



## 更に進化した世界最高効率41.5% のガスエンジンコージェネレーション 発電システム

The Further Progressed Gas Engine  
Co-generation System with World's Highest  
Efficiency of 41.5 %

野口 知 宏\*<sup>1</sup>  
Tomohiro Noguchi

白石 匡 孝\*<sup>2</sup>  
Masataka Shiraishi

高松 幹 夫\*<sup>2</sup>  
Mikio Takamatsu

逢坂 靖 彦\*<sup>3</sup>  
Yoshihiko Osaka

遠藤 浩 之\*<sup>4</sup>  
Hiroyuki Endo

田中 健 吾\*<sup>5</sup>  
Kengo Tanaka

今回開発した新機種は、従来機種の発電効率40.4%に対して、ロングストローク化を軸とした燃焼室形状の最適化による燃焼性能向上、バルブタイミング最適化・ターボチャージャー高性能化による損失の低減を行い、発電効率を更に1.1%上乘せし、中型クラスのガスエンジンとしては世界最高の41.5%を実現した。同時にコージェネレーションシステムとしてコンパクト化とメンテナンス性向上に注力し、製品力の向上に努めた開発を行った。

### 1. はじめに

近年、環境破壊の問題から、省エネルギー化に向けた様々な取り組みが行われている。特に、2005年2月に京都議定書が発効されたことから、CO<sub>2</sub>削減に関する取り組みが加速すると思われる。天然ガスを用いたコージェネレーションシステムは、高いエネルギー効率と、需要に合わせて運用できる分散型エネルギー供給システムとしての機能性、排気ガスがクリーンであるなどの優位性により従来から注目を集めている。今後、更にその需要が高まることが考えられる一方で、熱需要の多いユーザへのコージェネレーションシステム導入は一巡していることから、熱よりも電気を必要とするユーザにも対応できる高発電効率機種の開発が不可欠となっている。

当社は以前から大阪ガス(株)と共同でガスエンジンの高効率化に関する開発を行っている。2000年には、副室希薄燃焼方式にミラーサイクルを適用したガスエンジンGSRミラーサイクルシリーズ(以下:GSRミラー)を開発し、ガスエンジンとしては世界で初めて発電効率40%を達成した。2002年には、GSRミラーを更に高効率・高出力化したガスエンジンGSRアドバンスミラーサイクルシリーズ(以下:GSRアドバンスミラー)を開発し、発電出力1MW以下の中型クラスで、それぞれ世界最高の40.4~40.8%の機種をラインナップした。GSRミラーとGSRアドバンスミラーは合わせて、すでに全国で100台以上の納

入実績を上げ、ユーザより好評を頂いているが、両社では現在もガスエンジンの更なる高効率のための開発に取り組んでいる。

本稿において大阪ガス(株)と共同で開発し、中型クラスのガスエンジンとしては世界最高の発電効率41.5%を達成したGS6R2ミラーサイクル(以下:GS6R2ミラー)と、このエンジンを用いたコージェネレーションシステムの開発について述べる。

### 2. 環境にやさしいガスエンジンコージェネレーションシステム

#### 2.1 天然ガスとガスエンジンの特徴

ガスエンジンの燃料としては、主に天然ガスや都市ガス(12A, 13A)が用いられる。天然ガス、都市ガスはメタン(CH<sub>4</sub>)が主成分であり、他の化石燃料と比較して炭素原子(C)に対する水素原子(H)の比率が4倍と高いことから燃焼させると水(H<sub>2</sub>O)になる割合が高く、地球温暖化の原因となる二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の生成量が少ない。水素比率はプロパン(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)が2.7倍、ガソリン(C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>)が2.3倍、ディーゼル油(C<sub>16</sub>H<sub>30</sub>)が1.9倍であり、化石燃料のなかでは天然ガスが最も高く、燃料として使用した場合のCO<sub>2</sub>削減効果が大きい。さらに、燃料中に硫黄分が含まれないので酸性雨の原因となる硫酸化合物(SO<sub>x</sub>)、健康に悪影響を与える粒子状物質(PM: Particulate Matter)の発生が無いこと、人体に有害な窒素化合物(NO<sub>x</sub>)の排出も少なく抑えられるなど、天然ガ

