

水素ロータリエンジン

寺本 隆文・森本 賢治

マツダ株式会社 技術研究所
広島県安芸郡府中町新地 3-1

Hydrogen Rotary Engine

Takafumi Teramoto, Kenji Morimoto
Mazda Motor Corporation Technical Research Center
3-1, Shinchi, Fuchu-cho, Aki-gun, Hiroshima-ken

Mazda has begun leasing RX-8 HYDROGEN RE in Japanese market from February 2006. The RX-8 HYDROGEN RE runs clean and exhausts the water vapor produced by hydrogen combustion. And because the car can also run on gasoline by switching the dual fuel system from hydrogen to gasoline, it can be driven places where hydrogen filling stations are not yet available.

This paper focuses the development of the hydrogen rotary engine, which has been tackled as a clean energy technology from the early 1990s.

Key words: hydrogen, rotary engine, clean energy, dual fuel system

1. 緒言

マツダは 1990 年代初めから、クリーンな水素エネルギーに注目し、表 1 に示す通り水素ロータリエンジン（以下、RE）と燃料電池、両方の水素エネルギー技術の研究に継続的に取り組んできた。

燃料電池は究極のクリーン性能を備えているが、現時点ではコスト、耐久性、利便性といった解決しなければならない課題を抱えている。

一方、水素 RE は従来の内燃機関の技術や部品を流用できるため、コストが安く、耐久性の課題解決も容易である。

さらに、ガソリンでも運転可能なデュアルフューエルシステム化することによって、市場に水素ステーションの数が少ない状況下においても、利便性を損なうことなく運用することが可能である。

加えて、モータ駆動の燃料電池車に対し、慣れ親しんだ内燃機関の走行感覚で走ることができる水素 RE は、地球に優しく、しかも運転する楽しみ（Zoom-Zoom 感覚）はそのままに、というマツダブランドがめざす方向と一致した。

本稿では、水素 RE の開発について紹介する[1,2,3,4,5]。

表 1. マツダの水素自動車開発の歩み

1991	Developed the first hydrogen rotary engine vehicle, HR-X
1992	Test drive of golf cart equipped with fuel cell
1993	Developed second rotary engine vehicle, HR-X2
	Developed test version of MX-5 equipped with hydrogen rotary engine
1995	Conducted Japan's first public road tests with Capella Cargo equipped with hydrogen rotary engine
1997	Developed Demio (Mazda2) FC-EV
2001	Developed Premacy FC-EV and conducted first public road test in Japan (with methanol reformer fuel cell system)
2003	Announced Mazda RX-8 Hydrogen Rotary Engine vehicle development model
2004	Conducted the world's first public road tests of the RX-8 hydrogen rotary engine that can run on two types of fuel-hydrogen and gasoline
2006	Started leasing Rotary Hydrogen Vehicles

2. 水素 RE の特徴

2. 1 水素エンジンの課題

表 2 に示す水素の特性から、水素を内燃機関で燃焼させる場合、以下の 2 つの主要な課題がある。

- (1) 水素は着火エネルギーが小さく、可燃範囲が広いため過早着火、バックファイアなどの異常燃焼を発生し易い

- (2) 水素は混合気中に占める体積割合が大きいため、通常の吸気管に燃料を供給する予混合方式では吸入空気量が低下し、出力が低下する

表2. 水素の特性 [3]

Item	Hydrogen	Gasoline (average)
Chemical formula	H ₂	C _{7.5} H ₁₇
Molecular weight	2.016	107
Gas volume at stoichiometric mixture (%)	29.53	1.7
Lower calorific value(LHV)		
Calorific value per stoich. Mixture (MJ/m ³)	2.98	3.55
Calorific value per theoretical air (MJ/m ³)	4.23	3.62
Ignition limit(vol%)	4~75	1.0~7.6
Laminar flame speed (cm/s)		
Stoichiometric mixture (cm/s)	265	40
$\lambda = 2$ (cm/s)	48	
Minimum ignition energy (mWS)	0.02	0.24

