

ガスエンジンコージェネレーションシステムによる CO₂ 削減

CO₂ Reduction by Gas Engine Cogeneration System (Combined Heat and Power)



吉栖 博史*1
Hiroshi Yoshizumi

古川 雄太*2
Yuta Furukawa

高塚 正夫*3
Masao Takatsuka

石田 道靖*4
Michiyasu Ishida

磯野 憲一*5
Kenichi Isono

低炭素・脱炭素社会の達成に向けた世界的な動きが加速している。ガスコージェネレーションシステムは、熱電併給が可能なシステムであり、省エネルギーな分散型エネルギーシステムである。三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社(以下、MHIET)では、ガスコージェネレーションシステムの発電装置の一つであるガスエンジンとして、1台あたり315~5750kWをカバーするエンジンをラインアップしており、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、複数台を利用した事業用発電まで対応している。MHIET のガスエンジン製品ラインアップと特徴、CO₂削減効果、今後の技術展望について紹介する。

1. はじめに

脱炭素化に向けた世界的な潮流、国際的なエネルギー安全保障における緊張感の高まりなどを踏まえ、2021年10月に“第6次エネルギー基本計画”が日本国政府により策定され、2050年のカーボンニュートラル化を目指し、温室効果ガスは2030年度に2013年度比で46%の削減という目標が掲げられている。

ガスエンジンの燃料である都市ガスは天然ガスから生成されている。天然ガスは図1に示すとおり化石燃料の中で CO₂ 排出量が最も少なく、他の燃料から天然ガスへの燃料転換によって熱電供給の低炭素化につながる。また、将来、水素と CO₂ からメタンを合成するメタネーション等の技術が確立すれば、ガスエンジンは、カーボンニュートラルな合成メタンを燃料とすることもできる。最近では、移行期における水素混焼ガスエンジンやカーボンニュートラルな水素専焼ガスエンジンの開発も進んでおり、水素を燃料に利用したガスエンジン技術も確立しつつある。

熱と電気を組み合わせて発生させるコージェネレーションシステムは、熱電利用を同時に行うことによりエネルギーを最も効率的に活用できるシステムであり、省エネルギー性に優れたシステムである。また、日本のガス導管は埋設されていることから風雨の影響を受けにくく、大部分は耐震性も備えている。このため、自然災害時におけるガス供給途絶リスクは低いとされており、停電対応型のガスエンジンコージェネレーションシステムは、停電時でも継続的・安定的に電気と熱の供給が可能である。

以上のとおり、ガスエンジンコージェネレーションシステムは、2050年カーボンニュートラルに向けた燃料転換に対応できるシステムであり、レジリエンス強化と省エネルギーに資する分散型エネ

*1 三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社 エンジン・エナジー事業部 技術部 課長

*2 三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社 エンジン・エナジー事業部 技術開発室 主席チーム統括
技術士(機械部門、総合技術監理部門)

*3 三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社 エンジン・エナジー事業部 技術部 主席チーム統括

