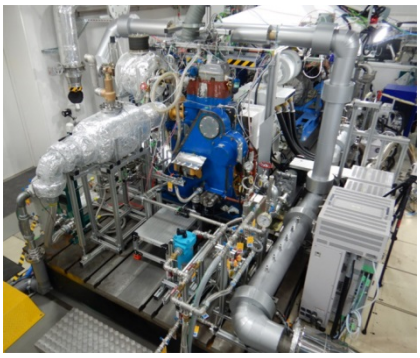
低炭素・脱炭素エンジン製品の紹介

New Engine Products for a Low & Decarbonized Society



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

カーボンニュートラル社会の実現に向けて，排出二酸化炭素の低減が急務であり，レシプロエンジンにおいても，この変化に対応していく必要がある。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，エンジン製品の排出二酸化炭素低減のため，各種の技術開発・製品開発に取組んでおり，ここで紹介する。

1. カーボンニュートラル化への想定シナリオ

エンジンでカーボンニュートラルを実現する方策としては，主にカーボンニュートラル燃料を使用する手法と排出ガス中の二酸化炭素を回収する手法の2つがあるが，二酸化炭素回収設備を，エンジンの出力に合わせて小型化してコストを低く抑えることは非常に困難なため，燃料による対応が現実的である。

燃料のカーボンニュートラル化については，バイオ燃料活用と水素活用の2種があり，ここでは水素を起点とする各種燃料について図1に整理した。カーボンニュートラル水素の製造方法としては，主に次の2つがある。(1)水蒸気メタン改質によって水素を製造し，発生する二酸化炭素を回収・貯蔵する。この水素はブルー水素と呼ばれる。(2)再生可能エネルギーによる電力を用いた水の電気分解によって水素を取り出す。この水素はグリーン水素と呼ばれる。

製造した水素は，図1に示す通り，水素として利用するだけでなく，輸送や利用を考えて様々な燃料に変換して活用することが可能である。レシプロエンジンの場合は，基本的な構造を大きく変更せずに，燃焼調整で幅広い燃料に対応できることや，燃料に対する純度の要求が燃料電池ほど厳しくないことなどのメリットがある。

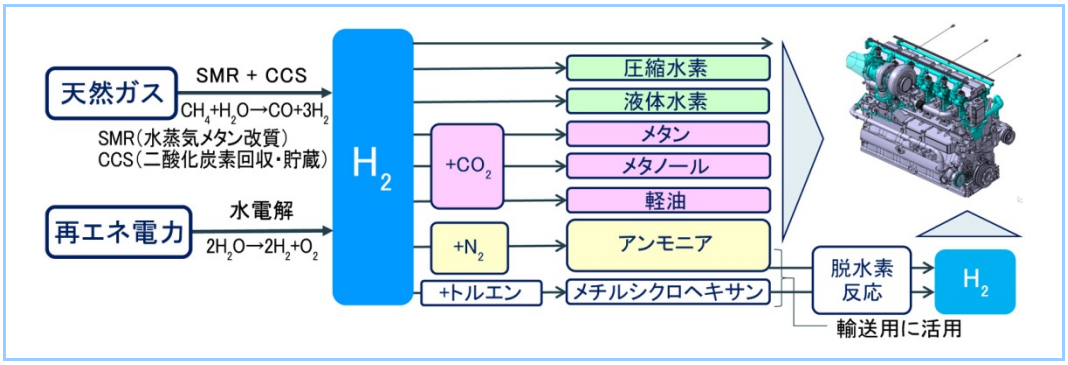


図1 水素を起点とした各種燃料

発電用エンジンにおけるカーボンニュートラル対応の想定技術シナリオを図2に示す。発電用エンジンにおいては，まず天然ガスへの水素の混焼から始まり，徐々に水素の割合が増えてい

き，最終的には水素 100%の専焼に進むと想定される。なお図には示していないが，舶用エンジンにおいては，水素では発熱量当たりの容積が大きくなるため船舶への搭載は困難であり，アンモニアが有力である。現時点ではディーゼル油が主流のため，まず 2030 年にかけて天然ガス化が進み，その後徐々にアンモニアへの転換が進むと考えられる。

