

高効率ガスエンジン 28AG の開発

Development of High Density Gas Engine 28AG

後 藤 悟 新潟原動機株式会社 技術センター製品開発グループ GE 開発チーム チーム長
高 橋 伸 輔 新潟原動機株式会社 技術センター製品開発グループ GE 開発チーム マネージャー
山 田 剛 技術開発本部総合開発センターレシプロエンジン開発プロジェクトグループ 部長
山 田 敬 之 技術開発本部総合開発センターレシプロエンジン開発プロジェクトグループ 課長

28AG 型ガスエンジンの開発は、市場が求める高効率のニーズに対応するために進められてきたが、この程、世界最高値となる 47.6% の発電効率を達成した。本エンジンに採用しているマイクロパイロット着火方式は強力な着火エネルギーを得ることができるため、希薄混合気の素早く確実な燃焼を可能とする。このため、ディーゼルエンジン並みの高い発電効率と出力を得ることができる。世界最高発電効率達成のキーポイントは、この独自の着火方式に加え、ミラーサイクルの採用、予燃焼室要目や混合気形成過程の最適化などである。

The 28AG engine was developed since the market requires higher efficiency gas engines. As a result, 47.6% power generation efficiency, which is the highest in the world, was confirmed. Since the micro pilot ignition system, which this engine has adopted, can obtain powerful ignition energy, quick positive combustion of fuel-air mixture is enabled. Thereby, about the same high power generation efficiency and high output as a diesel engine can be obtained. The key points of highest power generation efficiency achievement are the original ignition system, adoption of the Miller cycle, optimization of pre-combustion chamber specification, optimization of fuel-air mixture formation process, and others.

1. 緒 言

気体燃料を燃料とするガスエンジンは、A 重油などの液体燃料を使用するディーゼルエンジンと比較して排気ガス中に黒煙、PM（微粒子状物質）の排出がなく、かつ NO_x 濃度も低いことから低公害エンジンとしての優位性をもっている。

近年ガスエンジンは、その低公害性が認められ発電機駆動の動力源としてディーゼルエンジンに代わって選択されるケースも多くなっており、需要は拡大している。これら市場環境への適合性を高めるため、技術開発が加速的に進められた結果、出力、発電効率は向上し、ディーゼルエンジンに匹敵するまでになっている。

このような背景のもとで大形ガスエンジンの市場は、化学工業や機械工業向けのコージェネレーションシステムの用途をはじめ ESCO（Energy Service Company）事業や IPP（Independent Power Producer：独立系発電事業者）の需要者向けがほとんどであり、いっそうの効率向上が望まれていた。28AG 型ガスエンジンは、さらなる高効率のニーズに対応するため開発を進めてきたが、この程、世界

最高値となる 47.6% の発電効率を達成した。

本エンジンの開発は、石川島播磨重工業株式会社（以下、IHI と呼ぶ）と新潟原動機株式会社（以下、NPS と呼ぶ）とで共同で進めてきたものであり、NPS のガスエンジンに対する数多くの開発および市場実績に裏付けられた技術力・ノウハウと、IHI 技術開発本部における解析技術・要素技術が高い次元で融合した成果である。以下にその概要を述べる。

2. 28AG 型ガスエンジンの紹介

本主要仕様を次に示し、開発経緯を第 1 図に示す。

機関型式	18V28AG
発電出力	
50 Hz	5 800 kW
60 Hz	5 500 kW
回転数	
50 Hz	750 min ⁻¹
60 Hz	720 min ⁻¹
正味平均有効圧力	1.96 MPa
質 量	57 000 kg



