

高出力ガス機関 KU30GA の開発

Development of High Power KU30GA Gas Engine

横浜製作所 中野良治^{*1} 安枝信次^{*2}
 技術本部 伊藤邦憲^{*3} 山本高之^{*4}
 小田裕司^{*5}

この度当社では、従来の電気着火式の副室式希薄燃焼 KU30G の後継機種として、点火プラグに替えて全投入熱量の 1 % の液体燃料により着火を行うパイロット着火方式の KU30GA ガス機関を開発した。KU30GA は平均有効圧力 20 bar を達成し、V 型 12, 14, 16, 18 気筒をそろえ発電機出力 3.7 MW から 5.8 MW をカバーする。パイロット燃料噴射用のコモンレールシステム、VG 過給機による空燃比制御、ノッキング制御システムを用いた実機試験を行い、熱効率 43.8 %、NOx 排出量 0.5 g/kWh を達成した。

We developed a micropilot KU30GA gas engine ignited by diesel fuel less than 1% instead of a spark plug. Break mean effective pressure (BMEP) was increased to 20 bar, which covers output from 3.7MW to 5.8MW with V-12, 14, 16, and 18 cylinder configurations. This engine has been tested with the common rail system for pilot injection, the VG turbocharger for air/fuel ratio control, and knock detection and control. In this test, we achieved high thermal efficiency of 43.8% and low NOx emission of 0.5 g/kWh.

1. まえがき

環境規制が厳しくなる中、これまでのエネルギー源の主流であった液体燃料に対し、CO₂排出が少なく、NOx、ばいじん等の有害排出物の少ないガス燃料が今世紀の燃料として注目されている。産業用中、大型エンジンにおいてもガスを燃料とするガスエンジンがここ数年需要を伸ばしており、低 NOx 化と高効率が同時に達成できる希薄燃焼ガスエンジンが高い評価を得ている。

しかし、従来のガスエンジンは同サイズのディーゼル機関に比べて行程容積当たりの出力が低く、そのために単位出力当たりの単価が高く経済性の面でディーゼルエンジンよりも劣っていた。そこで次世代のエンジンとして環境に優しくかつ経済性も優れた高出力、高効率ガスエンジンの登場が期待される。

このような背景の下、この度当社では 1990 年に開発した電気着火の副室式希薄燃焼 KU30G 機関の後継機種として、微少な液体燃料を副室の中に噴射し自己着火させることで燃料ガスの火種とするパイロット着火方式の高出力、高効率 KU30GA ガス機関を開発した。

2. KU30GA ガス機関の特徴

2.1 機関主要目

表 1 に本機関の主要諸元を、図 1 に機関断面を示す。また、表 2 に従来の電気着火式 KU30G 機関との比較を示す。電気着火式に比べ同じエンジンサイズで平均有効圧力 P_{me} が 14.1 bar から 19.6 bar へと飛躍的に向上し、これにより 12~18 シリンダで 1 台当たり 3.7~5.8 MW の出力をカバーする。

また、パイロット着火方式の導入による燃焼改善、高出力化による機械効率向上、VG 過給機の採用によるサイクル効率

表 1 KU30GA の主要諸元

Specifications of KU30GA gas engine

	12KU30GA	14KU30GA	16KU30GA	18KU30GA
シリング数	12	14	16	18
定格出力 (50 Hz) (kW)	3 800	4 450	5 100	5 750
(60 Hz) (kW)	3 650	4 250	4 900	5 500
型式	過給機・空気冷却器付 V 型 4 サイクルガス機関			
シリング径 (mm)	300			
ストローク (mm)	380			
回転数 (rpm)	720/750			
平均ピストン速度 (m/s)	9.1/9.5			
燃料ガス	都市ガス (13 A)			
燃焼方式	予燃焼室式希薄燃焼方式			
エンジン重量 (t)	40	48	54	60

表 2 電気着火式機関との比較

Comparison with spark ignition engine

形 式	KU30G	KU30GA
着火方式	電気着火方式	パイロット着火方式
発電機出力 (MW)	2.7~4.2	3.7~5.8
平均有効圧力 (bar)	14.1	19.6
発電機端効率 (%)	39.3	42.5
機関熱効率 (%)	40.5	43.8
NOx 排出量 (g/kWh)	1.0	0.5

改善、ノッキング監視・制御システムの採用により発電効率は従来の 39.3 % から 42.5 % に大幅に向上した。また排熱及び温水熱回収を合せるとプラント総合効率は最高 71 % に達する。