\*1 汎用機・特車事業本部エンジン技術部大型エンジン設計課

\*2 汎用機・特車事業本部エンジン技術部エンジン実験課

\*3 汎用機・特車事業本部エンジン技術部プラント技術課

\*4 技術本部長崎研究所内燃機・油機研究推進室 工博

\*5 技術本部長崎研究所内燃機・油機研究推進室

スは低公害な燃料である。

### 2.2 コージェネレーションによるエネルギーの有効利用

コージェネレーションとは天然ガスなどの一つのエネルギー源から、電気や温水、蒸気などの複数のエネルギーを取り出すことで、廃棄するエネルギーを極力少なくするシステムである。エネルギー効率が高くなるため、結果的にCO<sub>2</sub>に代表される温室効果ガスの排出抑制につながると同時に、エネルギー費用の削減といった経済的メリットも得ることができる。

## 3. エンジンの技術開発

### 3.1 エンジン主要諸元

図1にGS6R2ミラーの外観を示す。表1にGS6R2ミラーの主要諸元と同じ6気筒の機種であるGS6Rミラー、GS6Rアドバンストミラーの主要諸元を示す。GSRミラーなどと比較してストロークを180 mm 220 mmと延長していることが特徴である。発電効率は41.5%であり、中型クラスの人気エンジンの中で

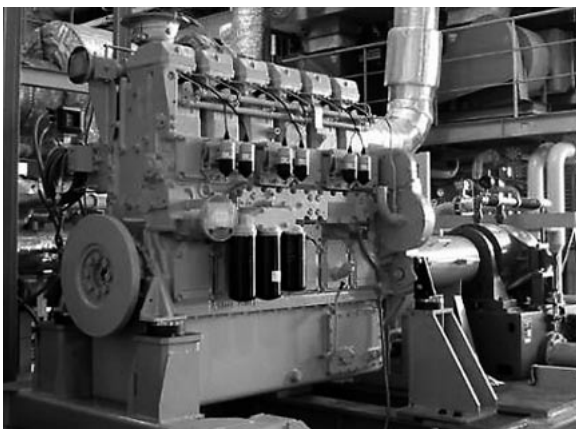


図1 GS6R2ミラーのエンジン外観 大阪ガス(株)試験場に設置された試験機。性能試験・耐久試験を共同で実施した。

表1 エンジンの主要諸元の比較

	GS6R ミラー	GS6R アドバンストミラー	GS6R 2 ミラー
エンジン様式	直列6気筒	直列6気筒	直列6気筒
ボア (mm)	170	170	170
ストローク (mm)	180	180	220
総排気量 (L)	24.5	24.5	30.0
回転数 (min <sup>-1</sup> )	1200	1200	1200
着火方式	副室火花	副室火花	副室火花
Pme(BMEP) (MPa)	1.20	1.32	1.32
発電出力 (kW)	280	305	380
熱出力 (kW)	241	252	330
発電効率 (%)	40.0	40.4	41.5
総合効率 (%)	74.4	73.8	77.6
NOx(O <sub>2</sub> =0%) (ppm) 簡易脱硝後	150以下	150以下	150以下

世界最高の効率を実現している。ロングストローク化に伴い排気量が増加したため、同じ正味平均有効圧力(Pme)の直列6気筒エンジンで比較すると、発電出力が305 kW 380 kWと大幅に増大している。図2に、代表的なガスエンジンの発電出力と発電効率の関係を示す。この図から、近年発売された高効率ガスエンジンの中でも、GS6R2ミラーが同クラスのガスエンジンと比較して高い発電効率を誇ることがわかる。

### 3.2 ミラーサイクルについて

ミラーサイクルとは、オットーサイクルをベースに、圧縮比よりも膨張比を大きくした内燃機関の燃焼サイクルである。図3にミラーサイクルの概念図を示す。通常、吸気行程のピストン下死点近傍で閉じられる吸気弁の閉まるタイミングを早く又は遅く変更することにより、幾何学的圧縮比(=膨張比)を高くしたまま実圧縮比を低くすることができる。膨張行程と圧縮行程の仕事量の差がより大きくなるので、エンジンの高効率化につながる。また、ガスエンジンなどの予混合燃焼機関において高圧縮比化した場合、ノッキングと呼ばれる異常燃焼が生じてしまうため、それを避ける

