

川崎重工技報

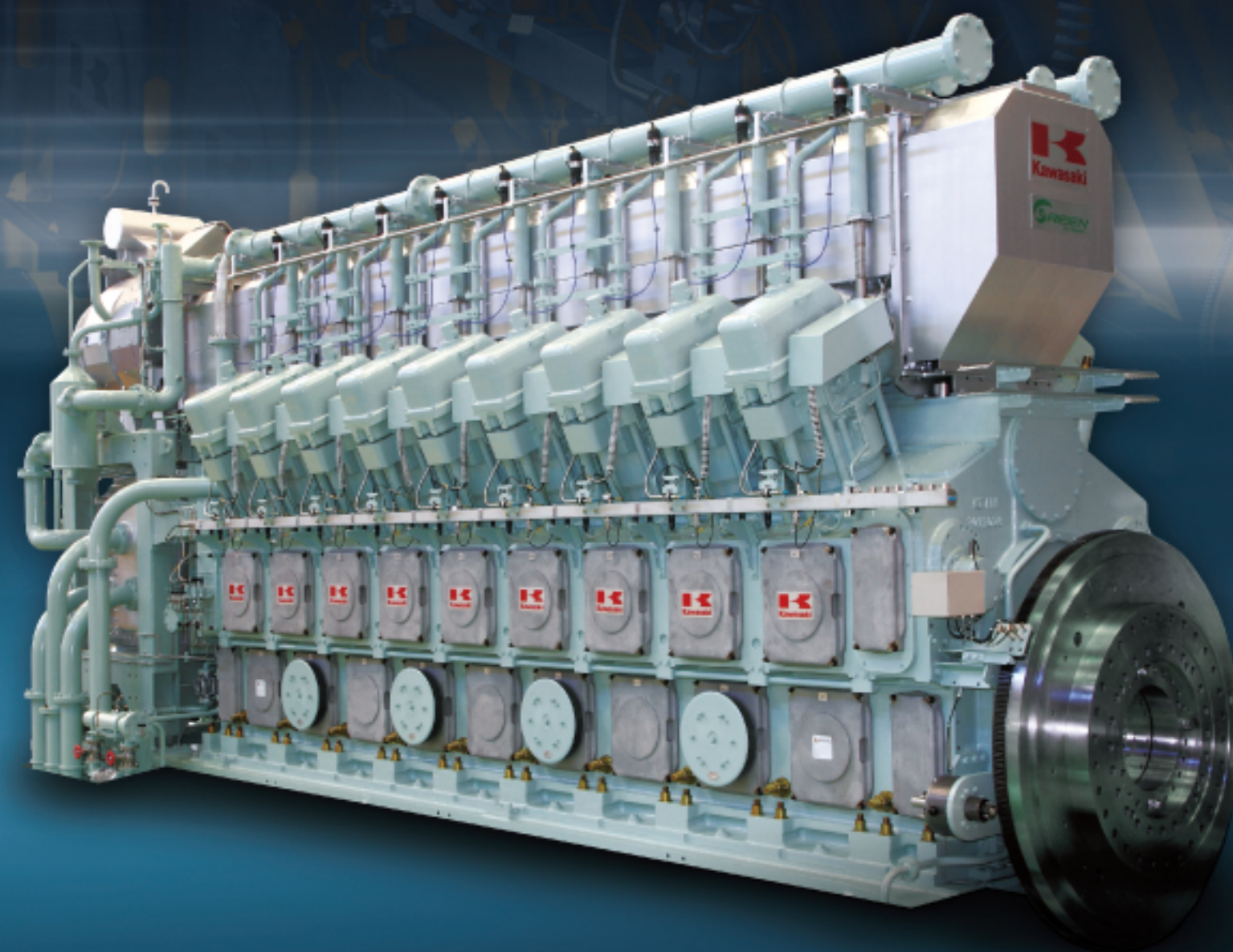
分散型発電システム特集号



TECHNICAL REVIEW

さまざまなエネルギーニーズに応える

Answers to Energy Needs Today and Tomorrow



【巻頭インタビュー】 分散型発電システム事業の取り組み状況と今後の展開	1
【総括説明】 多種多様なエネルギーニーズにソリューションで応える	2

特集記事

技術解説

エネルギーニーズに応える分散型発電システム - コージェネ・システムソリューション -	6
Distributed Power Generation Systems That Meet Energy Needs - Cogeneration System Solutions -	
電力の安定供給に貢献する非常用ガスタービン発電設備	10
Standby Gas Turbine Generator Set for Stable Supply of Electric Power	
省エネルギーと電源セキュリティ向上に貢献するガスタービンコージェネレーション設備	14
Gas Turbine Cogeneration System for Energy Conservation and Better Power Supply Security	
世界最高効率ガスエンジン - グリーンガスエンジン -	18
Gas Engine with World Highest Generating Efficiency - Green Gas Engine -	
30MW級 高効率ガスタービン [L30A]	22
Highly Efficient 30MW Class Gas Turbine, L30A	
8MW級 高効率ガスタービン [M7A-03] の高性能化	26
Modification of 8MW Class Gas Turbine, M7A-03	
1.7MW級 高効率・低エミッションガスタービン [M1A-17]	30
1.7MW Class High Efficiency and Low Emission Gas Turbine, M1A-17	
ガスタービンの環境性能をさらに高める DLE 燃焼技術	34
DLE Combustion Technology for Enhancing the Environmental Performance	
低濃度メタン燃焼ガスタービン発電装置	38
Lean Methane-Fueled Gas Turbine Generator Set	
250kW級 小型バイナリー発電設備 - グリーンバイナリータービン -	42
250kW Turbine Generator based on Organic Rankine Cycle with Effective Use of Low Temperature Heat Source - Green Binary Turbine -	

製品紹介

「川崎-MAN48/60型」 発電用4サイクルディーゼル機関	46
Kawasaki-MAN 48/60 4-Stroke Diesel Engine for Stationary Power Generating Plant	
多様な蒸気条件に適応する産業用蒸気タービン	48
Diverse Applications of Industrial Steam Turbines	
スーパーコンピュータ「京」向ガスタービンコージェネレーションシステム	50
Gas Turbine Cogeneration System for Supercomputer "K"	
排熱投入型吸収冷温水機 「シグマエースジェネリンク 1.43シリーズ」	52
Waste Heat Injection Type Absorption Chiller, Sigma Ace Gene-Link 1.43 Series	

特許・実用新案紹介

希薄燃料吸入ガスタービン	54
- 温室効果ガスを削減し、資源を有効利用 -	
蒸気タービン発電システムの起動方法、蒸気タービン発電システム	54
- シンプルな起動システムで、熱エネルギーを有効利用 -	

【巻頭インタビュー】

ー ガスタービン・機械カンパニー

プレジデントに聞くー

分散型発電システム事業の 取り組み状況と今後の展開

◆ 電力供給に関心が高い状態が続いています。 お客様からのニーズの変化はありますか。

これまで日本では集中型発電により電力が安定供給されていましたが、2011年3月の大震災以降、情勢が様変わりし、分散型発電の価値が見直されています。また、米国などではシェールガス開発が進み、クリーンな燃料である天然ガスがより注目されています。これらを背景に、当社のガスタービンやガスエンジンなどを用いた分散型発電システムへのニーズが高まっています。

さらに、資源の有効利用と地球温暖化防止のために、排熱を徹底的に利用するシステムや再生可能エネルギーの利用を促進するシステムが注目を集めています。

また、安心・安全と防災が以前にも増して重要視され、この面でのお客様からの引き合いも増えています。

◆ 当社の分散型発電システムによるソリューションの 特徴は？

分散型発電システムの核となる各種エネルギー機関と、それらを有効活用するシステム設計ノウハウを有し、お客様が最大限のメリットを享受できるシステムソリューションを提供できることです。

お客様の多種多様な電気と熱のエネルギーニーズに応じて、総合効率が高くベースロードに適する「熱主」のガスタービンと、電力需要の変動によらず発電効率の高い「電主」のガスエンジンに、排熱を有効利用する排熱ボイラ、吸収冷凍機、蒸気タービンやバイナリータービンなどを組み合わせ、お客様に最適なシステムを実現します。

当社の製品は1世紀以上にわたる船用機関、半世紀以上にわたる航空エンジン、これら輸送用機関がベースとなっています。輸送用機関には小型・軽量、広い範囲での高効率作動、さらに高い信頼性が求められ、これらに対応してきたことで、高度に鍛えられた技術を有します。また、エネルギー機関は空力、燃焼、構造、強度、材料、制御、電力変換などの高度な設計技術と高精度な製造技術によって成立しますが、当社はカンパニーと技術開発本部の緊密な連携と不断の努力によって技術を磨き、製品、および、システム提案力を高度化しています。

◆ 最近のトピックスはどんなものがあるでしょうか。

次々と新しい発電システムやエネルギー関連製品を世の中に送り出しています。

2012年8月には、世界最高の発電効率を誇るグリーンガスエンジン14基からなる11万kWの「日本テクノ袖ヶ浦グリ



ガスタービン・機械カンパニー プレジデント
代表取締役常務 井城 譲治

ーンパワー」が本格稼働を開始し、現在、発電効率49.5%で運用されています。10万kWを超える発電所がガスエンジンだけで構成されるのは国内初で、震災以後、一般電気事業者以外で初の新規発電設備です。新しい電力供給の時代の幕開けを感じます。

グリーンガスタービンでは、当社最大機種であるL30Aの開発が完了し、2012年10月から(株)ダイセル殿の網干工場の実証運転が始まっています。発電性能（世界最高クラスの効率40%）と低NOx排出特性に優れ、これにより当社製ガスタービンは、650kWから30,000kWまでの発電容量をカバーできるようになりました。

さらに、自然エネルギーを利用するシステムとして、地熱バイナリー発電設備やソーラー吸収冷凍機の実証試験が進められていることも特筆すべきことです。

◆ 今後の展開は？

新たな国のエネルギー基本計画に盛り込む2030年の電源構成案では、コージェネレーションを15%に、すなわち、現在の約5倍に増やす計画です。この計画達成には国全体が力を合わせて取り組む必要がありますが、当社の分散型発電システムがこの中で最大限貢献できるよう努力していきます。

グリーンガスエンジンやグリーンガスタービンの性能・品質をさらに進化させ、当社ならではのシステムソリューション提案力を強化していきます。

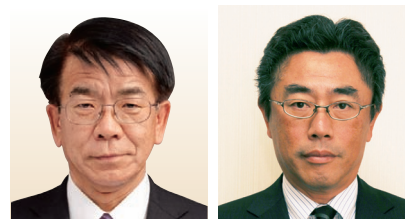
海外では、各地域の特性に応じた最適なシステムを提供するため、当社の拠点を活用してユーザーニーズを把握し、分散型発電システムを拡販していきます。

人類にとっての最大の課題である持続可能な社会の実現のためには再生可能エネルギーの拡大が必須です。薄く広く分布し、変動が大きい自然エネルギーを利用するには、化石燃料を有効に利用する分散型発電／コージェネレーションシステムが重要な役割を果たします。非常用発電で安心・安全を支え、クリーンな燃料のコージェネレーションシステムと徹底した排熱利用で限りある資源を有効に利用し、持続可能な社会の実現に貢献する、これが分散型発電システムに携わる我々の使命と考えています。

多種多様なエネルギーニーズにソリューションで応える

ガスタービン・機械カンパニー

ガスタービンビジネスセンター長 執行役員 久山 利之
機械ビジネスセンター長 理事 大畑 健



まえがき

2011年3月に発生した東日本大震災は、国内観測史上最大級の地震であり、大規模な津波を伴い未曾有の大災害を引き起こした。東京電力福島第一原子力発電所の事故や火力発電所の停止により、東京電力管内では計画停電の実施に至った。また、国内の原子力発電所が全て停止するというかつてない事態により、被災地区のみならず全国規模で電力不足に直面した。国内におけるエネルギー安定供給の脆弱性が露見し、エネルギー政策の見直しを我が国の喫緊の課題として認識させることとなった。

一方、世界経済はその歩みを止めることはなく、中国、インドをはじめとした新興国を中心に世界のエネルギー消費はますます増大している。国際エネルギー機関（IEA）によると、2030年には中国が世界のエネルギー消費の4分の1程度を占め、世界一になる。地球温暖化防止のため、各国は温室効果ガス排出量の低減をエネルギー政策の方針に掲げている。また、東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所の事故は、脱原発、縮原発の流れをもたらし、世界的にエネルギー政策の再構築が迫られている。一方で環境問題は一層深刻化しており、石炭や石油に変えてCO₂排出量の少ない化石燃料であるガスを使う動きも拡大している。今後は、ガスを利用した分散型発電の重要性がさらに増すこととなる。

2012年8月、経済産業省は、資源エネルギー庁に熱電併給推進室（通称：コージェネ推進室）を設置するとともに、各経済産業局に担当窓口を設置した。これにより、コージェネレーション（熱と電力の両方を供給するエネルギーシステム、以下「CGS」）の導入促進に向けた行政の機能を強化し、CGSの導入拡大を目指すとしている。

当社は、ガスタービン、ガスエンジン、ディーゼル、蒸気タービンといった発電装置をはじめ、排熱回収ボイラ、吸収冷凍機といった排熱利用機器も製品群として取りそろえており、さらに、CGSとしての納入実績も多数有している。本特集号では、多種多様なお客様のエネルギーニーズに応える、分散型発電システム関連のシステムソリューションと製品について紹介する。

1 お客様のニーズに応えるシステムソリューション提供

当社は、お客様の多種多様な電気と熱のエネルギーニーズに対して、ライフサイクルコストや環境性能を最適化するソリューションで応える。

例えば、プロセスや塗装工程・工業炉の熱源、製紙工場の紙乾燥工程、給湯や暖房用として、CGSから得られた蒸気を利用したり、システムに吸収冷凍機を加えることで、低温排熱から一般空調用や夏場のガスタービン発電出力を増加させるための吸気冷却用の冷水をつくることができる。また、この低温排熱をバイナリータービンで回収・利用すれば、システムの熱効率を向上することができる。さらに、排熱回収蒸気と各種蒸気タービンを組み合わせ、季節や時間帯による蒸気需要の変動にあわせた熱電可変システムを構築できる。このようにさまざまな機器を組み合わせ、高温から低温まで熱をカスケード利用（多段階利用）することで、高い総合効率を実現し省エネルギーやCO₂削減に大きく貢献できる。

以上のようなソリューションをお客様へご提案する際には、導入メリットを最大にするシステム構成とその運用方法を迅速にご提示できることが非常に重要である。今後のCGS導入促進に伴って、お客様のニーズの多様化からシステム構成の複雑化が予想され、ニーズに迅速に対応できるよう、当社はソリューション提案力の一層の強化を図っていく。

2 非常用発電ガスタービン

当社は、1972年に自社技術による産業ガスタービンの開発に着手、1977年に我が国初の純国産ガスタービン発電装置を納入して以降、多数のガスタービン発電装置を製作、納入してきた。ガスタービンの特徴である軽量、小型、高始動信頼性を活かし、現在、150～4,800kWクラスまで全21機種をシリーズ化している。1974年に消防法の改正により、ビルや大型店舗などに対する防災用発電設備の設置義務が強化された。非常用ディーゼル発電装置に比べて小型、軽量、冷却水が不要、低振動といったガスタービンのメリットが評価され、急速に市場へ浸透した。

近年、金融関係や情報通信関連企業の大規模データセンターが新設され、ガスタービン発電装置はデータセンター向けの



図1 データセンター向け3500kVA非常用発電装置



図3 30MW級PUC300コージェネレーション設備

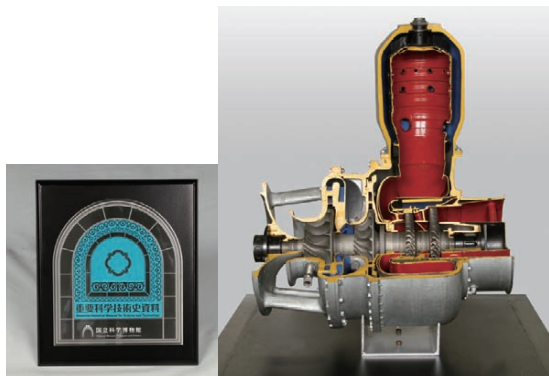


図2 非常用発電用ガスタービン普及の祖
(重要科学技術史資料)

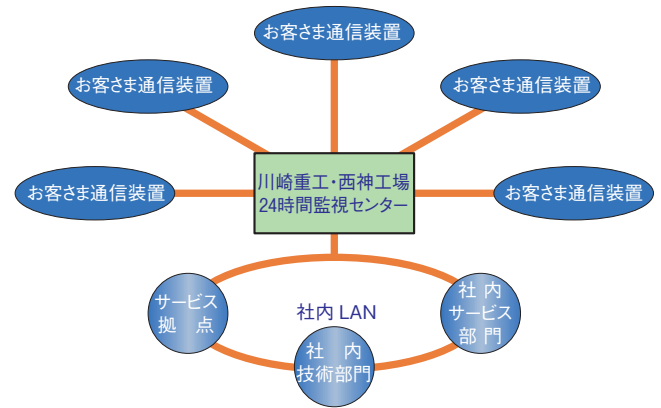


図4 テクノネットシステム (イメージ図)

バックアップ電源としても幅広く使用されている (図1)。

東日本大震災では、99.9%の始動信頼性が確認されており、被災地支援の一助となった。

東日本大震災以降、電力不足対策に向けたお客様の要望として、長時間運用が求められ、停電時には液体燃料で始動し、その後ガス燃料に切り替えるデュアルフューエル仕様の要請が多くなってきている。また、災害時や大規模停電時などの非常電源、配電線工事や点検時などの臨時電源として威力を発揮する移動電源車の要請も増えている。

1977年に非常用市場に進出して以来、2011年2月にはガスタービン販売1万台を達成した。また、2011年9月には、1975年に当社が開発した150kW級S1A-01型ガスタービンが、「非常用発電用ガスタービン普及の祖」として、国立科学博物館(東京)の重要科学技術史資料(未来技術遺産)に登録されている(図2)。

3 常用発電ガスタービン

社会的な省エネルギーニーズに応えるため、非常用での経験も活かして、ガスタービンと排熱回収ボイラからなるCGSを開発し、1984年には1,000kWのCGS初号機を納入した。さらに、蒸気タービンと組み合わせ、発電効率を向上させたコンバインドサイクル発電市場に進出した。その後、M7A(7MW級)、L20A(18MW級)と順次大型化したガ

スタービンを開発、市場投入してきた。さらに、L30A(30MW級)を開発し、2012年10月には商用初号機の運用を開始した(図3)。これにより、現在、650~30,000kWまで幅広い機種をシリーズ化している。

従来、CGSは、省エネルギーや温室効果ガス排出量削減の目的で導入されることが多かったが、東日本大震災以降、電力不足や停電リスクに備え、事業継続性の観点から導入検討される動きも出ている。

地球環境維持の観点からは、クリーンな排ガス特性(CO₂排出削減、NO_x排出削減)のニーズが高まっている。当社では、すでにNO_x排出レベル15ppm(O₂=15%換算)のガスタービンを製品化し、10ppm未満の製品も開発を終え実証運転中である。また、低カロリーガス、水素、副生ガスなどの多種多様な燃料に対応できる燃焼システムを開発中である。

アフターサービス面では、自社開発のガスタービンと独自の通信ネットワークを用いた遠隔監視システム「テクノネット」を構築し、お客様の運転状況を24時間把握することで、予防保全、運用サポート、万一の不具合発生時の即時対応を行い、迅速かつ的確なサービスを提供している(図4)。

4 低濃度メタン燃焼ガスタービン

石炭は、発電用や産業用の燃料として、また、製鉄用の原料として広く利用されており、中国やインドなどの新興



図5 低濃度メタン燃焼ガスタービン発電装置

国では発電を中心としての需要が急速に伸びている。

一方、石炭採掘時には、石炭層中に含有しているメタンガスが湧出する。メタンガスの温室効果はCO₂の約21倍であり、CO₂に次ぎ地球環境への影響負荷が高い。特に、炭鉱メタンの内、メタン含有量が1%未満と希薄なVAM (Ventilation Air Methane) は利用方法がなく、現状では大気中に放出されている。当社ではVAMなどの低濃度メタンを燃料とするガスタービンを開発した(図5)。今後、石炭生産国などに販売し地球温暖化防止に貢献していく。

5 ディーゼル発電設備

当社は、ディーゼル機関メーカーとして長い歴史を持っており、1911年、ドイツのMAN社と技術提携して以来、商船用・艦艇用および陸用に数多くの優れた機関を供給してきた。そして2011年にMAN社との技術提携100周年の記念の年を迎えた。

川崎-MAN 4 サイクルディーゼル機関は、軽量小型で高出力のL型およびV型がある。これらの機関は、重質油で長時間の無開放運転が可能であり、かつ保守整備作業の簡略化が図られていることから、船用主機・発電プラントなどに広く用いられている。



図6 沖縄電力向けディーゼル発電設備

陸上発電分野においては、これらMAN型や1993年に完成したS.E.M.T. Pielstick PA6CL型の4サイクル機関を適用し、事業用離島発電設備をはじめ原子力発電所用非常用発電設備および産業用発電設備にも納入実績があり、好評を博している(図6)。

6 ガスエンジン

当社は、世界最高性能を持つ発電出力8MW級ガスエンジンを開発した(図7)。2007年、18シリンダの実証機を完成させ、世界最高効率となる発電効率48.5%を達成するとともに、NO_x排出値についても世界最高レベルの環境性能を実現した(O₂=0%換算にて200ppm以下)。このガスエンジンは、燃焼室形状の最適化に加えて、シリンダごとの個別制御により耐ノッキング性とサイクル効率を向上させているのが特長で、排熱を利用したCGSへ展開した場合には、総合効率は約85%となる。2010年には神戸工場に出力5MWのガスエンジン発電設備を設置し、可変ノズル式過給機を搭載して発電効率を49.0%まで向上させるなど、さまざまな開発に取り組んでおり、2011年2月、初号機を受注した。近年、国内では電力の安定供給のため、中小規模発電所や自家発電設備などのニーズが一層高まっており、2011年7月、セントラル自動車(株)(現在、トヨタ自動車東日本(株))宮城工場向けガスエンジンを受注、さらに2011年9月には、新電力である日本テクノ(株)の「日本テクノ袖ヶ浦グリーンパワー」プロジェクト向けにガスエンジン14基からなる国内初の発電容量11万kWのガスエンジン発電所建設工事を受注し、いずれも本格稼働を開始した。現在、「日本テクノ袖ヶ浦グリーンパワー」では、低粘度潤滑油の採用などにより、発電効率49.5%で運用されている。また、海外でも経済発展に伴う電力需要の増加に対応して引き合いが急増している。2011年12月には、シンガポールのLNGターミナル向けにガスエンジン2基を受注し、海外向け初受注を成し遂げるなど、国内外で30基以上のガスエンジンを受注している。

自社開発した世界最高の発電効率を誇る発電用ガスエン



図7 7.8MWカワサキグリーンガスエンジン

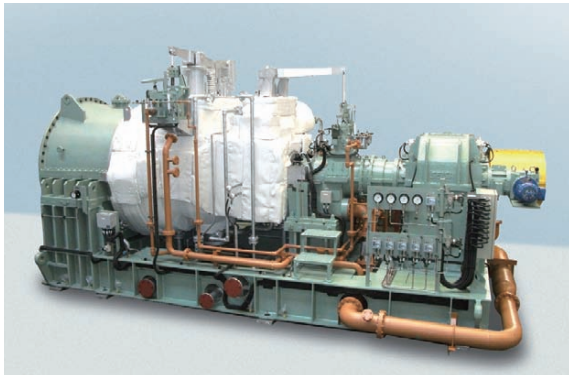


図8 発電用蒸気タービン

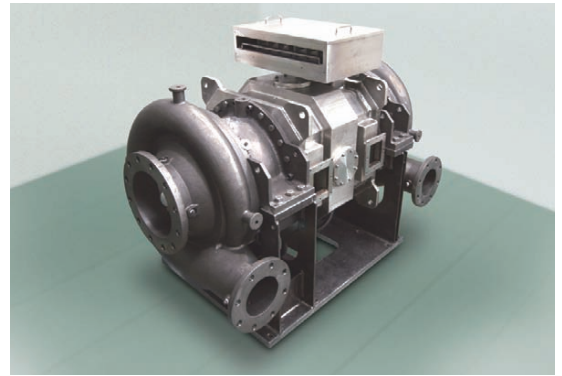


図9 グリーンバイナリータービン

ジンをベースに、船用ガスエンジンの開発に着手した。ガス専焼で大出力(2 MW以上)の主機用となる船用ガスエンジンの開発は、国内初となる。また、このエンジンは脱硝装置などの特別な装置を用いることなく国際海事機関(IMO) 3次規制を満足できる。船用ならではの負荷変動により生じるノッキングへの対応技術の開発や、エンジンの出力でプロペラを直接駆動させる直結推進方式と、エンジン出力で推進モータを回しプロペラを駆動させる間接推進(電気推進)方式の両方への適用技術の開発を行う。

2013年度中に約2.5MW(6シリンダ)の船用エンジンの実証機を完成させ、船級承認を取得した上で、2~8 MW(5~18シリンダ)の出力レンジから順次、市場投入する予定である。

7 発電用蒸気タービン

陸用蒸気タービンは、発電用とメカニカルドライブ用に区分され、当社は発電用として減速式(RP型・RC型)と直結式(DP型・SC型)、メカニカルドライブ用としてHP型・HC型をそれぞれシリーズ化しており、その出力範囲は1,000~150,000kWにまで及んでいる(図8)。

特に発電用途としては、従来の化石燃料焚きボイラ、タービン、発電機の組み合わせによる自家発電プラントのほかに、工場排熱利用による排熱回収プラント、ごみ焼却プラント、バイオマス発電プラントおよび地熱発電プラントなどの各種蒸気プラント分野において広範な実績を有するとともに、ガスタービンとの組み合わせによりエネルギーの有効活用を図るコンバインドサイクル発電プラントにも適した軸流排気式高効率タービンも生産している。

8 炉頂圧回収発電タービン

炉頂圧回収発電タービンとは、製鉄所の高炉から発生する高炉ガスの圧力エネルギーを電気エネルギーとして回収する機器である。このタービンを用いた炉頂圧回収発電設備は、高炉ガスの有効利用が可能で省エネ効果が高いことに加え、高炉ガス流れの流体騒音低減や除塵などの機能も備えており、環境対策にも効果があることから、日本国内

の大型高炉には100%設置されている。

当社の炉頂圧回収発電設備は、高炉の炉頂圧制御を従来の調速弁方式ではなく、タービンの入口静翼の角度を自由に変えることにより制御する可変静翼方式を採用しており、タービン内を通過するガスの量および圧力が変動する状況でも、低騒音で高効率に発電できる。当社は、炉頂圧回収発電設備のトップメーカーとして、すでに国内外で約50基の納入実績を有し、海外では、韓国、台湾、米国のほかに、中国やブラジルにも納入している。また、国内では更新案件の引き合いが活発である。

9 バイナリータービン

バイナリー発電とは、沸点の低い媒体を利用することで低温熱源からエネルギーを取り出し、タービン発電機を稼働させることで、電力を生み出す省エネルギーシステムである。工場などにおいて、これまで未利用であった排温水(80~120℃)や排ガス、および地熱・温泉熱水を有効利用して電力を得ることから、CO₂排出量削減に貢献する。当社が2010年6月から製造・販売するグリーンバイナリータービン(図9)は、同様のシステムであるフロンタービン発電設備で培った技術を活用するとともに、新たな低沸点媒体の採用により優れた環境性能、高い経済性を実現している。

なお、九州電力㈱と共同で、同社の山川発電所構内にて地熱バイナリー発電設備(250kW)の実証試験を開始し、地熱条件下での熱回収技術や経済性、耐久性などの確認・検証を行う予定である。

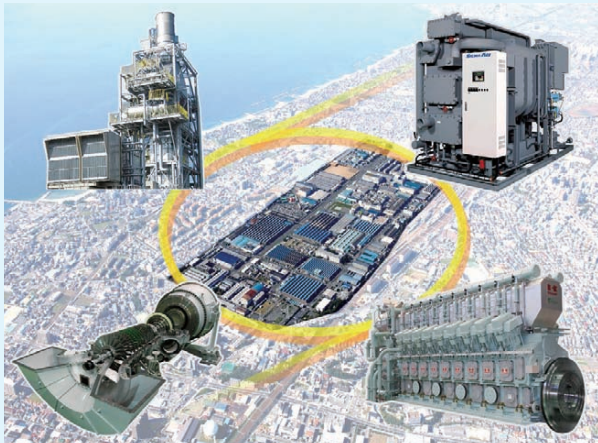
あ と が き

脱・縮原発の流れ、再生可能エネルギーの拡大、地球環境維持、CGSの導入や、分散型発電の拡大など、世界的にエネルギー政策が大幅に見直される状況にある。

当社は、地球環境維持のため、ならびに電力の安定供給に向け、これからも絶え間ない技術向上を図り、お客様からの多種多様なエネルギーニーズに応えた、効率的かつ実用的なエネルギーシステムや、エネルギー関連機器をお客様へ提案していく所存である。

エネルギーニーズに応える分散型発電システム —コージェネ・システムソリューション—

Distributed Power Generation Systems That Meet Energy Needs — Cogeneration System Solutions —



村上 直樹① Naoki Murakami
 中安 稔② Minoru Nakayasu
 稲田 篤彦③ Atsuhiko Inada
 杉本 智彦④ Tomohiko Sugimoto
 山崎 徹⑤ Toru Yamazaki
 小谷野 薫⑥ Kaoru Koyano
 黒坂 聡⑦ So Kurosaka
 田中 一雄⑧ Kazuo Tanaka
 杉本 和繁⑨ Kazushige Sugimoto

東日本大震災以降、省エネルギーだけでなく電源セキュリティも含めたエネルギーへの関心が高まっており、国のエネルギー環境政策ではコージェネレーションの普及拡大をうたっている。当社は、コージェネレーションの導入を促進するため、顧客の電力、熱、空調などの需要に最適なコージェネレーションシステム構成とその運用方法について、提案力の強化を図っている。本稿では、顧客のメリットを最大に引き出すためのコージェネ・システムソリューションへの取り組みを紹介する。

After the Great East Japan Earthquake, growing interest in energy has been motivated not only by energy conservation but also by power supply security, as Japan's energy and environment policies now mention the widespread use of cogeneration. To promote the introduction of cogeneration, we are making an effort to strengthen its ability to make proposals to customers about the configuration of the cogeneration system best suited to their demands for electricity, heat, air conditioning and the like, and about the manner of operating such a system. This article presents our approaches to cogeneration system solutions intended to maximize the customer's benefit.

After the Great East Japan Earthquake, growing interest in energy has been motivated not only by energy conservation but also by power supply security, as Japan's energy and environment policies now mention the widespread use of cogeneration. To promote the introduction of cogeneration, we are making an effort to strengthen its ability to make proposals to customers about the configuration of the cogeneration system best suited to their demands for electricity, heat, air conditioning and the like, and about the manner of operating such a system. This article presents our approaches to cogeneration system solutions intended to maximize the customer's benefit.

