特　集　論　文

世界最高効率三菱リーンバーンガスエンジン

MITSUBISHI Lean-burn Gas Engine of the Highest Thermal Efficiency in the World

角　田　　明　　下　田　裕　巳　　高　石　龍　夫

当社では小出力のGSRから大出力のMACH-30Gまでの低NOxリーンバーンガスエンジンをラインナップし，広い出力レンジをカバーしている．MACH-30Gは3 650～5 750kWの出力で点火プラグに代わる強力な着火能力を有するマイクロパイロットを特徴とし，GSRはミラーサイクル機構を有することを特徴として，コンパクトにパッケージングされ，280～845kWをカバーする．各々同一出力クラスで世界最高レベルの発電端効率44％と40％を達成した．現在，ともに20台以上が稼動中であり高い性能と信頼性が評価されている．

1．は　じ　め　に

1．1　高効率ガスエンジン開発の経緯

近年CO_2削減の必要が高まり発電用エンジンにおいてもCO_2，NOx，ばい塵等の有害排出物の少ないガスエンジンの需要が伸びている．このような背景の下，当社では世界最高の発電効率を目標に新技術を投入した低NOxリーンバーンガスエンジンの開発を実施し，この度その成果として5 000 kWクラスでは微量液体燃料を着火源としたパイロット着火方式のMACH-30Gを，また1 000 kW以下ではミラーサイクルを適用したGSRを各々世界最高の発電効率で市場投入し，好評を得て受注を伸ばしているので以下に紹介する．

1．2　三菱重工のガスエンジンラインナップ

表１に主要目を従来機種と比較して示す．MACH-30Gは平均有効圧力を13 barから20 barへとディーゼル機関と同等迄向上し，またパイロット着火方式と燃焼制御システムの導入により発電効率は従来の39.3 %から44.0 %に改善された．**図１**にMACH-30Gプラントの外観を示す．

GSRガスエンジンについては膨張比増大と高効率過給機でサイクル効率を向上するミラーサイクル化により従来機の発電効率35 %に対して５ポイント高い40 %を達成した．

MACH-30G とGSRにより当社のガスエンジンは小～大出力まで高効率のラインアップをそろえることができた．

2．MACH-30Gの特徴

MACH-30Gの特徴を以下に示す．

2．1　パイロット着火方式

図２にパイロット着火方式の特徴を従来の火花点火方式と比較して示す．パイロット着火方式の特徴は従来の点火プラグでの着火に替え，パイロットインジェクタから微量（熱量比１％以下）の液体燃料を噴射し副室内のガスを着火する．パイロット燃料は微量だが点火プラグに比し約8 000倍という強力な着火エネルギーを有するため燃焼が安定し効率が向上する．さらに強い着火エネルギーのおかげで火花着火機関で必要な副室内に濃い混合気を作る必要が無く，副室内でのNOxの生成を低減できたので他社製の半分以下に相当する業界初のNOx 100 ppm（O_2＝０％）仕様を実現し，脱硝装置無しで地域規制を下回ることができる．

パイロット着火用燃料弁は同時に点火プラグの寿命が1 000～2 000時間であるのに対し，倍以上の4 000時間ごとのメンテナンスで対応可能である．また強力な着火エネルギーを利用してバイオガス，廃棄物ガス等の低カロリーの多様

表１　三菱重工ガスエンジン主要諸元

	MACH-30G		GSR	
	従来型	パイロット着火	従来型	ミラーサイクル
発電端出力 (kW)	2 400～3 750	3 650～5 750	320～1 015	280～845
シリンダボア径／ストローク (mm)	300/380	300/380	170/180	170/180
回転数 (rpm)	720/750	720/750	1 500/1 800	1 200/1 500
正味平均有効圧力 (bar)	13	20	11	12
発電効率 (%)	39.3	44.0/42.5	35	40
NOx (ppm，O_2=０%)	200	200/100	150	150 (脱硝付)
特　徴	副室付希薄燃焼 火花着火	パイロット着火	副室付希薄燃焼 火花着火	ミラーサイクル

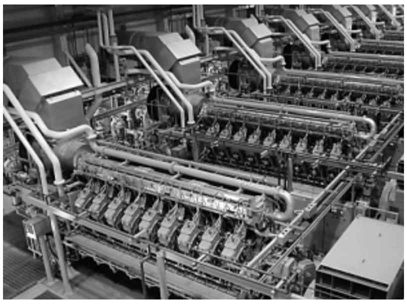


図１　MACH-30G外観　国内某所プラントに設置されたMACH-30Gの外観.