2. 2 RE の特徴と水素燃焼との適合性

図1に示す通り RE は、レシプロエンジン (以下、CE) のシリンダブロックに相当する藪型のローターハウジングの中で、ピストンに相当するローターが回転することにより、作動室が移動しながら吸気、圧縮、膨張、排気各サイクルを行う。

吸排気のタイミングは、ローターの回転に伴う吸気ポートと排気ポートの開閉により定まる。

従って各サイクルが行われる位置が異なること、排気弁を持たないこと等がレシプロエンジンと構造的に異なる。

これらの特徴から、水素を内燃機関で燃焼させる場合

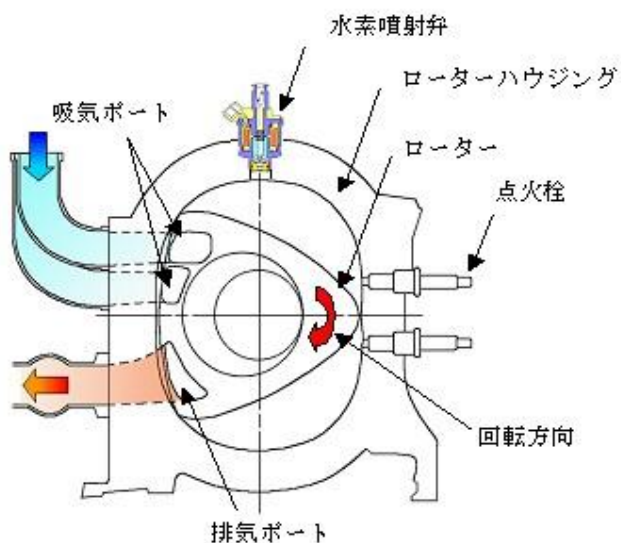


図1. REの構造

の2つの主要な課題に対して、RE は以下の特徴を有すると考えられる。

- (1) 過早着火の要因の一つとして高温となる排気弁が考えられる。RE は排気弁を持たないため、比較的容易に異常燃焼の対策が可能である
- (2) 出力低下対策として、吸気弁閉止後に水素を噴射する筒内直接噴射が有効と考えられる。作動室が移動する RE は、噴射弁を設置するスペースを取りやすく、直接噴射エンジンを容易に実現できる

2. 3 水素 RE と水素 CE の比較

水素エンジン研究のスタート時点において、ガソリン用の RE と CE の吸気管に水素燃料が供給できるように改造し、水素 RE と水素 CE の異常燃焼の発生状況を比較評価した[1]。

