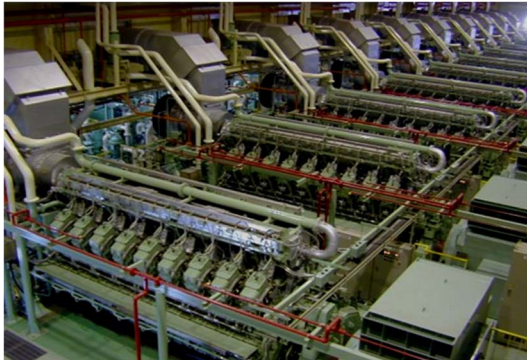


発電用ガスエンジン KU30GSI の発電効率向上と 冷却水エネルギー利用技術

Technologies for Improving Power Generation Efficiency and
Utilizing Cooling Water Energy of Gas Engine KU30GSI for Power Generation



吉栖 博史*¹
Hiroshi Yoshizumi

長面川 昇司*²
Shoji Namekawa

石田 道靖*³
Michiyasu Ishida

江崎 穰*⁴
Minoru Esaki

鈴木 元*⁵
Hajime Suzuki

安藤 純之介*⁶
Junnosuke Andou

環境負荷削減やシェールガスの開発を背景に、天然ガス資源は今後の主要な燃料として注目されている。当社では 305～1500kW をカバーする高速ガスエンジン GSR と 3650～5750kW をカバーする中速ガスエンジン KU30GSI をラインナップし、小規模な分散電源から施設・工場等のコージェネレーションシステム、事業用発電まで対応が可能である。本稿では、発電効率 49.5% を達成した KU30GSI-Plus の高効率化技術と、エンジン冷却水を昇温して蒸気回収の熱源として活用することを目的とした全蒸気回収システムに対応する技術について述べる。

1. はじめに

天然ガス資源は、環境負荷の削減や石油の代替エネルギーとして、将来的にも主要な燃料として注目されている。一方、災害時にも有効な分散型電源への関心は増々高まっていくものと考えられる。

この様な背景の中、ガスエンジンは、高い起動性能、負荷追従性を有し、廃熱回収にもフレキシブルに対応できる利点から、CHP (Combined Heat and Power plant) をはじめとする様々なアプリケーション、幅広い出力範囲で利用されている。特に、中速ガスエンジンでは、優れた発電効率、10 分以下の起動時間、高い排ガス温度による効率良い廃熱回収で 80% 以上の総合効率を達成しており、効率良いエネルギーソリューションの提供に最適な選択の一つと考えられる。

三菱重工グループの KU ガスエンジンシリーズは、1990 年に市場投入した火花点火方式の KU30G ガスエンジンをベースに出力・効率及び連続運転時間を向上したマイクロパイロット着火方式の KU30GA (MACH-30G) を 2002 年に市場投入し、高い信頼性と性能を評価頂き、150 台以上を出荷した。

2009 年には、豊富な実績を有する KU30GA ガスエンジンをベースに火花点火方式を採用し、廃熱回収を含めた総合効率を重視し、各種アプリケーションに柔軟に対応できる KU30GSI (総合効率重視仕様) を市場に投入した。

更に、2012 年には発電効率を重要視するお客様へのニーズに応えるため発電効率を高めた KU30GSI-Plus (発電効率重視仕様) を市場に投入し、総合効率と発電効率の幅広いニーズに対

*1 三菱重工エンジン&ターボチャージャ(株)エンジン・エナジー事業部技術部

*2 三菱重工エンジン&ターボチャージャ(株)エンジン・エナジー事業部技術部 次長

*3 三菱重工エンジン&ターボチャージャ(株)エンジン・エナジー事業部技術部 主席プロジェクト統括

*4 三菱重工エンジン&ターボチャージャ(株)エンジン・エナジー事業部技術部 課長

*5 三菱重工エンジン&ターボチャージャ(株)エンジン・エナジー事業部技術部 主席技師

*6 総合研究所燃焼研究部

応できる機種をラインナップした^{(1),(2)}。KU30GSI-Plus では更に発電効率を向上させ、2015 年に 49.5%仕様をリリースした^{(3),(4)}。

