

水素噴射クリーンエンジンの開発

高石龍夫・赤川裕和

三菱重工業(株)長崎研究所

851-0392 長崎市深堀町 5-717-1

Development of High-powered Hydrogen Engine System

Tatsuo TAKAISHI and Hirokazu AKAGAWA

Mitsubishi Heavy Industries, Ltd

5-717-1 Fukahori-machi, Nagasaki, 851-0392

The diesel engine has a diversified variety of uses such as power generation, marine vessels, and construction machinery. A hydrogen injection engine utilizes hydrogen as fuel in place of petroleum for such conventional diesel engines. As the fuel does not include carbon or sulfur, it is the clean engine that does not emit particulate matters, SO_x, or CO₂. Except for its injection system it does not differ from a conventional diesel engine. Therefore, it has high reliability. It also has the merit of being able to use low purity hydrogen such as coke oven by-product gas, which includes methane and CO.

Using a single-cylinder engine of 100 kW with a high-pressure injection system of 30 MPa, combustion tests were conducted. As the results, stable self-ignition at high loads and a start-up with intake gas at room temperature by electric spark ignition were secured. The power generation efficiency was 49.2 % (low heat value) at the rated load and that of 52.0 % (likewise) can be expected on the next generation engines. The NO_x emission was reduced to 835 ppm (remainder O₂ of 0%) by exhaust gas recirculation. It can be decreased to 100 ppm (likewise) by catalytic reduction.

Keywords: hydrogen engine, ignition, NO_x, exhaust gas recirculation

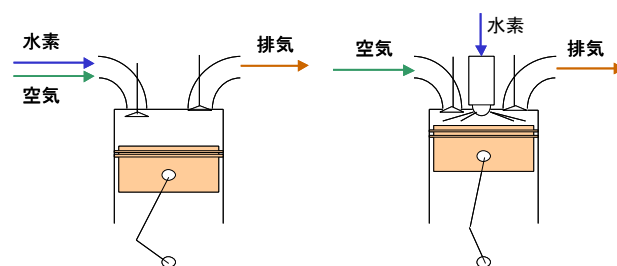
1. まえがき

ディーゼルエンジンは発電用、船舶用、建機用等の幅広い用途と1世紀以上の実績を有し、社会基盤を支える原動機である。大容量水素エンジン（以下、本エンジンと称す）は、このディーゼルエンジンの燃料として石油系に代わり水素を使用し、粒子状物質、SO_x、CO₂を排出しないクリーンエンジンである。

また、主要コンポーネントとして燃料噴射系以外は実績あるディーゼルエンジンのそれと変わらないため高信頼性が期待される。

2. 本エンジンシステムの特徴、基本構成

水素エンジンの燃焼方式には大別して、希薄予混合燃焼方式と筒内噴射拡散燃焼方式があり、各々の基本形式を図1に示す。本エンジンは後者の方式であり、前者の方式で水素を使用した場合に課題となる過早着火やノック



(a)希薄予混合燃焼方式 (b)筒内噴射拡散燃焼方式

図1 水素エンジンの燃焼方式

キングなどの異常燃焼を発生させずに従来ディーゼル並みの出力性能を実現できる特徴がある。

本エンジンシステムの基本構成を図2に示す。空気を作動ガスとするオープンサイクルの排気ターボ過給エンジンである。ここで、後述する技術課題の解決を目指した着火・燃焼システムの概略の構成を図3に示す。また、将来的に実用化を想定した600kW級エンジンの主要目を表1に示す。