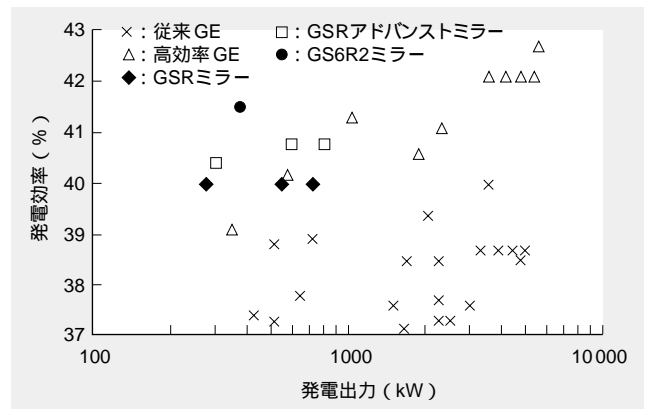


図2 ガスエンジンの発電効率と発電出力の関係 GS6R2ミラーは中型クラスでは、世界トップレベルの実力を持つ。

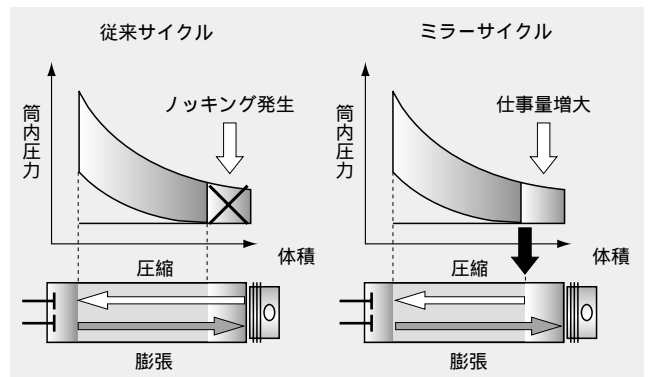


図3 ミラーサイクルの概念 圧縮行程より膨張行程を大きくすることで、ノッキングを避けながら、より多くの燃焼エネルギーを回収できる。

手段としても非常に有効である。最近の高性能ガスエンジンには広く採用されている技術である。

### 3.3 ロングストローク化による高効率化

3.1項で述べたとおり、ロングストローク化により、エンジン排気量がGS6Rアドバンスミラーと比較して増加するため、発電出力を増大させることができた。一方で、両エンジンのPmeは同一であるため、エンジンの主要部分で各部品が受ける摩擦損失には大差がないと考えられる。すなわち、ロングストローク化されたGS6R2ミラーのほうが、発電出力に占める摩擦損失の割合が少なく、エンジンの出力がより出しやすいことになるので、高効率化に対して有利である。また、燃焼室内の無駄容積をGS6Rミラーなどとほぼ同等としているので、行程容積の増大により、無駄容積割合が低減し、未燃ガスの排出を少なく抑えることができる。よってロングストローク化は、発電効率の向上と排出ガスの低公害化に大きく寄与している。

### 3.4 燃焼室形状の最適化

ロングストローク化に伴い行程容積が増加しているため、圧縮比をGSRミラーなどと同じに設定した場合、燃焼室形状を変更して対応する必要がある。ガスエンジンの燃焼において、燃焼室形状の影響は大きい。そのため、GS6R2ミラーでも形状の最適化を行った。複数の燃焼室形状に対して性能試験を実施し、効率の変化の把握と計測した筒内圧波形の解析を行うことで、最適な燃焼室形状を見出した。これにより燃焼効率の指針である等容度の向上と未燃ガス量の低減が実現でき、発電効率の向上につながった。図4はGS6RミラーとGS6R2ミラーの熱発生率を示す。GS6R2ミラーのほうが、熱発生が早く終了し、等容度が高いことが分かる。