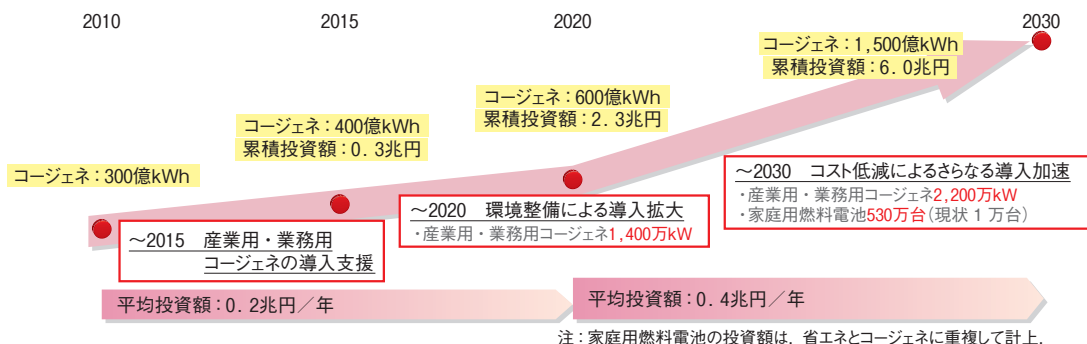
まえがき

これまでコージェネレーション（以下「コージェネ」）は、省エネルギー、エネルギーコスト削減、温室効果ガス排出量削減の目的で導入されることが主であった。しかし、東日本大震災後の電力不足、停電リスクにより「電源セキュリティの向上」などの新しいニーズが生まれている。

また、エネルギー基本計画の抜本の見直しが国により進められており、今後のエネルギー環境政策について閣議決

定した「革新的エネルギー・環境戦略」（2012年9月14日エネルギー環境会議）では、エネルギーの有効利用を促進させるために、コージェネを最大限普及させ、その発電量は現状の300億kWhから2030年に電力需要の15%を賄う1,500億kWhに増加するとしている（図1）。そのための促進策として、コージェネによる売電を円滑に行える環境を整備し、導入支援策が強化される。

このような背景において、当社では、多種多様なエネルギー供給機器（ガスタービン、ガスエンジン、ボイラ、吸



出典：国家戦略室「革新的エネルギー・環境戦略」

図1 2030年に向けたコージェネ導入の拡大
 Fig. 1 Expansion of introduction of cogeneration toward 2030

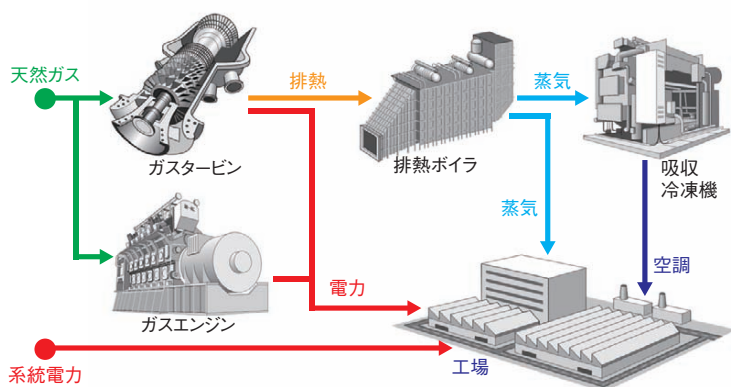


図2 コージェネ・システム
Fig. 2 Cogeneration system

収冷凍機など)を用いたコージェネ・システム(図2)のソリューション提案力を強化している(図3)。特に、顧客へのコージェネ導入提案において、導入メリットが最大となるシステム構成と運用方法の検討が重要となる。また、コージェネの売電や排熱の利用拡大のためには、電力と熱の需要変動追従などの事前検証技術(電力系統解析や蒸気系統解析など)も必要になる。このため、以下の取り組みを行っている。

1 システム構成提案

当社は、これまでもコージェネ導入の初期段階において、「熱サイクルCAE¹⁾」(CAE: Computer Aided Engineering)を利用した最適なシステム構成を顧客に提案してきた。しかしながら、今後のコージェネ導入促進に伴って、顧客ニーズの多様化によるシステム構成の複雑化が予想され、システム構成提案力の強化が必要である。

当社で開発している「構成最適化技術」は、コージェネを導入する顧客にとってライフサイクルメリット(設備メンテナンス費や燃料費の低減など)が最大となるシステム構成を提案することを目的としている(図4)。

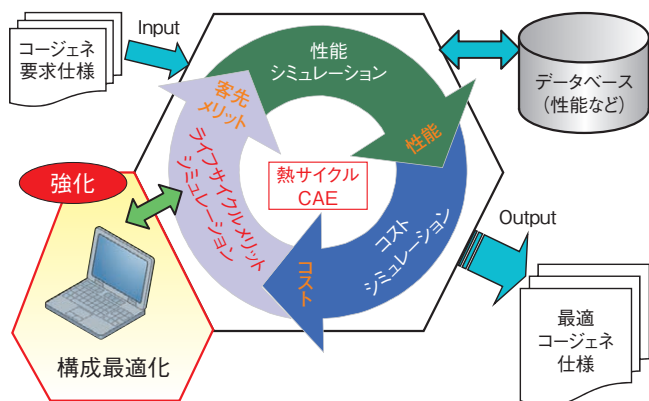


図4 コージェネ・システム構成提案
Fig. 4 Flow of proposal on cogeneration system configuration

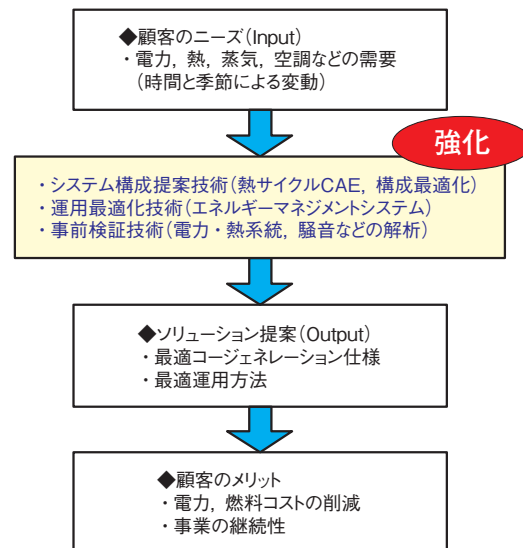


図3 コージェネ導入提案力の強化
Fig. 3 Strengthening of ability to make proposals on introducing cogeneration

構成最適化技術による燃費検討例を図5に示す。この例は、工場の需要パターンA、Bを対象に二つのシステム構成①②による燃料消費量をシミュレーションし、1日の積算量を比較したものである。熱需要が大きいパターンAでは、発電と熱(蒸気)を含めた総合効率が高いガスタービンコージェネの台数が多い構成①の方が、燃料消費量を低減でき、電力需要は同じでも熱需要が少ないパターンBでは、発電効率の高いガスエンジンの台数が多い構成②の方が、燃料消費量を低減できることが分かる。

構成	ガスタービンコージェネ	ガスエンジン	ガス焼きボイラ
①「ガスタービン」主体	3基	1基	1基
②「ガスエンジン」主体	1基	3基	3基

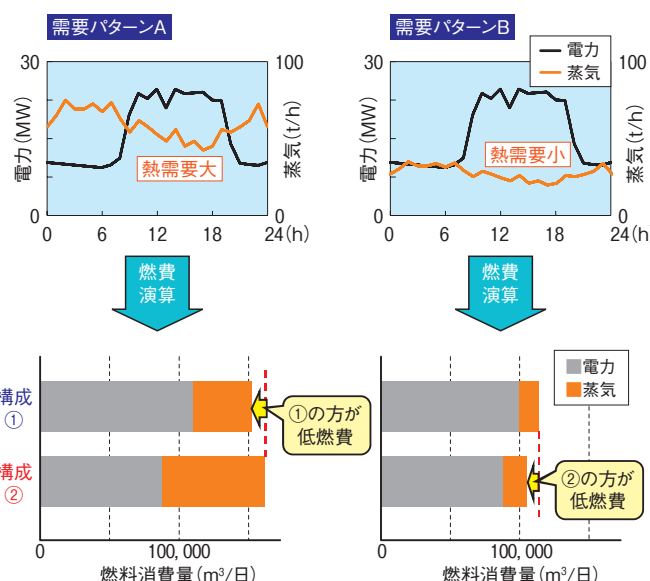


図5 構成最適化技術による燃費検討
Fig. 5 Study on fuel cost based on configuration optimization technology

⑥ 技術開発本部 システム技術開発センター システム統合技術部

⑦⑧⑨ 技術開発本部 システム技術開発センター エネルギーシステムソリューション開発室

今後、「熱サイクルCAE」と「構成最適化技術」を組み合わせて、コージェネ・システム構成提案の迅速化と柔軟性に富んだ対応を図っていく。

2 運用最適化

当社では、顧客の電力・熱などの需要変動に応じて、コージェネ運用を最適化するエネルギーマネジメントシステム（EMS）を開発している。EMSは、燃料コストやCO₂排出量などを最小化しつつ、需要に応じたエネルギー配分計画を立案・実行するシステムである。

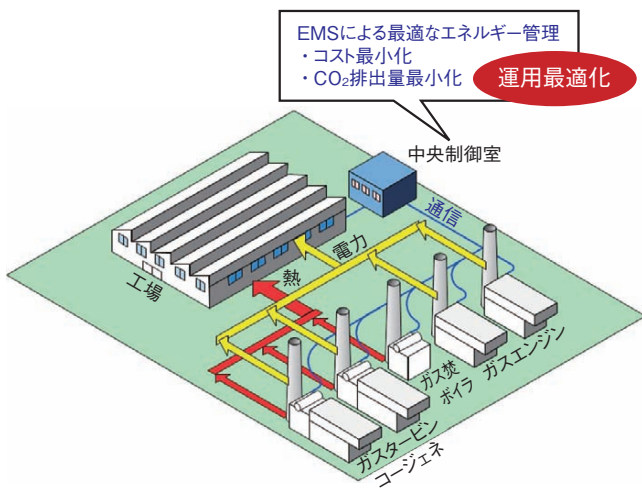


図6 コージェネ・システム構成例
Fig. 6 Example configuration of cogeneration system

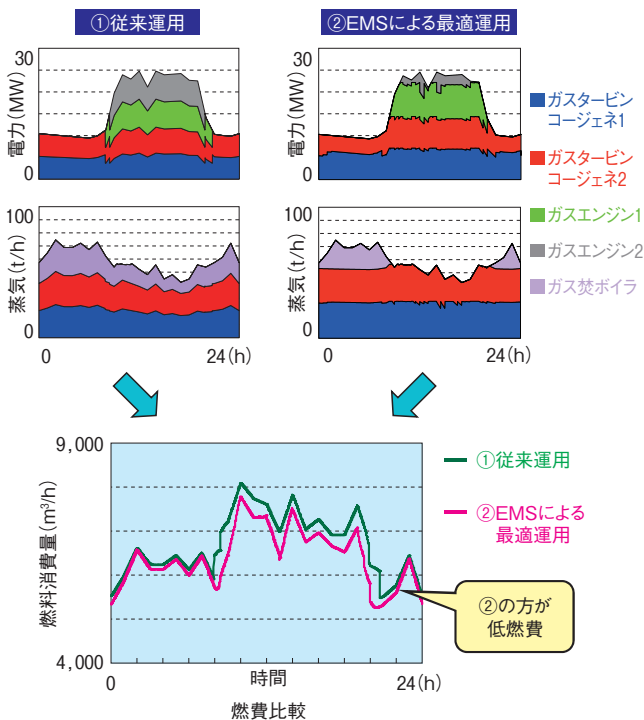


図7 EMSによる最適運用
Fig. 7 EMS-based optimization of system operation

図6に示すコージェネ・システム構成例において、EMSで最適運用した場合のシミュレーション結果を図7に示す。従来の運用では、電力・蒸気の需要が変動しても各機器の出力分担比率を固定しているのが一般的である。これに対し、EMSによる最適運用では、燃料コストを最小化するように、分担比率を逐次変えている。つまり、電力・蒸気の需要が高い昼の時間帯に、ガスタービンコージェネの分担を増やして、電力と熱（蒸気）の総合効率を高めることで燃料消費量を少なくすることができる。

このように、従来運用に比べて、EMSによる最適運用の方が、燃料消費量を低減でき、顧客のライフサイクルコストを最小化できる。

3 事前検証

コージェネ導入のシステム構成提案後の計画・設計段階において、電力・蒸気負荷変動への追従、商用系統事故の影響、機器トラブル時の電力・蒸気挙動などの事前検証が必要となる。以下に、これらの事前検証技術の中から、電力系統解析、蒸気系統解析、騒音解析を紹介する。

(1) 電力系統解析

電力系統解析は、コージェネの運用において、商用系統連系運転や自立運転などのさまざまな状況で、所要の電源品質を維持できるかを検証する技術である。

図6のコージェネ・システム構成例での電力系統図を図8に、その電力系統解析の結果を図9に示す。この例では、商用系統事故などのために系統連系運転から自立運転に移行する場合に、電力周波数がどのような挙動になるかを、さまざまな負荷状況で検証している。

このように、電力系統解析を活用することにより、事故や機器トラブル時などの電力（電圧・電流・周波数）の挙動を事前検証することが可能となり、非常時の顧客の事業の継続性を高めることができる。

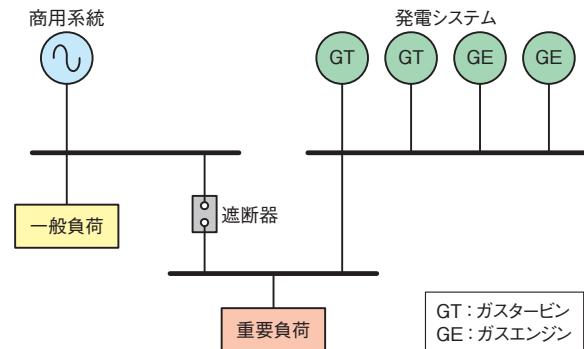


図8 電力系統図
Fig. 8 Power system

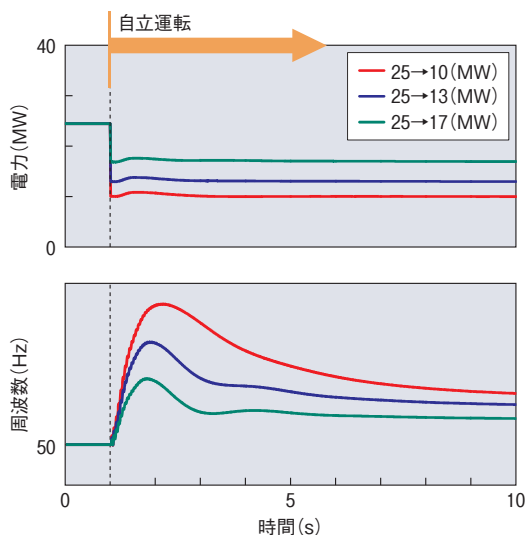


図9 電力系統解析
Fig.9 Analysis of power system

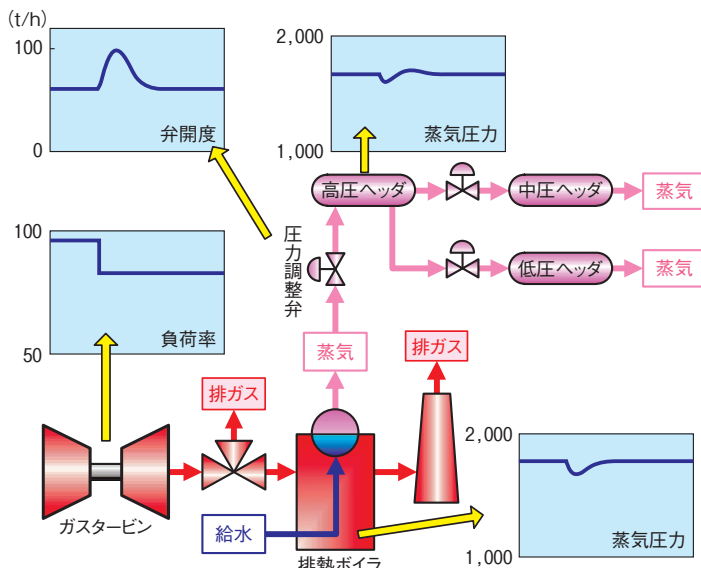


図10 蒸気系統解析
Fig.10 Analysis of steam system

(2) 蒸気系統解析

蒸気系統解析はコージェネのさまざまな運転状況での蒸気挙動の事前検証を行い、効率的な運用方法を提案できる。

ガスタービンコージェネの蒸気系統とシミュレーション結果を図10に示す。この例では、ガスタービンが負荷変動した際の、排熱ボイラや高圧蒸気ヘッドでの蒸気圧力挙動、および圧力調整弁操作を検証している。

このように、蒸気系統解析を活用することにより、蒸気の運用最適化や利用拡大が可能となり、顧客のコージェネ導入メリットを高めることができる。

(3) 騒音解析

コージェネ設備は、客先工場内で敷地境界近くに設置されることが多く、計画段階において、敷地境界の騒音値が規制値以下となるように検討する必要がある。特に、コージェネ設備では騒音源が多数存在するため、各機器の防音性能とコストの最適化が重要な課題となる。

当社では、蓄積された騒音源データを基に、環境騒音解析プログラムを用いて敷地境界面の騒音予測を行うことで、各機器の防音対策や防音壁の設置要否を検討し、総合的な防音仕様を提案している。

あとがき

東京電力福島原発事故は、これまでのエネルギー社会の在り方に大きな疑問を投げかけ、コージェネに対する市場ニーズも大きく変化した。当社では、この変化に対応すべく、ガスタービン、ガスエンジンなどの個々の製品力に加えてシステムソリューション提案力を強化することで、多種多様な顧客ニーズに応えていきたい。

参考文献

- 1) 田中, 山下, 原田, 向井, 軽部, 柳田: “熱サイクルCAE技術の分散型エネルギーシステムへの適用”, 川崎重工技報, No.151, pp.40-43 (2002)



村上 直樹



中安 稔



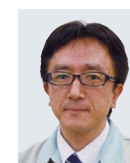
稲田 篤彦



杉本 智彦



山崎 徹



小谷野 薫



黒坂 聡



田中 一雄



杉本 和繁

電力の安定供給に貢献する非常用ガスタービン発電設備

Standby Gas Turbine Generator Set for Stable Supply of Electric Power

井上 雄介① Yuusuke Inoue
 内藤 朋② Tomo Naito
 倉澤 貞之③ Sadayuki Kurasawa



震災以降、非常時にも電力を安定供給できるシステムへのニーズが高まっている。当社では、24時間稼働が必要とされる病院、通信設備およびIT関連のデータセンターなどの非常用バックアップ電源として、幅広い出力範囲に対応した自社開発のガスタービンを駆動源とする発電設備を製造・販売している。

本稿では、非常用ガスタービン発電設備の特徴と東日本大震災など災害発生時の稼働状況について示す。

After the Great East Japan Earthquake, the need for systems that can stably supply power in an emergency is openly evident. We internally develop, manufactures and sells power generation facilities powered by gas turbines for a wide variety of output ranges, as standby backup power supplies to be used by hospitals, communications facilities, IT-related datacenters and other facilities that need to run 24 hours a day.

This paper presents the features of our standby gas-turbine power generation facilities as well as their operating track records in disasters such as the Great East Japan Earthquake.

まえがき

2011年3月に日本を襲った東日本大震災では、被災地域が1都15県と広範囲にわたり、甚大な被害が生じた。停電した地域においては、当社の非常用ガスタービン発電設備が100%稼働し、復電または燃料が尽きるまで電力を供給し続け、非常用として真価を発揮した。停電時に非常用発電設備が稼働した都県を図1に示す。

非常用発電設備は、緊急時に確実に始動し電力を供給することが必須であり、駆動源として用いるガスタービンには、高い始動信頼性、始動から給電開始までの時間が短いことなどの特性が求められる。そのため、簡素な構造の単純開放サイクル軸式ガスタービン(図2)が主流であり、当社でも採用している。また、ガスタービンは自己空冷式で冷却水が不要なため、屋上や地下など限られた場所への設置が可能である。ガスタービン発電設備の屋内設置の構成例を図3に示す。常用発電装置と同様、高効率であることも重要な特性であるが、使用目的の違いから、常用ガスタービンとは違った特性が求められる。

当社の非常用ガスタービン設備「カワサキPUシリーズ」の主要諸元を表1に示す。

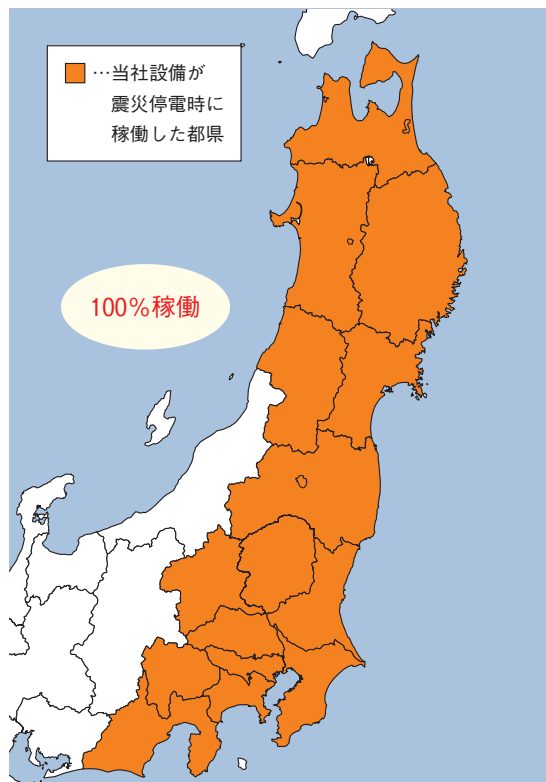


図1 非常用発電設備が稼働した都県
 Fig. 1 Localities with working standby generator sets

表1 「カワサキPUシリーズ」の主要諸元
Table 1 Main specifications of Kawasaki PU series

機種	PU 200	PU 250	PU 250S	PU 300	PU 375	PU 500	PU 500S	PU 625	PU 750	PU 1000	PU 1250	PU 1500	PU 1750	PU 2000	PU 2500	PU 3000	PU 3500	PU 4000	PU 4500	PU 5000	PU 6000	
項目																						
定格出力 (kVA)	非常用 (40°C)	187.5	225	250	300	375	437.5	500	625	750	1,000	1,250	1,500	1,750	2,000	2,500	3,000	3,500	4,000	4,500	5,000	6,000
発電機	電圧 (V)	200~6,600								400~6,600				3,300~6,600								
	周波数 (Hz)	50/60																				
	極数 (P)	4																				
ガスタービン	S1A-01	S1A-02	S1A-03	S1A-06	S1T-02A	S1T-02	S1T-03	S2A-01A	S2A-01	M1A-01A	M1A-01	M1A-03	M1A-06	M1A-23	M1T-01S	M1T-03	M1T-06	M1T-23	M1T-23S	M1T-33A	M1T-33	

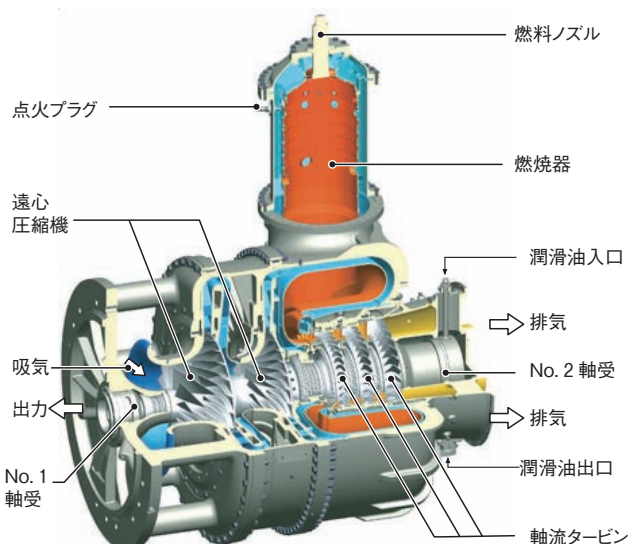


図2 単純開放サイクル軸式ガスタービン
Fig. 2 Simple open cycle single-shaft type gas turbine

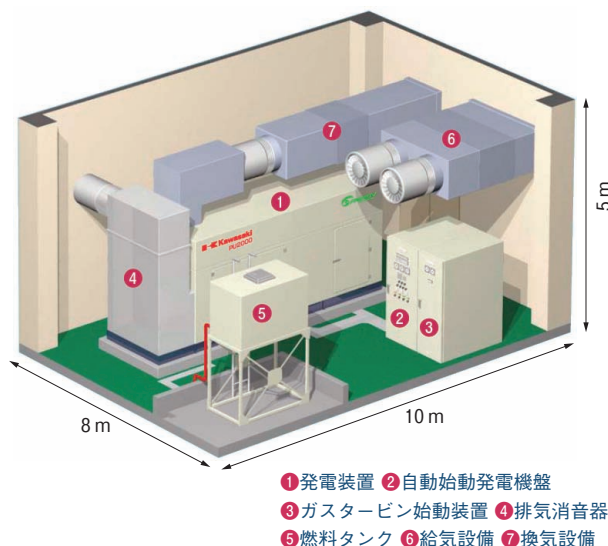


図3 ガスタービン発電設備の構成例 (2000kVA)
Fig. 3 Example configuration of gas turbine plant (2000kVA)

1 当社非常用ガスタービンの特徴¹⁾

(1) 迅速な始動

停電発生後、自動始動してから40秒以内に給電開始することができる。

通常、出力の増大に伴ってガスタービンが大型化すると、始動時間が長くなるといった問題が生じてくるが、始動トルクシミュレーションにより始動装置の最適化を図り、6,000kVAのガスタービンにおいても、40秒始動を達成している。

(2) 安定した周波数特性

一軸式ガスタービンは、圧縮機の駆動と回転出力の取り出しを同じタービン（主軸）で行っているため、また高速回転している主軸（毎分18,000~53,000回転）を毎分1,500/1,800回転の出力軸に減速するため、等価慣性モーメントが大きい。これにより、瞬時に負荷が変動した場合でも、速度変化が小さく良好な回転速度（周波数）特性が得られる。これは瞬時に過負荷がかかりやすい非常用発電設備には大きな長所となる。

(3) 自己空冷式

ガスタービンは、高温部の冷却に圧縮機出口空気を使用する自己空冷式である。そのため、冷却水とこれに付随する設備が不要であり、断水や寒冷時の凍結などを考慮する必要がなく、多様な状況で運用を行う非常用発電装置にとって有効な特性である。

(4) 小型軽量

回転機械であるガスタービンは、燃焼が連続して行われ、多量の作動流体を処理できるため、装置の小型軽量化が可能となる。

(5) 多様な使用燃料

主に非常用発電設備では、A重油、軽油および灯油の液体燃料を使用している。各使用燃料における設置環境の許容温度範囲を以下に示す。

- ① A重油：-10~40°C
- ② 軽油1, 2号：-10~40°C
- ③ 軽油3号：-15~40°C
- ④ 灯油：-25~40°C

A重油および軽油に関しては、低温時の動粘度上昇など

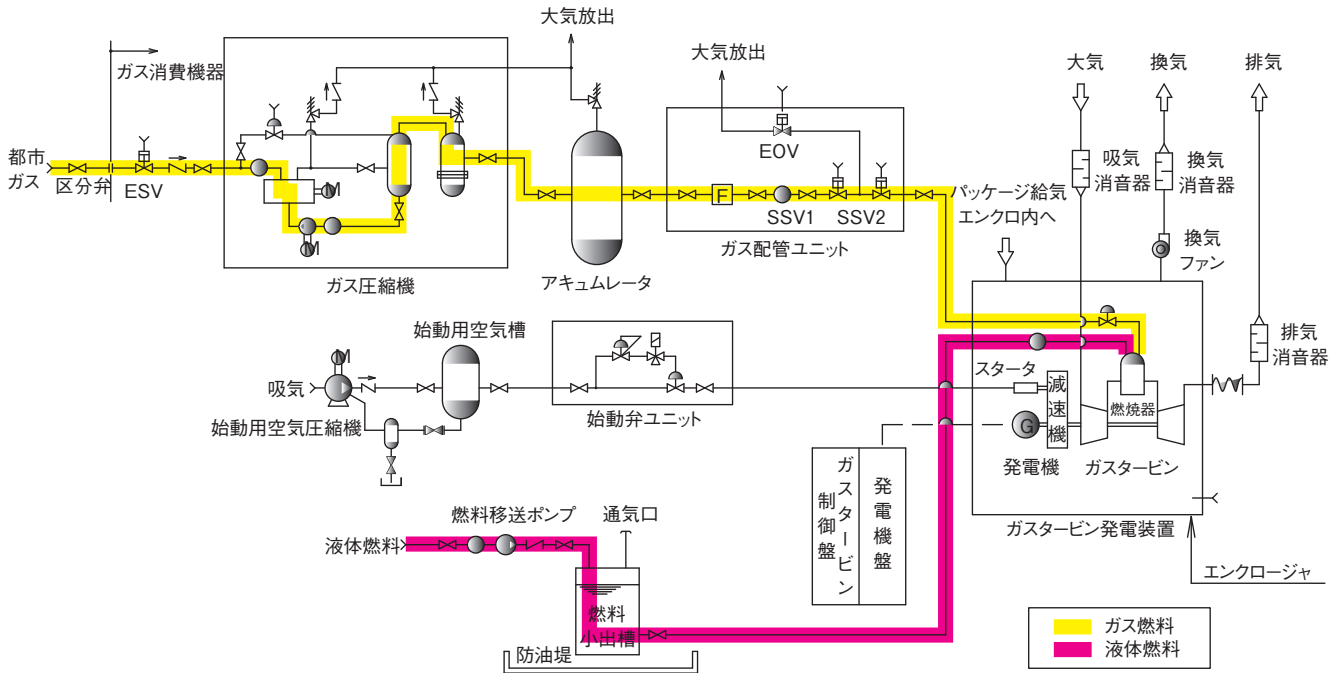


図4 デュアルフューエル方式のガスタービンのシステムフロー例
Fig.4 Example system flow of dual fuel type gas turbine

によるフィルタ目詰まり対策として、燃料小出槽や燃料配管をヒータリングすることで、始動信頼性を高めている。

また、近年では長時間運転にも対応できるように、始動完了後、ガス燃料に切り替えるデュアルフューエルシステムの提供も開始している。

2 デュアルフューエルシステム²⁾

非常用発電設備は、比較的短時間の電力供給を目的として設置されてきた。そのため、今回の震災に伴う計画停電のように、長時間の運用を求められる場合には、燃料供給をいかに安定して行うかが運用上の問題となる。

大半の非常用発電設備は、A重油、軽油、灯油などの液体燃料を使用しており、燃料は地下貯蔵タンクなどに備蓄されるが、貯蔵量には限りがある。デュアルフューエルシステムは、緊急時に燃料供給が絶たれた場合に備え、液体燃料・ガス燃料の併用を行うものである。

ガスタービンは、液体燃料とガス燃料の切り替えが容易である。デュアルフューエル仕様では、停電時には液体燃料で起動後、自ら発電した電気でガス圧縮機を駆動させ、運転中に液体燃料からガス燃料に切り替えることで、連続運転に対応することが可能である。これらのシステムは、常用発電設備では実績があり、燃料噴射ノズルなどの燃料システムの変更により、非常用発電装置でも適用可能とした。デュアルフューエル方式のガスタービンのシステムフロー例を図4に示す。

3 移動電源車

災害時に「小型・軽量で冷却水不要」というガスタービンの特長は、移動電源車にとって理想的な特性となる。定置式ガスタービン発電設備の市場で、高い定評と、圧倒的とも言える納入実績を重ねた「カワサキPUシリーズ」に機動力をプラスした、ガスタービン移動電源車「カワサキMPUシリーズ」(図5)について、以下に紹介する。

(i) 低振動・低騒音

定置式と同様、ガスタービンは往復運動部分のない回転運動機関のため、振動がほとんどない。また、騒音についても、発生音の主体が防音しやすい高周波であり、簡単な構造の防音パネルと消音器で、きわめて効果的な低騒音化を実現できる。そのため、市街地や夜間でも運用が可能である。



図5 移動電源車
Fig.5 Mobile power unit

(ii) 冷却水が不要

ガスタービンは自己空冷式のため、冷却水が不要である。これは、多様な運用状況を求められる移動電源車にとって最適である。

(iii) 寒さに強く、高い起動信頼性

冷却水が要らず、しかも摺動部分のないガスタービンは、構造的に寒さに強く、寒冷地仕様でもディーゼル電源車のような大がかりなヒーティングシステムが不要である。燃料は、A重油、軽油および灯油が使用でき、灯油の場合は、-25℃までヒーティングなしで始動が可能である。また、暖機運転なしで全負荷投入できるのも、ガスタービンならではの魅力である。

4 非常用ガスタービン発電設備の稼働実績

(1) 東日本大震災時の稼働状況

日本を襲ったマグニチュード9.0の東日本大震災は、1990年以降の観測史上最大であり、世界の5大地震に数えられる規模であった。被災地域は、東北・関東エリア合わせて1都15県に上る。被災地域における「カワサキPUシリーズ」の稼働状況を表2に示す。

被災地域には、当社の非常用ガスタービン発電設備「カワサキPUシリーズ」が、3,092台配備されており、停電発生地域には、1,035台が配備されていた。このうち、メンテナンスされていなかった1台を除き100%が正常に稼働し、高い始動信頼性を有することを証明した。

また、震災後には、関東近県において計画停電が実施されたが、対象地域の発電設備も全て正常に稼働した。

(2) 過去の災害時の稼働状況

1995年1月に発生した阪神・淡路大震災においては、断水によりディーゼルエンジンの発電設備が稼働しなかった。一方、自己空冷式のガスタービン発電設備の多くは稼働し、カワサキ非常用ガスタービン発電設備も95.9%の稼働率を発揮した。稼働しなかった設備の多くは、設置して以来、定期整備されていなかったことが原因であったため、この震災を機に定期点検整備の重要性も認識されるようになった。この結果、2006年8月の首都圏大停電、2007年の能登半島地震、新潟県沖地震および岩手・宮城内陸地震では、100%の稼働率を実現した。

あ と が き

近年、電力会社の計画停電や電力不足などの影響により、電源セキュリティ強化の動きが出てきている。BCP（事業継続計画）の観点からも、非常時に防災負荷および保安負荷への給電が可能なデュアルフェューエル方式の非常用ガス

表2 被災地域における「カワサキPUシリーズ」の稼働状況
Table 2 Operation of Kawasaki PU series in disaster area

	配 備 数		稼 働 状 況	
	被災地域	停電地域	稼 働	未 稼 働
青 森 県	57	50	50	
岩 手 県	50	50	50	
宮 城 県	134	119	119	
秋 田 県	32	28	28	
山 形 県	73	67	66	1 (メンテ不良)
福 島 県	64	41	41	
新 潟 県	89	0	0	
東 京 都	1,277	49	49	
神 奈 川 県	363	175	175	
埼 玉 県	216	125	125	
千 葉 県	233	91	91	
茨 城 県	125	76	76	
栃 木 県	65	43	43	
群 馬 県	106	90	90	
山 梨 県	28	13	13	
静 岡 県	180	18	18	
合 計	3,092	1,035	1,034	1

タービン発電設備の重要性が認識され始めており、今後もこれらのシステムを採用する事例が増えていくことを期待している。

また、小型ガスタービンを用いた移動電源車は、機動性に優れ、社会インフラを支えるバックアップシステムとして有用である。搭載されるガスタービンは、それぞれ違った特性から選ばれているが、原動機として高効率、高信頼性、低環境負荷を求められることには変わりはなく、今後も品質向上や普及拡大、非常時に確実に稼働させるために重要な定期整備サービスの展開を図っていく。

参 考 文 献

- 1) 辰巳, 井上, 若山, 細川, 堂浦: “小型ガスタービン発電装置の動向について”, 日本ガスタービン学会誌 (2012)
- 2) 井上俊彦: “デュアルフェューエル方式のガスタービンについて”, クリーンエネルギー (2012)



井上 雄介



内藤 朋



倉澤 貞之

省エネルギーと電源セキュリティ向上に貢献する ガスタービンコージェネレーション設備

Gas Turbine Cogeneration System for Energy Conservation and Better Power Supply Security



中安 稔① Minoru Nakayasu
長谷川大輔② Daisuke Hasegawa
山出 祐司③ Yuji Yamade

コージェネレーションは、省エネルギー、エネルギーコスト削減、温室効果ガス排出量の削減に大きく貢献することができる。さらに東日本大震災後は、上記に加え「電源セキュリティの向上」などの新しいニーズが生まれており、このような市場ニーズの変化に対応するガスタービンコージェネレーションの提供に鋭意取り組んでいる。

Cogeneration is capable of contributing greatly to energy conservation, energy cost reduction, and greenhouse gas emission reduction. Moreover, new demands, such as the need to “improve power supply security,” have emerged from the Great East Japan Earthquake. Under these circumstances, we are striving to provide gas turbine cogeneration that responds to this change in market needs.