一方、国内の自家発電設備などで有効に活用されていない廃温水からも蒸気を回収する全蒸気回収システムを4社*のシステム製品として、2015 年5月に商品化し、“発電+蒸気”効率においてクラス最高の 71.1%を達成した。

本稿では、KU30GSI ガスエンジンの優れた特徴と発電効率向上の技術及び全蒸気回収システムを代表例とする廃熱利用を拡大する技術(冷却水エネルギー利用技術)について述べる。

*東京ガス(株)、三菱重工業(株)、三浦工業(株)、(株)神戸製鋼所

2. KU ガスエンジンの概要

副室火花点火方式の希薄予混合燃焼4サイクルガスエンジン KU30GSI は、シリンダ数 12~18 を揃え、発電出力は、3650~5750kW をカバーしている。表1に KU30GSI と KU30GSI-Plus の主要諸元を示す。

表1 主要諸元表

形 式		KU30GSI	KU30GSI-Plus
シリンダ数		12-18	
ボア/ストローク	mm	300×380	
回転数	min ⁻¹	720/750	
発電機出力*	kW	3650-5750	
発電効率*	%	46.5	49.5
NO _x (O ₂ =0%)	ppm	< 320	
機関質量	kg	40 000-60 000	

※:ISO3046 条件及び当社推奨の標準ガスによる

総合効率重視仕様の KU30GSI では発電効率を高めると同時に排ガス温度も高く維持して、同クラストップレベルの 80%を超える総合効率を達成し、発電効率 46.5%、排気ガス温度 395℃、NO_x=320ppm (O₂=0%換算)を実現し、CHP など排熱回収を組み合わせるアプリケーションに最適な仕様としている。

また、発電効率重視仕様として、事業用や IPP などへの適用ニーズにも対応できるエンジン単機の発電効率を高めた KU30GSI-Plus を開発し、2015 年には発電効率 49.5%仕様(機関付潤滑油ポンプ動力含む)の市場へのリリースを開始した。

KU30GSI シリーズは国内外の種々アプリケーションに利用され、フィールドで約 30 000 時間の運転時間に到達している。KU シリーズガスエンジンとしては延べ運転時間 700 万時間を超える実績を有しており、KU30GSI シリーズは、部品の 80%をシリーズエンジンと共有化する高信頼性エンジンである。また、設計段階より据付・配線・配管などの容易化を指向した設計を採用し、現地据付工事の効率化と発電プラント建設の工期短縮を図っている。

3. 高効率ガスエンジン発電技術

近年、ミラーサイクルの適用や CFD (Computational Fluid Dynamics) による筒内流動の予測技術向上により、ガスエンジンでは発電効率の向上が急速に進んでいる。当社においても、日本国内特有のガス性状(メタン価 65)を背景としながら、燃焼の安定性を確保しつつ発電効率の更なる向上を進めてきた。

3.1 アドバンスドミラーサイクル

アドバンスドミラーサイクルの適用にあたり、まず、筒内圧力の変動および熱効率に対する給気弁閉タイミングの影響を確認した。図1は、空気過剰率及び筒内圧力を一定に保ち、タイミングA及び給気タイミングを遅らせたBのケースを示している。タイミングAでは筒内最高圧力の変動幅を示す COV-Pmax (COV: Coefficient of Variation) がタイミングBに対して約 50%改善しており、

熱効率は約1pt%高い。タイミングAは、給気弁開タイミングが早く給排気弁が同時に開くオーバーラップ期間が増え、未燃ガスの吹抜けにより熱効率を下げる因子があるにも関わらず、燃焼の安定化により熱効率の向上を実現している。図2はA, B両タイミングでの筒内最高圧力の時間履歴を示しているが、散発的に高い筒内圧力の発生が認められるタイミングBに対して、タイミングAは燃焼の安定性において優れた特性を示している。