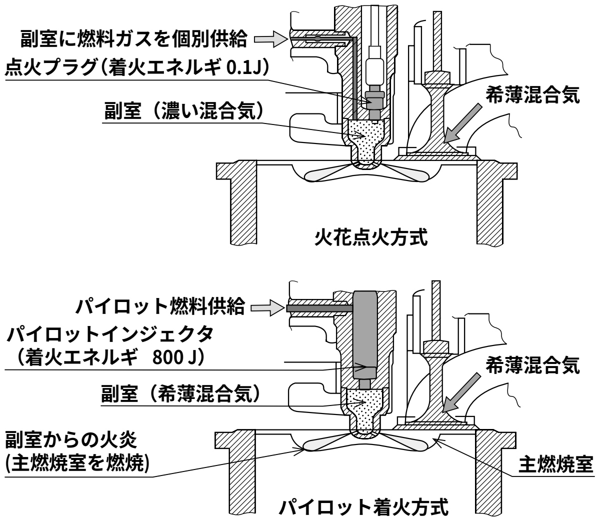


図２　パイロット着火方式と火花点火方式の比較　従来方式の火花点火に代わり，MACH-30Gは着火エネルギが従来の8 000倍になるパイロット着火方式を採用．

なガスも安定して燃焼することができる．

2．2　燃焼コントロールシステム，M-RICS（Mitsubishi Real time Intelligent Control System）

図３にMACH-30Gの電子燃料供給系と燃焼診断ユニットによる燃焼コントロールシステム，M-RICS（M-RICSは当社の登録商標）を示す．M-RICSは，各シリンダに取り付けられた筒内圧力センサで直接センシングして得られた燃焼圧力により燃焼状態を９段階に診断し，メインコントローラDIASYS（DIASYSは当社の登録商標）を介して各シリンダ個別にパイロット燃料・ガス燃料の量とタイミングを自動調整することで燃焼を制御する．従来の振動計型ノックセンサ等を用いた方式に比べ，はるかに高精度で細かい診断が可能であり，コモンレールを用いた電磁弁式パイロット燃料弁と電磁弁式ガス弁により高い応答性を持って毎サイクルの制御が可能なので，下記の特徴を有す（特許申請中）．

(1)　全シリンダ燃焼均一化による効率改善

燃焼圧力診断結果に基づいてパイロット噴射時期を自動調整し，各シリンダの燃焼を常時同一に制御することが実現できたため，全シリンダとも最高効率点での運転が可能で発電効率が向上した．

(2)　カロリー変動に対する最適制御

M-RICSは使用燃料のカロリー変動や部品の経年劣化に対しても燃焼圧力自体を診断制御しているので，常時最適燃焼に自動調整され，長期間にわたって高効率を維持可能である．既に４種類の異なるカロリーのLNGを用いたプラントが順調に稼動中である．

(3)　異常燃焼の回避制御

図４はM-RICSでとらえたノッキング時の筒内圧力波形と他社が採用している振動計ノックセンサ波形の例を比較したものを示す．M-RICSは直接筒内圧力をセンシングしているので，高精度で異常燃焼を診断しパイロット燃料量やガス量等を制御して異常燃焼を回避できる．さらに発電用エンジンとして重要な“問題発生時でもエンジンを止めずに発電が継続できる”自動シリンダカット機能を備えているので万一の突発事象に対しても余裕を持って対応が可能である．

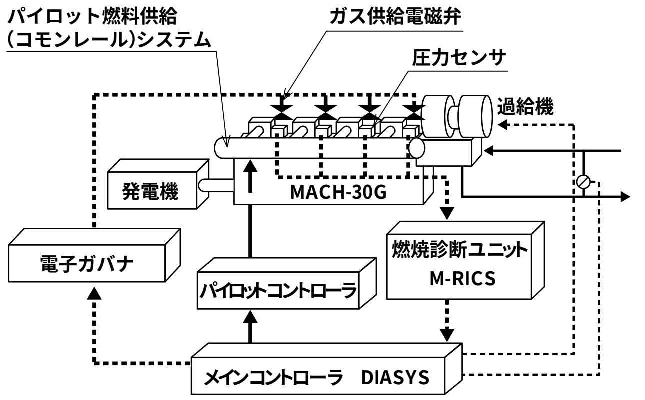


図３　電子燃料供給系と燃焼診断システムM-RICS（Mitsubishi Real time Intelligent Control System）
メインコントローラDIASYSを用いてエンジンの燃焼状態を常に最適制御できるM-RICS.