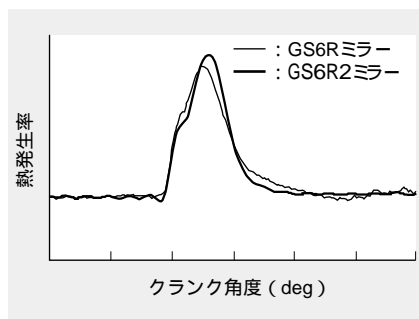


図4 熱発生率の比較 GS6R2ミラーの方が、燃焼している期間が短く効率の良い燃焼をしている。

### 3.5 吸気バルブリフト、バルブタイミングの最適化

ロングストローク化に伴い、シリンダ内へ供給すべきガスと空気の混合気量が増加した。その結果、供給混合気量に対する吸気バルブの時間開口面積が不足し、ポンプ損失が増大したため、その改善の手段が必要となった。シリンダ径やシリンダヘッド構造はGSRミラーなどと同じであるため、吸気バルブの大径化や形状変更が困難である。そこで、供給混合気量の確保とポンプ損失の低減を目的として、給気側のカムリフト量をGSRミラーなどと比較して増大したカムを用いることで対応した。同時に吸気バルブを閉じるタイミングも変更し、ミラーサイクルに対する最適化を行った。

### 3.6 高性能過給機の開発

3.5項で述べた混合気量の増加への対応として、より高い過給圧で混合気を供給するために、より高効率な過給機が必要となった。そこでGS6R2ミラー向けに、過給機のコンプレッサ、タービンの部品に新技術を投入することで、高圧力比でも高効率かつ安定した過給特性をもつ高性能過給機を開発した。過給機効率は62%であり従来品に対して2%の向上が認められた。さらに、タービン絞りの最適化も実施し、エンジン性能と運転の安定性の両立を図った。

### 3.7 高耐久性部品の開発

GS6R2ミラーはGS6Rアドバンスミラーと同じPmeであるが、出力増大に伴い発熱量が増大しているため、エンジンの各部品への熱負荷は厳しくなる。したがって、各部品には、更なる耐久性が要求される。

特に耐久性を必要としたシリンダヘッドとピストンに対し、冷却能力強化を中心に対策を実施した。両部品について、実際に温度計測を行い、従来部品と比較

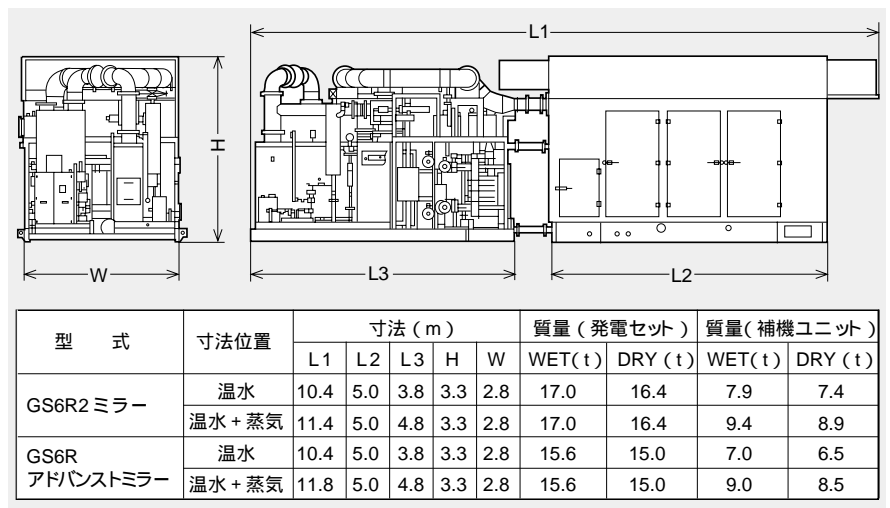


図5 コージェネレーションシステムの外観及び寸法 従来機と外観寸法を同一としていることが特徴である。機器の容量アップによる重量の増加も最低限に留めた。

して数十度の温度低減効果が得られることを確認した。それらを組み込んだ試験機にて8000時間以上の連続耐久試験を実施した。試験後、分解・計測を行い、シリンダヘッド、ピストン及びその他各部品の耐久性に問題がないことを確認した。

