸市兵庫区和田崎町1-1-2

2.3 2050年カーボンニュートラル達成への要求

2018年7月にとりまとめられた第5次エネルギー基本計画においては、安全を最優先に、エネルギーの安定供給、経済性効率性の向上、環境適合性を同時達成する(3E+S)との原則の下、再生可能エネルギーの主力電源化に向けて最大限これを導入することが記載された。

2020年10月26日の菅内閣総理大臣所信表明演説において、2050年までにカーボンニュートラルを目指すことが宣言され、その後2021年4月の地球温暖化対策推進本部及び米国主催の気候サミットにおいて、「2050年目標と整合的で、野心的な目標として、2030年度に温室効果ガスを2013年度から46%削減することを目指す。さらに、50%の高みに向けて、挑戦を続けていく」ことが表明された。

2.4 今後の電力システムに対する要求

今後の電力システムにおいては、安全最優先・電力安定供給を大前提に、電力制度の継続的改革により経済的合理性・効率性を維持・発展させながら、電力システムの強靱化向上と2050年カーボンニュートラルを達成することが求められる。

以降の章では、本章で述べた「今後の電力システムへの要求」に対する具体的な取組みを概説する。

3. 分散エネルギーシステムの実現^{(1),(2),(3)}

3.1 需給一体型モデル(分散型エネルギーモデル)

2012年7月に固定価格買取制度(FIT)が導入されて以降、再生可能エネルギーの導入量が制度開始前と比べて約4倍、2020年9月末時点でFIT制度開始後に新たに運転を開始した設備は約5,824万kW、FIT制度の認定を受けた設備は約9,347万kWとなっている。加えて、2019年11月以降順次、FIT調達期間を終えた太陽光発電(卒FIT)が出現し始めている。

「大手電力会社が大規模電源と需要地を系統でつなぐ

従来の電力システム」から「分散型エネルギーリソースを柔軟に活用する新たな電力システム」へ、卒FIT含む様々な再生可能エネルギー電源の自家消費や地域内系統の活用を含む需給一体型の再生可能エネルギー活用モデルが求められている。

その需給一体型の再生可能エネルギー活用モデルを具現化するひとつの形が、VPP(Virtual Power Plant)である(Fig. 1)。VPPは、卒FIT含む様々な再生可能エネルギー電源や蓄電池、自家発電設備、さらには電気自動車(EV)といった電源・電力貯蔵装置を束ね、統合制御し、電力系統の安定性とエリア全体の需要と供給を最適化する。VPPは、電力系統への電力供給だけでなくデマンドレスポンスによるネガワット供給も提供、その供給力は卸電力市場、需給調整市場で売買される。その調整力は特高・高圧に限らず、低圧(配電網)の安定化へも寄与することが期待される。

当社は、電力ICTソリューションパッケージBLENder(ブレンダー)シリーズでVPPを構成する機能を網羅的にサポートする。電力網に分散している電源を統合制御し、電力系統を安定させるとともにエリア全体での需要と供給を最適化する。再生可能エネルギーや自家発電設備、蓄電池など様々な発電リソースの最適制御を行うための予測機能や電力取引機能、需要家の設備(太陽光発電など)や省エネ行動を活用し一般送配電事業者の要請に応じた調整力を供給するデマンドレスポンス、需要家の電力ピークカット/ピークシフト、BCP(事業継続計画)などの機能を提供する。

3.2 地域マイクログリッド

電力システムの強靱化の側面から、地域で再生可能エネルギー電源を自律的に活用する需給一体的分散エネルギーシステムである地域マイクログリッドの構築が求められる。地域内のエネルギー循環に留まらず、地域内経済循環を実現する形としての期待も大きい。

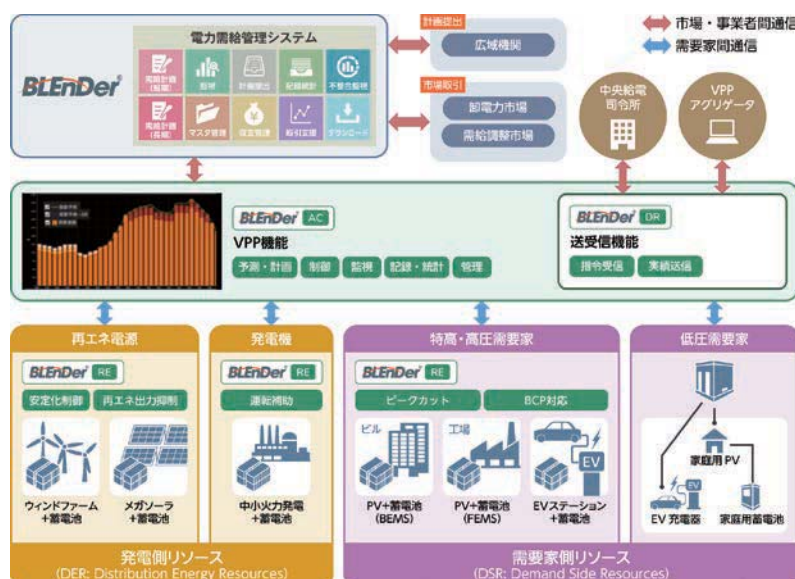


Fig. 1 Virtual Power Plant System

2020年6月に可決された「エネルギー強靱化法」は、地域マイクログリッド構築促進のため、地域マイクログリッドの担い手として期待するアグリゲーターを特定卸供給事業者として位置付けた。また地域内配電事業を可能とする配電事業者ライセンス制度を導入した。

地域マイクログリッドの構築は、導入コストに対する採算性の確保、電力システムに対する専門性の高さ、アグリゲータービジネスの活性化など課題はあるが、国による法的な整備と事業化支援への期待は大きい。2021年2月に分散型エネルギーを活用する事業の導入を加速するため、経済産業省 資源エネルギー庁及び環境省共催の「分散型エネルギープラットフォーム」が開催され約420の企業・団体が参加、地域マイクログリッドの構築や配電事業の実施に向けた意見交換が行われた。また地域マイクログリッド事業者向けに、一般送配電事業者や地元自治体などのステークホルダーとの調整や、事業を進めていく上での具体的な手順を示した「地域マイクログリッド構築のてびき」が経済産業省 資源エネルギー庁から発行されている。

当社は、電力ICTソリューションパッケージ BLEnDerによる機能の提供に加え、電力系統へ接続するための技術コンサルティングや電気品実装のエンジニアリングを提供し、地域マイクログリッドの促進に貢献している。

4. 次世代電力ネットワークの構築^{(4),(5)}

電力システムの強靱性を確保し、同時に再生可能エネルギーの大量導入に対応できる次世代型ネットワークへの転換が求められる。

総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会などで検討が進められており、2021年6月発行された「電力ネットワークの次世代化に向けた中間とりまとめ（案）」において、「系統の新設・増強」、「既存系統の有効利用」、「透明性・公平性の確保」を柱に次世代電力ネットワークの検討課題が整理されている（Table 1）。

Table 1 The issues of future electric power network

系統の新設・増強	・2022年度中を目処に送電網整備のマスタープランを策定
既存系統の有効利用	・日本版コネクト&マネージに取組む。2021年1月よりノンファーム型接続を空き容量のない基幹系統に適用 ・先着優先からメリットオーダーへ利用ルール見直し2022年度中に再給電方式を開始 ・将来の市場主導型（ゾーン制・ノードル制）への移行に向け検討
透明性・公平性の確保	・系統情報の公開・開示の高度化が必要 ・情報開示請求者の要件見直しやリアルタイムでのビジュアル化したデータ公開など

技術課題として電力系統安定性維持へも取り組む必要がある。再生可能エネルギー導入量が増加し太陽光発電

や風力発電といったインバータ電源（非同期電源）が増加する一方で、火力発電などの同期電源が減少する場合、慣性力が低下し、電力系統の安定性維持が困難となり、電源脱落時にブラックアウトとなる可能性が高まる。（慣性力は火力発電などのタービン及び発電機が回転し続ける力であり、電源脱落などによるエリア全体の周波数を維持して停電を防ぐことができる。）

再生可能エネルギー導入量を拡大しつつ、慣性力を確保するためには、「一定程度の同期電源の運転」、「同期調相機の設置」、「MGセットの設置」、「再生可能エネルギー・蓄電池の疑似慣性機能の開発」などの慣性力増加対策が考えられるが、設置コスト増に対する評価や新規の技術開発を待つ必要がある。

本課題に対しては、電力広域的運営推進機関の調整力及び需給バランス評価などに対する委員会、グリッドコード検討会などで、技術開発動向も見据えながら、コストと技術の両面で検討されている。

当社は、従来から電力系統保護・制御システム、電力系統監視制御システムを数多く提供してきており、最近では、分散型電源増大に対する系統安定性維持を目的に、FACTS（フレキシブル交流送電システム）、同期調相機などに力を入れている。

当社は、今後想定される低圧（配電ネットワーク）へ接続する分散電源の増加に対し、既存の配電ネットワークへの設備投資を抑えながら大量の分散電源の接続を可能とするDERMS（Distributed Energy Resource Management System）の技術開発にも取り組んでいる。分散電源の導入が先行する英国や北米で本技術のパイオニア企業であり多くの先進的なDERMS実証に取り組んでいるSmarter Grid Solutions Limited（SGS社）を2021年8月に買収した。当社が国内市場で培ってきた技術とSGS社の先進的なDERMS技術を融合し、次世代電力ネットワークの構築に貢献していく。

5. IoT活用した設備保全高度化とアセットマネジメント^{(1),(2),(3),(6)}

5.1 一般送配電事業者のアセットマネジメントの取組み

日本の電力システムを構成する設備は、日本の経済成長による電力需要拡大に伴い高度経済成長期、バブル期に大量に導入されており、導入から50年以上の高経年設備が多く存在する。またこれら大量の設備を保守・運用する人材の高齢化が進んでいる現状もある。他方、近年頻発する自然災害による大規模停電や送配電設備の被害により、電力システムの強靱化の重要性が高まっている。その様な状況の中で、次世代電力ネットワークの構築においては、極力既存設備を有効活用し再生可能エネルギーの大量導入に対応する方針が示された。

こうした環境変化に対応可能な電力システム強靱化を実現するための具体的な方策について、2019年11月以降、

総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 持続可能な電力システム構築小委員会などにおいて検討が進められ、電力システム強靱化に向けた具体的施策と共に、これを実行するために必要な投資の確保とコスト効率化を促す仕組みが議論された。そして2020年6月、「エネルギー強靱化法」が成立した。本法案においては、欧州の制度も参考に、国が一定期間ごとに一般送配電事業者の収入上限（レベニューキャップ）を承認することで、一般送配電事業者の投資の適切性及び効率性を定期的に審査すると共に、一般送配電事業者自らの効率化インセンティブを促す仕組みが整理された。そして、その仕組みの中で電力システムの維持・設備保全に対するアセットマネジメントを求める建付けとした。

アセットマネジメントとは、アセットの価値を最大化する企業の活動であり、ここでは電力システムを構成する設備をアセットと位置付ける。設備の故障確率と故障時の影響度を掛け合わせ（リスク評価と呼ぶ）、これを金銭化し、保全にかかるコストを踏まえ、最適な設備保全・投資を定量的に導出する。一般送配電事業者はこれを実施することを求められ、託送料金審査の中で国がアセットマネジメントの達成度合いをレビューする。レビューにあたっては、設備のリスク評価の標準的な手法を定めた「高経年化設備更新ガイドライン」が電力広域的推進機関により作成されている。一般送配電事業者は、本ガイドラインに沿ってアセットマネジメントを実行する。2023年4月1日の新託送料金制度開始に向けて、2021年度よりガイドラインの試行が行われる計画である。

当社は従来から電力・社会インフラの設備保全管理システムを提供し、電力・社会インフラの設備保全業務高度化とアセットマネジメントシステムの開発に取り組んできた。2017年よりIoTとAI技術により電力・社会インフラ設備の運用・保全業務の効率化を実現するIoTプラットフォームINFOPRISMの提供を開始、2018年に

は北米・欧州・豪州の電力・ガス・水道などインフラ設備のアセットマネジメントで実績のあるCopperleaf Technology Inc.（カナダ）とパートナー契約を締結、同社の電力・社会インフラ設備向けアセットマネジメント意思決定支援ソフトウェアC55（現在の製品名はCopperleaf Suite）の販売とシステム構築を行っている。

Copperleaf Suiteは、ISO55000シリーズに則り社会インフラ企業のアセットマネジメントを実現するパッケージソフトウェアであり、価値の概念により設備投資を見える化し最適化する。国がアセットマネジメントの制度導入を検討する際に参考にした欧州で適用されている。当社は、これとINFOPRISMを組み合わせ、日本の制度に合ったアセットマネジメントシステムをトータルで提供している（Fig. 2）。

5.2 発電所保安業務のスマート化

電気保安規制は、事業者の保安レベルの向上と事故率の低減の推移を見極めつつ、平成7年以降自己責任原則を重視した安全規制（自主保安）へ徐々に転換してきた経緯がある。昨今の電力システム改革の進展による発電事業への多くのプレーヤーの参入、電気保安人材の減少と高齢化による将来的な人材不足への懸念、新型コロナウイルス感染症で顕在化した現場作業改善の必要性など、新たな課題への対応が求められている。

その様な状況の中、2020年4月に経済産業省 電力安全小委員会 電気保安制度ワーキンググループが設置され、持続的な電気保安体制の構築に向けた電気保安制度の見直しと、新たな技術・課題への対応の検討が開始された。本検討では、電気保安の根幹である電気事故の防止を大前提に、事業者の保安力に応じた柔軟な規制、設備事故の教訓を次に繋げるPDCAサイクルの高度化などの既存制度の見直しと、新たな技術・課題への対応として新技術を見据えた技術基準などの整備、人材確保、スマート技術の導入支援などが行われている。

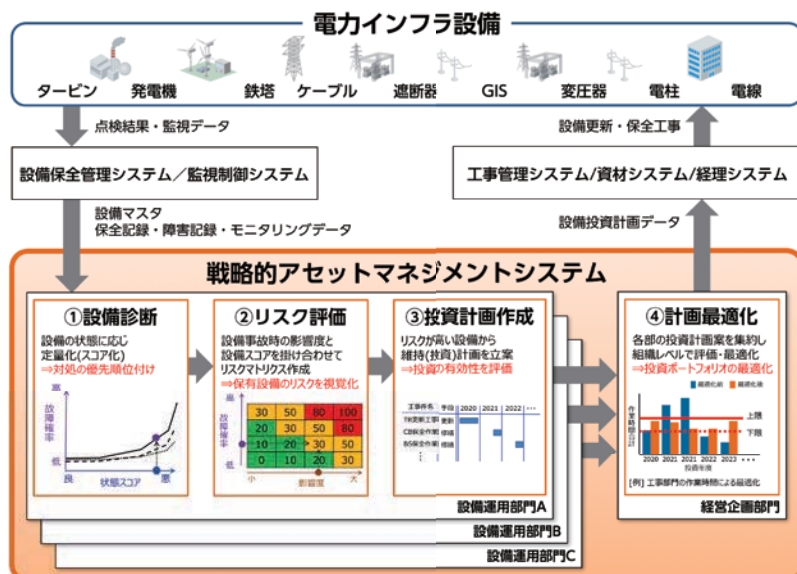


Fig. 2 Asset Management System

当社はIoTプラットフォームINFOPRISMにより、高度なセキュリティ機能を確保しながら、産業用通信規格に対応したIoTゲートウェイ装置によるさまざまな現場機器からのデータ収集と、収集したデータを当社AI技術Maisartにより分析し、設備診断・異常兆候を検知し、点検業務の効率化や設備運用・保全計画の最適化を支援する。発電所用計装制御システムMELSEP5／MELSEP5Gが保持するプラントデータをIoTデータとして活用するソリューションへも取り組んでおり、OT（運用制御技術）とITの融合を実現し発電所保安業務のスマート化に貢献する。

6. 安全な原子力発電の活用^{(1), (2), (7), (8), (9)}

原子力発電は、東京電力福島第一原子力発電所事故の後に新たに制定された新安全審査指針のもとで再稼働が進められ、2021年8月時点10基が再稼働を果たした。（大飯発電所3・4号機、高浜発電所3・4号機、美浜発電所3号機、玄海発電所3・4号機、川内発電所1・2号機、伊方発電所3号機）

国の2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略における成長が期待される14分野のうちの1分野であり、小型原子炉、高温ガス炉、核融合など、海外で進む次世代革新炉開発に官民で取り組むことがグリーン成長戦略として明記されている。2050年カーボンニュートラルの実現に向け、原子力発電を脱炭素の実用段階にある確実な選択肢のひとつとして位置付け、可能な限り依存度は低減しつつ、安全を確立した上で活用していく方針が示されており、2021年8月4日 経済産業省 総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会で示された2030年におけるエネルギーミックスにおいて、原子力の比率は20～22%と試算されている。

当社は、原子力発電所を統制する中央制御盤含む計装制御システム（MELTACシリーズ）、大容量タービン発電機をはじめとする電気関係設備、そして定期点検などアフターサービスを提供している。

原子力発電所の再稼働に向けた安全対策工事と並行して、より一層の安全性確保と生産性向上に取り組んでおり、計装制御システムへデジタル技術を適用するデジタルトランスフォーメーションを推進し、プラントデータ活用を軸に、発電所業務の安全・セキュリティの確保、合理化・高度化を提案中である。当社はこれまで、データダイオード装置やSIEM（Security Information and Event Management）などのセキュリティ製品を製品化してきた。さらに昨今、サイバー攻撃の脅威が増していることから、物理セキュリティとサイバーセキュリティを統合した高度な監視・運用の実現に向け、制御システムに対する高度なセキュリティ攻撃に備えて、物理的な侵入痕跡（カメラ画像、入退室履歴など）と電子的な侵入痕跡（操作ログ、認証など）の相関を分析し、サイバー／物理複合攻撃を未然に検知する機能の開発に取り組んで

いる。また、定期検査の合理的な短縮実現や業務合理化に向け、作業員の位置データ、作業進捗データなどを取得・管理・分析することにより、所内業務の効率化、ムダ作業の見える化に取り組んでいる。発電所内様々なデータ群（ビッグデータ）を一元管理し、これを活用し、さらに今後はAI技術を目的に応じ適用することで、発電所の安全性と生産性の向上を両立し、安全な原子力発電の実現に貢献していく。

当社は米国Holtec International社と共に小型原子炉SMR-160の開発にも取り組んでいる。小型原子炉は、安全性、短工期建設、分散エネルギーシステムへの適合性などの特徴を有し、実用化に向け各国で開発が進められている。2016年に共同開発契約を締結、初期段階からSMR-160の開発に参画し、Holtec International社が設計するプラントシステムの制御・保護機能を実現する計装制御システムを担当している。

7. 2050年カーボンニュートラルに向けた火力発電への期待^{(2), (5), (7), (8), (9)}

2050年カーボンニュートラル実現に向けた新たな目標を踏まえ、国は第6次エネルギー基本計画を策定中であり、「2050年カーボンニュートラル」、「2030年温室効果ガス2013年度比で46%削減、さらに50%の高みを目指して挑戦を続ける新たな削減目標の実現」に向けたエネルギー政策が議論されている。

2050年に向けて電力部門は、再生可能エネルギーや原子力など実用段階にある脱炭素電源を活用し着実に脱炭素化を進めるとともに、水素・アンモニア発電やCCUS／カーボンリサイクルによる炭素貯蔵・再利用を前提とした火力発電などのイノベーションを追求することが、目標達成のポイントとされている。

2021年8月4日に経済産業省 総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会で示された第6次エネルギー基本計画（素案）における2030年電源構成の試算状況はTable 2の通りとなっている。

Table 2 Estimate of energy mix for 2030 (provisional figures)

電源構成	2019年⇒現行目標	2030年ミックス (野心的な見通し)
再生可能エネルギー	18%⇒22～24%	36%～38%
水素・アンモニア	0%⇒0%	1%
原子力	6%⇒20～22%	20～22%
LNG	37%⇒27%	20%
石炭	32%⇒26%	19%
石油など	7%⇒3%	2%
(発電電力量) 10,650億kWh⇒約9,300～9,400億kWh		

火力発電はCO₂を排出する一方で、①安定して大きな供給力を持つこと、②需要に合わせて供給量を調整できる調整力を持つこと、③系統の安定性を保つ機能（慣性力など）を持つことから、太陽光発電や風力発電など

出力が変動する再生可能エネルギーを安定供給の面から支え、その導入拡大を支える重要な役割を担っている。

第6次エネルギー基本計画策定における議論においても、できる限り電源構成に占める火力発電比率は引き下げる方針ではあるが、電力の安定供給に必要となる設備容量は確保する方向性が示され、2030年における電源構成においては、調達リスク、発電量当たりのCO₂排出量、備蓄性・保管の容易性といった観点により、LNG、石炭、石油の適切な火力ポートフォリオが維持された。

2050年に向けては、非効率な火力発電のフェードアウトは求められる一方で、電力システム全体の安定性を確保する必要性から、次世代・高効率火力発電への期待は高い。

現在、アンモニア・水素などの脱炭素燃料の混焼やCCUS／カーボンリサイクルなどのCO₂排出を削減する機能といった脱炭素型火力発電への置き換えに向けた開発・実証が進められている。

当社は、ガスタービンコンバインドサイクルに適用する高効率タービン発電機を開発・提供しており、再生可能エネルギー導入拡大に伴うDSS (Daily Start and Stop) 運用への対応力強化を行うべく回転子疲労寿命評価技術の向上、起動時間短縮に対応可能な回転子の温度設計などの開発に取り組んでいる。

また、発電所の稼働率の維持・向上に貢献する高度な予防保全サービス技術として、タービン発電機の回転子を引き抜かずに異常の早期検知が可能なロボット点検、発電機の異常兆候を初期段階で検知するオンライン部分放電監視システムなどを開発して、アフターサービスの拡充を進めている。

8. 結言

1990年代後半から始まった電力システム改革は、電力自由化により達成した経済合理性・効率性を維持・発展させながら、強靱性向上と2050年カーボンニュートラル達成に向け動き出している。カーボンニュートラルの達成に向けては、産業・運輸・業務・家庭部門の電化が進み電力需要は増加すると想定される。電力供給と電力システム全体の安定性確保に寄与する火力発電は、脱炭素型への置換を進めながら、今後も重要な発電方式として、その技術進歩が期待される。

当社は100年という歴史の中で、日本の電力システムと共に歩み、技術を蓄積し、製品を提供してきた。今後も電力の安定供給の維持、2050年カーボンニュートラルの達成、そして持続可能な社会の実現に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) 経済産業省 資源エネルギー庁 令和2年度エネルギーに関する年次報告 (エネルギー白書2021)
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/> (参

照日 2021年9月9日)。

- (2) 経済産業省 資源エネルギー庁令和元年度エネルギーに関する年次報告 (エネルギー白書2020)
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/> (参照日 2021年9月9日)。
- (3) 経済産業省 資源エネルギー庁 総合資源エネルギー調査会 持続可能な電力システム構築小委員会 (令和3年8月10日 持続可能な電力システム構築小委員会第二次中間とりまとめ)
https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/system_kouchiku/pdf/t62022100902.pdf (参照日 2021年9月9日)。
- (4) 経済産業省 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会 (令和3年6月3日 電力ネットワークの次世代化に向けた中間とりまとめ (案))
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/033_04_00.pdf (参照日 2021年9月9日)。
- (5) 電力広域的運営推進機関 調整力及び需給バランス評価等に関する委員会 (令和3年2月15日 第54回 配布資料「再エネ主力電源化」に向けた技術的検討課題及びその対応策の検討状況について)
https://www.occto.or.jp/iinkai/chouseiryoku/2020/files/chousei_57_03.pdf (参照日 2021年9月9日)。
(令和3年5月26日 第61回 配布資料「再エネ主力電源化」に向けた技術的検討課題及びその対応策の検討状況について)
https://www.occto.or.jp/iinkai/chouseiryoku/2021/files/chousei_61_04.pdf (参照日 2021年9月9日)。
(令和3年8月23日 第64回 配布資料「再エネ主力電源化」に向けた技術的検討課題及びその対応策の検討状況について)
https://www.occto.or.jp/iinkai/chouseiryoku/2021/files/chousei_64_03.pdf (参照日 2021年9月9日)。
- (6) 経済産業省 第25回産業構造審議会 保安・消費生活用製品安全分科会 電力安全小委員会 (令和3年7月20日 電気保安制度ワーキンググループにおける検討事項)
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/hoan_shohi/denryoku_anzen/pdf/025_01_00.pdf (参照日 2021年9月9日)。
- (7) 経済産業省 革新的環境イノベーション戦略検討会 (令和2年1月21日 革新的環境イノベーション戦略)
<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/tougou-innovation/pdf/kankyousenryaku2020.pdf> (参照日 2021年9月9日)。
- (8) 内閣官房、経済産業省、内閣府、金融庁、総務省、外務省、文部科学省、農林水産省、国土交通省、環境省 (令和3年6月18日 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略)
<https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210618005/20210618005-3.pdf> (参照日 2021年9月9日)。
- (9) 経済産業省 資源エネルギー庁 総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 第48回会合 (令和3年8月4日 エネルギー基本計画 (素案②) の概要)
https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/2021/048/048_006.pdf (参照日 2021年9月9日)。

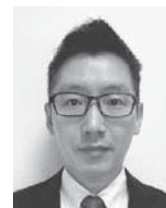
特集：至近の火力電源の運用・建設状況と将来火力発電技術の展望

負荷調整役割としての航空転用型ガスタービンと可搬型ガスタービン・パッケージFast Power 40の展望

Electrical Power Adjustment by Aero-derivative Gas Turbine and Prospect for Portable Gas Turbine Package; Fast Power 40



後藤 秀樹^{*1}
GOTO Hideki



安部 裕志^{*1}
ABE Hiroshi

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

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

1. 緒言

2050年のカーボンニュートラル目標達成に向けて，太陽光や風力に代表される再生可能エネルギーの有効利用および天然資源や枯渇性資源の効率的な活用と節減は大きな課題となっている。また，経済産業省資源エネルギー庁のエネルギー基本計画（素案）⁽¹⁾によると，2030年までに国内の電源構成に対する再生可能エネルギーの割合は36～38%となっており，2015年策定時の同割合である22～24%に比べると，より挑戦的な目標に見直されていることから，再生可能エネルギーは今後益々の普及が予想される。一方で，再生可能エネルギーの供給が不安定になったタイミングでは，瞬時かつ地域的なバックアップ体制の構築や，大規模ネットワークを補完するような，いわゆるエネルギーの地産地消の検討が大きな課題となっている。この問題に対応する解決策の一つとして，航空転用型ガスタービン発電設備の有効活用が挙げられる。

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。一般的に，エンジン単体で高効率，小型・軽量，保守が容易，急速起動，繰り返し発停能力などに優れるといった特長を持つ⁽²⁾。

当社では，従来より国内外に多数納入してきたガスタービンのパッケージの経験をもとに，GE社製航空転用型ガスタービンLM6000TMを原動機とした，発電用パッケージが持つ代表的な特長である「小型・軽量」「急速起動・負荷追従性」を最大限に生かした「Fast Power 40」⁽³⁾を市場投入する。

本稿では航空転用ガスタービンの特徴とFast Power 40の概要を紹介することで，2050年のカーボンニュート

ラル目標達成に向けた航空転用型ガスタービンの役割を紹介する。

2. 航空転用型ガスタービン発電設備⁽⁴⁾

2.1 航空転用型ガスタービンの特徴

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急速かつ大レンジで出力を変更する必要がある。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は，航空機用エンジンのコア部分を転用して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，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。また，効率よく大推力を得るために高負荷・高圧力比の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。さらに，航空機用エンジンの中でも，特にターボジェットや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開発・設計されている。