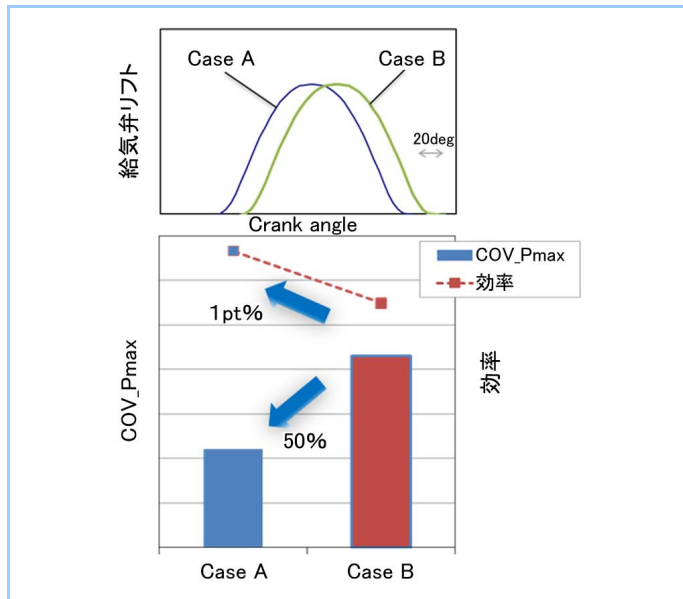


図1 ミラータイミングの効果

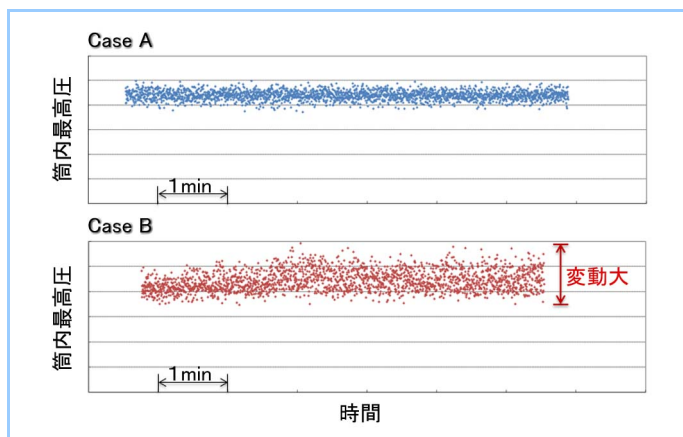


図2 ミラータイミングによる筒内最高圧力履歴

これらの試験結果から KU30GSI-Plus では、給気弁閉タイミングを早めたタイミングAをベースとして最適化を図り、燃焼安定化を目指した。このような信頼性を重視した最適化は、燃焼の不安定さから発生しうるノッキングなどによる燃焼室部品の過度な温度上昇を防止し、部品の寿命向上や長期の信頼性向上にも寄与している。また、負荷変動や冷却水温度などの環境条件に対しても十分な耐力を有する設定が可能となっている。特に、負荷上昇/減少時の過渡的な変化に対しても安定な燃焼を実現し、急速起動性、優れた負荷追従性を有している。

3.2 過給機効率の向上

給気弁閉タイミングの早いタイミングAにおいて高効率を達成するためには、より高い圧力比において高い過給効率を維持することが必要となる。KU30GSI-Plus では高過給機効率かつ最高圧力比 5.0 の三菱重工グループの MET42MB 過給機を採用している。図3に MET42MB 過給機の断面図、図4には機関運転時に計測した仕様変更前後の過給機効率の比較を示す。過給機効率が最大化できるよう、仕様・特性のマッチングにより、圧力比 4.5 以上の高圧力比域で過給機効率を約2pt%改善し、KU30GSI-Plus の発電効率向上に大きく寄与している。

