

マツダに於ける水素自動車の開発状況と将来

マツダ株式会社 技術研究所
部長研究員 森下 強

1 はじめに

化石燃料の使用によって発生するCO₂、NO_xなどが原因になって引き起こされる様々なレベルの環境問題がクローズアップされてきている。特にCO₂は炭素を含む化石燃料を燃やすとき必ず発生し、エネルギー需要増加に伴い加速度的に発生量が増大し続けており、今後の地球環境を考える上でも最も解決が難しい課題の一つと考えられている。

そこで注目を集めているのが水素である。水素は主に水の形で地球上に無尽蔵に存在する元素であり、燃やしてもCO₂を生成せず、燃焼後は水になる。逆に水から電気分解、熱分解、バイオなどで水素を作り出すことができる再生可能エネルギーで、自然サイクルの上でも好ましい循環性を持ったクリーンエネルギーである。また、電気との間で相互に変換が可能であると共に、電気に比べ貯蔵、輸送が比較的容易である。したがって、水力、風力、太陽光など自然エネルギーを使って水から水素を作り、輸送、利用すれば、化石燃料に依存せず、環境負荷の少ないクリーンエネルギー社会システムを実現することが可能となる。

既に、通産省・工技院のニューサンシャイン計画でこのような水素利用に向けた大規模プロジェクトがスタートしている。WE-NET構想は水素エネルギーの利用促進を目的とし、発展途上国などに未利用の形で豊富に存在する水力、太陽光などの自然エネルギーで電力を得、水を電気分解して水素を製造し、得られた水素の輸送・利用を国際協力のもとで行なおうというものである¹⁾。

こうした生産から利用に至る将来の水素エネルギーシステムにおいて、私達の日常生活に最も身近なエネルギー利用のひとつが水素自動車である。そこでマツダにおける水素自動車の開発状況と将来について紹介したい。

2 水素自動車の開発

水素自動車の開発は1970年代の初めから様々な開発が行なわれてきた。米国ではUCLA（カリフォルニア大学）、ロスアラモス研究所、DOE（エネルギー省）、ピリングス社、ドイツではダイムラーベンツ社、DFVLR（航空宇宙研究所）、BMW社、そして日本では機械技術研究所（工技院）、武蔵工業大学、水素エネルギー研究所、マツダ²⁾などである。

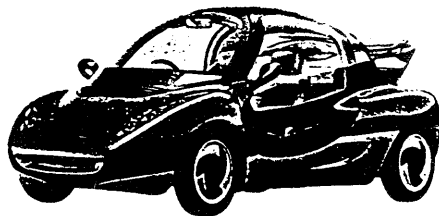
水素を自動車用燃料として使うには二つの大きな技術課題がある。一つはガソリンに比べ、わずかな火種でも着火し円滑な燃焼が難しい水素を、うまく燃焼させ得るエンジンを開発すること。もう一つは大量の水素を安全かつ軽量コンパクトに貯蔵する燃料タンクを開発することである。