第 1 図 28AG 型ガスエンジンの開発経緯
Fig. 1 Development process of 28AG engine

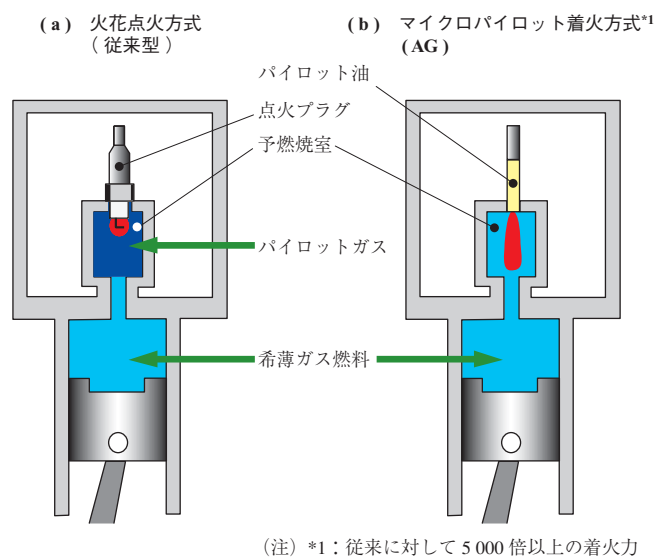
発電効率	47.6%
条 件	・ NO _x 排出量は 600 ppm 以下 (O ₂ :0%換算)
	・ 燃料性状による
	・ 裕度 5%を含む

すでに 1 ～ 3 MW の発電規模をもつコージェネレーション市場に対しては、22AG シリーズのガスエンジンが多くの実績を挙げている。28AG 型ガスエンジンは、この 22AG シリーズで採用されたマイクロパイロット着火方式の燃焼技術ならびにガスエンジン制御技術をベースに、さらに高い出力の市場への参入を図るため開発された。エンジン本体は、すでに市場で実績をもつ 28HLX 型高性能中速ディーゼルエンジンを母体としてガス燃料化したものである。クランク軸、クランクケースなどの主要構造はディーゼルエンジンと共通であるため、ディーゼルエンジンの実績を継承する。

2.1 マイクロパイロット着火方式

本エンジンは、マイクロパイロット着火方式を採用している (第 2 図)。このマイクロパイロット着火方式は、全供給熱量の約 1% に相当するパイロット油、すなわちディーゼル油を着火源として使用したものであり、従来の火花点火方式に比べ、より強力な着火エネルギーを得ることができる。強力な着火エネルギーは、希薄混合気の素早く確実な燃焼を可能とする。このため、ディーゼルエンジンと同じレベルの高い発電効率と出力を得ることができる。

着火方式は異なるが、燃焼システムは従来と同様の希薄燃焼方式を採用しているため、排気ガス中の NO_x 排出量は従来のガスエンジン同様に低い値を維持している。NO_x 排出量は、主としてパイロット油の量に左右されるが、使用するパイロット油が微少であるため、低い NO_x レベルを維持することができ、我が国の大気汚染防止法に定める



第 2 図 マイクロパイロット着火方式
Fig. 2 Powerful ignition energy of micro-pilot compression ignition system

排出基準を満足する。

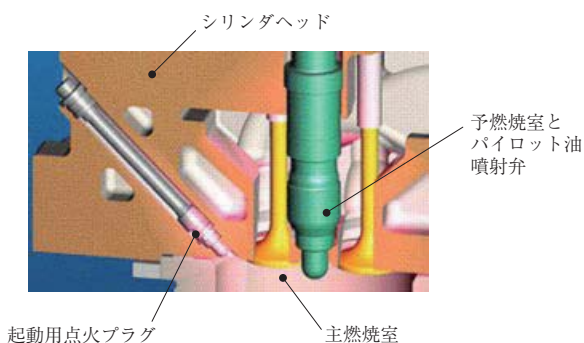
また、強力な着火エネルギーによって、熱分解ガスや下水汚泥ガスのような低い発熱量 (都市ガス 13A の発熱量に対して約 1/5) のガスも燃料ガスとして使用することができる。