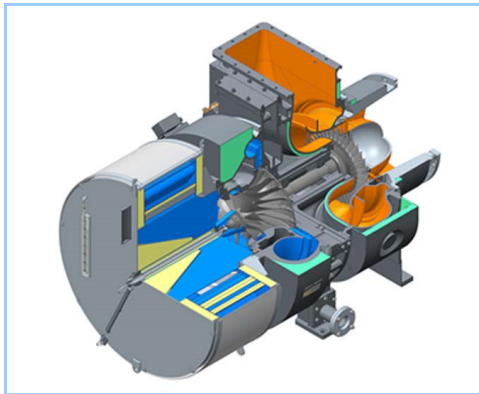


図3 MET42MB 過給機

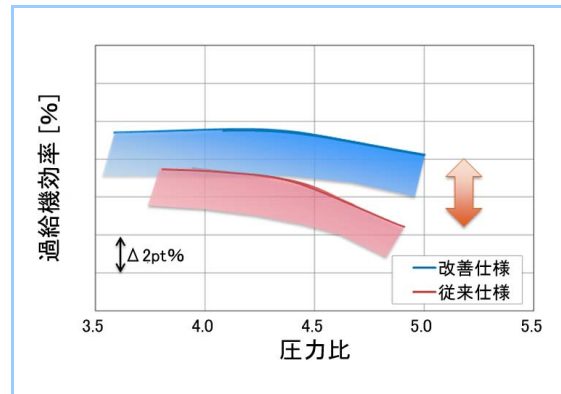


図4 過給機効率の向上

3.3 無駄容積の更なる低減

KU30GSI-Plus では、CFD 解析を基に混合気の分布や燃焼に寄与しない部位を把握する事で、異常燃焼の抑制や未燃ガスの低減を図っている。従来も、シリンダーヘッドの形状見直しや給排気弁周りのデッドボリューム削減を図り、未燃ガス量(THC: Total Hydro Carbon)の約 30% 低減を得ている(2012 年)。更に CFD 解析を用いた最適化により、燃焼室内の隙間など効果的なデッドボリューム削減を図り、前述の改良と合わせて約 60% の THC 低減を達成した(2015 年)(図5)。

以上のとおり、KU30GSI-Plus では安定な燃焼を指向しながら、発電効率を向上し 49.5%仕様 (ISO3046)を実現することが可能となった。

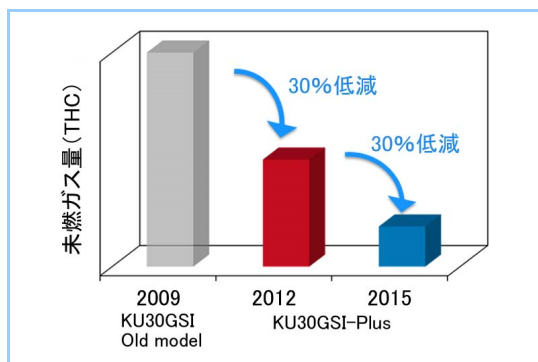


図5 未燃ガス量の低減

4. ガスエンジン冷却水エネルギー利用技術

KU30GSI では、蒸気・温水の利用を考慮すると 80%を超える総合効率を得られ、広くコージェネレーションプラントで利用されている。一方、温水については、需要側の制約から年間を通して有効に利用できない場合もあり、自家発電設備のメリットを最大限活かさないケースもある。

従来、このような低い温度の廃熱利用には ORC (Organic Rankin Cycle) やヒートポンプなどを適用し、利用可能なエネルギーに変換することが考えられている。このような背景から、冷却水温度レベルを引き上げ、こうした付加機器の熱利用効率の向上を図ることは意味を持つものと考えている。たとえば、エンジンからの冷却水温度を 110~120℃レベルに保てれば、大気圧レベルの低压蒸気を生成する事が可能になり、蒸気圧縮機を利用して排ガスボイラからの蒸気に加勢する事ができ、温水が利用できない場合においても有効な熱利用が達成できる。

図6に示すように、KU30GSI の冷却水を熱源として発生させた飽和蒸気を圧縮し、排ガスボイラ等で生成される蒸気に加えるシステムである“全蒸気回収ガスエンジン CGS”を商品化し、18KU30GSI 機関(50Hz)にて、蒸気発生量を約 3.3ton/h から約 5.1ton/h と 1.5 倍以上まで高めることで、“発電+蒸気”効率にて 71.1%を達成した。本システムは 2011 年から単筒機試験を開始