これら、エンジンの安定した燃焼制御と安全で効率的な燃料貯蔵の実現に向けて開発が進められてきた。

マツダではコンセプト車HR-Xを試作し、1991年秋に開催された第29回東京モーターショーに発表した（第1図）。

この車は都市型コンピューターをイメージしてデザインした水素自動車で、軽量コンパクトな2ローターロータリエンジンを搭載し、燃料タンクに水素吸蔵合金を採用している。

第1図 水素自動車HR-X



3 水素エンジン

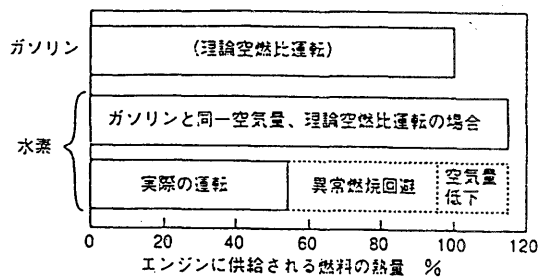
水素は基本的性質（第1表）から発熱量が多く、ガソリンエンジンと同一空気

量で同じ理論空燃比という条件であれば、水素エンジンの発熱量はガソリンの場合よりも15%多くなる。しかし、最小点火エネルギーがガソリンの約1/10と極めて小さいため、点火プラグ、排気バルブおよび残留既燃ガスなど、ガソリンエンジンでは問題にならない程度の熱源が着火源になり、過早着火やバックファイアなどの異常燃焼が発生し易い。また、水素は気体燃料であるため、理論空燃比の混合気を考えると、ガソリンの場合混合気全体のわずか1.7%の体積に留まるのに対し、気体水素は28%もの体積を占める。その結果、吸気管で燃料を混合しエンジンに自然吸入する予混合方式ではエンジン内に吸入できる空気量が大幅に低下し、発熱量が低下する。これら、異常燃焼と吸入空気量の低下を克服することが水素エンジンを開発する時の課題となる（第2図）。

第1表 水素の基本的な特性

項目	水素	ガソリン
組成(重量割合)	H:100 C: 0	H:15 C:85
密度(液体)	0.071	0.75
密度(気体)	0.089	5.09
最小点火エネルギー(空気中)	0.02	0.24
点火範囲体積割合(空気中)	4~75	1~8
燃流燃焼速度(理論空燃比)	270	38
低発熱量	28800	10800

第2図 水素CEにおける供給熱量の減少



(1) 異常燃焼への対応

従来の水素エンジンの研究では、異常燃焼を避けるため、出力を犠牲にしても水素供給量を減らし、燃焼温度を低くしたり、あるいは、シリンダー内への水噴射装置やナトリウム封入排気バルブを採用して、着火源を冷却するなどの対策を講じてきた^{2) 3)}。しかし、その結果、通常ガソリンエンジンに比した場合、出力性能の悪化や構造の複雑化を招いている。

一方、ロータリエンジン(以下RE)は作動室が回転するので、吸気、圧縮、膨張、排気の各行程が行なわれる場所が異なり、吸気時の作動室が比較的低温であること、および高温の排気バルブを持たないなど水素燃焼に有利な特有の構造を持っている。また水素ポートを設けることで、水素CEにおいてバックファイアの回避性能に効果があるとされる吸気行程中燃料噴射も容易に実現できる。

このため、実験ではREに先立って評価した水素予混合方式のレシプロエンジン(以下CE)では、ガソリン仕様の50%の出力しか得られなかったのに比べ、水素REは予混合方式で63%、吸気行程中噴射方式で75%の出力が得られており、水素REは特別な装置の付加や構造変更をしなくても水素燃焼に適合し易いことが解った。

(2) 吸入空気量の増大

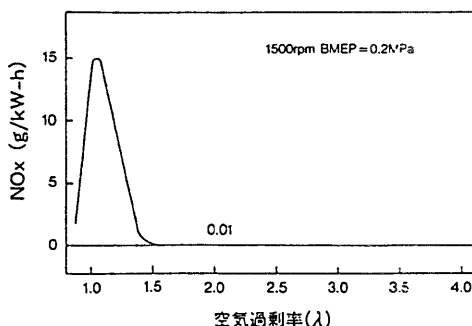
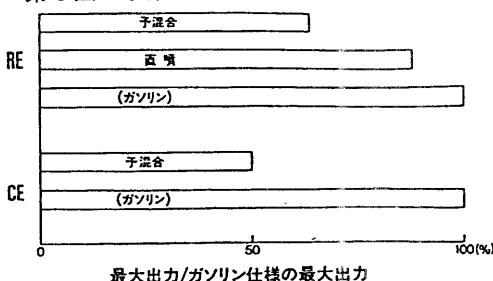
吸入空気量の低下は水素ガスの低密度のために生じるものであり、出力低下の原因になる。この対策として、空気の吸入終了後に、作動室内に水素を直接噴射する方式が研究されており^{4) 5)}、水素直噴方式REを開発した。直噴化による空気のみ体積効率を100%近くに出来れば、混合気の体積効率は最大138%までにすることが期待できる。また、過早着火がREの基本構造によって回避され易いため高圧噴射の必要性は少なく、より簡易な装置の低圧噴射を使用している。