*4 三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社 エンジン・エナジー事業部 技術部 次長

*5 三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社 エンジン・エナジー事業部 技術部 部長

ルギーシステムの一翼を担う役割が期待されている。

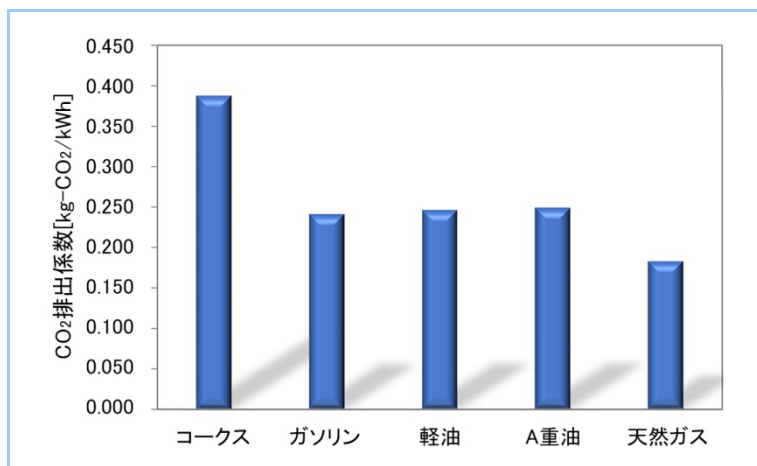


図1 燃料種とCO₂排出係数

2. 製品ラインアップと特徴

MHIET では、ガスコージェネレーションシステムの発電装置であるガスエンジンを 1990 年台初頭から開発し、多くのお客様へ分散型コージェネレーションシステムとして納入している。MHIET のガスエンジンは、発電出力 315～1500kW をカバーする高速ガスエンジン GSR と、GSR の発電効率を高め省スペースで 2000kW を出力できる GNB、3650～5750kW をカバーする中速ガスエンジン KU30GSI をラインアップし、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可能な製品をラインアップしている。表1に MHIET ガスエンジンの主要目、図2に外観写真を示す。

表1 ガスエンジン製品ラインアップ

エンジン型式		GS6R2		GS12R	GS16R		GS16R2		G16NB	12KU30GSI	14KU30GSI	16KU30GSI	18KU30GSI
ボア/ストローク		mm 170/220		170/180		170/220			300/380				
50Hz	発電出力	kW 315 500		700 930		-		1000 1500 2000		3800 4450 5100 5750			
	回転数	min ⁻¹ 1000		1500		-		1000 1500		750			
60Hz	発電出力	kW 380 450		610 815		850		1000 1200		-			
	回転数	min ⁻¹		1200				-		720			

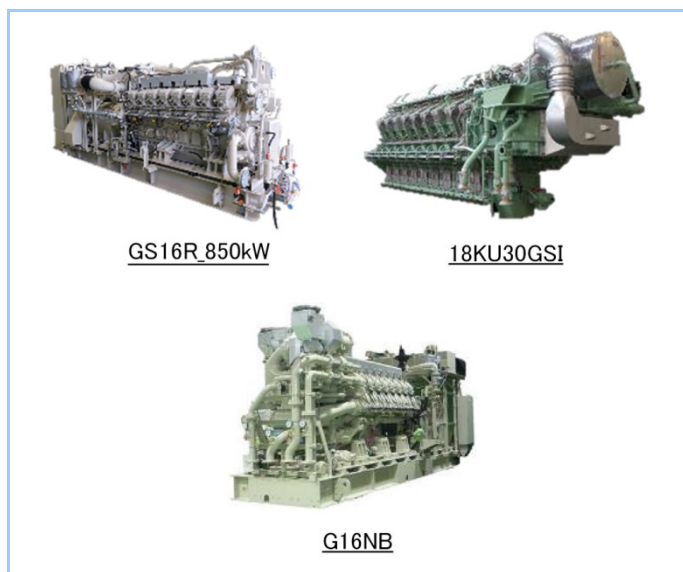


図2 ガスエンジン外観

ガスコージェネレーションシステムの発電装置には、ガスタービンやガスエンジン、最近では燃料電池を使用したものがあるが、ガスエンジンは発電出力が数百kWから複数台で数十MWのサイトで使用されることが多い。数分で定格出力まで到達できる高い起動性能や必要な電力にフレキシブルに対応できる高い負荷追従性を有しており、最近では再生可能エネルギーの調整電源としての需要も高まってきている。また、部分負荷においても発電効率の低下率は低く、特に複数台プラントでは、**図3**に示す通り運転台数の調整により出力を調整することで高い発電効率を維持した運用が可能となる。