図2に示す通り、RE は高熱価の点火プラグを採用するだけで、理論空燃比の λ (空気過剰率) =1 でも異常燃焼発生を抑えることができた。

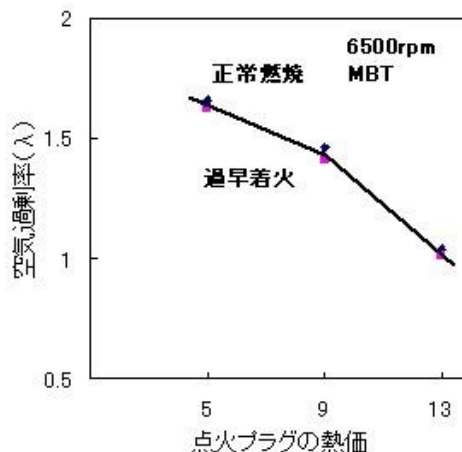


図2. 点火プラグ熱価と過早着火限界

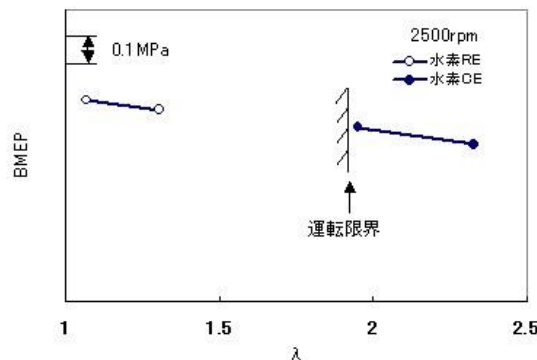


図3. 水素 RE と水素 CE の異常燃焼限界の比較

一方、図3に示す通り、CEは異常燃焼の発生により、 $\lambda=1.9$ 付近が運転限界となるため出力が低く押えられた。

本結果から、REが水素エンジンとして適していることが実証されたため、以降の水素エンジンの開発はREで実施した。

3. 水素REの実施例

水素RE車は1995年と2004年に大臣認定を受けて公道走行試験を実施した。これらに搭載した水素REと、2006年2月からリース販売を開始したRX-8ハイドロジェンREに搭載した水素REの特徴を紹介する。

3.1 機械弁方式直噴水素RE

1995年にマツダカペラカーゴ水素自動車に搭載した水素REの特徴と性能について説明する[2]。

この水素REの第1の特徴は、ガソリンエンジン並みの高出力を狙いとした水素直噴方式の採用である。

図4に示す通り、水素の噴射タイミングを制御する機械式ポペット弁を経由して、サイドハウジングに開口した水素ポートから、数気圧の圧縮水素ガスが圧縮工程中の燃焼室内に直接噴射される。

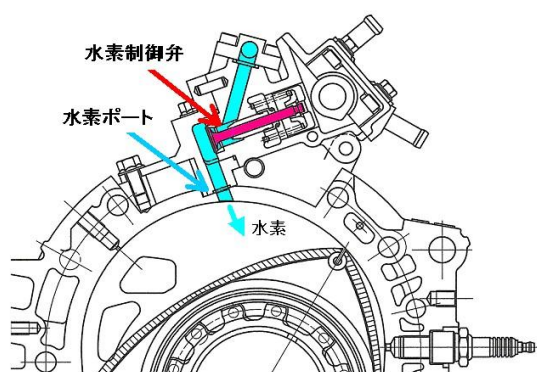


図4. 機械弁方式直噴水素RE

一般的なガソリンエンジンと同様に燃料を吸気管に供給する予混合方式では、水素が吸気管内で占める体積により、空気の充填効率が理論空燃比でガソリンエンジンに較べて約29%減少する。

