

水素ロータリーエンジン車の開発

マツダ株式会社

代表取締役社長 井巻 久一

マツダ(株) 技術研究所 主幹研究員	森本 賢治
マツダ(株) 技術研究所 主幹研究員	齊藤 智明
マツダ(株) 技術研究所 技術研究所 シニアテクニカルスペシャリスト	西村 博文
マツダ(株) 技術研究所 技術研究所 シニアテクニカルスペシャリスト	水島 善夫
マツダ(株) プログラム開発推進本部 主査	柏木 章宏
マツダ(株) 技術企画部技術戦略グループ 社員	後藤 昌志

はじめに

エネルギー発生後“水”になる、という特徴を持つ水素は、地球環境問題とエネルギー問題を同時に解決できる可能性を持つ燃料である。

自動車業界では、水素を燃料とする燃料電池車が複数の会社によって研究されているが、コスト、量産性、利便性等に課題があり、本格的な普及はかなり先になると考えられている。

さらに、国内の水素ステーションはまだ十数か所しかない。このため、燃料電池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ず、結果として運行範囲は水素ステーション周辺の狭い範囲に限られている。

内燃機関の水素自動車も、燃料電池車と同様に地球環境とエネルギー問題の解決に貢献できる技術である。この技術は、コスト、量産性等に優れているため、水素社会の早期実現のための有効な手段になり得る。

開発のねらい

当社では、水素社会を早期に実現するために、量産車をベースとして、出力、排ガス性能に優れた水素エンジン（内燃機関）車を開発することを目指した。水素充填圧は、国内の水素



図1 水素エンジン車

ステーションの標準的圧力である35MPaとした。また、水素とガソリンいずれの燃料でも走行可能な車とすることにより、水素インフラ普及期においても利用しやすい車とした。

開発車の概要

当社の量産車をベースに、エンジンを水素ガソリン兼用のものに改良し、新たに水素タンクと水素を安全に使用するための管理システムを搭載した。

エンジンは、既存のガソリン噴射装置を残したまま、水素噴射装置と、排ガス対策のために新たに開発した水素燃料に対応できるEGR（排ガス還流装置）を追加した。同時に、エンジン制御装置も新たに開発した（図2）。

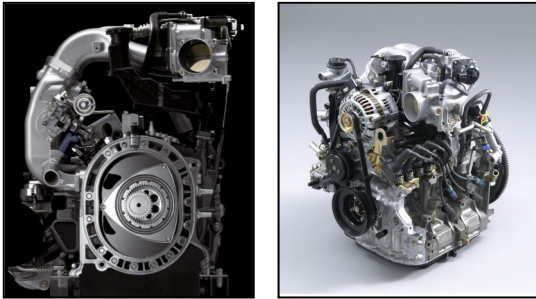


図2 水素エンジン

開発の要点

水素エンジンを実用化する場合、高出力の達成と同時にNO_x（窒素酸化物）の低減が開発の要点となる。

表1に水素燃焼の特性を示す。水素は、① 最小点火エネルギーが小さく、② 単位容積あたりのエネルギー量が低く、③ 燃焼速度が速い、という特徴を持つ。これらの特徴が、出力低下とNO_xの発生をもたらす。

最小点火エネルギーが小さい水素をエンジンの燃料に用いると、火花で点火させる前に作動室内の高温部位によって異常燃焼（過早着火）が起きやすくなり、出力低下につながる。特にレシプロ（往復動）エンジンでは、吸気、圧縮、膨張（燃焼）、排気をシリンダ内の同じ場所で行うため、燃焼時の熱により点火プラグや排気バルブが高温になり、吸気行程中に異常燃焼が起きやすくなる。

この問題を解決するため、当社の独自技術のひとつであるロータリーエンジンをベースエンジンに採用した。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、燃焼、排気を行なう高温部と、吸入、圧縮を行なう低温部が分かれている。この低温部に水素を吸入すること

表1 水素の特性

項目	水素	ガソリン (代表値)
化学式	H ₂	C _{7.5} H ₁₇
理論混合気における燃料容積割合 (Vol %)	29.53	1.7
着火濃度範囲 (Vol %)	4-75	1.0-7.6
層流火炎伝播速度 (cm/sec)		
λ = 1	265	40
λ = 2	48	
最小点火エネルギー (mJ)	0.02	0.24

で、異常燃焼を抑制することができる。

また、水素ガスは炭化水素系の燃料と比べると単位容積あたりのエネルギーが低い。このため、混合気中に占める燃料の容積割合が高くなる。吸気管内に水素ガスを供給する予混合エンジンでは、吸入空気の充填量はガソリン運転時に比べて3割近く減少し、これが出力の低下につながる。