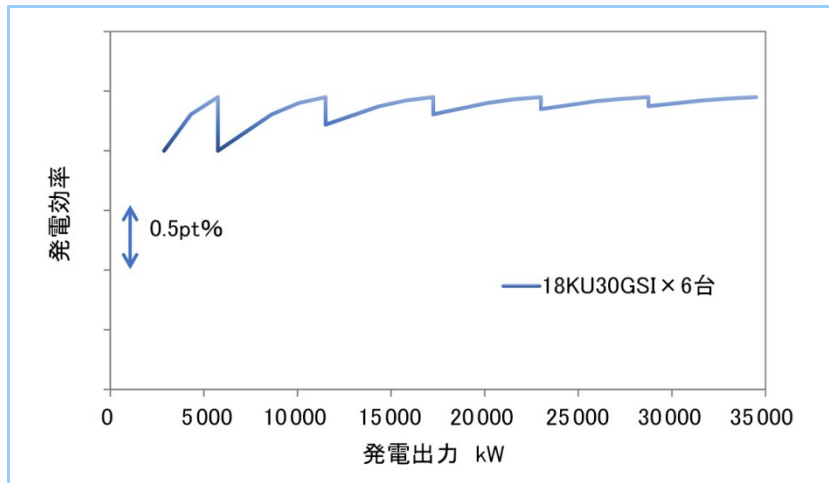


図3 複数台での発電効率

2.1 高速ガスエンジン

高速ガスエンジン“GSR”は、1991年に商品化して以来、部品の約80%をベースとなるディーゼルエンジンと共有化することで信頼性と製造、部品供給の効率化を図ってきた。発電出力は1台あたり315～1500kWをカバーし、ミラーサイクルの適用により、同出力クラスで最高レベルの発電効率を実現している。更に、優れた負荷投入性能を有しており、BOS(Black Out Start)も可能であることから、非常時の電源セキュリティニーズに応えられる機器としても利用されている。また、東日本大震災以降ニーズが拡大したBCP(Business Continuity Plan)に対応するためラジエータ仕様もラインアップしている。GSRは、高層ビル、工場、商業施設、病院等の常用電源やピークカット用の調整電源としても利用されている。

“GNB”は、市場実績が豊富なGSRシリーズをベースに、高出力・高効率機種として開発された出力2000kWの高速ガスエンジンである。同出力クラスのガスエンジンでは世界初となる2段過給システムを採用することで、排気量・エンジン回転数あたりの出力を33%増加させ、発電効率も同一回転数のGS16R2比で約9%(3.6pt%)向上させた。発電効率は同クラスの高速エンジンでは世界最高レベルであり、さらに、熱利用に関しては、蒸気、高温水に加え、給湯等での利用を想定した中温レベルの温水回収と組み合わせることで、エネルギー利用効率を高めることができる。また、2MWの発電設備を従来機種1MW機2台で構成する場合に比べ、発電パッケージの設置面積は、約40%低減することができ、ビル内設置や商業施設などの設置面積に制約がある場所でのエネルギー供給にも対応が可能である。高い発電効率とGSR同様のBOS機能や優れた負荷投入性能は、省エネルギー化に加えて、電源セキュリティの改善に貢献できる機種である。

2.2 中速ガスエンジン

中速ガスエンジン“KU30GSI”は発電効率を高めるとともに排ガス温度も高くすることで、発電と蒸気を合わせた総合効率で世界最高レベルの効率を実現している。最大5750kWの出力を有するKU30GSIは高い起動性能、負荷追従性を有し、工場などの自家発電設備をはじめ、事業用や特定電気事業者など、様々なアプリケーションで利用されている。

国内の自家発電設備では、廃温水が有効に使い切れない場合がある。そこで、KU30GSIでは

エンジン冷却水の出口温度を 120℃まで高めることで低圧蒸気生成のための安定した熱源とし、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を確立している。この“全蒸気回収ガスエンジン CGS”は 2015 年5月に商品化しており、18KU30GSI 機関 (50Hz)では、蒸気発生量が約 3.4t/h レベルから約 5.1t/h と約 1.5 倍まで高まり、“発電+蒸気”効率で世界最高の 70%以上の効率を実現している。従来のガスエンジンでは発電効率と蒸気効率の両方を高めることが難しかったが、この全蒸気回収ガスエンジン CGS は、従来では得られなかった熱電エネルギーバランスが得られ、蒸気発生量は小型ガスタービンの下限レベルと同等となった。

KU30GSI はスパークプラグ着火方式であるが、着火方式の異なる従前のマイクロパイロット着火ガスエンジン KU30GA や、KU30GA のベースとなった KU30A ディーゼルエンジンと部品の約 80%を共通設計としており、既設 KU30GA 設備を最大限に活用しながら、最新の KU30GSI への改造が可能であり、フィールド機の延命に対しても有効な機種となっている。

これら GSR, GNB, KU30GSI は、電力及び熱の需要に合わせて効率の良い省エネルギーなプラントの運用が可能で、かつ系統からの電力供給が途絶えた場合でも系統から切り離して重要負荷へ電力供給が確保できるエネルギーセキュリティの向上にも寄与できるものである。