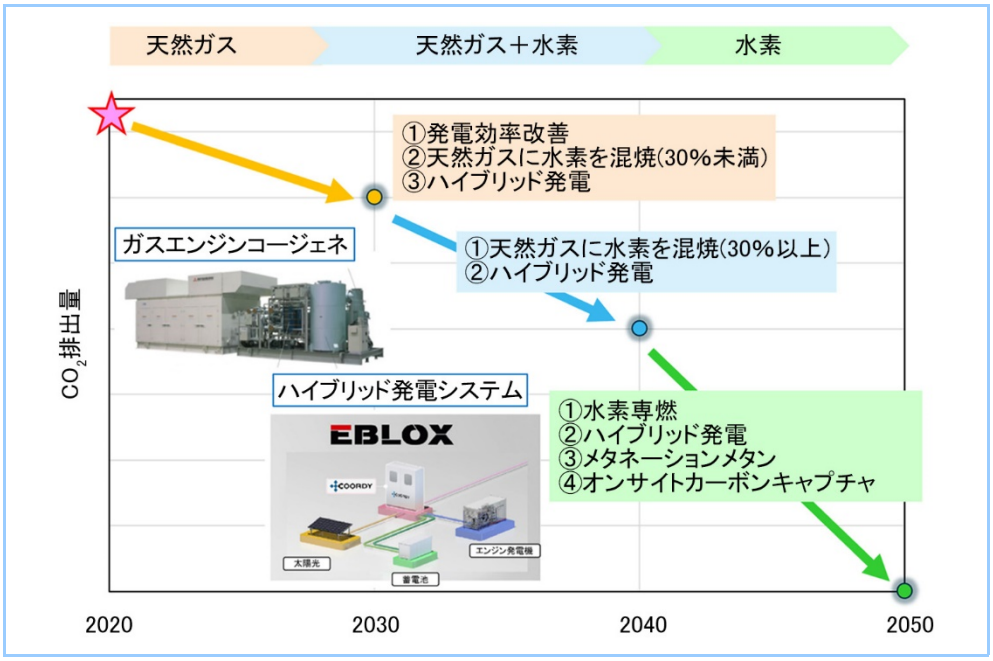
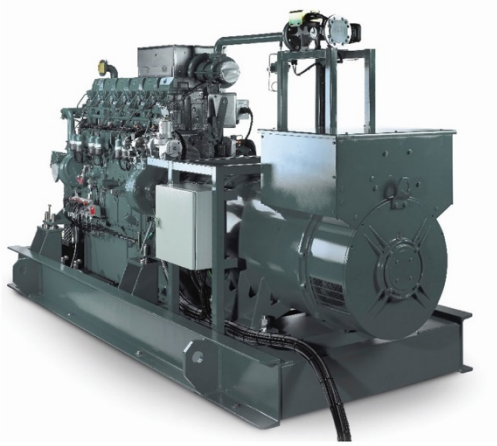


図2 発電用エンジンのカーボンニュートラル対応想定技術シナリオ

2. 舶用ディーゼルの天然ガスへの転換

ディーゼル燃料から天然ガスへ燃料転換することで燃料中の水素の割合が増えるため，排出二酸化炭素は 20%低減する。舶用エンジンにおいては，まだディーゼル燃料が主力であり，今後天然ガスへの転換が大きく進展すると予想されている。

MHIET では，発電用に開発した副室式リーンバーンガスエンジンを舶用に適用し，欧州を中心に既に 40 台以上を販売している。図3に舶用ガスエンジン発電セットの外観と主要諸元を示す。今後，舶用エンジンの天然ガスへの転換が加速するため，舶用ガスエンジンの製品ラインアップ拡大を進めていく計画である。



項目	単位	内容
シリンダ数	–	6
シリンダ直径×ストローク	mm	Φ170×220
定格出力	kW	380
回転数	min^{-1}	1200
点火方式	–	火花点火
燃焼方式	–	希薄燃焼

図3 舶用ガスエンジン発電セット外観及び主要諸元

3. 再生可能エネルギーとのハイブリッド化

太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーは，発電電力が自然環境に依存し変動するため，電力需要への安定的な電力供給が難しいという問題があり，特に系統電力の存在しないオフグリッド地域での活用には大きな制限がある。そこで，蓄電池とエンジン発電機を再生可能エネルギー電源と組み合わせて，電力需要に合わせた電力供給を実現するハイブリッド発電システムEBLOXを開発した。EBLOXの構成及び実証設備について図4に示す。EBLOXはエンジン発電機，再生可能エネルギー，蓄電池の3電源を，制御装置 COORDY で最適に制御することで，自立運転可能とした発電システムである。本システムは三菱重工相模原製作所に設置した実証設備にて各種機能の開発・検証試験を行い，オフグリッド地域への自立給電システムとして活用できることを実証済である。今後の再生可能エネルギーの活用に貢献する製品として展開を進める。更に将来的には，エンジン発電機を水素エンジンに変更することで，CO_2 排出のない自立給電システムを完成させ，脱炭素社会の実現とエネルギーの安定供給に貢献していく。