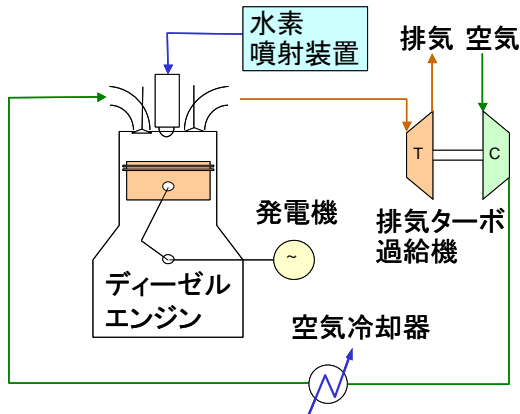


図2 大容量水素エンジンシステムの基本構成

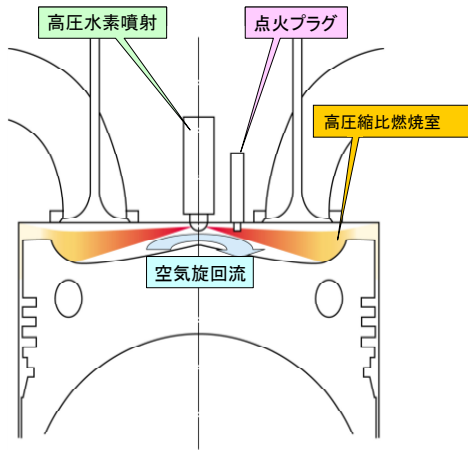


図3 着火・燃焼システムの概略構成

表1 水素噴射エンジン実機の主要目

| | |
|------------------------|-------------------------------|
| 項目 | 仕様・寸法 |
| 種類 | 4サイクル |
| シリンダ数 | 6 |
| 内径×行程 | φ170 mm×220 mm |
| 定格発電出力 (発電機効率95%仮定) | 600 kW/1,500min ⁻¹ |
| 正味平均有効圧 | 1.69 MPa |

3. 燃焼上の技術課題

本エンジンの燃焼上の技術課題と対策を表2に示す。第1の課題は安定着火である。水素は表3に示す通り自発火温度が石油系燃料より高いため、従来ディーゼルエンジン並みの圧縮比では自着火しない。そこで、圧縮比を増大して高負荷での自着火を狙うが、始動時は給気温度及び燃焼室温度が低いので電気点火プラグにより強制着火の安定化を図る。第2の課題は、他原動機との差別化の点から水素物性を利用した発電効率、熱効率の一層の向上である。水素は表3に示すように石油系燃料より燃焼熱量当たりに必要な理論空気量が少ない。これに着目し圧縮比を高めて、サイクル効率を向上させるとともに、水素の高燃焼速度の活用による燃焼期間の短縮化、これによる等容度向上を図る。第3の課題はNO_x低減である。水素の燃焼温度が高いため高圧噴射拡散燃焼方式ではNO_xを排出するが、排気に粒子状物質、SO_xを含まない特性を利用して信頼性を損なうことなく排ガス再循環(EGR)が実施可能である。このEGR適用により給気中の酸素濃度を低下させてNO_x生成の抑制を図る。生成したNO_xは触媒を用いた後処理装置との組合せにより更なる低減が可能である。

表2 燃焼上の技術課題と対策

| 技術課題 | 対策 |
|-----------------------|---|
| 1. 安定着火 | <ul style="list-style-type: none"> ・高圧縮比化で自着火 ・電気着火プラグによる強制点火 |
| 2. 熱効率向上 | <ul style="list-style-type: none"> ・高圧縮比化で燃焼サイクル効率向上 ・高噴出速度、高速燃焼を積極活用 |
| 3. NO _x 低減 | <ul style="list-style-type: none"> ・低酸素濃度の排ガス再循環 ・触媒による排ガス後処理 |

表3 水素と石油系燃料の物性比較

| | 水素 | 石油系 |
|-----------------------------------|------------|------------|
| 自発火温度 (大気圧) | 571℃ | 230℃ |
| 低位発熱量 | 120.0MJ/kg | 42.7MJ/kg |
| 理論空気量 | 34.3 kg/kg | 14.3 kg/kg |
| 理論空気量 ÷低位発熱量 | 0.286 g/kJ | 0.335 g/kJ |
| 音速 (300K、 30MPa から臨界 まで膨張時) | 1,370 m/s | (-) |

4. 本エンジンシステムの燃焼特性

実用化想定 of 600kW 級エンジンとシリンダ内径・ストロークが同じ 100kW 級の単筒実験機を使用して燃焼試験を実施した。

①着火の安定性 始動時電気火花点火試験結果を図4に示す。噴流先端がプラグ位置に到達後に点火すれば、常温で安定始動可能であった。図5に高負荷自着火試験結果を示す。高負荷では圧縮温度 690℃（圧縮比 18.3 で給気温度 100℃）程度以上で安定自着火が可能であった。このように高負荷時に通電停止すれば点火プラグ損耗防止の点で有利であり、点火プラグの信頼性を確保できる。