3. CO₂ 排出量の削減

二酸化炭素 CO₂ は地球温暖化を促進させる温室効果ガスの一つであるため、カーボンニュートラル社会の達成に向けて、低炭素化・脱炭素化を進めていくにあたり CO₂ 排出量削減の重要性が急激に増してきている。

ガスコージェネレーションシステムは、熱電併給によりエネルギーを最も効率的に活用できるシステムであり、省エネルギー性に優れたシステムであるが、ここでは、CO₂ 排出量の削減効果について述べる。

日本の発電に伴う CO₂ 排出係数は、[図4](#)に示すとおり 1970 年代の 0.60kg-CO₂/kWh から減少してきており、2011 年の東日本大震災の影響に伴う原子力発電所の長期停止等により 2013 年に 0.57kg-CO₂/kWh レベルまで増加したものの、2020 年にはおおよそ 0.44kg-CO₂/kWh となっている⁽²⁾。

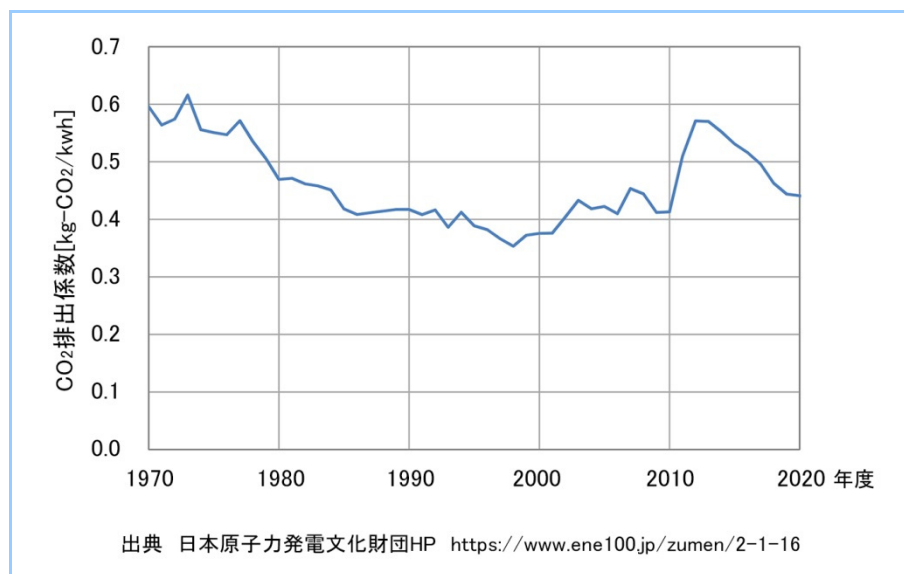


図4 日本の発電に伴う CO₂ 排出係数の推移

ガスエンジンコージェネレーションシステムは、ガスエンジンによる発電だけでなく、それに伴う廃熱を回収することでエネルギーを有効利用できる。廃熱回収は、ガスエンジンの排ガスの熱からボイラで蒸気として回収したり、エンジンの冷却水から温水として回収したりすることができる。

図5に同じ電力と熱需要をガスエンジンコージェネレーションシステムと系統電力+都市ガスボイラで供給した場合の CO₂ 排出量の比較を示す。図5の通り電力を系統から、熱需要をボイラや給湯器から賄うと、それぞれで CO₂ が排出されるが、ガスエンジンコージェネレーションシステムでは、熱電併給が可能となることから CO₂ を低減できる。図6に図5の考え方で計算した MHIET ガスエンジンの CO₂ 排出係数の試算結果を示す。MHIET のガスエンジンコージェネレーションシステムにおける発電+蒸気による CO₂ 排出係数は、約 0.27~0.34kg-CO₂/kWh であり、更に温水も全て回収すると、約 0.23~0.27kg-CO₂/kWh まで抑える事が可能なシステムである。発電と廃熱のエネルギーを系統電力(東京電力 2021 年度 0.452kg-CO₂/kWh⁽³⁾)と都市ガスボイラで賄った場合の CO₂ 排出係数に対しての CO₂ 削減率は、発電+蒸気で約 8~23%、温水も含めて回収した場合は、約 21~32%の削減効果がある。2013 年度の日本の発電に伴う CO₂ 排出係数 0.57kg-CO₂/kWh に対しては、約 34~43%の削減効果となる。