し、2014年の多気筒実機試験による検証を経て2015年5月に発売を開始した。

本システムに対応可能なエンジンとして、燃焼や機械的な要素を検証し、機関冷却水温度を従来より上昇させる技術を開発した。

一般的に冷却水温度が高くなると、エンジンの筒内の燃焼速度が増加するため、燃焼安定性への配慮が必要となる。特に日本国内のようなメタン価の低い燃料ガスを使用する場合には、安定な燃焼状態を得るために、定格出力での発電効率や発電出力を犠牲にせざるを得ない場合も考えられる。

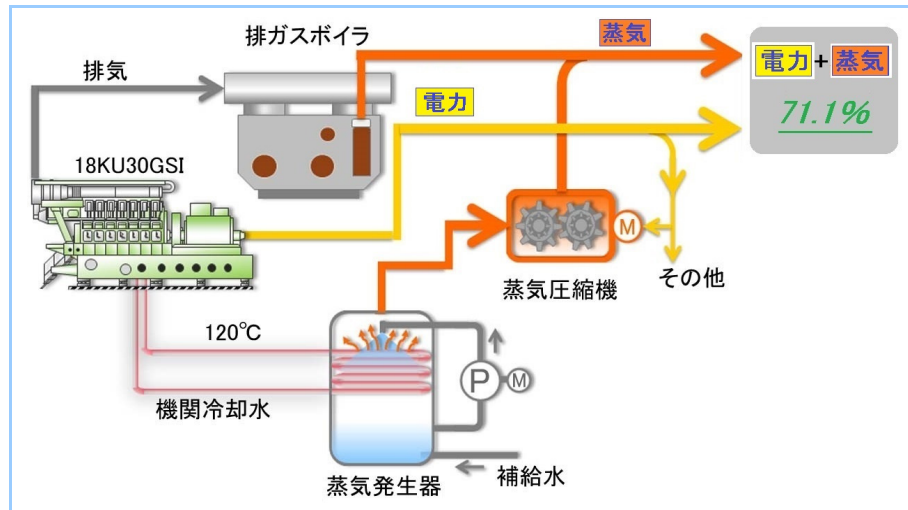


図6 全蒸気回収ガスエンジンシステム

図7は、機関出口冷却水温度を93℃から120℃に上昇させた時の熱発生率の変化を示す。機関出口冷却水温度が120℃では燃焼が早くなり、熱発生率のピークが高くなる傾向が見られている。これは、前述の通り燃焼室の壁面温度の上昇により、火炎伝播が早くなるためであると考えられる。