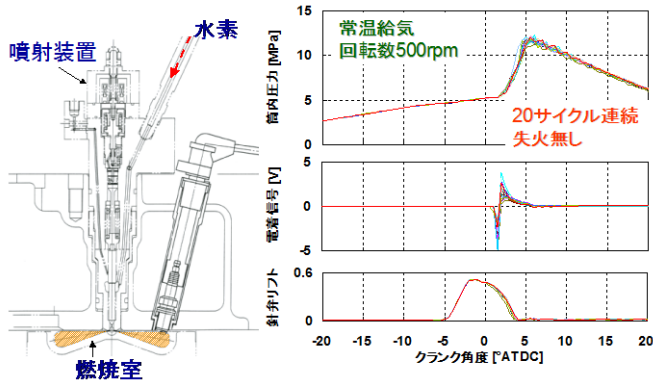


図4 始動時電気火花点火試験結果

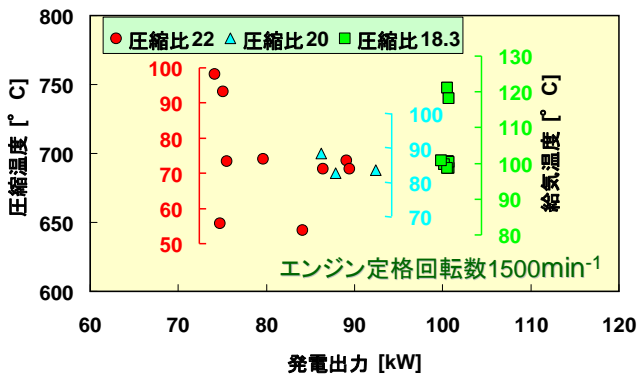


図5 高負荷自着火試験結果

②発電効率 発電効率の計測結果を図6に示す。定格運転点：100kW で発電効率 49.2%（低位発熱量基準）を達成した。さらに筒内最高圧力を従来値 14.8MPa よりも高い圧力を許容した場合の性能シミュレーション解析結果を図7に示す。筒内最高圧力 19.6MPa の次世代機関では高圧縮比化により発電効率 52.0%（低位発熱量

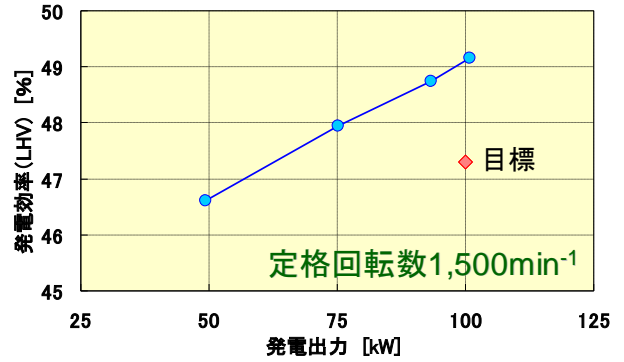


図6 発電効率計測結果

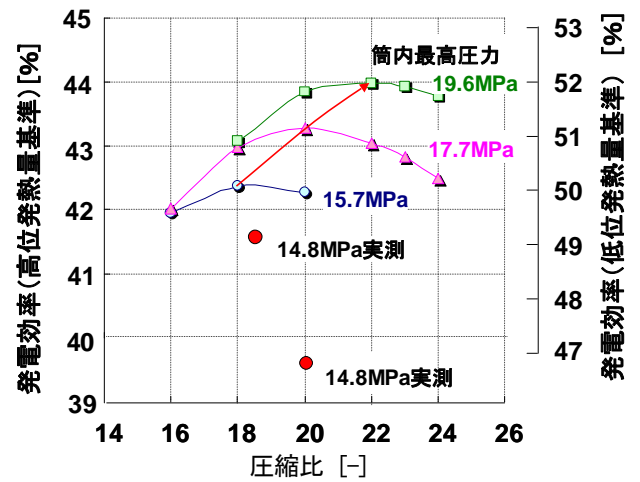


図7 高効率化の性能シミュレーション結果

基準）が期待される。このように、本エンジンシステムが性能面で高いポテンシャルを有することを確認した。

③排ガス特性 本エンジンシステムでは基本的に粒子状物質、SO_x、CO₂を排出しないが、オープンサイクルでかつ燃焼温度が高いためサーマル NO_xを生成する。これに対しては、排ガス再循環（EGR）の適用でNO_xを800ppm レベルまで低減できることを確認した（EGR率24%で835ppm（残O₂:0%））。さらに、触媒脱硝は生成NO_xを1/10レベルに低減できる実績があるので、これとの組合せで最終的に100ppm（同）以下の低NO_x化が可能である。

