

論文・解説

25

RX-8ハイドロジェンREの紹介

Introduction of RX-8 Hydrogen RE

森本賢治*1 水島善夫*2 定平誠二*3

Kenji Morimoto

Yoshio Mizushima

Seiji Sadahira

堂園一保*4 内田浩康*5

Kazuho Douzono

Hiroyasu Uchida

要約

将来の自動車用燃料として水素が期待されている。水素を燃料とする自動車として、燃料電池自動車の開発が鋭意進められているが、同様に地球環境問題への解決に貢献できる内燃機関水素自動車もコスト、量産性の面から一定の役割を果たすものと考えられる。マツダは1995年に当時の運輸省の大臣認定を受け、水素ロータリエンジン（以下RE）自動車の公道走行を実施している。当時と比べベースエンジンのRE及び周辺技術として燃料供給システムが進歩している。とりわけ軽量化、高圧化による燃料タンクの大幅な進歩が見られる。また、水素インフラ普及期においては、水素のインフラが十分整備されない状況が想定されるが、この状況下においても自動車として利便性を保つよう水素でもガソリンでも走行可能なデュアルフューエルの自動車の登場が期待される。そこで、RX-8をベースとして技術進歩を反映したデュアルフューエルの研究車両を試作した。新開発のRENESISに水素を噴射する電子制御インジェクタを追加し、直接噴射を行うことで出力の向上を図った。更に水素内燃機関で課題となるNOxの低減には希薄燃焼方式を用いた。車両技術としては、燃料電池自動車と共通の35MPaの高圧水素タンクを用い、更に前述の大臣認定取得時に織り込んだ技術をベースとした安全技術を搭載した。なお、この研究車両は2003年開催の第37回東京モータショーで技術展示を行い、好評を博した。

Summary

Hydrogen energy is greatly expectable as a promising vehicle fuel in the future. Generally, a fuel-cell vehicle has been developed as a hydrogen utilization technology, while a hydrogen-fueled internal combustion engine vehicle will have opportunities to be introduced to the market from the viewpoint of cost and mass production. Mazda obtained the certificate of the Ministry of Transport in 1995, and conducted the public road tests of the hydrogen-fueled internal combustion engine vehicle. Technologies of rotary engines, fuel supply systems, fuel tanks and so on have attained great progress since then. An experimental vehicle reflecting the technological progress was prototyped. We employed a dual fuel system to achieve high convenience even under a condition where hydrogen stations are not in good service. Direct injection of hydrogen attained by additionally installing an electronically controlled gas injector on RENESIS substantially improved engine output. Use of ultra lean combustion also reduced NOx. We adopted the safety technology based on the technologies which had been incorporated at the time of obtaining the above certificate. The same 35 MPa high-pressure hydrogen tank as in a fuel-cell car was installed. This research vehicle was exhibited at the 37th Tokyo Motor Show held in 2003 and gained public favor.

*1~5 技術研究所
Technical Research Center

1. はじめに

温暖化等地球環境問題，エネルギー問題を根本的に解決するエネルギーとして水素が注目され，実用化に向けての研究開発が進められている。例えば，経済産業省の研究補助事業として水素・燃料電池実証プロジェクト（以下JHFC）により燃料電池自動車，水素供給設備の実証研究が行われている。燃料電池自動車は，燃料電池で発電した電気エネルギーでモータを回して駆動するシステムであり，エネルギー変換効率が高く，有害な排出ガスを出さないため究極のシステムと考えられている。しかしながら，燃料電池自動車は，コスト，量産性，利便性等の観点からは本格的な普及には今しばらくの期間が必要と考えられる。

一方，内燃機関の水素自動車は，燃料電池車と同様に地球環境，温暖化等の課題解決に大きく貢献できる技術であり，マツダは環境対応技術として1990年代初頭から開発に取り組んでいる。この技術は，コスト，量産性等に優れ，比較的早期に水素を自動車用エネルギーとして本格的に導入するための有効な手段になり得ると考える。内燃機関としてREを用いた水素自動車は，タンクに水素吸蔵合金を用いたシステムで開発を行い，その一つは1995年に大臣認定を取得し¹⁾，2台で計4万kmを超える公道走行実験を実施している。水素REのベースエンジンであるREは2003年に新開発のRENESISとして出力，燃費，エミッションとも大幅な性能向上を果たし，RX-8に搭載している²⁾。また水素貯蔵技術としては，高压タンクの技術開発が進み，より高压化，軽量化が進められている。加えてガスインジェクタ技術等の周辺技術も1995年に大臣認定を取得した時点から大幅な進化が見られる。