2.2 起動方式

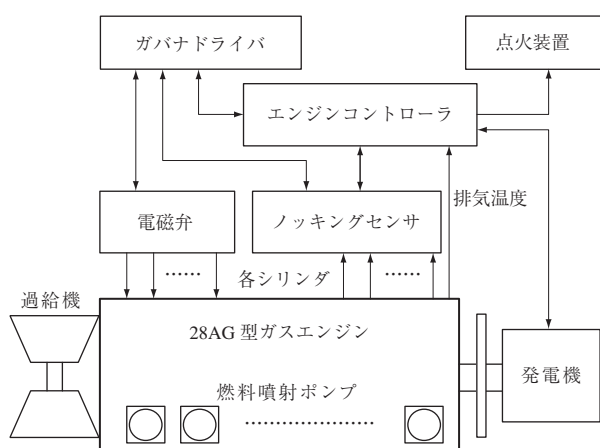
起動時の低回転域における着火の確実性を高めるため、点火プラグを起動時に点火源として機能させる方式を採用している。この点火プラグ起動方式は NPS 固有の技術⁽¹⁾であり、起動失敗はなく、マイクロパイロット着火方式の起動方式としては最も優れている。第 3 図に点火プラグによる起動システムを示す。

2.3 制御システム

第 4 図にエンジンの制御ブロックダイアグラムを示す。少量の液体燃料 (パイロット油) を供給するために開発された燃料噴射ポンプは、ディーゼルエンジンのポンプと



第3図 点火プラグ起動システム
Fig. 3 Spark start system



第4図 エンジン制御ブロックダイヤグラム
Fig. 4 Engine control block diagram

の部分共通化を図り、単純な構造となっているため、メンテナンス性に優れている。

燃料ガスはエンジンコントローラ、ガバナドライバおよび各シリンダに備えた電磁弁から成る EFI（電子燃料噴射装置）システムによってエンジンに供給される。エンジンコントローラは、最良の性能を維持するために燃料ガスの

供給タイミング、供給量を最適に制御し、各シリンダの排気温度は、この EFI システムによって自動的にコントロールされる。

また、ノッキング制御システムが装備されている。あるシリンダにノッキングが発生した場合、これを検知し、当該シリンダへの燃料ガス供給量を自動的に減少させて、ノッキングを回避する。このシステムによって安定した連続運転が維持できる。

3. 効率向上のポイント

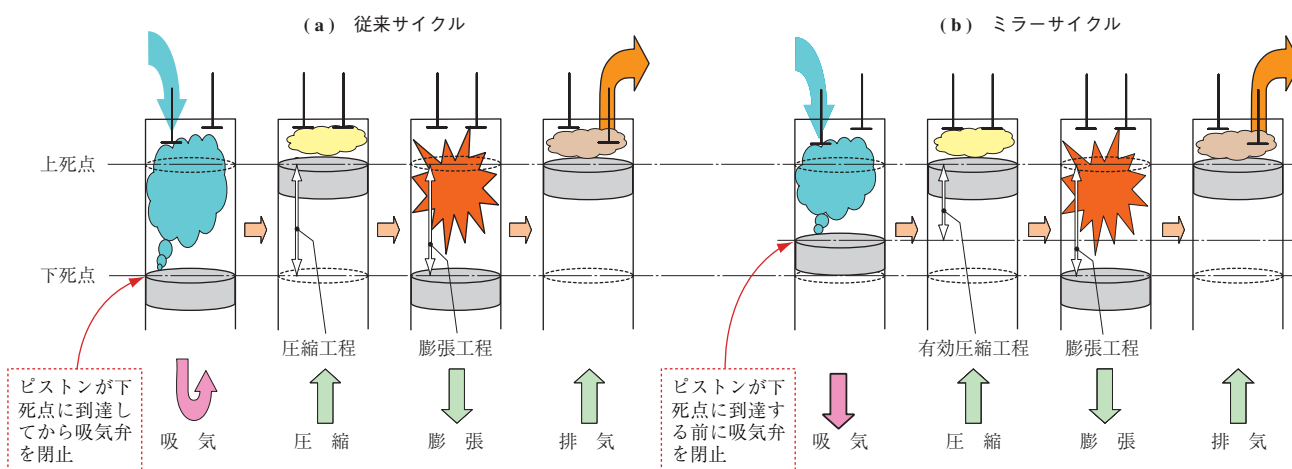
今回の世界最高発電効率達成のキーポイントは、高効率の過給機とミラーサイクルのマッチング、さらには予燃焼室要目、混合気形成過程の最適化などである。

つまり、ミラーサイクル採用の効果に加え、予燃焼室からの火炎伝播の最適化や混合気濃度の均一化などによるノッキングに対する裕度を確保したことが最高発電効率達成のポイントといえる。