5. 信頼性

本エンジンは燃料噴射系の部品のみが従来ディーゼルエンジンと異なるので、燃料噴射系及び燃焼系を中心に信頼性検証試験を実施した。

①熱負荷 燃焼室廻りの温度計測結果を図8に示す。ピストン触火面、シリンダライナトップリング位置温度

ともに従来ディーゼルとほぼ同等であった。従って、本エンジンの熱負荷による燃焼室廻り部品の信頼性は、従来ディーゼル並であることが分かった。

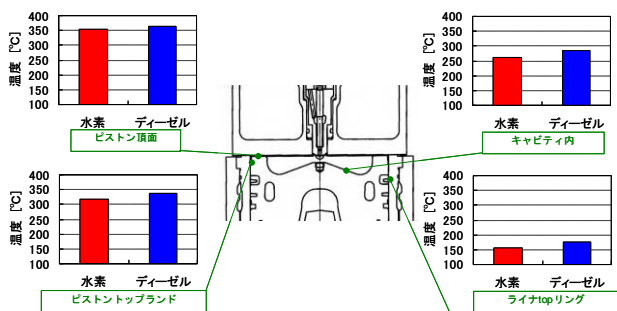


図8 燃焼室廻り温度計測結果

②エンジン性能の安定性 75%負荷で連続運転試験(約 50 時間)を実施した結果、燃焼状態を示す指標である等容度、有効受熱割合はほぼ一定であり、良好な燃焼安定性を確認した。本エンジンシステムでの発電効率・排気温度・排ガスなどの各種性能が連続運転中に安定であることが確認された。

6. 今後の応用展開

水素利用の原動機としての本エンジンの位置付け、すみ分けの点から燃料電池との比較を表4に示す。本エンジンシステムは燃料電池より単機出力が大きく、比較的高出力用途に適する。また、排熱温度レベルが高くコージェネレーション用にも適する。さらに、本エンジンシステムの利点の一つとして、低純度水素の利用可能が挙げられる。

表4 水素エンジンと燃料電池の比較

| | 水素エンジン | 燃料電池 (PEFC) |
|---------|---------------------------------------|-------------|
| 単機出力 | 100kW~数十 MW | 数百 kW 以下 |
| 排熱温度レベル | 500℃程度 | 70℃程度 |
| 低純度水素利用 | 可能 | 不可 |
| 耐久性 | ピストンリング等の摩耗部品さえ交換すれば数十年使用可能。負荷変化も問題ない | 今後の課題 |

①発電用、船舶用

食塩電解やコークス製造など副生水素発生工場の発電用、内航船主機などの船舶用が考えられる。国内で利用可能な副生水素量とそれによる発電可能出力は十分大きく、コークス炉副生ガスは水素の他にメタン、一酸化炭素等を含んでいる。燃料電池の触媒は、一酸化炭素に対し被毒するので水素を分離精製しなければ使用できないが、本エンジンシステムでは直接利用可能である。

②トラック用

本エンジンシステムのトラックへの応用例を表5に示す。燃料の水素を再生可能エネルギーから生産すればCO₂排出削減量は1990年排出量の4.0%に相当することがわかる。

表5 本エンジンシステムのトラックへの応用例

| | |
|-----------------------|---------------------------------|
| 定格出力 | 300kW |
| 走行時負荷率 | 33% |
| 走行時出力 | 100kW |
| 稼働率 | 30% |
| 導入予想台数 | 50万台 (現在の全国台数の5%) |
| CO ₂ 排出削減量 | 炭素換算 1,150万 t/年 (1990年排出量の4.0%) |

7. まとめ

本エンジンシステムは、100年以上の実績を有し高信頼性のディーゼルエンジンをベースに高熱効率のポテンシャルを一層高めることが可能であり、有害排ガスの少ないクリーンな原動機である。また、低純度水素が利用可能で耐久性にも優れるなど燃料電池とは異なる特徴を活かして、将来の水素社会への貢献が期待される。

本稿に述べた水素エンジンの開発は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の平成 11~14 年度“水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術 (WE-NET) 第Ⅱ期研究開発 タスク4 動力発生技術の開発”によるもので、(財)エンジニアリング振興協会及び共同研究先のご協力に対し深く感謝致します。