まえがき

これまでコージェネレーションは、省エネルギー、エネルギーコスト削減、温室効果ガス排出量削減の目的で導入されることが主であった。しかし、東日本大震災後の電力不足、停電リスクにより「電源セキュリティの向上」などの新しいニーズが生まれている。震災後の当社受注案件での代表的なコージェネレーション導入理由を表1に示す。

- ① 電源セキュリティの向上
- ② エネルギーコストの削減
- ③ 節電

当社ではこうした市場ニーズの変化に対応しつつ、高効

率・高信頼性のガスタービンコージェネレーションを提供するために鋭意取り組んでいる。

1 コージェネレーションの市場動向

(1) 国内

現在、2011年3月に発生した東日本大震災・原発事故を踏まえ、現行のエネルギー基本計画の抜本の見直しが進められている。新しいエネルギー基本計画の策定にあたり、経済産業省は、複数の「エネルギーミックスの選択肢」を発表した。エネルギーミックスの基本的方向性として、

- ・天然ガスシフトをはじめ、環境負荷に最大限配慮しながら、化石燃料を有効活用する。（化石燃料のクリーン利用）
- ・化石燃料のクリーン利用を進めるとともに、排熱の有効活用や分散型電源の普及を加速させるという観点から、電気と熱を一体活用するコージェネレーションシステム（燃料電池を含む）の利用拡大を図ることが重要である。このため、余剰電力を系統で有効活用する仕組みの整備も含め、導入拡大に向けた政策を早急に具体化させる必要がある。

と記載されている。これらの基本的方向性から提案された「エネルギーミックスの選択肢」の各ケースでは、コージェネレーションによる発電容量は現状の9,400MWから2030年の電力需要の15%を賄う21,500MWに増加させるとされた(図1)。

表1 震災後の主な受注案件と導入理由

Table 1 Major orders received after the Earthquake and reasons for introducing cogeneration systems

案件	導入理由
サイトA	夏季や冬季の電力安定供給と節電を考慮して導入
サイトB	原発の停止に伴い、工場の電源セキュリティ向上を目的として導入
サイトC	医療機器の保全電源の確保（電源セキュリティ向上）を目的として導入
サイトD	生産設備への電力安定供給から、関東の工場の機能の一部を九州に移転したため導入
サイトE	電気料金が値上がりしたため、電力安定供給とエネルギーコスト削減の観点から導入

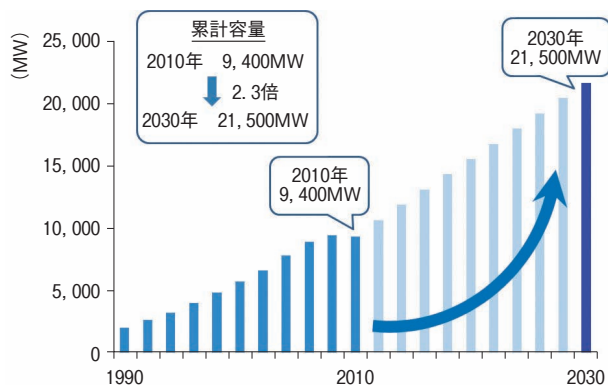


図1 コージェネレーションの導入量想定^{1) 2)}
 (注: 2030年は燃料電池を除く)
 Fig. 1 Anticipated introduction of cogeneration systems
 (Note: Fuel cells excluded from data for 2030.)

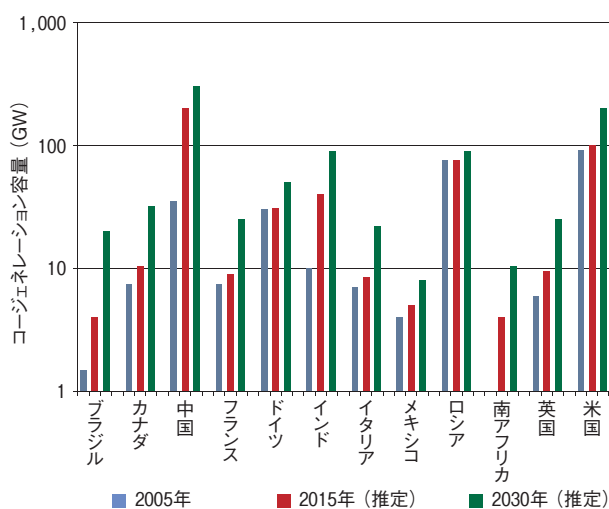


図2 各国コージェネレーション導入量 (IEA推定)³⁾
 Fig. 2 Introduced cogeneration systems by country (IEA estimate)

(2) 海外

国際エネルギー機関 (IEA) は「コージェネレーション: 地球規模での投資拡大から得られるメリットの分析」³⁾と題した報告書において、コージェネレーションは「地球温暖化と電力需要増加の問題解決に貢献できる低コストで信頼できる技術」としている。また、「コージェネレーション導入促進シナリオ」の中で、2015年および2030年における各国におけるコージェネレーション導入量の増加を推定している (図2)。

2 ガスタービンコージェネレーション

コージェネレーションとは、1種類の一次エネルギー(燃料)でガスタービンなどの原動機を駆動して発電機を回転させ、電力を得ると同時に原動機の排ガスや冷却水の熱を蒸気または温水として取り出し、冷暖房や給湯、プロセス加熱などに使用するエネルギーシステムである。

表2 ガスタービンコージェネレーションラインナップ
 Table 2 Lineup of Kawasaki gas turbine cogeneration products

機種名	発電端出力 (kW)	発電端効率/総合効率 (%)
PUC07D	650	24.4 / 75.0
PUC15D	1,455	24.1 / 82.0
PUC17D	1,660	26.5 / 84.2
PUC30D	2,865	23.9 / 81.9
PUC60D	5,250	28.9 / 83.1
PUC70D	6,500	30.0 / 81.0
PUC80D	7,290	32.7 / 84.3
PUC180D	17,530	33.5 / 81.9
PUC300D	28,350	38.8 / 83.1

当社では、自社開発のガスタービンを駆動源とし、600~30,000kWまでの幅広い製品をラインナップしている (表2)。

当社製品の特徴は、以下の通りである。

- ① エンジン開発からアフターサービスまでの一貫体制
- ② 豊富な実績 (納入台数517台, 累計1,000MW以上)
- ③ 多様な燃料が使用可能 (都市ガス, 液体燃料)
- ④ 防災時の非常用発電として兼用可能 (PUC30まで)
- ⑤ 24時間のアフターサービス体制

3 コージェネレーションの市場ニーズと導入事例

(1) 電源セキュリティの向上

サミット美浜パワー(株)に納入した17MW級L20Aガスタービン2基と16MW級蒸気タービンによる50MW級コンバインドサイクル発電設備PUCS500の概要を図3に示す。クリーンな都市ガスを使って、千葉市美浜区にある食品コンビナート各社に電力(7社)と蒸気(4社)を供給している。また、余力のある電力は小売事業を行っているサミットエナジー(株)を経由して首都圏の大口電力需要家に供給している。

本発電設備の大きな特長は、従来の熱電供給事業では1社1工場での自家消費が一般的であったのに対し、工場団地を構成する複数の工場への電力・蒸気の供給事業と電力小売事業を結び付けていることにあり、50MW級の発電所としては他に例を見ない全く新しい事業形態である。1工場単独での導入ではコストや環境負荷の低減といった分散型発電のメリットが十分に生かし切れなくても、このような事業形態をとることにより、発電設備の能力を最大源に発揮することが可能となる。

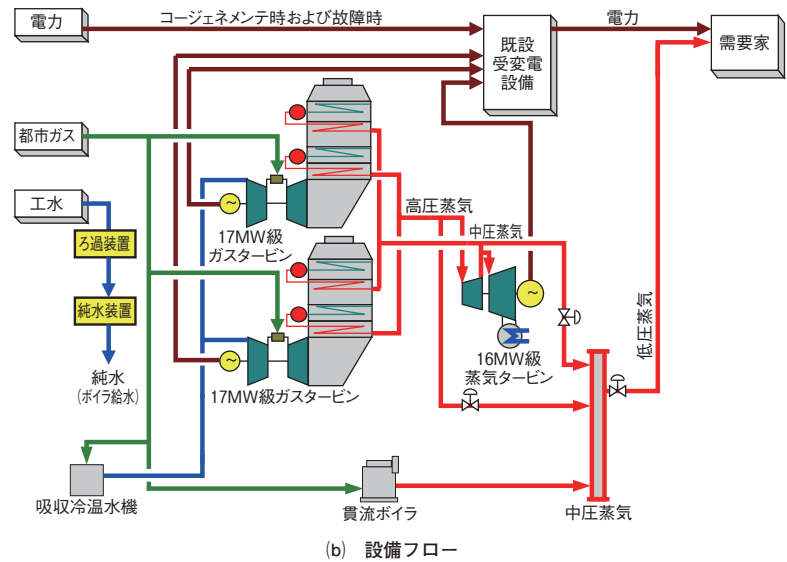
東日本大震災後の計画停電時には、食品コンビナート各社へ電力・蒸気を安定して供給することで、食品コンビナート各社の製品の安定供給に貢献できた。これにより、従来のコージェネレーションとは異なるニーズを発掘できた。この食品コンビナートでの電力や排熱エネルギーを面的に有効利用するシステムは、「スマートエネルギーネットワーク」の小規模な例とも言える。

■設備能力

ガスタービン発電出力：約34,000kW
 蒸気タービン発電出力：約16,000kW
 送気蒸気量：約65t/h



(a) 外観



(b) 設備フロー

図3 サミット美浜パワー株納 50MW級コンバインドサイクル発電設備PUCS500
 Fig. 3 50MW class combined cycle power generation plant PUCS500 delivered to Summit Mihama Power Corporation

(2) 省エネルギー、エネルギーコストの削減

静岡県某工場に納入した追焚き装置付きのPUC180Dガスタービンコージェネレーションの概要を図4に示す。既設重油焚きボイラを停止し、天然ガスを燃料とするガスタービンコージェネレーション導入と客先の排熱有効利用設備導入により、年間約19,000kLの原油削減効果を実現し、工場全体の約34%の省エネルギーに貢献している。

(3) 節電

当社明石工場エネルギーセンターは、L20Aガスタービンと蒸気タービンによるPUCS250コンバインドサイクル

発電設備、PUC80ガスタービンコージェネレーション発電設備、PUC17Dモノジェネレーション発電設備から構成されている。これらは、工場の電力と蒸気のエネルギーコスト削減、モデルプラント、新開発ガスタービンエンジンの長時間実証運転を主な目的として設置されたものである(図5)。

一方で、2011年からの関西電力の節電要請(冬季および夏季)に対応するため、これらの発電設備を最大限に稼働させ、購入電力を削減した上で、余剰分が発生する場合には関西電力への逆潮(送電)を実施している。

■設備能力

ガスタービン発電出力：約17,000kW
 送気蒸気量：約51t/h



図4 PUC180Dガスタービンコージェネレーション
 Fig. 4 PUC180D gas turbine cogeneration system

■設備能力

- 第4号発電設備 (L20A) : 18,000kW
- 第6号発電設備 (蒸気タービン) : 6,700kW
- 第7号発電設備 (PUC80D) : 8,100kW
- 第8号発電設備 (PUC17D) : 1,800kW



図5 明石工場エネルギーセンター
 Fig. 5 Akashi Works Energy Center



図6 デュアルフューエル仕様のガスタービン
Fig.6 Gas turbine of dual-fuel specification

4 震災後の市場ニーズへの技術対応

(1) デュアルフューエル

デュアルフューエル（2重燃料）とは、液体燃料と気体燃料とを切り替えて運転できる仕様である。災害などにより液体燃料の調達が困難になった場合でも、ガス導管によりガス燃料が供給できれば長時間の連続運転が可能となる。また、デュアルフューエル仕様のガスタービンは、停電時も起動可能なことから、災害時の非常用電源としても使用でき、病院や民生用ビルに多数導入されている（図6）。

(2) 自立運転

自立運転とは、連系している商用電源に瞬時電圧低下などの異常が生じた場合に系統解列を行い、コージェネレーションのみで重要負荷へ給電を行うことである。震災後に、既設コージェネレーションへの自立運転化の改造工事を多数実施した。

高速遮断器を用いた瞬時電圧低下対策の例を図7に示す。瞬低発生時は半導体スイッチを用いた高速遮断器によって母線連絡遮断器（52B）を解列させ、重要負荷への給電を継続する。

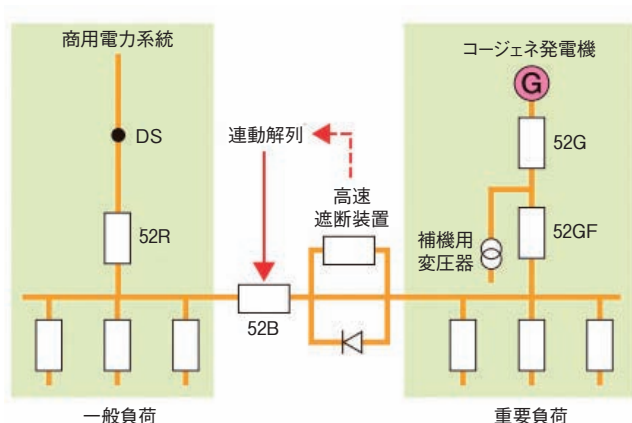


図7 高速遮断器を用いた瞬時電圧低下対策
Fig.7 Measure against instantaneous voltage drop using high-speed circuit breaker

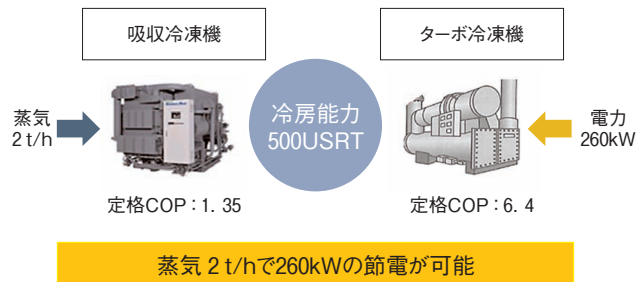


図8 吸収冷凍機による節電効果の例⁴⁾
Fig.8 Example of electricity conservation by means of absorption chiller

(3) 吸収冷凍機による節電

コージェネレーションの排熱蒸気を使って吸収冷凍機で冷房用冷水を製造することにより、ターボ冷凍機で消費する電力分の節電が可能となる。

吸収冷凍機による節電効果を図8に示す。約500USRTの冷房能力を得るために、吸収冷凍機で約2t/hの蒸気を消費するのに対し、ターボ冷凍機では約260kWの電力を消費する。

このため、コージェネレーションの排熱蒸気2t/hにより500USRTの冷房が行えると同時に、約260kWの受電電力の節電・ピークカットが行える。

あ と が き

エネルギーを取り巻く事業環境は日々大きく変わるが、この変化を素早くキャッチして、市場ニーズにマッチした製品を提供することで、社会に貢献していきたい。

参 考 文 献

- 1) 日本コージェネレーション・エネルギー高度利用センター：“年度別導入状況（累積導入件数）、国内のコージェネレーション導入実績”（2011）
- 2) 資源エネルギー庁：“自家発（コージェネレーションを含む）の導入量の想定について”（2012）
- 3) IEA：Combined Heat and Power（2008）
- 4) 大槻，乃村，井上，中安，西谷：“社会に貢献する中・小形ガスタービン発電装置－地震対策から新たな電力の自由化に向けて－”，日本工業出版（2012）



中安 稔

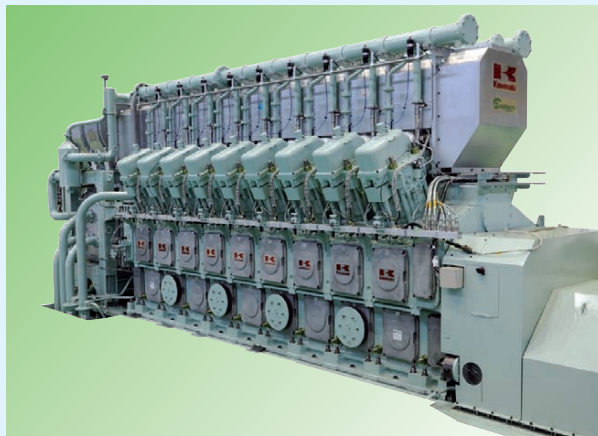


長谷川大輔



山出 祐司

世界最高効率ガスエンジン –グリーンガスエンジン– Gas Engine with World Highest Generating Efficiency – Green Gas Engine –



杉本 智彦① Tomohiko Sugimoto
 酒井 能成② Yoshishige Sakai
 服部 崇③ Takashi Hattori
 堀江 尚④ Takashi Horie
 野中 洋輔⑤ Yosuke Nonaka

2007年より高効率ガスエンジンであるグリーンガスエンジンの供給を始めた。開発当初から世界最高レベルの発電効率を達成していたグリーンガスエンジンであるが、さらに発電効率を伸長すべく開発を行ってきた。これらの成果はすでに市場へ投入され、当社神戸工場の神戸パワーセンターをはじめとして、国内最大級の110MW級大型発電プラントにも活用されている。

Since 2007, we have supplied green gas engines as high-efficiency gas engines. They exhibit the world's highest class of power generation efficiency, as development efforts have been devoted to further improving power generation efficiency. The results obtained from these efforts have been utilized in the market, being used at the Kobe Power Center of our Kobe Works and Japan's largest 110 MW class large-scale gas engine power generation plants.

まえがき

近年、系統電源の供給力不安から、電源バックアップを含めた自家発電や分散型発電市場が活性化している。特に、クリーンで効率の良いガスエンジンに市場の注目が集まっている。

当社では、高効率のグリーンガスエンジン(KGシリーズ)を2007年に開発し^{1) 2) 3)}、2010年にはさらに効率改善を図ったKG-Vシリーズを加えて、世界最高レベルの発電効率を維持し続けている。また、エンジン製造においても、市場の要求に応えるため、サプライチェーンや製造能力の強化に取り組み、月産4台体制を整えた。

このグリーンガスエンジンは、高い発電効率ならびに高い環境性能といった特長から受注を伸ばしており、2011年には国内外より28台を受注した。

表1 グリーンガスエンジンのラインアップ
Table 1 Green gas engine product lineup

型 式	KG-12	KG-18	KG-12-V	KG-18-V
シリンダ径 (mm)	300		300	
回 転 数 (min ⁻¹)	50Hz	750	750	
	60Hz	720	720	
発電出力 (kW)	50Hz	5,200 7,800	5,200	7,800
	60Hz	5,000 7,500	5,000	7,500
発電効率 (%)	48.5		49	
NOx (ppm) (O ₂ =0%換算)	200		200	
可能運転領域	30~100%負荷		30~100%負荷	

このような状況の中、市場における発電効率での優位性をさらに伸長するために、グリーンガスエンジンの性能改善に継続して取り組んでいる。

1 概 要

(1) ラインアップ

開発当初より、グリーンガスエンジンは発電効率48.5%を達成し、発電効率では同クラスのガスエンジンにおいて世界最高レベルであった。エンジンの型式は、出力別に5,000kW級の12気筒エンジン(KG-12)と7,500kW級の18気筒エンジン(KG-18)の2タイプがある。

2010年には、さらに高効率なKG-Vシリーズをラインアップに加え、計4機種としている(表1)。

(2) 特 長

グリーンガスエンジンには、以下のような特長がある。

- 世界最高レベルの発電効率49%を有する。
- 排出ガス中のNOx(窒素酸化物)値は200ppm以下と低く、環境性能においてもトップクラスである。
- 50%の部分負荷においても45%の高い発電効率を維持できる。
- 大気温度、高度による出力への影響が少なく、夏期の全負荷対応が可能である。
- 起動から10分以内に100%負荷に到達でき、30~100%の広い負荷範囲の運転が可能である。また、これにより柔軟な運用を可能としている。

2 発電効率改善に対する取り組み

グリーンガスエンジンは、発売以降も世界最高レベルの発電効率を維持すべく開発を行ってきた。本章では発電効率改善に対する取り組みを紹介する。

(1) 可変ノズル型過給機 (VTA) の採用

2010年に、当社神戸工場の電源設備として、12気筒エンジンを採用した神戸パワーセンターを設置した。本センターは工場電源として使用するだけでなく、発電効率改善の場として活用しており、過給機仕様を変更したエンジンの開発を行った。従来は給気圧を排気バイパス弁で制御していたが、過給機自体に可変ノズル(VTA: Variable Turbine nozzle Area)を採用して給気圧の制御に用いることで、発電効率を従来の48.5%から49.0%へ向上させることができた。標準仕様(KG型と称す)と高効率仕様(KG-V型と称す)との過給方式の違いを図1に示す。KG型では給気圧の制御に排気バイパス弁を設けて、排気エネルギーの一部を放出することで制御を行っている。一方、KG-V型は排気バイパス弁を廃し、代わりに過給機に可変ノズルを設けることで過給制御を行っている。可変ノズルの採用で過給機前の排気筒内の圧力を下げることができ、給排気行程における、ポンプ仕事を増やすことによって効率を改善することができた。

可変ノズル型過給機を採用したエンジンは、2010年より神戸パワーセンターにて実証試験を行っており、年間を通じて安定した性能であることを確認した。

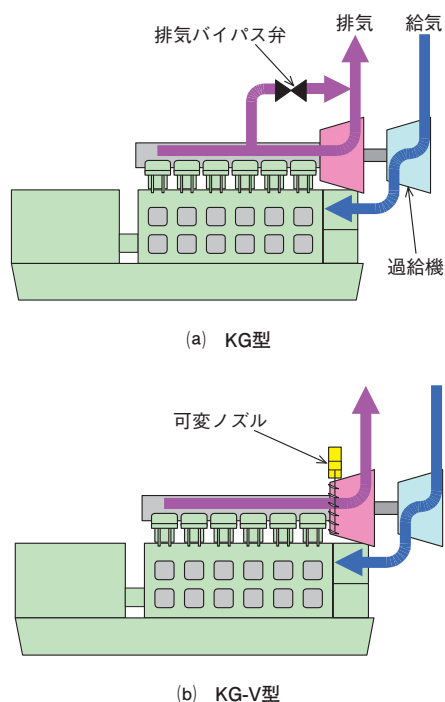


図1 過給方式
Fig.1 Turbocharger system

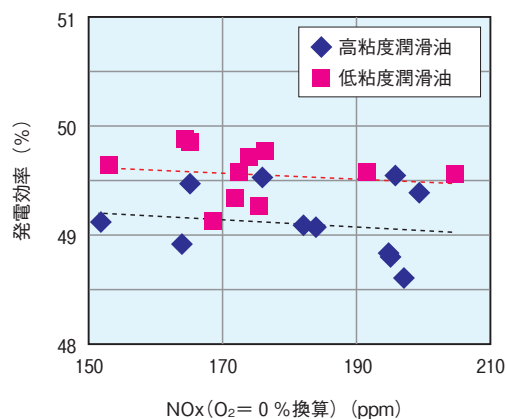


図2 潤滑油変更による発電効率改善
Fig.2 Improvement in efficiency through use of different lubricant

(2) 新型潤滑油の採用

近年、ガスエンジン用の潤滑油性能が向上し、低粘度潤滑油においてもエンジンが高温状態となった場合の粘度を確保できるようになった。

低粘度潤滑油の採用によりエンジンの機械損失を減らすことが可能となり、発電効率の向上が期待できる。当社でもガスエンジンへの適合を確認するため、神戸パワーセンターで従来の高粘度潤滑油から低粘度潤滑油へ変更し、確認運転を実施した。低粘度潤滑油使用下で1,000時間以上の運転を行い、発電効率の確認、および軸受けなどの機械摺動部品の信頼性を確認した。

発電効率については、従来の高粘度潤滑油を使用した場合より約0.5ポイント改善できた。また、試験後の解放点検において、軸受などの信頼性に問題のないことを確認した。潤滑油変更による効率改善の結果を図2に示す。現在、低粘度潤滑油は、従来機種へのオプションとしても対応している。

(3) 給気温度の変更

従来、ガスエンジンは主にコージェネレーションに用いられ、熱供給と電力供給の性能を両立させるように設備計画を行ってきた。しかしながら、昨今の電力事情に対する市場要求の変化から、発電性能のみに注力する案件の引き合いも増加している。このような市場の状況に対応すべく、熱利用よりも発電効率に重点を置いたエンジンの開発に着手した。

従来は熱利用のため、エンジンから取り出せる冷却水温度を高くして、温水としての熱回収率を高めることとしていた。今回は、取り出す冷却水の温度を高くする必要がないため、冷却系統を見直し、給気温度を下げることで性能改善を図った。

ガスエンジンは燃料の点火時期を早くする(進角)と燃焼時の圧力が上昇し効率が向上する。しかし、点火時期を早くし過ぎるとエンジンの運転を妨げるノッキングが多く発生する結果となる。今回は給気温度を下げることで、高

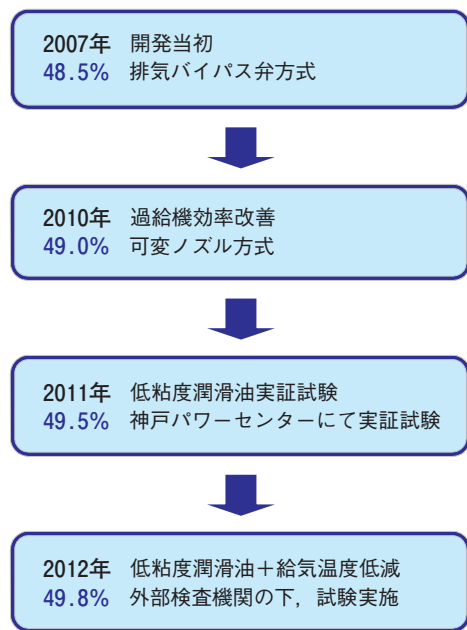


図3 発電効率改善の歩み
Fig. 3 Progress in improvement of power generation efficiency

効率化の妨げとなるノッキングに対するマージンを確保することができた。結果として、点火時期が進角可能となり発電効率改善が可能となった。実機での運転を通じ約0.2ポイントの発電効率の改善を確認した。

最終的に上記(1)-(3)の効率改善を組み合わせ、49.8%の発電効率を外部検査機関立ち会いの下で確認した。

グリーンガスエンジンの発電効率改善の歩みを図3に示す。

3 運用性の改善

ガスエンジンは一般的に連続運転可能負荷の下限が50%程度であるものが多く、発電効率は高いものの、実際の運転に対しては運用域が狭いという評価を受けていた。グリーンガスエンジンでは、発電効率だけでなく実際の運用においても扱いやすい発電設備にするために、運転領域の拡大に取り組んできた。神戸パワーセンターにおいて長時間の低負荷運転を実施し、エンジン運転範囲の検証を行った。

一般的に、ガスエンジンの長時間におよぶ低負荷運転では燃焼室に潤滑油などの燃焼残渣が発生してノッキングの発生要因となり、運転信頼性を妨げる結果となる。これに対し、神戸パワーセンターでの長時間の低負荷運転試験において、燃焼室内に発生する燃焼残渣が少ないことを実証

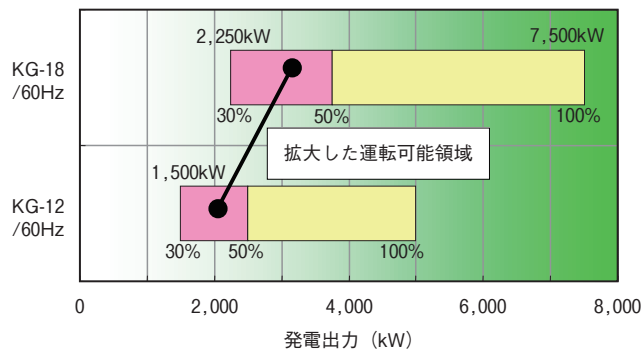


図4 グリーンガスエンジン運転可能領域
Fig. 4 Operation-fit domain for green gas engines

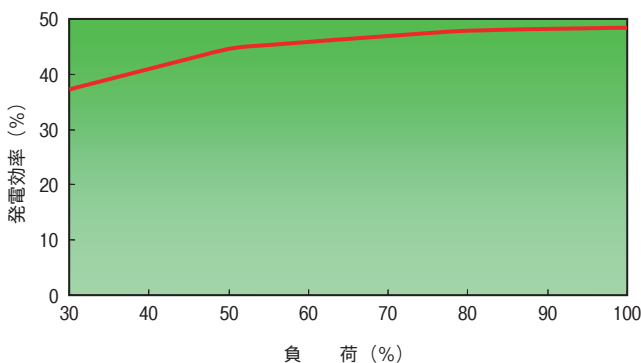


図5 部分負荷時における発電効率
Fig. 5 Power generation efficiency under partial load

し、グリーンガスエンジンの燃焼性能の高さを確認した。さらに、長時間の運転を通じ、グリーンガスエンジンの運転下限が従来のガスエンジンより低い30%まで設定できることを確認した。周波数が60Hz域でのエンジンの連続運転可能な発電出力の幅を図4に示す。また低負荷における発電効率減少も少ないことを確認した(図5)。

4 製造体制強化の取り組み

当社ではグリーンガスエンジンの性能改善と合わせ、高まる市場の要求に応えるべく2011年より製造体制の強化に取り組んできた。特に、大型工作機械(プラノミラー)の導入など工場の生産設備強化を行うとともに、組み立てラインや工場試運転設備の整備を実施した(図6)。その結果として、2012年は月産4台の製造能力を持つに至った。

グリーンガスエンジンの試運転場の全景を図7に示す。工場試運転設備としては3レーンを有し、うち2レーンは常設の試験発電機を備え付け、週1台の試験運転が実施可能である。また残る1レーンは、顧客に納入するエンジンと発電機ならびに補機を含めた総合試運転を可能とする試運転場として運用し、顧客のさまざまな試験要求に応えることができる。この試験設備には10,000 kWの乾式負荷装置を備え、エンジンと発電機を組み合わせたさまざまな負荷試験が可能である。

テーブル移動量 (m)	13.0
テーブル最大積載質量 (t)	200
門幅 (m)	5.5
門の高さ (m)	6.1



図6 生産設備 (プラノミラー)
Fig.6 Large-scale planomiller



図7 工場試験設備
Fig.7 Factory test facility

あとがき

グリーンガスエンジンは、100年以上の往復運動エンジンの歴史と各種機器・プラントで磨かれてきた当社の最新制御技術をベースとして開発した。

当社は、ガスエンジン発電所として国内最大級である日本テクノ(株)110MW級発電所「袖ヶ浦グリーンパワー」(図8)を受注した。この発電所は今回の効率改善で実証された可変ノズル型過給機や低粘度潤滑油をいち早く採用するなどにより、発電効率49.5%で運用されている。

今後も、高効率かつ環境負荷の低いグリーンガスエンジンを供給することで、豊かな社会に貢献していきたい。



図8 日本テクノ(株)110MW級発電所
Fig.8 110 MW class power station delivered to Nihon Techno Co., Ltd.

