

# マツダにおける水素エンジン車の開発

柏木章宏・瀬尾宣英

マツダ株式会社

〒730-8670 広島県安芸郡府中町新地3-1

## Development of Hydrogen Engine Vehicle in MAZDA

Akihiro KASHIWAGI, Nobuhide SEO

Mazda Motor Corporation

3-1, Shinchi, Fuchu-cho, Aki-gun, Hiroshima 730-8670

**Abstract:** Mazda has engaged in technology development of the hydrogen engine vehicle since the early 1990s. This paper describes the development outline of the hydrogen engine vehicle and the hydrogen engine hybrid vehicle launched in the markets after 2006. These hydrogen engine vehicles are equipped with the fuel switching system that allows driving with not only hydrogen but also gasoline.

**Keywords:** Hydrogen Engine、Rotary Combustion Engine、Hybrid Vehicle

### 1. はじめに

酸素と結合して“水 (H<sub>2</sub>O)”になり、その際エネルギーを発生する水素は、環境にやさしい燃料である。そしてその水素は、化石燃料以外からも作ることができるため、化石燃料の枯渇の問題をも解決できる可能性を持っている。

水素を燃料とする自動車には、おもに水素燃料電池車(以下、FCV ; Fuel Cell Vehicle)と水素エンジン車の2種類がある。マツダでは、1990年代初頭から水素燃料自動車の開発に取り組んでおり、これまでにFCV、水素エンジン車両方の開発経験をもっている。本稿では、2006年以降に市場導入した水素エンジン車の概要について述べる。

### 2. 開発のねらい

現在、多くの企業や研究機関等でFCVが研究、開発されているが、コスト、信頼性、白金の使用量等、今後普及に向けて解決すべき複数の課題を抱えている[1-2]。さらに、水素燃料を車両に供給する水素ステーションの数が現状では少なく、利用者にとってはまだまだ不便と言わざるをえない。

しかし近年、地球温暖化や石油資源の枯渇は急速に進んでおり、実用性の高い水素燃料自動車の登場を世界中が待ち望んでいる。

水素エンジン車は、FCVに比べるとエネルギー効率で劣るものの、内燃機関であるため、コスト、信頼性、生産性等は、FCVよりも優位と考えられる。また、使用する白金の量も、FCVより少なくできる可能性がある。さらに、水素が無くなった場合にはガソリンを燃料として走行する機能を付加することも、FCVに比べればはるかに容易であり、これによって水素ステーションの無い地域への移動も可能となる。

また、水素エンジンなら、燃料電池に用いる場合より低純度の水素が利用できるため、副生水素を利用する場合には、将来精製工程を簡略化できる可能性もある。

このような理由から、水素エンジン車は水素社会を早期に実現させるための有効な手段のひとつになりうると考えた。

### 3. 水素エンジン車

2006年2月に「RX-8ハイドロジェンRE」で、世界初の水素ロータリーエンジン車のリース販売を開始した。量産

スポーツカー「RX-8」をベースに、水素だけでなくガソリンでも走行できる、燃料切り替えシステムを備えた水素エンジンを搭載した。水素タンクは、日本国内の水素ステーションの標準的圧力である35MPaのものを採用した。