次に燃料の違いで考えると，航空機用エンジンでは液体燃料が用いられるが，発電用の航空転用型ガスタービンでは液体燃料に加えてガス燃料も用いられるため，航空転用型ガスタービン用の燃焼器は航空機用エンジンとは異なる仕様で特別に開発されている。

加えて，航空転用型ガスタービンのもつ負荷変動への

原稿受付 2021年9月13日

*1 (株)IHI原動機 陸用事業部 プラントエンジニアリング部
〒101-0021 千代田区外神田2-14-5

追従性や急速起動性能の高さという特長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NOx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ぐことでNOx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ことで成立している。

最後に、航空機用エンジンではエンジンの稼働率を向上させるために、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。

2.2 LM6000™の特徴

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を発電・機械駆動用に転用し、低圧圧縮機5段、高圧圧縮機14段、高圧タービン2段、低圧(出力)タービン5段から構成される2軸型構造のガスタービンである。シンプルサイクルでの発電効率が高く、同出力級では最高クラスの発電効率を持つ。1990年に発電用ガスタービンとして登場して以来、現在まで1,200台以上が生産されており、総運転時間も40,000,000時間を超える。中でも北米大陸(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、その多くが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。

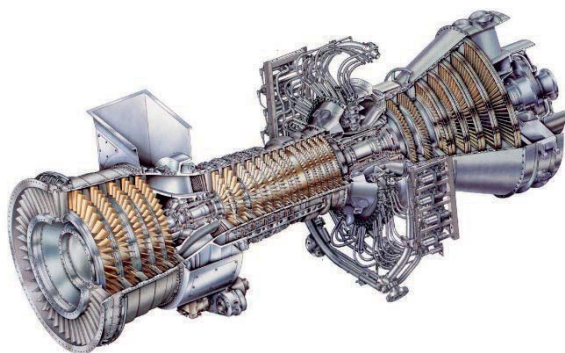


Fig. 1 LM6000™ gas turbine

LM6000™ガスタービンは、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の順守をもって安

全性を損なうことなくパージ工程を省略することによって急速起動を実現している。LM6000™ガスタービンでは、着火後に自立速度を通過し高圧軸のコアアイドル到達から低圧軸(出力軸)の最低回転数到達を待った後、低圧軸をシンクロアイドル回転数まで加速・到達させるが、この一連の流れが2分という非常に短い時間で行われる。シンクロアイドル到達後には2分の暖機運転を行い、発電機の系統接続を経て負荷を上昇させ、約4分で最大出力に到達することができる。

さらに近年、超急速起動として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、点火前モータリングの短縮、シンクロアイドル到達後の暖機運転の短縮、さらに負荷上昇率の引き上げにより、約1分で最大出力へ到達させることで実現した。Fig. 2に5分起動シーケンスの概略を示す。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により、負荷増減率は更に上昇させることが可能である。

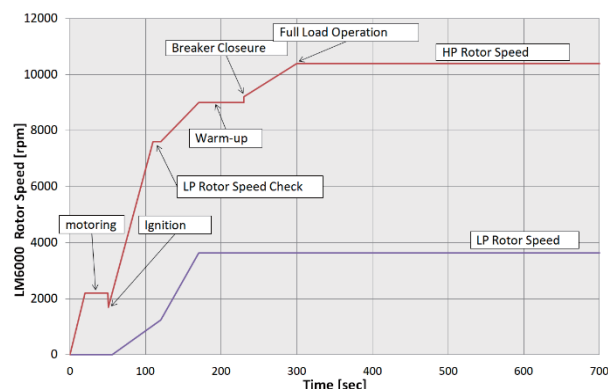


Fig. 2 LM6000™ fast start (5 minutes) trend

3. Fast Power 40⁽⁵⁾

当社は、持続可能な脱CO₂・循環型社会に向けた取り組みの一環として、航空機エンジン転用型ガスタービン・パッケージ「Fast Power 40」の市場投入を発表した⁽³⁾。従前より国内外に多数納入してきたガスタービンのパッケージの経験をもとに、付帯機器を予め組み込んだガスタービン発電設備として再構成することで、燃料供給および送電に必要な設備さえあれば、どこでも・すぐに電力を供給できることを新たな価値として付加した。主機にはLM6000™ガスタービンを採用すること



Fig. 3 Fast Power 40

で、航空転用型ガスタービンの特長である「小型・軽量」「急速起動・負荷追従」を維持している。Fig. 3にFast Power 40の外形図を示す。ここではFast Power 40が持つ「Fast Generation」「Flexible」「Utility Saving」「Cost Effective」の4つの特長と、Fast Power 40の適用事例、併せてIHI原動機の運用支援について説明する。

3.1 Fast Power 40 4つの特長

3.1.1 Fast Generation Fast Power 40も当社の従来型ガスタービン発電設備も、いくつかの機能を持った構成要素の組み合わせで成り立っている。従来型LM6000™ガスタービン・パッケージは、あらゆる環境・運用・メンテナンスに対して必要十分な構造とするために、構成要素には各種の付加機能を備えている。その一方で、輸送重量や据付面積において制約となることが多くなってしまい、航空転用型ガスタービンの特長を活かしきれない側面も持っていた。Fast Power 40は、その重量とサイズが適切になるように設計を大幅に見直し、当社の従来型LM6000™ガスタービン・パッケージと比べて重量と設置面積を約半分に削減することで、敷地の狭さを理由としたガスタービン発電設備の導入制限を緩和した。Fig. 4にFast Power 40と当社の従来型LM6000™ガスタービン・パッケージ外形図の比較を示す。併せて、構成機器の据付や接続方法を見直すことで、現地における基礎工事・足場工事や現物合わせの配管・配線作業に代表される多くの人と時間を要する作業を可能な限り削減し、2週間という短期間での据付を可能としている。設置場所の制約が小さいため、例えば本設の発電設備完成までの一時電源（ブリッジパワー）としての運用や、老朽化した既設ガスタービン発電設備の置き換えも可能となっている。

LM6000™ガスタービンの急速起動特性はFast Power 40でも引き続き備わっている。LM6000™ガスタービンの起動開始から5分で定格出力を発生させる急速起動特性に加え、必要な負荷の急変にも即座に対応する負荷追

従性によって、太陽光や風力に代表される再生可能エネルギーの出力変動や、需給バランスの中で出現する短時間のピーク需要を補間するピークカット電源としても活用することができる。

また、先に述べた特徴から、大規模災害等によって地域の電力網が寸断されたような場合においても、Fast Power 40を早期に設置・運転し、LM6000™ガスタービンが持つ40MWクラスの高出力によって、短期間で広い地域をカバーする非常用電源として活用することができる。

3.1.2 Flexible Fast Power 40は、据付工事の簡素化と据付工期の短縮を実現したのは先に述べたとおりであるが、更なる効果として、据付後の撤去・移設も容易である。常設のみでなく仮設・移設ができるガスタービン発電設備として、電力を必要とする国や地域、およびユーザーの事業や操業に合わせた設置・運用・移設の計画に柔軟に対応できるようになっている。

更には、運用条件や環境条件に合わせて様々なオプションを用意し、従来型LM6000™ガスタービン発電設備と同等の長時間運用や、各種信号の冗長化などにも対応できる仕様となっている。燃料の選択ができる点もLM6000™ガスタービンの特筆すべき特長の一つであり、ガス燃料・液体燃料の両方が使用可能であるのはもちろん、燃料の切り替えができるデュアルフューエル対応のガスタービンである。当然ながらFast Power 40もオプションによりデュアルフューエル対応ができる仕様となっており、ガスタービン・パッケージの改造無しで燃料の切り替えが可能である。これにより例えば、常用時はガス燃料により運用し、非常時は貯蔵しやすい液体燃料を使用するという運用や、あるいは国や地域によって変化する燃料の単価に応じて使用する燃料を切り替えての運用など、ユーザーのニーズに合わせたガスタービン発電設備の提供が可能になっている。

3.1.3 Utility Saving 発電設備においては運用に伴い、熱を発生させる機器も多く使われており、それらを冷却する設備が必要となる。Fast Power 40と同等の発電出力を持つ発電設備では、冷却方式として水冷を用いられることが多く、水資源が少ないという理由により発電設備を導入する障壁となる国や地域も多くみられる。そこで、Fast Power 40では主機となるガスタービンの潤滑油をはじめとして、全ての高温機器の冷却を100%の空冷化とすることで、ガスタービン発電設備の導入における水資源の障壁を解消した。これにより、大規模となりがちな水の貯蔵・輸送・調質・供給設備も不要となるため、ガスタービン発電設備全体としての小型化だけでなく、エネルギーや資源の削減につながることになる。水資源の問題で更に深刻なのは、ガスタービンから排気される燃焼ガス中のNOx排出量低減のために、一般には多量の水を必要とすることである。ガス燃料を用いた運用においては、水を使わずにNOx排出を低減す

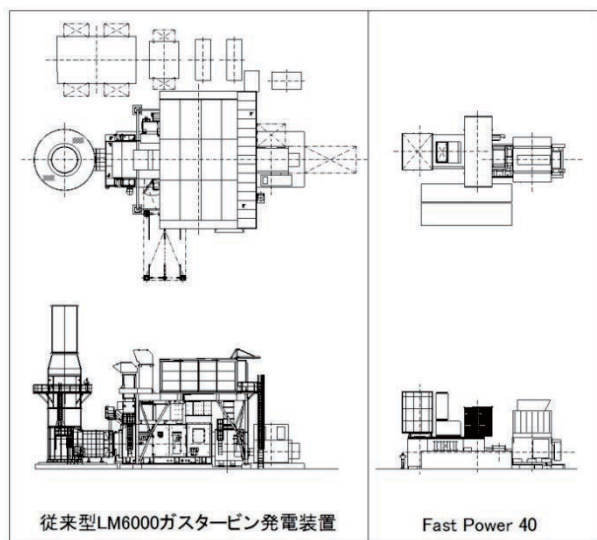


Fig. 4 Fast Power 40 vs conventional type size comparison

る技術を持ったガスタービンエンジンもみられるが、液体燃料を用いた運用となると多量の水が必要となるケースが多い。Fast Power 40の主機であるLM6000™ガスタービンは、ガス燃料であっても液体燃料であっても、水を使わずにNOx排出量を低減できるDLE (Dry Low Emission) 燃焼器を採用している。また、水噴射を必要とするガスタービンエンジンと比べて、DLE燃焼器は燃焼温度を高く維持できる特長を持っており、より発電効率の高い状態での運用が可能となっている。従って、Fast Power 40は完全空冷の実現により、冷却水ならびにNOx低減用水のどちらも使用することなく、NOx排出量の低減かつ高効率の連続運用によって、まさにエネルギーロスと資源ロスを最小限に留める設備となっている。

3.1.4 Cost Effective Fast Power 40は小設置スペース、短納期であることから、現地据付にかかる費用を当社の従来型LM6000™ガスタービン発電設備と比較して、大幅に削減することができたのは先に述べたとおりである。

Fast Power 40の主機であるLM6000™ガスタービンのシンプルサイクル効率が高くなっており、同出力級なら最高クラスの発電効率を持つことも先に述べた。このシンプルサイクルがFast Power 40の標準仕様となるが、従来のLM6000™ガスタービン・パッケージの設計を見直したものになるため、排気煙突以後の設計を変更することで、コージェネレーション、あるいはコンバインドサイクルへの適用も可能であり、ユーティリティさえあれば更なる総合効率の向上ができる。

LM6000™ガスタービンの整備に際しては、航空転用型ガスタービンの特長である小型・軽量をそのままに、ガスタービンのみを取り換えることで、ガスタービン発電設備の停止期間を最小として運用を継続させることが可能となっている。例えば、ユーザーのガスタービンを整備している期間は、当社の供給するリースエンジンを使用いただくことで、ガスタービンを整備している期間でもガスタービン発電設備を止めることなく運用いただけ、ユーザーの整備期間における経済的な損失を最小限に抑え、高稼働率を維持できる仕組みとなっている。

3.2 Fast Power 40 活用の場面

3.2.1 再生可能エネルギーとの協調 再生可能エネルギーの課題の一つとして、天候等を理由に電力需要に合わせた安定供給が難しい点が挙げられる。この再生可能エネルギーの出力変動に対し、航空転用型ガスタービンの特長である急速起動・負荷追従性・繰り返し発停能力に優れた点が役に立ち、出力調整電源として系統安定化に寄与ができる。出力調整機能は火力発電の得意とするところだが、低負荷運転は発電設備効率の低下を意味する。また、大規模火力発電になればなるほど、原子力発電と同様にベースロード運用を行うほうが有利である。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、急速起動特性を有する発電ユニットの運転台数、及び発停制御で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、設置個所も分散している。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クラスの高容量ガスタービン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。

Fast Power 40は、小設置スペースや輸送性に優れた利点などから、設置場所の制約条件が低く、選択肢が広いことは分散型電源の設置検討に大きな貢献ができる。

3.2.2 ブリッジパワー 枯渇性資源の効率的な活用方法として、GTCCやコージェネレーションシステムの利用があるが、そのような設備は完成するまでに時間がかかり、その間電力の供給は行えない。この解決策として、Fast Power 40のブリッジパワーとしての使用が挙げられる。Fig. 5に運用イメージを示す。ブリッジパワーとは、大容量発電設備完成までの期間の一時的な電源供給である。発電設備建設開始前後に、Fast Power 40を先行して設置することで、ユーザーは建設期間中に電力を利用することが可能となる。発電設備が完成した段階で可搬型ガスタービン・パッケージであるFast Power 40を撤去し、建設した発電設備に切り替えていただければ、電力使用までにかかる期間に対するユーザーの不安を軽減することができる。ブリッジパワーとしてのFast Power 40は、例えばリース契約とすることで、ユーザーへのコストへの影響は最小となる。

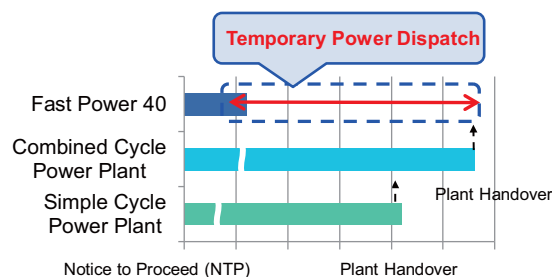


Fig. 5 GTCC construction plan with bridge power

3.2.3 発電所主機の更新・換装 既存ガスタービン発電設備の基礎、電気設備、HRSG、蒸気タービン発電設備を流用しつつ、古いガスタービン発電設備をFast Power 40に置き換えることで、総合効率や稼働率の向上が図れる。Fast Power 40は、小設置スペース、デュアルフューエル、完全空冷仕様などの特長により、設置条件への制約が少なく、既設改造範囲を最小限に抑えられるため、更新に関する初期投資費用を安くできる。短納期で据付ができることから、ガスタービン発電設備休止期間の最小化が図れることも利点である。

3.2.4 様々な活用方法 Fast Power 40の4つの特長を活かし、次のような活用が可能となっている。Fig. 6にイメージを示す。

- (1) 鉱山や砂漠地帯など電力網が届いていない地域での発電所
- (2) 急速起動・負荷追従特性を活かしたバックアップ電源や予備電源
- (3) 空港や大型商業施設における電気・蒸気・温冷熱の総合エネルギー供給設備
- (4) 小型・軽量・高出力な特長を活かしたFLPS (Floating LNG Power Station) や洋上発電設備 (Barge Mounted Power Plant) への搭載

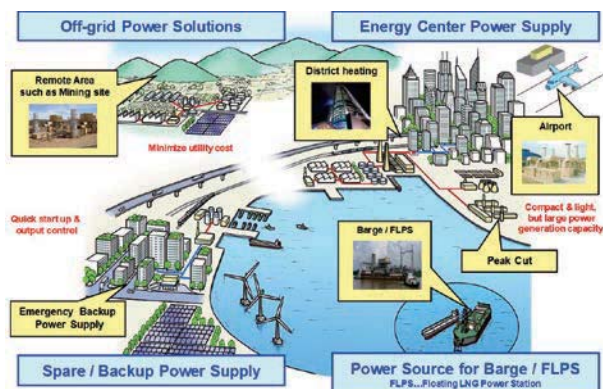


Fig. 6 Fast Power 40 application examples

3.3 IHI原動機の運用支援

当社では発電設備の提供と共に長期のメンテナンス契約を締結することで多くの運用支援サービスを提供しており、Fast Power 40もその例外ではない。例えば、発電設備の安定運用と信頼性向上を目的として、異常データを検知する予防保全システムを開発・運用している。遠隔監視装置「あいモニタ」を用いて各ガスタービン発電設備から運転データを収集・蓄積し、正常・異常のデータベースを構築することにより、実運転データと正常データのリアルタイムな比較や直近運転データの挙動から、異常を検知しガスタービンがトリップする前に処置することができる。これにより、MTBF (Mean Time Between Failure) 改善の効果が得られている⁽⁶⁾。また、仮にトラブルでガスタービン発電設備の運用が停止した場合においても、起きた事象を的確に把握し、原因の検討・究明および迅速に対処することが可能となっている。蓄積された運転データを基にライフサイクルコストを最小にするための運転最適化支援や、部品の交換時期や予備品購入といった発電設備の適正な管理時期の推奨などのオペレーション支援サービスも充実させていく。

また、当社ではユーザーサポート体制の更なる向上にも力を入れており、発電設備の所有および運用経験が少ないケースにおいても、運用シミュレーションやメンテナンストレーニングなどのオプションを多数準備し、導

入に向けた不安を払しょくする活動も進めている⁽⁷⁾。

4. 結言

航空機用エンジンを発電などの陸上設備用に転用した航空転用型ガスタービンは、エンジン単体で高効率、小型・軽量、急速起動、負荷追従特性、繰り返し発停能力に優れた特長を持つ。GE社製 LM6000TMガスタービンは、高い信頼性と同出力級なら最高クラスのシンプルサイクル発電効率を有する航空転用型ガスタービンであり、世界的なベストセラーとなっている。LM6000TMガスタービンは冷態から5～10分で定格出力に達するため、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、負荷追従性に優れた特長から、北米では主に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。

当社は、持続可能な脱CO₂・循環型社会に向けた取り組みの一環として、従前より国内外に多数納入してきたガスタービン・パッケージを見直し、LM6000TMガスタービンを主機とした「小型・軽量」、「急速起動・負荷追従」という特長を最大限に活かした新しいガスタービン・パッケージ「Fast Power 40」を市場投入する。Fast Power 40は以下の4つの特長を持つ。

(1) Fast Generation

小型・軽量なガスタービン・パッケージに設計しなおすことで輸送性を向上させた。また、現地工事作業を最小化し、2週間という短期間での据付を可能としている。LM6000TMガスタービンを主機とすることで急速起動特性に加え、負荷の急変にも即座に対応する負荷追従性を有している。

(2) Flexible

据付工事の簡素化と従来型相当のオプションの用意により、常設・仮設兼用の可搬型ガスタービン・パッケージである。ガス燃料・液体燃料の両方を使用可能なデュアルフューエル仕様でもあるので、ユーザーの操業に合わせたガスタービン発電設備の提供が可能になっている。

(3) Utility Saving

完全空冷化かつDLE燃焼器によって、水資源を全く使用することなくガス燃料だけでなく液体燃料使用時においてもNOx排出量の低減と高効率運転が実現できる。

(4) Cost Effective

当社の従来型LM6000TMガスタービン発電設備に比べて重量と設置面積を約半分に削減した小設置スペース、および据付工事の簡素化により、現地作業費用を削減した。

LM6000TMガスタービンは、同出力級なら最高クラスのシンプルサイクル効率を持ち、コージェネレーションあるいはGTCCへの適用も可能なので、総合効率の更なる向上が可能になっている。

ガスタービンの整備期間は、当社のリースエンジンを

使用することでユーザーの整備期間における経済的な損失を最小限に抑えられ、高稼働率を維持できる。

Fast Power 40の導入と、IoTを活用した運用支援・予防保全サービスを含むライフサイクルビジネス、トレーニングなどのサポート体制の強化により、2050年のカーボンニュートラル目標達成に向けた環境負荷の低減と電力の安定供給の両立に貢献していきます。

参考文献

- (1) 経済産業省資源エネルギー庁 総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会（第46回会合）
資料1 エネルギー基本計画（素案）の概要
< https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/2021/046/ >（参照日 2021年08月13日）。
- (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) 航空機エンジン転用型ガスタービン・パッケージ「Fast Power 40」を新たに市場投入 ～脱CO2・循環型社会に向けたエネルギーソリューションの取り組み加速～
< https://www.ihico.jp/ihico/all_news/2018/resources_energy_environment/2019-1-30/index.html >（参照日 2021年08月13日）。
- (4) 米澤克夫，井上靖浩，中野英彦，鈴木武雄，航空転用型ガスタービンによる対応の現状，日本ガスタービン学会誌，Vol. 47，No. 1（2019），pp. 27-32.
- (5) 畑尾翔，鈴木弘太，可搬型パッケージFast Power 40，クリーンエネルギー，Vol. 28，No. 8（2019）。
- (6) 野原隆樹，IHI原動機 中小型ガスタービンの適用事例，日本ガスタービン学会誌，Vol. 48，No. 2（2020），pp. 13-18.
- (7) 奈須野祐一，三輪隆信，中村有作，モザンビーク共和国マプト100MW級GTCC発電設備の建設，日本ガスタービン学会誌，Vol. 48，No. 1（2020），pp. 66-70.

特集：至近の火力電源の運用・建設状況と将来火力発電技術の展望

産業用における熱電可変型ガスタービンコンバインド設備の導入事例

Introduction of Gas Turbine Combined Cycle System with Variable Heat-Power Ratio for Industrial Applications

合田 真琴^{*1}
GODA Makoto

原田 哲也^{*1}
HARADA Tetsuya

小池 晃司^{*1}
KOIKE Koji

岡田 竣^{*1}
OKADA Shun

中安 稔^{*1}
NAKAYASU Minoru

キーワード：L30A, M7A, ガスタービン, 蒸気タービン, 排熱回収ボイラ, コンバインドサイクル, コージェネ, 高効率, 柔軟な適応性

Key Words：L30A, M7A, Gas Turbine, Steam Turbine, Heat Recovery Steam Generator (HRSG), Combined Cycle Power Plant (CCPP), Co-generation, High Efficiency, Flexible Application

1. 緒言

東日本大震災以降、国内のコージェネレーションシステム（以下、コージェネ）の導入量は伸び続けているが、これはエネルギーの有効活用のほかに分散型としてのエネルギーセキュリティの確保といった価値が評価されているためと考えられる。

当社は、1983年に自社開発のガスタービンを用いた1 MW級のコージェネを市場投入して以来、これまでに30MW級に至るラインアップを揃え、様々な市場のご要望にお応えしてきた。

近年は、老朽化したボイラ・タービン発電設備の更新や熱電需要の変化に追従しつつ省エネを図るため、ガスタービンコージェネと蒸気タービンを組み合わせたコンバインドコージェネ設備の導入が増えている。本稿では、8 MW級及び30MW級ガスタービンを用いたシステム導入事例を紹介する。

2. L30Aガスタービンを用いた事例

～鹿島南共同発電株式会社向け100MW級コンバインドサイクル発電設備の導入事例～

2.1 概要

鹿島南共同発電(株)は、鹿島臨海工業地帯東部地区コンビナートのエネルギーセンターとして1968年設立以降、近隣工場15社へ電気・蒸気・純水を供給している。既設主力発電設備として汽力（ボイラ・タービン）発電設備を有し、省エネや環境保全にも力を入れている。しかしながら近年はコンビナートの蒸気需要が減少傾向にある一方で電力需要は増加傾向にある。需要家の熱電バラ

スの変化や設備老朽化対策として2012年には重油から都市ガスへの燃料転換に取り組み、保全コストと環境負荷の低減を実施してきた。

今回、世界の潮流であるカーボンニュートラルを目指して発電設備の更なる高効率化と環境負荷低減に向けて、当社製ガスタービンの最大出力機である30MW級純国産高効率ガスタービン「L30A」を用いた100MW級コンバインドサイクル発電設備（以下、本設備）を導入した。

2020年7月、所定納期で据付工事/試運転を完了し、性能確認試験においては、全ての環境性能を満足しつつ、発電出力、燃料消費量、および蒸気供給量など所定の保証性能を全てクリアし、計画値を上回る高いプラント性能を達成した。以下に本設備の概要を紹介する。

2.2 システム構成、設備仕様および特徴

本設備の全体外観をFig. 1に示す。本設備は、主要機器である「L30A」ガスタービン3基、排熱回収ボイラ3基および抽気背圧式蒸気タービン1基が全て当社製で構成されており、近隣工場からの需要に応じて電気と蒸



Fig. 1 Birds-eye view of whole plant

原稿受付 2021年9月13日

*1 川崎重工業(株)
エネルギーソリューション&マリンカンパニー
〒650-8670 神戸市中央区東川崎町3丁目1-1

気をフレキシブルに供給可能なコージェネとしての機能を併せ持つ発電出力107MWのコンバインドコージェネ設備である。システム構成および各構成機器の主な特徴を以下に示す。

2.2.1 全体システム構成 本設備の主要設備概要をTable 1に、設備レイアウトをFig. 2に示す。

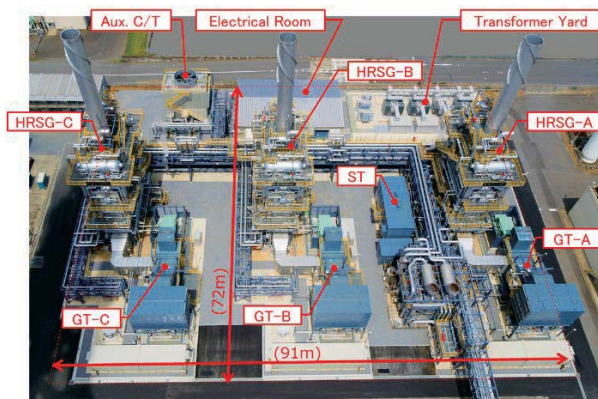


Fig. 2 Plant layout

主機となるガスタービンは、当社製30MW級純国産高効率ガスタービン「L30A」であるが、CCPP（コンバインドサイクル発電）性能の向上を目的に改良を加えた「性能向上型」を採用した。同機は、従来機で既にクラス世界最高水準であったガスタービン単体効率を更に向上させ単機発電端効率39.9%を達成すると共に、通常は単機効率向上とは相反する排ガス温度の大幅向上を実現することによりCCPP効率を大幅に改善している⁽¹⁾⁽²⁾。排熱回収ボイラは、当社完全自社開発の縦型複圧自然循環式を採用し、高圧/低圧2系統の蒸気を発生させることで、ガスタービンから排出される排ガスエネルギーを可能な限り高効率で回収し環境負荷を低減させている。