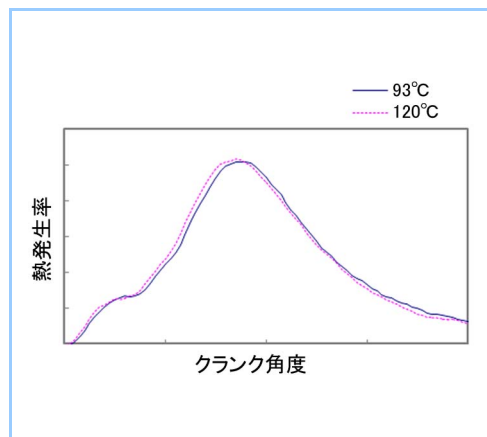


図7 機関出口冷却水温度昇温前後の熱発生率

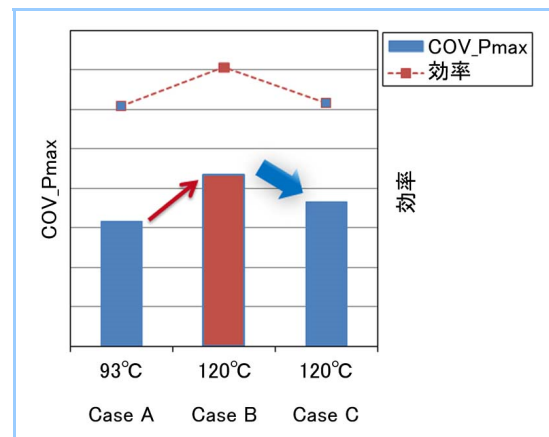


図8 機関出口冷却水温度昇温前後の効率とCOV_Pmax

図8に熱効率とCOV_Pmaxを示す。空気過剰率と筒内圧を同じにした場合、冷却水昇温時に、熱効率は高くなるが燃焼変動が逆に大きくなり、燃焼安定性の悪化を伴っている事がわかる。CaseCでは、熱効率と燃焼変動の最適化を図り、ノッキングのリスクを低減している。

CaseCは、CaseAと同等の効率を示しているが、これは冷却水温度上昇による冷却損失の低下と、燃焼効率改善による未燃ガス量の低減効果によるものと推定される。

図9に実機試験における起動時のトレンドデータを示す。燃焼圧力のトレンドから、定格負荷までの約5分の急速起動中、冷却水温度が120℃に到達するまで約15分間、120℃に整定した後も異常な燃焼は認められず、安定した燃焼の運転が実現できている。

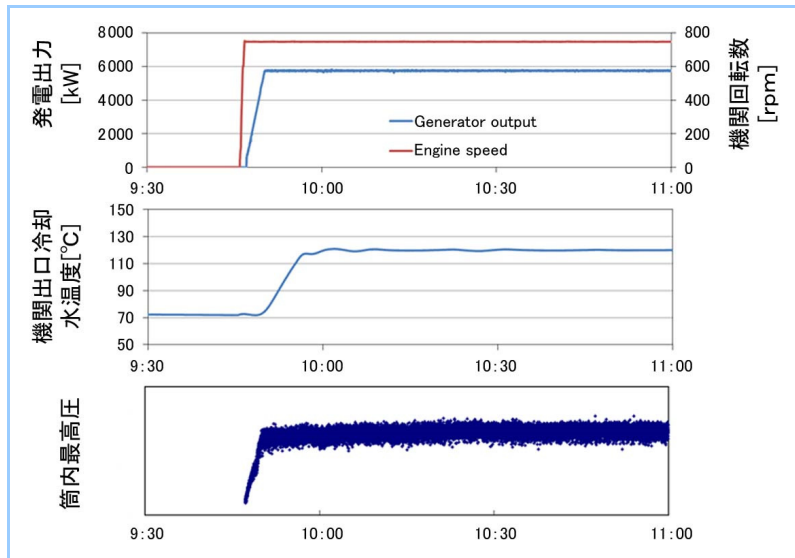


図9 機関出口冷却水温度昇温時のトレンドデータ

5. まとめ

KU30GSI-Plus において、本稿で述べた効率向上技術を適用し、発電端効率 49.5%を実現した。こうした発電効率の向上は、発電コストに寄与し、環境負荷低減やエネルギーの効率的利用に貢献できるものと考えている。

さらに、KU30GSI/KU30GSI-Plus 両モデルをラインナップすることで、CHP など熱電利用のアプリケーション、発電効率を要求されるモノジェネの両ケースにおいても、最適なソリューションを提供できるものと考えている。

高い起動性能、負荷追従性能および冷却水高温化に対する技術など、高いフレキシビリティを備えた本機関は、お客様の様々なニーズに対応し多様なソリューションを提供できるものと考えている。

参考文献

- (1) 鈴木ほか, CIMAC Congress 2013, Shanghai ; Paper No.421
- (2) 鈴木ほか, 分散型発電用ガスエンジン KU30GSI の高効率化と排熱利用技術, 三菱重工技報 Vol.50 No.3 (2013)
- (3) 高井淳, 三菱リーンバーンミラーサイクルガスエンジンの最新開発概要, 日本ガスタービン学会誌, Vol.44 No.5 (2016.9)
- (4) 吉栖ほか, CIMAC Congress 2016, Helsinki ; Paper No.189