参考文献

- 1) 桜井：“川崎重工の8 MW級大型ガスエンジン”，クリーンエネルギー (2007)
- 2) 桜井, 杉本, 徳岡：“8 MW級大型ガスエンジンについて”，コージェネシンポジウム (2007)
- 3) 桜井, 杉本, 徳岡, 野中, 橋本：“世界最高の発電効率と環境性能を達成 -カワサキグリーンガスエンジン-”，川崎重工技報, No.167, pp.6-11 (2008)



杉本 智彦



酒井 能成



服部 崇



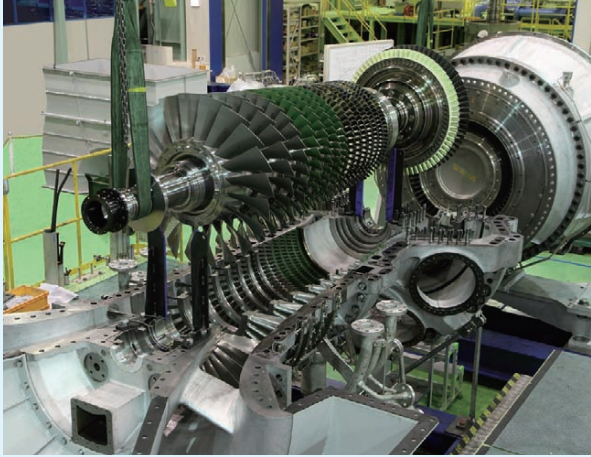
堀江 尚



野中 洋輔

30MW級 高効率ガスタービン「L30A」

Highly Efficient 30MW Class Gas Turbine, L30A



池口 拓也① Takuya Ikeguchi
 松岡 右典② Akinori Matsuoka
 田中 良造③ Ryozo Tanaka
 奥戸 淳④ Atsushi Okuto
 寺内 晃司⑤ Koji Terauchi
 酒井 祐輔⑥ Yusuke Sakai
 仮屋 大祐⑦ Daisuke Kariya
 笠 正憲⑧ Masanori Ryu
 武 浩司⑨ Koji Take

地球温暖化抑制や分散型発電への需要の高まり、さらには経済的側面から高効率発電へのニーズを受け、30MWクラスにて世界最高効率を誇るL30Aガスタービンを開発した。本稿では、この設計コンセプト、基本構造、設計概要などについて述べる。

From the viewpoint of reducing environmental loads and being aware of a growing demand for distributed power generation and an economy-driven need for high-efficiency power generation, we have developed the L30A gas turbine that boasts the world's highest efficiency in the 30 MW class. This paper describes the design concepts, basic structure, general design, and other features of the engine.

まえがき

人々の節電意識が高まる中、安定した電力供給を図るために分散型発電需要も高まり、ランニングコスト低減などの経済的側面から高効率発電がクローズアップされている。さらに、地球温暖化抑制やCO₂排出量削減の観点から、環境負荷の少ない再生可能エネルギーや省エネルギー分野への期待が一層高まっている。そのため、最近では高効率で環境に優しい産業用ガスタービンを利用した複合発電プラント（CHP/CCPP）が省エネルギー分野で最も注目を浴びている。

当社では、こういった社会のニーズに応えた高性能でエコフレンドリーな産業用ガスタービンとして、新たに30MW級高効率ガスタービンL30Aを開発した。

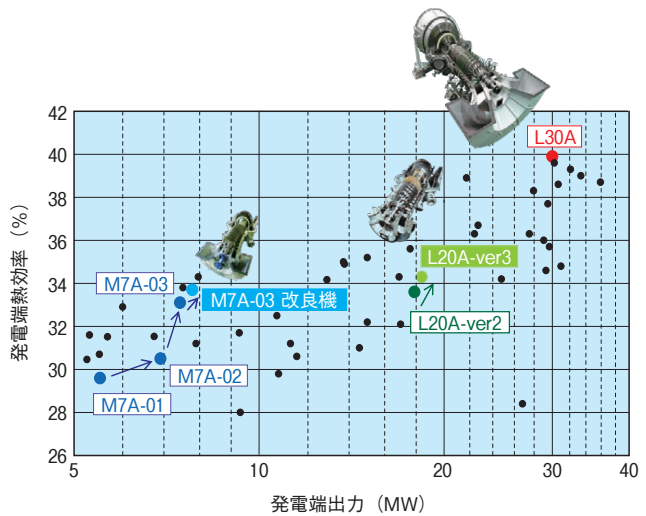


図1 5～35MWクラスの産業用ガスタービンの性能トレンド
 Fig. 1 Performance trend of 5-35 MW class industrial gas turbine

1 概要

発電端出力が5～35MWクラスの当社産業用ガスタービン性能を図1に示す。発電市場で需要が著しい20～35MWクラスにおいて世界最高となる効率40%以上を目標の一つとして、さらに石油・ガス市場や機械駆動用も視野に入れて、2007年度に2軸型のL30Aの開発を開始した¹⁾。

L30Aの主要諸元を表1に、外観を図2に示す。

L30Aのガスジェネレータモジュールには、これまで当社で実績のあるM7AやL20Aシリーズで採用された多段軸流圧縮機、多缶型燃焼器、水平分割構造とした。パワータービンモジュールについては、当社の小型ガスタービンM1Fと国家プロジェクトで開発したSMGT（Super

表1 L30A主要諸元

Table 1 L30A main specifications

型式	単純開放2軸型
出力 (MW)	30.9
熱効率 (%)	41.3
圧縮機	軸流14段
燃焼器	8缶型
ガスジェネレータタービン	軸流2段
パワータービン	軸流3段
ガスジェネレータ回転数 (min ⁻¹)	9,330
パワータービン回転数 (min ⁻¹)	5,600
空気流量 (kg/s)	86.5
圧力比	24.5
排気温度 (°C)	470

※ISO条件（パワータービン軸端換算、燃料：天然ガス）

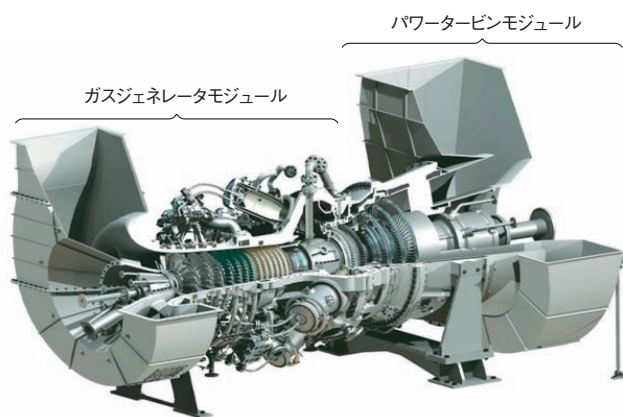


図2 L30Aガスタービン
Fig. 2 L30A gas turbine

Marine Gas Turbine) の各2軸型ガスタービンの開発実績を踏まえて、変形が小さく効率を上げやすいリング構造を採用し、設計に着手した。

2 特長

(i) 30MWクラスで世界最高効率

L30Aは同クラスで世界最高効率を達成するために、圧縮機の高圧力比化、各要素効率の向上、および最先端のタービン冷却技術を活用した。従来機では圧縮機の圧力比は18程度であったが、L30Aはこれを飛躍的に超える圧力比24.5を達成した。また、圧縮機では、翼形状最適化ツールを導入するとともに、全段のCFD (Computational Fluid Dynamics) 解析から段間マッチング調整を行った。タービンには当社の特許技術であるフィルム冷却と流体・伝熱連成解析を適用し、タービン翼周りの詳細な温度分布を把握することで設計精度を高めている。

(ii) 低エミッション

エンジンの高効率化によるCO₂排出削減に加えて、M7AやL20Aで実績のある低NO_x乾式燃焼器設計思想(第3世代)を採用した²⁾。燃料ノズルには予混合型を採用し、3種類のバーナを用いて広範囲のDLE (Dry Low Emission) 運転を可能としている。

(iii) メンテナンスの容易性

各ケーシングを分解することなく全ての流路面を検査できるよう、適切な位置に点検口が設けられている。また、ガスジェネレータモジュールの高温部は従来機と同様に多

缶型燃焼器と水平分割構造とし、定期交換時のメンテナンス期間の短縮を図っている。さらに、オーバーホール時に交換作業を簡単に行うことができるよう、モジュール化構造設計を導入している。

3 開発プロセス

エンジン開発に先立って、当社ではFMEA (Failure Mode and Effects Analysis) 手法を実施し、潜在的な事故や故障などの問題を設計段階で予測した。代表的な要素で故障モードの発生する確率が高いものを表2に示す。これらについては、事前に詳細な解析や要素試験を実施し、成立性を評価した。

(1) 先進的解析

(i) 流体・伝熱連成解析

運転中にタービン動翼が許容できるメタル温度となり設計クリープ強度を満足するために、燃焼器からの翼外部流れと翼内部の冷却空気流れ、それらに基づく動翼の伝熱連成解析を行い、冷却孔の配置・冷却通路形状を適正化した。

(ii) 非線形振動応答解析

パワータービンの動翼は全てチップシュラウド付き形状とし、Z型ノッチによる制振構造を採用している。そのため、運転時の振動はノッチ接触部における摩擦力や減衰を加味した振動応答解析を実施し、高次モードやランダム振動を含め十分な耐振強度設計ができていることを確認した。

(2) 要素試験

(i) 圧縮機要素試験

エンジン試験前に63%スケールの圧縮機要素試験を実施した(図3)。この試験設備を用いて起動特性、段間マッチング、圧縮機マップ、可変静翼スケジュールなどの各要素特性を確認し最適化して、故障の発生リスクの低減を図った³⁾。

(ii) 燃焼器要素試験

ドイツにあるアーヘン工科大学の試験設備にて、エンジン運転時と同圧力、同温度の条件で実スケールの要素試験を実施した。着火性能やエミッションなどの燃焼性能やライナ壁温計測による耐久性を確認し、エンジン試験前に故障の発生リスクを抑えることができた。

表2 L30Aの潜在的故障モード分析
Table 2 Failure modes and effects analysis of L30A

項目 (致命的要素)	故障モード	評価方法				
		設計	組立	エンジン試験		要素試験
				短期	長期	
245 (件数)	6,473	4,300	1,866	4,095	4,071	170
ガスジェネレータ1段動翼	クリープ破断	流体・伝熱連成解析	流量試験	パイロメータ計測	冶金検査	予旋回ノズル要素試験
軸流圧縮機	段間ミスマッチまたはサージ	多段3D-CFD	翼端隙間計測	壁面静圧計測	—	スケール圧縮機要素試験
DLE燃焼器	エミッション許容外	3D-CFD	(組立性確認)	NO _x 実測		実スケール要素試験

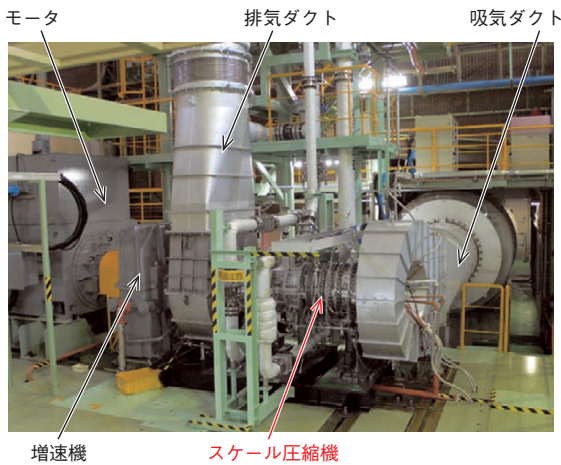


図3 スケール圧縮機要素試験設備
Fig. 3 Scaled-compressor rig test facility

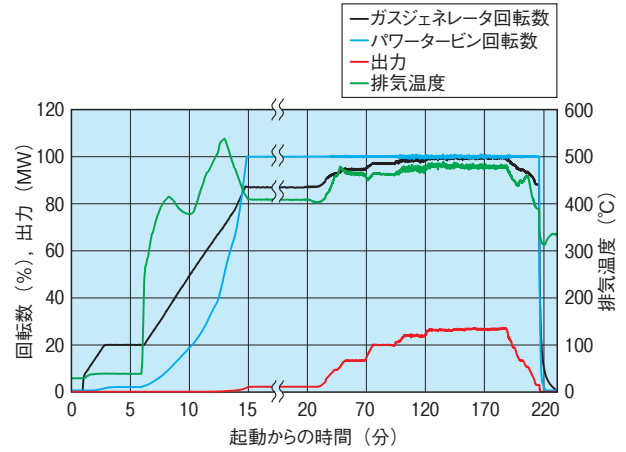


図5 起動から全負荷までのタイムチャート例
Fig. 5 Typical trend graph from startup to full load

(3) 製造面における特殊工程の確立

動翼の鋳造方法やコーティング施工法、電子ビーム溶接など各種特殊工程の加工条件を確立し、初号機の部品製造から適用できる体制を整えた。

4 運転試験結果

当社明石工場内にL30Aの運転試験設備を新設し、同時に天然ガス貯槽サテライト設備も新たに建設した。L30A運転試験設備内の各機器の配置を図4に示す。

エンジン試験は大きく4段階に分けて実施した。

(i) 起動試験・負荷投入試験

起動時から最大負荷条件までのタイムチャートを図5に示す。エンジン起動中の燃料スケジュールなどを調整し問題なく起動完了できた。さらに、負荷投入時におけるエンジンの運転状態を監視し、最大負荷条件まで安定した作動特性を持つことを確認した。

(ii) 性能試験

L30Aの性能は、エンジン運転中の各試験データをもと

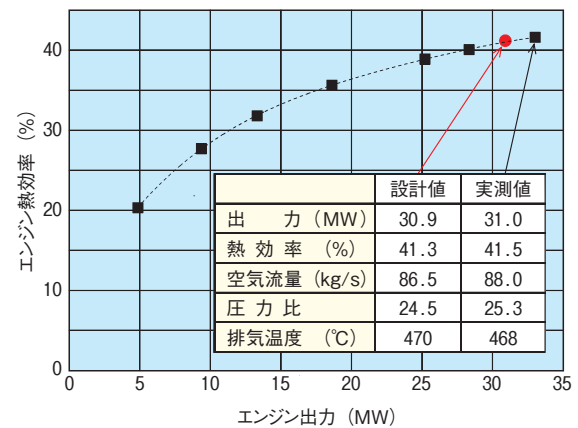


図6 L30A性能試験結果
Fig. 6 L30A performance test results

に当社で開発した性能計算システムを介してISO条件に換算して求められる。L30Aの性能を設計値と併記して図6に示す。エンジン出力に対するエンジン熱効率の目標を達成した。

(iii) 耐久性確認試験

運転中に動翼が共振して破損することがないように、圧縮機とタービンの各動翼について、多チャンネルを有するテレメータシステムを使用し翼振動を計測した(図7)。同時に、レーザによる非接触翼振動計測も実施し、両計測データから全動翼とも許容値以内であることを確認した。

さらに、タービン動翼は運転中に高温雰囲気さらされるため、放射温度計測システム(パイロメータ)による温度計測を実施した⁴⁾。計測データから動翼の耐久性に問題がないこと、事前検証した連成解析との整合性を評価し、両手法の有用性を確認した。

他にもクリアランス計測などを実施し、計測データをもとに組立時の隙間設定やエンジン再始動条件などを決定している。

(iv) DLE燃焼器試験

燃焼器は3種類のバーナ(パイロット、メイン、追い焚き)で構成される。DLE運転時にはパイロットバーナは

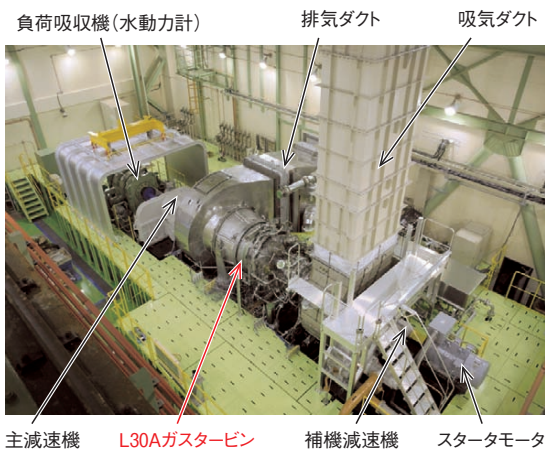


図4 L30A運転試験設備
Fig. 4 L30A test facility



図7 パワータービンのテレメータによる翼振動計測
Fig.7 Telemetry system for power turbine and vibration measurement test results

最小限の保炎の役割をする。そして、負荷が増加するにつれて追い焚きバーナの燃料割合を増加させ、低NO_xレベルを維持する機構をとっている。

この燃焼器をエンジンに搭載した試験結果から、事前実施した要素試験と同様に、排気ガスに含まれるNO_x量は負荷50～100%の範囲で15ppm (O₂=15%換算) 以下という世界最高レベルの目標を実現することができた。

5 L30A を用いた複合発電

適用例として、コージェネレーションシステムにL30Aを導入した際のプラント性能を算出した。表3に示すように、電力28MWと飽和蒸気46t/hを発生でき、総合熱効率は83.1%に到達することが分かる。

今日では、関西の某化学工場にてこの複合発電プラントの初号機商用運転が決定し、2012年10月からサイトでの実証運転を開始している。L30AパッケージPUC300DとCHPプラント全景を図8に示す。

あとがき

L30Aは30MWクラスで世界最高効率を誇るガスタービンとして発電用途の開発が完了した。また、商用運転も開始され、CO₂削減や省エネルギーに貢献している。

今後は、石油・ガス市場を見据えた機械駆動用としても開発を進め、高性能で環境保全に貢献するL30Aのますますの拡販に注力していく。

表3 L30Aコージェネレーション発電設備仕様
Table 3 Specifications of L30A combined heat & power plant

発電量 (MW)	28.4
蒸気量 (t/h)	46.2 飽和蒸気 (圧力: 0.83MPaG, 温度: 177°C)
熱効率 (%): 低位発熱量換算	38.8
総合熱効率 (%): 低位発熱量換算	83.1
吸気温度 (°C)	15
吸気/排気損失 (kPa)	0.98/3.43
燃料	天然ガス (低位発熱量=40.6MJ/Nm ³)



図8 L30AパッケージPUC300DとCHPプラント全景
Fig.8 Panoramic view of L30A package PUC300D and CHP plant

参考文献

- 1) R. Tanaka, et al.: "Verification Test of Newly Developed High Efficient 30MW Class Gas Turbine, The Kawasaki L30A", ACGT2012-7138 (2012)
- 2) 小田ほか: "ガスタービンの環境性能をさらに高めるDLE燃焼技術", 川崎重工技報, No. 173, pp. 34-37 (2013)
- 3) T. Ikeguchi, et al.: "Design and Development of a 14-stage Axial Compressor for Industrial Gas Turbine", ASME GT2012-68524 (2012)
- 4) T. Taniguchi, et al.: "Application of an Optical Pyrometer for Newly Developed Industrial Gas Turbine", ASME GT2012-68679 (2012)



池口 拓也



松岡 右典



田中 良造



奥戸 淳



寺内 晃司



酒井 祐輔



飯屋 大祐



笠 正憲



武 浩司

8 MW級 高効率ガスタービン「M7A-03」の高性能化

Modification of 8MW Class Gas Turbine, M7A-03



瀧 博資① Hiroshi Taki
 志賀早希子② Sakiko Shiga
 浮田 哲男③ Tetsuo Ukita
 合田 真琴④ Makoto Gouda

2007年より販売を開始した8 MW級高効率ガスタービン M7A-03は、現在約30台の受注を得ており、累積等価運転時間は200,000時間を超えて順調に稼働を続けている。さらなる高性能化へのニーズを受けて、M7A-03においても継続的に性能向上を図っている。本稿では、M7A-03の性能向上への取り組みについて紹介する。

About 30 orders have been received for our 8 MW class high-efficiency gas turbine, the M7A-03, which first appeared on the market in 2007. Those units are running smoothly with an accumulated equivalent operating time of more than 200,000 hours. To respond to the need for further performance enhancement, continuous efforts have been directed at improving performance of the M7A-03. This paper presents our approach to performance improvement with the M7A-03.

まえがき

従来からの環境意識の高まりに加え、分散型電源としてガスタービンを用いたコージェネレーションシステムはますます重要なハードウェアとして捉えられている。このコージェネレーションシステムの核となるガスタービンには、環境面からの天然ガス利用によるクリーンな排ガス特性（CO₂排出削減、NO_x排出削減）と経済面からの高効率へのニーズがさらに高まっている。

M7A-03は、このようなニーズに合致した低環境負荷、高効率のガスタービンであり、100台以上の納入実績を持つ当社のM7Aシリーズの最新機種である。当社では、上記ニーズに応えるために、継続的にM7A-03の高性能化に取り組んでいる。

1 M7A-03の概要

当社は、本格的な軸流圧縮機を搭載したガスタービン M7A-01¹⁾（6 MW級）を自社開発し、1994年に市場に投入した。続いて、遷音速圧縮機技術を適用し、吸込空気流量と圧力比増大による出力向上を実現したM7A-02²⁾（7 MW級）を開発、1998年から販売を開始した。さらに、M7Aの基本構造を踏襲してスケールアップを図り、これに最新技術を投入した高効率ガスタービンL20A³⁾（18MW級）を開発、2000年より販売を開始した。

M7A-03⁴⁾は、L20Aに投入された最新技術を逆に既存のM7A-02に適用することで性能を改善し、2007年より販売を開始している。M7A-03の概観図を図1に、また主要諸元を表1に示す。

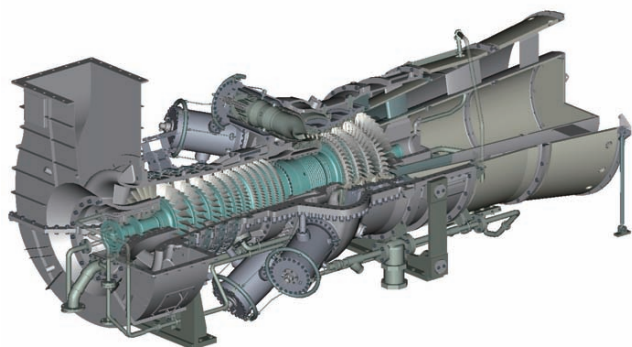


図1 M7A-03概観図
 Fig. 1 Overview of M7A-03 gas turbine

表1 M7A主要諸元
 Table 1 M7A main specifications

型 式	単純開放1軸型
圧 縮 機	軸流11段
燃 焼 器	缶型6缶
タービン	軸流4段
回 転 数 (min ⁻¹)	13,790
軸受仕様	すべり軸受



(a) 国内向け (b) ヨーロッパ向け

図2 M7A-03発電装置
Fig. 2 M7A-03 gas turbine generator package

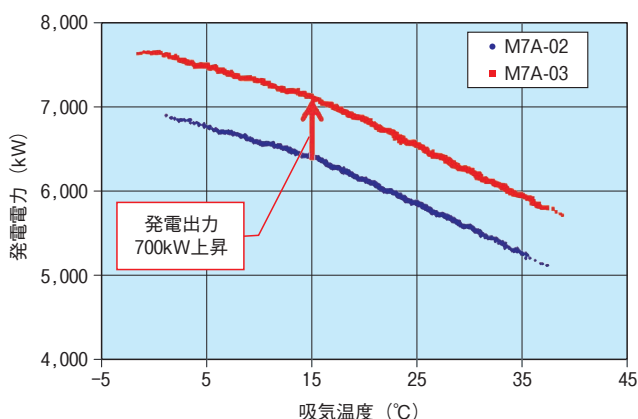


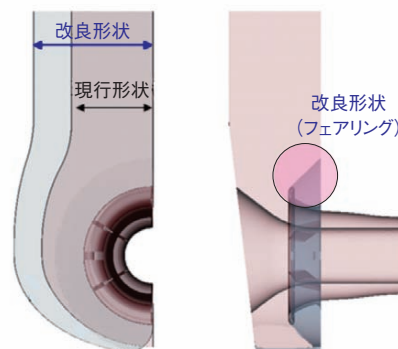
図3 M7A-02からM7A-03換装による発電電力の変化
Fig. 3 Benefits of output power by switching to M7A-03

2 M7A-03の稼働実績

M7A-03を搭載したコージェネレーション設備は、すでに国内外で約30台の受注を得ている。そして、総稼働時間は実運転時間で150,000hr以上、等価運転時間で200,000hr以上である。代表的な発電装置の例を図2に示す。

燃焼方式については環境面での要請から低NO_xのDLE (Dry Low Emission) 燃焼器を搭載した物件が多くを占める。排出NO_xが15ppm (O₂=15%換算)の超低NO_xのDLE燃焼器を搭載した仕様(3物件)も順調に稼働を続けている。一方で、東南アジアなど天然ガスのインフラが不安定な地域では、一時的に液体燃料も使用できるデュアルフェーゼル燃焼器を搭載した仕様もある。

また、M7A-03は、基本構造がM7A-02とほぼ同じであるため、M7A-02を搭載した発電装置へM7A-03を換装することも可能である。実際に換装を行った際の発電電力の変化を図3に示す。ガスタービンをM7A-02からM7A-03へと換装することにより、設備の大幅な改修を行うことなく発電電力を700kW向上させた。



(a) 軸方向矢視 (軸対称片側のみ表記) (b) 側面矢視

図4 インレットコレクターの形状改良
Fig. 4 Modified inlet collector profile

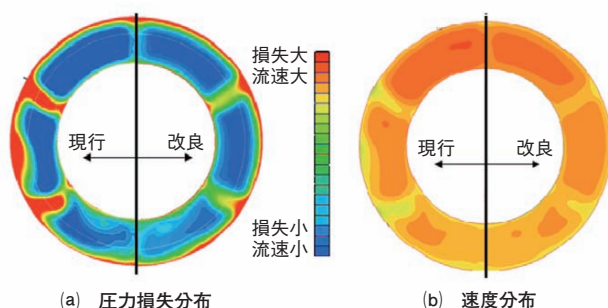


図5 インレットコレクター出口のCFD解析結果(ベルマウス下流断面)
Fig. 5 Results of CFD analysis at collector outlet

3 高性能化への取り組み

一方で、市場のさらなる高効率化への要求に応えるべく、継続的に高性能化に取り組んでおり、ここでその一部を紹介する。

(1) 要素効率向上と無効空気削減

M7A-03の開発⁴⁾では、圧縮機やタービンの要素効率向上と、動力発生に有効に利用されない空気を削減することにより、大幅な性能向上を実現した。引き続きこれらの改良を行うことで高性能化を図っている。

(i) インレットコレクターの圧力損失低減

発電装置外部よりガスタービン入口へ空気を取り込む通路が、インレットコレクターである。この形状が不適切であれば、圧縮機入口の流れに偏りが生じ、圧力損失が増加する。また、この偏流は圧縮機の要素効率や翼振動特性にも影響を及ぼす。

圧縮機入口の流れを均一化することを目標として改良を行った。改良前後の形状を図4に、CFD解析によるインレットコレクター出口(すなわち圧縮機入口)の解析結果を図5に示す。改良の結果、圧力損失を10%程度削減することができた。

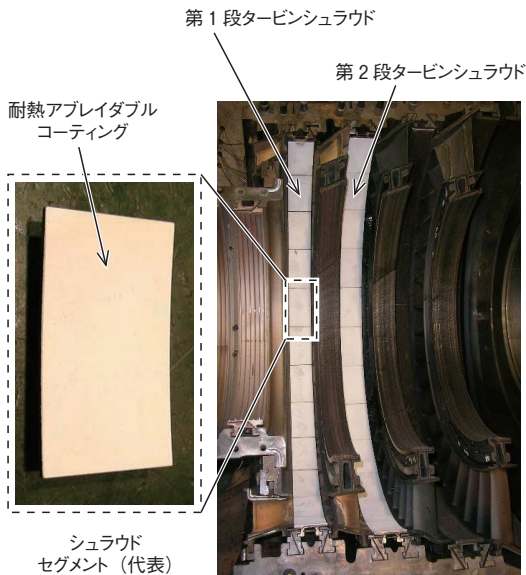


図6 耐熱アブレイダブルコーティング
Fig.6 Heat-resistance and abrasion-resistant coating

(ii) タービン動翼先端 (チップ) クリアランスの削減

タービン動翼と、対向する静止部品であるタービンシュラウドとの間に形成される翼端隙間をチップクリアランスと呼んでいる。このチップクリアランスは、翼表裏への作動流体のバイパス量を左右するため、タービンの要素効率に大きな影響を及ぼす。

チップクリアランスは、起動時などの過渡的な状態で最小隙間となる。その際に回転する動翼と静止しているシュラウドが強い接触により損傷しないように定常運用時のクリアランスが設定される。

定常運用時の隙間をさらに小さくするため、過渡運転時に動翼がシュラウドと接触しても大きなダメージがないように、動翼に対向するシュラウドに金属との接触に対して



図7 コードシールによる隙間の削減
Fig.7 Gap minimization by applying cord seal

削られやすく、耐熱性も備えたアブレイダブルコーティングを採用した。耐熱アブレイダブルコーティングを施したシュラウドを図6に示す。

(iii) 無効空気の削減

ガスタービンの圧縮機出口は非常に圧力が高い。このため、圧縮空気を格納している空間に隙間があれば空気が漏れ、圧縮空気を有効に利用できなくなる。しかし、加工公差や運用時の熱膨張差により隙間を完全になくすことは困難である。

運用時の隙間を可能な限り小さくし、漏れ空気を削減するために、隙間に耐熱性もあり、可塑性の高いコードシールを挿入することで運用時の隙間を小さくした。コードシールの挿入状況を図7に示す。

(2) 熱サイクルの見直し

ガスタービンの熱サイクル特性の点から性能向上を実現する方策としては、圧力比の上昇とタービン入口ガス温度の上昇がある。前者では、圧縮機の再設計が必要となり、構造面での大幅な変更が必要となる。従って、後者のタービンの入口ガス温度を上昇させることで高性能化を図った。

タービン部材の温度の上昇は、翼寿命の点から、信頼性に影響を及ぼす。信頼性を確保するためには、タービン入り口ガス温度を上昇させた場合の、高温部品の冷却技術とその効果を確認するための温度計測技術が重要となる。

(i) 冷却技術

タービン翼の冷却空気は圧縮機出口の圧縮空気を使用するため、この冷却空気の節約で、圧縮仕事の増加を抑えることができ、ガスタービンの性能向上に寄与できる。タービン入口ガス温度を上昇させた場合も、冷却空気量を極力増やさずに、タービン翼温度を従来と同等にするため、翼の冷却性能を向上させることが重要である。

最も高いガス温度にさらされる第1段タービン静翼の、最も熱負荷の高い前縁部分に対して、翼の冷却性能を向上させるために、従来の前縁の冷却構造をリブ構造から突起状の構造に変更して冷却側の伝熱面積を増加し、冷却性能を向上させた。冷却構造の相違を図8に示す。

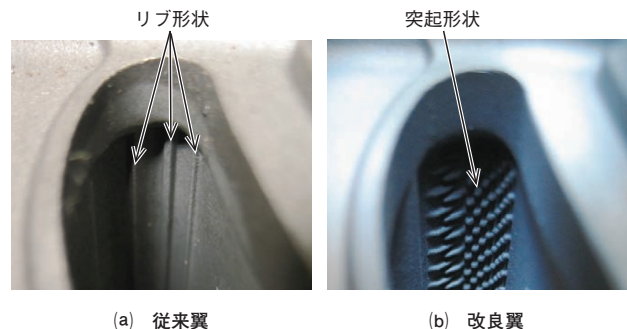


図8 第1段静翼前縁冷却構造
Fig.8 Cooling structure on leading edge

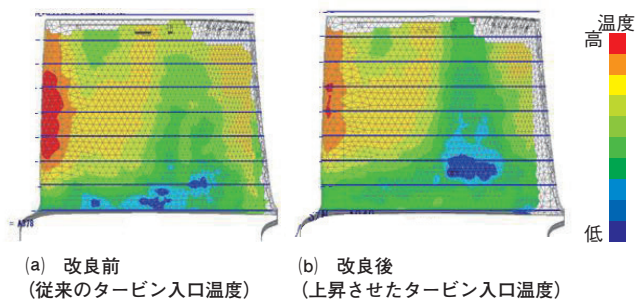


図9 パイロメータによる第1段動翼メタル温度計測結果(翼腹側)
Fig. 9 1st blade surface temperature measured by pyrometer (Brade pressure side)