本設備は、これらガスタービン発電設備と排熱回収ボイラの3系列ならびに蒸気タービン発電設備で構成されており、付随する配管ラック、補機冷却塔、電気室建屋、

トランスヤード（受変電設備）らを含め、各機器のメンテナンススペースも考慮した上で91m×72mの限られた敷地内にコンパクトに配置している。（Fig. 2）

全体システムフロー図をFig. 3に示す。各ボイラで発生した高圧蒸気は主蒸気配管に集約され、特高送気分を除いた全量が蒸気タービン入口蒸気として利用される。蒸気タービンには、当社で十分実績のある完全自社開発の10MW級減速式抽気背圧式を採用し、タービン入口蒸気により発電出力を得ると共にタービン途中段からの抽気蒸気を高圧ヘッダへ、タービン出口の排気蒸気を低圧ヘッダへ供給している。また、各ボイラで発生した低圧蒸気は系列毎に直接低圧ヘッダへ供給される。送気蒸気系統としては、特高・中圧・低圧の3系統あり、それぞれ既設プラントを経由して近隣工場へ供給される。蒸気タービンは高圧/低圧二つの蒸気加減弁を有しており、通常運用中は主蒸気圧力および抽気圧力（中圧ヘッダ圧）もしくは排気圧力（低圧ヘッダ圧）を同時に制御することで、ボイラ高圧ドラム圧力を一定に制御しボイラ運転状態を安定させると共に、送気系統の安定運用の役目を担っている。

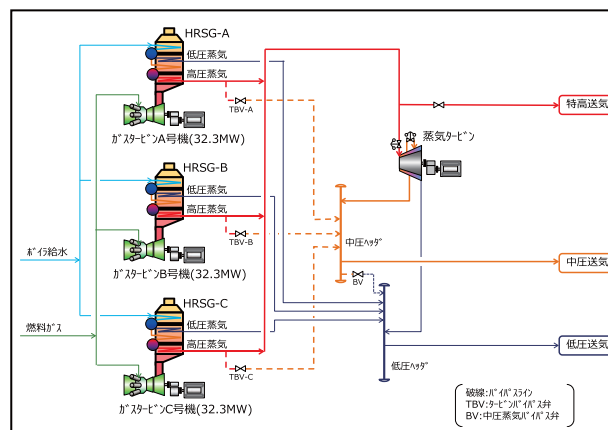


Fig. 3 System flow diagram

2.2.2 特徴 本設備の主な特徴は以下の通りである。

- 1) 広範囲な高効率運用を実現
- 2) 高い冗長性による設備信頼性
- 3) 将来需要変化への柔軟な適応性

1) 高効率運用

当社製コンバインドコージェネ設備では、各々が高い単機効率を有するガスタービン、排熱回収ボイラ、蒸気タービンを一体で組合わせた最適システム設計を実施し、お客様の多様な熱電需要要求に応じ最適化を図ることで、非常に高いプラント性能を実現している。本設備においても、ガスタービンの高性能化のみならず、蒸気タービンに抽気背圧式を採用することで復水器への排出エネルギー損失を無くし、また排熱回収ボイラには複圧式を採用すると共に給水入口部にプレヒータを搭載することでボイラ出口排ガスエネルギー損失を限界まで低下させている。これら最適設計の結果、計画性能を上回る高いプ

Table 1 Outline of major components

Plant Type	Combined Co-generation
Major components	
Gas Turbine (GT)	Type : L30A-01D Fuel : City Gas (13A) Power Output (generator terminal) : 32.3MW (@15℃) /unit Number : 3 units
Heat Recovery Steam Generator (HRSG)	Type : Vertical Multi-pressure Natural Circulation Steam Generator Steam Output /unit : HP : 9.3MPa×478℃×34t/h LP : 0.6MPa×200℃×12t/h Number : 3 units Feed Water Temperature : 20℃
Steam Turbine (ST)	Type : Back Pressure Extraction Reduction Geared type Power Output (generator terminal) : 10.5MW (rated) Number : 1 unit

ラント総合効率を達成することができた。

また、年間を通じ近隣工場の熱電需要動向は種々変化するため、それらの変化に柔軟に対応可能な機能性が要求される。本設備では、ガスタービンの複数台運用により広範囲なプラント負荷領域において高効率な運用が実現可能なシステムとなっている (Fig. 4)。日常の熱電バランス変化に対しては、既設汽力設備との協調運用により最適化を図り、発電所全体の環境負荷を大きく低減させている。

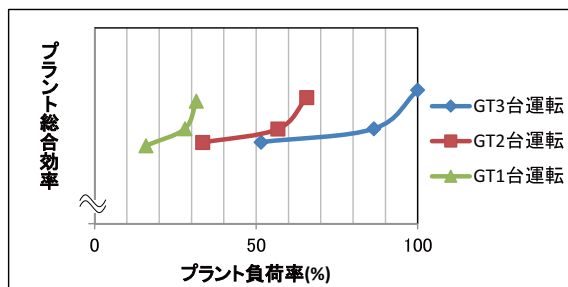


Fig. 4 Total plant efficiency

2) 設備信頼性

本設備では、ガスタービンと排熱回収ボイラを複数台並列運用することで高い冗長性を確保しており設備信頼性を向上させている。単機系列毎のメンテナンスを可能とすることで整備期間中の稼働率の低下を最小限に抑え、年間を通じ連続的な熱電供給が可能な設備となっている。なお、各系列間の取合配管は基本的に全て二重閉止可能な配管構成としている等、他系列運用中のメンテナンスにおける安全性を十分考慮した設計としている。

3) 将来需要への適応性

ガスタービン複数台設置のもう一つの利点に、将来的な熱電需要変化にも柔軟に適用可能なシステムであることが挙げられる。本顧客のような共同エネルギー供給事業者が設備導入を計画する場合、一般的には熱電需要動向が各工場の生産計画に依存することから、将来的な需要予測が非常に難しい。そこで本設備のように中小型の分散型発電設備を複数台導入することで将来的な設備運用計画のバリエーションが増え、将来動向の変化にも柔軟に適応することが可能となる。

主要機器毎の主な特長を以下に示す。

a. L30Aガスタービン (Fig. 5)

- ・クラス世界最高レベルの発電端効率と排ガス温度向上を両立させた「性能向上型」
- ・環境性に優れたDLE燃焼器を搭載 (NO_x値 15ppm以下 O₂=15%換算)
- ・ガスジェネレータ (GG)、パワータービン (PT) の2軸式モジュール構造による高いメンテナンス性
- ・エンジン交換方式によりオーバーホール現地工期

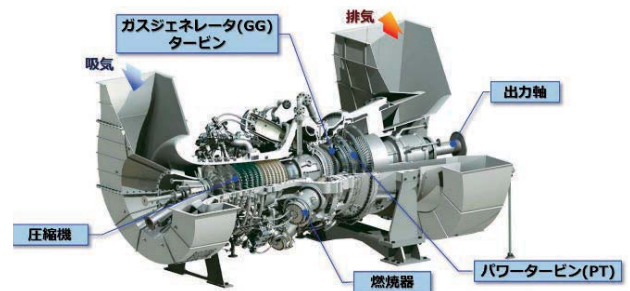


Fig. 5 「L30A」 Gas Turbine

を最短化、TBO (オーバーホール間隔) を長期化 (GG: 6 年毎, PT: 12 年毎)

- ・高度な遠隔監視システムによる充実した運用サポートと予兆監視を実現

b. 排熱回収ボイラ (HRSG) (Fig. 6)

- ・完全自社開発の縦型複圧自然循環式排熱回収ボイラ
- ・設置面積が低減でき組立/据付性に優れる縦型タイプを採用し、モジュール方式により現地据付工事工程の大幅短縮化を実現
- ・高圧蒸気/低圧蒸気の複圧式の採用と共に給水入口部にプレヒータを搭載し、徹底した排熱回収効率の向上により環境負荷を低減



Fig. 6 Heat Recovery Steam Generator

c. 蒸気タービン (Fig. 7)

- ・完全自社開発の減速式抽気背圧式タービン
- ・高圧/低圧加減弁を備え、発電出力制御に加え前圧制御/抽気圧制御/排気圧制御など多彩な制御モードを搭載
- ・最適流路設計により高効率化を実現
- ・蒸気タービン、減速機を台板上にユニット化し一体出荷することにより、現地据付工事工程を短縮化



Fig. 7 Steam Turbine Unit

2.3 設備導入効果

本設備導入により、既設ボイラ・タービン発電設備の一部操業を停止し本ガスタービンコンバインドコージェネ設備に切り替えることで、発電所全体のプラント総合効率を大幅に改善することができた。本設備導入前後において、既設復水タービンの稼働率低減により復水量を大きく削減できたことなどからCO₂排出量も大きく低減し、大幅な省エネ効果が得られている。

2.4 今後の展開

当社製30MW級純国産高効率ガスタービン「L30A」を用いた自社開発の100MW級コンバインドサイクル発電設備初号機を鹿島南共同発電株式会社鹿島発電所へ納入し、所定の保証性能を全て満足し高いプラント性能を実現した。鹿島南共同発電株式会社殿の多大なるご協力により、今後は本設備を当社製CCPPのモデルプラントとして活用させていただき、世界的規模で加速する「低炭素・脱炭素社会」への移行に 대응べく、同製品の更なる性能改良、機能改善、品質向上に邁進していく所存である。

3. M7Aガスタービンを用いた事例

～国内化学会社殿向け11MW級コンバインドサイクル発電設備の導入事例～

3.1 概要

国内化学会社は2007年に当社の8 MW級ガスタービンを用いたガスタービンコージェネ設備を導入し、自家発電設備として工場内設備に電気・蒸気を供給しているが、生産設備増強に伴い、自家発電設備を増設することとなった。本工場の熱電需要の特徴として、季節により熱電バランスが大きく変動する傾向がある。特に夏季は電力需要が多い一方、蒸気需要は少ないため、余剰蒸気が発生する場合があった。また、工場内で発生する副生ガス（主成分：メタン）を有効利用する方法を模索していた。

これらの課題を解決するため、既設と同程度の出力を有する8 MW級ガスタービンと3 MW級蒸気タービンを組み合わせた11MW級コンバインドサイクル発電設備（以下、本設備）を2020年12月に納入した。副生ガスは排熱回収ボイラの追焚システムに用いることで有効活用することとした。以下に本設備の概要を紹介する。

3.2 システム構成、設備仕様および特徴

本設備は当社製「M7A」ガスタービン1基、排熱回収ボイラ1基および復水式蒸気タービン1基から構成される。システム構成および各構成機器の主な特徴を以下に示す。

3.2.1 全体システム構成 本設備の主要設備概要をTable 2に、設備レイアウトをFig. 8に示す。

Table 2 Outline of major components

Plant Type	Combined Co-generation
Major components	
Gas Turbine (GT)	Type : M7A-03D Power Output (generator terminal) : 7.57MW (@15℃) /unit Number : 1 unit
Heat Recovery Steam Generator (HRSG)	Type : Horizontal Natural Circulation Steam generator (with Duct burner) Steam Output (by Duct burner) : Superheated : 2.19MPa×453℃ ×15t/h Saturated : 2.44MPa×225℃ ×19.7t/h Number : 1 unit Feed Water Temperature : 35℃
Steam Turbine (ST)	Type : Condensing impulse type with reduction gearbox Power Output (generator terminal) : 3.55MW Inlet Steam : 2.19MPa×453℃ ×15t/h Number : 1 unit
Plant Output (Planned value)	
Power Output	Total : 11.12MW (@15℃)
Steam Output	Saturated:0.8MPa x 175℃ ×0 ~ 38.0t/h
Total plant efficiency	with ST Operation : 66.7% without ST Operation : 92.8%

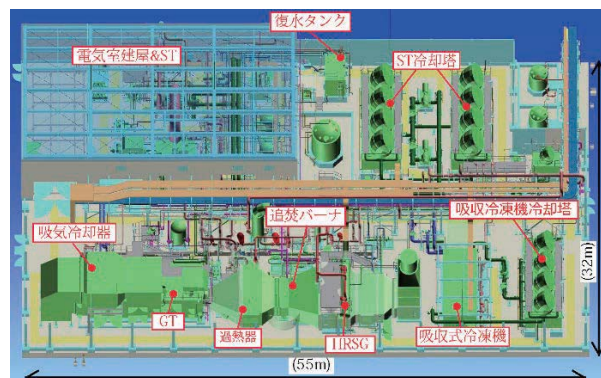


Fig. 8 Plant layout

主機であるガスタービンは、当社製8 MW級純国産高効率ガスタービン「M7A」を採用した。同機は1993年より販売を開始した当社の主力機種の一つであり、国内外の数多くのコージェネ設備に導入した実績がある。「M7A」ガスタービンの外観図をFig. 9に示す。

排熱回収ボイラは、川重冷熱工業製の横型自然循環式を採用し、過熱/飽和の2系統の蒸気を発生させている。ガスタービンから排出される排ガスエネルギーに加えて、ダクトバーナで燃料を追焚する追焚システムを導入する

ことで蒸気発生量を増加させ、広範囲の蒸気負荷に対応することが可能である。

その他の設備として、復水式蒸気タービン、吸気冷却器、吸収冷凍機、各冷却塔等の設備がある。また周囲への騒音を配慮して、高さ約4.5mの防音壁を設置している。

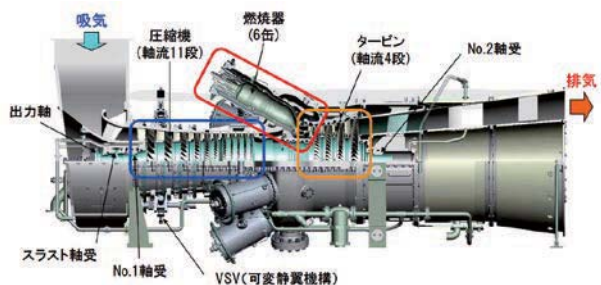


Fig. 9 「M7A」 Gas Turbine

全体システムフロー図をFig. 10に示す。排熱回収ボイラから過熱蒸気および飽和蒸気の2系統の蒸気を発生する。過熱蒸気は蒸気タービンに投入し、飽和蒸気は構内送気として使用する。過熱蒸気系統にはバイパスを設けており、過熱蒸気を減温・減圧して飽和蒸気と合流させ、構内へ送気することが可能である。また燃料ガスは高圧天然ガスをガスタービンに供給し、低圧天然ガス及び副生ガスを追焚システムに供給する。

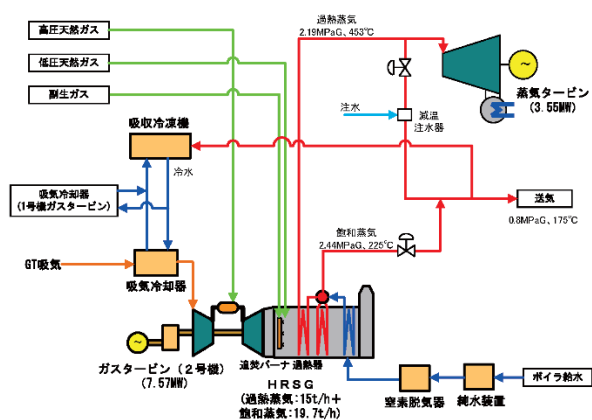


Fig. 10 System flow diagram

3.2.2 システムの特徴 本設備の主な特徴は以下の通りである。

- 1) 広範囲の電力・蒸気負荷への対応
- 2) 副生ガスの有効利用
- 3) 吸気冷却システムによる電力ピークカット
- 4) 既設と並列で自立運転可能

1) 広範囲の電力・蒸気負荷への対応

過熱蒸気を蒸気タービンからバイパスする系統を設けているため、構内負荷に応じて電力負荷を優先、もしくは蒸気負荷を優先して運用することが可能である。また、追焚システムにより構内蒸気負荷の変化に合わせて送気することができる。これにより、広範囲の熱電負荷に柔

軟に対応可能なシステムを実現している。運用例の一覧表をTable 3に示す。

Table 3 Examples of operation pattern

Operation pattern	Power Output (GT+ST)	Steam Output (Saturated : 0.8MPa)
①GT+ST+Duct Burner	11.12 MW	19.7 t/h
②GT+ST	10.57 MW	0 t/h
③GT+Duct Burner	7.57 MW	38.0 t/h
④GT	7.57 MW	15.6 t/h

2) 副生ガスの有効利用

本設備では構内で発生する副生ガスを排熱回収ボイラの追焚システムの燃料に使用可能である。副生ガスの発生量が多い場合は、副生ガス専焼で運用することで副生ガスを有効活用する。一方、副生ガスの発生量が少ない場合は、別系統の低圧天然ガスとの混合、もしくは低圧天然ガス専焼に運用を切り替えることができる。したがって、副生ガスの発生量に変動が生じても安定的に蒸気負荷に追従可能なシステムとしている。

3) 吸気冷却システムによる電力ピークカット

一般的にガスタービンの発電出力は吸気温度が高いほど減少する傾向があり、特に夏季のような高温期に顕著にみられる。そこで、本設備では吸収冷凍機から冷水を吸気冷却器に供給することで、ガスタービン入口の吸気温度を35℃から15℃まで低下させる吸気冷却システムを導入した。吸収冷凍機の熱源は飽和蒸気であり、夏季に余剰となること多い蒸気を有効に利用している。また、既設ガスタービンコージェネ設備にも吸気冷却器を追設、本設備で発生させた冷水を供給することで、既設にも吸気冷却システムを導入した。既設および本設備の吸気冷却システム導入により、ガスタービン発電端出力はそれぞれ約20%の出力向上が見込まれ、夏季の電力ピークカット運用を可能とした。吸気温度による出力の違いをFig. 11に示す。

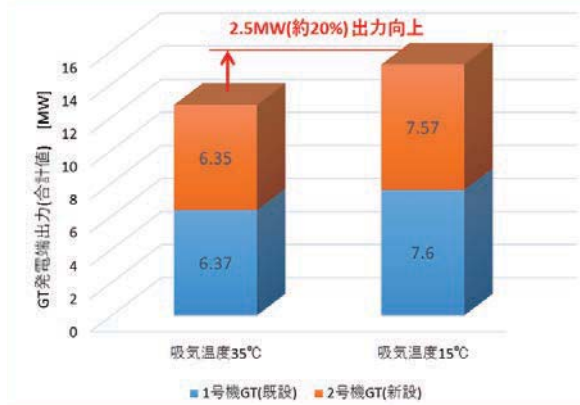


Fig. 11 Output improvement by intake air cooler

4) 既設と並列で自立運転可能

本設備は非連系運転中でも既設と本設備の発電機間並

列運転が可能である。また、既設もしくは本設備のいずれかで負荷を持つ状態から、停止中のガスタービンを起動することも可能であり、系統と切り離された状態でも構内負荷へ給電することが可能である。蒸気タービンも同様に連系運転中に運転していた場合、非連系運転となっても運転を継続する。さらに停止していた場合でも、非連系運転中に起動可能である。自立運転時の構内単線結線図をFig. 12に示す。

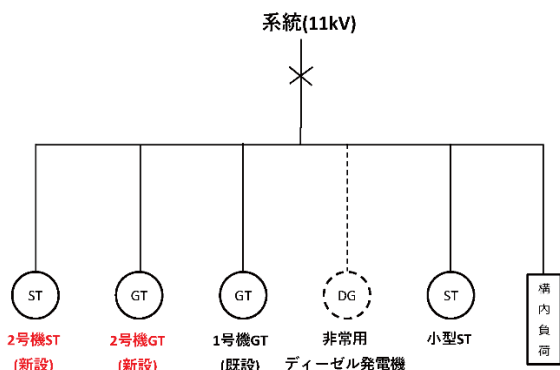


Fig. 12 Single line diagram under isolated operation

3.3 今後の展開

国内化学会社に既設の当社製ガスタービンコージェネ設備に増設して、8MW級ガスタービン「M7A」を用いた11MW級コンバインドサイクル発電設備を納入した。本設備は需要家の電力・蒸気需要の変化に幅広く柔軟に対応することを可能としつつ、副生ガスを有効活用する

ことで省エネルギーを実現している。また自立運転時の発電出力増強により工場の安定稼働にも貢献している。

最後に多大なるご指導、ご協力を頂きました国内化学会社の皆様をはじめ、本プロジェクトに携わった関係者の方々に厚く御礼と感謝を申し上げます。

4. 結言

近年のエネルギーを取り巻く環境の変化やCO₂排出量削減の要望などから、エネルギーシステムにはより一層の高効率化が求められている。当社ではこれらに対応するため、ガスタービンの効率向上、システム全体効率の向上に継続的に取り組んでいる。今後も市場動向を見極めながら、水素ガスタービンの開発やシステムの運用性改善など、更なる商品性の向上に努めて行きたいと考えている。

参考文献

- (1) T. Taniguchi, R. Tamai, Y. Muto, S. Takami, R. Tanaka, M. Ryu, Performance Improvement program for Kawasaki Gas Turbine, ASME Turbo Expo 2017, GT2017-63333
- (2) R. Tamai, R. Tanaka, T. Taniguchi, Y. Muto, S. Takami, M. Ryu, Kawasaki L30A Gas Turbine Upgrade for Improved Efficiency and Fast Demand Response, IGTC 2019, Paper ThAM11.2

航空エンジン用低圧タービン翼後縁近傍流れ場のPIV計測 —翼面境界層流れと翼後縁近傍流れ場の関連性調査—

PIV Measurement of the Flow Field Near Trailing Edge of the Low-pressure Turbine for Aeroengine: Investigation of Relationship Between Blade Boundary Layer and Flow Field Near Trailing Edge

相馬 天斗^{*1}
SOMA Takato

山崎 悠貴^{*1}
YAMAZAKI Haruki

船崎 健一^{*2}
FUNAZAKI Ken-ichi

谷口 英夫^{*2}
TANIGUCHI Hideo

長尾 隆央^{*3}
NAGAO Takahisa

ABSTRACT

This study deals with PIV measurements of the flow around the trailing edge of low-pressure turbine for aeroengine. Since this area, called base region, is greatly involved in the aerodynamic loss evaluation, detailed measurement of the base region is strongly desired. Thus, our research group has been conducting several studies focusing on the base region of a low-pressure turbine (LPT) blade. In the previous researches, we measured base pressure, however the flow field near the trailing edge of the blade wasn't investigated in detail. In this study, using a large-scale cascade, we investigate the relationship between the flow behaviors near the trailing edge and boundary layer around the blade under the unsteady flow condition with the wake inflow generated by the wake generator, along with the steady condition measurements without wake inflow.

キーワード：低圧タービン，粒子画像流体計測法，境界層流れ，後縁流れ，後流

Key words : Low Pressure Turbine, Particle Image Velocimetry, Boundary Layer Flow, Trailing Edge Flow, Wake

1. 緒言

近年，民間用航空エンジンは低燃費化・低騒音化の観点から高バイパス比ターボファンエンジンが主流となり，バイパス比上昇の傾向は今後も続くと考えられている。このエンジンの推力の大半はエンジン前方のファンで発生しており，そのファンは低圧タービンによって駆動されている。したがって，エンジンの高効率化には低圧タービンの高効率化が必要不可欠である。

筆者の研究グループでは，大型の直線翼列試験装置を用いて，翼後縁近傍の流れに着目した研究を行ってきた。この領域（ベース領域）での圧力（ベース圧）に起因する空力損失は，Denton⁽¹⁾が提唱した翼列損失（Denton損失と称する）と密接にかかわっていることもあり，ベース圧の直接計測や数値解析による調査が数多く行われているが⁽²⁾，筆者の研究グループでは主として航空エンジン用低圧タービンでのベース圧損失に着目し

た調査を実施してきた。低圧タービンのベース圧損失は，後縁厚みが相対的に小さいこともあり，Denton損失中のほかの損失，特に負圧面側の境界層損失と比べて小さいが（研究者，流動条件にもよるが形状損失全体の15%前後という報告がある^{(3),(4)}），低圧タービンのさらなる高効率化に向けてそのメカニズムの解明や損失低減が望まれている⁽⁵⁾。特に，高負荷低圧タービンでは負圧面での剥離泡やその後方への非定常的な渦放出⁽⁶⁾，また，正圧面での剥離からの縦渦放出⁽⁷⁾など，翼後縁近傍の流れ場は翼面境界層の影響を強く受けており，ベース圧損失の議論には翼面境界層流れとの関連を把握する必要がある。藤田ら⁽⁸⁾は翼後縁の流れ場計測にPIV（Particle Image Velocimetry）を用い，圧力計測には静圧孔を設けた円柱を翼後縁に設置した翼を用い，主流乱れや周期的後流がベース圧損失に与える影響を調査した。その際，ベース領域には負圧面側の境界層流れが流入することは確認されたものの，その現象がベース圧にどのように関係するかについては調べられていない。

そこで本研究では，円柱wakeの影響を受ける翼面境界層流れが翼後縁近傍流れ場及びベース圧にどのように影響するかを調査することを目的とし，大型の翼列試験装置を用いた2次元PIV計測を実施している。

原稿受付 2021年1月20日

査読完了 2021年8月27日

*1 岩手大学大学院

〒020-8551 盛岡市上田4丁目3-5

*2 岩手大学理工学部

〒020-8551 盛岡市上田4丁目3-5

*3 (株)IHI

〒235-8501 横浜市中区新中原町1番地

主な記号

Table 1 Main symbols

C : 翼コード長 [m]	T : Wake通過周期 [s]
Cx : 軸コード長 [m]	Tu : 主流乱れ度 [%]
C_{pb} : ベース圧力係数 [-]	$\mathbf{v}(\mathbf{x}, t)$: 速度ベクトル [m/s]
k : 2次元乱流運動エネルギー [m ² /s ²]	V_{in} : 入口, 出口平均流速 [m/s]
Pitch : 翼列ピッチ	x : x座標 (軸, 流れ方向)
Re : レイノルズ数 [-]	y : y座標 (ピッチ, 垂直方向)
St : ストローハル数 [-]	PS, SS : 正圧面, 負圧面
t : 時刻 [s]	TE : 翼後縁

2. 実験手法

2.1 実験装置

Fig. 1に実験装置を示す。本研究では、典型的な高負荷低圧タービン翼の拡大モデルを用いた直線翼列を使用している。翼コード長は0.308m, 軸コード長は0.270m, 翼列ピッチは0.240mである。翼列上流部には直径8mmの円柱を2本装着したスポーク型の後流発生装置を設けており、動翼に流入する静翼からの周期的後流（以降Wakeと呼ぶ）を相対的に模擬している。

レイノルズ数 Re は、コード長、翼列1ピッチ分の出口平均流速（本論文では速度の大きさを流速と称す）および動粘度で定義している。Wake通過周波数 f の無次元数であるストローハル数 St は次で定義される。

$$St = \frac{fC}{V_{in}} \quad (1)$$

ここで、 V_{in} は翼列入口1ピッチ平均流速。主流乱れ度 Tu は $Re=100k$ 条件で1.0%, そのほかのレイノルズ数では0.5%となっている。本研究では $St=0.00$ を定常条件、 $St=0.36$ ($f=3.8$ [Hz]) 条件を非定常条件と称している。

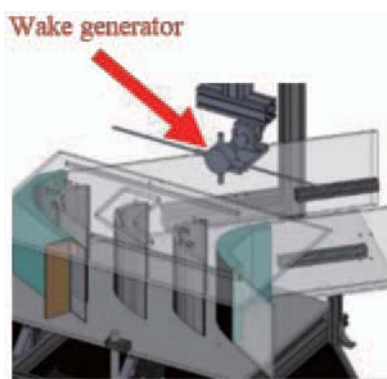


Fig. 1 Test section

2.2 計測機器

2次元PIV計測の際の粒子画像撮影に使用した高速度カメラはPhantom V1210 (Vision Research社) である。レンズにはNikkor 50mm f/1.2とAF-S VR Micro-Nikkor 105mm f/2.8G IF-EDを使用し、前者を使用したPIV計測を「広域計測 (Wide)」, 後者を「詳細計測 (Detailed)」