図1. RX-8ハイドロジェンRE

### 3.1 ロータリーエンジンの採用

ベースエンジンには、当社の量産ロータリーエンジン「13B」を採用した。以下、その理由を述べる。

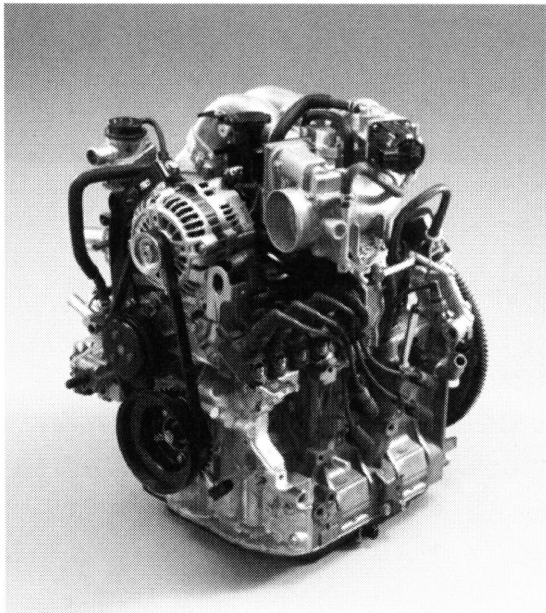


図2. 水素ロータリーエンジン外観

水素ガスは、ガソリンなどの石油系燃料に比べて、最小点火エネルギーが小さく、理論混合気における燃料容積割合が大きい、などの特徴を持つ。

水素ガスを内燃機関の燃料に用いた場合、水素の最小点火エネルギーが小さいため、作動室内の高温部位の影響により、本来の点火時期より早く燃焼する、異常燃焼（過早着火）が起きやすくなる。特にレシプロエンジンでは、

吸気、圧縮、燃焼、排気をシリンダ内の同じ場所で行うため、燃焼時の熱により排気バルブなどが高温になり、異常燃焼が起き易い。

ロータリーエンジンは、その構造上、吸排気バルブを持たず、かつ吸入、圧縮、燃焼、排気を行なう場所が分かっている。このため、比較的容易に異常燃焼を抑制できる。

また、水素ガスはガソリンなどと比べて理論混合気における燃料容積割合が大きいため、吸気管内に水素ガスを供給する予混合エンジンでは、相対的に吸入空気量が減少し、これが出力低下につながる。空気の充填量の減少を防ぐには、気筒内に直接燃料を供給する、いわゆる直接噴射（以下、直噴）方式が有効である。

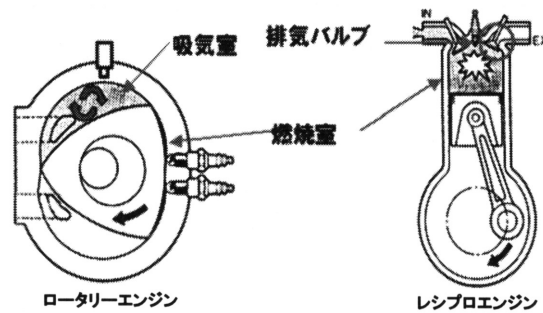


図3. ロータリーエンジンとレシプロエンジン

レシプロエンジンを直噴化する場合は、シリンダーヘッド周辺に燃料噴射装置（以下、インジェクター）を設けることになるが、スペースが少なくインジェクターのレイアウトは容易ではない。さらに、燃焼時の高温、高圧がインジェクターに直接作用するため、装置はこれらに耐える仕様を要求される。

ロータリーエンジンの場合は、インジェクターを燃焼室に設ける必要がないため、レシプロエンジンに比べて設置場所の自由度が大きい。燃焼時の高温、高圧が影響しない場所に設置できる。このため、インジェクターの設計も楽になり直噴化に都合が良い。

以上の理由により、ロータリーエンジンをベースエンジンに採用した。

### 3.2 NOxの低減

水素エンジンでは、水素と酸素の反応により水が生成されるが、同時に空気中の窒素と酸素の熱反応により窒素酸化物（以下、NOx）も生成される。水素エンジンを実用化するには、このNOxを低減することが重要である。

図4に水素の希薄燃焼によるNOx低減効果を示す[3]。

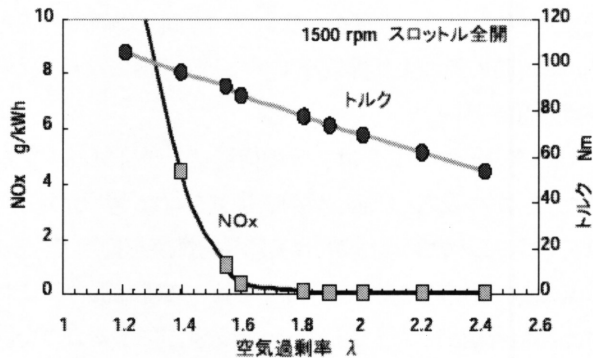


図4. 希薄燃焼によるNOx低減効果

水素は可燃範囲が広く、ガソリンエンジンでは運転困難な希薄な混合比でも安定して燃焼させることができる。図4に示す条件の場合、空気過剰率 $\lambda = 1.6$ 以上で運転すれば、NOx 排出量はごく微量となる。