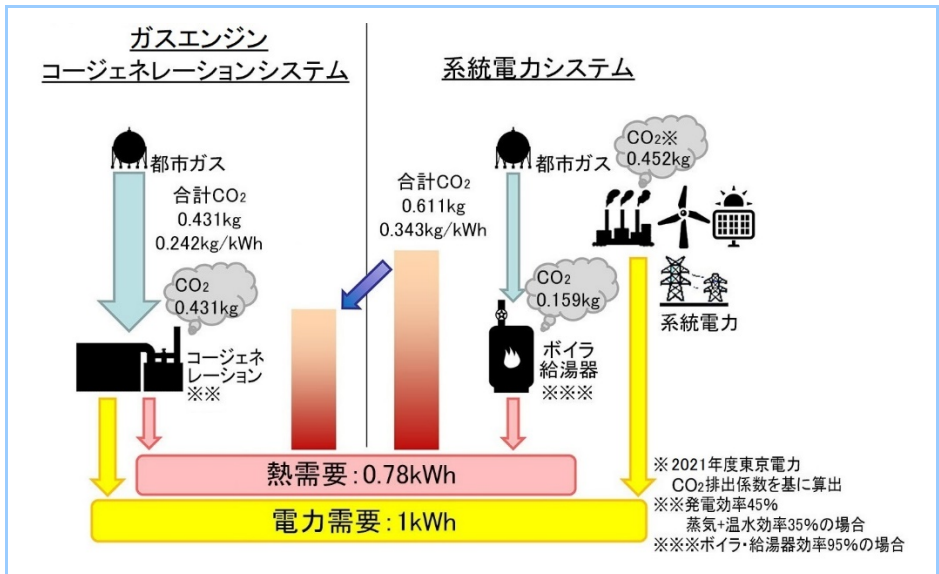


図5 ガスエンジンコージェネレーションシステムと系統電力システムの比較

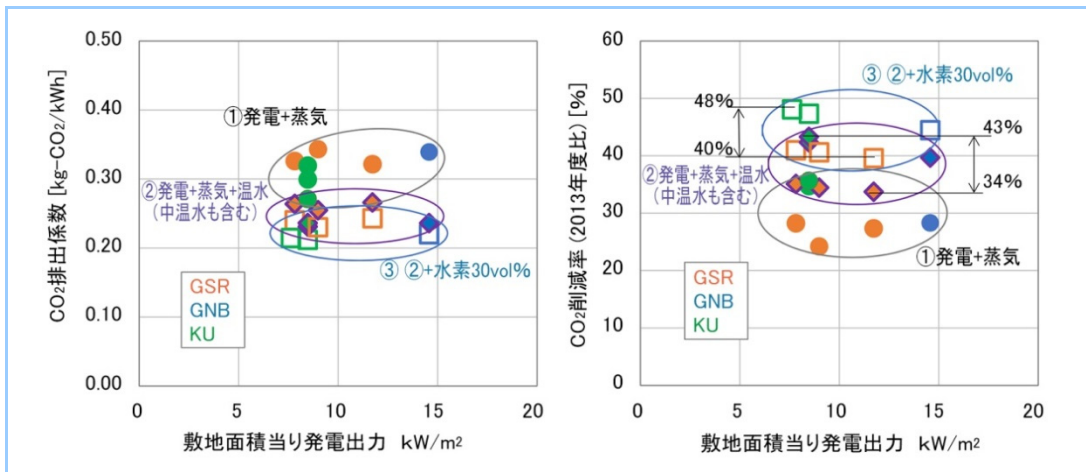


図6 CO₂ 排出係数と削減率(2013 年度比) 試算結果

更に、カーボンニュートラルな合成メタンや水素専焼までの移行期において、都市ガスに水素を混ぜる水素混合ガスが使用される可能性があり、ガスエンジンでの水素混焼技術も確立しつつある。水素混焼 30vol%の場合、CO₂ 削減率は、発電、蒸気、高温水、中温水回収で現状の系統電力、都市ガスボイラに対して約 28~38%近くまで削減、2013 年度比の場合では、約 40~48%まで削減できる可能性がある。