*1 原動機技術部ディーゼル設計課長

*2 原動機技術部ディーゼル設計課

*3 横浜研究所機械研究室主任

*4 横浜研究所機械研究室

*5 長崎研究所内燃機・油機研究推進室主任

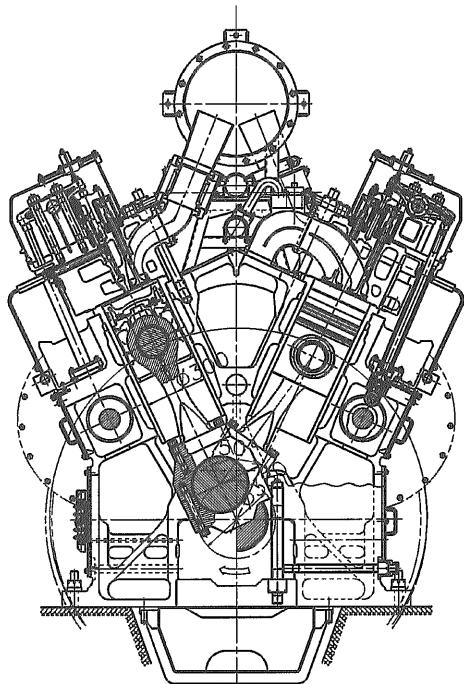


図1 KU30GAの断面 KU30GA機関の横断面を示す。
Cross section of KU30GA gas engine

排気ガスはパイロット燃料の噴射量を全投入燃料の1%以下に抑えることで0.5 g/kWh以下のNOxを達成し、将来的規制強化にも対応できるレベルを満足している。

2.2 燃焼方式

図2にKU30GAの燃焼室周りの断面を、図3に従来のKU30Gとの比較を示す。従来のKU30Gは副室予混合希薄燃焼方式を採用し、点火プラグによる電気着火方式を探っていた。この方式は燃焼室中央に位置する副室内で点火プラグにより着火を行い、副室からのトーチ火炎により主室の希薄混合気を着火するものであった。しかし、点火プラグは、高出力化に伴う高圧縮圧力下では、所要放電電圧が上がるため交換寿命が短くなる。そのため、従来のKU30Gに対し出力アップを図ったKU30GAの出力レベルにおいては、点火プラグの寿命が短く、数千h以上の連続運転を要求される発電用ガスエンジンとして不満足な短寿命が懸念される。この課題を解決するために、KU30GAでは点火プラグによる着火に代えて、前述のパイロット着火方式を採用了した。このパイロット着火方式の導入によって点火プラグが不要となり、替りに着火エネルギーの大きな液体燃料の圧縮着火を利用するため、高出力下での信頼性の高い着火が可能となった。

2.3 パイロット燃料噴射システム

KU30GAのパイロット燃料噴射システムを図4に示す。パイロット燃料の噴射系は噴射量、噴射時期、噴射圧を自由に変更できるコモンレールシステムを採用了した。高圧ポンプがエンジンのカム軸駆動ギヤを介して駆動され、レールに蓄圧された燃料が電磁弁駆動の噴射弁により各シリンダの副室内に噴射される。これによりあらゆる運転条件で最適なパイロット噴射が可能となる。また各シリンダの噴射量、噴射時期のばらつきも制御できるので全シリンダとも一定した着火を