以上を踏まえ，水素社会を早期に実現する動力源の提案として，新開発のRENESISをベースとした水素REを搭載した研究車両「RX-8 Hydrogen RE」を試作した（Fig.1）。当該研究車両に関する技術について紹介する。



Fig.1 RX-8 Hydrogen RE

2. 開発の狙い

研究車両は現在唯一のRE搭載車であるRX-8をベースに以下三項目を狙いとして開発を行った。

(1) デュアルフューエルシステム

水素でも，ガソリンでも走行可能なデュアルフューエルシステムを実現する。水素社会への移行期において水素インフラの整備されていない地域へ出かけた場合を想定し，ガソリンでも走行可能とする。

(2) 出力向上と窒素酸化物（以下NO_x）低減

水素を内燃機関に用いる場合の課題である出力の向上とNO_xの低減を図る。

(3) 35MPa高压タンク

水素燃料タンクは，多くの燃料電池自動車と共通である35MPa高压タンクとする。これは，現在燃料電池自動車において，同方式の水素供給設備の実証試験が進められており，当面燃料タンクとして主流になると考えられるためである。

3. RENESIS水素RE技術

上記狙いを実現するために織り込んだエンジン技術について紹介する。

3.1 デュアルフューエル技術

RENESIS水素REの基本構造をFig.2に示す。マツダRENESISの<Std>パワーユニット³⁾をベースとし，ロータハウジングの長軸近傍に電子制御低圧水素ガスインジェクタを付加した。直接噴射にした理由については3.2節で述べる。ガソリンインジェクタは，ベース仕様からの変更はない。水素とガスの二系統の燃料噴射系を持つことにより，要求に応じていずれかの燃料をエンジンに供給することができる。

Fig.3は水素で運転した場合の空気過剰率（以下 λ ）と点火プラグ熱価の過早着火発生限界への影響を示す。ガソリンRENESISは7~9の熱価の点火プラグを用いていることから， $\lambda=1.6$ 以上の希薄燃焼運転を行えば，ガソリンとの点火プラグの共通化が可能となり，デュアルフューエルへの対応が可能であることが分かる。水素の燃焼速度はガソリンと比較して非常に大きいため，例えば $\lambda=1$ で燃焼させると水素ノックと呼ばれる異常燃焼音が生じる。しかしながら希薄燃焼を行うと燃焼速度は小さくなり $\lambda=2$ では燃焼音がガソリンと同等になる。

水素に最適な燃焼を行うためには，最適点火時期，最適空燃比等の調整が必要であるが，本ベースエンジンは電子制御スロットルを持つため，エンジン制御ユニットのセッティングを変更するだけで，最適な水素燃焼が可能となる。

