

水素利用クリーンエンジンの研究開発

Development of Clean Hydrogen Engine

技術本部 赤川 裕和*¹ 石田 裕幸*¹
汎用機・特車事業本部 杉村 純*² 江頭 英則*³

地球温暖化対策としてCO₂を排出しない再生可能エネルギー起源の水素製造・利用技術の開発が世界的に進められつつある。アルゴン循環型の水素エンジンもその一つで、熱効率が高く理想的にはNO_x、CO₂の排出がない優れた特性を有している。本エンジンは水素利用インフラ整備時のコージェネレーション用としてのほか、短期的には化学プロセス等で発生する副生水素を利用した水素利用原動機導入のけん引役として期待されている。これまでに、100 kW級単筒実験機システム開発のため水素燃焼基礎試験を実施し、水素噴流の発達、燃焼、熱負荷特性などの有効なデータを取得した。

Global measures against global warming have triggered the development of technologies for producing and using hydrogen originating from renewable energy. These include an argon-circulation hydrogen engine, which has excellent characteristics of high thermal efficiency and no emission of NO_x or CO₂. This engine is expected to serve for cogeneration when the hydrogen infrastructures are built and to encourage the introduction of hydrogen prime movers using by-produced hydrogen in chemical processes in short terms. In order to develop a single-cylinder engine system of 100 kW, we are conducting fundamental tests of hydrogen combustion and obtaining useful results.

1. はじめに

現在エネルギー源として主に用いられている石油資源は可採年数が43年程度といわれている⁽¹⁾。その燃焼時に排出されるCO₂によって地球の温暖化も進行しており、代替燃料によるシステムの構築が世界的に急がれている。当面は天然ガスに大きな期待が懸けられているが、21世紀半ば以降は太陽光、水力、地熱、風力などの再生可能エネルギーを軸とするエネルギーシステムに移行する必要がある。これらの再生可能エネルギーを一次エネルギーとして製造する二次エネルギーを担う物質としては水素、メタノールなどが挙げられている。とりわけ水素は水の電気分解によって容易に製造でき燃焼後に水に戻る究極のクリーン燃料である。

一方、水素利用エネルギーシステムを実現していくためには、水素製造・輸送・貯蔵などのインフラストラクチャを20～30年の時間を掛けて整備していく必要がある。このため、けん引役として早期に水素のメリットを実証できる原動機が求められる。100年以上の実績を有するディーゼルエンジンの燃料に水素を利用したクリーンエンジンは実用化が容易でありこれに最適である。水素の供給についても、短期的には化学プロセス等で発生する副生水素が利用可能である。

本報では作動ガスにアルゴンを使用した高効率でNO_xの排出もない水素利用クリーンエンジン⁽²⁾の開発状況について述べる。

2. アルゴン循環型水素エンジンの特徴

図1にアルゴン循環型水素エンジンの特長を示す。アルゴン循環型水素エンジンは作動ガスとして空気に代えてアルゴン・酸素を使用し燃焼室内に水素を高圧噴射し拡散燃焼させ

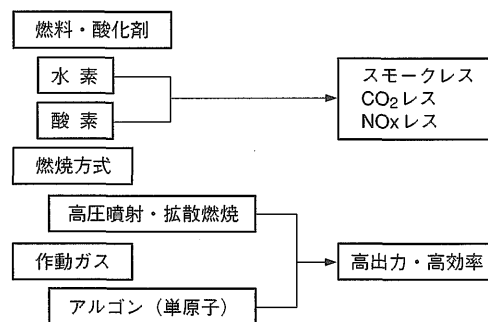


図1 アルゴン循環型水素エンジンの特長 スモーク、CO₂、NO_xの排出がなく高効率・高出力である。
Characteristics of argon-circulating hydrogen engine

る水素エンジンである。本システムの特徴としては、まず、燃料水素の燃焼によって発生するのは理想的には水蒸気のみで、CO₂の排出もなく、さらに作動ガスとしてアルゴンを使用しているためNO_xの発生も0である。また、アルゴンは単原子分子であるため比熱比が大きく、熱力学的に熱効率が向上する。さらに、燃料供給方式として高圧噴射式を採用しているため給気に燃料を含む予混合方式に比較して高出力である。