(ii) 温度計測技術

M7A-03の回転翼のうち、第1,2段タービン動翼に冷却翼を用いている。タービン翼の翼寿命を評価する上で翼の部材温度は非常に重要な要素の一つであるが、冷却翼全域の温度を設計時に正確に予想することは難しく、実機運転での翼の温度計測が非常に重要である。

翼の信頼性を保持するため、冷却翼の基本構造は従来翼と変えず、強度的な信頼性を維持させた。その上で、タービン入口ガス温度が上昇しても、翼への冷却空気増加によって翼の部材温度を上昇させないことを目標とした。設計においては、エンジン性能に与える影響を考慮して、最小の冷却空気増分でタービン翼部材温度の維持が実現できるように検討を行った。

今回の設計による冷却空気量の増分が妥当であることを確認するために、実機による翼の部材温度計測を行った。回転翼の温度計測には、当社で十分な使用実績のある赤外線放射温度計測システム(パイロメータ)⁵⁾により計測した。第1段タービン動翼での計測結果を図9に示す。これにより、入口ガス温度が上昇してもタービン翼の部材温度が従来翼と同等以下に保持されていることが確認できた。

4 改良機の性能

現在各改良項目の信頼性を確認するため、当社明石工場7号発電所にて2012年6月より改良機のフィールド試験を実施中である。今回の改良を適用したガスタービンの性能を表2に示す。

表2 M7A-03改良機の性能
Table 2 Performance of improved M7A-03

	改良機	従来機
発電端出力 (kW)	7,780	7,420
発電端効率 (%)	33.5	33
排気ガス温度 (°C)	523	510
圧力比	15.6	15.6
空気流量 (kg/s)	27	27

吸排気ダクトロスなし、燃料：メタン (CH₄ 100%)

あとがき

2007年より販売を開始したM7A-03は、受注状況も堅調であり、順調に稼働実績を伸ばし続けている。

さらなる高性能化を図ったM7A-03は、2012年6月より当社の明石工場エネルギーセンターで実証試験を行っている。

今後も、より高性能で信頼性の高いガスタービンを顧客へ提供するため、継続的に改良を行っていく所存である。

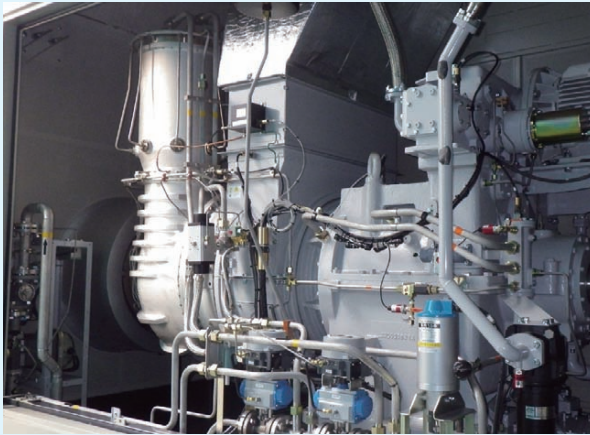
参考文献

- 1) 唐沢, 井上, 中安: “6 MW級中型高効率ガスタービン M7A-01およびコージェネレーションシステムPUC60”, 川崎重工技報, No.119, pp.90-91 (1993)
- 2) “ガスタービン「M7A-02」コンバインドサイクル発電設備”, 川崎重工技報, No.148, pp.48-49 (2001)
- 3) 笠, 永井, 杉本, 奥戸, 長友, 足利, 尾崎: “20MW級ガスタービン「L20A」の開発”, 川崎重工技報, No.148, pp.6-11 (2001)
- 4) 村上, 谷村, 石田, 松岡, 加藤: “M7A-03ガスタービンの開発”, 川崎重工技報, No.161, pp.24-27 (2006)
- 5) T. Taniguchi, K. Sanbonsugi, Y. Ozaki, A. Norimoto: “Temperature Measurement of High Speed Rotating Turbine Blades Using a Pyrometer,” ASME GT2006-90247 (2006)



1.7MW級 高効率・低エミッションガスタービン「M1A-17」

1.7MW Class High Efficiency and Low Emission Gas Turbine, M1A-17



細川 恭史① Yasufumi Hosokawa
 合田 真琴② Makoto Gouda
 山崎 義弘③ Yoshihiro Yamasaki
 楠本 吉昭④ Yoshiaki Kusumoto
 上村 大助⑤ Daisuke Uemura
 金澤 直毅⑥ Naoki Kanazawa
 則本 篤史⑦ Atsushi Norimoto

当社は日本で最初に発電用ガスタービンを自社開発した後、長年にわたりさまざまな製品の開発を通じて、技術の高度化を図ってきた。これらの豊富な経験を基に、最新の解析技術を駆使して、新たに1.7MW級の発電用ガスタービンM1A-17を開発した。発電端効率は同クラスでは世界最高レベルの26.5%であり、NOx排出値においても35ppm (O₂=0%

換算) 以下 (O₂=15%換算で10ppm以下) と世界最高性能を達成した。2010年4月より当社工場内発電設備にて実証試験機の運用を開始し、2012年以降、日本を含め世界各地で量産機が稼働を始めた。

We have been developing and manufacturing power generation-use gas turbines for a long time ever since pioneering the manufacture and sale of the first such unit in Japan. Based on this rich experience, we developed a new 1.7MW class power generation-use gas turbine, the M1A-17, with latest analysis technology. Its generating-end efficiency is of the world's highest class at 26.5%, while NOx emissions are 35 ppm converted on an O₂=0% basis (10 ppm converted on an O₂=15% basis), also the world's highest performance achieved. The field test machine started operation in a power generation facility at our plant in April 2010, and marketed units started operation all over the world, including Japan, in 2012.

まえがき

近年、災害時の電源喪失や、電力供給の停止に対する電源セキュリティ確保の観点から、分散型電源の重要性がさらに高まっている。また、地球環境保護の観点から、排気ガスに対する規制が世界的に厳しくなっており、発電用ガスタービンにおいてもNOx排出値の低減が求められている。

当社は1972年に日本で初めて産業用ガスタービンの自社開発に成功して以降、さまざまな機種を世に送り出してきた。

当社の産業用ガスタービンのラインアップを図1に示す。1980年代後半に開発したM1A-13は、常用機種として国内外で累計約400台の納入実績を誇っている。

M1A-17¹⁾は、豊富な運用実績を持つM1A-13をベースに、当社で培ってきた開発経験や基盤技術を集約し、その信頼性を維持したまま、効率、排気ガス性能を大幅に改善したものである。発電端効率は26.5%、ボイラを含めた場合の総合熱効率は84%となり、このクラスで最高レベルの数値を達成した。

1 M1A-17の概要

M1A-17は、2段遠心圧縮機、3段軸流タービン、単筒缶型燃焼器が主要構成要素である。燃焼器は拡散燃焼器、またはDLE(Dry Low Emission)燃焼器が搭載可能であり、特にDLE燃焼器搭載型をM1A-17Dと呼称する。M1A-17Dのカットモデルを図2に、また主要諸元およびコージェネレーション性能を表1に示す。以下にM1A-17の特長について述べる。

(1) 高効率

M1A-17では、後述する各要素効率の改善などにより、同クラスで世界トップレベルの発電端効率26.5%を達成している。また排気ガス温度も従来機と同程度としているた

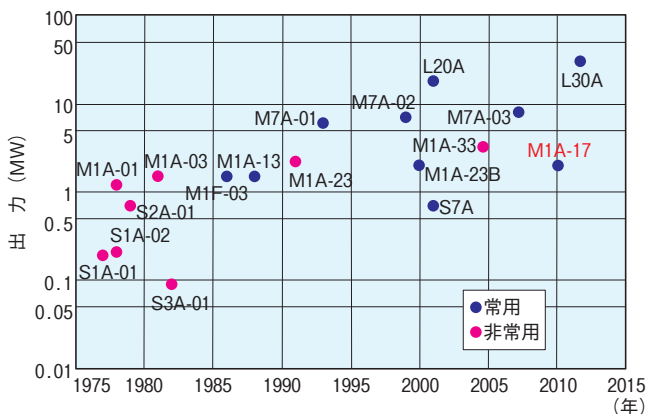


図1 当社産業用ガスタービンラインアップ
 Fig. 1 Lineup of industrial gas turbines

め、発電に加え、排気ガスを利用して蒸気を発生させるコージェネレーションシステムとして84%という高い総合効率を可能としている。

(2) 低エミッション

DLE燃焼器には当社にて実績のあるM7Aで用いられているシステムを採用し、高い信頼性を継承している。また、DLE燃焼器搭載型ガスタービンとしては、世界トップレベルであるNOx値35ppm以下 (O₂=0%換算) を実現した。

(3) 高信頼性

M1A-17は、高い信頼性を誇るM1A-13とロータやケーシングなどの基本構造を同じとし、機械的な信頼性を継承し

ている。また、回転数や軸受などもM1A-13と同じとし、周辺機器も他機種で実績のあるものを採用しており、システム全体として信頼性を継承している。

2 各要素の改良設計

(1) 圧縮機

圧縮機は2段遠心式を採用している。従来は回転体であるインペラの設計にのみCFD解析を用いていたが、今回は静止側部品にもCFD解析を適用し、回転体・静止体の一体解析を実施して、静止体流路内の逆流を防止するなど通路形状の最適化を図った。圧縮機1、2段の内部流れ解析例を図3に示す。このような解析技術を用いることで、遠心式圧縮機では最高レベルの効率を達成することが可能となった。

(2) タービン

タービンは3段軸流式で、1段目に冷却翼を採用している。タービン設計において、構造面ではブレード先端を凹型にするチップ*シニング構造(図4)を採用することにより漏れ損失の低減を計り、またタービン部のケーシング材料には低膨張材を採用することで、定格運転時にチップクリアランス**が最小となるよう設計した。これにより、翼先端部からの漏れが少なくなり、より多くの流体エネルギーをタービンにて回収可能となった。空力面では、最新

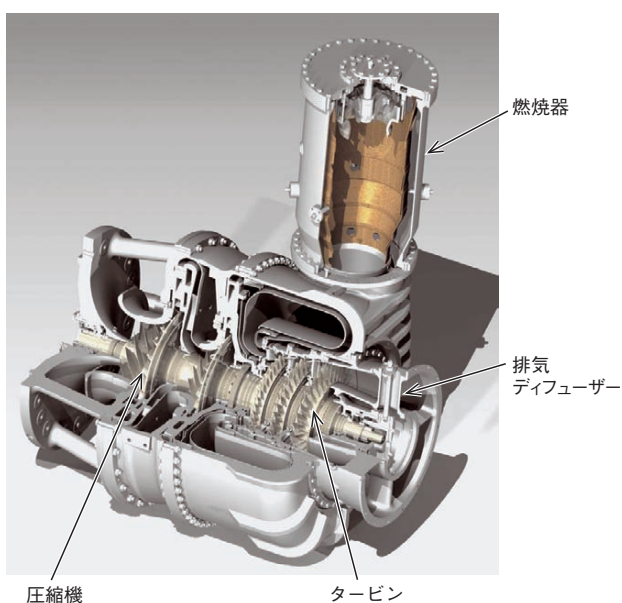


図2 M1A-17Dカットモデル
Fig. 2 Cut model of M1A-17D gas turbine

表1 M1A-13D/M1A-17Dの主要諸元および性能
Table 1 Main specifications and performances of M1A-13D and M1A-17D

機種	M1A-13D	M1A-17D
型式	開放単純サイクル1軸式	
圧縮機	2段遠心式	
タービン	3段軸流式	
燃焼器	単筒缶型(DLE)	
発電端出力 (kW)	1,470	1,660
燃料消費量 (m ³ N/h)	541	555
送気蒸気量 (kg/h)	5,040	5,150
発電端効率 (%)	24.1	26.5
熱回収効率 (%)	57.9	57.7
総合効率 (%)	82	84.2
NOx値 O ₂ =0%換算 (ppm) (運転領域)	NOx<75 (75~100%)	NOx<35 (70~100%)

〈性能算出条件〉
 吸気温度：15℃
 大気圧力：101.3kPa(高度0m)
 吸/排気圧損：0.98/2.45kPa
 燃料：都市ガス13A

発電機効率：96%
 NOx対策：希薄予混合燃焼
 排熱ボイラ：蒸気圧力0.83MPaG
 給水温度60℃

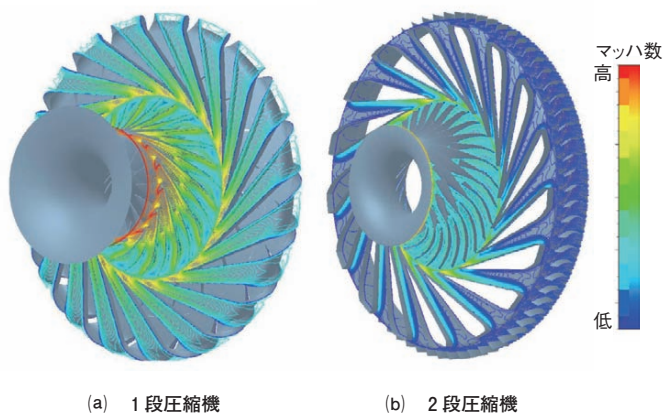


図3 圧縮機内部流れCFD解析結果(マッハ数分布)
Fig. 3 CFD results of compressor internal flows



図4 チップシニング構造
Fig. 4 Tip thinning structure

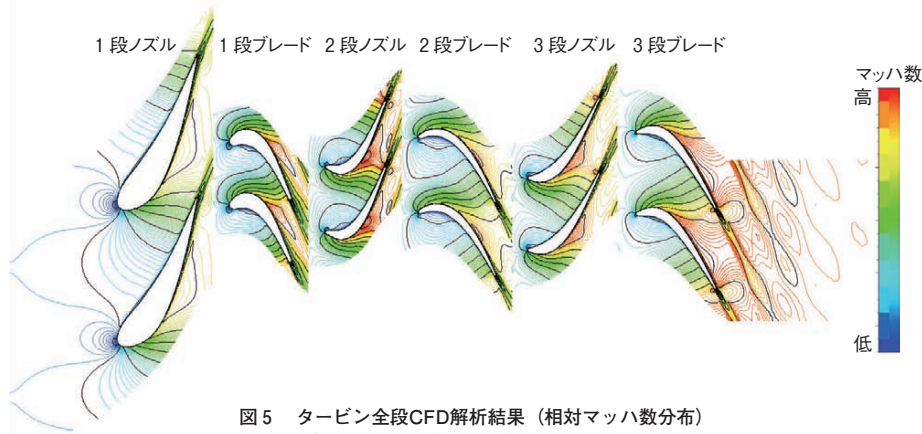


図5 タービン全段CFD解析結果（相対マッハ数分布）
Fig.5 CFD results of all turbine stages

のCFDツールを用い単段解析実施後、全段による解析を行い、通路形状・段仕事配分の最適化を行った。全段CFD解析結果を図5に示す。

* チップ：タービン動翼先端

** チップクリアランス：タービン動翼と動翼を覆っているタービンシュラウドとの間に形成される翼端隙間

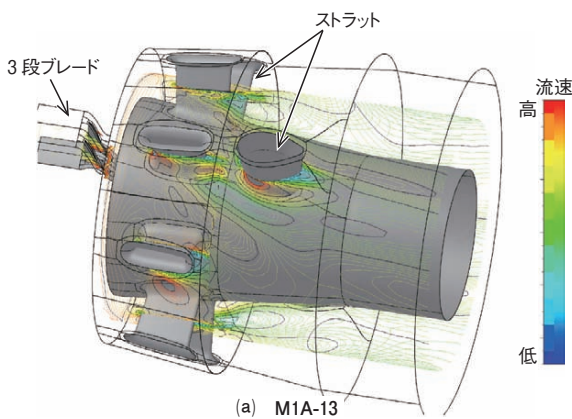
(3) 排気ディフューザ

排気ディフューザは、流路を拡大させることで流速を落とし、静圧回復をはかりながら排気ガスを排出する部品である。流路内には、内径側に配置される軸受部品などを保持するため、ストラットが設置されている。ストラットは

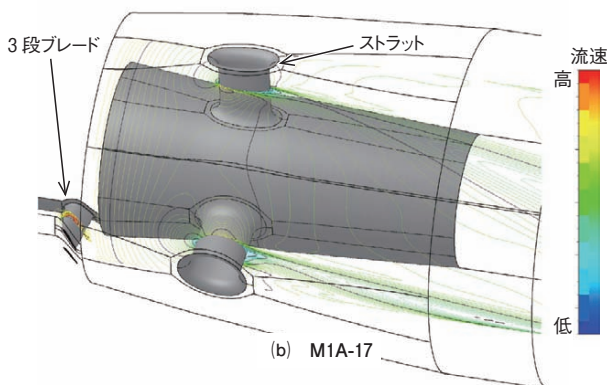
排気ガス通路内にあるため、その形状、本数、配置が排気ディフューザ性能に大きく影響する。M1A-17では、CFDによる流れ解析によりストラットの配置および形状検討を実施し、逆流域を最小限にするなど圧力損失を低減した。M1A-13, M1A-17の排気ディフューザCFD解析例を図6に示す。M1A-17ではストラット本数低減などにより、M1A-13に比べて流れの剥離、逆流域などが低減されていることがわかる。

(4) DLE 燃焼器

燃焼器には、当社で実績のある、希薄予混合燃焼と追い焚き燃焼方式を採用している。パイロットバーナ、メインバーナ、追い焚きバーナの3種類のバーナで構成され(図7)、パイロットバーナは主に着火・保炎用、メインバーナおよび追い焚きバーナは、主に低NOx運転時に使用される。エミッション低減には、燃焼領域における燃料濃度分布を可能な限り均一にすることが効果的である²⁾。そのため、CFD解析を適用し、バーナ部において空気と燃料を効率的に混合させるようバーナ部や流路の形状を最適化した。また、燃焼器単体試験およびエンジン試験により、NOx値は35ppm (O₂=0%換算) 以下を実現、M1A-13に比べNOx排出特性は約50%改善した。NOx排出特性を図8に示す。



(a) M1A-13



(b) M1A-17

図6 排気ディフューザCFD解析結果（軸流速度分布）
Fig.6 CFD results of exhaust diffuser

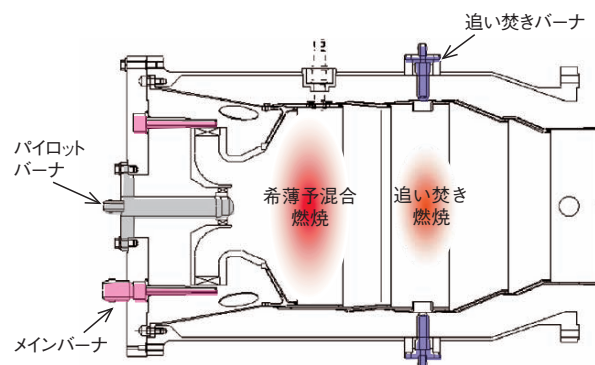


図7 DLE燃焼器
Fig.7 Dry Low Emission combustor

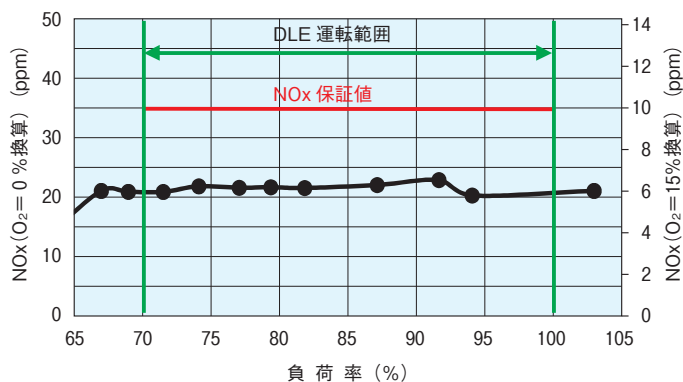


図8 NOx排出特性
Fig. 8 NOx emission characteristics



図9 明石工場内発電設備
Fig. 9 Electric power plant at Akashi Works

表2 M1A-17Dの納入実績
Table 2 M1A-17D track record of deliveries

納入先	国名	使用燃料	排熱利用
エネルギー供給会社A	スイス	天然ガス	ボイラ
エネルギー供給会社B	アメリカ	天然ガス	ボイラ
化学品製造会社	ドイツ	天然ガス	ボイラ
食品製造会社A 1号機	ドイツ	天然ガス	ボイラ
食品製造会社A 2号機	ドイツ	天然ガス	ボイラ
金属製造会社	ドイツ	天然ガス	ボイラ
製紙会社	日本	都市ガス	ボイラ
建築材製造会社A 1号機	日本	都市ガス	乾燥炉
建築材製造会社A 2号機	日本	都市ガス	乾燥炉
建築材製造会社B	日本	都市ガス	乾燥炉



図10 M1A-17Dパッケージ (スイス)
Fig. 10 M1A-17D package (Switzerland)

3 フィールド試験

M1A-17Dの信頼性確認のため、2010年4月より当社工場内発電所(図9)にてフィールド試験を開始した。DLE燃焼器にて運用を行っており、2012年8月に実運転時間8,000時間を超え、現在も順調に運用中である。

4 量産機について

M1A-17は2010年4月より販売を開始した。2012年4月より量産初号機の運用が開始され、2012年6月現在で10台出荷されている。納入実績を表2に、量産初号機であるスイス向けのパッケージを図10に示す。

あとがき

M1A-17は、従来機の信頼性を継承しつつ、最新の高性能化技術を導入し、各要素効率の性能改善により熱効率を大幅に向上した。また、世界トップレベルの低エミッション化を実現した。今後も、フィールド試験において信頼性を実証し続けるとともに、さらなる改良を継続し、エネルギーの有効利用と環境負荷低減に貢献していく所存である。

参考文献

- 1) 細川, 合田, 山崎, 則本: “1.7MW級高効率ガスタービンM1A-17の開発”, 第38回ガスタービン定期講演会 (2010)
- 2) 松本, 青木, 堂浦, 小田, 緒方, 木下: “M7A-03ガスタービンDLE燃焼器の開発”, 第37回ガスタービン定期講演会 (2009)



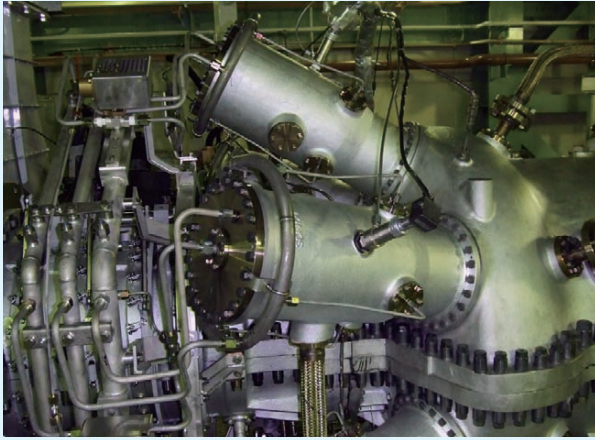
細川 恭史 合田 真琴 山崎 義弘 楠本 吉昭



上村 大助 金澤 直毅 則本 篤史

ガスタービンの環境性能をさらに高めるDLE燃焼技術

DLE Combustion Technology for Enhancing the Environmental Performance



小田 剛生① Takeo Oda
 緒方 正裕② Masahiro Ogata
 松本 匡史③ Kiyoshi Matsumoto
 青木 茂樹④ Shigeki Aoki
 堀川 敦史⑤ Atsushi Horikawa
 平野 昂志⑥ Kohshi Hirano

当社では、0.7～30MWクラスの常用ガスタービンを各種取りそろえており、全機種に対して世界最高レベルのエミッション性能を保証すべく、燃焼器の開発・量産化を行っている。本稿では、当社のDLE (Dry Low Emissions) 燃焼技術の開発および実証について述べる。

With a product lineup of 0.7 to 30-MW class gas turbines, we are engaged in the development of combustors and working to bring them into mass-production with the aim of assuring the world's top class emission performance in all models. This paper describes the development and demonstration of our DLE (Dry Low Emissions) combustion technologies.

まえがき

環境保全意識の向上から、ガスタービン発電システムに対する環境規制は年々厳しくなっており、今後もこの傾向は続くと考えられる。ガスタービンメーカー各社はこれに対応するために、低エミッション燃焼器の開発を推進している。当社では、0.7～30MWクラスの常用ガスタービンを各種取りそろえており、全機種に対して低エミッション燃焼器の開発・量産化を行っている。

本稿では当社での低エミッション燃焼器の開発と、世界最高レベルのエミッション性能保証値を実現している実例を紹介する。

1 ガスタービンのエミッションと低減メカニズム

ガスタービン燃焼器から排出されるエミッションは、主に二酸化炭素(CO₂)、窒素酸化物(NO_x)と一酸化炭素(CO)である。CO削減はガスタービン本体の性能向上により達成されるものであり、ここでは燃焼改善で削減可能なNO_xとCOについて記述する。NO_xの排出要因は、生成メカニズムにより、高温域で生成される「サーマルNO_x」、燃料過濃火炎面で生成される「プロンプトNO_x」、燃料分子中に含まれる窒素分が酸化して生成される「フューエルNO_x」の3つに分類される。ガスタービン発電装置の場合、NO_x排出量を支配するのは「サーマルNO_x」であり、これをいかに低減するかがキーとなる。(以下、本稿ではNO_xとはサーマルNO_xのことを指す。)一方、COは、炭化水素燃料が燃焼しCO₂となる手前の中間生成物であり、火炎温

度を高めることや高温場での滞留時間を延ばすことで低減できる。

NO_xは火炎温度が高くなると、急激に生成量が増加する。一方で、COは火炎温度が低くなると急増する。このため、図1のように部分的にでも高温領域があれば、その領域で大量にNO_xが生成され、低温領域があればその領域で大量にCOが生成される。

NO_x低減のためには、平均火炎温度を下げ、火炎温度を平滑化するために、燃料濃度分布の均一化を行いつつ、一方で、CO排出とのバランスを取ることが重要である。

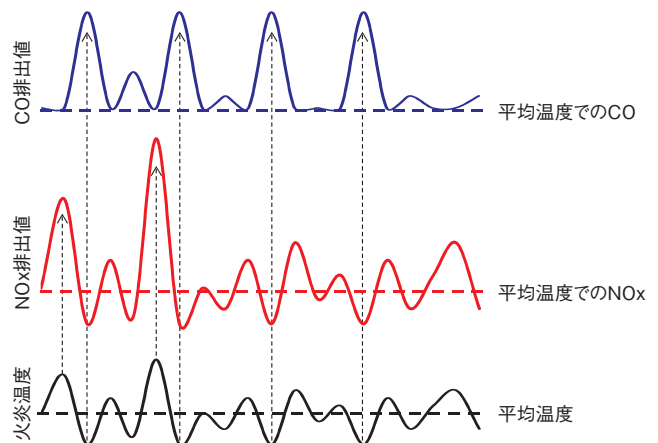


図1 NO_xおよびCO生成量と火炎温度分布の関係
 Fig.1 Relationship between NO_x and CO formations and flame temperature distribution

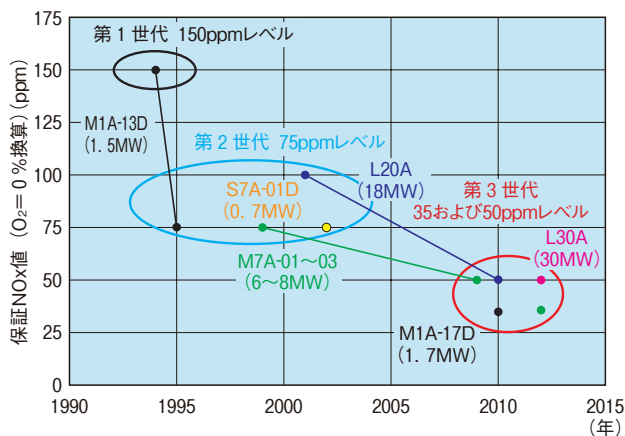


図2 当社でのDLE燃焼技術の系譜
Fig. 2 History of Kawasaki DLE combustion technologies

2 当社での低エミッション燃焼器開発

(1) 当社DLE燃焼技術の系譜

ガスタービン燃焼器では、当初は拡散燃焼器に水または蒸気を噴射することでNOxを低減する手法を採用していたが、1990年代に水または蒸気を噴射することなくNOxを低減できるDLE (Dry Low Emissions) 燃焼技術が開発された。当社でも1990年代中頃よりDLE燃焼技術を開発、量産化している¹⁾。その後、常用ガスタービン全機種への展開、NOx保証レベルの低減に向けた取り組みを継続的に実施している。当社でのDLE燃焼技術の系譜を図2に示す。第1世代のDLE燃焼技術はNOx保証が150ppm (O₂=0%換算) レベルであり、第2世代で75ppmレベルまで低減した。現在は第3世代であり、世界でトップレベルである50ppmまたは35ppmを保証している。

(2) 当社のDLE燃焼器の特徴

ガスタービン各社が採用している希薄予混合燃焼方式のDLE燃焼器は、空気と燃料をあらかじめ混合させてから

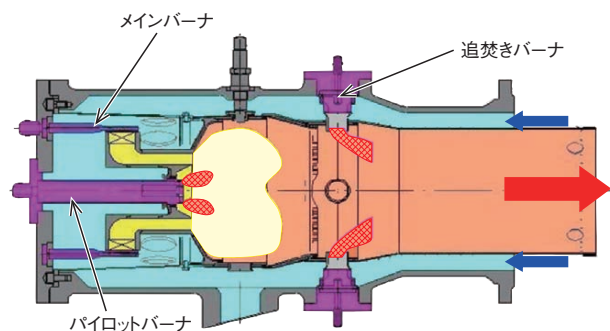


図3 M7A-03用第3世代DLE燃焼器概略図
Fig. 3 Schematic diagram of third-generation DLE combustor for M7A-03

燃焼させることにより、火炎温度を一様かつ、低く制御してNOx排出を抑制できる。一方で、本方式は安定して燃焼できる範囲が狭く、CO排出との両立を考慮すると運転範囲が狭い。当社のDLE燃焼器では、予混合希薄燃焼を行うメインバーナの燃焼状態を低NOxかつ安定した条件に維持し、エンジン出力に応じた燃料の増減を追焚きバーナの燃焼量で吸収することで、低NOxと燃焼安定性が両立する運転範囲を広げることができる。

当社DLE燃焼器 (M7A-03 第3世代DLE燃焼器) の概略図を図3に示す。当社のDLE燃焼器は上記に加えて、始動/低負荷時に用いるパイロットバーナを含めた3系統のバーナで構成されている。バーナ制御 (燃料配分制御) とNOx排出のイメージを図4に示す。

(3) DLE 燃焼器の開発

DLE燃焼器開発時では数値流体力学 (CFD) 解析、流れ計測、リグ燃焼試験などにより形状の調整を行い、エンジン試験にて確認を行う。問題があれば、同様のことを繰り返し最終的な量産形状が得られるまで最適化を行う。

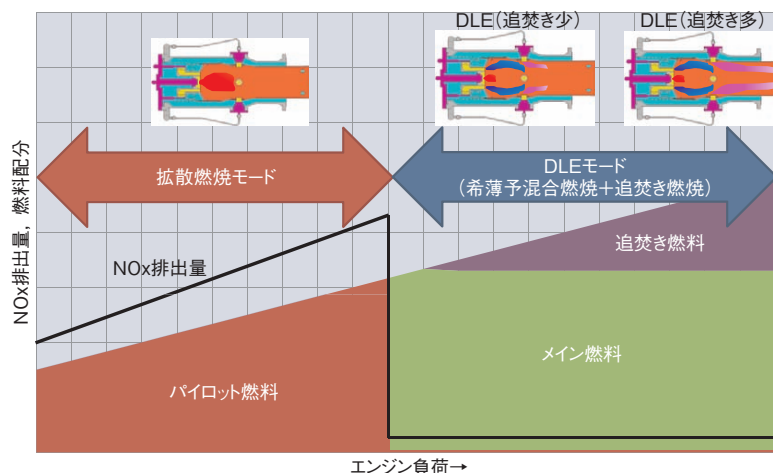


図4 当社DLE燃焼技術でのバーナ制御とNOx排出イメージ
Fig. 4 Conceptual diagram of burner control and NOx emission using Kawasaki DLE combustion technology

