

# 5. 研 究 論 文

## 不活性ガス循環型燃焼システムの研究

機械技術研究所

浜 純, 川口 靖夫

### 1. ま え が き

地球温暖化, 酸性雨などの地球環境破壊は, 二酸化炭素などの温室効果ガス, 窒素酸化物, およびイオウ酸化物などが主要因とされており, これらの発生源である, 化石燃料の燃焼を利用するエネルギー変換装置は, クリーン化への対応が求められている。

著者らは, これらの問題に対処できるエネルギー変換装置の一つとして, 不活性ガス循環型水素原子動機システムの基礎研究を進めている。本システムは, 図1の概念図の一例に示すように, 水素と酸素を不活性ガス中で燃焼させ, その発生熱から動力を取り出し, 燃焼生成物である水は凝縮器で凝縮除去し, 不活性ガスは循環させて再利用するものである。

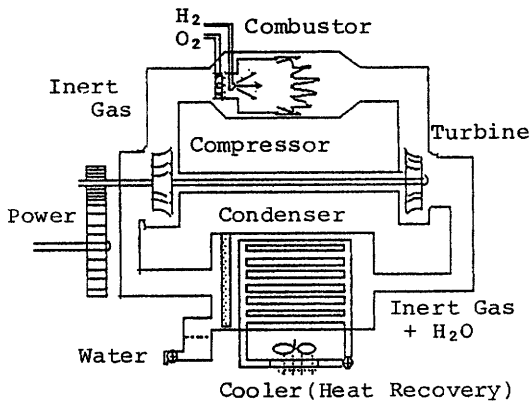


図1. 概念図

このような密閉サイクルの研究は, 水素-酸素燃焼を利用するものとして, ガスタービン用燃焼器の提案<sup>1)</sup>, 内燃ランキンサイクルを想定したスチームジェネレータ<sup>2), 3)</sup>や火花点火エンジンシステムの試作<sup>4)</sup>などがあり, 一方, 通常化石燃料を使用したディーゼルエンジンシステムの開発例<sup>5)</sup>もある。

しかし, 一原子分子ガスを主要作動媒体とし, 水素-酸素燃焼を加熱源に利用した内燃式の密閉サイクルについては, 原理的に無排気・無公害, 高効率, 低騒音などの特長があるにもかかわらず, レシプロエンジン本体の研究<sup>6, 7)</sup>があるのみで, 具体的なシステムを試作した例は公表されていない。特に本システムでは, 供給される水素と酸素はその流量比率が理論混合比に保たれ, 完全燃焼して, その総流量が凝縮水として除去されねばならないが, これらを具体的に実現する方法も明確でない。

本研究では, この動力システムの追求の第一歩として, 循環型燃焼システムのモデル装置を試作して, 点火から停止までの燃焼実験を行い, 循環型システムとして機能するための具体的な制御方法などについて知見が得られたので報告する。

本研究では, この動力システムの追求の第一歩として, 循環型燃焼システムのモデル装置を試作して, 点火から停止までの燃焼実験を行い, 循環型システムとして機能するための具体的な制御方法などについて知見が得られたので報告する。

## 2. 実験装置および方法

不活性ガス循環型燃焼システムの装置全体の概略を図2に示す。本装置は、燃焼装置、凝縮装置、不活性ガス循環用ポンプ、水素・酸素ガスなどの流量制御装置、循環ガス中の残存ガスの分析装置などから構成される。