アルゴン循環型水素エンジンを固体高分子型燃料電池と比較すると、水素エンジンは排熱の温度レベルが高く蒸気で利用できることがメリットである。発電出力範囲としては固体高分子型燃料電池が数百kW以下であるのに対し、水素エンジンは数百kW～数千kWで船用などの大出力用途にも適用可能である。

このほか水素エンジンはディーゼルエンジンとしてのこれ

*1 長崎研究所内燃機・油機研究推進室

*2 企画経理部技術企画グループ主席

*3 エンジン・ターボ技術部大型エンジン設計課主席

表1 100 kW 級単筒実験機主要諸元
Specifications of 100kW single-cylinder test engine

ボア	170 mm
ストローク	180 mm
出力	100 kW
回転数	1 800 rpm
平均有効圧 (実機換算)	1.67 MPa
熱効率 (実機換算, LHV)	49 %

表2 アルゴン循環型水素エンジンの技術課題
Technical challenges of argon-circulating hydrogen engine

項 目	課 題
着 火	・始動時の強制着火方法
燃焼・熱負荷	・低密度水素噴流の発達及び混合気形成能力 ・水素の火炎温度が高く消炎距離が短いこととアルゴンの比熱比が大きいことによる高熱負荷
リング・ライナ潤滑	・高温しゅう動部での油膜形成 ・高温しゅう動部での潤滑油蒸発・燃焼
排ガス凝縮	・多量不凝縮性ガスを含む蒸気の凝縮性能
過 給	・アルゴン作動ガス大容量型過給機の信頼性確保

までの実績があり⁽³⁾、信頼性が高いという点で実用化への障害が少ないと考えられる。

3. 100 kW 級単筒実験機の開発

3.1 開発目標

現在開発を進めているアルゴン循環型水素エンジンの100 kW 級単筒実験機の主要諸元、目標熱効率を表1に示す。

3.2 技術課題

アルゴン循環型水素エンジンシステムの技術課題を表2に示す。このうち最重要課題は水素エンジンの燃焼特性と熱負荷である。水素噴流は密度が低いため噴射弁噴孔出口での流速は大きいが噴射終了後貫徹力を失い作動ガスと混合しにくいと考えられる。また、水素は火炎温度が高いことに加えて消炎距離が短いため燃焼室壁面近傍の温度こう配が大きくなり熱負荷が高いとされている。アルゴンの比熱比が大きく圧縮時の温度が高いことも高熱負荷の要因である。

3.3 基礎試験

3.3.1 試験装置

水素エンジンの技術課題解決を目指し、水素燃焼の基礎試験を実施している。基礎試験装置として、混合気の種類、燃料噴射時期、ストロークといった実験条件の自由な選択が可能であり、光学的な観測が容易である急速圧縮・膨張装置を用いた。図2に急速圧縮・膨張装置の燃焼室を示す。急速圧縮・膨張装置の行程容積は100 kW 級単筒実験機の約1/4であるため、単筒実験機のシリンダ中心から見て約90°分をモデル化した燃焼室とし、燃料弁はシリンダのサイドに配置した。

3.3.2 試験結果

(1) 噴流の広がり及び到達距離

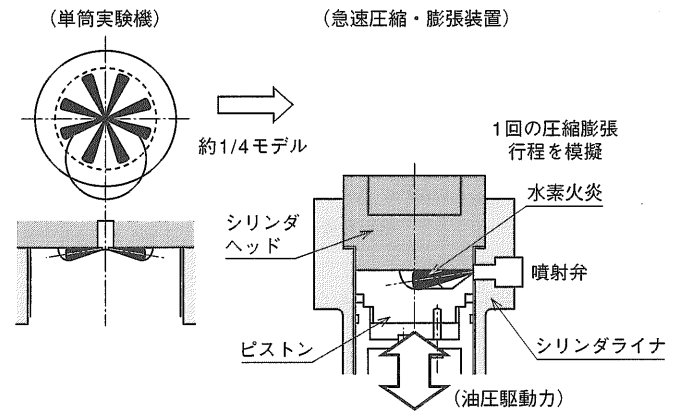


図2 急速圧縮・膨張装置の燃焼室 急速圧縮・膨張装置の行程容積は100 kW 級単筒実験機の約1/4であるため、単筒実験機のシリンダ中心からみて約90°分をモデル化した。
Combustion chamber of rapid compression expansion machine