$\lambda=1.6$ 以上の希薄燃焼を行えば点火プラグ，燃焼系にお

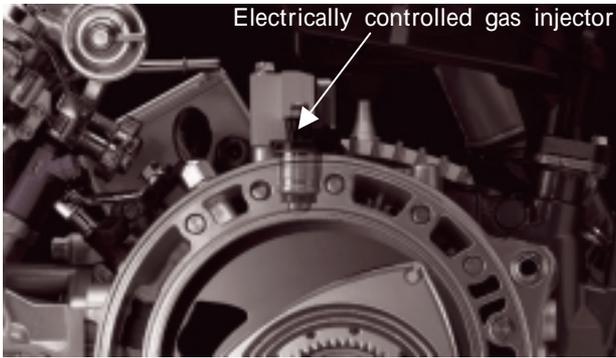


Fig.2 RENESIS Hydrogen RE

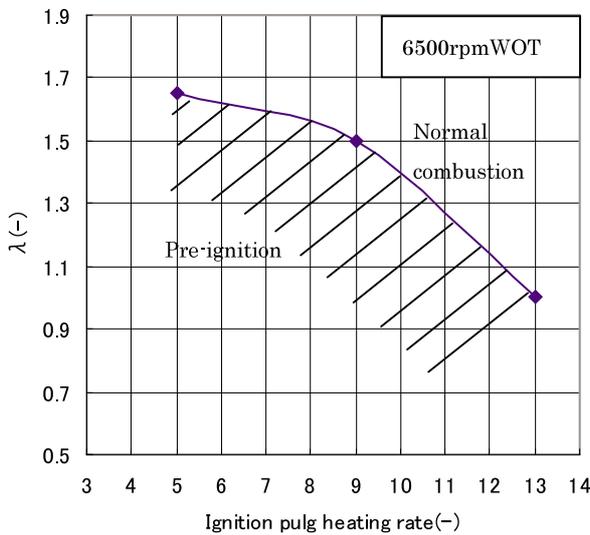


Fig.3 Effect of Spark Plug Heating Value to Pre-Ignition⁽³⁾

Table 1 Characteristics of Hydrogen⁽⁴⁾

item	Hydrogen	Gasoline
Chemical formula	H ₂	C _{7.5} H ₁₇
molecular weight	2.016	107
Chemical amount theory density (volume)	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 flow combustion speed(cm/s)		
stoichiometric mixture (cm/sec)	265	40
λ = 2 (cm/sec)	48	
Minimum ignition energy (mWS)	0.02	0.24

いてガソリンとの共通化が可能であり、デュアルフューエルを実現できる。

3.2 出力の向上技術

Table 1に示すように、水素は混合気中に占める燃料の容積割合が高い。例えば λ = 1においては、混合気100%中、ガソリン1.7%に対して水素は29.5%もの容積を燃料が占める。その結果、多くのガソリンエンジンで用いられているような吸気管内で混合気形成され、その後エンジンに予混合気として供給されるエンジンにおいては、吸入空気の入荷量が大幅に低下する。Fig.4はガソリンの空気入荷量を100%とした時の、λ = 1, 1.5, 2における水素エンジンの空気入荷量を示す。λ = 1では約70%、λ = 2においても約83%に空気の入荷量は低下する。空燃比が一定の場合、出力は空気入荷量と比例関係にあるため、入荷量の減少は出力の低下につながる。この入荷量減少への対策として、吸気行程では空気のみを吸入し、圧縮行程において筒内に燃料を直接供給するいわゆる直噴技術が水素には特に有効である。Fig.5は、水素エンジンにおける直噴化による入荷量の向上率を示す。混合気中に占める燃料の割合がλ = 1では約42%の効果があるが、λ = 2では、約20%の入荷量向上効果がある。なお、入荷量の向上のトルク向上効果への寄与は、エンジンの出力特性、フリクションロス特性により異なるため、一律ではないが、λ = 2においても25-30%程度の効果が期待される。

直噴ガソリンエンジンの場合、部分負荷では圧縮行程の後半に噴射し混合気の成層化を行い、高負荷では、吸気行程から噴射し混合気を均一化する方法が一般的である。一方水素はTable 1に示すように可燃範囲が広いので、全域において成層化を行う必要がなく、むしろ早期に噴射し均質な混合気を生成することがNOx低減、熱効率向上には有利である。そこで本エンジンでは、ミキシング時間を十分取り、均質な混合気形成されよう圧縮行程の初期に噴射する方法とした。特にREは、各行程が270° CAでありコンベンショナルのレシプロエンジンの1.5倍と長く、更に筒内で発生する強い流動も加わるため、圧縮行程の初期に噴射を行えばレシプロエンジンと比較してミキシングに有利である。加えて、圧縮行程の初期に噴射することで、要求噴射圧が低くなり①高圧タンクの圧力が燃料の消費により低下してきても、低圧まで噴射ができる②燃料システムとしてCNG等で用いられている低圧ガスインジェクタを使用可能になるなどの利点も生じる。噴射圧は0.5Mpaである。

次に低圧のガスインジェクタで燃料を供給する場合に必要なインジェクタの個数について検討した。水素ガスは、その特性上大きなボリュウムのガス噴射を必要とする。例えば 80kWの出力を得るためには、水素を約2,000NL/min噴射する必要がある。今回実験に用いたガスインジェクタは、比較的容量の大きい11,150NL/minの仕様であるが、