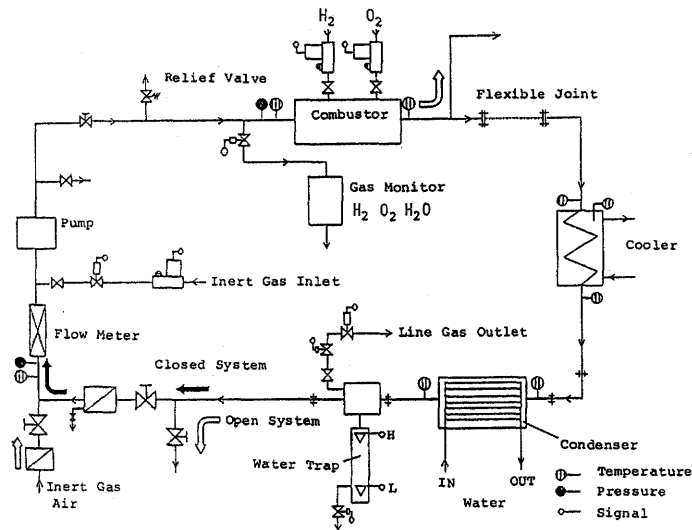


図2. モデル燃焼装置の概略

燃焼装置は、水素の予混合燃焼における逆火の弊害を防ぎ、かつ保炎と火炎の短縮化をねらいとして進めてきた水素用燃焼器<sup>8)</sup>を不活性ガス循環用に改良したものである。その概略を図3に示す。本装置では、まず不活性ガス流路の周囲から酸素ガスを供給して不活性ガスと酸素とを混合させ、この酸素供給位置から約150mmの下流に多孔ノズルを設けて、水素を噴射するようにした。さらに水素ノズル先端より下流25mmの位置に急拡大部を設けて、火炎がこの循環域から保持されるようにした。ノズルと保炎器の主要寸法を図4に示す。燃焼筒は内径50mm、長さ200mmとし、高負荷燃焼時の保炎器の溶損防止や燃焼筒の冷却のために保炎器の外周に不活性ガスによる冷却経路を設けた。その経路への不活性ガス流量

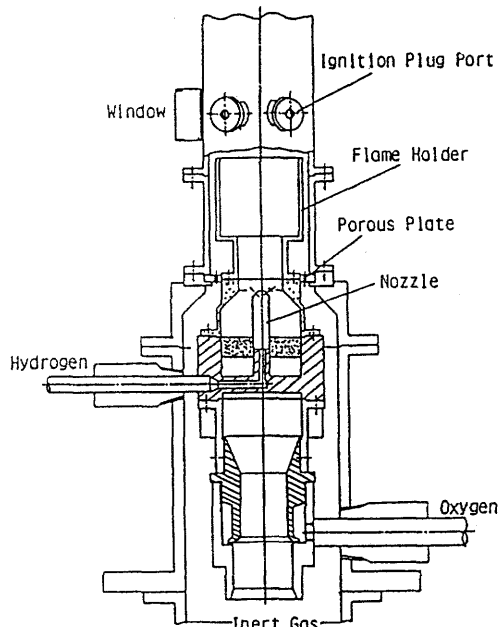


図3. 燃焼器

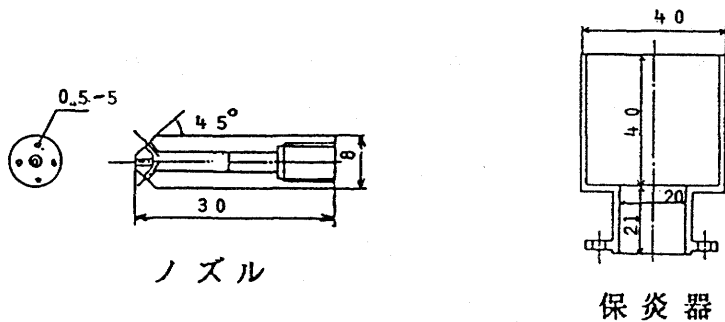


図4. ノズルと保炎器の主要寸法

は、多孔板（ $\phi 1.3\text{mm}$ 穴 - 24個）を用いて、燃焼経路を流れる不活性ガス流量の約10%にした。点火は保炎器下流約30mmの位置で電気火花により行い、その様子を石英ガラス窓から観察できるようにした。

凝縮装置は、動力源による燃焼ガスの熱落差を模擬した冷却器、凝縮器本体、および凝縮水除去装置から構成される。冷却器と凝縮器の主な設計仕様を表1、2に示す。

表1. 冷却器仕様

	タンク側	コイル側
流体名	冷却水	ヘリウムガスと水蒸気の混合ガス
入口流量	10 l/min	0.59 m <sup>3</sup> /min
入口温度	20 °C	600 °C
設計圧力	0.9 kg/cm <sup>2</sup> G	0.9 kg/cm <sup>2</sup> G
設計温度	40 °C	600 °C
主要材料	SS41	SUS310S
伝熱面積	0.42 m <sup>2</sup>	

表2. 凝縮器仕様

	シェル側	チューブ側
流体名	ヘリウムガスと水蒸気の混合ガス	冷却水
入口流量	0.39 m <sup>3</sup> /min	40 l/min
入口温度	300 °C	20 °C
設計圧力	0.9 kg/cm <sup>2</sup> G	0.9 kg/cm <sup>2</sup> G
設計温度	300 °C	40 °C
主要材料	SUS304	SUS304
伝熱面積	2.6 m <sup>2</sup>	