図3に水素噴流の噴流形成状況とこれから読取った噴流到達距離を他の噴射圧力及び作動ガス初期圧力のときも含めて示す。噴流はほぼ円すい形に発達し、広がり角は半頂角で10°程度である。図3には試験条件に対応した噴流の到達距離を、噴孔出口流速は音速としその後は運動量が保存される⁽⁴⁾として次の式で計算した結果も示す。

$$y = \left(\frac{\rho_H}{\rho_a} \right)^{0.25} \left(\frac{2\kappa}{\kappa+1} R_H T_0 \right)^{0.5} \left(\frac{\sqrt{cd}}{\tan \theta} \right)^{0.5} t^{0.5}$$

ここで、

y : 到達距離

ρ_a : 筒内ガス密度

ρ_H : 水素密度

κ : 水素比熱比 (=1.422)

R_H : 水素ガス定数 [=4124.6 J/(kg·K)]

T_0 : 水素初期温度

c : 噴孔量係数 (=0.8)

d : 噴孔径

θ : 噴流広がり角 (半頂角) (=10°)

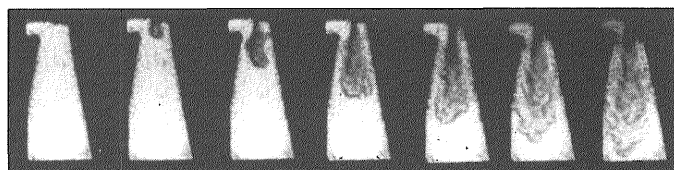
t : 時間

噴流の広がり角は厳密には筒内ガス密度と水素密度により変ってくるが、図3の実測では噴流の広がり角ほぼ一定であるためここでは10°とした。実測値に対し絶対値及び圧縮初期圧力、噴射圧力に対する変化傾向はおおむね一致していることが分かる。

(2) 作動ガス成分による燃焼と熱負荷

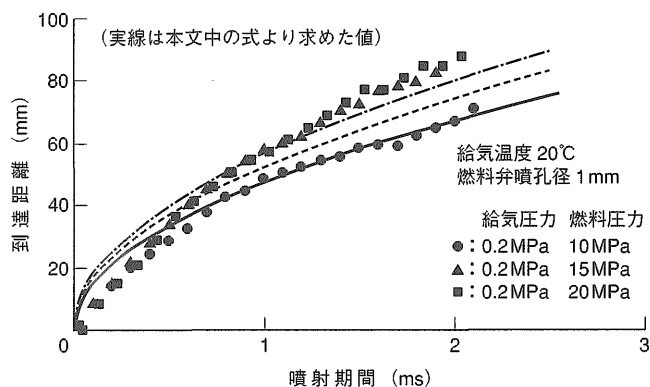
図4にアルゴン・酸素濃度を变化させた場合の筒内圧力、受熱率の変化を示す。圧力波形を見ると、アルゴン濃度が大きい方が作動ガスの比熱比が大きくなるために、圧縮圧力が大きくなっているのが分かる。また受熱率の図において、酸素濃度が高いほど燃料噴射期間前半でのピーク値が高くなっている。図5に図示熱効率の変化を示す。アルゴン濃度が79%以上になると急激に熱効率が低下することが分かる。これは酸素過剰率が小さくなって燃料が完全燃焼しなくなることによると推定される。

図6にアルゴン・酸素濃度を变化させた場合の熱流束波



給気温度20℃, 給気圧力0.1MPa, 燃料圧力20MPa, 燃料弁噴孔径1mm

(a) 発達状況



(b) 到達距離

図3 水素噴流の発達状況と到達距離 噴流はほぼ円錐形に発達し、広がり角は半頂角で10°程度である。実測値に対し絶対値及び圧縮初期圧力、噴射圧力に対する変化傾向はおおむね一致している。