この場合の噴射に必要なインジェクタ本数を検討した。Table 2においてAは、インジェクタをFig.6の位置に設置し、圧縮行程にのみ噴射する場合に必要なインジェクタ本数を、Bは同上設置条件で、吸気行程 + 圧縮行程に噴射した場合に必要なインジェクタ本数を示す。その結果、Table 2に示すように、2ロータで4本のインジェクタを設置すれば、実用走行において必要とされる3,000rpmまで完全に圧縮行程で噴射できることが分かった。またこの仕様で、吸気行程の一部にも噴射すれば7,000rpmの要求最大流量を満足することが分かった。そこで本エンジンでは、2ロータで4本即ちロータ当たり2本のインジェクタを配置することとした。具体的には、Fig.6, 7に示すようにロータハウジング長軸近傍に気筒当たり2本のインジェクタを配置した。このように、2本のインジェクタを容易に設置できるのは、REの構造上のメリットである。

以上のようにREは、構造上インジェクタのレイアウトの自由度が高く、低圧直噴機構を設けることが容易であり、

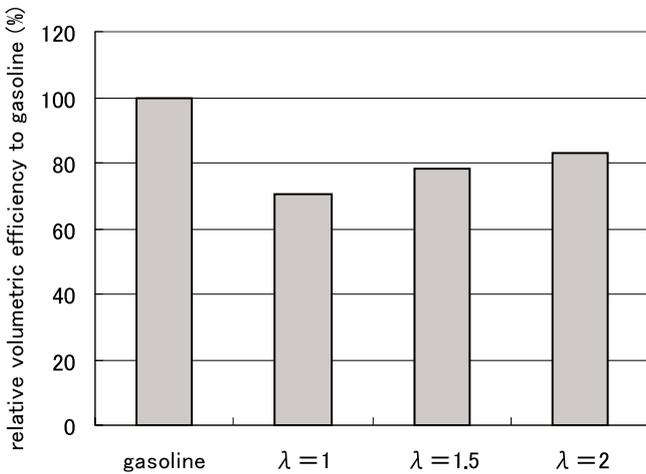


Fig.4 Comparison of Relative Volumetric Efficiency

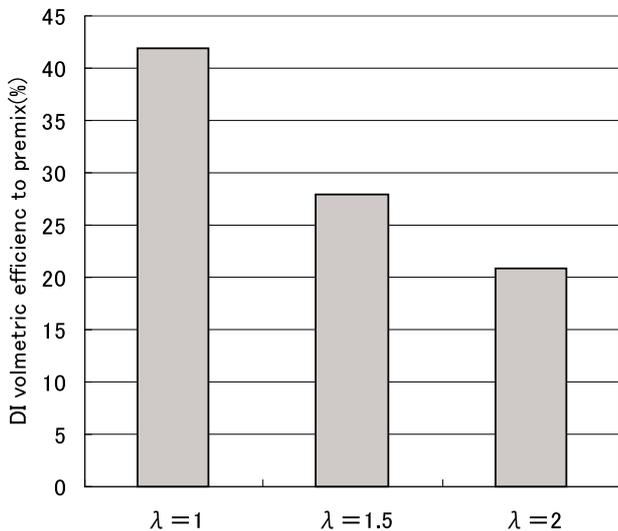


Fig.5 Effect of Volumetric Efficiency Increase with DI

Table 2 Required Total Number of Injectors (2rotors)

Engine speed(rpm)	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000
A	0.8	2.4	3.9	4.9	5.1	6.3	6.9
B	0.7	1	1	1.2	1.3	1.6	1.7

A: compression stroke

B: compression stroke+ induction stroke

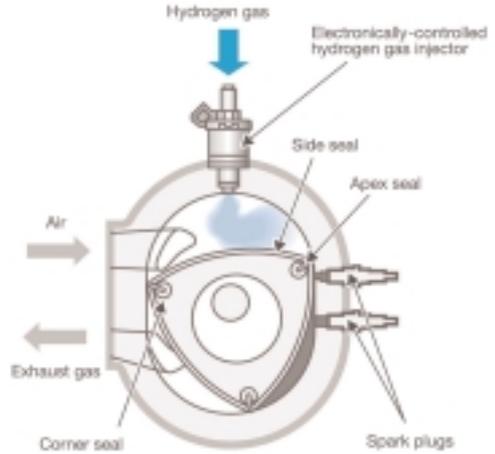


Fig.6 Schematic of RENESIS Hydrogen RE-(1)