と称している。シート光にはPIV Laser G15000K (カトウ光研, 波長: 532nm, 最大出力15W, 連続光) を使用している。フォグはSafex Fog Generator 2010 (Dantec Dynamics社) によって導入している (メーカー仕様値におけるフォグの平均粒子径は約1 μ m)。粒子変位の算出にはDynamicStudio6.10を使用しており、処理法は再帰的相関法の一つであるAdaptive PIVを採用している。

2.3 実験条件・計測条件

Table 2に本研究における実験条件とサンプリング周波数を示す。サンプリング周波数は、計測領域内において画像間の粒子の最大移動量が6 pixel以下となるよう設定している。これは画像間の粒子移動量5～10pixel⁽⁹⁾の推奨値に準拠している。計測時間は0.6sである。

Table 2 Experimental conditions and sampling frequencies

Steady	Re=100k	Re=130k	Re=170k
Wide	4,500[Hz]	6,000[Hz]	7,500[Hz]
Detailed	22,000[Hz]		
Unsteady	Re=100k	Re=130k	Re=170k
Wide	6,500[Hz]		
Detailed	22,000[Hz]		

2.4 計測上の設定

2.4.1 PIVの座標系 Fig. 2に本計測におけるPIVの座標系を示す。広域計測では翼列の軸方向とPIVの座標軸が一致するようにしている。詳細計測では計測中心位置において、翼面法線方向がPIV座標系のy軸と一致するようにしている。

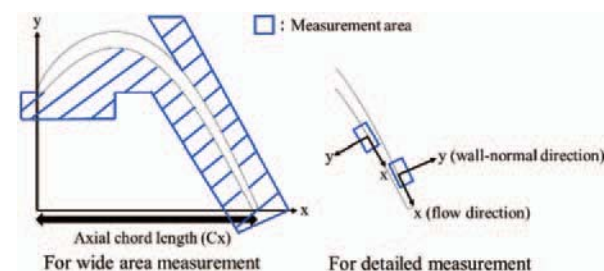


Fig. 2 PIV coordinate systems

2.4.2 検査領域 検査領域IA (Interrogation Area) の形状は広域計測と詳細計測で異なっている。Table 3に検査領域の大きさを示す。広域計測では、流れの方向が大きく変化するため検査領域の形状を正方形型とし、詳細計測では、翼面境界層計測時の空間分解能を上げるために検査領域の高さを縮小した長方形型としている。

Table 3 Interrogation area sizes

Condition	IA	Overlap
Wide	24×24[pixel]	x-wise : 67%, y-wise : 67%
Detailed	24×16[pixel]	x-wise : 67%, y-wise : 50%

長方形型の検査領域は柿原⁽¹⁰⁾により推奨されており、筆者の研究グループでもその効果が確かめられている⁽¹¹⁾。

2.4.3 後流発生装置との同期計測手法

非定常条件では後流発生装置の移動円柱との同期計測を行っている。Fig. 3にその概略を示す。後流発生装置が1回転するごとにトリガー信号が出力されるようになっており、そのタイミングで粒子画像の撮影を開始している。また、トリガーからの遅れ時間等を設定することにより、位相を固定した粒子画像のみを取得することも可能である。その際にはトリガー信号に合わせて粒子画像を2枚ずつ撮影する。本研究では図のように遅れ時間 τ を設定し、速度を取得する位相を変えている。計算負荷を考慮し、Wake通過周期 T を10分割し10位相分を調査している。位相平均に使用したデータ数 N は700である。ここで、2次元速度ベクトル $\mathbf{v}(\mathbf{x}, t)$ の位相平均は次式で定義される。

$$\bar{\mathbf{v}}(\mathbf{x}, t) = \langle \mathbf{v}(\mathbf{x}, t) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \mathbf{v}(\mathbf{x}, t + kT) \quad (2)$$

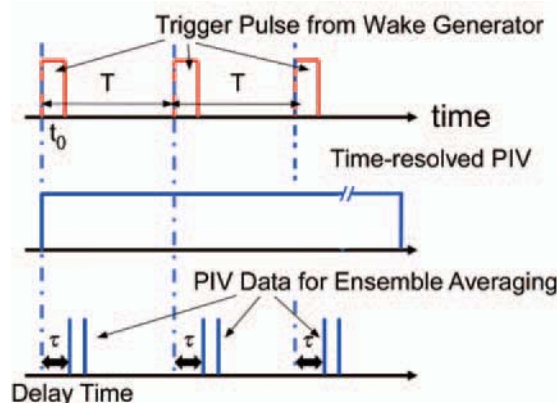


Fig. 3 Synchronous measurement method

2.5 前処理

粒子画像のRawデータにはカメラセンサーのノイズやシート光が翼面反射した影響等が記録されており、それらが粒子変位算出に影響を及ぼすことから、本研究ではそれらの影響を低減すべく以下のような前処理を行っている。

まず、翼部分や計測対象としない領域に対しマスキング処理を行う。次に粒子未投入時の平均画像を作成する。そしてマスキングされた粒子画像と粒子未投入の平均画像の輝度値を差し引くことで、カメラセンサーノイズの影響や翼面におけるシート光反射の影響を低減している。

3. 広域計測の結果と考察

3.1 定常条件

Fig. 4に、定常条件における広域計測面上時間平均流速コンターを示す。無次元化には出口平均流速を使用している。計測範囲は翼前縁部から後縁まで広範囲にわたるが、装置の構造上、負圧面60% C_x 上流の翼面付近の計

測は行っていない。また、計測領域を4分割して計測を行ったため、それぞれの領域で作成されたコンター図を重ねたものをFig. 4としている。分割時の計測領域のオーバーラップは3% C_x から9% C_x である。Fig. 4では正圧面剥離が各レイノルズ数において確認できる。また、Fig. 4には広域計測により得た流速分布を基に推定された正圧面における時間平均の剥離点と再付着点を図に記載している。ただし、広域計測におけるPIVの空間分解能の低さが懸念されたため、正圧面側の再付着点に関しては次節の詳細計測によってさらに調査する。負圧面境界層流れは、粒子画像からは境界層の剥離がすべての条件において確認されているが、広域計測では $Re=100k$ 条件のみ負圧面境界層流れの剥離が確認できた。 $Re=130k$ と $Re=170k$ 条件で剥離が確認できなかった理由は、剥離泡高さが検査領域の大きさよりも小さく、PIV処理における空間平均化により時間平均的に剥離が解像できなかったからだと考えられる。

Fig. 5に $Re=100k$ 条件における正・負圧面上の剥離泡から渦放出が起きている付近での x - y 平面に垂直方向渦度成分（スパン方向渦度成分と称す）瞬時コンターを示す。なお、動画の観測から、正のスパン方向渦度成分のせん断層で特徴付けられる正圧面の剥離泡から生じた渦の多くは、周囲が低速領域であるため剥離泡付近で滞留しており、それらの一部は下流へ移流していく様子が確認された。また、Fig. 4中の破線円内の流速分布からも確認できるように、再付着点付近では剥離せん断層が不鮮明になっているが、これは再付着現象の非定常性に起因するものと考えている。この種の報告は、低圧タービンについては少ない。他方、船崎らの定常条件・低主流乱れ下の可視化研究⁽¹²⁾でも確認されているように、負圧面では剥離泡からの間欠的渦放出が生じていることが確認できる。また、Fig. 5中の後縁近傍拡大図や後述のFig. 16からも確認できるように、負圧面の剥離泡で生じた渦は翼後縁まで移流した後、ベース領域へ回り込むことが確認されている。このことから、定常条件では翼後縁近傍の流れ場には負圧面境界層の剥離泡から生じる渦が翼後縁近傍の流れ場に与えている可能性が高いと考えられるが、広域計測では十分に分析できないため、後述するように詳細計測で再付着点付近の流れ場と後縁近傍の流れ場をより詳しく調査した。

3.2 非定常条件

Fig. 6右側列に非定常条件における時間平均流速コンターを示す。流速の無次元化手法等は定常条件と同じである。Fig. 6左側列の定常条件との比較より、定常条件で確認された剥離せん断層（図中矢印で示す）が、破線楕円で示すようにWake流入により剥離せん断層の存在が不鮮明となり、正圧面剥離が時間平均的に抑制されていることがわかる。

Wakeが流入していく様子やWake流入に起因した現象を確認することを目的として、位相平均による次の量

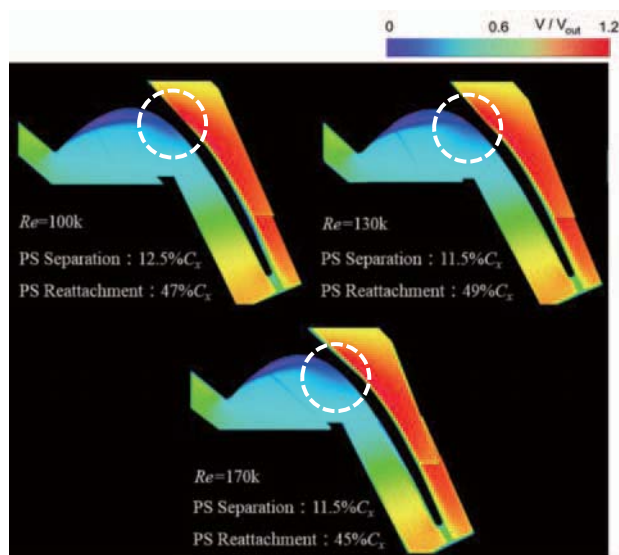


Fig. 4 Time-averaged flow speed contours for three Reynolds number conditions ($St=0.00$)

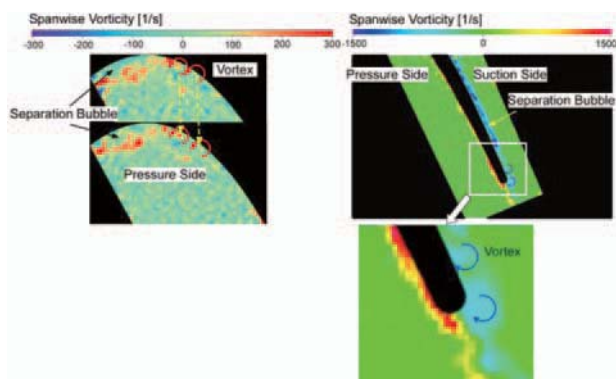


Fig. 5 Instantaneous spanwise vorticity component contours around pressure-side (left) and suction-side (right) separation areas ($Re=100k$, $St=0.00$)

を導入する (Uzun, Hussaini¹³)に倣い位相平均2次元乱流運動エネルギー (2DTKE) と称す。

$$k(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{2} \langle (\mathbf{v}(\mathbf{x}, t) - \bar{\mathbf{v}}(\mathbf{x}, t)) \cdot (\mathbf{v}(\mathbf{x}, t) - \bar{\mathbf{v}}(\mathbf{x}, t)) \rangle \quad (3)$$

Fig. 7に $Re=100k$ での位相平均2DTKEコンターを示す。時刻 t はトリガー信号発生時を0.0とし、Wake通過周期 T で無次元化した t/T で表記する。Fig. 7より、 $t/T=0.1$ で2DTKEが大きい領域が正圧面側剥離領域付近に現れており (図中矢印)、正圧面側におけるWake流入を示唆している。 $t/T=0.3$ では正圧面側の翼面付近をWakeが通過している。 $t/T=0.7$ では負圧面側でWakeが流入し始め、 $t/T=0.8$ では負圧面翼面付近で高2DTKE領域が形成されており、Wakeと負圧面翼面境界層の干渉によって生じたと推測される。なお、 $t/T=0.8$ の2DTKEに僅かな不連続が現れているが、前述のように複数の小領域毎の位相平均のデータをオーバーラップして表示しており、小領域毎に計測開始点の僅かなずれ発生がその理由として考えられる。また、 $t/T=0.7$ では負圧面の後縁付近でTKEが大きい領域が形成されていることがわかる。こ

の時刻では負圧面の後縁付近にWakeが到達していないため、Wakeに直接起因した現象ではないと考えられる。この現象については詳細計測で調査する。

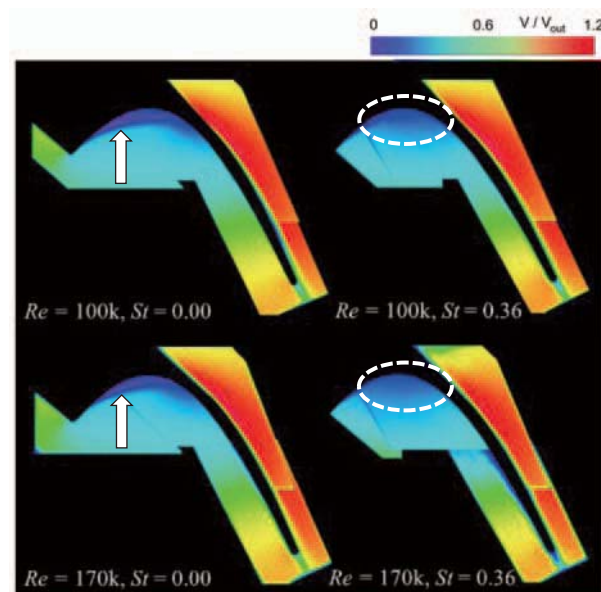


Fig. 6 Time-averaged flow speed contours for two Reynolds number conditions (left ; $St=0.00$ / right ; $St=0.36$)

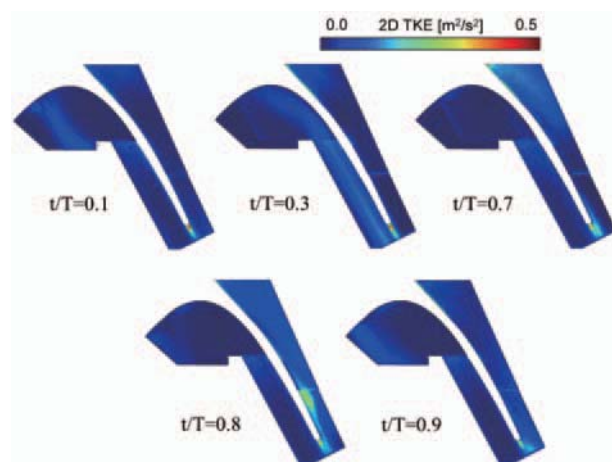


Fig. 7 Phase-locked averaged 2DTKE contours ($Re=100k$, $St=0.36$)

4. 詳細計測の結果と考察

紙面の都合で、詳細計測に関する議論は $Re=100k$ に限定して行う。

4.1 定常条件

4.1.1 剥離再付着点近傍 Fig. 8に詳細計測での対象領域を、Fig. 9に時間平均の無次元流速コンターを示す。座標系は計測域中心の翼面法線方向をy軸の正とし、正圧面側の粒子画像は上下反転させている。そのため、翼面はコンター図の下側にある黒の領域であることに留意されたい。

詳細計測の結果で得た流速分布Fig. 9 (a)の分析、具体的にはFig. 9に併記したように翼面近傍における速度ベ

クトルの分析から、負圧面境界層の時間平均再付着点は $93.5\%Cx$ に存在すると推定された。再付着点下流は翼面近くの流速が増加している。正圧面側に関しては、正圧面境界層剥離の再付着点はFig. 9 (d)の分析から $48\%Cx$ と推定された。Fig. 4に示す広域計測結果と比較すると、詳細計測時の時間平均再付着点が $1\%Cx$ 下流に位置しており、PIVの空間分解能の違いによって再付着点位置がわずかながらずれたと考えられる。

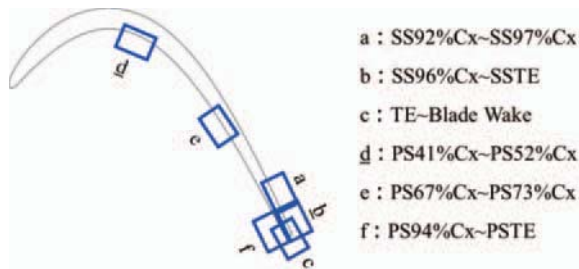
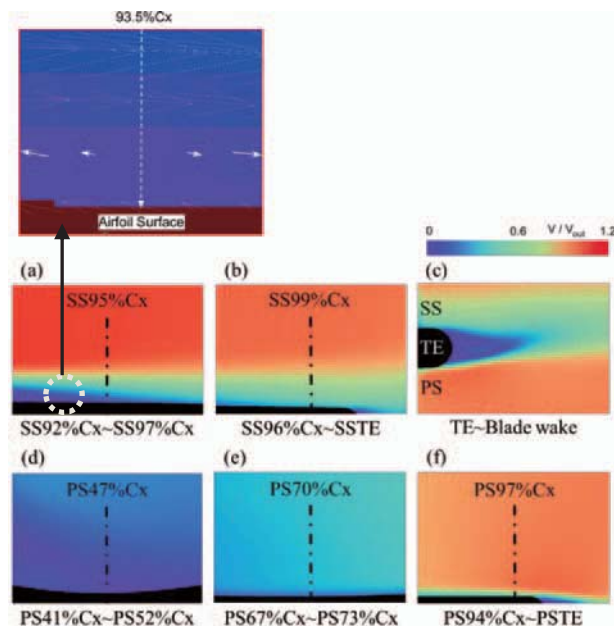


Fig. 8 Detailed measurement area

Fig. 9 Time-averaged flow speed contours (upper: suction side, bottom: pressure side) ($St=0.00$) with an explanatory figure for reattachment point detection

4.1.2 翼面境界層 Fig. 10は正・負圧面合計5カ所における境界層内時間平均流速分布を示しており、縦軸は壁面法線方向距離を翼ピッチで無次元化したものである。横軸の流速については、PS 47%CxとPS70%Cxに関しては出口平均流速で無次元化しており、それ以外の場所の流速データは境界層外縁の時間平均最大流速で無次元化している。Fig. 11に示す速度RMS分布の無次元化手法も同様である。Fig. 10のSS95%Cx及びPS47%Cxにおける壁近傍流速分布は直線的であり、それぞれ再付着点の直下流及び直上流の流速分布の特徴¹⁸⁾を呈している。また、Fig. 11から、負圧面剥離泡の再付着点

下流 (SS95%Cx, SS99%Cx) は、後述するように剥離泡からの渦が移流してくることによって速度RMSが $y/Pitch = 0.02$ 近傍でピークを有しつつy方向に高速度RMS領域が成長している。一方、正圧面剥離泡の再付着点近傍 (PS47%Cx) では $y/Pitch = 0.04$ までほぼ一様な高速度RMS領域が現れ、下流側に速度RMSが減衰している。なお、SS95%Cxの速度RMS分布において、 $y/Pitch=0.08$ 付近でRMSの増加が見られるが、これはこの高さにおける粒子数が少なかったことによりサブピクセル精度が悪化したことが原因であると考えられる。

前述の負圧面速度RMSに関連する現象を考察するため、Fig. 12にSS99%Cxにおける流速と境界層積分値の時間履歴を示す。速度は $y/Pitch=0.02$ のデータである。この計測点は速度RMSがピークに達する位置である。上から順に、流速、排除厚さ、運動量厚さであり、流速は出口平均流速で無次元化している。また、黒の破線は時間平均値を示す。また、この時間平均値から計算した形状係数 H_{12} が図中に記入されている。流速の時間履歴より、時間平均流に対して加減速をもたらす現象、即ち渦が周期的に流入していると考えられる。実際、中洞らの計測¹⁵⁾で負圧面の剥離泡から生じた巻き上がり渦がSS99%Cxに流入していることが示されている。Fig. 13には中洞¹⁶⁾が2DPIV計測した流れ場から時間平均流を差し引いた変動速度場を示す ($Re=170k$)。この図から、回転方向が交番する渦構造が下流側へ移流する状況が確認でき、Fig. 12の流速変動発生を裏付けている。また、それに合わせて排除厚さや運動量厚さも変化している。

Fig. 14にPS97%Cxにおける流速と境界層積分値の時間履歴を示す。流速は $y/Pitch=0.006$ (正圧面境界層外縁にほぼ相当) のデータである。流速や境界層積分値の時間履歴を見ると、負圧面で見られたようなスパイク状の変動は発生しておらず、スパン方向渦度成分分布 (Fig. 5) からFig. 13のような二次元的渦放出は発生していない。一方、平均値に対して大きな変動が見られるタイミング ($t=0.1 \sim 0.2$ [s]) が存在する。この現象を調査するため、Fig. 15にPS97%Cx付近におけるy方向流速成分とスパン方向渦度成分コンターを示す。時刻 t はFig. 14における $t=0.00$ と $t=0.15$ に対応している。 $t=0.00$ に比べて $t=0.15$ では翼面近くにy方向流速が正の領域 (図中では上向き) が流れ方向に広く存在していることがわかる。この様な広範囲にわたってy方向流速の変化を誘発する事象としては、流れ方向に軸を有する渦 (縦渦) を挙げるができる。実際、村上^(7),17)が行ったLES解析によると、正圧面剥離せん断層から放出された渦は、放出直後に流れ方向に細長い3次元的な渦へ変形し、翼後縁へ移流していく様子が確認されており、本研究でとらえられたこの現象と対応していると考えられる。そして、PS97%Cxにおける境界層積分値の大きな変動は流れ方向に軸を持つと推測される渦構造の流入が原因であると考えられる。しかし、今回の2DPIVのみ

では縦渦の存在を立証するには不十分であり、測定面を追加するなど更なる調査を行う予定である。

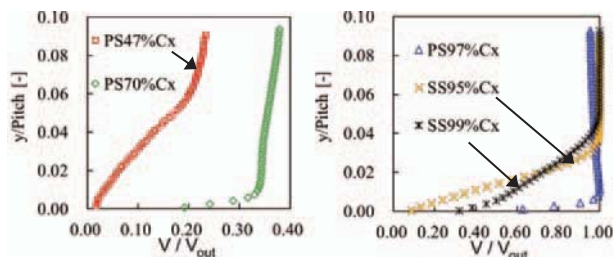


Fig. 10 Time-averaged flow speed distributions ($St=0.00$)

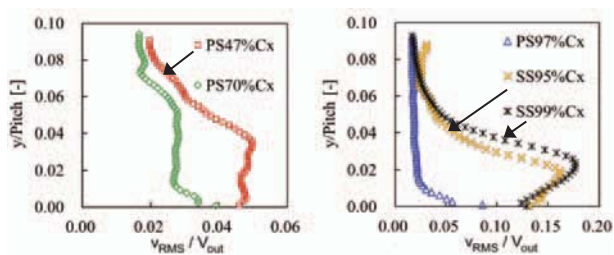


Fig. 11 Time-averaged velocity RMS distributions ($St=0.00$)

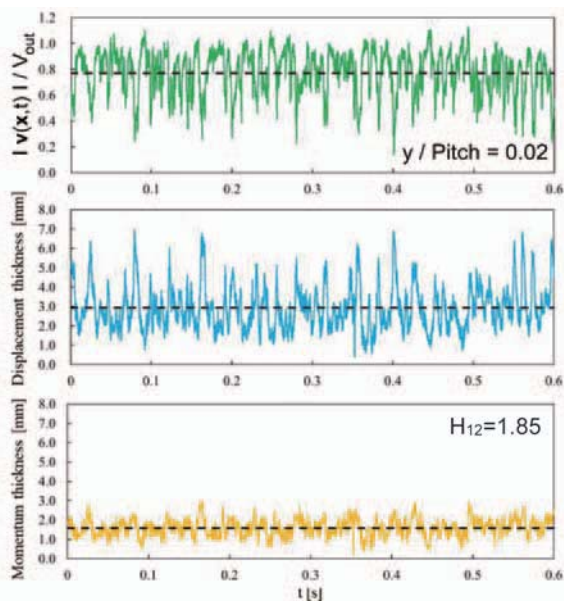


Fig. 12 Time histories of flow speed and boundary layer integrals at SS99%Cx ($St=0.00$)

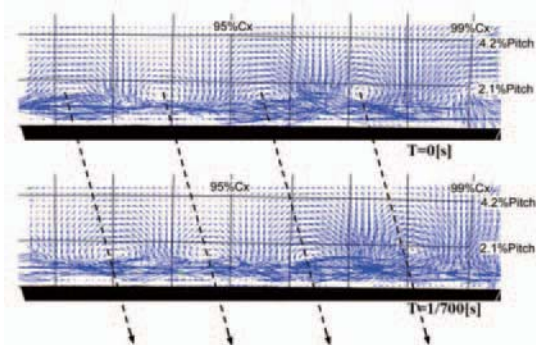


Fig. 13 Fluctuating 2D velocity field over the suction side measured by Nakahora^[15,16] ($Re=170k$, $St=0.00$)

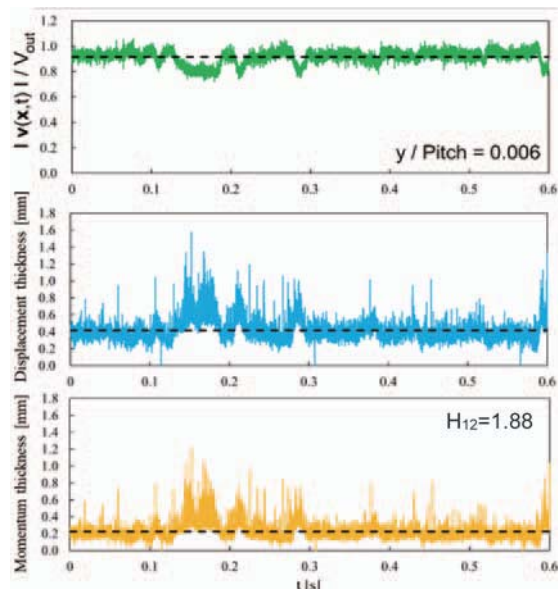


Fig. 14 Time histories of flow speed and boundary layer integrals at PS97%Cx

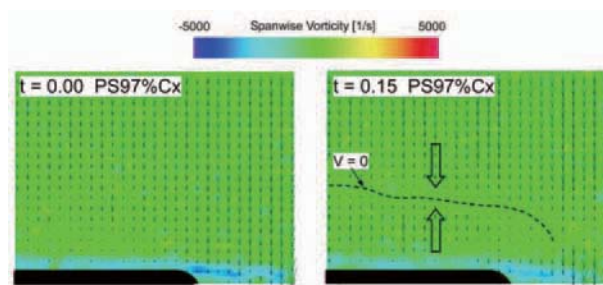


Fig. 15 Instantaneous normal velocity components and spanwise vorticity component contour around PS97%Cx ($St=0.00$)

4.1.3 後縁下流 ベース領域の空間的広がりを理解するため、逆流領域を定義し、それをFig. 16に示す。ここで、逆流とは流れ方向速度が負となる状況を指し、逆流領域は逆流の発生頻度が計測時間の50%以上となる領域とする。また、Fig. 16には逆流頻度50%以上を10%刻みの等高線としても印している。また、図中には時間平均速度場から算出した流線群を示す。この流線群から、ベース領域での再循環は負圧面側にのみ現れていることがわかる。なお、逆流率50%の範囲の下流側への広がり $L_R (=1.33d, d$; 後縁直径)は、時間平均流線から読み取れる翼後縁から下流側よみ点までの距離とほぼ一致していることなどから、ベース領域の時間平均的な特徴量抽出は両記述方法で共通していると見なせる。なお、時間平均的な再循環挙動の広がりを示す指標として再循環の中心位置を導入したところ、翼後縁から36% $L_R (=48\%d)$ 程度であった。

これらの図から、後縁中心を0度、正圧面側を正とした場合、翼後縁上における逆流頻度50%の位置は+40度、-20度に位置することが分かった。また、逆流頻度50%未満の領域は負圧面側後縁部の50%線の上流側及び上部に広がっている一方、正圧面側の逆流頻度50%未満の領