(4)　異常診断予防保全機能

MACH-30Gの遠隔監視システムではM-RICSの燃焼診断データを当社監視センターでモニタしている．したがって従来の温度・圧力レベルによる異常診断に比べ，はるかに正確で迅速な異常診断が可能となっているが，今後予防保全機能を更に充実していく予定である．

2．3　生産・受注実績

表２にMACH-30Gの受注，納入実績を示す．平成13年度は５プラント19台を受注し，その初号機・２号機が平成14年10月に当社横浜製作所内のMYP（MHI Yokohama Power）にて営業運転に入った．**タイトル図**にMYP全景を示す．平成15年３月までに19台すべてが引き渡され，順調に稼動中である．さらに海外を含む11プラント16台を受注し，合計受注台数は35台となった．

2．4　今後のMACH-30Gの展開

(1)　発電効率向上

MACH-30GはGSRにて開発済のミラーサイクルを含めた更なる発電効率向上試験を実施中である．

(2)　総合効率向上

蒸気ニーズの大きい客先にもメリットを創出すべく当社独自のボイラ技術による従来の2.5倍の蒸気発生が可能な

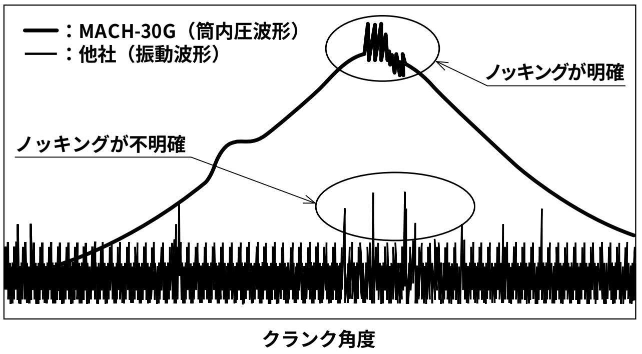


図４　ノッキング時の筒内圧波形と振動波形の比較　筒内圧波形は振動値よりも燃焼状態を正確に把握できる．

ダクトバーナ，MACH-DUET（Duct Burner for Utility Efficient Technology）を開発，実証試験を終了した．

（3）遠隔運転

標準装備としている遠隔監視を更に発展させた遠隔地からの運転制御についてもシステム開発が終了し，実証設備による試験を計画中であり，今後の客先ニーズにこたえられるよう準備している．

3．ミラーサイクルガスエンジンコージェネレーションパッケージ

3．1　GSRミラーサイクルガスエンジン

GSRミラーサイクルガスエンジンは高効率，低NOxを特長とするGSR希薄燃焼ガスエンジンをベースに，ディーゼルエンジンに匹敵する発電効率を目指し開発した．燃焼サイクルにミラーサイクルを採用し高膨張比化を図るとともに過給機の高効率化，燃焼室形状の最適化等によりこのクラス世界最高の発電効率である40％を達成している．

3．2　コージェネレーションパッケージ

（1）概要

ミラーサイクルガスエンジン発電装置は大阪ガス(株)との共同開発によって商品化され，平成13年4月以降市場に投入されてきた．総合効率は通常の希薄燃焼ガスエンジンコージェネレーションパッケージ（従来タイプ）と大差ないが，発電端効率が従来タイプのものより約5％アップすることから電力供給を主眼とした客先向けに導入が続いている．平成15年3月時点で19台が稼動中であり，現在試運転中のものも含め本年10月までにさらに19台の納入を予定している．以下にパッケージの概要を説明する．

（2）パッケージ化

エンジン周りのコージェネレーションシステムの構成機器としては，エンジン，発電機，始動用蓄電池，ポンプ，熱交換器，消音器，ボイラ，ガスコン等があり膨大なバリエーションとなるが，基本システムをベースに標準化することで客先仕様への迅速な対応を可能としている．

ガスエンジンを核としたコージェネレーションシステムは温水回収仕様と温水＋蒸気回収仕様の2とおりがある．そのため，両システムの共通部分と異なる部分を考慮してユニット化を行い，発電機を含むユニット（発電セット）と熱回収機器を含むユニット（補機ユニット）の構成とした．補機ユニットは温水回収仕様のものと温水＋蒸気回収仕様の2とおりを準備している．

発電セットはエンジン，発電機，始動用蓄電池，潤滑油槽，発電機制御盤，ガス弁機器，ガスコンプレッサ等の機器を搭載している．一方，補機ユニットは，蒸気ボイラ又は温水ボイラ，熱交換器，消音器，冷却水循環ポンプ，脱硝装置，脱硝触媒等の機器を搭載している．**図5**に温水回収仕様の系統図，**図6**に温水＋蒸気回収仕様の系統図を示す．