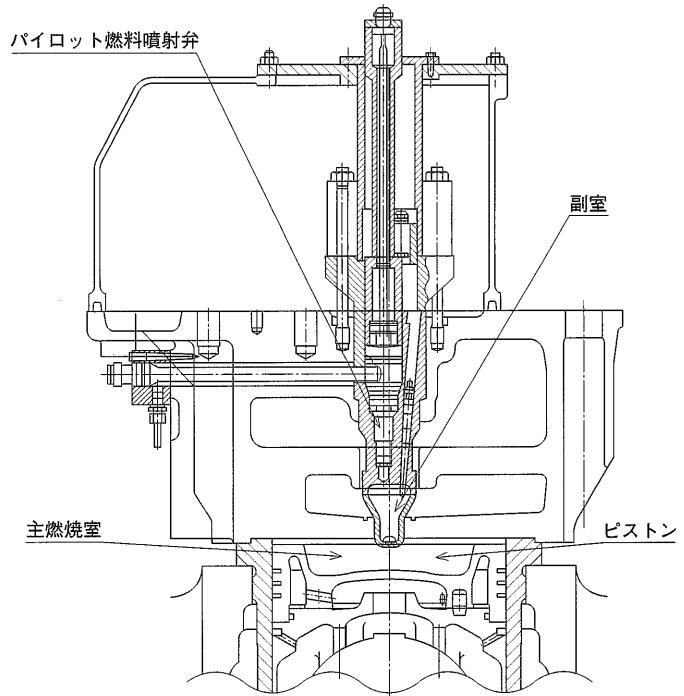


図2 燃焼室構造 KU30GAは副室内に噴射する液体燃料により着火を行うパイロット着火方式を探る。
Combustion chamber

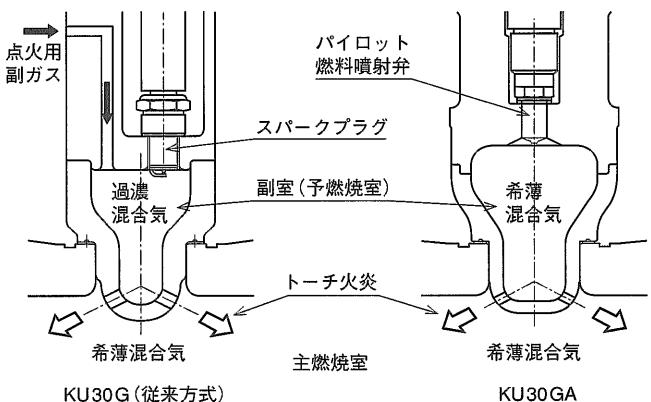


図3 燃焼室構造の比較 従来型KU30GとKU30GAの燃焼室構造を比較する。
Comparison of construction of combustion chamber

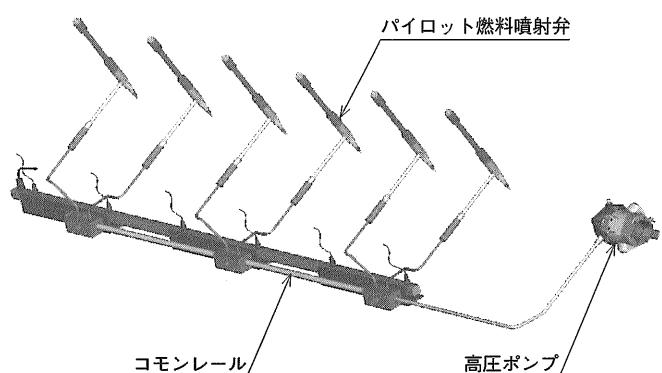


図4 パイロット燃料噴射システム パイロット燃料噴射系にはコモンレールシステムを用いる。
Pilot fuel system

実現できる。

2.4 空燃比制御システム

従来の電気着火 KU30G 機関では給気放出により空燃比を調整していたが、この方法では過給空気を捨てるため熱効率上も損失であった。これに対し KU30GA ではタービン側の静翼の角度を運転中に変え給気圧を調整できる当社開発の VG (Variable Geometry) 過給機を使用することで給気放出なしで空燃比制御を行い、効率向上を図った。この改善効果は給気放出量の多かった低負荷側でより大きく、低負荷性能の顕著な改善を実現した。KU30GA に用いた MET-SRVG の断面図を図 5 に示す。

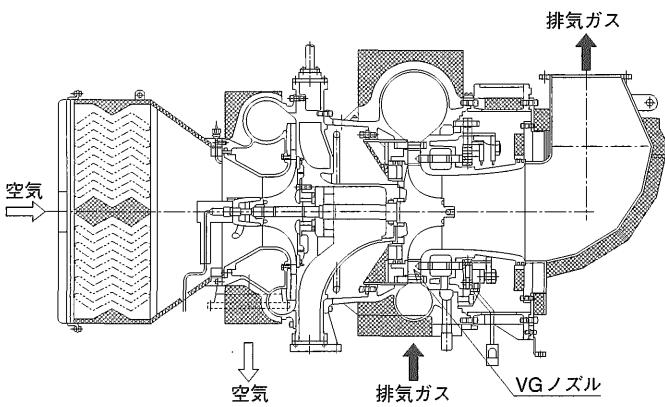


図 5 MET-SRVG 過給機の断面
MET-SRVG 過給機の断面を示す。
Cross section of MET-SRVG turbocharger

2.5 ノッキング制御システム

KU30GA のような予混合燃焼のガス機関では、出力向上に伴い、ノッキングと呼ばれる異常燃焼が発生しやすくなる。ノッキングはピストンや副室の損傷を促進させるため、着火時期遅延等によるノッキング防止策が必要となる。一方で、運転条件をできる限りノッキング限界に近づけることで熱効率が向上するため、できる限りノッキング限界に近い条件での運転が望ましい。しかし実用上は使用燃料の性状変化や燃焼室の経年汚損によってノッキングが発生する運転条件が異なり、ある程度以上の裕度を持って運転する必要がある。KU30GA 機関では、常時ノッキングを監視し発生時には回避制御することで限界に近い条件での運転を可能とした。このノッキング制御システムを標準装備して最高効率を得ることができる運転が可能となった。