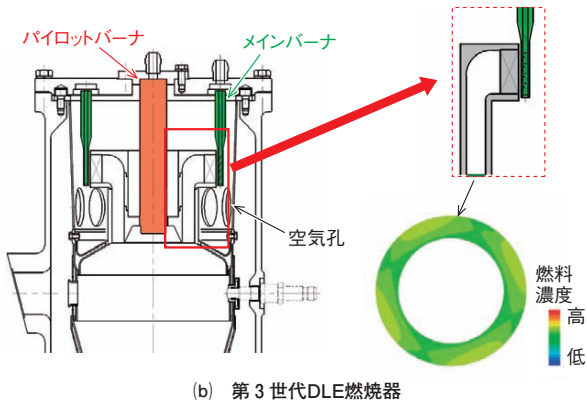
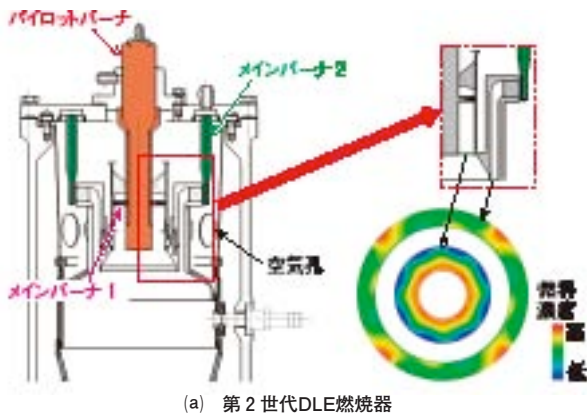
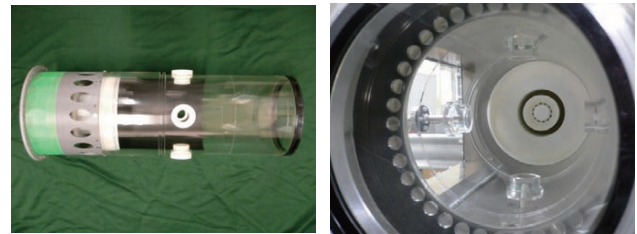


図5 メインバーナ出口燃料濃度分布
Fig. 5 Fuel concentration distribution at outlet of main burner



(a) 全体図 (b) 燃焼器出口

図6 PIV計測用アクリル製燃焼器
Fig. 6 Acryl combustor for PIV measurement

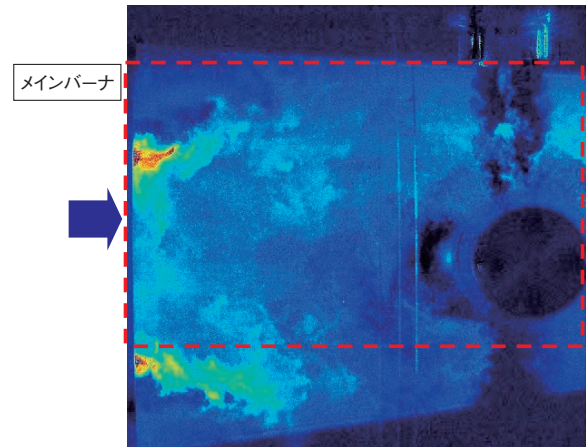


図7 オイルミストを用いた燃焼器内流れの可視化画像
Fig. 7 Image of internal flow of combustor visualized with oil mist

(i) CFD解析

NO_xを低減するためには燃料濃度分布の均一化が必要である。濃度分布を改善するために実施したCFDによる混合解析例を図5に示す²⁾。図5(a)は第2世代DLE燃焼器、図5(b)は第3世代DLE燃焼器について示している。各図の左側はメインバーナおよびパイロットバーナ全体の断面図であり、右側はメインバーナ出口の濃度分布のCFD解析結果と、濃度分布の評価位置である。メインバーナ流入空気に対する燃料噴射位置を最適化することで、第3世代DLE燃焼器では、より均一な濃度分布が得られていることが分かる。

(ii) 流れ計測

燃焼器内部流れ計測方法の一例としてPIV (Particle Image Velocimetry) 計測を紹介する。PIVとは流体に微小な粒子を添加し、その粒子の速度をレーザ光で計測することにより、流体の速度場を調査する手法である。PIV計測に用いたアクリル製燃焼器を図6に示す。本ケースでは、燃焼器出口側からレーザ光を照射し、側面から計測を行っている。燃焼器内に微小粒子としてオイルミストを流して、そのミー散乱光により流れを可視化した画像を図7に、図7の赤点線枠内をPIV計測して得られた速度ベクトル図を図8に示す。

(iii) リグ燃焼試験

当社は、ガスタービン燃焼器の燃焼試験設備を5つ保有し、それぞれの試験目的に応じて使い分けている。代表的

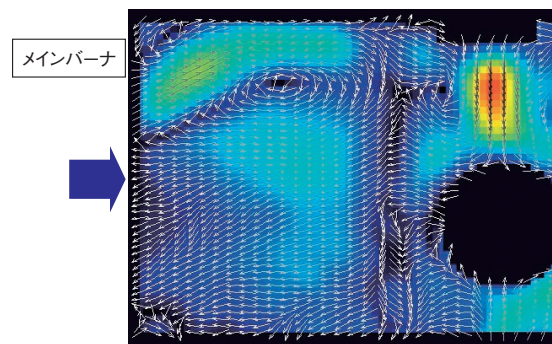


図8 PIV計測結果 (速度ベクトル)
Fig. 8 Result of PIV measurement (Velocity vector)

な燃焼試験設備の系統図を図9に示す。空気はエンジンでの燃焼器入口状態を模擬するために、所定の条件まで圧縮・昇温し、燃焼器に供給される。燃料は、別系統で流量制御して燃焼器内に供給する。燃焼器内で発生した高温の燃焼ガスは、冷却してから大気に放出している。

リグ燃焼試験では、着火性能やエミッションなどの燃焼性能や、燃焼器の耐久性に関わるライナ壁温などを計測し、これを基にエンジン試験前に改良設計を行う。また、試験中は燃焼器下流に設けられた観察窓から火炎の様子を常時観察している。燃焼器下流から撮影した火炎画像を図10に示す。火炎観察は、燃焼状態を理解する上で非常に重要な

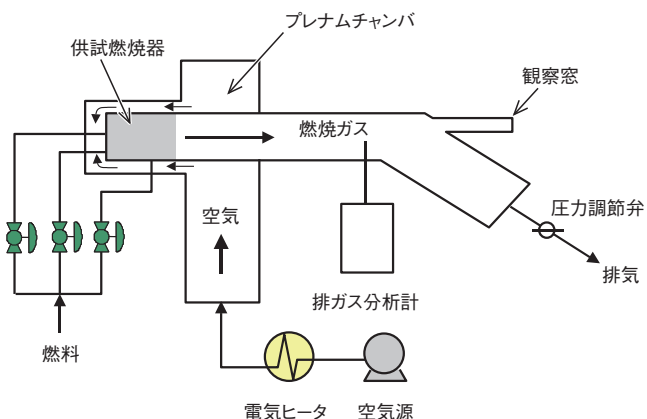


図9 燃焼試験設備系統図
Fig.9 System diagram of combustion test facility



図12 M7A-03搭載発電装置 (PUC80D)
Fig.12 Power generation plant (PUC80D) with M7A-03

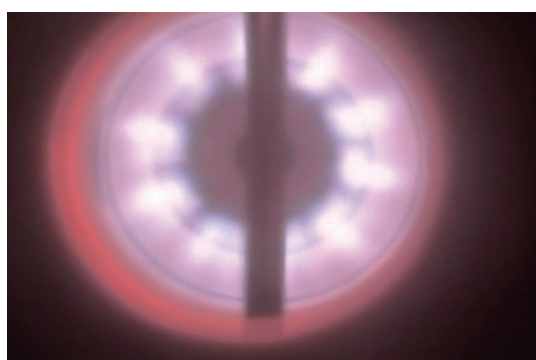


図10 燃焼器下流から観察した火炎画像
Fig.10 Image of flame as observed from downstream of combustor

手段である。また、リグ燃焼試験では燃料条件や空気条件をそれぞれ独立して変化させることができるため、広範囲な条件でのデータを取得することができる。例えば、エンジン試験では、吸気温度が -20°C や、 $+50^{\circ}\text{C}$ という条件で試験をすることは困難だが、リグ燃焼試験では、このような条件時の燃焼器入口条件を模擬することも可能である。

(iv) エンジン試験

M7A-03第3世代DLE燃焼器を搭載したエンジン試験の結果を図11に示す。負荷率50~100%まで NO_x とCOの低減が両立していることが分かる。

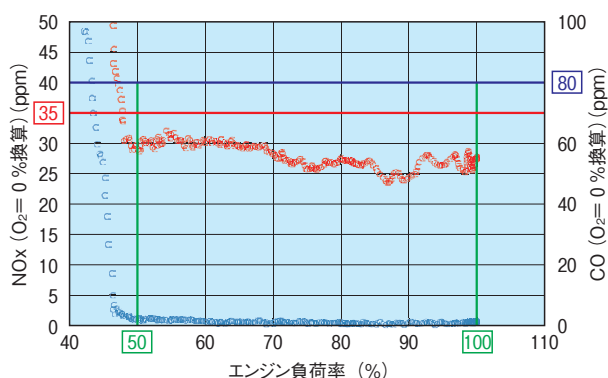


図11 エンジンでの NO_x およびCO排出
Fig.11 NO_x and CO emissions from engine

3 最新第3世代DLE燃焼システムの実証

開発の最終段階として、当社工場内に実証設備を設置し、運用を行っている。第3世代DLE燃焼システムが搭載された実例として、当社明石工場内で運用されているM7A-03の発電装置 (PUC80D) を図12に示す。ここでは $\text{NO}_x=35\text{ppm}$ ($\text{O}_2=0\%$ 換算) 以下で運用されている。

あとがき

環境規制の強化や環境保護意識の高まりから、低エミッション化への要求には終わりが無い。今後も世界最高レベルの環境性能を実現できる燃焼技術を開発し、市場に提供していく所存である。

参考文献

- 1) Kajita, S., et al. :“An Advanced Development of a Second-Generation Dry Low- NO_x Combustor for 1.5MW Gas Turbine”, ASME 96-GT-49. (1996)
- 2) 松本ほか：“M7A-03ガスタービンDLE燃焼器の開発”，日本ガスタービン学会，第37回ガスタービン定期講演会 (2009)



小田 剛生



緒方 正裕



松本 匡史



青木 茂樹



堀川 敦史



平野 昂志

低濃度メタン燃焼ガスタービン発電装置

Lean Methane- Fueled Gas Turbine Generator Set



山崎 義弘① Yoshihiro Yamasaki
 上村 大助② Daisuke Uemura
 堂浦 康司③ Yasushi Douura
 細川 恭史④ Yasufumi Hosokawa
 田中 克典⑤ Katsunori Tanaka
 佐藤 毅⑥ Tsuyoshi Satou
 黒坂 聡⑦ So Kurosaka
 松尾 和也⑧ Kazuya Matsuo
 堀川 敦史⑨ Atsushi Horikawa

当社は、石炭採掘時に湧出する希薄な炭坑通気メタンなどの低濃度メタンガスを燃料として活用する「低濃度メタン燃焼ガスタービン発電装置」を世界で初めて開発した。世界の炭鉱やごみ埋め立て地などから大気中に放出されている未利用の低濃度メタンガスの大量処理による温室効果ガスの削減と発電による有効活用を目指し、本装置の商品化を進めている。

We developed, for the first time in the world, a lean methane- fueled gas turbine generator set in which ventilation air methane (VAM) obtained during the excavation of coal is used as fuel. Aiming at the reduction of greenhouse gases through large volume treatment of unused lean methane gas, which is emitted into the atmosphere from coal mines and landfill etc. around the world, and simultaneously aiming at its effective use for power generation, we are accelerating the commercialization of this system.

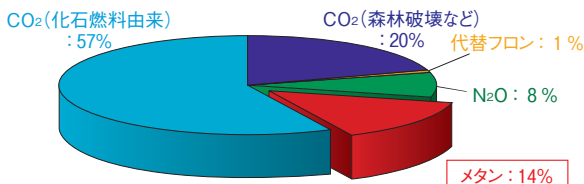
まえがき

メタンガスは京都議定書で定義されている温室効果ガスの一つで、その温室効果は二酸化炭素（CO₂）の約21倍であり、CO₂に次いで環境影響負荷が高い。さらに、このメタンガスの総排出量の約6%が炭鉱から大気放出されている（図1）。

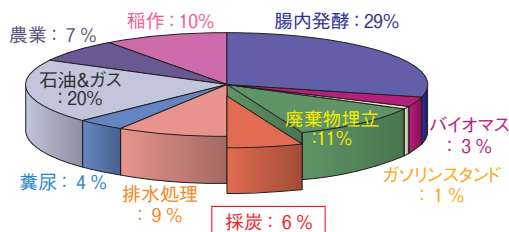
石炭層中には、石炭の生成過程で生じたメタンガスが含まれており、石炭採掘時に湧出する。湧出したメタンガスのうち、メタン含有量が30%以上の炭鉱メタン（CMM:

Coal Mine Methane）は発電などに利用されているが、メタン含有量が1～30%のCMMと1%未満の希薄な炭坑通気メタン（VAM: Ventilation Air Methane）は、現状では利用方法がないため大気中に放出されている。このVAMは、採炭過程において排出されるメタンガスの60～80%を占めるため、大気中への放出は、エネルギーを無駄にするだけでなく地球温暖化の一因にもなる（図2）。

そこで、当社では、VAMなどの低濃度メタンガスを燃料として発電できるガスタービンを開発している。



(a) 全世界の温室効果ガス排出量 (CO₂換算) 2007年



(b) 全世界のメタンの排出源 2010年

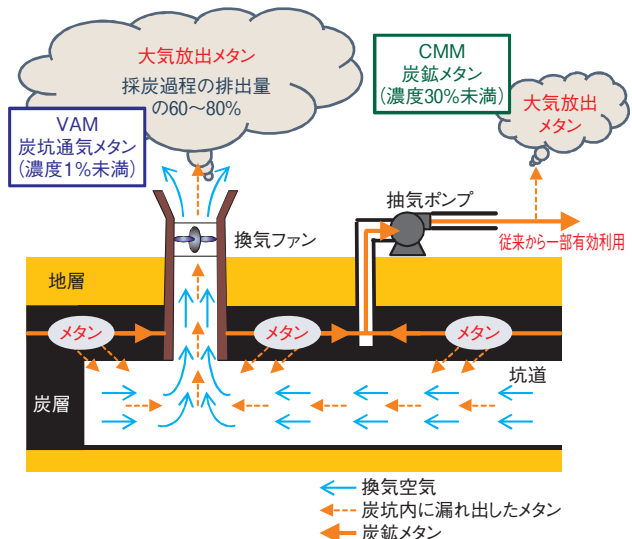


図2 炭鉱からの大気放出されるメタン

Fig.2 Methane emitted into the atmosphere from coal mines

図1 全世界の温室効果ガス排出量および排出源

Fig.1 Greenhouse gas emissions and sources around the world

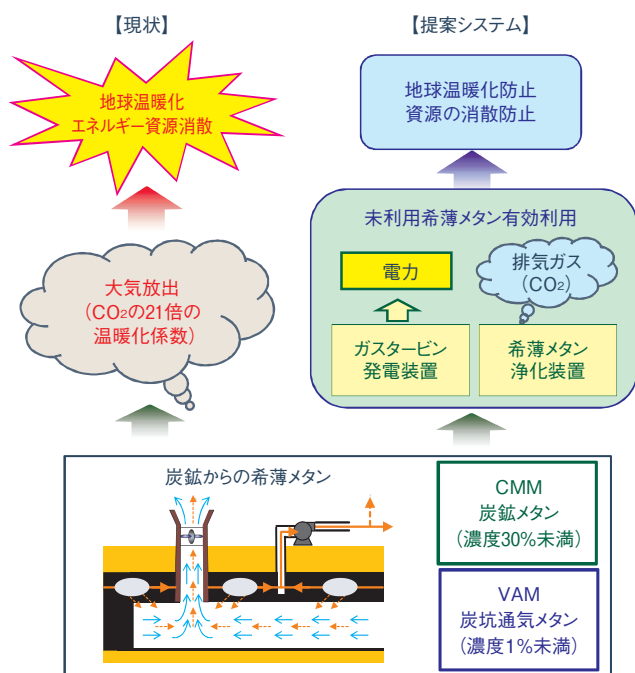


図3 未利用希薄メタン処理システムのコンセプト
Fig. 3 Concept behind treatment system for unused lean methane

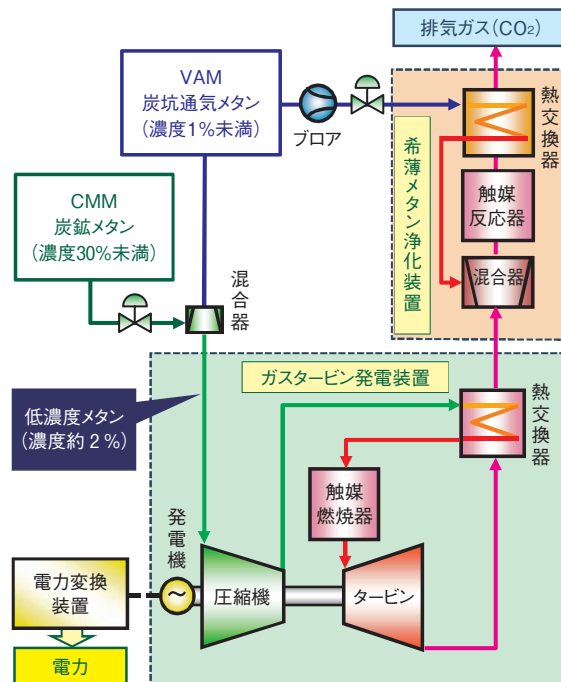


図4 システムの機器構成
Fig. 4 Configuration of system

1 未利用希薄メタン処理システム

(1) コンセプトおよび構成

当社が提案する未利用希薄メタン処理システム¹⁾のコンセプトを図3に示す。

本システムは、触媒燃焼式「ガスタービン発電装置」と、ガスタービンの排熱を利用して作動する触媒燃焼式「希薄メタン浄化装置」から構成され、通常では処理できないVAMのような超低濃度のメタンガスを処理すると同時に発電することができる。システムの機器構成を図4に、計画性能を表1に示す。

(2) 原理

触媒燃焼式「ガスタービン発電装置」では、未利用のまま大気放出されている大量のVAMとCMMの混合気（メタン濃度：2%）をエンジン吸気として吸い込んで圧縮し、熱交換器で触媒反応開始温度まで加温した後、触媒燃焼器で燃焼させる。これによって得られた高温・高圧のガスでタービンを回転させ、発電機を駆動する。

発電装置の排気ガス温度は、まだ高いエネルギーを有しており、このエネルギーを利用してVAMを酸化処理するのが触媒燃焼式「希薄メタン浄化装置」である。これにより、温室効果ガス排出量のさらなる削減を図る。希薄メタン浄化装置は排気混合器、触媒反応器および熱交換器から構成している。ブローによって供給されるVAMは、熱交換器で排気ガスとの熱交換によって予熱される。予熱されたVAMは排気混合器において発電装置の排気ガスと均一に混合されて触媒反応器に送られ、触媒反応によって混合

表1 システムの計画性能
Table 1 Design performance of system

発電装置	発電機端出力 (kW) ^{*1)}	800
	VAM+CMM処理量 (Nm ³ /h)	22,000
	温室効果ガス削減量 (t-CO ₂ /年) ^{*2) *3)}	48,000
浄化装置	VAM処理量 (Nm ³ /h)	38,000
	温室効果ガス削減量 (t-CO ₂ /年) ^{*2) *3)}	20,000
温室効果ガス削減総量 (t-CO ₂ /年) ^{*3)}		68,000

*1) 15°C, 1気圧, 高度: 0m条件における出力。
*2) メタン濃度をVAM: 0.5%, CMM: 30%とした場合。
*3) 稼働率97%で1年間運転した場合。

気中のメタン成分が酸化される。さらに、触媒反応器の排気ガスは熱交換器を通して大気中に排出される。

(3) 特長

本システムの特長を以下に示す。

- 従来、利用手段がなかったVAMおよび低濃度CMMで発電でき、良質な燃料（天然ガス、石油、石炭）の消費量を削減できる。
- 発電と同時に温室効果ガス排出量を削減できる。
- 窒素酸化物（NO_x）が発生しない。
- 可燃範囲（5～15%）外の低濃度メタン（約2%）を使用するため、安全性が高い。
- 小型で可搬式にすることが可能。

2 適用技術の概要

ガスタービン発電装置の機器仕様を表2に示す。さらに、各要素の適用技術の概要を以下に示す。

表2 ガスタービン発電装置の機器仕様

Table 2 Equipment specifications of gas turbine generator set

部 位	項 目	形式・仕様
ガスタービン	形 式	再生サイクル 1軸式
	出力位置	吸気側
	圧縮機	遠心2段
	燃 焼 器	単缶 触媒燃焼器
エンジン機器	タービン	軸流3段(全段無冷却)
	始動燃焼器	単缶 拡散燃焼器
	熱交換器	プレートフィン型
パワーエレクトロニクス機器	減速機	遊星2段歯車式
	発 電 機	誘導発電機(始動装置兼用)
	電力変換装置	インバータ・コンバータ方式

(1) ガスタービン

本システムの核となる触媒燃焼式ガスタービンは、当社が開発・販売している1,000kW級ガスタービンM1A-01をベースに、触媒燃焼式かつ再生サイクル仕様向けに最適化したものである。

(2) 触媒燃焼器

システムに必要な不可欠な「触媒燃焼技術」は、触媒表面に空気中の酸素とメタンを吸着して触媒の強い酸化作用を

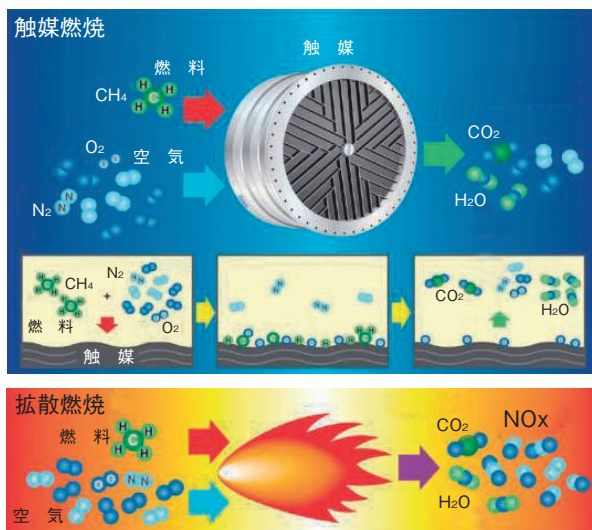


図5 触媒燃焼と通常の燃焼(拡散燃焼)との比較
Fig. 5 Comparison between catalyst combustion and normal (diffusion) combustion

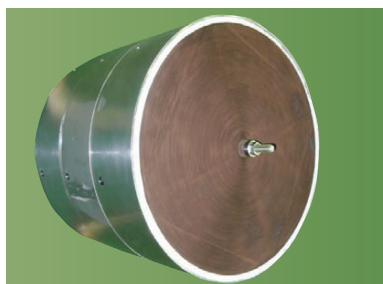


図6 触媒燃焼器コア
Fig. 6 Catalyst combustor core

利用して燃焼(酸化)させる。通常の火炎燃焼では燃焼できない超低濃度のメタンガスを低温(300~900℃)で燃焼でき、大気汚染原因物質の一つである窒素酸化物(NOx)は全く発生しない。これに対して、通常の燃焼器では可燃濃度範囲(5~15%)の混合気が必要な上、空気と燃料の混合気が炎を出して高温で燃焼するため大量のNOxを発生する。図5に触媒燃焼のイメージを通常の燃焼(拡散燃焼)と比較して示す。

当社は、超低NOxガスタービンとして、触媒燃焼式ガスタービンM1A-13Xを世界で唯一実用化しており、それらの触媒燃焼技術を転用し、開発した(図6)。

(3) 熱交換器

熱交換器は、高い温度効率と耐久性に加え小型であることが要求される。これらを考慮し、当社600kW級再生式ガスタービンS7Aでも実績のあるプレートフィン型熱交換器を採用した(図7)。

(4) 電力変換装置

本システムは始動時の触媒燃焼器着火の際に、部分回転数での暖機および発電状態への移行が必要となるため、発電機に誘導発電機を採用し、自社開発の電力変換装置を用

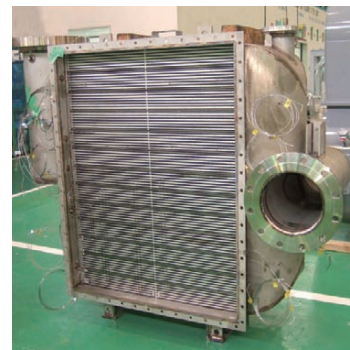


図7 プレートフィン型熱交換器
Fig. 7 Plate-fin-type recuperator

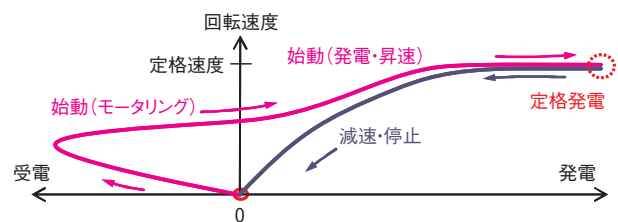
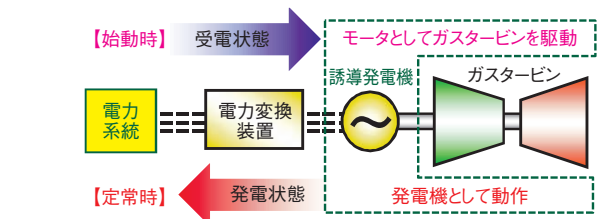


図8 始動時および定常時の機器の作動イメージ
Fig. 8 Image of equipment operation in starting phase and steady running phase

いた可変速制御を実施している。始動および定常時の機器の作動イメージを図8に示す。

(5) 制御技術

通常の制御シーケンスに加え、本システムに特有の始動停止制御およびメタン濃度変動対応制御などの制御ロジックを新たに設計した。これにより、安定した始動停止、VAM/CMMのメタン濃度が変動した際の触媒などの機器の保護/安全性に配慮したシステムを実現した。

3 社内実証試験

(1) 実証試験機

実証試験機(図9)、実証試験設備(図10)を用いて社内にて実証試験を行った。社内実証試験では、VAMのような低濃度メタンが存在しないため、空気を吸気し、混合器に都市ガスを噴霧し、低濃度メタンを模擬している。

(2) 実証試験結果

始動試験や負荷試験などを実施し、自動制御にて始動から負荷運転まで安定した運転が可能で、かつ所定性能(温室効果ガス削減量:48,000 t-CO₂/年, 定格出力:800kW)が得られることを確認した。試験結果の一例を図11に示す。



図9 実証試験機
Fig. 9 Demonstration test unit

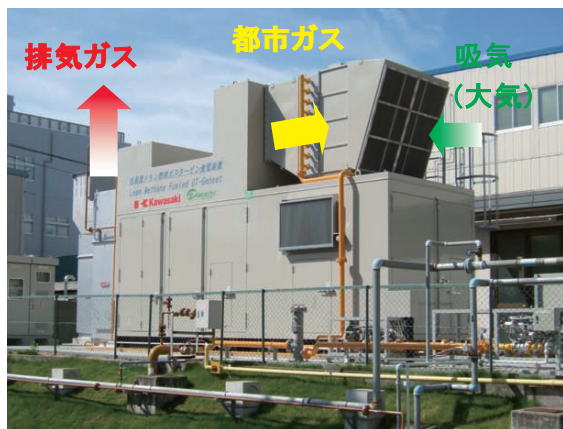


図10 実証試験設備
Fig. 10 Demonstration test facility

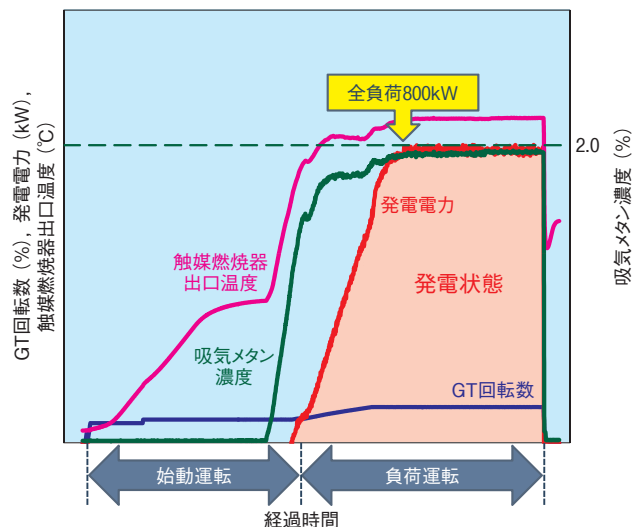


図11 実証試験結果の一例
Fig. 11 Example of results of demonstration tests

あとがき

今後は、「低濃度メタン燃焼ガスタービン発電装置」の信頼性や耐久性などを確認した後に量産化し、VAM放出量が多いオーストラリアや中国などの炭鉱や、低濃度メタンガスの放出量が多い米国などのごみ埋め立て地などに向けて販売する計画である。

本製品は大気中に放出されている低濃度メタンガス(温室効果ガス)の処理と発電への利用を通じて地球温暖化防止を進め、地球環境の未来に貢献していく。

参考文献

- 1) 特許 第4538077号, “希薄燃料吸入ガスタービン”



山崎 義弘



上村 大助



堂浦 康司



細川 恭史



田中 克典



佐藤 毅



黒坂 聡



松尾 和也



堀川 敦史

250kW級 小型バイナリー発電設備 ーグリーンバイナリータービンー

250kW Turbine Generator based on Organic Rankine Cycle with Effective Use of Low Temperature Heat Source – Green Binary Turbine –



溝口 和彦① Kazuhiko Mizoguchi
 清水 元② Hajime Shimizu
 鈴木 宏和③ Hirokazu Suzuki
 三宅 直樹④ Naoki Miyake
 今野 優子⑤ Yuko Konno
 山下 誠二⑥ Seiji Yamashita
 澤田 正志⑦ Masashi Sawada

従来は利用されずに分散して存在する排熱（80～120℃）の回収を目的として、低沸点である代替フロンを作動媒体に用いた「グリーンバイナリータービン」を開発した。

当社神戸工場内の自家発電所（神戸パワーセンター）でのガスエンジン排温水熱源利用でのデモ運転を経て、地熱利用の九州電力㈱との実証試験への取り組みや、低温蒸気利用のごみ焼却工場などの排熱高度活用プロジェクトへの参画など、多様な熱源に対応する製品展開を進めている。

We have developed a “green binary turbine” that uses low-boiling-point alternative CFCs as the working fluid with the aim of recovering distributed waste heat that exists in unused condition (80-120°C). After a demonstration that used a waste hot water source from a gas engine at the in-house power station of our Kobe Works, we are pushing ahead with the development of products compatible with diversified heat sources by conducting geothermal power generation verification tests jointly with Kyushu Electric Power Corporation and participating in advanced waste heat utilization projects using low-temperature steam such as waste incineration plants.