域は50%線とほぼ重なっており、負圧面側後縁での速度変動域が大きく、流線群からも確認されたように後縁中心に対してベース領域での流れ場が非対称的であることを示している。負圧面側での速度変動が大きいのは、動画での観測及びFig. 11～13で確認された負圧面境界層の挙動などから、負圧面剥離泡からの渦が後縁に流入していることに起因していると考えられる。

後述するように、ベース領域での流れ場の非対称性は後縁部での圧力分布に影響する⁽⁸⁾ことから、ベース圧損失は負圧面境界層の挙動との関連性が高い。

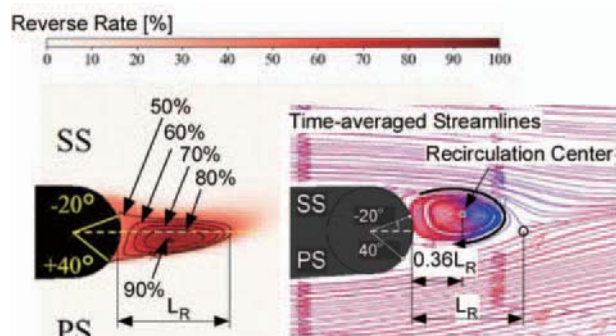


Fig. 16 Reverse flow region downstream of T.E. with time-averaged streamlines ($St=0.00$)

4.2 非定常条件

非定常条件ではWake流入によって剥離が抑制されることや、3.2節で確認されている翼後縁負圧面側での位相平均2DTKEの増減に関する現象を詳細に調査するため、計測領域はFig. 8に示す(b),(c),(f)の3領域とした。

4.2.1 翼面境界層 Fig. 17にSS99% C_x における無次元位相平均流速分布と位相平均速度RMS分布を示す。ここで、 V_{max} は各位相における流速の最大値である。Fig. 18にSS99% C_x における流速と境界層積分値の時間履歴を示す。流速は $y/Pitch=0.07$ のデータである。平板境界層に関する船崎らの研究⁽⁹⁾から、Wake通過によるnegative jet 効果により流れの加速に続いて減速発生が知られている。この過去の知見とFig. 18の位相平均流速の時間履歴より、SS99% C_x へのWake流入開始時刻は $t/T=0.80$ 前後であることがわかる。これはFig. 17の結果とも対応している。例えば、 $t/T=0.81$ では、計測領域全域の位相平均速度RMSが顕著に増加している。また、排除厚さや運動量厚さはWake通過前後で大きな変化を示し、排除厚さには複数のピークや谷部が発生している。 $t/T=0.10$ から $t/T=0.41$ では壁近傍の位相平均流速が低下していき、位相平均速度RMSも小さくなっていく。位相平均速度RMSは $t/T=0.41$ （図中矢印で示す時刻）で最小となっていることから、この時刻ではWake通過直後に出現するCalm region^{(20),(21),(22)}が存在していることがわかる。 $t/T=0.51$ 以降は位相平均速度の増加と位相平均速度RMSの増加が生じており、Calm regionの崩壊が示唆される。その後の $t/T=0.61, 0.71$ では、位相平均流速

分布や速度RMS分布はFig. 10やFig. 11に示す時間平均の分布に類似したものになっており、Wake通過後境界層が剥離泡を伴う時間平均的な状態に戻ったものと考えられる。Wakeが通過する前に発生している排除厚さのピーク P_1 やそれに続く谷部は、後述するようにこの状態で発生した渦放出現象と関係している。

Fig. 19にスパン方向渦度成分コンターを示す。理解しやすくするため、速度ベクトルを一部に併記している。時刻は図に記載のとおりである。 $t/T=0.61$ では負のスパン方向渦度成分を持った層が翼面付近に形成されている。上述のようにWake通過の影響から回復したこの時刻において剥離泡が存在していることが確認されているため、剥離せん断層と考えられ、速度ベクトルからもそのように理解できる。 $t/T=0.74$ では、SS99% C_x 付近では巻き上がり渦が発生し、下流へ移流していく様子が見られた。 $t/T=0.83$ でも同様である。これらの時刻は排除厚さのピーク値 P_2, P_3 出現の時刻とほぼ一致しており、比較的規模の大きい渦構造の出現が排除厚さの大きな増減を生じさせている。同様な結果がLengani⁽²³⁾らのPIV計測によっても得られており、 $St=0.36$ のようにWake通過周期が比較的大きい条件では、剥離抑制効果はある一方で、Wake間においては剥離泡が再成長し、その影響によって形状係数も増加しているとみられる。

Fig. 20にPS97% C_x における位相平均流速分布と位相平均速度RMS分布を示す。SS99% C_x と比べてWake流入による位相平均流速の変化は小さい。速度RMS分布では時刻によって差が見られており、 $t/T=0.10$ から $t/T=0.40$ にかけてRMSの増加が生じていることから、Wake流入の時刻であると考えられる。また、壁近傍においてRMSが増加しているのは、2.5節で示した前処理を行ったことにより壁近傍の粒子が消失し、サブピクセル精度が悪化したことが原因と考えられる。

Fig. 21にPS97% C_x における流速と境界層積分値の時間履歴を示す。速度は $y/Pitch=0.07$ のデータである。前出の船崎らの研究⁽⁹⁾では、正圧面側ではpositive jet効果により負圧面とは逆に減速に続いて加速が発生することが明らかにされており、この知見と位相平均流速の時間履歴から、Wake流入開始時刻は $t/T=0.14$ 付近であることがわかる。この時刻において排除厚さと運動量厚さが比較的大きく増加していることが確認できる。また $t/T=0.4 \sim 0.6$ 付近で排除厚さや運動量厚さの変動が確認できるがWake通過の効果と比して限定的である。

4.2.2 後縁下流 Fig. 22に後縁下流における位相平均2DTKEコンターを示す。この図から、翼後縁下流の流れ場における高2DTKE領域は空間的、時間的に大きく変動していること、また、翼後縁のごく近傍におけるベース領域付近での2DTKEの値は非常に小さいことがわかる。Fig. 5で確認されたように、定常条件では翼後縁正圧面側からせん断層の流出が明確に確認されており、Fig. 22中の $t/T=0.1 \sim 0.4$ （Wake通過の影響

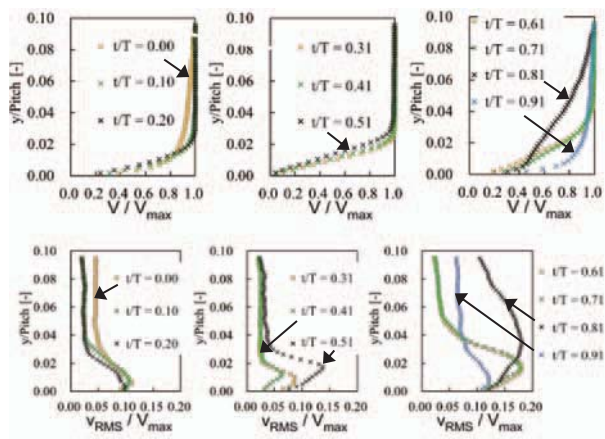


Fig. 17 Phase-locked averaged flow speed and velocity RMS distributions at SS99%Cr ($St=0.36$)

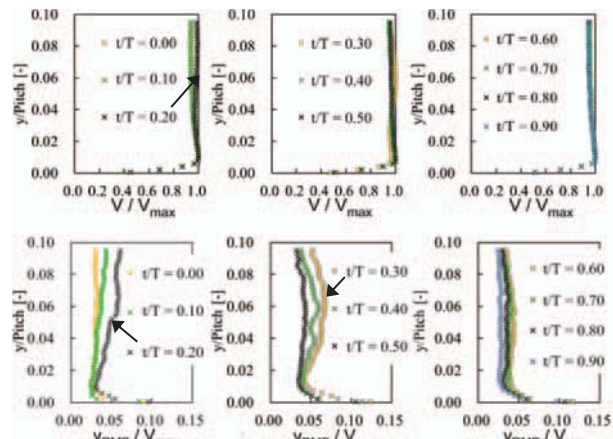


Fig. 20 Phase-locked flow speed and velocity RMS distributions at PS97%Cr ($St=0.36$)

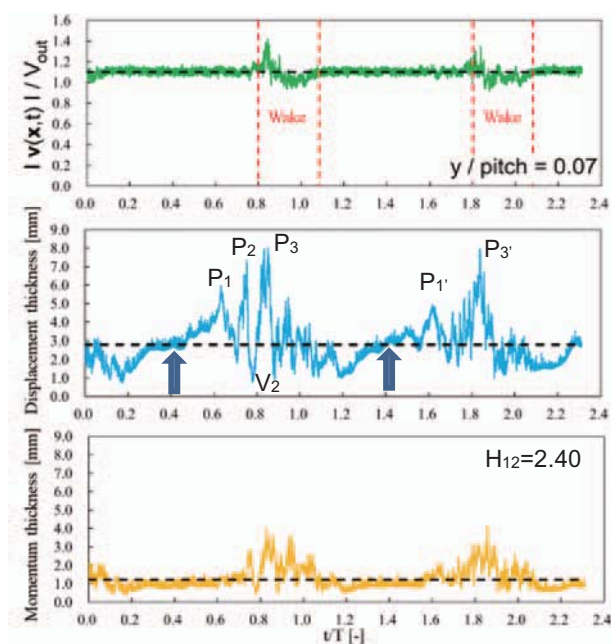


Fig. 18 Time histories of flow speed and boundary layer integrals at SS99%Cr ($St=0.36$)

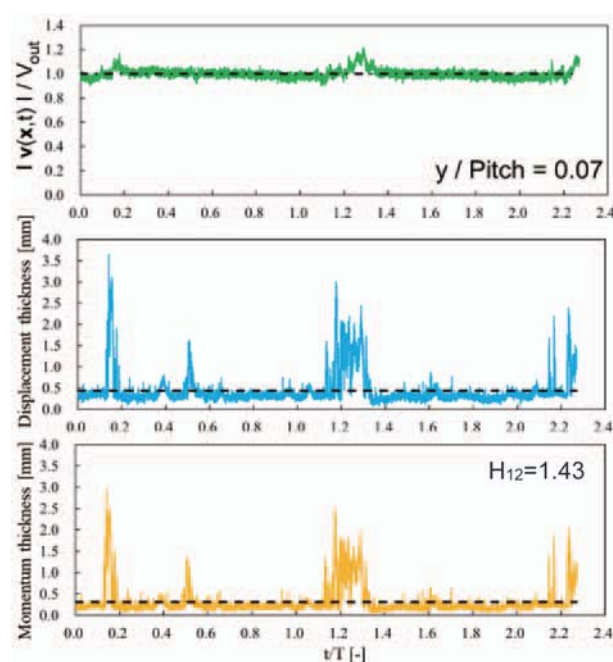


Fig. 21 Time histories of flow speed and boundary layer integrals at PS97%Cr ($St=0.36$)

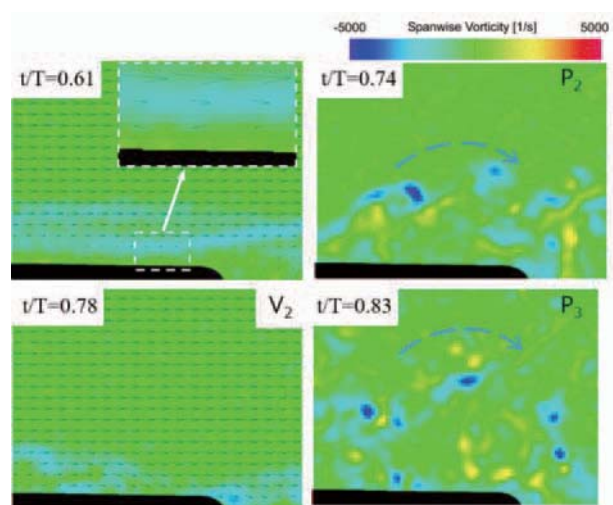


Fig. 19 Instantaneous spanwise vorticity component contours around SS99%Cr ($St=0.36$)

を受けない時刻)で確認された後縁下流の高2DTKE領域は、主として正圧面側の後縁から放出されているせん断層が巻き上がるにより生じた渦によるものである。 $t/T=0.50$ から $t/T=0.70$ 付近では、4.2.1節にもあるように、SS99%Cr付近において比較的規模の大きい渦構造が出現している時刻であるため、負圧面側後縁下流で2DTKEが増加している。 $t/T=0.80$ ではWakeがSS99%Crに到達している時刻であり、図中矢印で示すようにWakeが流入するためベース領域上方負圧面側の2DTKEが増加したと考えられる。

Fig. 23に逆流領域及び時間平均流線群を示す。非定常条件での後縁における逆流頻度50%の位置は定常条件とほぼ同じ結果となった。しかし、逆流領域は流れ方向に拡大している ($L_R=1.77d$) ほか、負圧面側後縁後方の速度変動域は、正圧面側とは対照的に上部側へ拡大して

いることが分かった。また、時間平均流線群から読み取れる負圧面側の再循環の中心位置は、翼後縁から47% L_R (=83% d)と定常条件より更に下流側に移動している。一方、正圧面側の再循環領域が定常条件より拡大し、全体として上下の対称性が生じている。

Fig. 24及びFig. 25に後縁の壁面静圧計測から算出された局所ベース圧係数を示す^{(8), (24)}。ここで、

$$C_{pb}(\theta) = \frac{p_b(\theta) - p_{out}}{1/2\rho\bar{V}_{out}^2}, \quad (4)$$

$p_b(\theta)$: 局所ベース圧, p_{out} : 翼列出口圧力, \bar{V}_{out} : 翼列出口速度。局所ベース圧は、Cicatelli, Sieverding⁽²³⁾の研究と同様に静圧孔1つを設けた円柱(直径は翼後縁直径に等しい)を後縁部に取り付け、それを -90° (負圧面側)から 90° (正圧面側)の範囲で 10° ずつ回転させ静圧を計測している。圧力計測には、翼列から少し離れた場所に設置した圧力変換器を用いており、約40秒間の測定値の時間平均から圧力を算出している。逆流領域での局所ベース圧係数の変化の幅は小さく、定常、非定常の両条件での差もほとんどない。一方、負圧面側では局所ベース圧係数が定常条件の値から上昇(回復)しており、結果としてベース圧分布が後縁中心に関して対称性及び平坦性が出現したと見なせる。Sieverding, Manna⁽²⁾によれば、低マッハ数流出条件下で翼後縁部での圧力分布が平坦になる理由は、翼後縁からのせん断層の巻き上がりによる渦形成がベース領域から十分離れた場所で行われていることが原因とされている。このことから、定常条件下で観測された負圧面側 $-30^\circ \sim -70^\circ$ の圧力低下は、剥離泡から放出される巻き上がり渦(Fig. 13)が後縁から流出することで、せん断層の早期巻き上がりに相当する効果が現れベース領域に影響を与えたと考えられることができる。また、非定常条件での圧力の回復と平坦性の出現には、前述のように、翼負圧面での剥離泡がWake通過で抑制されることが原因と考えられる。即ち、Fig. 18, 19で確認されたように、Wake通過による剥離泡抑制効果とそれによる巻き上がり渦の発生頻度の減少が関与していると考えられることができる。同様の現象は、Fig. 25に示すように別のレイノルズ数($Re=130k$)でも確認されている。

5. 結言

本研究は航空エンジン用低圧タービン翼での翼面境界層流れと翼後縁近傍(ベース領域)流れ場の関連性を明らかにすることを目的とし、詳細なPIV計測を実施した。その結果、以下のような知見を得た。

(1) 定常条件について 負圧面境界層では剥離が発生しており、剥離泡から発生する渦が翼後縁まで移流し、渦通過に伴い排除厚さや運動量厚さが非定常的に変化している。その結果、負圧面側後縁の速度変動が大きくなった。正圧面境界層では剥離泡からの縦渦と見られる現象の通

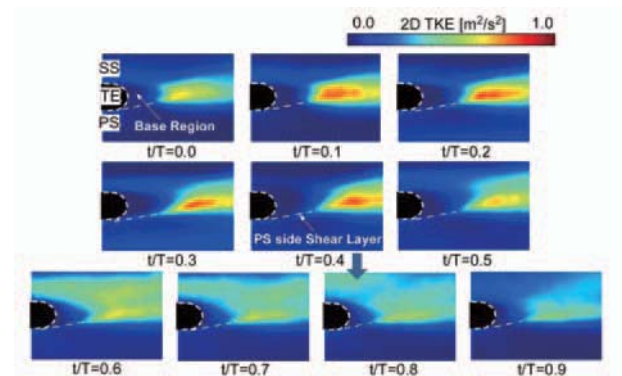


Fig. 22 Phase-locked averaged 2DTKE contours around T.E. ($St=0.36$)

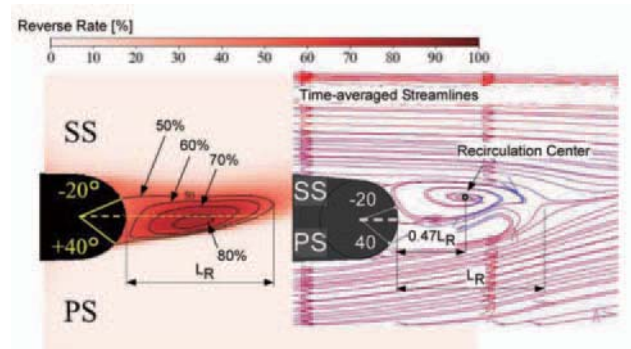


Fig. 23 Reverse flow region downstream of T.E. with time-averaged streamlines ($St=0.36$)

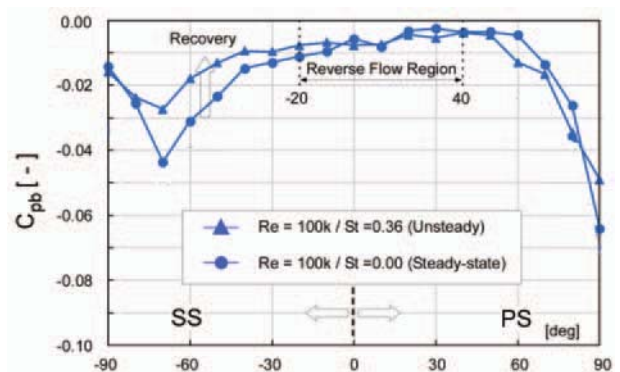


Fig. 24 Base pressure distributions for $Re=100k$ ⁽²⁴⁾

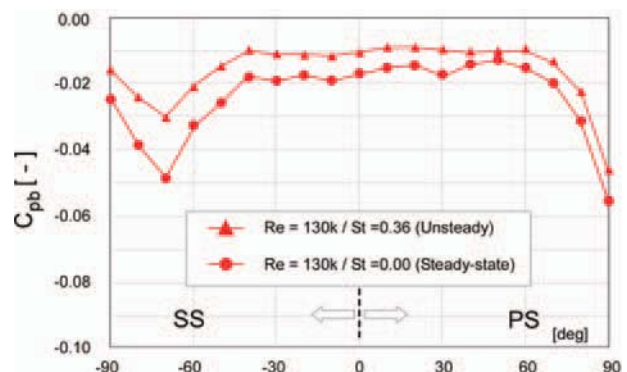


Fig. 25 Base pressure distributions for $Re=130k$ ⁽²⁴⁾

過に伴い排除厚さ等が変化している。しかし、正圧面側後縁の速度変動は負圧面側に比べて小さいことから、正圧面剥離泡からの縦渦によるベース圧損失への影響は小さいと考えられる。また、後縁まわりの静圧分布は後縁中心に関して非対称性を有している。

(2) 非定常条件について 負圧面境界層ではWake通過時やWake通過後に起こる剥離や巻き上がり渦の発生が排除厚さや運動量厚さの変化を引き起こしている。後縁の逆流頻度50%の位置は定常条件と同一であったが、後縁の速度変動はこれら負圧面境界層の挙動の影響を受け、局所ベース圧係数も定常条件の値から上昇（回復）した。その結果、後縁まわりの静圧分布は後縁中心に関して対称性を回復している。

これらの結果から、今回報告した実験条件においては後縁近傍での負圧面境界層の挙動とベース圧損失は関連性が高いと考えられる。

今後の展望として、レイノルズ数や主流乱れ、ストローハル数を変更した試験を行うほか、正圧面側前縁近傍での剥離点近傍の流れ場及びそれに起因する流動現象等を調べていく計画である。

参考文献

- (1) Denton, J. D. Loss Mechanisms in Turbomachines, ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 115 (1993), pp. 621-656.
- (2) Sieverding, C. and Manna, M., A Review on Turbine Trailing Edge Flow, International Journal of Turbomachinery Propulsion and Power, Vol. 5 (2) (2020).
- (3) Parra, J., et al., Trailing Edge Thickness Impact on the Profile Losses of Highly Loaded Low Pressure Turbines Blades, ASME Paper, GT2016-57955 (2016).
- (4) Furukawa, J., Hamabe, M. and Funazaki, K., The Difference of Down-stream Mixing Loss due to the Trailing Edge Configuration, ISABE-2017-22613, 2017.
- (5) Zhou, C., Hodson, H. and Himmel C., The Effects of Trailing Edge Thickness on the Losses of Ultra-High Lift LP Turbine Blades, ASME Paper, GT2013-94029 (2013).
- (6) Funazaki, K. et al., A Novel Method for Improvement of Aerodynamic Performance of Highly Loaded LP Turbine Airfoils for Aeroengines, ASME Paper GT2013-94745 (2013).
- (7) 村上大地他, 航空エンジン用高圧タービン翼の高効率化に関する研究（翼厚みが正圧面剥離及び空力性能に与える影響）, ターボ機械, Vol. 45-11 (2017), pp. 687-698.
- (8) 藤田優輔, 船越亮, 谷口英夫, 船崎健一, 航空機エンジン用低圧タービン翼のベース領域に関する研究, 日本機械学会2018年度年次大会 (J0550103), (2018).
- (9) 可視化情報学会編, PIVハンドブック, 第2版 (2018), p119, 森北出版.
- (10) 榊原潤, PIV基礎, 第29回可視化フロンティア「PIV講習会2017-2 (東京)」資料, (2017).
- (11) 相馬天斗他, 剥離・再付着を伴う境界層速度計測における熱線プローブ挿入の影響について, 日本機械学会第97期流体工学部門講演会 (2019).
- (12) 船崎健一, 谷口英夫, 斎藤拓, 酒井宏, 剥離を伴う航空エンジン用低圧タービン翼面境界層の遷移挙動に関する研究, ながれ, Vol. 30 (2011), pp. 479-487.
- (13) Uzun, A. and Hussaini, M.Y., An Application of Delayed Detached Eddy Simulation to Tandem Cylinder Flow Field Prediction, Computers & Fluids, Vol. 60 (2012), pp. 71-85.
- (14) 船崎健一, 山田和豊, 田中望, 千葉康弘, 航空エンジン用低圧タービン翼面上剥離境界層に与える主流乱れの効果に関する研究, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 38, No. 2 (2010), pp. 47-54.
- (15) 中洞秀明, 船崎健一, 谷口英夫, 佐藤克紀, 熱線流速計と流れの可視化を用いた航空エンジン用低圧タービン翼面上における剥離を伴う境界層遷移に関する研究, 日本機械学会東北支部第50期総会・講演会 (2015).
- (16) 中洞秀明, 航空エンジン用低圧タービン翼面上における境界層乱流遷移現象に関する研究, 岩手大学修士論文 (2015).
- (17) 村上大地, 航空エンジン用低圧タービン翼の空力性能に関するパラメトリック解析（実機環境を想定した空力損失の評価及び損失メカニズムの解明）, 岩手大学修士論文, (2018).
- (18) Rinoue, R., Shirai, Y. and Sunada, Y., Behavior of Separated and Reattaching Flow Formed over a Backward Facing Step, Transaction of Japan Society of Aeronautical and Space Sciences, Vol. 45, No. 147, (2002), pp. 20-27.
- (19) 船崎健一, 北澤貴, 渡邊喬, 周期的後流による境界層強制遷移に関する研究（後流通過に伴う速度変動の効果）, 日本機械学会論文集 (B編), Vol. 61, No. 583, (1995), pp. 874-881.
- (20) Stieger, R. D. et al., The Transition Mechanism of Highly-Loaded LP Turbine Blades, ASME paper, GT2003-38304, (2003).
- (21) Stieger, R. D. et al., Unsteady Surface Pressures Due to Wake-Induced Transition in a Laminar Separation Bubble on a Low-Pressure Cascade, ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 126, (2004), pp. 544-550.
- (22) 船崎健一, 田中望, 菊池護, 航空エンジン用低圧タービンの高負荷化に関する研究（高負荷・超高負荷状態における遷移挙動の時空間図理解）, 日本機械学会論文集 (B編), Vol. 74, (2008), pp. 41-50.
- (23) Lengani, D. et al., Recognition of Structures Leading to Transition in a Low Pressure Turbine Cascade: Effect of Reduced Frequency, ASME paper, GT2019-91222, (2019).
- (24) 藤田優輔, 航空機エンジン用低圧タービン翼のベース領域に関する研究, 岩手大学大学院修士論文 (2020).
- (25) Cicatelli, G., Sieverding, C.H., The Effect of Vortex Shedding on the Unsteady Pressure Distribution around the Trailing Edge of a Turbine Blade, ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 119 (1997), pp. 810-819.

気流中の水膜分裂によって発生する一次分裂水滴径分布に関する研究

A Study on Water Droplet Distribution of Primary Atomization Generated by Water Film Disruption in Airflow

伊藤 大輔^{*1}
ITO Daisuke中野 晋^{*2}
NAKANO Susumu竹田 陽一^{*1,*2}
TAKEDA Yoichi

ABSTRACT

Droplets of the primary atomization generated by disruption of water film, which flows on a plate set in parallel airflow, are observed by a high-speed camera to investigate effects of airflow velocity, a flow rate of the water, and a thickness of the plate edge on the water droplet diameter distribution. Although the airflow velocity and the flow rate of water affect the distribution pattern, the thickness of the plate edges has little effect on the distribution pattern. The distribution patterns of the primary atomization were approximated by exponential functions whose exponents were obtained by performing multiple regression analysis. Modified breakup model that is focused on a water lump accumulated on the plate edge and its disruption frequency is proposed. Spanwise unstable wave length of the water lump is compared with calculated and measured one, effectiveness of the modified model is shown.