このように、ガスエンジンコージェネレーションシステムは、現行システムを利用しながら大きな CO₂ 削減効果を持つシステムである。

4. 今後の技術展望

エネルギー基本計画⁽¹⁾によると、カーボンニュートラル社会を達成するためには、水素は電化が難しい熱利用の脱炭素化、電源のゼロエミッション化、産業部門の脱炭素化など多様な貢献が期待されており、水素供給量は、2030年に最大300万t/年、2050年には2000万t/年程度に拡大することを目指すとされている。また、水素の供給コストについても、2030年に30円/Nm³(CIF価格)、2050年には20円/Nm³以下に低減し、長期的には化石燃料と同等程度の水準までコストを低減することを目指すとされている。

カーボンニュートラル社会に向けて、ガスエンジンにおいても水素を燃料として利用していく必要があるが、水素を利用する上での技術的な課題のひとつとして、水素の燃焼特性が挙げられる。水素は都市ガスに比べて可燃範囲が広く、燃焼速度が速く、最小点火エネルギーが小さいという特徴がある。そのため、エンジンで使用した場合は、ノッキングや過早着火、バックファイアなどの異常燃焼が発生しやすくなる。

MHIETのガスエンジンは、副室式を採用し、副室内の空気と燃料ガスの比率を完全燃焼に必要な理論空気量とほぼ同等にして安定した着火を実現しながら、主燃焼室の空気過剰率を約2前後まで高め、超希薄燃焼とすることでNO_x等のエミッションを下げつつ、高効率な燃焼を実現している。図7に空気過剰率と層流燃焼速度の概念図を示す。水素は燃焼速度が速い特徴があることから、副室式を採用すると主燃焼室での燃焼速度が速くなりすぎ、燃焼が制御できなくなることが考えられる。燃焼速度は空気過剰率を高めることで抑制できるが、必要な空気量が増え過給機の性能により出力や混燃率に制約がかかると考えられる。そのため、今後の水素利用にあたっては過給機の高圧力比化技術の利用が益々進むものと考えられる。