冷却器はφ48.6mm×2.77mの循環ガス用管をコイル状にして水タンクに納めたタンク・コイル式の構造とし、凝縮器本体はφ10mm×1mの水管92本を燃焼ガス流路内に納めた堅型多管円筒式の構造とした。凝縮水除去装置には気液分離用フィルターと1.38ℓの凝縮水溜を設けて、凝縮水がその水位により自動的に排水処理されるようにした。

不活性ガス循環ポンプには、ガスの漏れがなく、循環流量が変えられるように変速機付き、密閉型ロータリーブロワーを使用した。

燃焼装置に供給する水素と酸素の流量制御には質量流量コントローラを用いた。また循環経路のガス圧力を制御するために不活性ガスを供給および排出できる制御系を設けた。

これらの供給ガスの流量計測・制御と、図2に示す各部の温度、圧力および濃度の計測にはデータロガならびにパソコンを使用した。

### 3. 実験結果

#### 燃焼器の保炎限界

不活性ガスを高圧ポンプより直接燃焼器に供給する方法を用いて、水素と酸素の供給流量を理論混合比一定のもとで燃焼器の燃料希薄側の保炎限界を調べた。その結果を図5

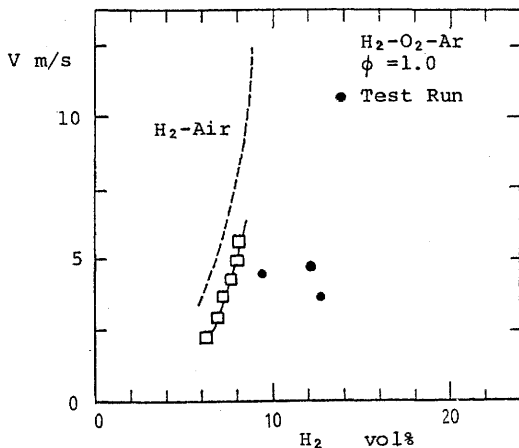


図5. 燃焼器の保炎性能

に示す。横軸は燃焼器を通過する全ガス流量中の水素の体積濃度であり、縦軸は大気圧、20℃の全ガス流量と燃焼器出口の流路面積を代表流路として求めた代表流速Vである。図中の破線は、高容量の圧縮機を用いて高速領域まで調べた水素-空気の保炎限界を示す。図から保炎限界は流速依存性が比較的小さく、水素体積濃度で8%前後であり、水素-空気混合気の保炎限界に近いことがわかる。また、図2に示す燃焼器出口から大気開放とする経路に設定し、実際の循環ポンプを用いた保炎性能はそれぞれの保炎限界とほぼ一致することから、循環ポンプによって生じる循環ガスの脈動の保炎限界への影響は小さく、この保炎限界が循環ポンプ使用時の保炎限界とみなせることがわかった。

この保炎限界と燃焼器の耐熱性（燃焼器出口温度1100℃以下）および循環ポンプの容量を考慮して、以下の循環システムの燃焼実験は主に図中に示す代表流速および水素濃度で行った。また循環ガス経路の圧力は燃焼器入口において0.12Mpaのほぼ大気圧条件とした。

なお本実験範囲では、水素供給流量の熱入力凝縮装置の能力より小さいため、循環ガスの凝縮装

置出口温度は熱入力に依存せず、一定であった。したがって、燃焼器入口の循環ガス温度は循環流量一定のもとで変化しない。

**点火特性** 循環型燃焼システムをスムーズに起動させるために、まず水素、酸素の供給から点火・保炎までの系内の挙動を把握しておくことが必要である。そこで前記した保炎範囲の混合気濃度と流速条件において、点火から定常燃焼に移行するまでの系内の挙動を調べた。その一例を図6に示す。