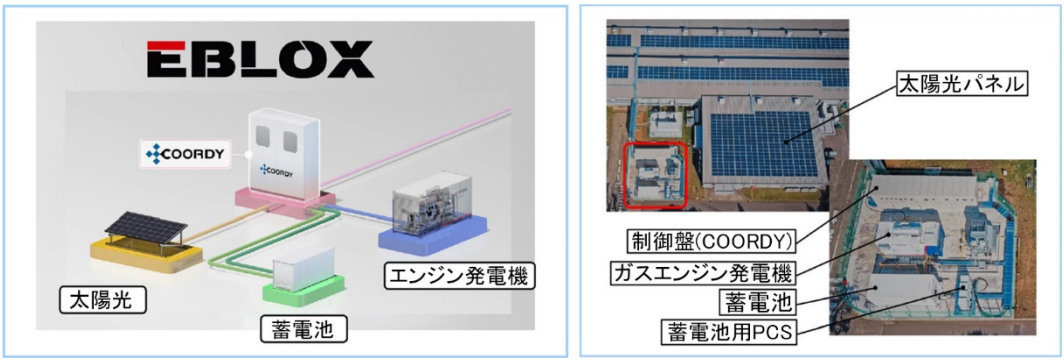


図4 EBLOX 構成及び実証設備

4. 水素エンジン

4.1 水素エンジン普及時期の予想

発電用エンジンで考えた場合，水素エンジンが普及するには経済性で都市ガスより良くなることが条件である。現在の水素価格は約 100 円/Nm^3 であり，発熱量当たり価格で見ると都市ガスよりも6倍以上の高コストとなっている。今後の水素価格の低下が不可欠であるが，もう一つは将来導入されると予想されるカーボンプライスがポイントである。将来のカーボンプライスは定まっていないが，ここでは 0～250USD/t-CO_2 の範囲で変化した場合について，水素と都市ガスの経済性に関する比較を行った。比較結果を図5に示す。図5は横軸に水素価格，縦軸に発熱量当たりの水素価格を都市ガス価格で割った数字を示している。都市ガス価格にはカーボンプライスを含めた金額を使っている。図5で縦軸の数字が1を下回ると，水素の方が，経済性が良いと言うことになる。従って，仮にカーボンプライスが 250USD/t-CO_2 となれば，水素価格 30 円/Nm^3 が水素普及条件となる。カーボンプライスが 50USD/t-CO_2 程度にとどまれば，水素価格は 20 円/Nm^3 以下まで下がる必要がある。なお経済産業省の目標では水素価格が 30 円/Nm^3 となるのは 2030 年，20 円/Nm^3 となるのは 2050 年であることから，水素普及は 2030 年以降と予想される。