その結果、体積効率は予混合方式に対し各回転数に於いて20~30%増加し、水

素を含む混合気の体積効率では2,000rpm以上で100%を越え、出力はベースのガソリンREの87%が得られている(第3図)。

第4図 NOx排出特性

第3図 水素エンジンの出力性能比較



(3) 排出ガス特性

水素エンジンでは燃料に炭素分はないが、燃焼室に持ち込まれた微量の潤滑油が燃焼するため若干のHC、CO、CO₂が発生する。その量は空気過剰率(λ)に関係なくほぼ一定で、ガソリンエンジンの1/100以下の極低いレベルであることが確認された。なかでもCO₂はガソリンなどの化石燃料を使用する限り、このように大幅に低減することは不可能であるため、水素エンジンの最も価値ある利点のひとつである。

一方、NO_xはガソリンエンジンと同様の挙動であり、 $\lambda=1$ 付近で排出のピークを示し、リーン側、リッチ側では急激に低下することが明らかになった。熱効率上望ましいリーン側では、空気過剰率(λ)が1.6を超える付近からNO_xは殆どゼロレベルにまで低下している(第4図)。通常ガソリンエンジンではこのような領域では点火や燃焼が不安定となり、トルク変動やHC、COの排出が急激に増加する実用上の運転限界があるため、NO_xが極めて低い領域での運転は困難である。ところが、水素エンジンは極めてリーンな領域(空気過剰率が1.6~5.0の範囲)の運転においても、安定した燃焼を確保でき、トルク変動の悪化もない。したがって、水素REを搭載した車両では、実用走行域で使われる部分負荷の広い運転範囲において空気過剰率(λ)が1.6以上のリーン燃焼を行なうことが出来、ガソリン車に比べ走行時のNO_x排出を極めて少なく抑ええることが可能である。

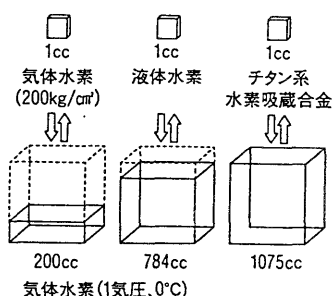
4. 水素燃料タンク

水素の貯蔵方式は高圧ガスボンベ(気体)、液体水素(液体)、そして水素吸蔵合金(固体)に吸蔵させる方法に大別される。一般的にもちいられている気体での貯蔵の場合、通常の高圧ボンベでは150~200気圧に圧縮されるが、それでも容積効率が最も悪く、高圧の圧力容器であるため容器の重量も重い。液体水素の場合は容積効率、重量効率共に良いが、液化にエネルギーが必要で、-253℃以下の低温で貯蔵するための高度な断熱タンクが要求され、また、絶えず燃料が蒸発する。水素吸蔵合金は水素を低圧で吸蔵し、容積効率に優れるが、金属であるため重量効率が悪く、水素の出入に加熱/冷却が必要である。このようにいずれも長短があり、目的によって使い分けが必要である。

自動車の燃料タンクとしては、限られたスペースに効率よく貯蔵できて、温度、圧力などの制約が少なく、充填、放出が容易であることが重要である。これらの条件に最適な貯蔵方式としてマツダでは水素吸蔵合金を採用している。水素ガ

スを加圧して水素吸蔵合金を冷却すると、水素が金属との化合物になり、大量の水素を貯蔵することが出来る（第5図）逆にエンジンの冷却水により熱を加えると、温度を制御することで一定圧力の水素ガスを安定して取り出すことが出来るので、取り扱いも簡単である（第6図）。さらに、熱を加え続けられない限りガスになって出てこないのが非常に安全性が高い。従来の合金は、吸蔵による体積膨張により微粉化することと被毒劣化のため、吸蔵量が低下するという問題があったが、マツダでは水素吸蔵合金をマグネシウムで複合化することによって耐久性を大幅に向上させ、自動車用タンクとして十分な寿命を実現している。また、燃料タンク自体は一種の熱交換器であることから、その熱交換性能は水素吸蔵合金の特性を活かす上で重要である。