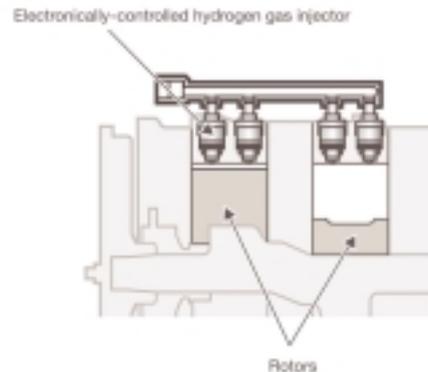


Fig.7 Schematic of RENESIS Hydrogen RE-(2)

その結果水素エンジンで課題となる出力の向上に対して有利である。

3.3 NOx低減技術

水素を内燃機関で燃焼させた場合、NOxの排出が問題となり得る。水素は、燃焼すると基本的には水が生成されるが、加えて空気中の酸素と窒素が反応しNOxが生成される。NOxを低減する手法として、 $\lambda = 1$ で運転し三元触媒により浄化する方法¹⁾、あるいは水素の広い可燃燃焼範囲を利用し超希薄燃焼でNOxの排出を低減する方法がある。Fig.8に $\lambda = 1$ とNOx排出特性を示す¹⁾。 $\lambda = 1.6$ 以上で運転すればNOxの排出量は微量である。本エンジンでは3.1節で述べたように希薄燃焼によりデュアルフューエルを実現させているので、NOx低減も希薄燃焼を基本コンセプトとした。

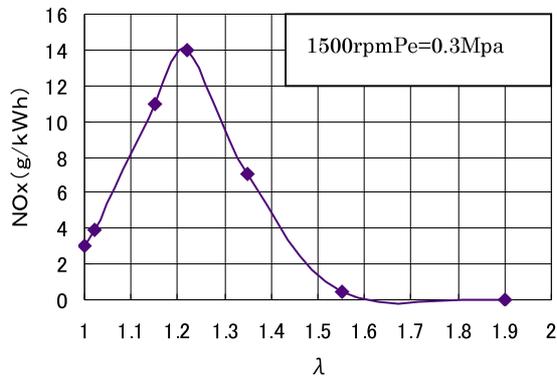


Fig.8 NOx Characteristic of Hydrogen RE⁽¹⁾

Table 3 Vehicle Main Specifications

Dimensions	Overall length	4435mm
	Overall width	1770mm
	Overall height	1340mm
	Wheelbase	2700mm
	Track: front/rear	1500mm/1505mm
	Occupancy	4persons
Engine	Type	Mazda RENESIS hydrogen rotary engine
	Maximum power	Using Gasoline : 154kW(210Ps)@7200rpm Using Hydrogen : 81kW(110Ps)@7200rpm
	Maximum torque	Using Gasoline : 222N·m/5000rpm Using Hydrogen : 120N·m/5000rpm
Fuel tank	Gasoline	61L
	Hydrogen	74L/35MPa
Transmission	Type	5MT
Suspension	Suspension system: front/rear	Double wishbone/Multi-link
Brake	Main brake system: front/rear	Ventilated disc
Tires and wheels	Tires front/rear	225/45R18
	Wheels front/rear	18 × 8JJ

4. 車両技術

RENESIS水素REを搭載し、更に燃料タンクとして高压貯蔵タンクをトランクルームに搭載した研究車両のレイアウトをFig.9に、車両諸元をTable 3に示す。車両技術として、水素貯蔵技術、燃料供給システム、安全システムについて以下に紹介する。

4.1 水素貯蔵技術

水素は密度が小さいため、その貯蔵方法が課題となる。一般的に水素燃料の貯蔵法としては、主として気体の状態で貯蔵する圧縮水素ガスタンク方式、液体の状態で貯蔵する液体水素燃料タンク方式、及び固体の状態で貯蔵する水素吸蔵合金タンク方式がある。Table 4にそれぞれの方式の特徴を示す。当該車両は国内の燃料電池自動車に使われていて、取り扱いが簡単で軽量の圧縮水素ガスタンク方式を採用した。タンクは軽量で、かつ水素ガスの透過防止に優位なTYPE3（アルミライナー + CFRPフルラップ）を採用した。内容積は74L、全長約1,000mm、外形約400mm、充填圧35MPaである。タンクの一部に元弁を配し、水素の充填、放出を行う。元弁には水素の供給、緊急遮断を行う電磁開閉弁（ノーマルクローズ）、サービス時の遮断用の手動開閉弁、タンク内のガス温度を計測する温度センサ、ライン圧を測定する圧力センサ、燃料タンクが火炎にさらされ高温、高压になった時に水素ガスを一気に放出するPRD（Pressure Release Device）が一体化されている。当該タンクは約2kgの水素を貯蔵する。この量は、エネルギー換算でガソリンの約6Lに相当し、エネルギー貯蔵量としては不十分である。水素貯蔵量の向上が今後の課題である。