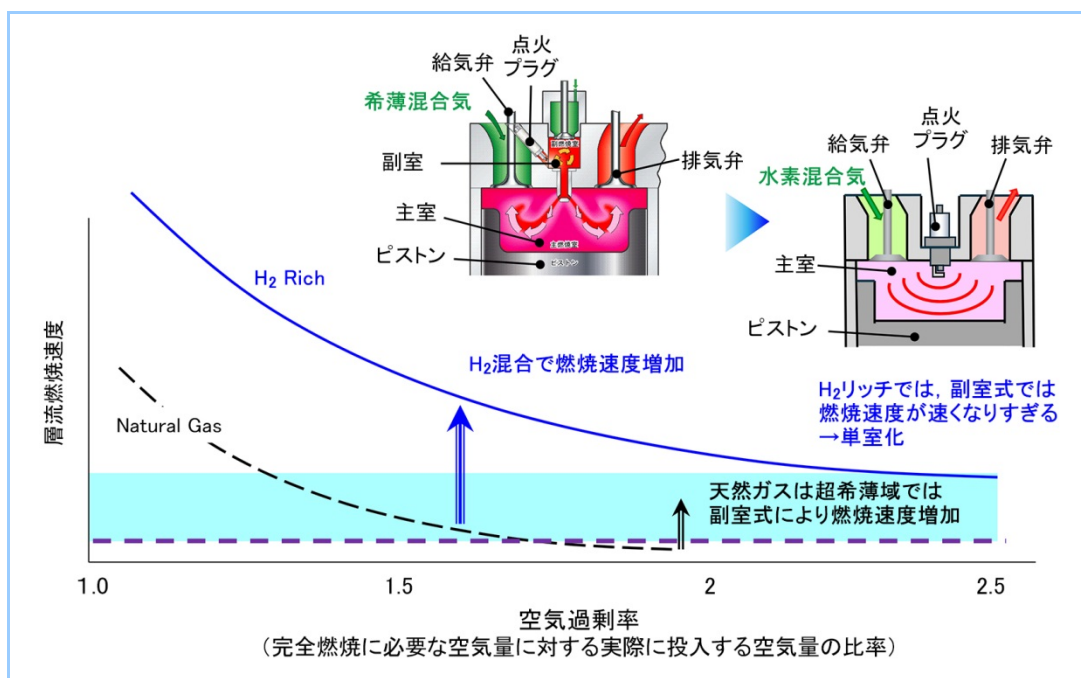


図7 空燃比と層流燃焼速度の概念図

一方、燃焼方式については、副室式から単室式へ変更することで燃焼速度を抑制することが可能である。特に水素専焼においては、単室式へ燃焼方式を変更した上で過給機の性能とのマッチングの中で安定運転可能な性能最適化が進められていく。水素専焼対応のためには、副室式から単室式への変更に加え、エンジン内への水素供給位置、圧縮比、空燃比などの混合気形成と燃焼条件に関わる仕様の最適化と燃焼をモニタリングして適切な燃焼制御を行うシステムが必要となる。MHIETではこのような水素の特性を踏まえて、単筒試験機を活用して評価を進めており、水素専焼における適正仕様の検証を実施中である。

次に2030年度までの技術展望について考える。2030年度の電源構成予想では、石油・石炭・LNGといった化石燃料を41%程度に抑え、原子力を20~22%、再生可能エネルギーを36~38%まで増加、水素・アンモニアは1%程度とされている⁽¹⁾。水素の社会実装には、製造、輸送・貯蔵、利用までの水素サプライチェーンが、他のエネルギー源に対してコスト競争力のある形で供給される必要があり、臨海部等での大規模活用や水電解装置等を用いた自家消費、周辺利活用が実装モデルとして進められているが、最適な水素サプライチェーンは一義的には決まらず、社会実装モデルの構築を通じて水素供給コストを最小化すべく検討が進められている段階である。

水素社会の実現には、大規模水素サプライチェーン構築と需要創出を一体的に進める事が必要とされており、発電部門における水素利用については、最新の大型ガスタービン(GTCC:Gas Turbine Combined Cycle)においても最小限の改造で導入可能な30vol%混焼の燃焼機器開発が完了し、水素混焼率の増加や専焼についても開発が進められている⁽⁴⁾。ガスエンジンにおいても、大幅な改造を伴わない範囲での水素混焼は発電需要を支えるものと考えられ、水素サプライチェーンが地域毎に進められていることから、比較的小規模な発電においては発電効率の高いガスエンジンコージェネレーションシステムによる水素混焼発電が実現していく可能性があると考えられる。

天然ガスへのシフト、ガスコージェネレーションシステムの導入は水素社会実現までの移行期にも促進されていくとみられるが、化石燃料の利用においてはCCUS(Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage)による炭素貯蔵、再利用が進められると考えられている。三菱重工業株式会社では、石炭火力発電所や化学プラントに対して、独自のCO₂回収プロセスKM CDR ProcessTMを納入し、その規模は500t-CO₂/日以上となっている。この技術を小規模なCO₂発生源での削減ニーズに対応すべく、小型のCO₂回収装置の開発も進められており⁽⁵⁾、MHIETの発電出力1500kWのGS16R2ガスエンジン設備に小型CO₂回収装置を組み合わせた実証試験を三菱重工業株式会社相模原製作所で実施中である。図8に実証試験に用いているCO₂回収装置の外観を示す。



図8 GS16R2 1500kW 発電セットと小型CO₂回収装置

また、再生可能エネルギーの電源比率向上が掲げられていることから、太陽光や風力発電が脱炭素化を進める上で重要な電源の位置付けである一方で、再生可能エネルギーは、天候や気象条件によって発電量が変動する不安定な電源であることが課題である。そのため、再生可能エネルギーの発電量が低下したときのバックアップ電源の需要が高まるものと考えられる。ガスエンジンは、優れた負荷追従性を有しながらCO₂排出が少なく、バックアップ電源としての利用も高まると考えられる。また、蓄電池とガスエンジンコージェネレーションシステムを組み合わせたハイブリッド発電は、更に安定した電源供給を実現するシステムであり、再生可能エネルギーの利用を促進するソリューションの一つになるものと考えられる。MHIETでは、ハイブリッド発電システムとして500kWのGS6R2ガスエンジンと500kW×0.5hの蓄電池設備、311kWの太陽光発電を組み合