第5図 水素貯蔵方法の比較



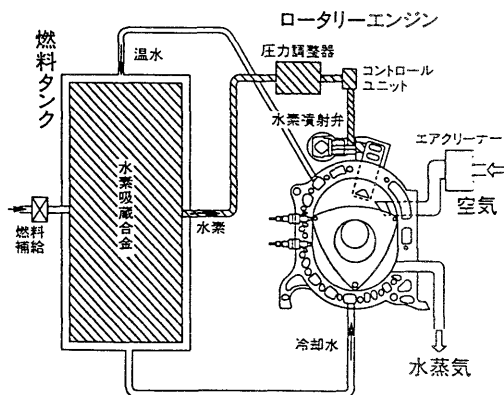
5. 水素自動車の性能

現在、水素エンジンは低圧直接燃料噴射方式のREを用いると、ベースとしたガソリンエンジンに近い出力を得ることが出来る。したがって、車としては燃料タンクの重量と貯蔵できる水素量によって性能が規定されてくる。ガソリン車と同条件で性能比較することは非常に難しいが、例えばユーノスロードスターをベースとした水素自動車（第7図）の場合、量産の13B型REをベースとした、水素REを搭載し、加速性能や最高速度はベースのガソリン車と同等の性能を実現している。しかし、航続距離はおよそ1/4であり、同じくロードスターをベースにニッケルカドミウム電池を積んだ電気自動車と同レベルにある。

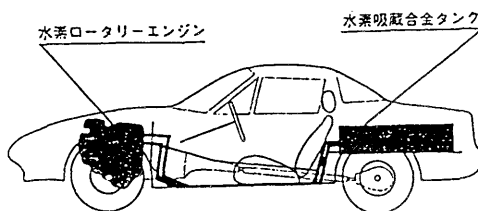
6. 水素自動車の課題とその対応

水素自動車の課題は大きく分けると車両の性能向上、燃料供給の二つが考えられる。車両性能については航続距離をさらに延ばすために、エネルギー密度に優れた新たな水素吸蔵合金の開発、燃料タンクの軽量/コンパクト化を中心に進めている。燃料供給については輸送を含む水素ガスステーション迄の水素流通シ

第6図 水素自動車燃料システム



第7図 ロードスター水素自動車



テム作りやワンタッチで水素を補給できるシステム作りの活動を推進している。

しかし、水素自動車普及に向けて、水素自動車の良さが広く理解されることが最も重要であり、そのために実用試験車による走行実績もさらに積み重ねていきたいと考えている。

7. 将来に向けて

さらに将来の水素利用技術としては燃料電池を用いた水素自動車も考えられる。マツダでは燃料電池が移動体用電源として、どのようなポテンシャル／課題があるかを調査する目的で燃料電池自動車の実験車（イメージとしてはゴルフ用カートに近い）も試作し、テストしている。

現在の自動車は化石燃料を燃料にして走っている。しかし、環境問題を解決して行くためには化石燃料をより効率よく使うことと同時に、自然エネルギーをベースとしたエネルギー利用技術の開発を進めて行かなくてはならない。

我々は水素自動車の実用化開発を通して、水素エネルギーを有効利用するための社会基盤作りにも貢献して行きたいと考えている。

参考文献

- 1) ニューサンシャイン計画ハンドブック 通商産業省編 (1993)
- 2) 古浜ほか：水素エンジンの燃焼特性、自動車技術会論文集、No6, p12(1973)
- 3) K. Feucht et al.: Hydrogen Drive for Road Vehicles .Results from the Fleet Testrun in Berlin, 6th WHEC, p.1145(1986)
- 4) J. Hama et al.: Hydrogen Powered Vehicle with Metal Hydride Storage and D. I. S. Engine System, SAE Paper 880036.
- 5) S. Furuhashi et al : High Output Power Hydrogen Engine with High Pressure Fuel Injection Hot Surface Ignition and Turbo-Charging, 5th WHEC, p.1493 (1984)
- 6) 水素吸蔵合金 大角泰章著 与野書房 (1985)