まえがき

当社では、工場や発電所、ごみ焼却場の排温水など、従来は利用されずに分散して存在する排熱（80～120℃）の回収を目的に、低沸点である代替フロンを作動媒体に用いた単純ランキンサイクルの250kW級小型バイナリー発電設備「グリーンバイナリータービン」を開発した。2010年に、当社神戸工場内の自家発電所「神戸パワーセンター」に設置し、現在まで順調に運転を続けている。当社製「グリーンガスエンジン」と組み合わせ、発電所総合効率50%超と小規模発電所としては類を見ない効率を有している。

本稿で紹介する小型バイナリー発電設備は、当社が1980年代初頭に開発・製作したフロン（CFC-11：現在は規制により製造されていない）を作動媒体とする2～4 MW級バイナリー発電設備の知見に基づいたものである。タービン発電機は、最新のパワーエレクトロニクス技術によりタービンと発電機を一体化し、かつ、高速回転させることでコンパクト化を図っている。また、作動媒体を完全に密封し、系外への媒体の漏洩が無いという特長を有する。

1 概要

(1) 主要諸元

神戸パワーセンターに設置したグリーンバイナリータービンと熱交換器の主要諸元を表1に示す。

表1 主要諸元
Table 1 Main specifications

要 目	仕 様	
サイクル	ランキンサイクル	
作動媒体	代替フロン	
発電機端出力 (kW)	250	
タービン型式	横型単段ダブルインベラ式	
発電機型式	永久磁石3相交流高周波同期発電機	
発電機容量 (kVA)	250 (力率1.0)	
回 転 数 (min ⁻¹)	約9,000 (可変速式)	
蒸 発 器	流下液膜式シェル&フィンチューブ式	
(熱源) 循環温水	入口温度 (°C)	98 ^{*1)}
	流量 (t/h)	180 ^{*1)}
凝縮器型式		シェル&フィンチューブ式
(冷却源) 循環冷却水	温度 (°C)	20 ^{*1)}
	流量 (t/h)	480 ^{*1)}
CO ₂ 削減量	約550t-CO ₂ /年 ^{*2)}	

*1) 定格条件：250kWの発電に必要な温水・冷却水条件
 *2) 発電出力パッケージ内補機動力

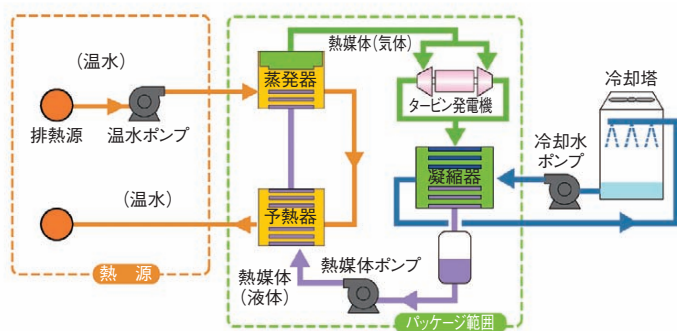


図1 サイクル構成
Fig.1 Cycle composition

(2) サイクル構成

基本的な作動媒体サイクル構成を図1に示す。タービン発電機と蒸発器、凝縮器など媒体系統機器が含まれたパッケージ範囲を基本構成とし、温水系統、冷却水系統はパッケージ範囲外としている。熱源にはさまざまな形態があるので、それに応じてパッケージ範囲外を設計する必要がある。

媒体は、液体の状態ですり熱器を通り加温された後、蒸発器において飽和蒸気となる。飽和蒸気はタービン発電機で250kWの動力を発生させた後、凝縮器で凝縮され液体となる。タービン発電機や構成機器からの媒体の漏洩は無く、完全に密閉なサイクルを実現している。

凝縮器に水冷式を採用したので、空冷式凝縮器を採用した場合と比較して、主媒体蒸気とタービン排気の有効熱落差が大きいため、サイクル効率が向上する。

2 特長

(1) タービン発電機

タービン発電機の断面図を図2に示す。タービンと発電機が一体構造であること、さらに発電機ロータとステータの間に薄肉円筒状のキャンを挿入することで媒体の漏洩が無いことが特長である。

発電機ロータの両端にインペラを装着するダブルフロー構造とすることで、シングルフローと比較して小径インペラ

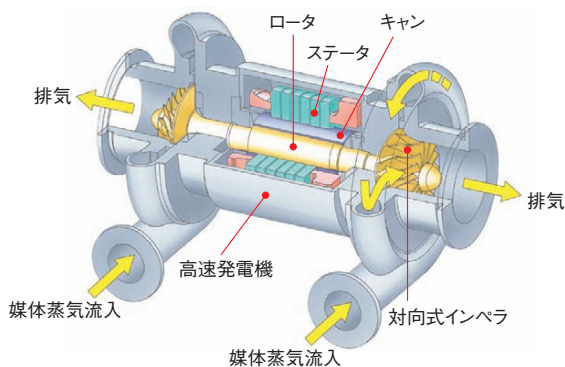


図2 タービン発電機カットモデル
Fig.2 Turbine cut model

ラが採用できるため、高速回転化が可能となり、発電機のコンパクト化を図っている。また、タービンと発電機を軸直結していることから、一般的に採用される減速装置が不要となる。

キャンは媒体との適合性試験、および圧力・熱サイクル試験を実施し、強度や媒体の漏洩に問題が無いことを確認した上で採用している。

発電機ロータ部の冷却は媒体蒸気で行っている。通常は軸にファンを設け、ロータとステータを共に空冷するが、ロータ部はキャン内部構造となるため、空冷式ファン冷却ができない。よって、発電機ステータ部のみを冷却するために、外部に送風ファンを設けている。

インペラの形状および発電機の冷却流路形状は、数値流体力学(CFD)解析により、採用されている媒体の特性に合わせて最適化を図っている。

(2) 熱交換器

蒸発器は流下液膜式とすることで、蒸発器の胴側に管群全体を浸すまで媒体を満たす必要がなく、比較的高価な媒体の保有量を最少化している。なお、流下液膜式蒸発器は当社グループ企業の吸収冷凍機の技術を適用するとともに、蒸発における熱伝達は伝熱特性試験により特性を十分に把握したことで、コンパクトな蒸発器とすることができた。

凝縮器は過去の2～4MW級バイナリー発電設備で実績のある冷却管の配列や構造を採用している。

(3) 媒体

環境性、安全性、熱物性、取り扱いやすさ、入手性、規制などから総合的に評価し、環境特性に優れ(オゾン破壊係数が0、地球温暖化係数は比較的低い)、毒性・腐食性が無く、不燃性で、潜熱/顕熱比が小さく、大気圧力下の常温付近で液体である媒体として代替フロンを選定した。

(4) 電気・制御系統

電気・制御系統の構成を図3に示す。

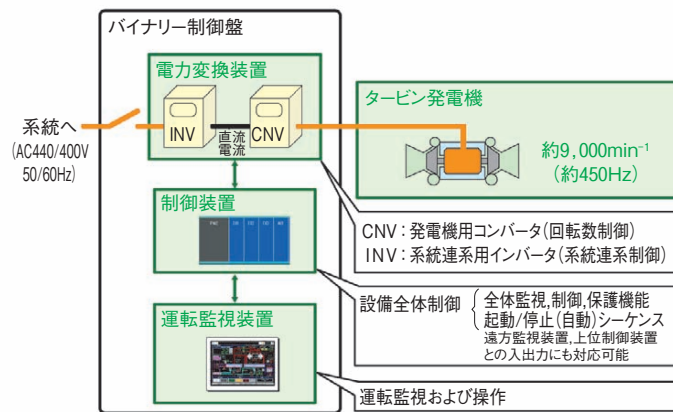


図3 電気・制御系統図
Fig.3 Diagram of electric and control systems

発電機の周波数約450Hzを直流化し、かつ発電機回転数を制御する発電機用コンバータ、直流を系統周波数に一致した交流とする系統連係用インバータ、および設備全体の監視・制御・保護機能を有し、自動起動/停止シーケンスを内蔵した制御装置、さらに運転操作端を一体構造とした盤としている。

また、遠方監視装置、上位計算機との入出力にも対応可能としている。

(5) 部分負荷特性

バイナリー発電設備では、熱源の温度が低く、冷却は大気温度程度であるため、有効利用できる温度差が小さい。夏季のような大気温度が高い場合は、さらに温度差が小さくなり、タービン排気圧力が上昇するため、大きく設計点からずれることになる。このような場合、定格回転数（約9,000min⁻¹）での運転ではタービン効率がかかなり低下する。しかし、電力変換装置によりタービン発電機回転数を系統周波数と独立して制御できるので、約7,000min⁻¹まで下げることが可能である。

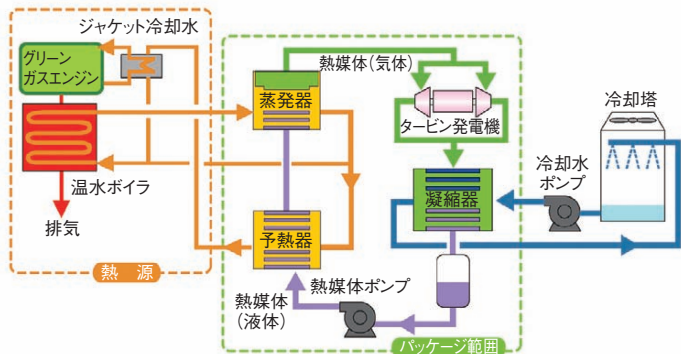


図4 神戸パワーセンターでのサイクル構成
Fig. 4 Composition of binary cycle at Kobe Power Center

3 適用事例

(1) ガスエンジンへの適用

当社神戸パワーセンターでのグリーンガスエンジン「KG-12-V 5000kW」と組み合わせたバイナリーサイクル構成を図4に、機器配置構成例を図5に示す。

蒸発器、予熱器で熱を利用した後の温水出口温度は、ガスエンジンのジャケット冷却水供給温度に合わせている。ガスエンジンのジャケット冷却熱と排ガス熱を用い、温度98℃、流量180t/hの温水を得て、250kW（発電機端）の発電を行っている。

グリーンガスエンジンは、単機で世界最高効率の49%を達成しており、グリーンバイナリータービンと組み合わせることで、発電所総合効率50%超を達成した。

(2) 地熱発電への適用

本装置は、低温熱源を利用する発電設備として開発したが、自然エネルギーを利用した地熱発電への適用性を確認するために、九州電力㈱と共同で地熱利用小規模バイナリー発電設備の実証試験にも取り組んでいる。

本実証試験設備のサイクル構成を図6に示す。従来の蒸気タービンによる発電では、噴出する蒸気と熱水から、蒸気だけを発電に利用し、熱水は地中へ還元している。この実証試験では、地中へ還元する熱水の一部をバイナリー発電に利用する。

本設備は鹿児島県指宿市にある山川発電所内に設置し、地熱流体に対する熱回収技術、スケール対策、腐食対策、設備性能、経済性などについての評価を2013年度末までに行う計画である。

(3) ごみ焼却工場の排熱活用

大阪市環境局のごみ焼却工場では、ごみの焼却熱で蒸気が発生させ、発電や場内の給湯・暖房に有効利用している。大阪ガス㈱、大阪市、大阪府と当社で行う共同実証事業

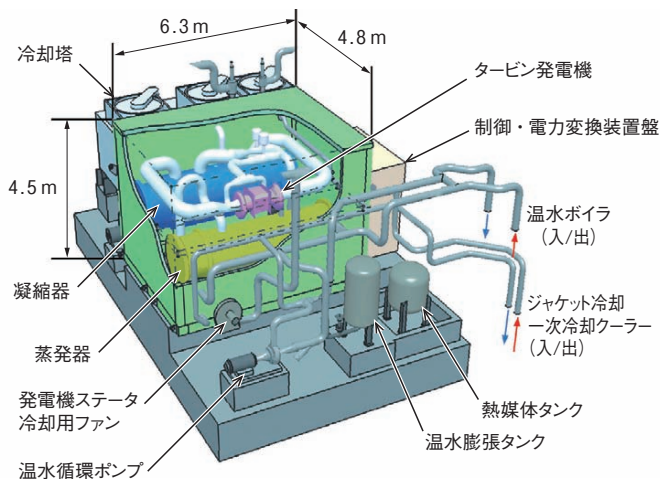


図5 機器配置構成例
Fig. 5 Example of layout and configuration

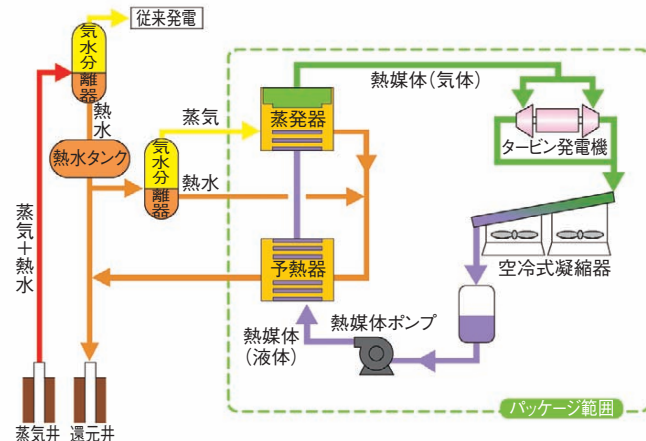


図6 地熱利用小規模バイナリー発電実証試験におけるサイクル構成
Fig. 6 Composition of cycle in demonstration test for small-scale geothermal binary power generation

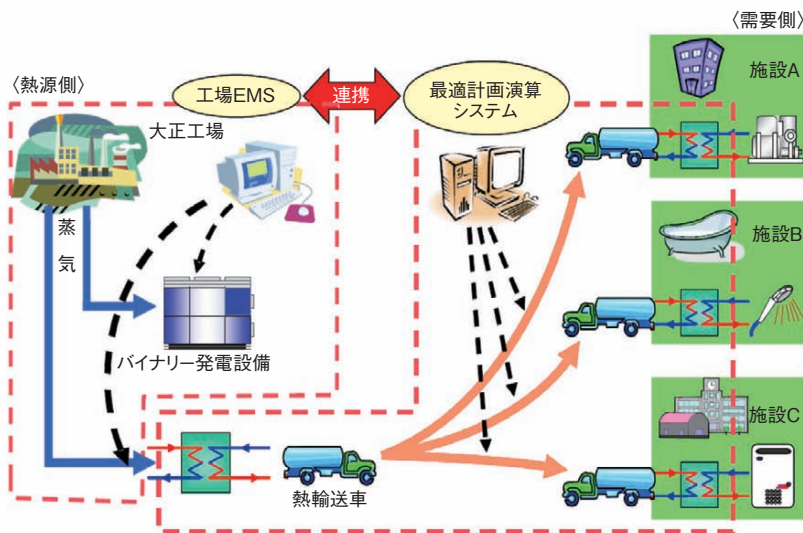


図7 「ごみ焼却工場等の都市排熱高度活用プロジェクト」におけるシステム構成
 Fig.7 System configuration for “Waste Heat Utilization from City Incinerators, Etc.” project

「ごみ焼却工場等の都市排熱高度活用プロジェクト」では、実証試験の実証場所として大正工場を選定し、バイナリー発電設備による発電と、蓄熱輸送システムによる未利用排熱の近隣コミュニティ内での利用と、さらに、それらの最適化により、総合エネルギー効率を25%向上させることを目指している。

プロジェクトの全体システムの構成を図7に示す。

主要設備・システムとして、当社からバイナリー発電設備、工場エネルギーマネジメントシステム（EMS）、および大阪ガス㈱から蓄熱輸送システムが導入される。

① バイナリー発電設備

熱源は、同工場に設置されている蒸気タービンの排気熱である。従来は温度が低く発電に利用できなかったが、低温熱を有効利用できるバイナリー発電設備により発電することが可能である。

② 蓄熱輸送システム

ごみ焼却熱を蓄熱槽に蓄え、コミュニティの複数の需要家に輸送供給することができる。

③ 工場エネルギーマネジメントシステム（EMS）

近隣コミュニティ内の熱利用状況に応じ、焼却熱を電気に変換（発電）するか、熱のまま利用（熱輸送）するかを最適化する。

2012年度中に試運転を経て実証運用を開始し、2013年度末まで技術実証を行う計画である。

あとがき

グリーンバイナリータービンは、排ガス、排蒸気や排温水あるいは地熱温水など、分散して存在する未利用の低温熱源から電力回収する製品として、開発を行ったものである。初号機を設置した神戸パワーセンターには、多数の見学者が訪れ、本製品が省エネ機器として期待されているこ

とを改めて実感している。

しかし、従来の発電設備や他の省エネ機器と比較すると低温熱利用であるが故にコストの壁は依然として高い。

一方で、地熱発電に再生可能エネルギーの電力買取制度（FIT）が適用可能となり経済性が改善すること、また九州電力㈱との共同研究を通じ地熱発電の実績を積むことで、地熱発電分野で本製品の展開に弾みが付くと考えている。

今後、さまざまな分散低温排熱源に対して適用を進め、幅広いユーザーのニーズに合った製品に育成していく所存である。

参考文献

- 1) 溝口和彦：“低温廃熱利用小型バイナリー発電設備「グリーンバイナリータービン」”，クリーンエネルギー，pp.24-28，20-1（2011）
- 2) 山下誠二：“自然エネルギー利用バイナリータービン発電システム”，日本ガスタービン学会誌，Vol.39，No.5，pp.20-24（2011）



溝口 和彦 清水 元 鈴木 宏和 三宅 直樹



今野 優子 山下 誠二 澤田 正志

「川崎-MAN48/60型」発電用4サイクルディーゼル機関

Kawasaki-MAN 48/60 4-Stroke Diesel Engine for Stationary Power Generating Plant



2011年に、沖縄電力㈱の石垣第二発電所に、国内初、世界最大級18MWの発電出力を誇る新型ディーゼル機関「川崎-MAN18V48/60」を主機とする常用発電設備を納入し、良好な性能で運用中である（従来の国内最大出力は、10MW）。

本稿では本ディーゼル機関「川崎-MAN48/60型」を紹介する。

まえがき

当社のディーゼル発電設備は1955年に川崎製鉄㈱（現在、JFEスチール㈱）に非常用発電設備を納入して以来、約60年間にわたって常用発電用、非常用発電用としてディーゼル発電設備を納入してきた。これまでの納入総台数は111台、総出力は226.1 MWである。近年は、国内電力会社向けに約20年間で10台のディーゼル常用発電設備を納入している。

近年のレシプロエンジンによる発電設備の市場は高出力・高効率・優れた環境性能が求められ、環境負荷の低いガスエンジン発電設備に注目が集まっている。しかし、ガスインフラが整っていない離島では、今なおディーゼル発電のニーズは高い。

当社は2011年に沖縄電力㈱に、世界最大級の18MW発電出力の新型ディーゼル機関「川崎-MAN18V48/60」を主機とする常用発電設備を納入した。

18V48/60は、MAN社にて多数の運転実績を有し、信頼性が高いエンジンである。また常に機関性能を向上させ、市場の要求である高効率、高環境性能にも対応している。

表1 「川崎-MAN48/60型」ディーゼル機関の主要諸元
Table 1 Main specifications

型式	L 型		V 型	
シリンダ数	9	12	14	18
機関出力 (kW)	9,450	12,600	14,700	18,900
回転数 (min ⁻¹)	500/514			
周波数 (Hz)	50/60			
シリンダ直径/行程 (mm)	480/600			
ヒートレート (kJ/kWh)* (熱効率) (%)	7,558 (47.6)	7,473 (48.2)		

*ヒートレートは以下の条件

- ・ISO3046/1-2002条件
- ・直結ポンプなし
- ・排気エミッション WB2007/2008
- ・マージン5%
- ・機関端

1 主要諸元

「川崎-MAN48/60型」ディーゼル機関の主要諸元を表1に示す。

2 構造

川崎-MAN48/60型ディーゼル機関の組立構造図を図1に示す。

給気は、1台の軸流タービン型排気ガス過給機で加圧され、A列、B列それぞれの空気冷却器（高温水、低温水の2段階冷却により最適な給気温度に制御）を通り、各シリンダに供給される。シリンダ燃焼室では、電気式调速機で制御された燃料油が高压で噴射され、拡散燃焼した後、排気ガスは単一排気管に排出され、過給機タービン室を通り大気放出される。

V型の主な構成部品の特徴を以下に示す。

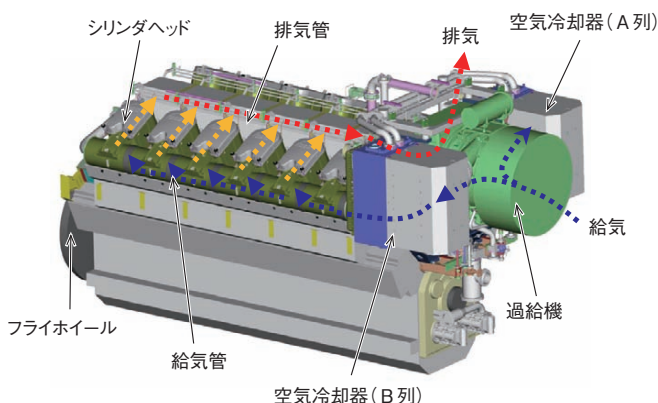


図1 「川崎-MAN48/60型」組立構造図
Fig.1 Engine outline

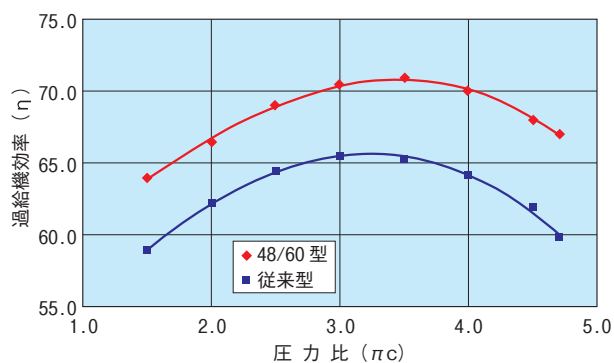


図2 過給機効率
Fig. 2 Turbocharger efficiency

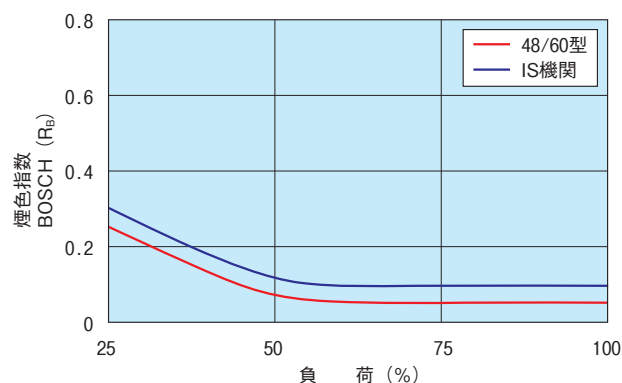


図3 ばい煙の煙色指数
Fig. 3 Smoke index

(1) シリンダヘッド

給・排気管の形状の最適化、燃焼面の平滑化により、最適な空気流を形成することで、燃料と空気の混合改善、燃焼効率改善および燃料残渣物の低減を図っている。

(2) 燃料噴射系

燃料噴射タイミングを最適化し、燃料噴射最大圧力を従来の80MPaから、160MPaと高圧化することにより、燃焼状態の改善を図っている。

(3) 過給機

従来の過給機2台搭載を、高効率な大型の過給機1台搭載に変更した。従来型過給機との効率比較を図2に示す。

3 特長

最適設計によって、本機関は以下の特長が得られている。

(1) 高出力化

シリンダ当りの出力比較を行う場合に用いる平均有効圧力で比較すると、従来の10MWクラスの機関より47%上昇しており、高出力化を達成した。出力増大によりシリンダ内圧の増加を伴うが、シリンダヘッドの最適設計により安全性・信頼性を確保している。

(2) 高効率化

燃焼室・燃料噴射および過給機の最適設計により、従来の10MWクラスの機関の熱効率45.5%に対し、本機関は48.2%と高効率化した。

(3) ばい煙改善

燃焼状態の改善や高効率過給機の搭載により、ばい煙の改善効果が得られている。ばい煙の煙色指数を図3に示す。

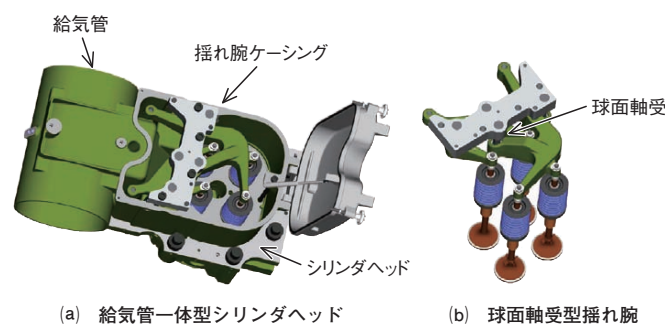


図4 シリンダヘッド・揺れ腕構造
Fig. 4 Cylinder head and control lever for valves

ばい煙は、煙色指数が $0.3R_B$ （ポッシュ指数）以下では、目視で確認できない良好な排気エミッションである。従来からMAN型機関では、IS（Invisible Smoke）機関として25%負荷以上で良好な排気エミッションだが、今回さらに改善が図られた。また、給気温度制御により低負荷時に給気温度を上げ、低負荷時の黒煙も低減した。

(4) 容易な保守・整備作業性

シリンダヘッド、給気管および揺れ腕ケーシングを1シリンダごとに一体構造とし、また揺れ腕装置は新規構造の球面軸受を採用して運動部品点数の削減を行い、作業時間の短縮を図っている。図4に構造図を示す。

あとがき

今後、さらなる高効率化、環境性能および燃料の多様化などさまざまなニーズも予想されるため、MAN型機関の改善に努め、高効率で環境負荷の少ないディーゼル発電を通して社会へ貢献していきたいと考えている。

〔文責 機械ビジネスセンター 発電プロジェクト部
大崎 誠一／福島 道雄〕

〔問い合わせ先〕

ガスタービン・機械カンパニー 機械ビジネスセンター 発電プロジェクト部
Tel. (078) 682-5344, Fax. (078) 682-5530

多様な蒸気条件に適応する産業用蒸気タービン

Diverse Applications of Industrial Steam Turbines



蒸気タービンを使った発電設備は、化石燃料を燃やすプラントだけでなく、バイオマス発電や廃熱回収発電のような環境負荷の低いものもある。また、蒸気タービンの排気や途中段落から抜いた蒸気を工場で利用し、工場全体でのエネルギー効率向上を図ったものもある。さらに、最近注目されている地熱発電も含め、蒸気タービンはさまざまな発電設備で利用されている。

まえがき

蒸気タービンは、発電設備の原動機として古くから世界中で使われている主要な設備である。

発電用に使われる蒸気タービンは、電力会社などで使われる事業用と工場での自家発電などで使われる産業用に大別される。当社は1956年に1号機を製造して以来、約350台の産業用蒸気タービンを納入した。

産業用蒸気タービンの特徴として、要求仕様が千差万別であることが挙げられる。1台ずつのオーダーメイドとなるが、当社は自社技術で設計・製造しており、柔軟な対応が評価されている。

また、蒸気タービンは蒸気を発生させるための熱源を選ばず、蒸気タービンから排出された蒸気を利用することも可能であり、発電用と一括りにしても、使われるプラントにはさまざまな形態がある。ここでは、いくつかの特徴的な使われ方の例を挙げる。

1 火力発電プラント用

最も基本的なシステムは、燃料を燃やした熱で蒸気を発生させて蒸気タービンを回す方法である。

最近の代表例としてフィリピンに納入した84MWの蒸気タービン発電設備のフローを図1に示す。2008年に納入した1台目をはじめとし、5台が稼働中である。さらに、その運転安定性が高い評価を得て、現在、追設機を受注・製作中である。

ボイラで発生した蒸気は、蒸気タービンで仕事をし、復水器で水となって、再びボイラへ給水される。この時、蒸気タービンの排気真空度が高い（排気圧力が低い）ほど、大きな発電出力が得られるが、そのために復水器で冷却水に奪われた熱は廃棄されるだけである。そこで、蒸気ター

ビンの途中段落から蒸気を抜き（抽気）、ボイラへ給水される前の水の予熱に利用することで、プラント全体の熱効率を高めている。

産業用蒸気タービンでは、抽気をボイラ給水の予熱に利用するほか、工場での製品製造工程に利用する場合もある。さらに利用したい蒸気量が多い場合には、蒸気タービンの排気圧力を真空にはせず、圧力/温度が高いまま排気し、全量を蒸気として利用することも可能である。電気と熱（蒸気利用）に対する個々の要求に適した蒸気タービンを提供し、エネルギーの高効率利用に寄与している。

また、蒸気を発生させるために燃やす燃料は化石燃料に限らない。木屑や古タイヤをはじめ、サトウキビの搾りかすなどを燃やして発電するプラントにも広く適用されており、バイオマス発電として環境負荷低減の面でも注目されている。

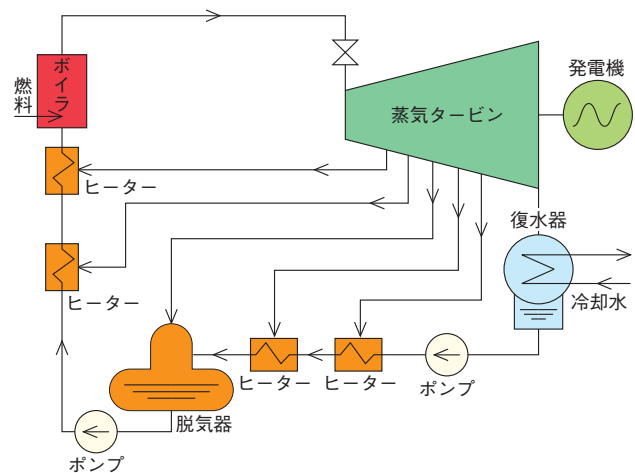


図1 火力発電プラント フロー図
Fig. 1 Flow diagram of thermal power plant

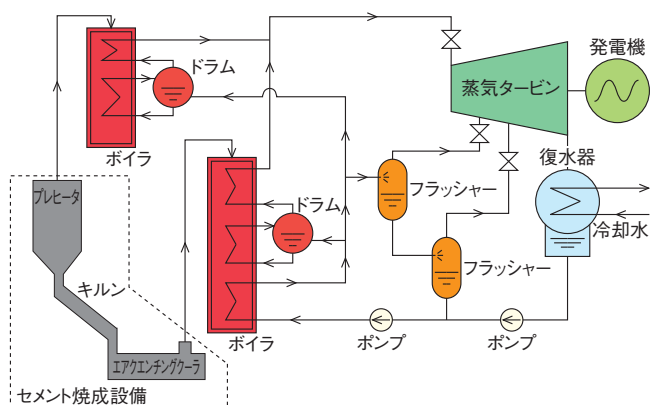


図2 廃熱回収発電プラントフロー図
Fig. 2 Flow diagram of waste heat recovery power plant

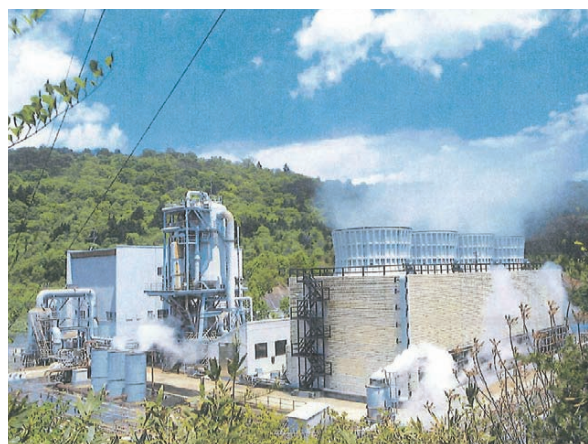


図3 地熱発電設備
Fig. 3 Geothermal power generation facility

2 廃熱回収発電プラント用

燃料を燃やすことなく、工場の廃熱を利用して蒸気を発生させて蒸気タービンを回す方法もある。発電のための燃料は不要であり、環境負荷低減の面でも経済性の面でも有利である。

主な適用例としては、コークス乾式消化設備やセメント焼成設備で発生した熱を利用した発電設備がある。コークスは、石炭を蒸し焼きにして不活性ガスと分離・生産される（乾留）。ここでできた赤熱コークスを、不活性ガスで消火する際の熱をボイラで蒸気として回収して、発電に利用するもので、当社ではこの発電設備用の蒸気タービンを国内外でこれまでに計16台納入している。また、セメント焼成設備で発生した熱を利用した発電設備用の蒸気タービンは、国内外で14台の納入実績がある。

このような廃熱を利用した蒸気タービン発電設備の特徴的なシステムとして、比較的低温の熱も蒸気タービンの途中段落に入れて（混気）発電に利用するものもある。フローの例を図2に示す。入口から入れる主蒸気のほか、比較的低温の熱も2段階で回収し、蒸気タービンの途中段落に入れて発電に利用し、エネルギーの有効利用を図っている。

3 地熱発電プラント用

最近注目されている発電方式に地熱発電がある。地熱発電設備の外観を図3に示す。これは、地熱によって暖められた蒸気や温水を利用して蒸気タービンを回し、発電するものである。通常の蒸気タービン発電設備との主な違いは、比較的低压の飽和蒸気であることと蒸気の質の悪さが挙げられる。

低压の蒸気を利用するため、出力の割に体格の大きな蒸気タービンとなり、飽和蒸気であるため、蒸気タービンの入口部分からエロージョン（侵食）対策が必要となる。また、通常の蒸気タービンでは、水質管理された蒸気が使われるが、地熱発電では地中から噴出してきた蒸気をそのまま使うため、耐酸性の配慮など、地熱発電独特の対応が必要である。

当社では、1975年の1号機以来、納入までに施した対策に加え、アフターサービスを通して得た知見を蓄積しており、今後の地熱発電の普及へ大いに貢献できるものと自負している。

あ と が き

東南アジアを中心に経済成長が著しい新興国では、急激に電力需要が増加している。また、先進国でも、より環境負荷の低い発電設備が求められている。

当社には、蒸気タービンの設計・製造技術から発展した製品として、高炉ガスの圧力を発電に利用する炉頂圧回収タービンや、比較的低温の工場の廃ガス・廃温水や温泉を利用したバイナリー発電用タービンといった環境負荷低減に貢献する製品もラインアップしている。