本エンジンでは直噴システムの採用により、図5に示す通り、予混合方式よりも20~30%充填効率が増加し、

ガソリンエンジンと同等まで高めることができた。

この結果、図6に示す通り、全開出力性能において、予混合がガソリンエンジンに対して68%であるのに対して、本直噴エンジンは90%まで改善することができた。

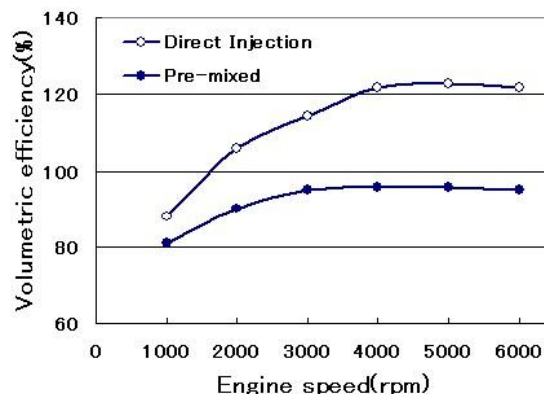


図5. 直噴と予混の体積効率比較

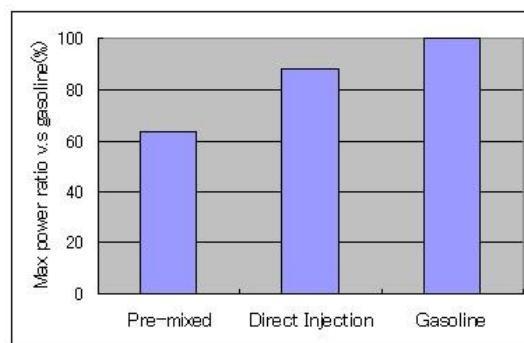


図6. 直噴と予混の出力比較

3.2 デュアルフューエル方式電子制御直噴水素RE

2004年のRX-8水素自動車に搭載した水素REの特徴と性能について説明する[3]。

本エンジンの第1の特徴は、水素とガソリンのいずれの燃料でも運転可能なデュアルフューエル方式の採用である。

現在、日本における水素ステーションの数は十数か所にとどまっており、当面は急激な増加はないと予想される。このため、水素エネルギー車は常に水素燃料切れの不安を抱えて走行しなければならない、結果として移動範囲は水素ステーションから一定の範囲内に限られてしまう。

しかし、燃料としてガソリンも使用可能となれば、万一水素燃料が切れてもガソリンで走行でき、燃料切れの懸念がなくなる。その結果、水素ステーションの未整備

地域への移動も可能となり、水素インフラの過渡期において特に高い利便性を発揮する。

図7にデュアルフューエルシステムを示す。量産ガソリンエンジンのガソリン供給系はそのままに、水素直噴システムシステムのための燃料供給系を追加した。

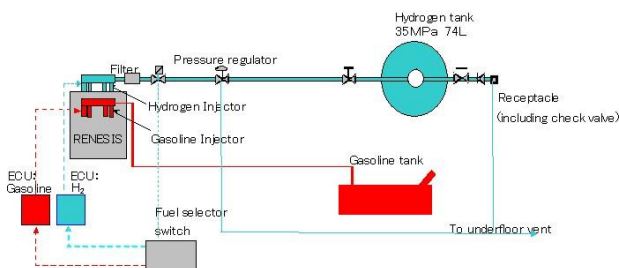


図7. デュアルフューエルシステム

第2の特徴として、水素の噴射用に電子制御噴射弁を採用した。

ガス燃料である水素では、例えば80kWの出力を得るためには、約2000NL/minの大流量を噴射する必要がある。この大流量をカバーするため、図8に示す通り、1気筒当たり2個の噴射弁をローターハウジングに設置した。