2.6 ガス供給システム

図 6 に従来型と KU30GA のガス供給方式を示す。従来の電気着火式 KU30G では主室への燃料ガスは機関入口に設置したガバナ弁で供給量を一括調整された後、給気弁と一体構造のガス弁を介して各シリンダへ供給していた。

一方、本機関では各シリンダの給気ポートにガス供給電磁弁を取り付け、コントローラで供給時期と供給量を制御するシステムとした。これによりシリンダ間の空燃比のばらつきを抑制することができる。このことは、シリンダごとの燃焼、ノッキング裕度のばらつきを抑えることにつながり、全シリ

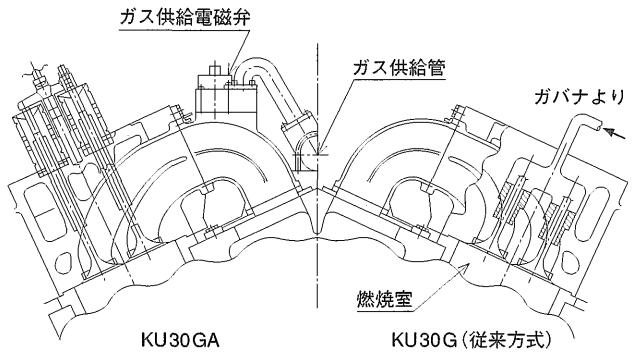


図 6 ガス供給方式の比較 従来型と KU30GA のガス供給方式を示す。KU30GA は電子制御式のガス供給弁を用いる。
Comparison of fuel gas supply

ンダをより均等にノッキング限界に近づけることが可能となり熱効率向上をもたらす。また、供給タイミング、供給圧力、供給方法に自由度がもたらされる。また、従来方式よりも上流でガスを混合する点も、より均一な混合気形成を可能とした。この点もノッキング裕度改善に寄与している。開発試験では何種類もの供給時期、圧力、供給方法が比較され、混合気の濃度分布とノッキング裕度の計測結果より最適な供給条件を採用した。

また本方式のガス供給によるシリンダ直前のガス量制御は機関動特性を向上させている。

2.7 全体制御系

上述のパイロット噴射系、空燃比制御系、ノッキング制御系、ガス供給系に、給気温度制御、異常燃焼監視システムを加えた 6 種類のシステムを当社が開発した DIASYS が統合する。この DIASYS はこれのほかに補機を含めた発電設備全体の制御を行う。

DIASYS は火力プラントのメインコントローラとして十分な実績を有する信頼性の高い制御装置である。また DIASYS は機関、補機の情報を電話回線を通して当社の設計、サービス部門に転送し常にプラントの状態を監視できるリモート監視システムの中核でもある。

2.8 信頼性

クランク軸、エンジンフレーム、軸受など燃焼室周り以外の主要部品は 200 台以上の実績を有する高信頼性ディーゼル機関 KU30A ($P_{me}=20$ bar) と同じ部品を使用しており、高い信頼性を誇る。ピストンリングはディーゼル機関でも高い評価を得ているクロムセラミックリングを使用しリングライナッシュ動性能の向上、リング、ライナの摩耗量の低減に寄与している。

3. 開発試験

3.1 供試機関

当社横浜製作所金沢工場で発電設備として稼働している電気着火式 12KU30G 機関を、6 シリンダのパイロット着火方式に改造し性能及び信頼性検証試験を実施した。最初に 1 シリンダだけをパイロット着火に改造し比較試験を通じて性能最適化、信頼性検証を行い、次に全シリンダを改造して性能の最終確認、制御系など全体システムの検証試験を行った。