Development of hydrogen jet and measured and calculated hydrogen jet length

形、図7に平均熱流束を示す。熱流束は、センサ表面に薄いめっき膜で形成した温接点と内部に形成した冷接点から成る熱電対でセンサ表面温度変動を計測し、非定常一次元熱伝導方程式を解くことにより求めた。水素燃焼時の熱流束はアルゴン濃度が大きいほど低くなっている。酸素濃度が小さいことにより燃焼速度が遅くなり火炎温度が低くなって熱流束が小さくなっていると考えられる。一方、図7より圧縮・膨張だけの非燃焼時にはアルゴン濃度が大きい方が平均熱流束が大きくなるのが分かる。作動ガスの比熱比が高く圧縮温度が高くなるために平均熱流束も大きくなると考えられる。

4. ま と め

作動ガスにアルゴンを使用した高効率でNO_xの排出もないクリーン水素エンジンを開発中である。本エンジンの技術課題のうち最も重要な水素の燃焼特性と熱負荷を明らかにするため基礎試験を実施した。

水素噴流の発達は、出口流速を音速としその後は運動量理論を適用することにより到達距離がおおむね予測可能である。作動ガスのアルゴン・酸素濃度を変化させると、アルゴン濃度が高いほど圧縮圧力が大きくなり比熱比増大の効果は認められたが、燃焼が悪化して酸素濃度21%以下で急激に図示熱効率が低下した。今後の単筒実験機試験では低酸素濃度条件での燃焼改善が課題である。

燃焼室熱流束は酸素濃度が高いほど大きくなった。アルゴン濃度の増加による比熱比増大の効果よりも、酸素濃度の増加による燃焼特性の変化の方が熱流束の大きさに影響を及ぼ

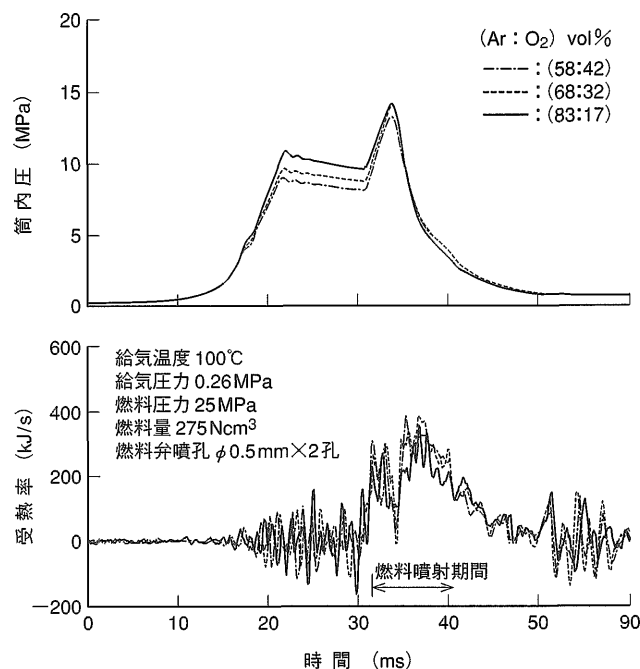


図4 アルゴン・酸素濃度による筒内圧力、受熱率変化 アルゴン濃度が大きいほど圧縮圧力が大きくなる。酸素濃度が高いほど燃料噴射期間前半での受熱率が高くなる。
Pressure in cylinder and heat acceptance rate by argon·oxygen percentages

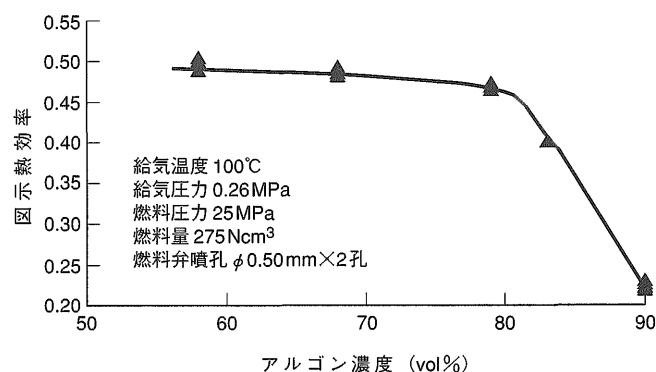


図5 アルゴン・酸素濃度による図示熱効率変化 酸素濃度が21%以下になると急激に熱効率が低下する。
Effect of argon·oxygen percentages on indicated thermal efficiency