この電子制御噴射弁の採用により水素の噴射時期、噴射期間等の制御性の改善と直噴システムのコンパクト化が達成された。

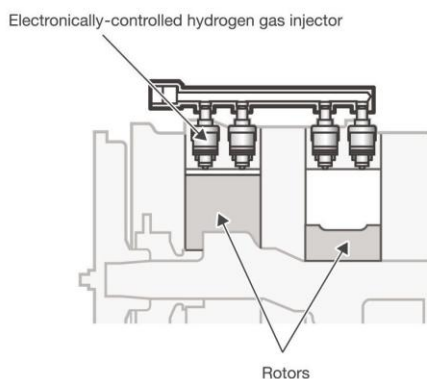


図8. 電子制御噴射弁

3.3 RX-8ハイドロジェンRE搭載水素RE

2006年2月から国内市場に供給を開始したRX-8ハイドロジェンREを図9に、新開発したエンジンシステムを図10に示す[4,5]。

本システムでは、出力、燃費、NOx等の各種性能を改善するため、筒内直接噴射にポート噴射を追加し、更にEGR(排気ガス還流)と三元触媒を装備した。

更に、エンジン運転領域に応じた燃焼制御と、スムーズな燃料切替えを実現するため、エンジン制御技術を新開発した。

本水素REのNOx低減、自動燃料切替え制御、及びデュアルCPU型の電子制御ユニットの開発について説明する。



図9. RX-8ハイドロジェンRE

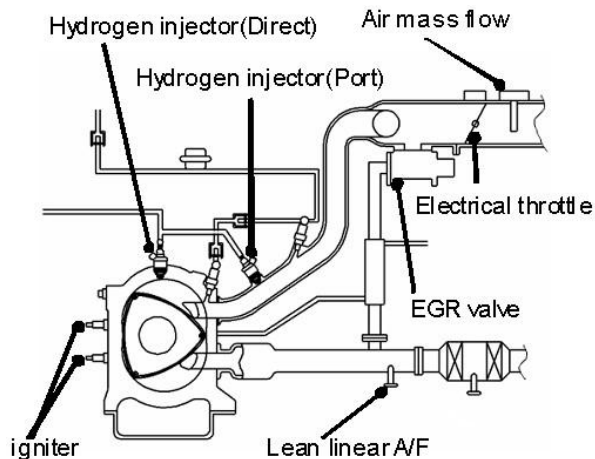


図10. 水素REシステム

3.3.1 NOx低減

水素を内燃機関で燃焼させた場合、基本的な燃焼生成物は水だけであるが、副次的に空気中の酸素と窒素が反応してNOxが生成される。

本エンジンではNOx低減のため、希薄燃焼、EGR、三元触媒を採用した。三元触媒はベース車のガソリン用をそのまま使用している。

低負荷域は希薄燃焼によりNOxを低減した。表2に

示したように、水素の燃焼範囲が水素の体積割合で4～75%と広いことを利用して希薄燃焼により燃焼温度を下げ、NO_xの発生を低減する方法である。

図1 1に水素 RE の NO_x の排出特性を示す。λ=1.8以上のリーン領域で排出されるNO_xは10ppm以下と極めて微量となる。

この方法は触媒作用を利用しないため、エンジン始動時の排出ガス温度が低い場合にも本質的な効果が変わらない利点がある。

ただし、λ=1.8以上の希薄燃焼で得られるエンジン出力が限られるため、車両の運転条件から要求されるエンジン負荷が高い場合はこの方法は使用できない。

従って、高負荷域はガソリンエンジンで一般的に使用されている方法を採用し、理論空燃比で運転し三元触媒によりNO_xを低減した。

更に、EGRを導入することにより、なお一層NO_x低減を図った。水素は可燃範囲が広いいため、多量のEGRを導入しても、燃焼安定性を維持しながらNO_xを低減することが可能である。

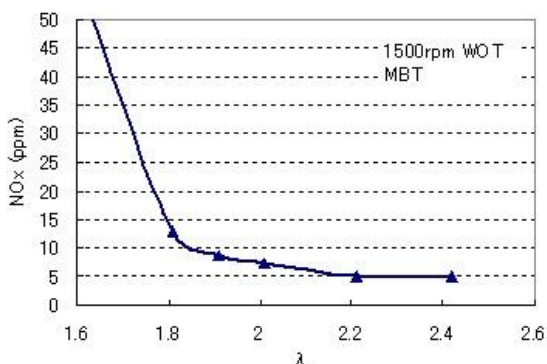


図1 1. NO_x 排出特性

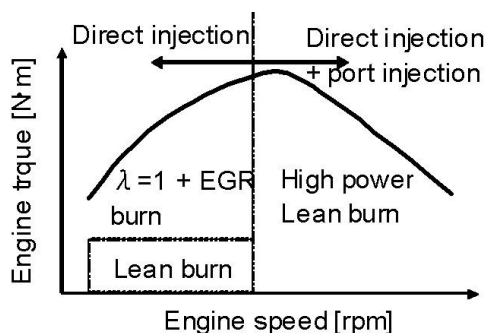


図1 2. 水素燃焼制御

図1 2に本エンジンの燃焼制御の概要を示す。これにより国内の平成17年基準排出ガス75%低減レベル

(SU-LEV)を達成した。

3. 3. 2 自動燃料切替え制御

水素走行中に水素燃料がなくなると、自動的にガソリン走行に切り替わるデュアルフューエルシステムシステムを開発した。

また、水素燃料が残っている場合でも、図1 3に示す運転席右側の燃料切替えスイッチで任意に水素からガソリンへ切り替え可能とした。

燃料切替えの課題として、水素燃焼とガソリン燃焼では、要求点火タイミング、要求空燃比に大きな差があるため、切替え時に燃焼音やトルクの差が生じ運転者に違和感を与える懸念がある。