標準パッケージの設計に当たっては，メンテナンス性を考慮し，かつコンパクトに収めることに主眼をおいて設計を行った．あわせて，従来機種を取り扱ってきた中でのメ

表2　MACH-30Gの受注，納入実績

		H12	H13	H14	H15	運転実績（h）
プロトタイプ(6シリンダ)	：1台					約8000
MHI横浜パワー向	：2台					約5000
国内向	：7台					約4000
国内某所向	：10台					約2000

H13年度受注台数　国内5プラント19台
H14年度受注台数　国内10プラント15台，海外1プラント1台
(注) 運転実績は平成15年7月現在の時間

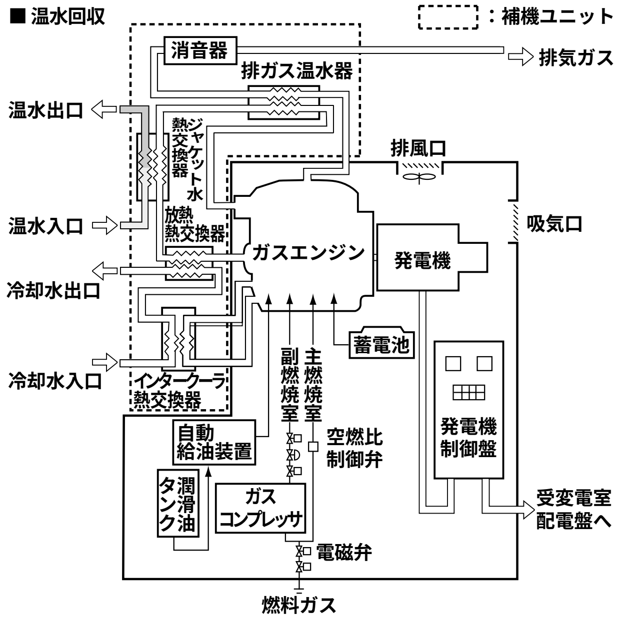


図5　温水回収仕様の系統図　温水回収の場合の補機ユニット系統．

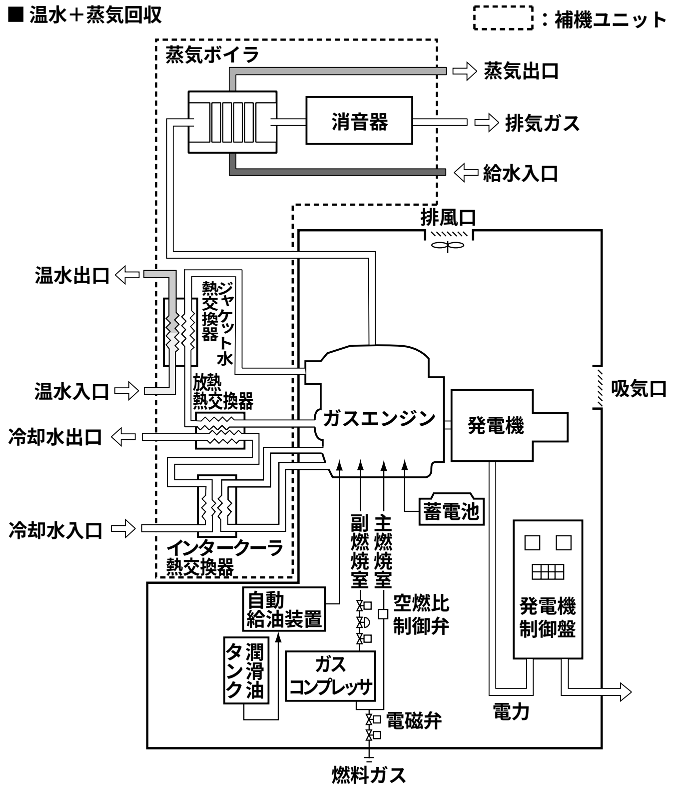
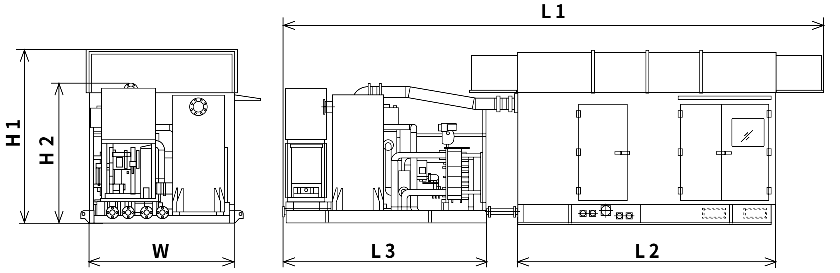