キーワード：水滴, 水膜, 一次分裂, エロージョン, 蒸気タービン, 低圧段, 過飽和吸気冷却

Key words : Droplet, Water film, Primary breakup, Erosion, Steam Turbine, Low-pressure stage, Oversaturated water atomization cooling

1. 緒言

蒸気タービンの高効率・高出力化には最終段の長翼化が有効である。長翼化により排気損失を低減でき、さらにタービン車室数の低減が可能になる。しかし、低圧段における湿り域までの蒸気膨張により静翼に凝縮水滴の一部が付着し水膜流を形成する。これが静翼後縁から飛散して動翼先端に衝突し損傷を引き起こす⁽¹⁾。これはドレンエロージョンと呼ばれる損傷現象で、蒸気タービンの高効率化に相反してタービンの信頼性を低下させる。同様な現象は、ガスタービンの過飽和吸気冷却⁽²⁾にも見られる。水噴霧による吸気密度の増加と圧縮機駆動動力の低減により夏場のガスタービン軸出力の低下を防止するが、入口案内羽根に付着した水滴は水膜流を形成し羽根後縁から飛散して圧縮機初段動翼のエロージョンを引き起こすことが指摘されている⁽³⁾。

エロージョン損傷量の定量化として、金属への水滴の衝突速度や衝突水滴径に対するエロージョン損傷量の研究は、これまでも蒸気タービンを対象として坪内⁽⁴⁾や伊藤⁽⁵⁾らによって行われ、ガスタービンを対象として内田⁽⁶⁾らによって行われている。エロージョン損傷の定量

的な評価には翼後縁での水膜分裂で発生する水滴径やその分布を知ることが不可欠である。

気流中を運動する液滴の分裂形態に関しては、単独液滴の分裂観察からBag-type, Club-type, そしてDisc-typeの3種類の分裂形態があり⁽¹⁾, Flock⁽⁷⁾らは各分裂形態のウェーバ数範囲を明確にした。Hammit⁽⁸⁾らは、単独液滴の分裂形態を基に液滴の微細化メカニズムをまとめている。またガスタービンを対象として安田⁽⁹⁾らが翼後縁厚みは水膜の分裂形態、飛散水滴径及びその分布に影響を及ぼさないことを示した。

蒸気タービン低圧段や、吸気冷却ガスタービンの入口案内羽根後縁での液膜分裂の現象は、航空用ガスタービンの燃料噴射器に用いられるプレフィルミングエアブラストアトマイザー⁽¹⁰⁾においても扱われる現象である。Gepperth⁽¹¹⁾らは液膜流の不安定性理論^{(12),(13)}を基に液膜分裂モデルを構築した。さらに液膜分裂によって発生する一次分裂液滴径モデルを提唱し⁽¹⁴⁾, プレフィルミングエアブラストアトマイザー用に提案された他の液滴径予測式と比較し、一次分裂における液滴径の予測精度を向上させている。

本研究では、平板上の水膜流が平板端から気流中に流出するときに平板上の水膜流と分断する際に発生する微粒化を一次分裂と定義する。蒸気タービン低圧段の静翼では後縁からの飛散水滴を微細化する方法がしばしば議論されるため、一次分裂現象を解明することは重要である。本報告では、蒸気タービン低圧段での水滴エロ-

原稿受付 2021年3月30日

査読完了 2021年9月22日

*1 東北大学大学院 工学研究科 ファインメカニクス専攻
〒980-0845 仙台市青葉区荒巻 6-6-11
E-mail: susumu.nakano@rift.mech.tohoku.ac.jp

*2 東北大学大学院 工学研究科 附属先端材料強度科学研究センター

ジョン損傷の予測式を確立するための基礎検討として、一次分裂水滴径分布に及ぼす気流速度、水膜流量、及び平板端厚みの影響を調べ、その予測式を提案する。併せて分裂メカニズムの解明を行った。

2. 実験装置及び実験方法

2.1 実験装置

本実験に用いた実験装置の概略をFig. 1に、テストセクションのカットモデルをFig. 2に示す。本装置は、テストセクションに空気を送風するブロワ（日立ボルテックスブロワVB-080-E2）、ブロワからの空気を一部大気排出してテストセクションへの空気流量を調節する流量調節弁、テストセクションへの空気流量を計測する流量計（東京計装ミニサーマルフローメータTF-2251N-351-4F80）、およびテストセクションで構成される。Fig. 1に示すようにテストセクション部は助走ダクトとフランジで接合されており、流れ方向に400mmの長さを有する。テストセクション入口部から1000mmの長さの中央分離板を有し、その端部の角度はHammit⁽⁸⁾の実験と同様9.0°である。また、中央分離板の片面にはフランジ部から100mmの位置にスリットが設けられ、ここから水道水を供給する。給水は気流によって中央分離板表面を重力方向に流れ、端部（以下、平板端）から水滴として飛散する。

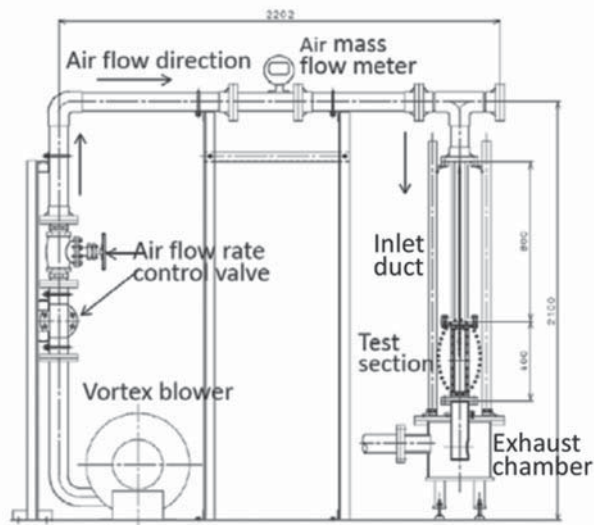


Fig. 1 Experimental equipment [units: mm]

2.2 対象とする流れ場

対象とする流れ場は蒸気タービン低圧段の圧力20kPa程度の湿り蒸気である。本実験は気流条件と水膜条件の設定の容易さより、空気流と水道水の供給により実験を行うが、流路中央の最大流速を代表速度としたとき、空気流速 $U_m = 90\text{m/s}$ 程度で液滴の臨界ウェーバ数⁽¹⁾とレイノルズ数が実機同等となるようにした⁽¹⁵⁾。

2.3 実験条件

空気流量と供給水流量は松崎⁽¹⁵⁾らの実験と同様とし

た。つまり、空気流量は $120\text{m}^3/\text{h}$, $180\text{m}^3/\text{h}$, $240\text{m}^3/\text{h}$, $300\text{m}^3/\text{h}$ とした、上記の空気流量で、流路中央の最大流速はそれぞれ $U_m = 54.4\text{m/s}$, 81.6m/s , 108.8m/s , 136m/s になる。以下それらを代表速度とする。

給水流量は $Q_w = 0.29 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, $0.58 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, $1.17 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ とした。これを中央分離板の幅 $b = 20 \text{ mm}$ で除した単位長さあたりの給水流量は $Q_w/b = 14.5 \text{ mm}^2/\text{s}$, $29.0 \text{ mm}^2/\text{s}$, $58.5 \text{ mm}^2/\text{s}$ となる。以下、これらを給水流量とする。

平板端厚み条件は 0.30mm , 0.60mm , 0.90mm （以下R0.30, R0.60, R0.90と記載）の3種類を用いた。

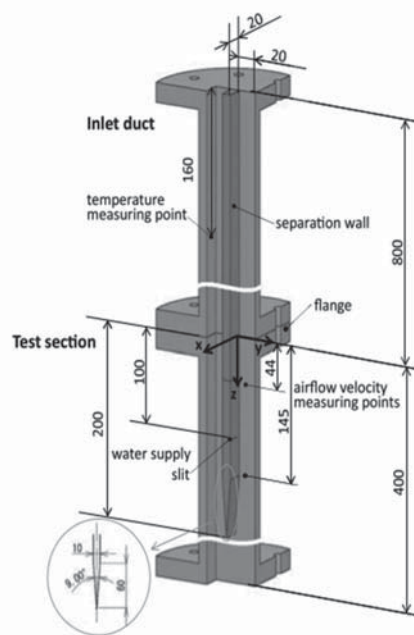


Fig. 2 Cut model of test section [units: mm]

2.4 実験方法

各実験条件について、平板端から飛散する水滴を高速度カメラ（Photron製 FASTCAM-SA/MC2.1）で撮影し、その撮影画像を分析することで水滴径分布およびザウタ平均粒径を取得した。照明にはバックライト方式とフロントライト方式を併用した。なお、撮影方向は中央分離板正面を撮影面とし、撮影速度は500 fpsとした（ただし、後述する離散フーリエ解析時には5000fpsとする）、シャッタースピードは $1/338000 \text{ sec}$ と設定した。また、各実験条件に対して2048フレームの撮影を行った。

2.5 撮影画像の解析

画像処理にはImageJ¹⁶を用いた。画像解析の領域は平板端から分離し終えない水膜や液糸を除くため、平板端から40mm下流の領域とした。初めに撮影画像の背景の抜き出し処理として、もとの像と背景画像（z-project像）の画素値の差に変換して画像の明暗を明確にし、この画像について二値化処理を行った。二値化時のノイズ除去のため、2ピクセル以上の辺接続を持つ集積をひとつの水滴と判断した。さらに奥行方向に重なった画像を

ひとつの水滴径と評価することによる水滴径の過大評価を回避するため Watershed 処理¹⁶⁾を行った。また、縦横比の大きな扁平形状の画像も除外するため、Circularity ≥ 0.50 の粒子のみを抽出した。

水滴数の頻度は、2 ピクセル以上で構成される粒子点数を、2048 フレームに渡り各ピクセル毎に計測し、2048 フレームの全画像点数との比で表し、式(1)に示す分布関数 $f(d)$ で規格化している。

$$\sum_{i=2\text{pixel}}^{\max} f(d)_i \Delta d_i = 1 \quad (1)$$

中央分離板の横幅20mmを基準とし、各粒子の粒面積を実スケール $[\text{mm}^2]$ に変換した。今回の場合、中央分離板の幅20mmが366ピクセルの長さとなるため、画像面積に等価な円直径として $87 \mu\text{m}$ が最小水滴直径になる。

3. 実験結果と考察

3.1 気流速度の影響

Fig. 3に単位長さあたりの給水流量 $29.0 \text{ mm}^2/\text{s}$ 、平板端厚み 0.3mm の時の各気流速度での平板端の水膜分裂状態を示す。

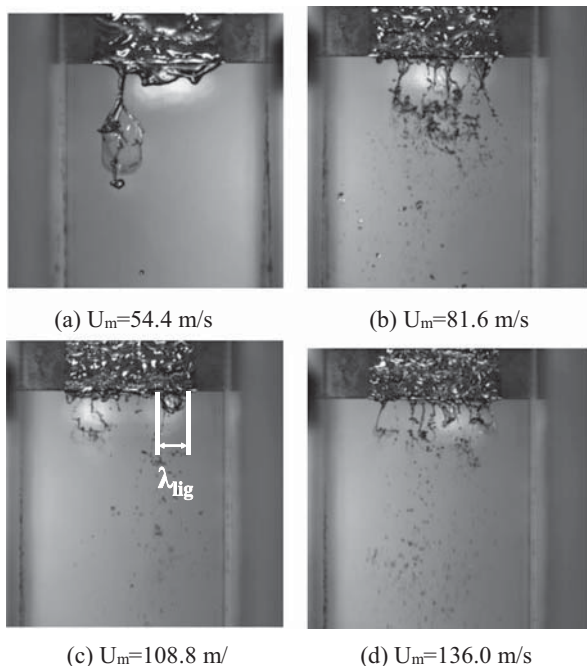


Fig. 3 Water film breakup patterns ($Q_w/b = 29.0 \text{ mm}^2/\text{s}$, R0.30)

気流速度 54.4 m/s では滴状分裂から膜状分裂に分裂状態が遷移する状態で単独水滴での Bag - type や Club-type に見られる投げ網状の分裂形態を呈する。気流速度 81.6 m/s 以上では平板端から微小な水膜塊が空間にせり出して分裂する膜状分裂¹⁵⁾になり、微細な水滴が発生していることが分る。Fig. 3 (c)に示す λ_{lig} は3.5で述べる空間にせり出した水膜のスパン方向不安定波長である。平

板端にせり出した水塊によって形成される凹凸波形の一波形分の凹部の最底部間の距離を測定した。

Fig. 4に $Q_w/b = 14.5 \text{ mm}^2/\text{s}$ 、平板端厚み 0.3 mm の水滴径頻度分布を、各気流速度に対して示す。気流速度の上昇に伴って最大水滴径とその発生頻度が減少していることが確認できる。図には参考のため安田⁹⁾らの結果を記載した。安田らの実験ではスプレーノズルによる水の供給や翼型を用いている点、および計測位置が翼後縁から 100mm 下流位置等、実験方法が異なるため本実験結果と直接比較することはできないが、片対数グラフ上で概ね線形の結果となっており、本計測結果と同様な分布形態を示していることが伺える。

Fig. 4に示す $274, 171, 124, 95 \mu\text{m}$ の4つの水滴径は Hammit⁸⁾らによって示された気流マッハ数 M による臨界ウェーバ数 $W_{e,cr}$ の関係に本実験条件をあてはめた場合の臨界水滴径である。 $W_{e,cr}$ は M の関数として式(2)で近似している¹⁵⁾。

$$W_{e,cr} = -25.8M^5 + 132.2M^4 - 234.5M^3 + 118.8M^2 + 45.4M + 4.1 \quad (2)$$

気流速度 54.4 m/s の場合、直径 $274 \mu\text{m}$ 以下の水滴は2次分裂せずに飛散すると考えられる。ここで、ガスタービンの吸気冷却の場合を考えると、ノズル噴霧水の水滴径に比べると $274 \mu\text{m}$ は約10倍程度大きな水滴であり、圧縮機入口案内羽根に付着した噴霧水が羽根後縁から放出されるときに、噴霧水水滴の10倍の直径を有する粗大水滴が2次分裂せずに初段動翼に衝突することになる。高速域においてはほとんどの水滴は2次分裂することになるが、それでも $100 \mu\text{m}$ 程度の水滴は2次分裂せずに飛散することになる。

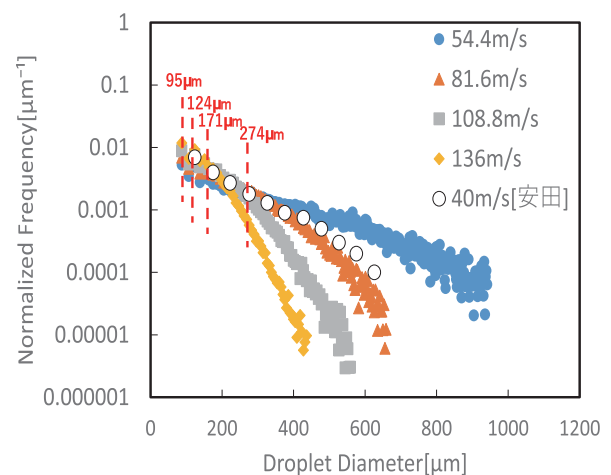


Fig. 4 Effect of airflow velocity on droplet distribution ($Q_w/b = 14.5 \times \text{mm}^2/\text{s}$, R0.30)

3.2 給水流量の影響

Fig. 5に、平板端厚み R0.30、気流速度 $U_m = 54.4 \text{ m/s}$ 、 81.6 m/s 、 136 m/s における、給水流量を変化したときの水滴径頻度分布を示す。気流速度が低速な $U_m = 54.4 \text{ m/s}$ のときは給水流量の変化に伴う水滴径頻度分布の

変化が観察されないのに対して、気流速度の増加に伴い給水流量の影響が顕在化し、給水流量の上昇に伴い粗大水滴の割合が上昇している様子が観察される。

3.3 平板端厚みの影響

Fig. 6に、給水流量 $Qw/b = 29.0 \text{ mm}^2/\text{s}$ 、気流速度 $U_m=54.4 \text{ m/s}$, 81.6 m/s , 108.8 m/s , 136 m/s における平板端厚みを変化したときの水滴径頻度分布を示す。Fig. 5に示した給水流量の影響と同様、低速気流条件においては平板端厚みの上昇に伴う水滴径頻度分布の変化がほとんど観察されないのに対して、高速気流条件においては、平板端厚みの上昇に伴い、片対数グラフ上における水滴径頻度分布の傾きが若干低下していることから、粗大水滴の割合が上昇する傾向が読み取れる。しかし、平板端厚みが水滴径頻度分布に及ぼす影響は、給水流量が及ぼす影響と比較して軽微である様子が観察される。

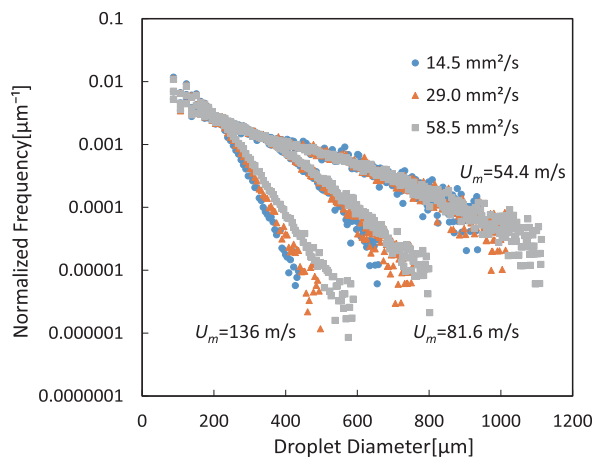


Fig. 5 Effect of water flow rate on droplet distribution (R0.30)

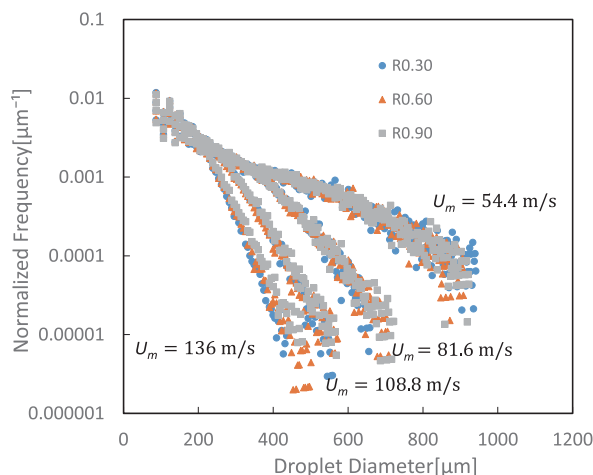


Fig. 6 Effect of thickness of plate edge on droplet distribution ($Qw/b = 29.0 \text{ mm}^2/\text{s}$)

3.4 平均水滴径

平均粒径は式(3)で示されるザウタ平均径 D_{32} を算出した。各条件におけるザウタ平均径をTable 1, Table 2, Table 3に示す。この結果を用いて、気流速度とザウタ

平均径の関係をプロットした図をFig. 7に示す。また、同図には、この関係についてべき関数の相関を仮定し、最小二乗法による回帰を行った結果も示す。

$$D_{32} = \frac{\sum_i n_i d_i^3}{\sum_i n_i d_i^2} \quad (3)$$

Table 1 Sauter Mean Diameter (R0.30)

Qw/b [m²/s]	Airflow velocity [m/s]			
	54.4	81.6	108.8	136
14.5	517	322	244	200
29.0	530	332	248	208
58.5	551	348	267	223

Table 2 Sauter Mean Diameter (R0.60)

Qw/b [m²/s]	Airflow velocity [m/s]			
	54.4	81.6	108.8	136
14.5	503	324	242	204
29.0	518	340	258	215
58.5	549	359	273	228

Table 3 Sauter Mean Diameter (R0.90)

Qw/b [m²/s]	Airflow velocity [m/s]			
	54.4	81.6	108.8	136
14.5	509	328	249	210
29.0	515	338	255	218
58.5	548	364	277	235

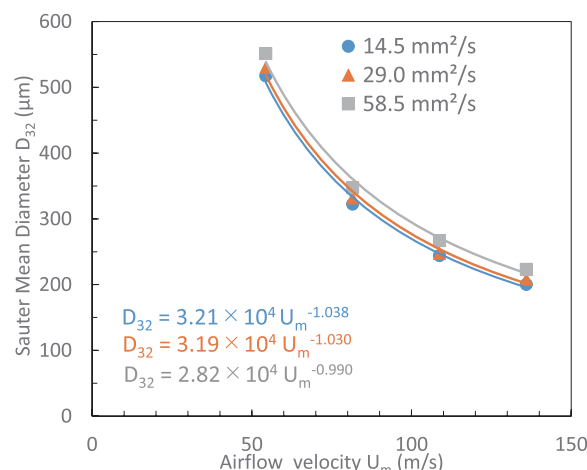


Fig. 7 Sauter Mean Diameter (R0.30)

Fig. 7からザウタ平均粒径は気流速度と概ね半比例している様子が観察できる。Gepperth⁽¹⁴⁾は、ザウタ平均粒径として、これまでに提案された予測式を自らの実験データと比較している。ザウタ平均粒径に対する気流速度の影響はべき乗で現れ、EL-Shanawany ら⁽¹⁷⁾は気流速度の-1.2乗に、Sattelmayer⁽¹⁸⁾は-1.57乗に、Ainger⁽¹⁹⁾

は-1.05乗に、そしてGepperth²⁰⁾は気流速度の-0.93乗にザウタ平均粒径が比例することを示している。本研究結果はAingerとGepperthの結果に近い値を示す。一方、EL-ShanawanyとSattelmayerの結果とは乖離がある。これは、AingerとGepperthの研究では平板端の直下で水滴径を計測しているのに対し、EL-ShanawanyとSattelmayerの研究ではより下流での計測を行っており、二次分裂の影響が顕在化していることが原因であると考えられる。本分析のザウタ平均粒径は、他の結果と同等な結果が得られており、一次分裂を捉えていると判断できる。

3.5 水滴径頻度分布

Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6の結果から、本実験範囲内においては、片対数グラフ上で水滴径頻度分布が直線を示しているため、これは式(4)で示される指数分布を仮定できる。

$$f(d; \beta) = g(\beta) \exp\left(-\frac{d}{\beta}\right) \quad (4)$$

ここで、 d は水滴径、 β は分布を決定づける変数である。 $f(d; \beta)$ は確率密度関数であり、定義域における積分値が1となることから $g(\beta)$ を決定できる。特に、定義域が $0 \leq d \leq \infty$ のときは $g(\beta) = 1/\beta$ となるが、有限の $d_{min} \leq d \leq d_{max}$ のときは、式(5)で表せる。

$$f(d; \beta) = \frac{\exp\left(-\frac{d}{\beta}\right)}{\beta \left[\exp\left(-\frac{d_{min}}{\beta}\right) - \exp\left(-\frac{d_{max}}{\beta}\right) \right]} \quad (5)$$

β を決めることで水滴径頻度分布を規定することができる。Fig. 4に示した水滴径頻度分布を指数関数で近似した結果をFig. 8に示す。指数にかかる係数の絶対値を取り、この逆数を計算することで β が得られる。

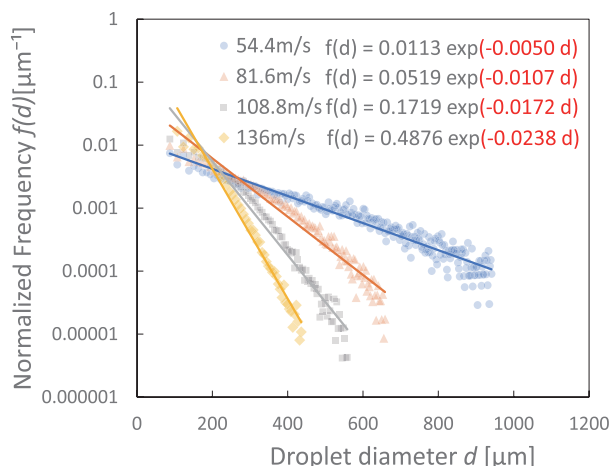


Fig. 8 Exponential approximation of droplet distribution ($Q_w/b=14.5 \text{ mm}^2/\text{s}$, $R0.30$)

Fig. 9に、平板端厚みが $R0.30$ 、給水流量条件が $Q_w/b = 14.5 \text{ mm}^2/\text{s}$, $29.0 \text{ mm}^2/\text{s}$, $58.5 \text{ mm}^2/\text{s}$ のときの気流速度と β の関係を示す。図中にはべき乗近似した結果を破線で示す。各結果の相関係数から、いずれの給水流量条

件についても、気流速度と β の関係はべき乗近似式と極めてよい一致を示すことが分かる。

同様に、給水流量、平板端厚み条件についても、 β をこれら変数のべき乗で近似した。結果をTable 4に示す。給水流量に関しては、気流速度 108.8 m/s 以上では β は給水流量のべき乗式としての近似が良好であるが、 81.8 m/s 以下での相関は低下する。同様の結果は、平板端厚みに対しても現れているが、べき乗近似式の指数は給水流量の場合よりも小さく、 β に対する影響が少なくなっていることを示している。

以上より、 β の値には気流速度が最も強い影響を及ぼし、その関係はべき乗式で良好に近似できる。一方で、給水流量と平板端厚みの変化に伴う β の変化のべき乗近似は、低速気流条件では β の変化に及ぼす給水流量や平板端厚みの影響が殆ど見られないものの、高速気流条件では、給水量に関してはある程度の相関性を示す。

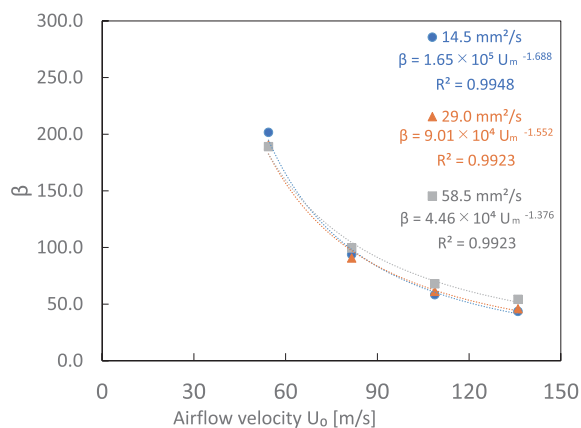


Fig. 9 Effect of airflow velocity on β ($R0.30$)

Table 4 Power Approximation for β
(Application range $87 \leq d \leq 1113 \text{ } \mu\text{m}$)

factor	Water flow rate [mm^2/s]	Correlation equation	Correlation coefficient R^2
Airflow velocity [m/s]	14.5	$\beta = 1.65 \times 10^5 U_m^{-1.69}$	0.9948
	29.0	$\beta = 9.01 \times 10^4 U_m^{-1.55}$	0.9923
	58.5	$\beta = 4.46 \times 10^4 U_m^{-1.38}$	0.9923
factor	Airflow velocity [m/s]	Correlation equation	Correlation coefficient R^2
Water flow rate [mm^2/s]	54.4	$\beta = 226 (Q_w/b)^{-0.046}$	0.8344
	81.6	$\beta = 81.8 (Q_w/b)^{0.043}$	0.4064
	108.8	$\beta = 43.0 (Q_w/b)^{0.11}$	0.9631
	136	$\beta = 28.0 (Q_w/b)^{0.16}$	0.9229
Plate edge thickness [mm]	54.4	$\beta = 192 R^{-0.033}$	0.5547
	81.6	$\beta = 90.0 R^{-0.030}$	0.6470
	108.8	$\beta = 63.9 R^{0.080}$	0.9177
	136	$\beta = 49.3 R^{0.12}$	0.6847

3.6 一次分裂で生じる水滴径頻度分布の近似式

β を式(6)で示すように、気流速度 U_m [m/s] の ζ 乗、給水流量 Q_w/b [m²/s] の η 乗、平板端厚み R [m] の θ 乗、定数 e^γ の積で近似する。

$$\beta(U_m, Q_w/b, R) = U_m^\zeta \left(\frac{Q_w}{b}\right)^\eta R^\theta \exp \gamma \quad (6)$$

式(6)は、対数を取ることで線形式になるため、重回帰分析を行う。

$$\ln \beta = \gamma + \zeta \ln U_m + \eta \ln \left(\frac{Q_w}{b}\right) + \theta \ln R \quad (7)$$

