

特集：環境

8

ノルウェー仕様のRX-8水素エンジンREの開発 Development of Norway Specification RX-8 Hydrogen RE

齊藤 智明^{*1} 桜井 茂^{*2} 赤星 英明^{*3}
Tomoaki Saito Shigeru Sakurai Hideaki Akahoshi
内田 浩康^{*4} 菅 俊也^{*5} 木ノ下 浩^{*6}
Hiroyasu Uchida Toshiya Kan Hiroshi Kinoshita

要 約

2006年にリース販売を開始したマツダRX-8水素エンジンREは、デュアルフューエルシステムを搭載し、水素とガソリンのいずれの燃料でも走行可能なことを特徴としている。また、エンジン、車両は水素インジェクタと高圧水素タンクを追加しているが、多くの部品を量産のRX-8とほぼ共通にしている。このため、従来設備での生産や市場でのサービスが可能である。

ノルウェーでは、水素社会に向けた国家プロジェクトがいくつも進行中である。その中の一つであるHyNor（ハイノール、Hydrogen Road of Norway）とマツダは、水素燃料と水素自動車の展開と開発を促進する目的で協力活動を行うことに2007年11月に同意した。

HyNorへの協力を具体化するため、国内仕様のRX-8水素エンジンREを基本とし、左ハンドル化など現地への適合と、商品性の向上のための開発を行った。

本稿では、新しく開発したノルウェー仕様のRX-8水素エンジンREについて紹介する。

Summary

Mazda RX-8 Hydrogen RE, for which commercial leasing started in 2006, features the dual-fuel system enabling the car to run on either hydrogen or gasoline. While a hydrogen injector and high-pressure hydrogen tanks are newly added, many of the parts of its engine and body are mostly common with those of the RX-8 model in production. Consequently, Mazda RX-8 Hydrogen RE can be built and serviced at existing facilities.

In Norway, various national projects aimed at building a hydrogen-energy society are underway. One of those projects, HyNor (Hydrogen Road of Norway), and Mazda agreed in November 2007 to collaborate in the development of hydrogen fuel and hydrogen vehicles.

As a specific cooperation action with HyNor, Mazda carried out the development in a bid to comply with Norwegian requirements, including the left-hand drive system, and enhance marketability, based on Japanese-spec RX-8 Hydrogen RE.

This paper describes our newly-developed Norwegian-spec RX-8 Hydrogen RE.

1. はじめに

ここ数年、地球温暖化の原因物質の一つであるCO₂の排出量の削減は、世界共通の課題となっている。

CO₂の削減は自動車メーカーの責務になっており、低燃費だけでなく、石油そのものに依存しない持続可能な社会の

形成に向けて、次世代エネルギーとして水素エネルギーが注目されている。水素エネルギーを利用する自動車には、水素から電気エネルギーを発生させて走る「燃料電池車」と水素を内燃機関で燃焼させて走る「水素自動車」の2種類がある。

マツダは、1990年からこの水素エネルギーに着目し、水

*1~4 技術研究所
Technical Research Center

*5 パワートレインシステム開発部
Powertrain System Development Dept.

*6 パワートレイン技術開発部
Powertrain Technology Development Dept.

素自動車の開発を続けてきた。2006年2月には水素ロータリエンジンを世界で初めて実用化し、「RX-8 ハイドロジェンRE」のリース販売を開始した。以来、国や地方自治体、民間企業などへ8台を納入している (Fig.1)。



Fig.1 Japan-spec RX-8 Hydrogen RE

2. ノルウェー仕様開発のねらい

国内仕様で提供しているリース車で基本技術は確立できているため、国内仕様を基本に、マニュアルトランスミッション (MT)、左ハンドル仕様に変更した上で、商品性の向上のための開発を行った。

(1) 良好な走行性を確保

トルク特性の改善, エンジン安定性の向上

(2) 極寒環境下での使用

冷間始動性, 冷間時の走行性改善

主要仕様をTable 1, に, 車両概観をFig.2に示す。

極寒環境下での課題確認のため、国内仕様のRX-8ハイドロジェンREを現地で運用し、課題を開発にフィードバックした。

Table 1 Major Spec of Hydrogen Vehicles

Items	Domestic Specification	Norway Specification
Dimension	OAL 4435mm/OAW 1770mm/OAH 1340mm	←
Seating Capacity	4 persons	←
Engine	Hydrogen rotary engine	Norway Specification
Dual-fuel system	Installed	Installed
Fuel	Hydrogen and gasoline	←
Max Power	• Hydrogen mode	80kw(109PS)
	• Gasoline mode	154kw(210PS)
Max Torque	• Hydrogen mode	140Nm(14.3kgm)
	• Gasoline mode	222Nm(22.6kgm)
Max Speed	170km/h	←
Transmission	4AT	5MT
Drive Range	• Hydrogen mode	100km
	• Gasoline mode	549km
		45km