本エンジンでは、空気の充填量の減少を防ぐために、吸気行程では空気のみを吸入し、圧縮行程でエンジン内に直接水素ガスを供給する、いわゆる直噴（直接噴射）方式を採用し、図3に示す位置に水素噴射弁を配置した。

直噴方式は、ディーゼルエンジンのように圧縮行程の後期に噴射する高圧型が多いが、本エンジンでは低圧型を採用した。

高圧型では水素タンク内の水素を低圧領域まで使えず航続距離の低下を招く。この解決のために専用の燃料圧縮装置を設けることも考えられるが、更なるコスト上昇と開発要素の増加につながり得策ではない。

また、レシプロエンジンでは燃焼室に直噴装置を設置することになり、燃焼圧力が噴射弁に作用する。そのため、燃焼ガスの逆流を防ぐ工夫が必要となるが、ロータリーエンジンは、燃焼圧力が作用しない位置に噴射装置を設置することができ、低圧直噴が容易となった。

また、水素燃料は可燃範囲が広いいため、部分的に燃料を濃くするいわゆる成層化を行う必要がなく、早期に噴射し均質な混合気を生成することがNO_x低減、熱効率向上に有効である。

本エンジンでは、ミキシング時間を十分取り、かつ前述した低圧での噴射を実現するため

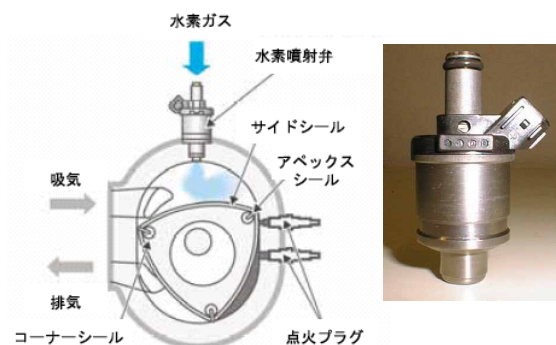


図3 水素噴射弁の位置と外観

に、圧縮行程の初期に噴射する方式とした。これらにより、目標出力である80kWを達成した。

技術上の特徴

1. NO_x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、空気中の窒素と酸素の熱反応によりNO_xも生成される。特に水素は火炎伝播速度が速いため、燃焼時の圧力、温度が高くなり、高温場が形成されやすく、NO_xを生じやすくなる。

図4に希薄燃焼によるNO_x低減効果を示す。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混合比でも安定して低温燃焼させることができる。これを利用し空気過剰率 $\lambda = 1.6$ 以上で運転すれば、NO_x排出量はごく微量となる。

しかし、混合比の希薄化に伴ってトルクも低下する。このため本エンジンでは、主に低負荷域は希薄燃焼とし、高負荷域は新たに開発したEGRと3元触媒により、NO_x低減を図った。3元触媒はベース車のガソリンエンジン部品をそのまま使用した。

2. 直噴と吸気管噴射の併用

直噴化により出力の向上を図ったが、高回転域では混合時間が短くなり、部分的に水素が非常に濃い領域が発生(図5)した。空気と水素の混合状態が悪いと、NO_xの発生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

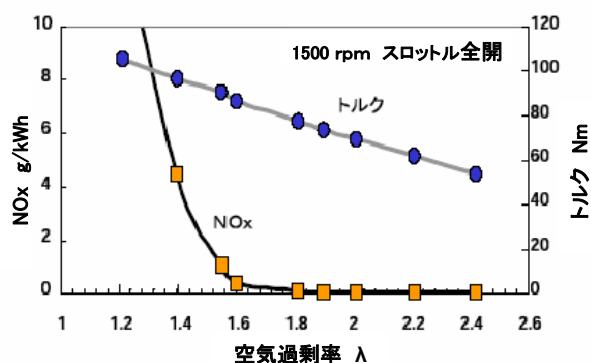


図4 水素ロータリーエンジンのNO_x排出特性

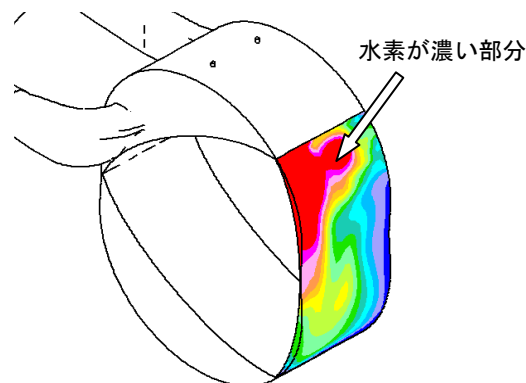


図5 水素の混合状態 (高回転)