図6　温水＋蒸気回収仕様の系統図　温水と蒸気を回収する場合の補機ユニット系統．



型式	寸法位置	寸法（m）						質量（発電セット）		質量（補機ユニット）	
		L1	L2	L3	H1	H2	W	WET (t)	DRY (t)	WET (t)	DRY (t)
GS6R	温水	10.4	5.0	3.8	3.3	2.8	2.8	17.0	16.5	8.0	7.5
	温水＋蒸気	11.7	5.0	4.8	3.3	3.9	2.8	17.0	16.5	11.0	10.0
GS12R	温水	10.6	5.7	3.2	3.3	4.1	3.0	23.5	22.0	8.0	7.5
	温水＋蒸気	12.4	5.7	5.0	3.3	4.3	3.0	23.5	22.0	11.0	10.0
GS16R	温水	12.6	6.3	3.5	3.3	4.1	3.0	27.0	25.5	10.0	9.0
	温水＋蒸気	13.3	6.3	5.0	3.3	4.4	3.0	27.0	25.5	11.6	11.0

図7　パッケージ外観及び寸法　パッケージは発電セットと補機ユニットから成り，非常にコンパクトである．

図8　稼動中のGSRパッケージ　温水回収仕様で稼動中のGS12Rの外観．

ンテナンス部門，ユーザからの要望，意見，改良点も織り込むことを考慮した．ユニット化を行うことによって，機器据付け時に発電セットと補機ユニットを接続するだけで，二次側の取合い（冷却水配管系，温水回収配管系，蒸気回収配管系，ドレン他）以降を現地で施工するだけとなり，現地工程の大幅な短縮が可能となった．

パッケージの外観及び寸法等について**図7**に示す．また**図8**には実際に納入されたGSRパッケージの外観を示す（GS12Rミラーサイクル560 kW，温水回収仕様の例）．

（3）ユニット化における考慮点

従来タイプの発電装置は高さが3 300 mmを超えていたため輸送時発電セットの上部ダクト部分を分割する必要があった．本機では発電セットの高さを3 300 mm以下とし，低床台車での一体輸送が可能となったので，現地搬入の際にダクトの取り外し，再組立ての必要が無くなりコストダウン，現地工程短縮を図ることができた．

一方，補機ユニットについては，エンジンごとに1 200 min^{-1}（60 Hz）と1 500 min^{-1}（50 Hz）用のユニットが共通化できるよう考慮した．また，温水回収側の熱交換器の二次側温度設定については，これまでのコージェネレーションパッケージの納入経験により，汎用性のある温度範囲（83～88 ℃，吸収式冷凍機，ジェネリンク等により要求される範囲）に設定している．また，ヒートバランスは環境によって変化するので，熱的な裕度については，熱交換器では15 %等を考慮している．

（4）今後のパッケージの展開

前述のとおりエンジン３機種（GS6R，GS12R，GS16R）についてそれぞれ，発電セット，温水回収仕様補機ユニット，温水＋蒸気回収仕様補機ユニットの標準化を行った．平成14年11月のパッケージ見直し以来，既にGS6Rは５台，GS12R用は６台，GS16R用は４台の受注があり，現在製作及び試運転中である．今後は補機ユニットについて，更なるコンパクト化を図って，市場ニーズにこたえていくとともに出力アップも図っていくことにしている．

4．まとめ

MACH-30Gは従来ガスエンジンを上回る低公害性を有しながらマイクロパイロットによる大幅な効率向上として発電端効率44 %を達成した．各プラントにて安定した運転実績を継続しており，客先からも評価を頂いている．

またGSRミラーサイクルガスエンジンコージェネレーションパッケージはミラーサイクルによる効率向上で40 %を達成し，かつ標準化パッケージを設定することにより，納期短縮,低コスト化が図られ今後多くの受注が期待されている．また，標準パッケージをベースに客先要求事項をオプション化した対応も可能である．

現在はマイクロパイロット，ミラーサイクル，各々の技術を統合したガスエンジンのラインナップをそろえるべく開発を進めておりディーゼルエンジンを凌駕する高い効率を広い出力レンジで達成する所存である．

また，バイオガスや廃棄物ガスに対応した発電プラントも予定しており，地球温暖化防止に寄与したいと考えている．

参考文献

（1）中野ほか，高出力ガス機関KU30GAの開発，三菱重工技報 Vol.38　No.4（2001-7）
（2）小田ほか，三菱重工における分散型電源，三菱重工技報 Vol.39　No.3（2002-5）

角田明
横浜製作所
原動機技術部次長

下田裕巳
汎用機・特車事業本部
エンジン技術部主席

高石龍夫
技術本部
長崎研究所
内燃機・油機研究推進室長