Table 5に重回帰分析の結果を示す。得られた指数の値、その不偏標準誤差、および各実験パラメータに関するP値⁽²⁾を示す。ここでP値は、それぞれの実験パラメータが水滴径頻度分布に及ぼす有意確立を示し、一般的にP値が5%を下回ると、そのパラメータは目的変数に対して関係性があると判断できる。すなわち、気流速度と給水流量に関するP値は非常に小さく、これらのパラメータは水滴径頻度分布に影響を及ぼすと考えられるが、平板端厚みに関するP値は約6%と大きく、本実験範囲内においては、平板端厚みの変化は水滴径頻度分布に有意な影響を与えないか、与えるとしても非常に小さい影響となることが考えられる。

また、Table 5に示した指数の値から水滴径分布の確率密度関数は、気流速度にかかる指数が負、他は正の値となる。これは、気流速度の上昇に伴い粗大水滴の割合は減少し、給水流量および平板端厚みの増加に伴い粗大水滴の割合は上昇するというを示しており、Fig. 4, Fig. 5で示した傾向と一致する。また、この指数の絶対値を比較すると、気流速度にかかる指数の値が他のものと比較して15倍以上と、最も影響を与えるパラメータになっていることも確認できる。

Table 5 Results of multiple regression analysis

Parameter	Air velocity		Water flow rate	Edge thickness
Multiplier	γ	ζ	η	θ
	12.35	-1.46	0.086	0.051
Standard deviation	0.16	0.035	0.020	0.026
P-value	-	1.35E-29	2.62E-04	5.96E-02

Fig. 10に、実験結果の水滴径分布から直接得られた β の値と、式(6)とTable 5から算出した β の値を比較した結果を示す。気流速度が遅い領域では、実験結果と計算結果にばらつきが見られるが、レイノルズ数と臨界ウェーバ数が実機同等となる、高速気流条件 ($\beta < 100$) では実験結果と計算結果が良好に一致しており、この領域では本研究で確立した近似式について一定の信頼性が得られたものと考えられる。

3.7 水膜の分裂周期

水膜分裂の撮影画像から、平板端での水膜分裂には周期性が観察された。Fig. 11は平板端より40mm下流位置を通過する水滴量の時間変化を示した図である。水滴通過量は間欠的であることが分かる。この通過水滴量の変化を離散フーリエ変換し、そのパワースペクトル密度のピーク値を計測した。 t [フレーム] ($0 \leq t < N$) における水量を $x(t)$ とおくと、離散フーリエ変換式 $X(f)$ は式(8)⁽²⁾で定義される。

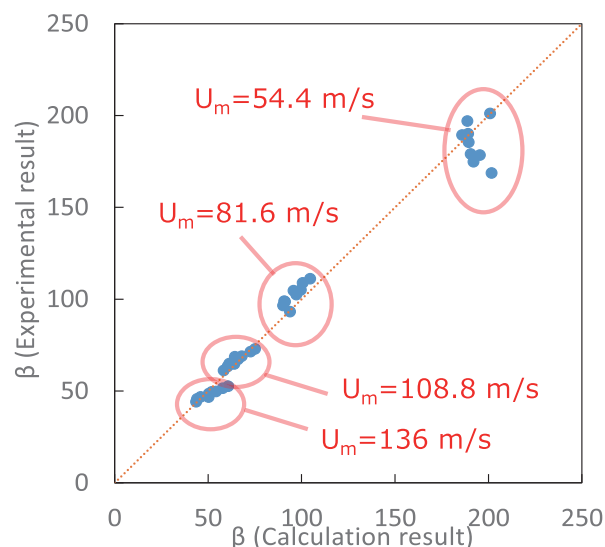


Fig. 10 Comparison of experimental and calculated result of β

$$X(f) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \exp\left(\frac{-2\pi i \times k}{N}\right) \quad (8)$$

ここで、 N は撮影画像の全フレーム数、 π は円周率、 i は虚数である。離散フーリエ変換の結果からパワースペクトル $|X(f)|^2$ の計算を行った。パワースペクトルは約160Hzにピーク値を持つ。この周波数は次節で述べる平板上に生じる不安定波の周波数に比べると低い。平板端には実際には液溜まりが生じ、この液溜りの量が水膜分裂の周期に影響を及ぼしていると考えられる。

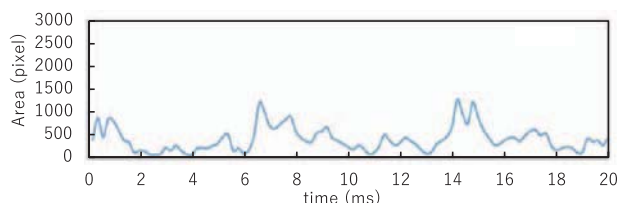


Fig. 11 Change in total pixel numbers of droplets ($U_m=108.8$ m/s, $Q_w/b=29$ mm²/s, $R0.30$)

3.8 水膜分裂モデルに関する考察

Gepperth⁽¹¹⁾は、気流によって流される水膜の平板端からの飛散現象と、水膜上の不安定流を関連付けた考察を行い、水膜分裂モデルを提案している。Fig. 12の左の写真は本実験による中央分離板上の流れを示したものである。水膜にはケルビン-ヘルムホルツ不安定性（K-H不安定性）に起因する不安定波が発現している。右はGepperthによって示された水膜分裂モデルの概要⁽¹¹⁾である。

分裂モデルについて簡単に説明する。K-H不安定性によって水膜に生じる不安定波の周波数は式(9)⁽¹³⁾で示される。

$$f_{wav} \cong \left(\frac{du_g}{dy} \right)_{max} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right) \quad (9)$$

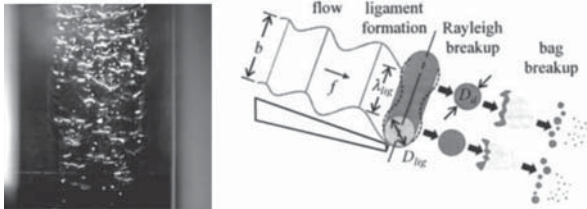


Fig. 12 K-H instability and Gepperth model.⁽¹¹⁾
($U_m=81.6\text{m/s}$, $Q_w/b=29.0\text{ mm}^2/\text{s}$)

右辺は気流の最大速度勾配と、気流と水膜の密度比の積である。ここでは最大速度勾配は、水膜が存在しないときのダクト断面の気流速分布における水膜厚さに相当する位置での速度勾配を用い、気流分布は1/7乗則から、また、水膜厚さは平板上の水膜に作用する力の釣り合いによる簡易的な運動方程式から算出した⁽¹⁵⁾。

Gepperthは f_{wav} と水滴飛散周期が同期すると仮定し、一度に飛散する水塊は平板端において、直径 D_{lig} の円柱形状になるとモデル化した。この円柱の高さ、即ち水膜幅を b とし、単位時間あたりの給水流量を Q_w とすると、式(10)に示す質量保存則が成立する⁽¹¹⁾。

$$\pi \frac{D_{lig}^2}{4} b = \frac{Q_w}{f_{wav}} \quad (10)$$

この円柱にはレイリー不安定性により、くびれが周期的に生じる。この波長を λ_{lig} とすると、式(11)が成立する⁽¹¹⁾。

$$\lambda_{lig} = 4.508 D_{lig} \quad (11)$$

式(10)、(11)より、式(12)が得られる。

$$\lambda_{lig} \cong 4.508 \left(\frac{4}{\pi} \frac{Q_w}{b f_{wav}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

この λ_{lig} で表される長さの水膜が、空間にせり出し分裂を生じるひとつの水塊と考えることができる。 λ_{lig} に関しては、気流の渦度厚さおよび渦度厚さを代表長さとするウェーバ数の関数として表すことが提唱されている^(23,24)が、ここでは、水膜流量と関連付けるGepperthモ

デルを用いる。なお、Gepperthモデルでは平板端厚みは考慮していないが、平板端の液溜まりの形成は平板端厚みの影響を受けると考えられる。

Gepperthモデルでは水膜の不安定波の周波数 f_{wav} と水滴飛散周波数 f_{sp} が同期すると仮定しているが、実際には平板端での液溜りの影響が現れる。水膜不安定波の周波数 f_{wav} と水滴飛散周波数 f_{sp} を1:1で結び付けずに、1: α で結びつける係数 α を導入してGepperthモデルを修正する。つまり、 α を式(13)で定義する。

$$\alpha = \frac{f_{wav}}{f_{sp}} \quad (13)$$

Gepperthモデルで、一度に飛散する水塊の体積は α 倍になるから、式(10)は式(14)式のように変形できる。

$$\pi \frac{D_{lig}^2}{4} b = \frac{Q_w}{f_{sp}} = \alpha \frac{Q_w}{f_{wav}} \quad (14)$$

式(14)と式(11)から、修正Gepperthモデルは式(15)のように示せる。

$$\lambda_{lig} \cong 4.508 \left(\frac{4}{\pi} \alpha \frac{Q_w}{b f_{wav}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

Fig. 13に気流速度と α の関係を示す。給水流量 $Q_w/b = 58.5\text{ mm}^2/\text{s}$ の条件では $\alpha \cong 1$ となり、既往モデルの適用範囲であると考えられる。しかし、 $Q_w/b = 14.5\text{ mm}^2/\text{s}$, $29.0\text{ mm}^2/\text{s}$ の条件では気流速度の増加に伴って α は増加している。 α は給水流量が少なくなるほど、また気流速度が増加すほど、1から大きくずれてくる。

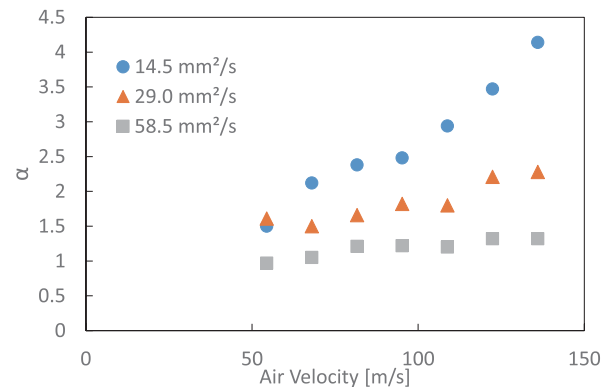


Fig. 13 Ratio of wave frequency and discharged water frequency, α (R0.30)

Table 6 Values of f_{wav} , f_{sp} , and α

Q_w/b [mm ² /s]	U_m [m/s]	54.4	68.0	81.6	95.2	108.8	122.4	136.0
14.5	f_{wav} [Hz]	75	169	238	322	441	625	869
	f_{sp} [Hz]	50	80	100	130	150	180	210
	$f_{wav}/f_{sp}=\alpha$	1.5	2.1	2.4	2.5	2.9	3.5	4.1
	f_{wav} [Hz]	81	120	166	237	288	398	480
29.0	f_{sp} [Hz]	50	80	100	130	160	180	210
	$f_{wav}/f_{sp}=\alpha$	1.6	1.5	1.7	1.8	1.8	2.2	2.3
	f_{wav} [Hz]	58	84	121	159	192	238	277
	f_{sp} [Hz]	60	80	100	130	160	180	210
58.5	$f_{wav}/f_{sp}=\alpha$	1.0	1.1	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3

Fig. 14に画像から計測した λ_{lig} と、式(9)および(15)から算出した λ_{lig} を示す。画像計測による λ_{lig} は20点の計測結果の平均値で、エラーバーは不偏標準偏差を示す。また、Table 6には λ_{lig} の算出に用いた水膜不安定波の周波数 f_{wav} の計算値と、計測位置を通過する水滴量変化から求めた水膜分裂周期 f_{sp} を示す。Table 6において、 $Q_w/b=58.5$ で、空気流速122.4, 136 m/sの水滴飛散周波数 f_{sp} は、パワースペクトルに明確なピークが見られないため、他の給水流量の結果と同じと仮定した。Fig. 14に示すように、修正モデルの値は実験結果と一致することから、修正モデルを用いることで一次分裂の核となる水塊の体積をよりよい精度で予測することが可能と考えられる。

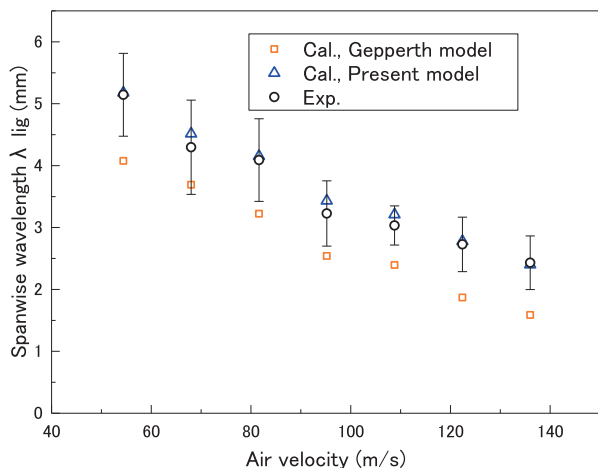


Fig. 14 Comparison of measured and calculated λ_{lig}
($Q_w/b=29.0$ mm²/s, $R=0.3$)

4. 結論

平行気流中に設置された平板端から飛散する水滴を高速度カメラで撮影し、その撮影画像処理によって平板端から飛散する水滴径分布を計測し、水滴分布に及ぼす気流速度、給水流量、平板端厚みの影響を調べ、以下の結論を得た。

- (1) 高速度カメラによる撮影像を二値化することで水滴径頻度分布の取得を行い、本実験条件では水滴径頻度分布は指数分布を示すことを確認した。

- (2) 水滴径頻度分布を、気流速度、給水流量、平板端厚みを変数とする式で近似し、重回帰分析によりその関数形を求めた。水滴径頻度分布には気流速度が最も影響を及ぼす因子であり、給水流量および平板端厚みは、気流速度の高速域においてわずかに影響が現れるが。気流速度に比べて水滴径分布への影響は少ない。

- (3) 水膜分裂の際に平板端に生じる液溜まりに着目した既往一次分裂モデルの修正を提案し、平板端に発生するスパン方向不安定波の波長を実験結果と比較し、修正モデルの有効性を確認した。一次分裂水滴の発生メカニズムの解明として、一次分裂の核となる水塊体積の予測精度の向上が見込まれる。

謝辞

本研究は、東北電力株式会社と東北大学の共同研究部門である電力エネルギー未来技術共同研究部門で実施されたもので、東北電力株式会社からは研究遂行に対して多くの支援を頂きました。深く感謝の意を表します。

参考文献

- (1) Moore, M., Sieverding, C. H., "Two-phase steam in turbine and separators", Hemisphere Pub. Corp., (1976).
- (2) 宇多村元昭, ガスタービン吸気水噴霧冷却技術, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 37, No. 4 (2009), pp. 203-209.
- (3) Koizumi, M., Utamura, M., Yano, T., Nakano, S., Shibata, T., Myoren, C., "CFD Analysis of Water Droplet Behavior in Axial Flow Compressor", Int.J. Gas Turbine, Propulsion and Power Systems, Vol. 8, No. 3 (2016), pp. 12-19.
- (4) Tsubouchi, K., Yasugahira, N., Yoshida, S., Kaneko, R., Sato, T., "An Evaluation of Water Droplet Erosion for Advanced Large Steam Turbine", Advanced in Steam Turbine Technology for Power Generation, PWR-Vol. 10, ASME, Book No. G00518 (1990)
- (5) 伊藤洋茂, 岡部永年, "金属材料の液滴エロージョン評価", 日本機械学会論文集 A編, vol. 59, no. 567, pp. 2736-2741, 1993.
- (6) 内田竜郎, 大友文雄 "吸気冷却ガスタービン入口案内羽根後縁から噴霧する水滴の挙動と圧縮機動翼の侵食評価", 日本ガスタービン学会誌, Vol. 42, No. 3, (2014).
- (7) Flock, A. K., Guildenbecher, D.R., Chen, J., Sojka, P.E., and Bauer, H.J., "Experimental statistics of droplet trajectory and air flow during aerodynamic fragmentation of liquid drops", International Journal of Multiphase Flow, 47 (2012) pp. 37-49.
- (8) Hammitt, F. G., Krzeczowski, S., and Krzyzanowski, J., "Liquid film and droplet stability consideration as applied to wet steam flow," Forsch. im Ingenieurwes., vol. 47, no. 1, pp. 1-14, 1981,
- (9) 安田貴旭, 渡辺紀徳, 姫野武洋, 南希, "噴霧流れ中の圧縮機翼周りの液挙動に翼後縁半径が及ぼす影響", 第47回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集, C-15

- (2019). pp. 1-6.
- (10) Lefebvre, A. H., "Gas Turbine Combustion", Taylor & Francis, (1983).
- (11) Gepperth, S., Guildenbecher, D., Koch, R., and Bauer, H.-J., "Pre-filming primary atomization: Experiments and modeling", ILASS-Europe 2010, 23rd Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Brno, Czech Republic, (2010).
- (12) Rayleigh, L., "On the Instability of Jets", Proceedings of the London Mathematical Society s1-10 (1), pp. 4-13. (1878).
- (13) Villermaux, E., "On the role of viscosity in shear instabilities", Physics of Fluids, 10 (2), pp.368-373, (1998).
- (14) Gepperth, S., Koch, R., and Bauer, H.-J., "Analysis and Comparison of Primary Droplet Characteristics in the Near Field of a Prefilming Airblast Atomizer," in Volume 1A: Combustion, Fuels and Emissions, 2013.
- (15) 松崎悠, 中野晋, 鳥山温美, 竹田陽一, 佐藤公仁弘, "気流中に放出する水膜の分裂形態に関する研究," 日本ガスタービン学会誌, vol. 43, no. 6, pp. 451-457, 2015.
- (16) Schneider, C. A., Rasband, W. S., and Eliceiri, K. W., "NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis," 2012.
- (17) El-Shanawany, et.al., "Airblast atomization: The effect of linear scale on mean drop size" Journal of Energy, 4 (4), pp.184-189, 1980.
- (18) Sattelmayer, T., and Witting, S., "Internal flow effects in prefilming airblast atomizers: Mechanisms of atomization and droplet spectra" Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 108 (86-GT-150), pp. 465-472, 1986.
- (19) Aigner, M. M., "Charakterisierung der bestimmenden einflussgrossen bei der luftgestutzten zerstaubung: physikalische grundlagen und messtechnische erfassung" PhD thesis, Institute fur Thermische Stromungsmaschinen (ITS), Universitat Karlsruher, 1986.
- (20) Gepperth, S., Muller, A., Koch, R., and Bauer H.-J., "Ligament and droplet characteristics in prefilming airblast atomization" in ICLASS, 12th Triennial International Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 2012
- (21) Vickers, A. J., 竹内正弘訳, p値とは何か, 丸善出版, 2013.
- (22) 中村尚五, ビギナーズデジタルフーリエ変換 (ビギナーズ), 東京電機大学出版局, (1989).
- (23) Marmottant, P., and Villermaux, E "On spray formation", J. Fluid Mech. 498, 73, 2004.
- (24) Inoue, C., and Maeda, I., "On the droplet entrainment from gas-sheared liquid film", Physics of Fluids 33, 011705, 2021.



RJ500・V2500-A1プロジェクトと海外の友人達の思い出

RJ500 & V2500-A1 Projects and Foreign Friends



藤網 義行*1
FUJITSUNA Yoshiyuki

1. RJ500プロジェクト

40年前の民間機用ジェットエンジンの国際共同開発、即ち、日英共同開発と5ヶ国共同開発の思い出を紹介したいと思います。

私とガスタービン・ジェットエンジンへの出会いは昭和55年（1980年）5月の石川島播磨重工業株式会社（現IHI）への入社が契機でした。IHIで期待されている役割が認識できたのは最初の海外出張でした。1981年夏のRR-Bristolへの出張で、RJ500エンジンのThe Project EngineerのKelleher氏からDDP（Draft Development Program）の講義を1対1で受けたからです。民間航空機用エンジンの商業開発は日本にとって初めての経験ですから、その開発プログラムを書ける専門家は居ないわけで、「自分に務まるか？」と自問自答しました。全体計画—設計計画—部品製造計画—エンジン試験計画—要素試験計画/強度試験計画/新材料検証計画—型式承認取得—飛行試験計画—運用開始が階段状に展開され、それを遂行するための供試用部品供給計画、エンジン試験/リグ試験装置製作計画などが展開されます。その各々が過去の軍用/民間エンジン開発をベースに統計データを有しており、それをベースに開発コストが積みあがるという体系ができていました。DDPを完全に理解できたおかげで航空エンジン事業が概念的には理解できました。

この日英国際共同開発は50：50の出資比率でしたから、日本側の事業能力と技術力をRR並みに引き上げることが重要だとRR社内で理解されており、日本側を育成することにRR社員に迷いはありませんでした。その結果、それぞれの分野で日本側は急速にノウハウを蓄積し、更に数多くの若手人材が成長できたと思います。日英共同開発に参加したRR-Bristolの方々には深く感謝する次第です。（詳細は文献を参照ください。）

2. V2500-A1プロジェクト

RJ500プロジェクトはPWA, MTU, FIATも参加するV2500-A1プロジェクトに発展し、多くの海外の技術者のお世話になりましたが、特にお世話になったのは、日英の共同開発事務所をミクローパー技術事務所の他に立ち上げてくれたRRの開発技術統括のHopton氏

と、難航を極めた技術変更管理でお世話になったPWAのScaramella氏の二人です。

Hopton氏は初対面の時は37歳でしたが、プロジェクトがBristolからDerbyへRR社内の主管が移ったので、Bristolの流儀を学んだ吾々にDerby流の開発技術も教示してくれて、我々をRR DerbyとPWAグループの開発業務に適合できるようにリードしてくれました。それゆえ、5ヶ国内でRRとJAEC（日本航空エンジン協会）の開発技術部隊は統合力を発揮できたと思います。

彼はRRの若手リーダーの一人としてV2500-A1の成功に貢献し、その後Boeng社へ派遣されるなど活躍をしましたが、病を発症して2013年に62才で亡くなりました。まことに惜しまれます。

一方、機装配管の技術変更（Engineering Change）が40も滞留して、「エアバス飛行試験エンジンの組立部品表がコンピューターから打ち出せない」＝「FAAが飛行試験用エンジンとして承認しない」＝「組み立て工場から出荷できない」という危機に直面しました。しかし、PWA形態管理チームが来日して応援してくれたこともあり、ぎりぎり期限内に処理出来ました。PWAチームのリーダーのScaramella氏は、帰社した後、一週間寝込んでしまった、ということでした。彼は全力で協力してくれたと今も感謝しています。

文末に改めてV2500-A1の開発でお世話になった4ヶ国の海外の友人たちに感謝する次第です。

なお、エンジン設計技術の立場から、勝又一郎氏（元日本航空機エンジン協会技術部設計統括班長、元IHI理事・技監、現在はその場考学研究所代表）が科学博物館の依頼で「技術の系統化（第30集）—民間航空機用エンジン技術の系統化」を執筆されたことを紹介します。因みに、令和4年1月22日(土)に産業技術史講座にてご講演がオンデマンド配信される予定です。

申込等詳細は、<http://sts.kahaku.go.jp/diversity/lecture/index.php> をご参照ください。

参考文献

- 航空技術, 社団法人日本航空技術協会, 2005年6月号, pp. 47-55.
同上, 2005年7月号, pp. 52-60.
同上, 2005年8月号, pp. 58-68.
同上, 2005年9月号, pp. 48-57.

原稿受付 2021年8月30日

*1 元僚IHI, 日本ガスタービン学会名誉会員



ESPRプロジェクトと海外の友人達との思い出

ESPR Project and Foreign Friends



藤網 義行*1
FUJITSUNA Yoshiyuki

1. ESPR組合とGTSJでの活動

1989年2月にJAEC（日本航空エンジン協会）から復帰後、IHIではいろいろな技術部に関わりましたが、学会活動からは遠ざかったままでした。ところが、1993年に第11回ISABEが東京で開催され、Banquetの司会者の故坂田公夫氏（航空宇宙技術研究所、現JAXA、2013年日本ガスタービン学会会長）をサポートしました。これが縁で1994年4月15日にGTSJに入会したのですが、この経緯から国際交流委員会委員に1997年と2000年に就きました。

更に、2000年7月に超音速機用推進システム技術研究組合（所謂HYPR組合、後にESPR組合）へ出向しましたので、プロジェクトに参加しているGE、PWA、RR、Snecmaの技術者のみならず、米英仏独ベルギーの研究機関の方々や大学教授と交流しました。米国ではMIT、Dayton Univ.等、英国はCambridge Univ. (Whittle Lab) 等、独はGottingen Univ., Cologne Univ.等を訪問しました。このような活動からGTSJ国際委員会の委員を2004年から2012年まで務めさせていただきました。このように海外の方々にお世話になったのですが、特に心に残る友人を挙げたいと思います。

2. 海外の友人を偲ぶ

一人目は、Ballal教授です。彼とは1973年Pennsylvania State Univ.で開催された14回国際燃焼シンポジウムで出会いました。その後もAIAAやASMEの会議で会うと立ち話を交わす程度の間柄でしたが、GE訪問の際にDayton Univ.を訪れて、ゆっくりと彼と語る機会を持ちました。彼は米国の燃焼工学の権威の一人であり、第2次大戦後Dayton 大学で教鞭を取ったHans von O'Hein教授の名前を冠する初代Distinguished Professorとして1999年に大学から認定されるという榮譽を受けていました。その後2008年のASME Turbo ExpoでGTSJが開催したIAC (International Advisory Committee) に出席してアドバイスをくれ、2009年のACGTに来日しました。滞在中に高野山に登り、「是非にも一泊したい」と言うので宿坊の何軒かに電話して、英語が話せるお坊様が居る宿坊を見つけて紹介しました。彼と一緒に宿泊した奥

様が「高野山の朝の読経の声にサンスクリット語の音と雰囲気は混合している。アジアの仏教の流れを直接に感じて感動した。」と言われました。Ballal夫妻はこれを体験したかったのだと理解できて、今後は長くご夫妻と友人同士のお付き合いができそうだと感じました。しかし、数年後、彼は60才半ばで亡くなりました。まだまだやりたい仕事一杯あったらと惜しまれました。

もう一人はMr. Theovalです。ESPR組合の研究活動の成果はGTSJ学会誌の2004年9月号に特集が組まれているのでそこに譲り、ESPRプロジェクト後の話をします。SSTエンジンの技術開発は研究の継続が不透明になりましたが、その中でSST技術研究を継続できたのは当時タレス日本支社長のMr. Theovalの活躍があったからです。彼はフランス航空宇宙工業会（GIFAS）日本委員会を結成し、初代会長として日仏SSTエンジン技術研究を提案し、日仏の関係先に働きかけました。その結果、SJAC（日本航空宇宙工業会）とGIFAS（仏航空宇宙工業会）が「超音速技術に関する日仏共同研究」の枠組み協定（Frame Agreement）を2005年6月に締結したのです。そして、日仏間で超音速技術の研究が進められて、1年後10月に研究成果を第1回日仏SST技術ワークショップ（東京）で発表し、以後毎年パリと東京で交互にワークショップを開催し続けることができました。

Mr. Theovalは日仏航空工業交流への貢献を評価されて2006年にフランス政府からレジオンドヌール勲章を受けました。彼は一貫して日仏航空工業の繋ぎ役として活動を続けていましたが、2015年6月24日にパリエアショーで倒れ、そのまま帰らぬ人となりました。まだまだ働ける70歳でしたので、本当に惜しまれます。

このお二人の他にESPR組合とGTSJ国際委員会の活動を通じてお世話になった多くの海外の友人に改めて御礼申し上げます。

参考文献

日本ガスタービン学会誌, Vol. 32, No. 5, pp. 1-42.