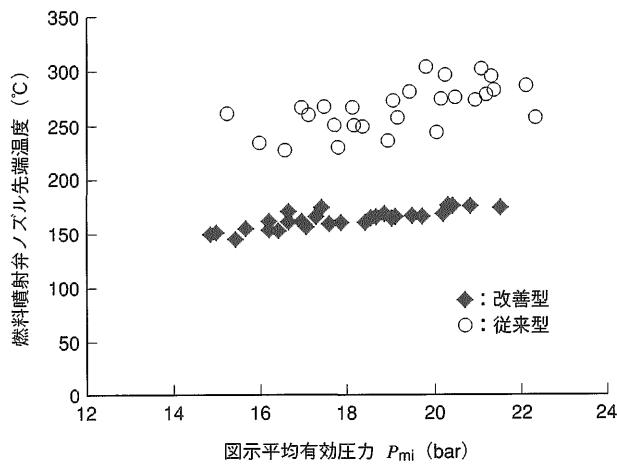


図7 燃料噴射弁のノズル先端温度 パイロット噴射用燃料噴射弁のノズル先端温度を示す。シート部の改良により約100°C低減した。
Nozzle tip temperature

3.2 信頼性検証試験

KU30GA開発に当っては、パイロット燃料噴射弁噴孔の燃料コーリングによる閉そく回避も課題であった。これは微小パイロット着火の場合、噴射量が通常のディーゼル機関に比べ極端に少ないため燃料自身による噴射ノズルの冷却作用が少なくノズルが加熱して燃料がコーリングすることへの懸念である。この懸念解消のために副室周りの温度を実測し、またFEM解析で熱の流れを把握した上で効果的な噴射弁冷却策を確保した。副室の形状と噴射弁シートの位置を最適化することにより図7に示すように当初の計測温度より約100°Cの低減を得、目標の180°Cまで下げる事ができた。

他の燃焼室部材についても図8に示すように、実績のあるKU30Aディーゼル機関と同一温度分布レベルに抑えることができ十分な信頼性を確認した。

3.3 性能試験

実機性能試験では高効率を達成するために圧縮比、ピストン形状、パイロット噴射条件、副室仕様(容積、噴孔数、噴孔径、噴孔角度)、給排気オーバラップなどのパラメータについての最適化試験を実施した。目標出力に相当する平均有効圧力 $P_{me}=20$ barにて熱効率43.8%を達成した。またパイロット噴射量を1%以下にすることでNOxを0.5 g/kWh以下まで低減することに成功した。これは今後のNOx規制に十分に対応できるレベルであると同時に、更なる低減に向けての

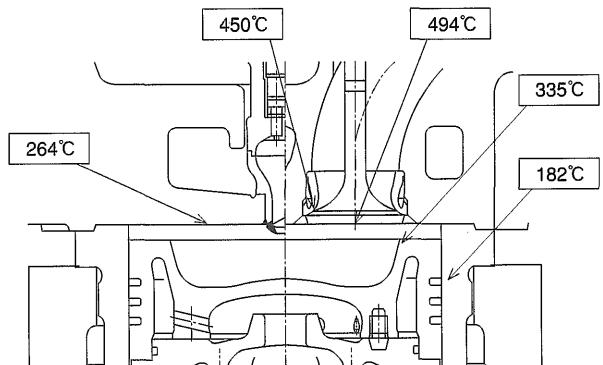


図8 燃焼室温度 燃焼室周り各部の温度を示す。
Temperature of combustion chamber

出発点ともなる。

4. む　す　び

従来の電気着火式ガス機関に代る次世代の高効率、低公害ガス機関としてパイロット着火方式を採用したKU30GAを開発した。本機関はコモンレール噴射系、VG過給機など最新の技術を搭載した高性能ガス機関で各種最適化試験の結果、熱効率43.8%を達成した。また1%以下のパイロット噴射量で安定した燃焼を実現し0.5 g/kWhという極めて低いNOxレベルを得た。主要部品は200台以上の実績を有するKU30Aディーゼル機関と共に共通の部品を使用する上、試験の結果燃焼室温度もディーゼルの実績レベルに抑えることができた。今後希薄燃焼技術の高度化を図り、更なる効率向上、環境調和に寄与したいと考えている。

参考文献

- (1) 中川ほか、副室式トーチ点火希薄燃焼ガスエンジンの研究、日本機械学会第72期全国大会講演論文集(III) No.940-30 (1994-8) p.356
- (2) 中川、高温冷却方式小型・高効率・低NOxガスエンジンの開発、アドバンス・コーポレーションシステム技術研究組合(ACT 90) 第二回研究成果発表会講演資料集(1992-1) p.39
- (3) 宮野ほか、三菱KU30G型ガスエンジン“低NOx・高効率リーンバーンエンジン”，クリーンエネルギー Vol.4 No.10 (1995-10) p.57
- (4) 中川ほか、高性能希薄燃焼ガスエンジンの研究開発、三菱重工技報 内燃機関特集、Vol.34 No.4 (1997-7) p.276