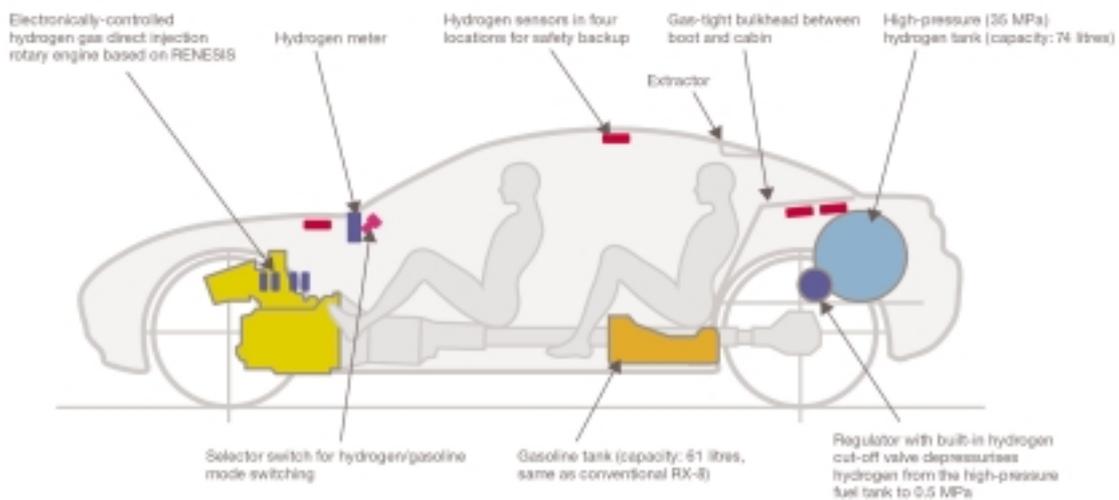


Fig.9 RX-8 Hydrogen RE Layout

Table 4 Comparisons of the Hydrogen Storage

		Compressed Hydrogen (35MPa)	Liquid Hydrogen	Metal hydride Hydrogen
※ Energy density	Weight(kcal/kg)	15	50	6
	Volume(kcal/L)	7	23	15
Feature		<ul style="list-style-type: none"> •The handling (filling etc.) is easy . •The volume 	<ul style="list-style-type: none"> •An energy density is high. •The boil off 	<ul style="list-style-type: none"> •The low temperature start and the low weight

※- Relative value when gasoline is assumed to be 100



Fig.10 High-pressure Hydrogen Tank



Fig.11 Filler Lid for Hydrogen



Fig.12 Filler Lid for Gasoline

4.2 燃料供給システム

当該車両は燃料としてガソリンと水素が使用できるデュアルフューエルシステムを実現している。高圧の水素タンクは、Fig.10に示すように、隔壁により車室と気密を保ち、外気との連通口を配したトランクルームに搭載している。水素充填口 (Fig.11) はガソリンの給燃口 (Fig.12) と反対側に設けた。充填用のレセプタクルは国内のJHFC^①で設置した水素スタンドに使われているものと互換性のある形式を採用し、5分以内で水素の充填が可能である。ガソリンの貯蔵にはベース車のガソリンタンク (61L) を流用している。

デュアルフューエルの燃料供給システムをFig.13に示す。最大35MPaの高圧水素はトランクルームに設置された圧力調整弁により0.5MPaまで減圧される。水素は、更に車室外に配置された配管、エンジンルーム内の遮断弁及びフィルタを介してエンジンに供給される。ガソリンは通常のカソリン車と同じシステムにより供給される。水素とガソリンの切り替え運転可能とするため、ガソリンに最適化したエンジン制御ユニットと水素に最適化したエンジン制御ユニットの2台を持つ。2台の制御ユニットは、運転席に設置した燃料切り替えスイッチにより、運転者が任意に切り替えられるシステムとした。