原稿受付 2021年8月30日

*1 元僚IHI, 日本ガスタービン学会名誉会員

Asian Congress on Gas Turbines 2020 報告

国際委員会

Asian Congress on Gas Turbines (ACGT, アジアガスタービン会議)は、アジア地域におけるガスタービン関連技術の情報交換の場として2005年から開催されている。日韓の共同開催でスタートしたが、その後中国からの参加希望があり、3か国の共催になった。更にインドからも参加の希望があったため、2012年からは日本、韓国、中国、インドの4か国が1年おきに持ち回り開催する共催行事となっている。

第7回となるACGT2020は中国が主催する順番で、前回盛岡で行われたACGT2018における関係者会合から協議を重ねた結果、2020年8月にQuindao (青島)で開催されることとなり、中国科学院上海高等研究院のHuang Weiguang先生が中心になって中国側で準備が進められた。ところがその後コロナ禍で予定通りの実行は困難となり、やむなく会期を1年延期して2021年8月に開催することとなった。中国では感染が落ち着いて来ていたため、現地での対面開催が検討されたものの、他の国からの渡航はできそうにないので、中国国内の参加者は青島で対面、外国の参加者はオンラインというハイブリッド開催が準備された。しかしながら会期が近づくと、中国でも局所的な感染が複数の地域で増加したため、最終的には全参加者がオンライン参加とせざるを得なかった。ただ、中国側の実行委員会メンバーは青島に集合して会場からライブ配信が行われたので、結果的にはハイブリッドの形式となった。実行委員長は中国科学院工程熱物理研究所のZhu Junqiang先生が務められた。非常に大きな制約の中、実施にこぎつけた関係者各位に深く謝意を表したい。

ACGT2020は2021年8月18日(水)、19日(木)の2日間にわたって開催された。共催組織は、Gas Turbine Society of Japan (GTSJ)、Korean Society for Fluid Machinery (KSFM)、Chinese Society of Engineering Thermophysics (CSET)、Indian Institute of Technology Bombay (IIT Bombay)である。

講演会には4室の平行セッションが設定され、キーノート講演4件、招待講演10件、および論文発表67件で構成された。プレナリーの会場は青島の会議場に設定されており、演壇からの挨拶などがライブ配信された。キーノート講演の映像も通常のオンライン配信のほか会場のスクリーンにも大写しされていた。

キーノート講演は共催4か国からそれぞれ1件ずつ、計4件が実施された。タイトルと講演者は以下の通りである。

1. "Key Technologies and Applications of Light-duty Aero-engine", Prof. Zhu Junqiang, Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, China
2. "Role of Gas Turbine in Korea's Energy Transition", Mr. Kwang Yol Lee, Doosan Heavy Industries and Construction, Korea
3. "Recent Progress in Gas Turbine Combustion Technologies", Prof. Satya Chakravarthy, Indian Institute of Technology Madras, India
4. "Pathway to achieve Carbon Neutrality - What is the role of Gas Turbine?", Mr. Yasushi Fukuizumi, Mitsubishi Heavy Industries, Japan

論文発表は11のセッションで4か国からの67件が行われた。国別内訳は、中国55件、日本9件、韓国2件、ニュージーランド1件であった。インドからは今回はなかった。インドには事前の開催連絡が十分行われなかったようで、これが反省点となった。招待講演 (Invited Speech) では中国の研究者からの研究発表が行われた。日本の参加者からは、特に中国の最新の研究状況を広く知ることができたという好意的な感想が聞かれた。

参加費はこれまで一般300USDを目安に設定されていたが、今回はオンラインのため180USDに減額された。

会議1日目のセッション終了後にはACGTの関係者会議が4か国の代表者により実施された。当学会からは福泉副会長、国際委員会の渡辺委員長、谷幹事、船崎委員、山本委員、および中村事務局長が出席した。中国側から今回の実施報告があり、種々意見交換が行われたほか、次回のACGTは前々からの計画通り2022年に韓国で実施すること、それ以後も従来通り偶数年度に持ち回りで開催することが確認された。日本での次回開催は2026年の予定となる。

世界的なパンデミックの混乱した状況の中で、1年延期、オンラインへの移行と、状況に対応して不安定な変遷をたどった中で、充実した国際会議を開催することができた。繰り返しになるが、Zhu先生、Huang先生をはじめとする中国側の実行メンバーに心より感謝申し上げたい。

最後になるが、当学会からご参加、ご協力いただいた皆さんに厚く御礼申し上げるとともに、来年8月に韓国で開催されるACGT2022に多くの方々が出席されるようお願いする次第である。

第33回ガスタービン教育シンポジウム開催のお知らせ

下記の通り、学生およびガスタービン開発に関わる新人技術者を対象とした標記シンポジウムを開催します。会員・非会員を問わず積極的にご参加ください。

今回は、オンライン開催に合わせ、全国の皆様から要望の高い講義内容をコンパクトに提供いたします。前半では、教科書『ガスタービン工学』の「概論」部分を重点的に解説し、ガスタービンの作動原理、ならびに、性能向上と環境適合性の鍵となる基盤技術（空力、構造、材料、燃焼、潤滑）を横断的に捉えます。後半では、「概論」の理解を踏まえ、発電用ならびに航空用ガスタービンの技術動向を、開発の最前線で活躍される講師が解説し、基礎理論が設計にまで繋がる面白さを、具体例を交えて理解いただく機会とします。

1. 日時：2021年12月21日(火) 13:00-17:30

2. 会場：Zoomによるオンライン講演室

3. プログラム：

13:00-13:05 開会の挨拶

13:05-15:05 「ガスタービン概論」 渡辺 紀徳 氏 (東京大学)

15:15-16:15 「ガスタービンの実際 発電分野」 八田 将佳 氏 (三菱重工業株式会社)

16:25-17:25 「ジェットエンジンへの要求と技術開発-IHIの取り組み-」 室岡 武 氏 (株式会社IHI)

17:25-17:30 閉会の挨拶

(注) スケジュールが変更になる場合がございますので、最終プログラムはホームページにてご確認ください。

4. 定員：150名 ※申し込み多数の場合、お断りすることがございます。

5. 対象者：大学、大学院、高等専門学校在籍者、ならびに技術者（ガスタービン初心者）

6. 参加費（税込）：

・学生 (会員：¥3,300 / 非会員：¥5,500)

・社会人 (会員：¥6,600 / 非会員：¥11,550)

※参加費には教科書『ガスタービン工学』の代金（¥3,300）が含まれております。

7. 受講書の発行：講義を受講された方で希望の方に「ガスタービン教育シンポジウム受講証」を発行いたします。

8. 参加要領：

・学会ホームページ (<https://www.gtsj.or.jp/>) よりお申し込みください。

・参加登録は必ず事前登録にてお願いいたします。オンライン開催のため、当日登録はございません。

・参加費のご入金確認後に、教科書を郵送いたします。

・オンライン講演参加（入室）に関する情報は、開催日までにメールにてご連絡いたします。

・申込締切日：12月13日(月)、参加費払込締切日：12月14日(火)

○ 本会協賛行事 ○

主催学協会	会合名	協賛	開催日	詳細問合せ先
日本機械学会	No.21-79「機械材料・材料加工のシミュレーションと計測(第1回：3D積層造形)」	協賛	2021/12/1	URL : https://www.jsme.or.jp/event/21-79/
気象影響防御技術コンソーシアム	第6回WEATHER-Eyeオープンフォーラム	協賛	2021/12/14	URL : https://www.weather-eye.jp/
日本機械学会 関西支部	第378回講習会「実務者のための振動基礎と制振・制御技術」	協賛	2022/1/26-27	URL : https://jsmekansai.org/



▷ 入 会 者 名 簿 ◁

〔正会員〕

厚地 聡(IHI)

唐津 卓哉(IHI)

石原 信哉(川崎重工業)

糸賀 健裕(川崎重工業)

桐谷 英樹(川崎重工業)

須原 亮(川崎重工業)

吉村 親樹(川崎重工業)

〔学生会員〕

和田 祥(京都大学)

武田 明樹(高知工科大学大学院)

「ガスタービン及び過給機生産統計」(2021年9月号掲載)に関するお詫びと訂正

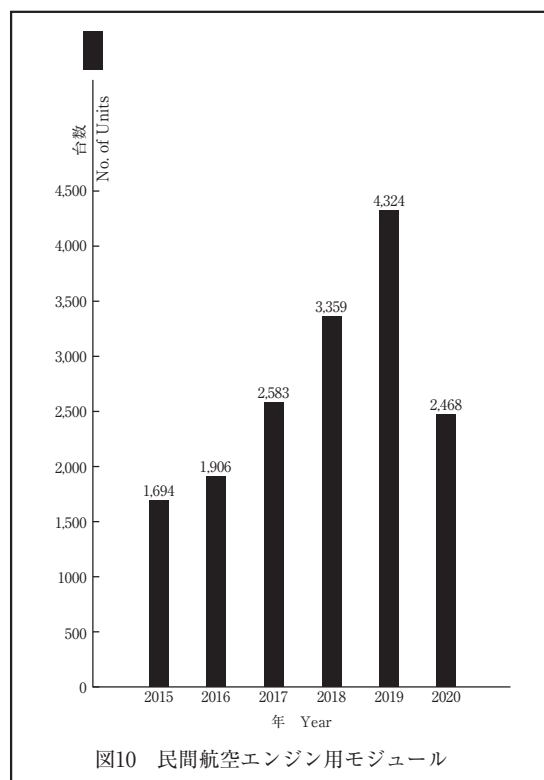
ガスタービン統計作成委員会

2021年9月号 (Vol. 49, No. 5) に掲載した「ガスタービン及び過給機生産統計」の図10に誤記がありました。読者の皆様にはご迷惑をおかけしましたことを謹んでお詫びし、以下の通り訂正致します。

図10 (民間航空エンジン用モジュール) の2019年の台数

誤) 4,273

正) 4,324



次号予告 日本ガスタービン学会誌2022年1月号 (Vol. 50 No. 1)

特集 構造解析技術の最新動向

論説・解説

巻頭言

航空機用エンジンにおける構造解析技術の動向 北村 祥之 (IHI)

川崎重工業における構造解析の活用事例 倉嶋寛貴, 玉井亮嗣, 三浦 聡允 (川崎重工業)

ジェットエンジンのファンブレードにおける鳥衝突簡易評価手法の紹介 高岡 恵輔 (本田技術研究所)

マルチフィジクスやDXにおける最新ソリューション(仮) 森 正明, 長澤 剛, 西森 亨 (サイバネットシステム)

メッシュフリー法の概要と応用事例 北風 慎吾, 齊藤 啓, 林 信哉, 西 正人 (JSOL)

FRANC3D/GENOAを用いた、汎用構造解析ソルバーを拡張運用する最新き裂損傷進展解析ソフトウェア技術の紹介 平出 隆一 (アドバンステクノロジー)

最新スパコンとそれを活用した大規模構造解析のご紹介 金堂 剣史郎, 金澤 宏幸 (富士通)

メッシングの技術動向(仮) 塚本昌美 (アルテアエンジニアリング)

デジタル画像相関法によるCAE解析結果の妥当性確認の実用例 青木 壮太 (丸紅情報システムズ)

第49回定期講演会報告

第49回日本ガスタービン学会定期講演会 全体報告 渡邊 裕章(九州大学)

先端技術フォーラム「脱炭素社会実現に向けたガスタービン技術開発の最前線」 赤松 史光(大阪大学)

喫茶室 世界一を目指して挑戦 大槻 幸雄 (元 川崎重工業)

※タイトル、執筆者は変更する可能性があります。

2021年度役員名簿

会長 太田 有 (早大)

副会長 福泉 靖史 (三菱重工)

法人管理担当執行理事 大石 勉 (IHI), 黒木 英俊 (三菱重工) (兼務), 鈴木 雅人 (産総研), 辻田 星歩 (法政大), 笠 正憲 (川崎重工)

公益目的事業担当執行理事 石坂 浩一 (三菱重工), 及部 朋紀 (防衛装備庁), 黒木 英俊 (三菱重工), 鈴木 伸寿 (東芝エネルギーシステムズ), 鈴木 雅人 (産総研) (兼務), 高橋 徹 (電中研), 新関 良樹 (徳島文理大), 姫野 武洋 (東大), 渡邊 裕章 (九州大), 渡邊 啓悦 (荏原)

理事 岩井 裕 (京大), 桂田 健 (JALエンジニアリング), 清野 幸典 (東北電力), 福谷 正幸 (本田技術研究所), 藤原 仁志 (JAXA)

監事 今成 邦之 (IHI), 二村 尚夫 (JAXA)

2021年度委員名簿 (順不同)

2021年11月5日現在

○は委員長

倫理規定委員会 ○笠 正憲 (川崎重工), 大石 勉 (IHI), 黒木 英俊 (三菱重工), 辻田 星歩 (法政大), 姫野 武洋 (東大)

自己点検委員会 ○笠 正憲 (川崎重工), 大石 勉 (IHI), 黒木 英俊 (三菱重工), 辻田 星歩 (法政大), 姫野 武洋 (東大)

運営委員会 ○辻田 星歩 (法政大), 大石 勉 (IHI), 黒木 英俊 (三菱重工), 酒井 義明 (東芝ESS), 鈴木 雅人 (産総研), 塚原 章友 (三菱重工), 寺本 進 (東大), 新関 良樹 (徳島文理大), 姫野 武洋 (東大), 松沼 孝幸 (産総研), 村田 章 (東京農工大), 笠 正憲 (川崎重工)

企画委員会 ○黒木 英俊 (三菱重工), 鈴木 雅人 (産総研), 塚原 章友 (三菱重工), 辻田 星歩 (法政大), 新関 良樹 (徳島文理大), 姫野 武洋 (東大), 村田 章 (東京農工大), 安田 聡 (三菱重工), 笠 正憲 (川崎重工), 輪嶋 善彦 (本田), 渡辺 紀徳 (東大)

国際委員会 ○渡辺 紀徳 (東大), 伊藤 優 (東大), 太田 有 (早大), 岡井 敬一 (JAXA), 岸根 崇 (三菱重工), 渋川 直紀 (東芝ESS), 鈴木 雅人 (産総研), 谷 直樹 (IHI), 都留 智子 (川崎重工), 寺本 進 (東大), 福田 雅文 (高効率発電システム研究所), 船崎 健一 (岩手大), 邊 英智 (本田), 山根 敬 (JAXA), 山本 誠 (東京理科大)

学術講演会委員会 ○渡邊 裕章 (九大), 岡嶋 芳史 (三菱重工), 岡本 光司 (東大), 尾関 高行 (電中研), 糟谷 宏樹 (東芝ESS), 岸部 忠晴 (三菱重工), 北村 英二郎 (本田), 富永 純一 (JFEエンジニアリング), 中山 健太郎 (川崎重工), 平川 香林 (IHI), 平野 孝典 (拓殖大), 范 勇 (産総研), 藤澤 信道 (早大), 古澤 卓 (東北大), 水野 拓哉 (JAXA)

集行事務委員会 ○姫野 武洋 (東大), 安藤 友香 (防衛装備庁), 石坂 浩一 (三菱重工), 伊藤 祐太 (本田), 尾崎 喜彦 (川崎重工), 桂田 健 (JALエンジニアリング), 河上 誠 (日立), 小島 充大 (富士電機), 澤 徹 (東芝ESS), 泰中 一樹 (電中研), 西江 俊介 (三井E&Sマシナリー), 西村 英彦 (三菱重工), 久枝 孝太郎 (IHI), 吉田 征二 (JAXA)

ガスタービン技術普及委員会 ○高橋 徹 (電中研), 石田 克彦 (川崎重工), 井筒 大輔 (三菱重工), 岡田 満利 (電中研), 岡村 直行 (JAXA), 小田 豊 (関西大), 垣内 大紀 (IHI), 窪谷 悟 (東芝ESS), 寺本 進 (東大), 長谷川 晃 (JALエンジニアリング), 林 明典 (三菱重工), 林 明宏 (富士電機), 姫野 武洋 (東大), 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 ○新関 良樹 (徳島文理大), 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), 黒瀬 良一 (京大), 古池 隆洋 (東京ガス), 酒井 英司 (電中研), 阪井 直人 (川崎重工), 佐藤 哲也 (早大), 渋川 直紀 (東芝ESS), 鈴木 雅人 (産総研), 清野 幸典 (東北電力), 田尻 敬次 (荏原エリオット), 寺本 進 (東大), 中野 賢治 (IHI回転機械エンジニアリング), 野原 弘康 (ダイハツディーゼル), 八田 直樹 (三井E&Sマシナリー), 原 浩之 (三菱重工), 福谷 正幸 (本田), 藤原 仁志 (JAXA), 北條 正弘 (JAXA), 松崎 裕之 (東北発電工業), 三ヶ田 一裕 (JALエンジニアリング), 宮入 嘉哉 (防衛装備庁), 村上 秀之 (NIMS), 室岡 武 (IHI), 森澤 優一 (東芝ESS), 山下 一憲 (荏原), 渡邊 啓悦 (荏原)

論文委員会 ○山本 誠 (東京理科大), 青塚 瑞穂 (IHI), 壹岐 典彦 (産総研), 岩井 裕 (京大), 大北 洋治 (JAXA), 小田 剛生 (川崎重工), 鈴木 雅人 (産総研), 田頭 剛 (JAXA), 寺本 進 (東大), 中谷 辰爾 (東大), 姫野 武洋 (東大), 山田 和豊 (岩手大), 山本 武 (JAXA), 吉岡 洋明 (東北大)

ガスタービン統計作成委員会 ○村田 章 (東京農工大), 飯塚 清和 (IHI), 井田 真澄 (ターボシステムズユニテッド), 恵比寿 幹 (三菱重工エンジン&ターボチャージャー), 榊 誠司 (川崎重工), 澤 徹 (東芝ESS), 前田 泰宏 (ヤンマーパワーテクノロジー), 眞鍋 壮 (三菱重工), 山上 展由 (三菱重工)

産官学連携委員会 ○岸部 忠晴 (三菱重工), 壹岐 典彦 (産総研), 今村 満勇 (IHI), 岡崎 正和 (長岡技科大), 及部 朋紀 (防衛装備庁), 北山 和弘 (東芝ESS), 幸田 栄一 (電中研), 野崎 理 (高知工科大), 原田 広史 (超合金設計研究所), 二村 尚夫 (JAXA), 松崎 裕之 (東北発電工業), 笠 正憲 (川崎重工), 輪嶋 善彦 (本田), 渡辺 紀徳 (東大)

広報委員会 ○鈴木 伸寿 (東芝ESS), 壹岐 典彦 (産総研), 尾関 高行 (電中研), 酒井 義明 (東芝ESS), 谷 直樹 (IHI), 長谷川 晃 (JALエンジニアリング), 山本 誠 (東京理科大), 吉田 征二 (JAXA)

表彰委員会 ○福泉 靖史 (三菱重工), 黒木 英俊 (三菱重工), 新関 良樹 (徳島文理大), 姫野 武洋 (東大), 笠 正憲 (川崎重工)

将来ビジョン検討委員会 ○高橋 徹 (電中研), 小田 豊 (関西大), 賀澤 順一 (JAXA), 酒井 義明 (東芝ESS), 柴田 貴範 (岩手大), 柴田 良輔 (本田), 半澤 徹 (東北電力), 寺本 進 (東大), 仲俣 千由紀 (IHI), 姫野 武洋 (東大)

男女共同参画推進委員会 ○川澄 郁絵 (本田), 猪亦 麻子 (東芝ESS), 川岸 京子 (NIMS), 都留 智子 (川崎重工), 森川 朋子 (三菱重工), 山上 舞 (IHI)

調査研究委員会 ○川岸 京子 (NIMS), 大北 洋治 (JAXA), 岡崎 正和 (長岡技科大), 岡田 満利 (電中研), 長田 俊郎 (NIMS), 笈 幸次 (東京都立大), 金久保 善郎 (IHI), 岸部 忠晴 (三菱重工), 東部 泰昌 (川崎重工), 野上 龍馬 (三菱重工航空エンジン), 日野 武久 (東芝ESS), 輪嶋 善彦 (本田)

創立50周年記念事業実行委員会 ○渡辺 紀徳 (東大), 太田 有 (早大), 佐藤 哲也 (早大), 鈴木 伸寿 (東芝ESS), 高橋 徹 (電中研), 新関 良樹 (徳島文理大), 姫野 武洋 (東大), 船崎 健一 (岩手大), 松沼 孝幸 (産総研), 山本 誠 (東京理科大)

IGTC2023準備委員会 ○寺本 進 (東大), 大石 勉 (IHI), 太田 有 (早大), 小田 豊 (関西大), 岸根 崇 (三菱重工), 黒瀬 良一 (京大), 酒井 祐輔 (川崎重工), 鈴木 正也 (JAXA), 玉井 亮嗣 (川崎重工), 塚原 章友 (三菱重工), 姫野 武洋 (東大), 平川 香林 (IHI), 武藤 昌也 (名城大)

編集 後記

現在コロナワクチンの効果なのか、コロナウィルス感染者が劇的に減少に転じ、オリンピック開催時の今夏の緊迫感が幻想であったかの様な日々が続いております。今後、この落ち着きが長く続き、コロナ蔓延以前の生活環境に完全に戻るとは言わないまでも、日常生活を過ごす上で制約の無い生活、そして各人の「希望」「夢」に向けたポジティブな行動が忌憚無く出来ることを願ってやまない限りです。皆様のお気持ちも同様かと拝察しますが如何でしょうか。

こうした状況の中、経済活動の基盤である電力エネルギー事情については、2050年CNに向けた動きが加速化する中、再生可能エネルギー導入拡大とその主力電源化、それに併せたエネルギー需要・供給の変革等に向け、様々な議論や検討が日々色々な形で提示されております。ただ電力エネルギー事情は、人々の日常生活に密着な関連性を持つことは勿論のこと、各種産業の礎の役割を果たすものであり、その変革に向けては複雑に入り組んだ実行施策の時間軸を整理しつつ、常に「S+3E」を意識しながら、予見性を持って進めていくことが重要と再認識しているところです。こうした中、現状火力発電に携わっているものとして、改めてその現況を認識しつつ、将来に向けた技術動向を広範にご紹介し、予見性の一助として頂ければと思ひ本号特集記事として企画したところでした。

以上の趣旨に則り、ご執筆頂いた皆様にはご多用中のところ、ご無理を申し論文の執筆をお願いすることとなりましたが、皆さま心良く引き受けて頂き、さらにご専門の知識・見識を論文の中に着実に落とし込んで頂き、結果としまして実りの多いものとしてご提供頂いたものと強く感じております。

また編集作業では、本号をご担当頂いた委員の方々のご協力は勿論のこと、編集委員会の各委員の方の貴重なご意見・ご指導と後支えを持ちまして、不慣れな中でも

何とか纏めることが出来ました。改めてここに御礼を申し上げます。と思います。

(清野 幸典)

●11月号アソシエイトエディタ

清野 幸典 (東北電力)

●11月号担当委員

荒木 秀文 (三菱重工業)

加藤 千幸 (東京大学)

古池 隆洋 (東京ガス)

中野 賢治 (IHI回転機械エンジニアリング)

(表紙写真)

今回の表紙については、【論説・解説】の著者より流用およびお借りしています。

詳細については、下記記事をご参照ください。

- ・「至近におけるGTCCの運用状況と耐力向上に向けた取り組みについて」…………… (P.414 ~ 419)
- ・「内陸型GTCCの建設と運用状況」 …… (P.420 ~ 425)
- ・「1650℃級JAC形ガスタービンの現状と今後の展開」…………… (P.426 ~ 431)
- ・「CO₂分離・回収型酸素吹IGCCの開発状況と今後の展望について」…………… (P.432 ~ 438)
- ・「CO₂分離回収設備の商用化に向けた最新動向」…………… (P.439 ~ 444)
- ・「次世代電力システムの展望と高効率火力発電への期待」…………… (P.445 ~ 450)
- ・「負荷調整役割としての航空転用型ガスタービンと可搬型ガスタービン・パッケージFast Power 40の展望」…………… (P.451 ~ 456)
- ・「産業用における熱電可変型ガスタービンコンバインド設備の導入事例」…………… (P.457 ~ 462)

だより

♣事務局 ☒ ♣

10月下旬を過ぎても夏日があるかと思えば、次の週には年末ごろの気候と目まぐるしく気温が上げ下げしている中で、ようやく新型コロナ感染症の感染者数もぐっと減ってきて、街に少し賑わいが戻ってきた感があります。とはいえ、1年半以続いた自粛生活に慣れてきたので、個人的にはまだ元の通りの生活スタイルに戻るのには躊躇しているところもあります。例えば飲食店などはまだテイクアウトが精いっぱいなところで、居酒屋さんで飲むなんてことはまだまだ先だな、と考えている人間なので、テレビの中継で元気に杯を傾けている人々をびっくりしながら眺めています。

学会事務局も年に一度の定期講演会が終わり（市民フォーラム、講演会、見学会ともに大変な盛況のうちに終了しました、ご参加いただいた皆様ありがとうございました）、日々

の仕事のほかにも来年に向けた準備も始まっています。毎年こんなことをやっていたな、と記憶をぼつぼつとたどりながら進めておりますが、いつまでたっても新鮮さが失せません（苦笑）

前号でも申し上げましたが、来年は学会創立50周年となります。学会誌にも50周年を示すロゴが表紙に加わります。また、学会誌の中身をどうするかと委員長をはじめ学会誌編集委員会の皆さんが意見を出し合って記念号にふさわしいものとするべく日々鋭意努力を続けておられます。充実した紙面づくりは一夜にしてならず、何度も議論を重ねて学会誌を毎号お届けしております。ぜひ皆様のニーズにお応えする学会誌であり続けたいと励んでいる委員の方々に少しでも助力できれば、と考えることしきりな秋の日でした。（田頭 和利）

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(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
 TEL：03-5157-1277
 E-mail：eblo_h3@eblo.co.jp

技術論文投稿要領（抜粋）

2021年7月11日改定

1. 本学会誌に投稿する和文技術論文（以下和文技術論文）およびJGPPに投稿する英文技術論文（以下英文技術論文）は次の条件を満たすものであること。
 - 1) 和文技術論文の責任著者は、論文投稿時および論文掲載時に、本学会の正会員または学生会員であること。英文技術論文についてはこの限りではない。
 - 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) 和文技術論文は「学会誌原稿執筆要領」に従って執筆された日本語原稿、英文技術論文は「Instruction to Authors」に従って執筆された英語原稿であること。
 - 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. 技術論文のページ数は、和文技術論文は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。英文技術論文は「Instruction to Authors」に定める。
3. 和文技術論文の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」「Instruction to Authors」に従って作成された原稿電子データを、「技術論文原稿表紙」とともに技術論文投稿システム(Editorial Manager)から提出する。
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. 和文技術論文の著作権に関しては、別途定める「日本ガスタービン学会著作権規程」、および「学会誌編集および発行要領」第5章第16条を適用する。英文技術論文の著作権に関しては、別途定める「日本ガスタービン学会著作権規程 (Copyright Regulations of the Gas Turbine Society of Japan)」, および「英文論文集発行要領」第6章を適用する。

日本ガスタービン学会誌

Vol. 49 No. 6 2021.11

発行日 2021年11月19日

発行所 公益社団法人日本ガスタービン学会

編集者 新関 良樹

発行者 太田 有

〒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(株)

〒105-0003 東京都港区西新橋1-18-17

明産西新橋ビル

Tel. 03-5157-1277

©2021, 公益社団法人日本ガスタービン学会

複写複製をご希望の方へ

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