しかし、混合気の希薄化に伴ってトルクも低下する。このため、主に低負荷域を希薄燃焼運転とし、高負荷域ではあらたに開発した排ガス還流装置と3元触媒により、NOxの低減を図った。

以上により、日常用途に十分な出力 (80 kW) を達成すると同時に、一般に四つ星車と呼ばれる低排出ガス車の基準より、更にクリーンな排ガス性能を達成した。

### 3.3 燃料混合状態の改善

直噴化により出力の向上を図ったが、高回転域において、部分的に空気と水素の混合状態が悪くなる現象が発生した。これは、NOxの増加や異常燃焼の原因となる。

これを解決するため、第2の水素インジェクターを新たに吸気管に配置し、筒内のものと合わせて2箇所のインジェクターを運転状況により使い分ける方式とした。これにより、水素燃料の混合状態が改善し、全領域にわたって良好な燃焼が可能となった。

### 3.4 燃料切り替えシステム

「RX-8ハイドロジェンRE」の水素での航続距離は100kmである。また、ガソリンでの走行も可能とすることで利便性を向上させた。ガソリン用のインジェクターは、ベースエンジンの部品を残して、そのまま使用した。

エンジンの運転制御に関しては、水素燃焼とガソリン燃焼では、要求点火タイミング、要求空燃比等に大きな差がある。そのため、燃料の切り替え時には、トルクの顕著な変化が生じる恐れがある。これを改善するため、1ロータ

ー毎にインジェクターを切り替え、スロットルと燃料噴射量をトルク制御することで、燃料切替え時のトルクショックを解消し、走行中の切り替えも可能にした。

本システムでは、水素燃料で走行中に燃料切れが起きた場合、自動的にガソリン燃料に切り替わる。また、水素インフラの無い地域への長距離移動などの場合に備え、手動で燃料を切り替えることも可能とし、そのためのスイッチを運転席右側に配置した。

万が一、水素燃料系などに異常が起きた場合には、水素タンクの元弁を遮断すると同時に、自動的にガソリン走行へ切替える機能も備え、突然のエンジンストップを防止している。



図5. 燃料切り替えスイッチ

## 4. 水素エンジンハイブリッド車

2009年3月には、「プレマシーハイドロジェンREハイブリッド」を開発し、リース販売を開始した。この車両では、「RX-8ハイドロジェンRE」に対し、水素航続距離を2倍の200kmとし、最高出力も約40%改善することをめざし、あらたにハイブリッドシステムを開発した。



図6. プレマシーハイドロジェンREハイブリッド

図7に車両レイアウトを示す。ベース車は3列シートのミニバンである。2列目シートまでを乗員スペースとし、高電圧電池を2列目シート下部に搭載した。また、3列目シートを廃止して水素タンクと荷室をレイアウトした。

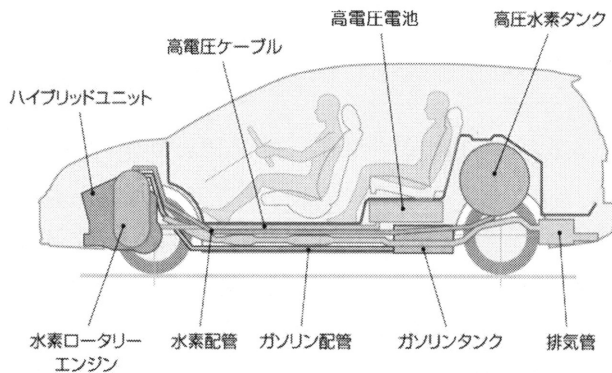


図7. 車両レイアウト

これにより、「RX-8ハイドロジェンRE」に比べて荷室スペースが大幅に拡大し、乗員数も5名に増やすことができた。

#### 4.1 ハイブリッドシステム

一般にハイブリッドシステムには、パラレル、シリーズパラレル、シリーズの3方式がある。現在量産車に多く採用されているのはシリーズパラレル式である。

本車両のハイブリッドシステム選定にあたっては、近年の電気駆動系の効率改善技術の進歩に着目し、それを最大限に利用することをめざした。そのため、エンジンの出力を全て電気エネルギーに変換し、全駆動をモータで行なうシリーズ式を採用した[45]。また、高電圧電池は高出力密度のリチウムイオン電池を採用した。