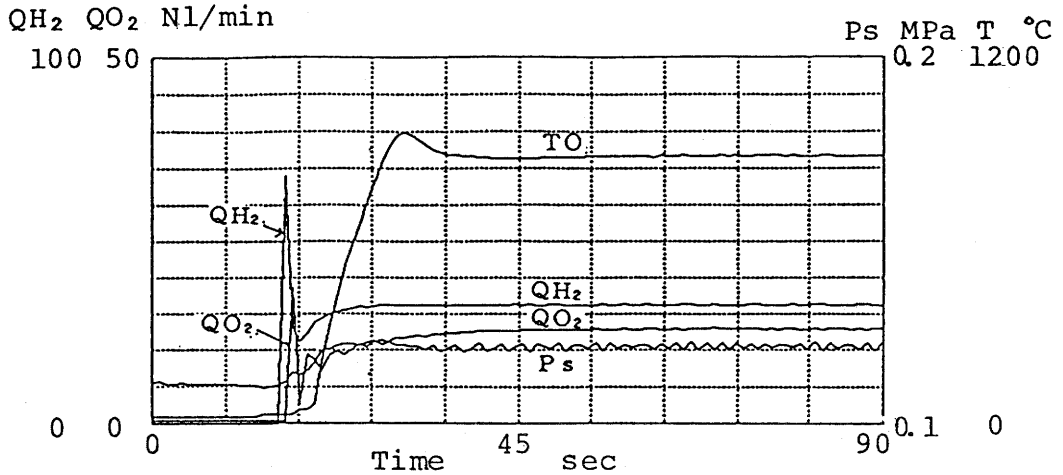


図6. 点火制御特性

ここでアルゴンガスの流量は  $230 \text{ l/min}$  一定とし、水素と酸素の供給流量を循環ガス中の残存ガスが零となる実際の理論混合比のもとで水素供給流量を0から  $32 \text{ l/min}$  にステップ状に供給する設定とした。図には燃焼器入口圧力 ( $P_s$ ), 水素と酸素ガスの流量特性 ( $Q_{H_2}$ ,  $Q_{O_2}$ ), および燃焼器出口のガス温度 ( $T_O$ )の挙動を示している。水素と酸素の質量流量コントローラの作動初期ではこれらの供給流量の制御が不十分であるため点火しないが、供給流量が安定すると点火することがわかる。この点火遅れ時間に循環経路内に溜った水素と酸素は、点火後に供給される水素と酸素と一緒に燃えるため、燃焼器出口温度が一時的に高温となる。したがって、点火から定常燃焼にスムーズに移行させるためには、水素と酸素の供給流量をその供給開始当初からできるかぎり理論混合比で供給し、点火遅れを短くすることが必要である。しかし、図6に示すようにその流量制御が不十分であっても、その時間が一循環するために要する時間に比べて短く、その時間に供給された水素と酸素のガス総量が系内の不活性ガス量に比べて少なければ、異常燃焼などの支障は生じなかった。

**残存ガス濃度制御** 本システムでは供給された水素と酸素流量が燃焼してすべて水として除去される場合に循環型燃焼システムの安定状態が成立する。しかし、実際には水素と酸素の供給開始時の流量特性の相違や各流量計の誤差などがあるため、水素と酸素の供給流量が理論混合比からずれることは避けられない。したがって、点火後に水素-酸素の供給比率が理論混合比で安定して供給され