Fig.2 Norway-spec RX-8 Hydrogen RE

3. 商品性の向上

国内仕様はオートマチックミッション (AT) であるが、現地への適合のためノルウェー仕様では5速マニュアルミッション (5MT) とした。

このため、停車からの加速性やシフトチェンジフィーリングの向上のために、エンジン本体の開発を行い、エンジントルク特性を改善した。

また、現地での利便性や安定性の向上のために、ソフトウェアの改善や追加装備を行った。

3.1 エンジントルク特性の改善

(1) トルク特性改善のための課題

水素ガスを内燃機関で燃焼させる場合、以下の3つの課題がある。

- ① 燃焼速度がガソリンに比べて速く、水素ノック音と呼ばれる燃焼音が生じる。特に、エンジン出力が高い領域で起きる。
- ② ガスのため体積あたりのエネルギー密度が低く、大流量の燃料噴射を必要とする。
- ③ 水素燃焼時は、ガソリンと同様に窒素酸化物 (NOx) が生成される。

一方で、水素混合気は燃焼範囲が広く、希薄混合、多量EGRの条件でも安定して燃焼する特徴がある。

従来の国内仕様は、これらの課題に対応した新しいエンジンシステム (Fig.3) を採用している。

このシステムの特徴としては、ロータハウジングの上方に水素ガスインジェクタを設置し、直接噴射式 (以下、直噴) としたことで、予混合用の水素インジェクタを吸気管部に設けていることと、EGRを追加したことである。

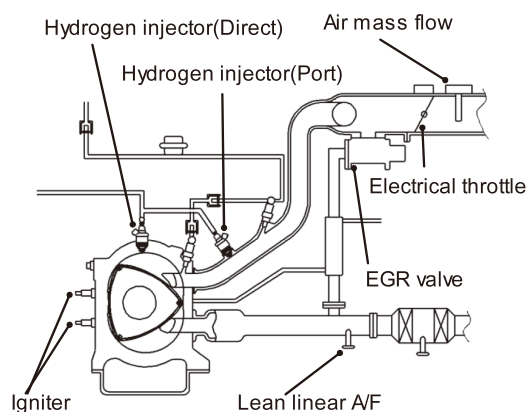


Fig.3 Hydrogen RE System

そして、Fig.4に示すようにエンジンの運転状況に応じて、直噴、予混合の噴射割合を変更して、水素と空気のみキシングをコントロールし、希薄燃焼、多量EGR下での $\lambda=1$ 燃焼を切り替えることによって、出力改善と窒素酸化物 (NOx) の低減を両立している。

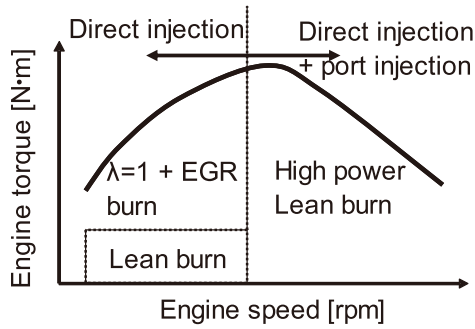


Fig.4 Hydrogen Burn Control

今回のノルウェー仕様でもこのシステムを基本的に踏襲し、以下の改善を行った。

(2) ノルウェー仕様での改善内容

国内仕様では、エンジンの中低回転域において、多量EGRを導入することで、NO_xと燃焼音を低減した。

一方で、多量EGRの導入によって、充填量の低下と吸気温度の上昇が起きる。また、ロータ表面の温度も上昇し、ヒートポイントと呼ぶ高温の部分が発生しやすくなる。

このため、水素燃料を増量すると、圧縮工程中にプリイグニッション（点火する前に自己着火する現象）という問題が発生する確率が増加するため、更なるトルクの向上が困難であった。