わせた EBLOX を開発、実証済である⁶⁾。図9に EBLOX の外観を示す。このようなハイブリッド発電システムは、オフグリッド地域への自立給電システムとしても活用されていくと考えている。

2050年のカーボンニュートラル化に向けて、コストを抑えつつ円滑な脱炭素化への移行には合成メタンの技術確立が期待されているが、ガスエンジンコージェネレーションシステムは、水素混焼、水素専焼、合成メタンのいずれにも対応していくことができるポテンシャルのあるシステムである。再生可能エネルギーとのハイブリッド発電システムも開発されており、分散型エネルギーシステムの一つとして将来のエネルギー需要を支えていく重要なシステムになるものと考えられる。

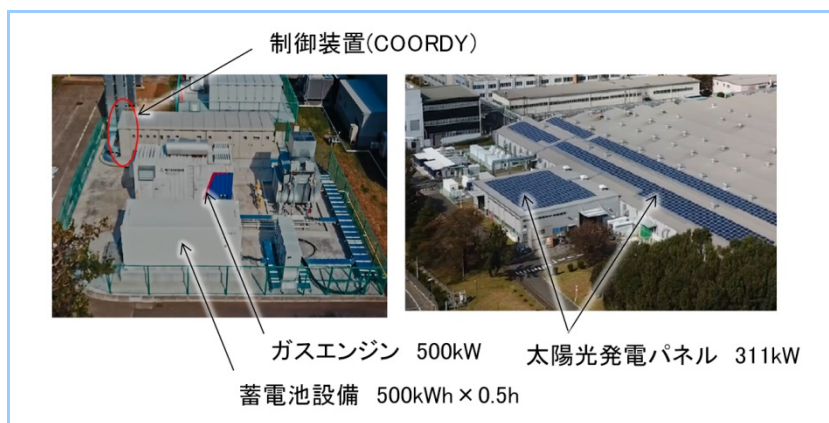


図9 ハイブリッド発電システム(EBLOX)実証設備

5. まとめ

MHIET では、省エネルギーな分散型エネルギーシステムであるガスエンジンコージェネレーションシステムを幅広い出力でラインアップしている。これらのガスエンジンは、将来のカーボンニュートラル社会の達成に向けて、水素専焼や合成メタンにも対応可能なポテンシャルを持ち、移行期の水素混焼にも対応できる。MHIET のガスエンジンコージェネレーションシステムの CO₂ 排出係数は、発電+蒸気+温水(中温水利用も含む)により、2013年度比で系統電力+都市ガスボイラに対して約 34~43%の削減効果があり、水素混焼 30vol%により約 40~48%の削減効果が見込まれる。水素サプライチェーン構築の取組みが地域毎に進められていることから、数百 kW~数十 MW の比較的小規模な発電においては分散型エネルギーシステムとして発電効率の高いガスエンジンコージェネレーションシステムによる水素を利用した熱電併給が実現していくものと考えられる。

MHIET のガスエンジンコージェネレーションシステムは、数多くの実績に基づく信頼性を有しており、将来のカーボンニュートラル社会に向けて移行期も含めてエネルギー需要を支えていく重要なシステムになると考えている。

参考文献

- (1) 経済産業省資源エネルギー庁, 第6次エネルギー基本計画
- (2) 日本原子力発電文化財団 HP <https://www.ene100.jp/zumen/2-1-16>
- (3) TEPCO 東京電力エナジーパートナーHP
https://www.tepco.co.jp/ep/notice/news/2022/1663624_8910.html
- (4) 松本ほか, カーボンニュートラルに貢献する水素・アンモニア焚き ガスタービンの開発状況, 三菱重工技報 Vol.59 No.4(2022)
- (5) 仙波ほか, 小型 CO₂ 回収装置の製造業排出源適用に向けた取組み, 三菱重工技報 Vol.59 No.4(2022)
- (6) 田中ほか, 分散電源時代に向けたトリプルハイブリッド発電システムの実証“EBLOX”“COORDY”の開発, 三菱重工技報 Vol.56 No.2(2019)