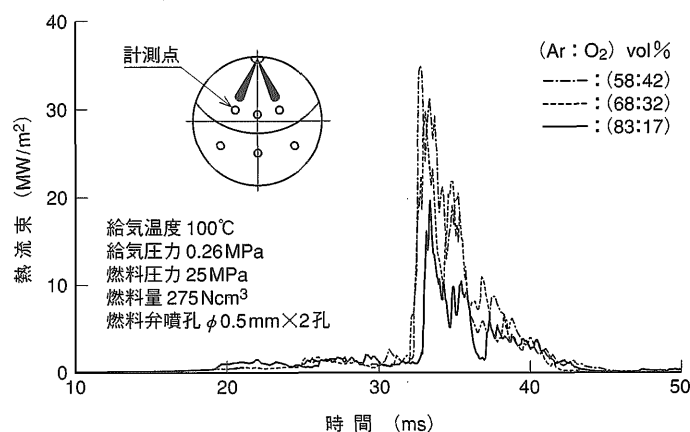


図6 アルゴン・酸素濃度による熱流束波形 水素燃焼時の熱流束はアルゴン濃度が大きいほど低くなる。
Transient heat flux by argon·oxygen percentages

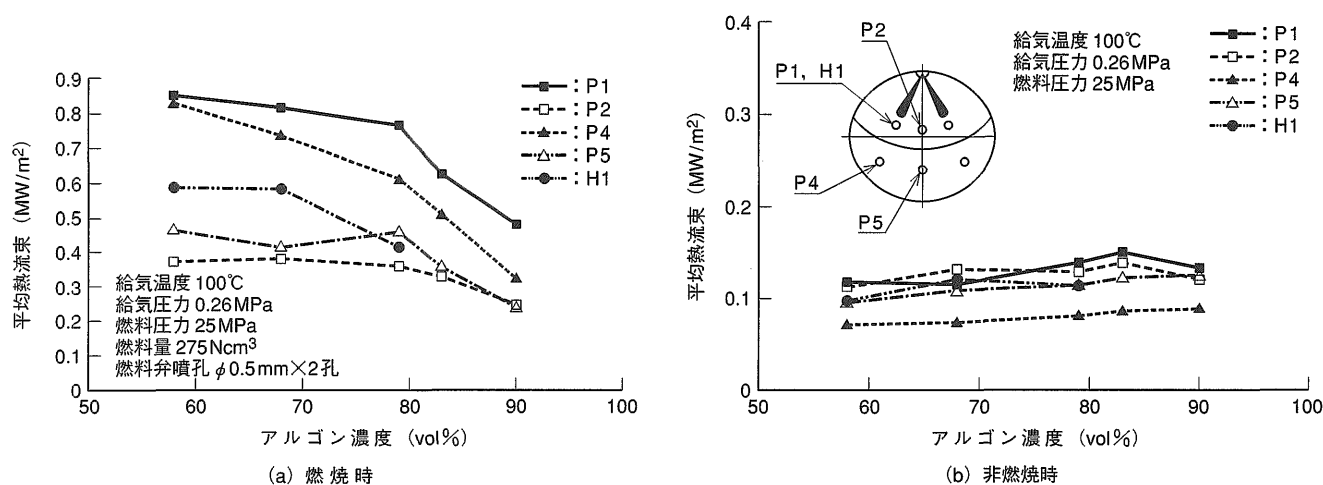


図7 アルゴン・酸素濃度による平均熱流束 圧縮・膨張だけの非燃焼時にはアルゴン濃度が大きいほど平均熱流束が大きくなる。
Time-averaged heat flux by argon-oxygen percentages

すことが分かった。

今後、基礎試験結果を反映して 100 kW 級単筒実験機の燃焼システムと噴射装置を試作して評価試験を実施し水素利用クリーンエンジンのメリットを実証して行く。

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の平成 10 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 I 期研究開発サブタスク 7”及び平成 11, 12 年度“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。

参 考 文 献

- (1) 日石三菱環境報告書 2000
- (2) 石田裕幸ほか、水素利用クリーンエンジンの基礎研究、三菱重工技報 Vol.35 No.6 (1998) p.394
- (3) 古浜庄一ほか、新エネルギー自動車、山海堂(1995) p.204 ~228
- (4) 和栗雄太郎ほか、ディーゼル機関燃料噴霧の到達距離に関する研究、日本機械学会論文集 Vol.25 No.156 (1959) p.820