3.1 ミラーサイクル

一般にガスエンジンのようなレシプロエンジンでは、圧縮比の増加とともに発電効率も向上するが、ノッキングが発生するため高圧縮比化には限度があった。一方、ミラーサイクルは、吸気弁の閉じタイミングを通常の設定よりも早くすることによって、膨張比を圧縮比よりも大きくすることで、より多くのエネルギーが取り出せ効率向上が可能となる。また、有効圧縮比が低下することとなるため、ノッキングに対する裕度が拡大される。第5図にミラーサイクルの原理を示す。この裕度を効率改善のための運転調整に生かすことによって、さらに効率向上が可能となる。

しかし、吸気弁の閉じタイミングを通常の設定よりも早



第5図 ミラーサイクルの原理
Fig. 5 Miller cycle principle

めた場合は、第 5 図に示すようにいったん燃焼室内に閉じ込められた混合気が膨張という過程を経るため、短期間に高密度の混合気、特に燃焼用の空気を供給する必要がある。このため、過給機はより高圧力比を実現できることが要求される。28AG 型ガスエンジンでは、ターボシステムズユナイテッド株式会社／ABB 社（ABB Turbo Systems Ltd.（スイス））製の高圧力比・高効率過給機を用いることによって、この問題を解消している。

また、性能改善のためには、吸気弁の開閉タイミングや圧縮比の最適化がポイントとなる。このため、本開発ではサイクルシミュレーションによってあらかじめ性能改善予測を行い、この計算結果を基に実機組込み部品を製作し性能確認を進めてきた。ミラーサイクル採用時の変更部品はカム、ピストンといったエンジン主要部品となるため、シミュレーションによって大幅な開発費用の削減および期間の短縮ができた一例である。

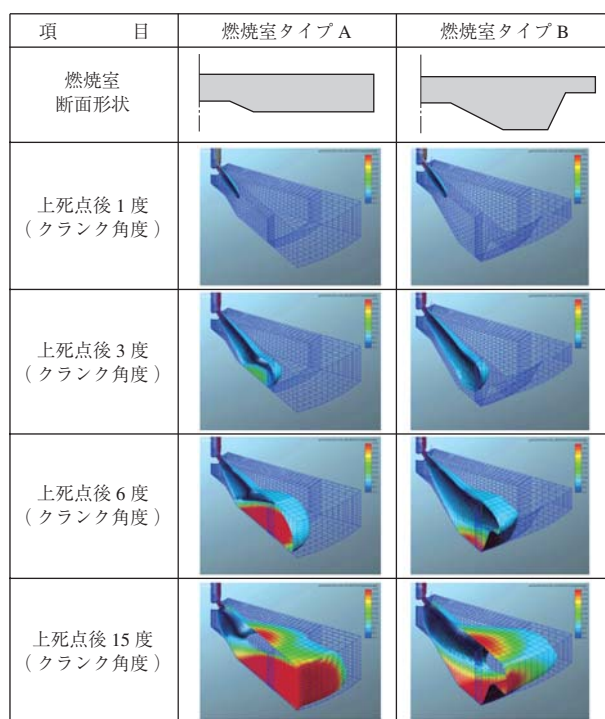
3.2 予燃焼室要目と主燃焼室形状の最適化

28AG 型ガスエンジンの開発ポイントは、22AG シリーズのマイクロパイロット着火方式の燃焼技術を、より大きなシリンダ径のエンジンに適合させることにあった。これを実現させるためには予燃焼室形状の最適化が大きく貢献している。点火源である予燃焼室から噴出するジェット火炎の改善によってクエンチングエリア（消炎領域）の減少、短期燃焼化を図り、燃焼効率の向上を行った。また、主燃焼室形状に対して適したジェット火炎を形成させることによって、最適燃焼を実現させ高効率を得ることができている。