#### 4. ガスエンジンコージェネレーションシステム

##### 4.1 システムとしてのパッケージ化

当社では、発電セットとしてエンジン、発電機、始動用バッテリー、補給用オイルタンク、発電機制御盤、ガス弁機器、ガスコンプレッサなどをエンクロージャ内に配置し、補機ユニットとして蒸気ボイラまたは温水ボイラ、熱交換器、マフラ、冷却水循環ポンプ、脱硝装置、脱硝触媒などの機器を一つの台板の上に搭載し、両者をコージェネレーションシステムとしてパッケージ化している。

今回、GS6R2ミラーのパッケージ化にあたっては、コンパクト化とメンテナンス性の両立を考慮した。

##### 4.2 システムのコンパクト化

GS6R2ミラーではロングストローク化によりエンジン単体の高さがGS6Rアドバンスミラーと比較して高くなると同時に、エンジンの出力増大に伴い発電機の体格も大きくなっている。しかし、システム納入時に低床台車での一括輸送ができるように、発電セットとしての高さは従来タイプと同様に3300mmとした。これにより、現地搬入時の上部ダクト部の分解、再組立を省略できるため現地工事短縮とコストダウンを図ることができた。今回、GS6R2ミラーで採用している発電機は、体格が大きくなったことでGD<sup>2</sup>が増加するため、負荷投入や負荷遮断などのエンジンの動特性向上に寄与している。また、発電機自体の効率向上もあり、システム全体に対して大きなメリットをもたらしている。

一方、補機ユニットについては、出力が増大したことにより熱量が増え、ボイラなどの補機類の容量クラスが一つ上がった。しかし、それぞれの補機に対する配置の最適化と配管ルートの見直しを行うことで、従来と同じサイズの台板にユニットとしてまとめることができた。

エンジン、発電機、補機類が、すべて従来の機器より大型化しているが、システムとしての寸法を变えることなく、重量の増加も最低限に留めている。図5にシステムの外観及び寸法の比較を示す。

##### 4.3 メンテナンス性の考慮

通常、コージェネレーションシステムはユーザに納入されると10年以上にわたり数万時間という長期間使用される。機器の性能、信頼性を維持するために、

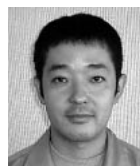
消耗品である点火プラグや潤滑油の交換、発電機のグリスアップといった軽整備から、シリンダヘッドやピストンを交換する重整備まで、定期的なメンテナンスを行うことが必須である。自動車のエンジンとは異なり、オーバホールなどはシステムを納入した現地で行うことが多いので、エンクロージャのコンパクト化は作業性の犠牲を伴い、メンテナンス担当者の負担になってしまう。GS6R2ミラーのパッケージではエンジンや発電機のメンテナンス作業をよりスムーズに行えるように、メンテナンス部門やユーザからの意見を取り入れ、エンクロージャ内の機器配置に反映することで、メンテナンス工数の低減に配慮を行った。

#### 5. ま と め

今回、大阪ガス(株)と共同開発したGS6R2ミラーは両社の解析技術、評価技術を用いて中型クラスの高スエンジンとして世界最高の発電効率41.5%を達成し、2005年4月に販売を開始した。今後は、燃焼の改善などによる発電効率の向上と耐久性を含めた信頼性の更なる確保を目指したエンジンの開発を進めていく。

GS6R2ミラーのコージェネレーションシステムとしてのパッケージ化は、設計当初からコンパクト化とメンテナンス性の両立を念頭に置き進めた。その結果、GS6Rアドバンスミラーのシステムと同一のスペースに設置可能となり、同時にメンテナンス工数を抑えることでランニングコストの低減を実現した。今後は、ユーザのニーズに見合う範囲内での簡素化や各種制御機器の統合などを進めることでコストダウンを図り、市場要求に応えていく。

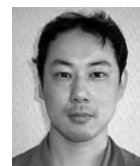
当社では、ユーザのCO<sub>2</sub>排出やエネルギー費用の削減活動のお役に立てる製品作りのため、今後ともエンジンの高性能化、低公害化とコージェネレーションシステムとしてのパッケージ化能力の向上に努めていく所存である。



野口知宏



白石匡孝



高松幹夫



逢坂靖彦



遠藤浩之



田中健吾