今後も、個々の顧客のニーズにマッチした製品や仕様の提案を行い、信頼性の高い製品を納入していくことが当社の使命と考えている。

〔文責 機械ビジネスセンター タービン部
桐村 拓未〕

〔問い合わせ先〕

ガスタービン・機械カンパニー 機械ビジネスセンター 発電機器・システム営業部

Tel. (03) 3435-2267, Fax. (03) 3435-2022

スーパーコンピュータ「京」向 ガスタービンコージェネレーションシステム

Gas Turbine Cogeneration System for Supercomputer “K”



独理化学研究所計算科学研究機構の「京」の電気設備の一部として当社の6 MW級ガスタービンコージェネレーションシステムを納入した。計算機センターの電源保護にコージェネレーションシステムを利用することは、当社として初めての取り組みである。本稿では、本コージェネレーションシステムの特徴について紹介する。

まえがき

「京」は、2011年6月と11月にスーパーコンピュータに関する世界ランキングTOP500において世界一位を記録した。当社は、その電気設備の一部として6 MW級ガスタービン2台からなるコージェネレーションシステム（CGS）を納入した。

「京」に導入されたCGSは、ピークカットによる契約電力の抑制、節電などに加え、電源保護の役目も担っている。計算機センターの電源保護にCGSを利用することは当社として初めての取り組みであった。

本稿では、当社CGSが貢献した「京」の電源保護システムと省エネルギー化について紹介する。



図1 コージェネレーションシステム
Fig.1 Appearance of cogeneration system

1 CGS 設備の概要

CGSの外観を図1に示す。6 MW級ガスタービン2基と排熱回収ボイラ2基から構成され、燃料は都市ガス13Aである。発電機は「京」のハードディスク装置や研究室負荷などの重要負荷に接続されており、商用電源と常時系統連系し運用される。停電ならびに瞬時電圧低下時でもこれら負荷の保護が可能である。また、ガスタービンの排熱を蒸気吸収式冷凍機を用いて計算機の冷却水の製造に利用する。

2 特徴

(1) 電源保護システム

「京」に関する設備の瞬時電圧低下・停電保護対策システム（以下、瞬低対策）は、計算結果を保存する大規模ストレージ機器や研究データの保護が必要な研究棟など重要な領域を対象としている。

通常では、電算センターなどの瞬低対策は蓄電池式UPS

を用いるが、本施設の場合、対象となる重要な領域の必要電力は最終的に6,500kWになる予定であり、蓄電池式UPS設備では、イニシャルコストの増大、設置場所の確保、メンテナンス費用の増大などの問題があった。また、重要機器であるファイルサーバを瞬低から保護するには、瞬低時に発電機母線の電圧を80%以内に維持し、さらに系統からの切り離しを20ms以下にする必要がある。そこで、高速限流遮断器を組み合わせた瞬低対策システムを構築した。システム構成図を図2に示す。

具体的には、商用系統の電圧低下時には高速限流遮断器を用いて商用系統とコージェネレーションとの高速遮断(3/4サイクル 12.5ms)を行い、発電機母線の電圧を確保する手法を採用した。このシステムにより従来の方法に比べ、バックアップ電源の設置費・メンテナンス費用を抑制、設置スペース削減を実現しながら、ファイルサーバなどの重要機器の保護が可能となった。

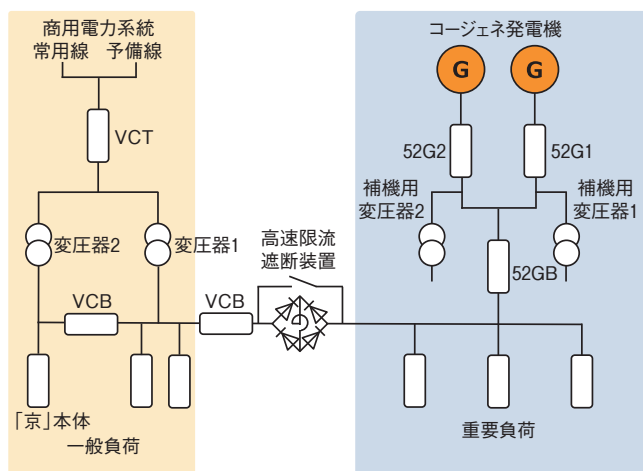


図2 瞬低対策システムの構成図

Fig. 2 Schematic diagram of measures against instantaneous voltage drops and protection from power interruption

(2) エコスパコン施設としての省エネ技術の導入

「京」の設備のコンセプトの一つに「エコスパコン」がある。当社のCGSは、ガスタービンによる発電とガスタービンの排熱回収蒸気を利用する吸収式冷凍機を用い、計算機システムとシステムを設置する建屋設備としての環境負荷の低減に貢献している。

商用電源と系統連系しており、最大12MW相当の電力供給を行うことが可能である。排熱回収ボイラにより製造された蒸気(12.5 t/h×2基)は、蒸気吸収式冷凍機(1700RT)4基へ供給される。冷凍機で製造された冷水で計算機の発熱を効率よく冷却する。熱源系統フローを図3に示す。

(3) 運用実績

(i) 運用実績

運用実績として、発電効率約30%、熱回収効率約45%、総合効率約75%で稼働しており、計算機負荷に合わせた効率的な運転となっている。

(ii) PUE (Power Usage Efficiency) 実績

PUEとは、電算センター全体の省電力性を評価する基準である。PUEは計算機の消費エネルギーと計算機、空調、冷凍機器、照明などを含めた建物全体の消費エネルギーから求められ、次の式で定義される。

$$PUE = \frac{\text{建物全体の消費エネルギー}}{\text{計算機の消費エネルギー}}$$

この定義から、PUEが1に近いほど、計算機を冷却するための空調・冷凍機器、照明・コンセント機器など、設

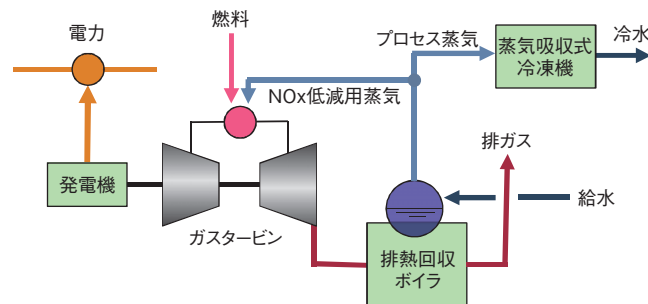


図3 熱源系統フロー

Fig. 3 Facility flow of cogeneration system

備で消費する電力が小さく、省エネルギー性に優れた施設といえる。

米国の環境保護庁(EPA)が公開している「2011年に達成すべきPUEの目標値」は標準で1.7、達成すべき最良値で1.3、画期的な新技術が公表された場合が1.2である。

今回の「京」での実績としては、CGSが高効率で運用されているためPUE目標値(最良値)である1.3程度で運用されている。

あとがき

「京」に導入された当社のCGSは、従来のCGSが持つメリットに加えバックアップ電源設置などの費用抑制、設置スペースの削減などの新しいメリットがあることを証明した。これらの点が評価され「京」の電気設備は、電気設備学会技術部門施設奨励賞を受賞した(独理化学研究所、(株)日建設計、(株)きんでん、(株)九電工、三機工業(株)との共同受賞)。

今後も、顧客の多様化するニーズに対応し、高信頼・高品質の製品を提供できるよう努力していく所存である。

最後に、本設備を納入するに当たり、さまざまなご協力をいただいた(独理化学研究所をはじめ、関係者各位に深く感謝の意を表します。

[文責 ガスタービンビジネスセンター

産業ガスタービンシステム総括部 プロジェクト部
友藤 大輔/小賀坂 暢浩]

【問い合わせ先】

ガスタービン・機械カンパニー ガスタービンビジネスセンター 産業ガスタービンシステム総括部 プロジェクト部

Tel. (078) 921-5184 Fax. (078) 921-5196

排熱投入型吸収冷温水機「シグマエースジェネリンク1.43シリーズ」 Waste Heat Injection Type Absorption Chiller, Sigma Ace Gene-Link 1.43 Series



省エネルギーとCO₂排出量削減で地球環境に寄与する技術として排熱利用が注目されている。

当社ではガスエンジンコージェネレーションシステムを構成する排熱投入型吸収冷温水機「ジェネリンク」を1998年に開発・販売し好評を得ている。このたび、燃料消費量を従来機種比で最大約8%低減した「シグマエースジェネリンク1.43シリーズ」を開発した。

まえがき

近年、地球温暖化防止対策としてCO₂排出量削減の社会的要求が高まる中、コージェネレーションシステム（CGS）などの排温水を有効利用し、CO₂排出量を大幅に削減する排熱投入型吸収冷温水機が注目されている。

当社では、従来機からの大幅な省エネルギー化を達成した直焚式高期間効率機「シグマエース1.43シリーズ」をベース機として、新規に排熱投入型吸収冷温水機「シグマエースジェネリンク1.43シリーズ（ジェネリンク1.43機）」を開発した。

1 概要

ジェネリンク1.43機の主要機器仕様を表1に、サイクルフロー（冷房）を図1に示す。

ジェネリンク1.43機は、ベース機の「シグマエース1.43シリーズ」に当社従来型ジェネリンク機で培ってきた排熱利用技術を適用することで、優れた省エネルギー性を実現した。これにより、ガス3社が運営する「吸収式グリーン制度（05基準）」にて、エネルギー環境負荷低減機および高期間効率機として認定された。

2 特長

(1) 定格運転時の燃料消費量を30%削減

従来から採用していた蒸発器と吸収器の高性能伝熱管に加えて凝縮器にも高性能管を採用し、さらに溶液循環量を最適化することで、定格効率だけでなく部分負荷効率の向上を図った。これらにより、排温水を利用した場合、燃料消費量特性（図2）が示すように、排温水を利用しない場合と比較して定格運転時で燃料消費量を30%削減した。ま

た、従来機に対しては、上記に加え本体のCOP（Coefficient of Performance）向上により、最大約8%の燃料消費量削減となる。

(2) 優れた部分負荷効率

ジェネリンク1.43機では、冷房負荷に応じて最適な循環量にし、部分負荷効率を向上させるために、3台の溶液ポンプを個別インバータ制御とした。これにより、図2に示すように、部分負荷においても燃料消費量を大幅に削減した。また、燃料を使用せず、排温水のみで冷房運転が可能な排温水単独運転についても最大50%負荷まで可能とした。

(3) ガスエンジンとの組み合わせ機種の多様化

排温水からの熱回収量が従来機種比1.2倍となることから、同容量の吸収冷温水機で、より大きなガスエンジンに対応可能となり、市場でのガスエンジンとの組み合わせ範囲を拡大した。

表1 主要機器仕様
Table 1 Main specifications

項目		ジェネリンク1.43機
冷房COP	熱回収あり	1.86
	熱回収なし	1.30
暖房効率	(熱回収なし)	0.86
冷水	入出口温度 (°C)	15.0 → 7.0
	流量 (m ³ /h·RT)	0.378
冷却水	入出口温度 (°C)	32.0 → 37.6
	流量 (m ³ /h·RT)	1.00
排温水	入出口温度 (°C)	90.0 → 80.0
	流量 (m ³ /h·RT)	0.115
定格運転時燃料削減率 (%)		30
排温水単独運転負荷率 (%)		50

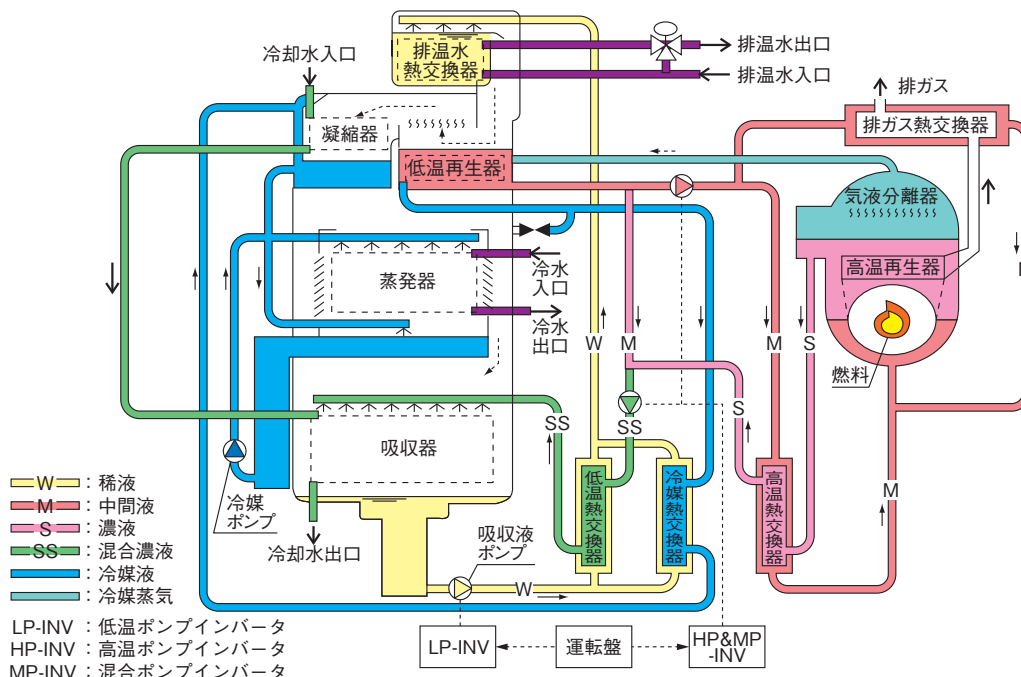


図1 サイクルフロー (冷房)
Fig. 1 Cycle flow (Cooling)

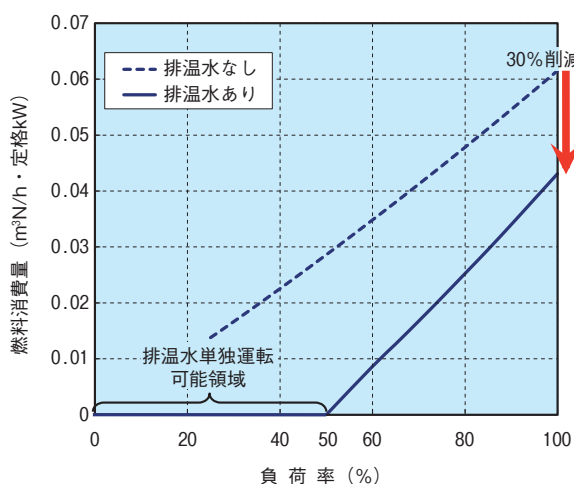


図2 燃料消費量特性 (13Aガス)
Fig. 2 Characteristics of fuel consumption rate

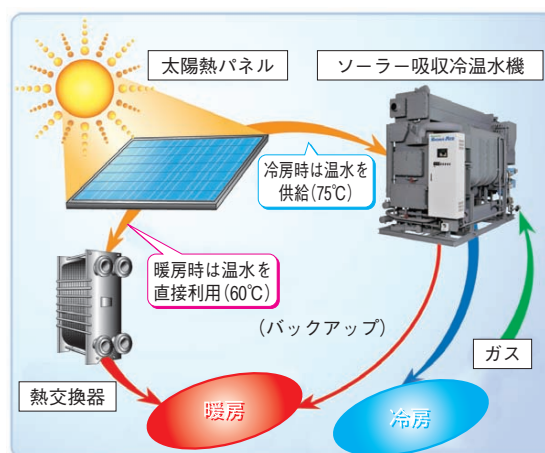


図3 ソーラークーリングシステム
Fig. 3 Solar cooling system

これにより、冷房負荷要求よりも電力負荷要求が大きいシステムに対しても、最適な機種を選定することができ、ガスエンジンの排温水を無駄なく利用することが可能となる。

あとがき

電力分散化によりCGSの需要が増え、そのシステムの多様化が進む現在において、高い省エネルギー性と広い適応範囲を有するジェネリンク1.43機はCO₂排出量の削減に寄与するだけでなく、ランニングコストを大幅に削減するこ

とができるため、CGSに最適な製品である。

また、当社は本技術を応用し、近年、注目を集めている太陽熱利用冷暖房システム(ソーラークーリングシステム)(図3)に最適な吸収冷温水機を、「ソーラー吸収冷温水機」として商品化している。

当社製品が省エネルギーや地球環境保護に貢献できることを切に願うとともに、今後も高効率かつ信頼性の高い吸収冷温水機の開発に注力する所存である。

〔文責 川重冷熱工業(株) 技術総括室 空調技術部 田中 大輔〕

〔問い合わせ先〕

川重冷熱工業(株) 技術総括室 空調技術部
Tel. (077) 564-4111, Fax. (077) 564-4353

特許 第4751950号

発明の名称：希薄燃料吸入ガスタービン

発明者：山崎 義弘, 黒坂 聡, 柏原 宏行

—温室効果ガスを削減し、資源を有効利用—

炭鉱から排出される炭坑通気メタン（VAM）などの低濃度メタンガスは、地球温暖化の原因となるにもかかわらず、メタン濃度が低い（低カロリー）といった理由から、従来の発電システムでは有効利用されず、大気に放出されていた。この低カロリーガスを燃焼できる触媒燃焼器を用いた、低濃度メタン燃焼ガスタービン発電装置を他社に先駆けて開発した。

触媒燃焼器を機能させるためには、触媒を高温にして活性化させる必要がある。定常運転時には、高温な排ガスにより加温できるが、始動時では排ガス温度が低いため、加温が必要となる。これまでは排気通路内に加温設備を設置していたが、本発明では、抽気弁と加温用バーナをタービン出口の排気通路外に設置した。発電装置の始動時や低負荷運転時には、抽気弁から加温用バーナへ圧縮機の抽出ガスを供給する。その抽出ガスと燃料の混合気を加温用バーナで燃焼させたガスを利用して、触媒の温度を上昇させ、活性化させる。

排気通路内に設置しないので、定格運転時の排気系の圧力損失を抑えられ、エンジンの出力低下を防止できた。また、排気通路の寸法を小さくすることでガスタービンの小型化を実現し

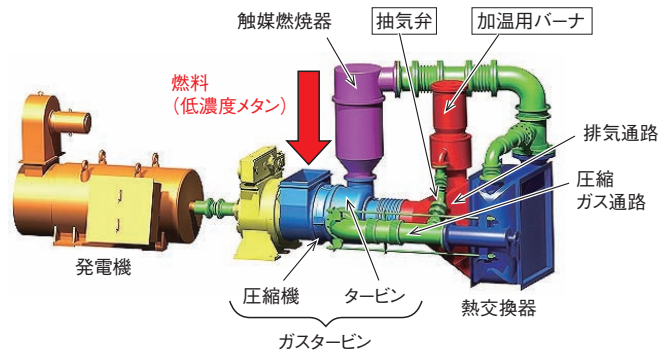


図1 低濃度メタン燃焼ガスタービン発電装置

た。さらに、ガスタービン始動時に加温用バーナを作動して、抽出ガスと燃料の供給量を適切に制御することにより、触媒を効率的に活性化させることができるため、排気通路内に設置する場合に比べて始動がより円滑になった。

現在、当社明石工場で社内実証試験を行っており、本発電装置の信頼性や耐久性などを確認した後、VAM放出量が多い炭鉱や低濃度メタンガスの放出量が多いごみ埋め立て地への販売を計画している。

特許 第4885299号

発明の名称：蒸気タービン発電システムの起動方法、蒸気タービン発電システム

発明者：山本 浩義, 杉本 智彦, 鈴木 宏和, 三宅 直樹

—シンプルな起動システムで、熱エネルギーを有効利用—

本発明は、蒸気タービン発電システムをシンプルな構造と制御で起動する技術である。熱媒体を蒸気タービンへ導くバイパス管と起動弁を設け（図1）、これらを利用してタービンを起動する。起動から定格運転までは、以下の手順で行う（図2）。

- ① 起動弁のみを開いて、バイパス管から蒸気をタービンに供給する。
- ② タービンと発電機の回転数を同調用回転数 N_1 まで上昇させる。
- ③ タービンと発電機の回転数を N_1 で保ち、電力変換装置のコンバータ指令回転数が N_1 になる（同調する）ように制御する。

- ④ タービン、発電機とコンバータが同調すると、発電機の回転数が電力変換装置で制御可能となる。ここで主蒸気止め弁を開く。
- ⑤ 主蒸気止め弁を開くと、主蒸気管からも熱媒体がタービンに供給され、電力変換装置が発電機との同調を保ちながら、タービンの回転数を定格回転数 N_2 まで上昇させ、定格運転に入る。

これにより、発電機の起動用モータや発電機の回転数を N_2 に保つためのガバナ機構を用いなくて、シンプルな構造と制御でタービンを起動できる。さらに、本技術を産業機械などからの排熱を利用するバイナリー発電システムに適用した。熱源としては、ゴミ焼却場の排熱や地熱などがあり、今まで利用できずに廃棄していた熱エネルギーを有効利用することで、温室効果ガスの削減に貢献する。

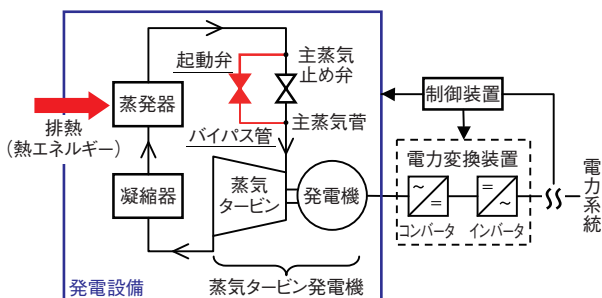


図1 蒸気タービン発電システム

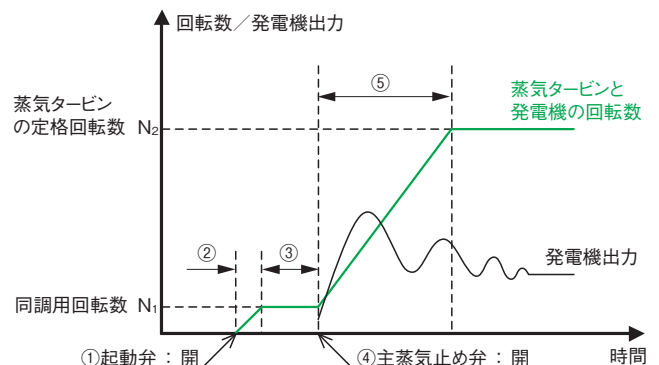


図2 蒸気タービン発電システムの起動方法

事業セグメント別主要製品／生産拠点

事業セグメント	主 要 製 品	主要生産拠点
船 舶 海 洋	<ul style="list-style-type: none"> ・LNG運搬船, LPG運搬船, 油槽船, ばら積み船, コンテナ船, 自動車運搬船, 超高速船, 艦艇, 官公庁船, 海洋構造物 	神戸工場 坂出工場 南通中遠川崎船舶工程有限公司 大連中遠川崎船舶工程有限公司
車 両	<ul style="list-style-type: none"> ・鉄道車両, 新交通システム, モノレール, プラットホームドア ・ニッケル水素電池「ギガセル®」 	兵庫工場 播磨工場 Kawasaki Motors Manufacturing Corp., U.S.A. Kawasaki Rail Car, Inc. (米国)
航 空 宇 宙	<ul style="list-style-type: none"> ・航空機(固定翼機/ヘリコプター), 飛翔体誘導機器, 宇宙関連製品, 電子機器, シミュレータ ・航空機(部分品等), ロケット部分品, 宇宙機器, 標的システム ・航空機整備・改造 	(株)日本除雪機製作所・本社工場 (株)日本除雪機製作所・曙工場 岐阜工場 名古屋第一工場 名古屋第二工場 日本飛行機(株)・横浜工場 日本飛行機(株)・厚木工場
ガスタービン・機 械	<ul style="list-style-type: none"> ・航空機用ジェットエンジン, 航空機用・船用ガスタービンエンジン, 航空機用トランスミッション, エンジン周辺機器 ・ガスタービン発電設備, 熱電供給システム(コージェネレーションシステム), 機械駆動用ガスタービン, ガスタービン移動発電機車 ・陸・船用蒸気タービン, ディーゼル機関, ガスエンジン, 大型減速装置 ・船用推進装置(可変ピッチプロペラ/サイドスラスト/旋回式スラストなど) ・各種空力機械(送風機/圧縮機/天然ガス圧送設備/風洞装置/トンネル換気装置/電気集塵機など) ・空調機器, 汎用ボイラ 	明石工場 西神戸工場 神戸工場 播磨工場 武漢川崎船用機械有限公司 川重冷熱工業(株)・滋賀工場
プ ラ ン ト ・ 環 境	<ul style="list-style-type: none"> ・各種産業用プラント(セメントプラント/化学プラント/繊維プラント/荷役搬送設備/物流システム/FAシステムなど) ・排煙脱硝設備 ・各種産業機械(鋼材自動加工機械/振動機械など) ・蒸気タービン/ガスタービンによる各種産業機械 ・各種陸船用ボイラ, 灰処理設備(事業用発電ボイラ/産業用ボイラなど) ・原子力設備 ・空冷熱交換機 ・都市ごみ焼却設備, 水処理設備 ・粗大ごみ破碎・リサイクル設備, 産業廃棄物処理設備 ・各種貯蔵設備(LNGタンク/LPGタンクなど), 高圧ガス容器, 水圧鉄管, 空港施設 ・ロケット射点設備, 港湾荷役施設, 消防訓練施設, 可動建築物 ・鋼管構造など各種構造物 ・シールド掘進機, トンネル掘削機 ・破碎機, リサイクル用機器, 粉砕機, 鋳鋼製品 	播磨工場 上海中遠川崎重工鋼結構有限公司 安徽海螺川崎裝備製造有限公司 安徽海螺川崎節能設備製造有限公司 (株)アーステクニカ・八千代工場
モ ー タ ー サ イ ク ル & エ ン ジ ン	<ul style="list-style-type: none"> ・二輪車, ATV(四輪バギー), 多用途四輪車, パーソナルウォータークラフト「ジェットスキー®」 ・汎用ガソリンエンジン 	明石工場 加古川工場 Kawasaki Motors Manufacturing Corp., U.S.A. Kawasaki Motores do Brasil Ltda. Kawasaki Motors Enterprise (Thailand) Co., Ltd. P.T. Kawasaki Motor Indonesia Kawasaki Motors (Phils.) Corporation 常州川崎光陽發動機有限公司
精 密 機 械	<ul style="list-style-type: none"> ・建設機械用油圧機器, 産業機械用油圧機器・装置 ・船用舵取機, 船用各種甲板機械 ・産業用ロボット 	明石工場 西神戸工場 Kawasaki Precision Machinery(U.K.)Ltd. 川崎精密機械(蘇州)有限公司 川崎春暉精密機械(浙江)有限公司 Flutek, Ltd. (韓国) Wipro Kawasaki Precision Machinery Private Ltd. (インド)
そ の 他	<ul style="list-style-type: none"> ・各種土木建設機械(ホイールローダ/除雪ドーザ/ロードホウルダンプ/コンクリート舗装機械など) 	(株)KCM本社工場 KCMA Corporation (米国)

本誌掲載記事の抄録文は
当社のインターネットホームページにも掲載しています。
URL : <http://www.khi.co.jp>

川崎重工技報 第173号

2013年3月1日

編集・発行 兵庫県明石市川崎町1番1号
川崎重工業株式会社 技術開発本部

発行責任者 技術開発本部長 牧村 実

発行人 技術開発本部 技術企画推進センター長
崎山 雅行

印刷 大阪府大阪市北区天満三丁目4番12号
株式会社 正巧堂

禁無断転載

事 業 所 所 在 地

東京本社 (〒105-8315)	東京都港区海岸1丁目14番5号	☎(03)3435-2111 Fax. (03)3436-3037
神戸本社 (〒650-8680)	兵庫県神戸市中央区東川崎町1丁目1番3号(神戸クリスタルタワー)	☎(078)371-9530 Fax. (078)371-9568
技術開発本部 (〒673-8666)	兵庫県明石市川崎町1番1号(明石工場内)	☎(078)921-1611 Fax. (078)921-1867
北海道支社 (〒060-0808)	北海道札幌市北区北8条西3丁目32番(8・3スクエア北ビル5階)	☎(011)727-3131 Fax. (011)727-3132
中部支社 (〒450-6041)	愛知県名古屋市中村区名駅1丁目1番4号(JRセントラルタワーズ)	☎(052)388-2211 Fax. (052)388-2210
関西支社 (〒530-0004)	大阪府大阪市北区堂島浜2丁目1番29号(古河大阪ビル)	☎(06)6344-1271 Fax. (06)6348-8289
九州支社 (〒812-0011)	福岡県福岡市博多区博多駅前1丁目4番1号(博多駅前第一生命ビル)	☎(092)432-9550 Fax. (092)432-9566
東北支社 (〒980-0021)	宮城県仙台市青葉区中央1丁目6番35号(東京建物仙台ビル16階)	☎(022)261-3611 Fax. (022)265-2736
中国支社 (〒730-0013)	広島県広島市中区八丁堀3番33号(広島ビジネスタワービル12階)	☎(082)222-3668 Fax. (082)222-2229
沖縄支社 (〒900-0015)	沖縄県那覇市久茂地3丁目21番1号(國場ビル11階)	☎(098)867-0252 Fax. (098)864-2606
岐阜工場 (〒504-8710)	岐阜県各務原市川崎町1番地	☎(058)382-5712 Fax. (058)382-2981
名古屋第一工場 (〒498-0066)	愛知県弥富市楠3丁目11番地	☎(0567)68-5117 Fax. (0567)68-5090
名古屋第二工場 (〒490-1445)	愛知県海部郡飛鳥村金岡7番地4	☎(0567)55-0800 Fax. (0567)55-0803
神戸工場 (〒650-8670)	兵庫県神戸市中央区東川崎町3丁目1番1号	☎(078)682-5001 Fax. (078)682-5503
兵庫工場 (〒652-0884)	兵庫県神戸市兵庫区和田山通2丁目1番18号	☎(078)682-3111 Fax. (078)671-5784
西神工場 (〒651-2271)	兵庫県神戸市西区高塚台2丁目8番1号	☎(078)992-1911 Fax. (078)992-1910
西神戸工場 (〒651-2239)	兵庫県神戸市西区榎谷町松本234番地	☎(078)991-1133 Fax. (078)991-3186
明石工場 (〒673-8666)	兵庫県明石市川崎町1番1号	☎(078)921-1301 Fax. (078)924-8654
加古川工場 (〒675-0112)	兵庫県加古川市平岡町山之上向原170番地	☎(079)427-0292 Fax. (079)427-0556
播磨工場 (〒675-0155)	兵庫県加古郡播磨町新島8番地	☎(079)435-2131 Fax. (079)435-2132
坂出工場 (〒762-8507)	香川県坂出市川崎町1番地	☎(0877)46-1111 Fax. (0877)46-7006

海 外 事 務 所

北京事務所	中華人民共和国 北京市建国門外大街1号 国贸写字楼1座2602室	☎ 86-10-6505-1350 Fax. 86-10-6505-1351
台北事務所	台湾 台北市仁爱路二段99号 福記大樓15樓	☎ 886-2-2322-1752 Fax. 886-2-2322-5009
德里事務所	5th Floor, Meridien Commercial Tower, 8 Windsor Place, Janpath, New Delhi 100 001, India	☎ 91-11-4358-3531 Fax. 91-11-4358-3532
モスクワ事務所	Office 432 (4th floor) , Entrance 6, Krasnopresnenskaya nab. 12, 123610, Moscow, Russian Federation	☎ 7-495-258-2115 Fax. 7-495-258-2116

現 地 法 人 事 務 所

Kawasaki Heavy Industries (U.S.A.), Inc.	60 East 42nd Street, Suite 2501, New York, NY 10165, U.S.A.	☎ 1-212-759-4950 Fax. 1-212-759-6421
Kawasaki Heavy Industries (U.S.A.), Inc. Houston Branch	333 Clay Street, Suite 4310, Houston, TX 77002-4109, U.S.A.	☎ 1-713-654-8981 Fax. 1-713-654-8187
Kawasaki do Brasil Indústria e Comércio Ltda.	Avenida Paulista, 542-6 Andar, Bela Vista, 01310-000, São Paulo, S.P., Brazil	☎ 55-11-3289-2388 Fax. 55-11-3289-2788
Kawasaki Heavy Industries (U.K.) Ltd.	4th Floor, 3 St. Helen's Place, London EC3A 6AB, U.K.	☎ 44-20-7588-5222 Fax. 44-20-7588-5333
川崎重工諮詢(上海)有限公司	中華人民共和国 上海市黄浦区南京西路288号 創興金融中心10樓	☎ 86-21-3366-3100 Fax. 86-21-3366-3108
Kawasaki Heavy Industries (Singapore) Pte. Ltd.	6 Battery Road, #23-01, Singapore 049909	☎ 65-6225-5133 Fax. 65-6224-9029
Kawasaki Heavy Industries Middle East FZE	Dubai Airport Free Zone, Bldg. 6W, Block-A, Office No. 709, P.O. Box54878, Dubai, U.A.E.	☎ 971-4-214-6730 Fax. 971-4-214-6729

川崎重工業株式会社

TECHNICAL REVIEW