燃焼流体シミュレーションによる計算結果の一例を第 6 図に示す。本計算結果は、異なる燃焼室形状に対するジェット火炎の伸展を見るためにクランク角度ごとの燃焼室内温度分布を示したものである。比較的早い時期に火炎が燃焼室壁面に接触するものは、燃焼が緩慢になり、その後の火炎の伸展が遅れる結果となっている。つまり、主燃焼室形状には、予燃焼室から噴出した直後の火炎の伸長に十分な空間をもたせる必要があり、また、予燃焼室のジェット火炎噴出孔は主燃焼室形状に適した向きになければならないことが分かる。

3.3 混合気形成過程の最適化

主燃焼室内の希薄混合気に濃度むらが生じている場合、燃料リッチの濃厚な部分は、 NO_x 発生、ノッキング発生の要因部分となり効率改善の調整代を減少させることになる。一方、希薄部ではクエンチング（消炎）が生じ排気ガ



（注）温度分布：1000 K 等温面を水色で表示

第 6 図 予燃焼室火炎ジェットのシミュレーション計算結果

Fig. 6 Calculation results of jet flame from pre-combustion chamber

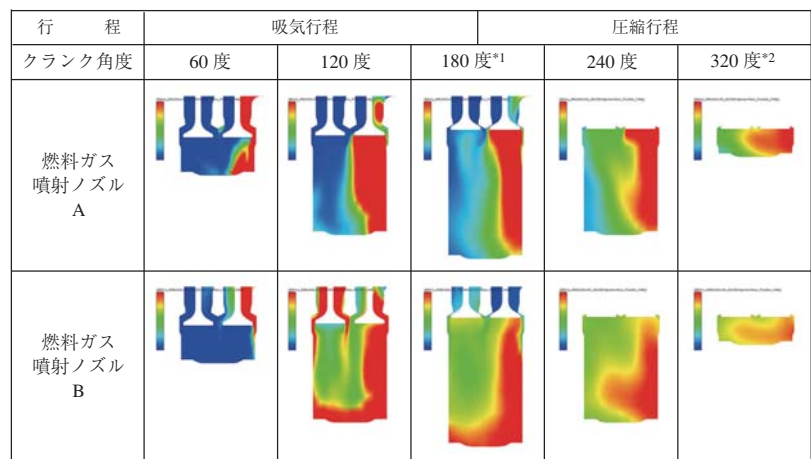
ス中の未燃ガスを増加させる要因となる。つまり、効率改善には希薄混合気の混合促進が不可欠である。

燃料混合状況の把握は、3D-CFD（三次元数値流体解析）で実施した。計算モデルは吸気行程中の吸気弁の開閉とピストンの動きを含んだものとし、ピストンの動きに伴う空気流動によって吸気管内に噴射された燃料ガスが、吸気と混合しながら燃焼室内に流入し圧縮されて燃焼直前に至るまでに示す挙動を計算によって明らかにした（第 7 図）。計算結果から、燃料ガス噴射ノズルの形状や位置の相違によって主燃焼室内の希薄混合気濃度の均一性が変わることを把握した。燃料ガス噴射ノズルが主燃焼室から離れるほど混合促進が図られるが、弊害として吸気管内の残存ガスが増加する。以上から、燃料ガスの供給圧力や供給タイミングも混合促進のための要素であることが確認された。これらの計算結果を基に最適化を図り、効率改善を実現した。

4. 結 言

28AG 型ガスエンジンは、大形ガスエンジン市場の高効率ニーズに対応するため開発を進めてきたが、この程、世界最高となる発電効率 47.6%を達成した。

本開発は、石川島播磨重工業株式会社と新潟原動機株式会社が共同で進めており、石川島播磨重工業株式会社では



(注) *1：下死点
*2：着火前

第 7 図 燃焼室内混合気濃度のシミュレーション計算結果
Fig. 7 Calculation results of fuel-air mixture concentration

主として数値シミュレーションなどによる解析や要素試験を担当，新潟原動機株式会社は試験エンジンによる各種組合せ試験を担当し，両者が効率的に開発作業を進めてきた。高効率・高出力を実現するマイクロパイロット着火方式に加え，ミラーサイクルの採用，予燃焼室要目や混合気形成

過程の最適化などによって効率改善を図り，世界最高発電効率を達成した。

参 考 文 献

- (1) NPS：特開 2000 - 64838，後藤 悟，中山貞夫