るようになって、それまでに供給された水素と酸素ガスのうち、過剰に供給された成分のみが循環ガス中に残存することがわかった。

この残存ガスを減少させるために、水素と酸素の供給流量比率を理論混合比から一時的に変える方法を試みた。水素ガスが残存する場合の一例を図7に示す。

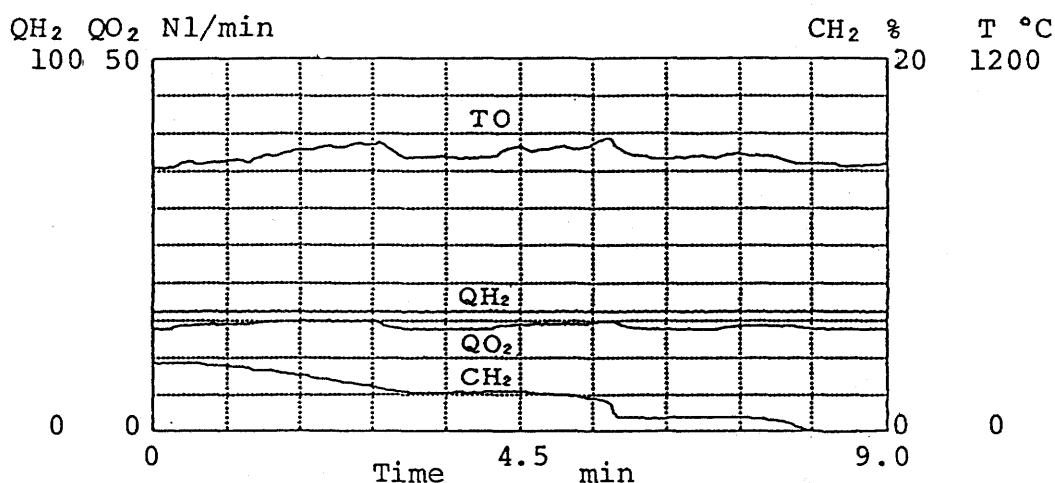


図7. 残存ガス濃度制御

ここでは残存水素濃度 ( $CH_2$ ) の挙動を監視しながら酸素供給量を増し、残存水素濃度がほぼ零となる時点で当初の理論混合比の流量に戻す操作を行っている。図から、この操作で循環ガス中の残存水素濃度を制御できることがわかる。

一方、循環ガス中に酸素が残存する場合には、逆に水素流量を制御すればよいことも確認した。これらの結果から、供給された水素または酸素ガスが循環ガス中に残存しても、残存ガス成分の供給流量を減らすことにより、残存ガスを燃焼器で無駄なく消費させて、低減できることがわかった。これを実現するためには、水素-酸素供給流量比率の一定制御に加え、水素と酸素の各々の残存濃度を監視して供給流量を制御することも循環型燃焼システムでは必要である。

負荷制御特性 負荷制御を想定して、定常燃焼中の水素と酸素の供給量を理論混合比でステップ状に変化させた場合のシステムの制御性を図8に示す。流量制御の誤差により残存水素濃度がわずかに増えるが、制御性に支障のないことがわかる。同様なステップ状の流量変化を酸素過剰の条件でも実験を行ったが、運転上何等支障もなく、制御できることがわかった。

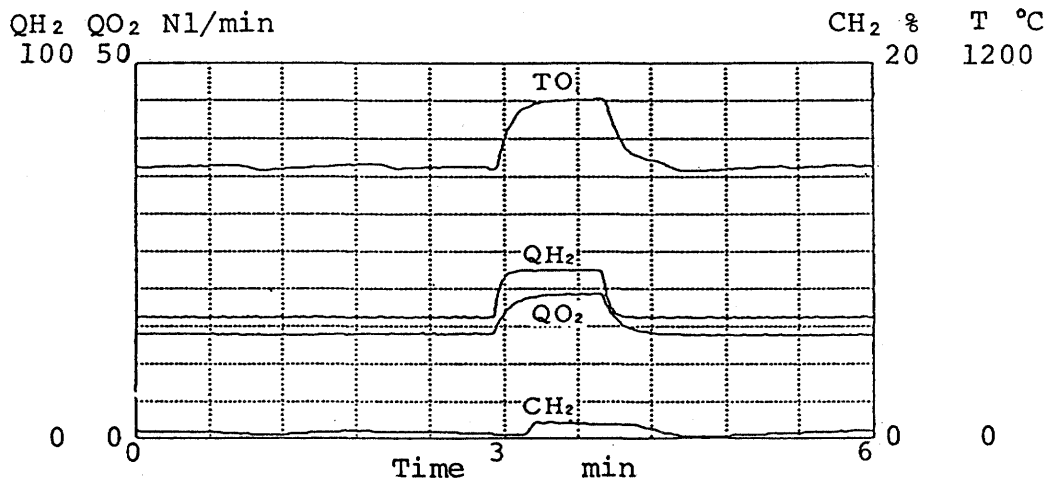


図 8. 負荷制御特性

#### 4. あとがき

不活性ガス循環型のモデル燃焼システムの一連の実験から、点火から停止までの具体的な運転・制御方法を把握するとともに、これらを最適化することにより、循環型燃焼システムが基本的に機能し得ることを実証できた。

これらの燃焼実験結果をもとに、動力システムの詳細な性能計算および装置の具体化を今後進めていく予定である。

#### 参 考 文 献

- 1) 水素エネルギー読本, (1982) 133 オーム社
- 2) H. J. Sternfeld, 5th WHEC (1984) 1595
- 3) T. Kumakura, et al, 7th WHEC (1988) 1545
- 4) P. L. Underwood and P. B. Dieges, SAE Paper 719046
- 5) 永井 将, 浅田忠敬: 機論 44-386 (昭53-10) 3543
- 6) M. Ikegami, et al, I. J. of Hydrogen Energy 7 (1981) 341
- 7) 金 栄吉他, 日本自動車研究所速報 64 (1977)
- 8) 浜, 川口: 第25回燃焼シンポジウム (昭62-11) 160