ハイブリッドシステムの概要を図8に示す。水素エンジンは横置きとしてジェネレータに直結し、エンジンの出力は全て電気に変換される。モータは減速機を介してタイヤを駆動する。

発進や定常走行などのモータ出力が比較的小さい走行シーンでは、エンジンを停止し高電圧電池の電力で走行する。加速や高速走行等の比較的大きなモータ出力が要求されるシーンでは、エンジンを始動し、エンジンで発電する電力によってモータを駆動する。加速など一時的に大きな出力が必要なシーンでは、エンジンによる発電電力に高電圧電池からの電力を加えてモータを駆動する。減速時にはモータが発電機として働き、減速エネルギーで発電した電

力を高電圧電池に蓄える。

また、エンジン出力とモータ出力を部分的に同調させ、加速に合わせてエンジン回転数が上昇するなど、通常の内燃機関に似た走行感覚を実現している。

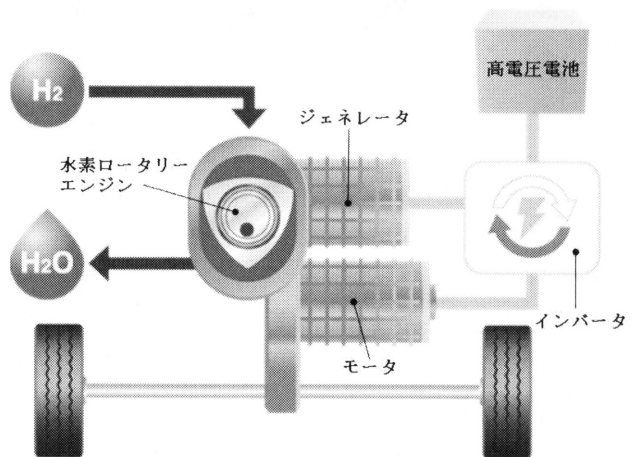
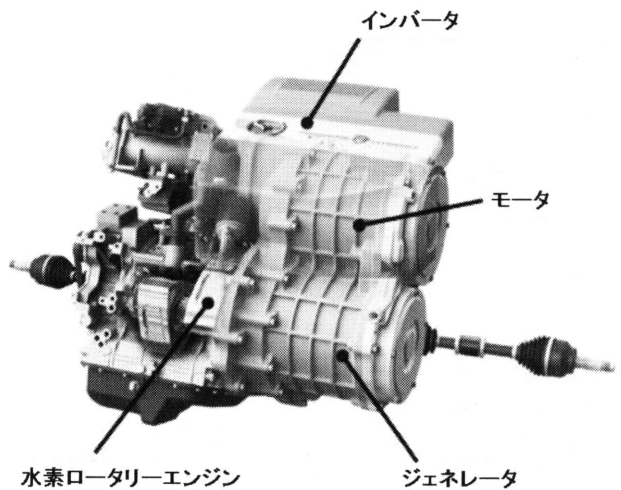


図8. ハイブリッドシステムの概要

#### 4.2 巻線切り替えモータ

モータは交流・永久磁石型同期モータとし、巻線切り替えの機能を織り込んだ[6]。通常、モータ設計においては、高トルク型か、高回転型かを選択し、ステータの巻線仕様を決定する必要がある。本システムでは、巻線切り替え機能により運転中にモータ巻線数を切り替えることによって、高トルク型と高回転型の双方の特性を両立する技術を開発した。図9に巻線切り替えの概念を示す。