4.3 安全システム

安全対応の考え方は、1995年に大臣認定を取得した水素自動車^②で採用した手法を基本とし、高圧ガスに係わる技術要素を加味し、以下のように構築した。

(1) 後突時にタンクへのダメージを防ぐ燃料タンクの搭載位置

燃料タンクは、トランクルームに設置しているが、バンパ後端とタンクの間には、クラッシュスペースを設けた。

(2) 燃料システムの車室外配置

燃料タンクを設置したトランクルームとキャビンはエアタイトに分離すると同時に、燃料配管も車室外に配置した。

(3) 漏洩水素が滞留しない構造

ルーフには、室内の換気を行うため新たにエクストラクタを設置した。このエクストラクタにより、万が一車室内に水素が漏洩した場合でも、水素の滞留を防ぐことができる。

(4) 水素センサによる警報機能

キャビン、エンジンルーム、トランクルームに水素センサを設置した。水素センサとしては、1,500ppmで警報を鳴らす熱線式半導体センサを採用した。

(5) 緊急遮断弁の設置

タンク出口及びエンジン直近に電磁式遮断弁を設置し、緊急時には運転席に設置したキルスイッチを押すことにより瞬時に水素通路が遮断される機構とした。

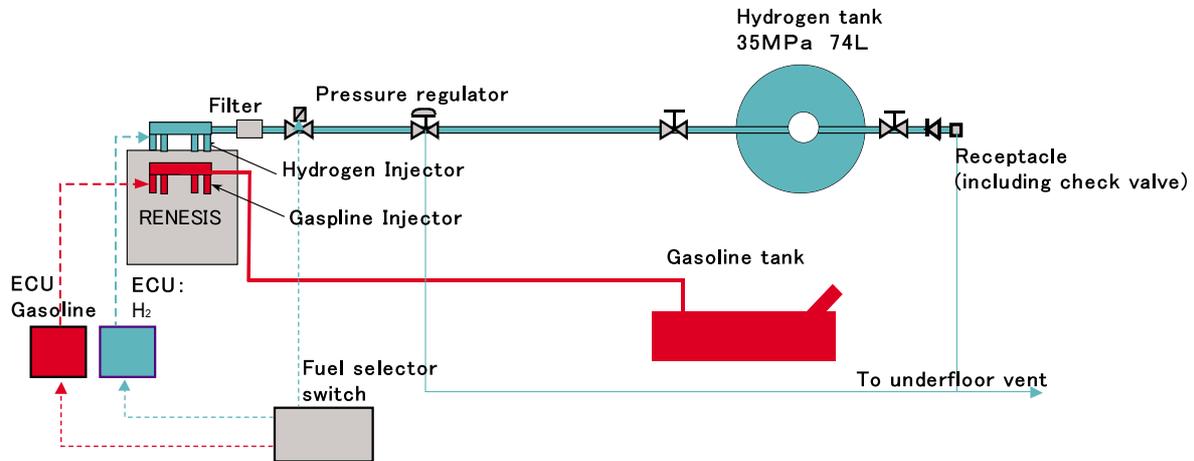


Fig.13 Fuel Supply System

5. おわりに

内燃機関の水素自動車は、燃料電池車と同様に地球環境、温暖化等の課題解決に大きく貢献できる技術である。更に、コスト、量産性の面で有利であり、また燃焼を最適に制御することでガソリンでも走行できる利点を持つ。したがって、水素インフラが十分整備されていない環境下では、水素社会への架け橋として重要な役割を果たすと認識している。更に水素社会が発達し、水素インフラも十分に整った状況下においても、内燃機関特有の軽快な走行フィーリングを持つクリーンな水素自動車として、市場の一角を占め続けるものと確信する。

参考文献

- (1) 森本 他：水素自動車の開発，マツダ技報，No.14，p.154-161（1996）
- (2) 木ノ下 他：RX-8搭載の新開発RENESIS，マツダ技報，No.21，p.11-17（2003）
- (3) 森本 他：ロータリエンジンにおける水素燃焼特性，自技会学術講演会前刷集912208（1991）
- (4) 山根：水素の物性，HESS 水素安全技術フォーラム予稿集，p.1-9（2003）

著者



森本賢治



水島善夫



定平誠二



堂園一保



内田浩康