そこで、ノルウェー仕様では、このプリイグニッションを抑制しトルク特性を改善するため、以下の対応を行った。

- ① EGRクーラの容量UPとレイアウト変更によるEGRガス温度の低減
- ② ロータ（エンジン内部）の冷却性アップによるロータ表面のヒートポイント発生の低減

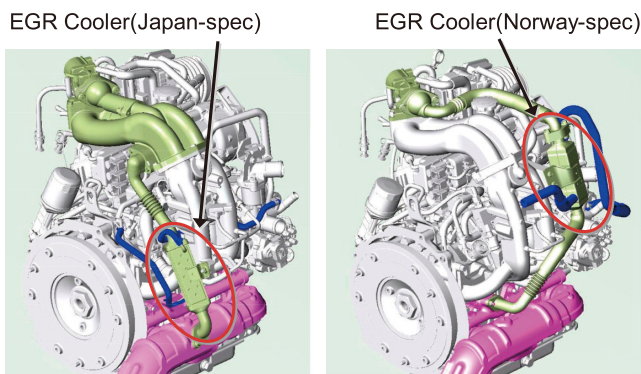


Fig.5 EGR Cooler Layout

Fig.5に変更前（左側）と、変更後（右側）のEGRクーラの位置を示す。変更前は車体と排気系の間にEGRクーラがレイアウトされているため、冷却効果が低かったが、変更後は冷却効果が改善された。

また、ロータの冷却性アップは、オイルコントロールジェット径UPと作動領域を拡大することで対策した。

これらの改善によって、プリイグニッションの抑止と、トルクの向上の両立ができた。

この結果、Fig.6のように、中低回転域のトルクを20%以上向上させたトルク特性に改善することができた。

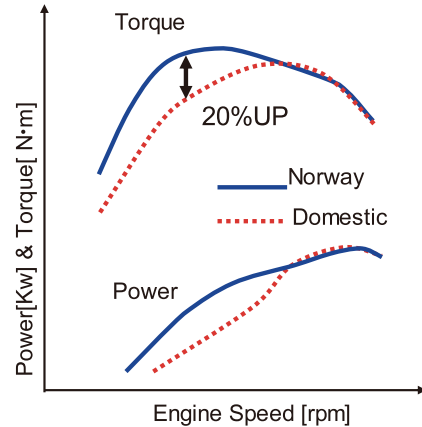


Fig.6 Improvement of Engine Torque and Power

3.2 極寒環境への対応

ノルウェーは、オスロ近郊においても-20℃も珍しくない環境であり、極冷間の機会が多い。そこで、始動性の向上のため、点火時期を最適化した。

具体的には、通常ガソリンでは、点火時期を進角させるとトルクが増大する。このため、当初は、国内仕様よりも進角側で最適化を図った。しかし、図示有効圧力を計測しながら、点火時期を大きくリタードさせた結果、国内仕様よりも更に遅角側に最適なセットがあることがわかった。

Fig.7に点火時期のみ条件を変えた結果（指圧波形）を示す。水素は、燃焼速度がガソリンと比べて速いため、TDC付近で点火した場合には、燃焼期間が短い。一方で、点火時期を大きく遅角させると、燃焼速度が低下し、長い期間燃焼し、図示有効圧力も増加する。

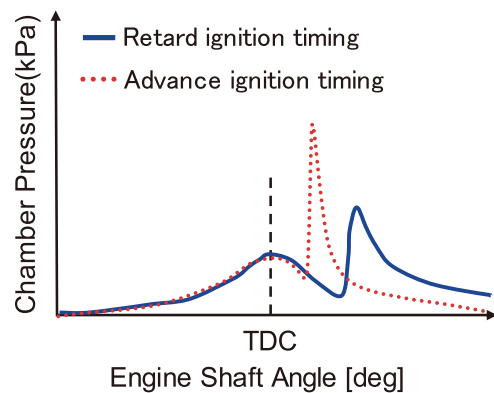


Fig.7 Impact of Ignition Timing on Hydrogen Combustion

この結果、Fig.8に示すように、従来よりも始動時のトルクを30%増加させることができ、極寒環境への対応ができた。

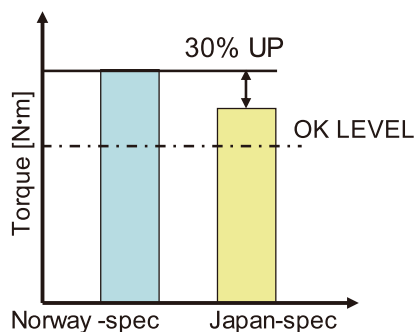


Fig.8 Torque Improvement at Engine Start

3.3 その他の改善点

(1) 給燃時の安全性の向上

ノルウェーでは、水素ステーションはセルフサービスとなっている。そこで、安全性向上の観点から、給燃中の車両の誤発進を防止するため、水素給燃口にスイッチを設け (Fig.9)、リッド開時にはエンジン始動を強制的に禁止するイモビライザシステムを追加した。