この課題を解決するため、燃焼のサイクル毎に燃料噴射、点火タイミング、補機類などの駆動を個別に切替える制御システムを開発した。本システムにより、1ロータずつ噴射弁を異なる燃料に切替えながら、スロットルと燃料噴射量をトルク制御することで、切替え時のトルクショックを解消した。

この結果、走行中に自動的に燃料の切替えが行われても、運転者に違和感を与えることなく走行が可能となった。



図1 3. 燃料切替えスイッチ

3. 3. 3 デュアルCPU型の電子制御ユニットの開発

ガソリン運転の性能および機能をそのままに維持した上で水素運転を可能とし、更に自動燃料切替えも可能とするため、図1 4に示すように、CPU(Central Processing Unit)を追加したデュアルCPU型の電子制御ユニットを新規に開発した。

図1 5に新しく開発した電子制御コントローラのソフトウェア処理概要を示す。

ガソリンと水素で共通の部品(点火プラグ、スロットルなど)を制御するために、別々のCPUからの制御信号を適切なタイミングで切替えるソフトウェアを新たに

開発した。

さらに、ガソリン CPU と水素 CPU は上記の処理を同時並行で実行する必要があるため、切替えのタイミングやセンサー情報の通信・同期処理を開発した。

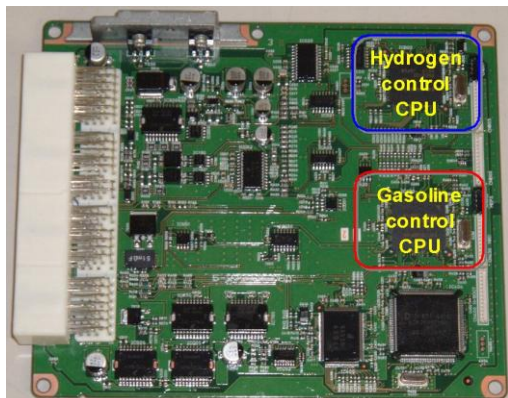


図 1 4. 水素電子制御ユニット

参考文献

1. 寺本 他：水素ロータリエンジンの開発, マツダ技報, NO.11, p.60-67 (1993)
2. 森本 他：水素自動車の開発, マツダ技報, NO.14, p.132-138(1996)
3. 森本 他：RX-8 ハイドロジェン RE の紹介, マツダ技報, NO.22, p.132-138(2004)
4. 柏木 他：RX-8 ハイドロジェン RE の紹介, マツダ技報, NO.24, p.135-138 (2006)
5. 齊藤 他：RX-8 ハイドロジェン RE デュアルフューエル制御システムの開発, マツダ技報, NO.24, p.139-143(2006)

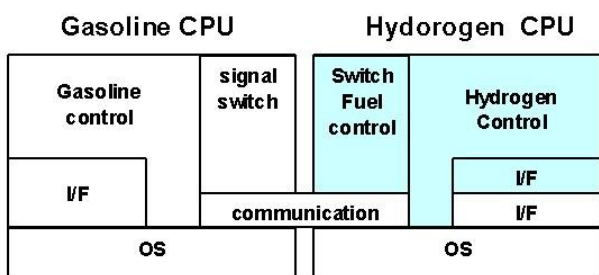


図 1 5. Dual CPU processing

4. おわりに

研究開始から 10 数年を経た本年 2006 年から、水素 RE を搭載した RX-8 ハイドロジェン RE を、お客様の下に届けることが可能となった。

RX-8 ハイドロジェン RE が水素エネルギー利用を促進し、クリーンな水素社会の実現に向けて活躍してくれることを願っている。

一方、水素社会の実現のためには、水素の運搬、貯蔵、管理等多くの分野で解決しなくてはならない課題がある。RX-8 ハイドロジェン RE も、水素での航続距離、走行性能など、ガソリンエンジン車に比較するとまだまだ劣る面が残っている。

水素社会の実現を目指し、各分野で課題解決に取り組む多くの水素エネルギー技術研究者とともに、今後もより良い製品の開発に努力していきたい。