この機能により、低回転域では高トルク型モータの特性を発揮し、高回転になると巻線を切り替えてコイルの量を減らし、高回転運転を可能にした。



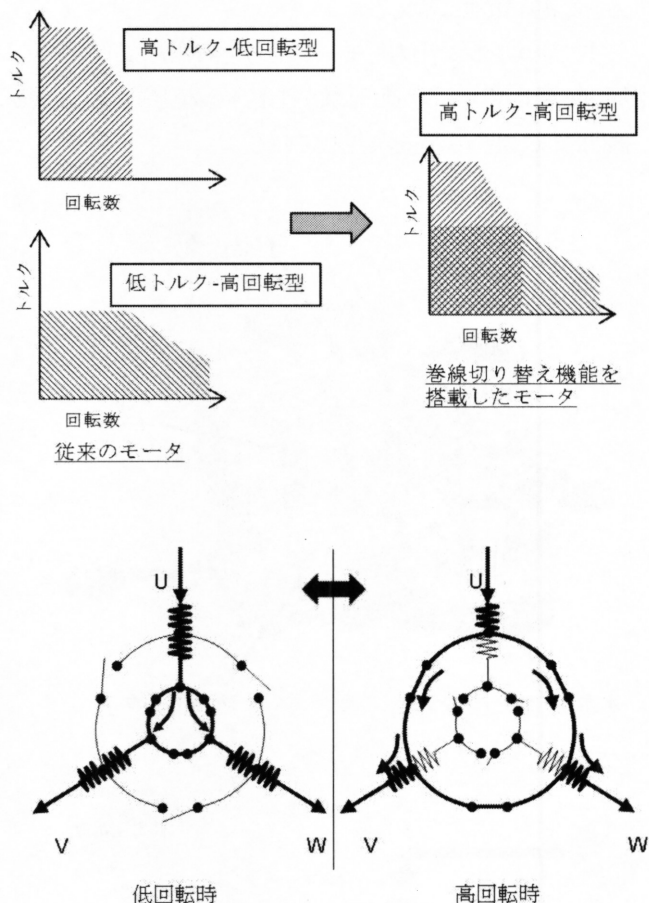


図9. 巻線切り替えの概念

巻線切り替え自体は、既に産業用等で実用化されている技術だが、車に応用する場合は、切り替え時のトルク変化が直接運転フィーリングに反映されるため、その解決には様々な工夫が必要である。本システムでは、切り替えを瞬時に行うために半導体スイッチを用いた電子式巻線切り替えとし、切り替え時の制御等を工夫することで、違和感の無い巻線切り替えを実現した。

この技術により、高トルクと高回転を両立できただけでなく、モータの高効率運転領域も広がり、エネルギー効率の改善にも寄与した。

なお、本車両のモータ、ジェネレータ、インバータは(株)安川電機との共同開発により製作した。

#### 4.3 植物由来材料

脱石油資源と製造時の二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) 削減をめざして、植物由来の原料から作られるバイオプラスチックとバイオファブリックを内装材に採用した。

バイオプラスチックは、射出成形法で製造可能とし、かつ石油由来のプラスチックと同等の耐熱性と耐衝撃性

を実現した。これを運転席、助手席周辺のトリムと水素タンクカバーに使用した。

また、バイオファブリックについては、自動車内装表皮に使用できる品質を達成し、これを全席のシート表皮とドア内張りに使用した。

#### 5. まとめ

水素社会を実現するためには、水素の製造、運搬、貯蔵、利用など多くの分野の課題を解決する必要がある。その中で水素燃料自動車は、水素を利用 (消費) する段階の製品である。製品化にあたっては、環境にやさしい性能を実現することのみならず、消費者の利便性とリーズナブルな価格も重要なファクターとなる。

本稿では、水素エンジン車の持つ利点を紹介し、小規模ながら製品化を実現した車両について、そのシステムと特徴を解説した。

将来水素エンジンは、自動車用だけでなく、発電用や船用等へも応用可能と思われ、水素社会の実現に貢献できる重要な技術のひとつになると確信している。

#### 参考文献

1. 網治: NEDO技術開発機構におけるPEFCの研究開発状況と実用化に向けた技術開発ロードマップ、自動車技術、Vol.61、No.9、p.18-24 (2007)
2. 木崎: 燃料電池自動車の開発状況、自動車技術、Vol.61、No.9、p.31-36 (2007)
3. 森本ほか: 水素自動車の開発、マツダ技報、No.14、p.154-161 (1996)
4. 柏木ほか: プレマシーハイドロジェンREハイブリッドの紹介、マツダ技報、No27、印刷中 (2009)
5. 若山ほか: ハイドロジェンREハイブリッドシステムの開発、マツダ技報、No27、印刷中 (2009)
6. Mahesh M. Swamyほか: 永久磁石形同期電動機の電子巻線切替による速度範囲の拡大方法、平成16年電気学会産業応用部門大会、p.III-187-190 (2004)