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ことにした。これにより水素の濃い領域を無くすことができ、全領域にわたって良好な燃焼が可能となった。(図6)

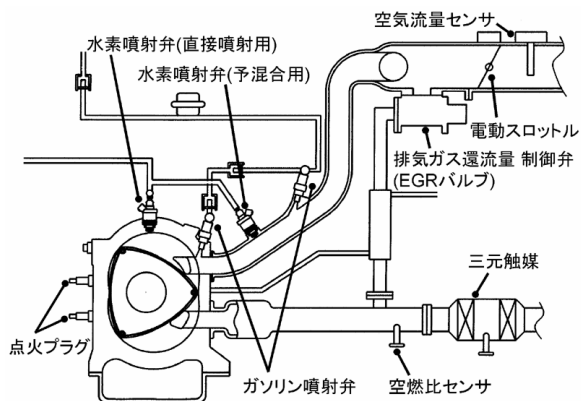


図6 水素エンジンシステム

3. 運転領域の制御

電子制御を生かして吸気管噴射を併用する領域や噴射タイミング、空燃比などを細かく制御し、高い次元でNO_xと出力をバランスさせた。(図7)

運転領域毎の切り替えでは、同一スロットル開度でも運転領域により出力が異なるため、従来のトルクベースの制御では、燃焼移行時にトルクショックが生じる。また、運転領域によって異なるEGR量や、空燃比にスムーズに変化させる必要がある。

そのため、エンジンの出力トルクを精密に管理し、最終的にトルクからスロットル開度に変換することでエンジンをコントロールするトルクベース制御を行った。また、EGR量の変化に応じ、必要な燃料を演算する機能を追加し、

目標空燃比が変化したときの応答性を向上させる機能を改善した制御アルゴリズムを開発した。

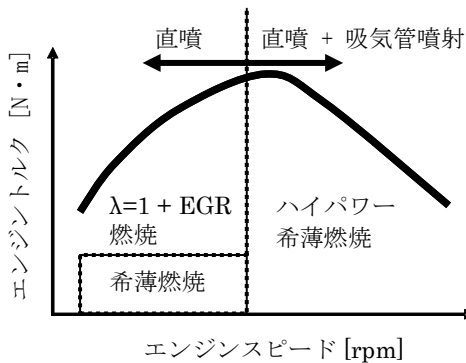


図7 エンジン制御マップ

4. 燃料切り替え制御

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。その結果、切替え時に燃焼音やトルクの差が生じる。これを解決するため、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を開発した。

1ロータ毎に燃料を切替えながら、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。

5. 水素安全システム

高圧水素安全システムは、2005年3月に国交省で制定された「圧縮水素ガスを燃料とする自動車の燃料装置の技術基準」に沿って開発を行った。また、水素燃料使用中に万一異常が起きて、安全に走行するため、部品の異常を検出する機能、異常検出時に高圧タンクの元弁を遮断する機能、水素供給遮断と同時にガソリン走行へ自動的に切替える機能などを備えた。



図8 燃料切り替えスイッチ

実用上の効果

以上により、国内の通常用途に充分使える出力を達成すると同時に、一般に四つ星車と呼ばれる、最も排ガスがきれいな低排出ガス車より更にクリーンな排ガス性能を達成した。

また、図8に示すように運転者が手動スイッチで燃料を切替えることを可能にしてお客様の利便性を確保すると同時に、走行中に水素燃料が無くなった場合には、ガソリン走行に自動的に切替えるシステムを加えて安全性を高めた。

当該車両は2006年2月から、国内の燃料電池車のリース料金の半額以下の料金でリース販売を開始した。2007年8月時点で8客先に対してリース納入を行ない、各地で一般業務に加え、環境教育、エコ活動等に広く活躍している。

工業所有権の状況

本開発品に関しては、特許出願公開番号2006-132406エンジン制御装置、など国内34件、海外4件が出願中である。

むすび

二酸化炭素排出量の削減は、人類の緊急の課題である。また、原油価格は急激な上昇を続けており、人類は早期に石油に代わる新しい燃料を見つけなければならない。

水素エンジン車は、エネルギー効率において燃料電池車に劣るものの、その信頼性の高さ、コストの安さ、利便性の高さなど、多くの長所を持っている。また、将来は工場などから出る副生水素を、そのまま燃料として利用できる可能性もある。さらに、水素燃料による発電用エンジン、船用エンジン等への応用の可能性もあり、将来を担う重要な技術のひとつであると確信している。