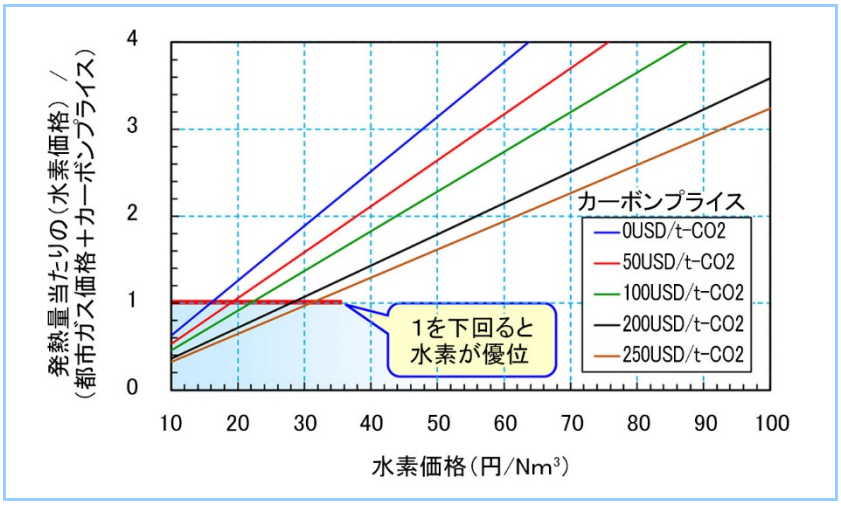


図5 水素エンジン普及条件

4.2 水素をエンジンに用いる場合の技術的課題

水素をレシプロエンジンに使用する上での技術的な課題としては，異常燃焼が発生しやすい点がある。図6に水素とメタンの燃焼特性の比較を示す。水素はメタンに比較して可燃範囲が広く，最小点火エネルギーが低く，燃焼速度が速いため，エンジンで使用した場合は，バックファイア(逆火)，プレイグニッション(過早着火)，ノッキングなどの異常燃焼が発生しやすい。これらの異常燃焼を避けるためには，水素の供給位置，着火方式，圧縮比，空気過剰率など混合気の形成と燃焼条件に関わる仕様を最適化する必要がある。なお燃焼特性以外にも水素のハンドリングなどについても課題解決の必要がある。

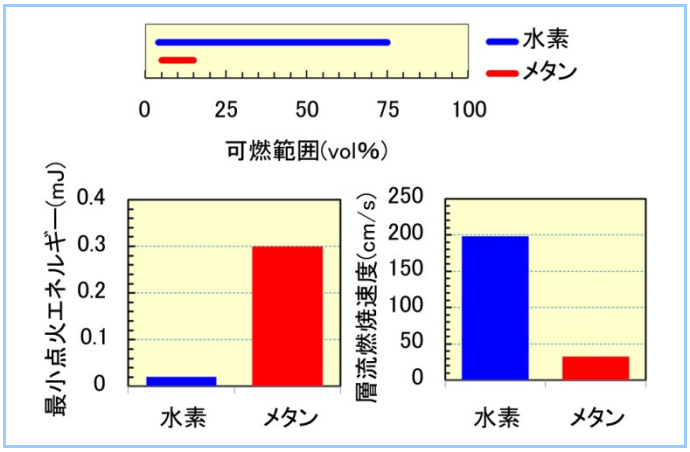
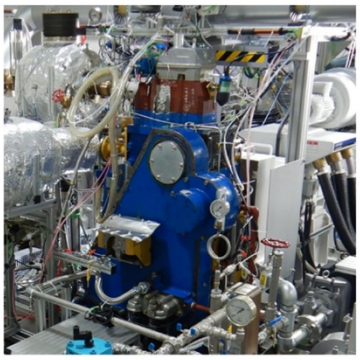


図6 水素とメタンの燃焼特性の比較

4.3 水素燃焼基礎試験

MHIET では，国立研究開発法人 産業技術総合研究所との共同研究により，水素エンジンの運転試験を実施した。MHIET 製の4ストロークレシプロガスエンジン“GS6R2～GS16R2”シリーズ(ピストン径 170mm × ストローク 220mm)を改良した単気筒エンジンを，産総研 福島再生可能エネルギー研究所(福島県郡山市)に設置し，水素 100%での燃焼試験を開始した。図7に試験装置の外観と主要諸元を示す。水素の燃焼特性に合わせて，水素燃料供給方法，着火方法，給気弁閉じ時期などを見直し試験を実施した。出力を向上させていく段階でプレイグニッションや軽度なバックファイアが発生したが，空気過剰率や点火時期などの燃焼パラメータの調整を行いながら，徐々に出力向上を行った。その結果，水素 100%にて 16 気筒換算で 920kW までの出力向上に成功した。今後，燃焼条件，仕様の調整を行い 16 気筒換算で 1000kW の出力達成を目指す。また試験データを積み重ねることで，次段階の多気筒試験機の開発につなげる。



項目	単位	内容
シリンダ数	–	1
シリンダ直径×ストローク	mm	Φ170×220
目標出力（16気筒換算）	kW	1000
回転数	min^{-1}	1500
点火方式	–	火花点火
燃焼方式	–	希薄燃焼

図7　水素エンジン試験装置

5. 今後の展開

レシプロエンジンは，ディーゼル燃料から天然ガスへの転換が既に進行しており，低炭素化の流れからこの転換は加速していく。更に低炭素化が進むと天然ガスに水素を混合するエンジンやハイブリッド発電システムが普及すると考えられる。脱炭素社会では，再生可能エネルギー起源の炭素を含まない水素，アンモニアなどの燃料が使用される。MHIET では，それぞれの低炭素・脱炭素の段階に対応し燃料の普及状況や社会の要請に適したエンジン製品を商品化していくべく，水素混焼ガスエンジン，水素エンジン，アンモニアエンジンなどの研究開発を推進していく。なお将来的には，水素エンジンとしては，6，12，16 気筒エンジンを製品化し，350～1000kW のレンジをカバーする。製品投入は水素普及が見込まれる 2030 年代の予定である。