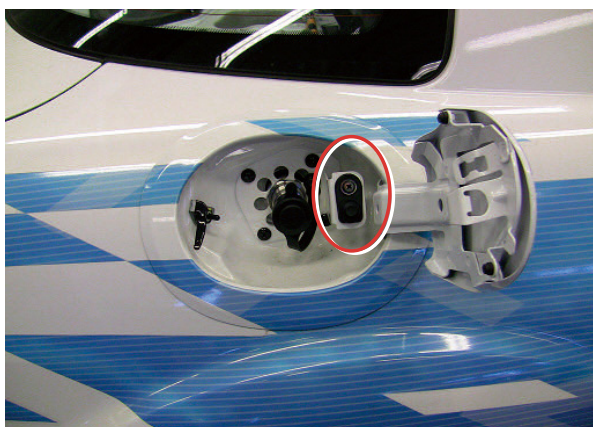


Fig.9 Immobilizer at Hydrogen Fuel Lid

(2) 左ハンドル化およびメータデザインの変更

欧州仕様のため左ハンドル化した。メータは、水素運転をメインにした配置に変更した。

具体的には、従来のガソリン残量計の位置 (右側のメータ) に水素残量計を配置し、更に、水素関係の各種ワーニングを追加した。ガソリン残量は、左側のメータに配置した。



Fig.10 Meter Layout

(3) 極寒環境での利便性向上

極寒環境では、始動性の向上とエンジン暖機のための燃料節約のため、駐車時に電気で暖めておくエンジンブロックヒータが一般的となっている。そこで、エンジンブロックヒータを取り付け、利便性を向上した。

4. 制御ソフトウェアの改善

2006年の国内仕様の開発において、Matlab/Simulink (制御系設計CADツール) を使ったモデルベース開発手法を適用したが、主に設計段階における活用であった。今回は、更に、実機検証段階に活用した。

4.1 空燃比制御のキャリブレーションの改善

空燃比制御は、目標空燃比に対して排気管に配置したλセンサで検出した実空燃比λを追従させる。実空燃比λは、燃料量と空気量で決定される。

エンジンの空燃比は、むだ時間と時定数が大きい系として知られている。このため、Fig.11に示すように実空燃比を推定するオブザーバを追加したF/Bを構成した。

この推定λが実λに近いほど、制御応答性が向上するため、推定精度の向上が重要となる。

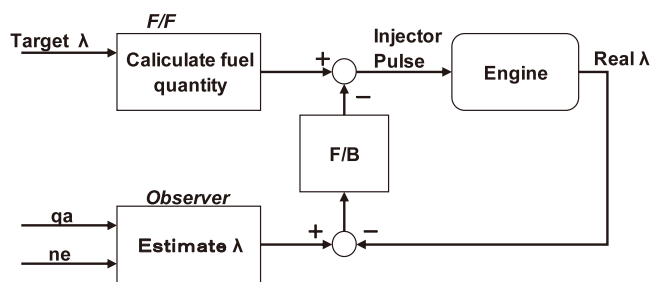


Fig.11 λ Control Block Diagram

従来の手法では、排気管の体積や、λセンサの設計上の時定数を用いて推定モデルのキャリブレーションを行っていた。しかしながら、実機の結果とずれるため、更にキャリブレーションが必要であった。

今回、効率化のため、従来実機で行っていたオブザーバのキャリブレーションを、Matlab/Simulink上で実施した。

4.2 故障診断ソフトウェアの改善

従来の故障検出に加えて、水素特有の部品の劣化を検出するソフトウェアを追加した。

故障検出に比べて劣化検出の方が、誤診断の可能性が高いため、品質確認のためのテスト項目が増加する。

そこで、従来、ECUにソフトウェアを実装後、実機で検証していたが、効率化のため、Matlab/Simulink上で検証した (Fig.12)。

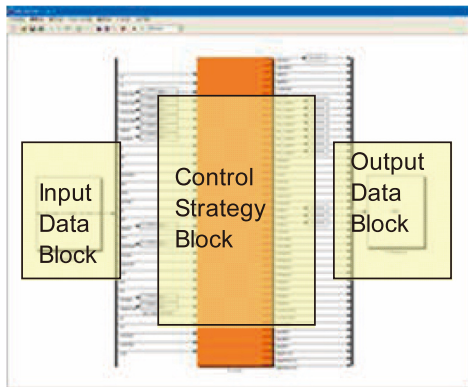


Fig.12 Diagnosis Software Test on Matlab

検証は、まず、劣化状態を模擬した入力データを作成した。次に、作成した入力データを、Matlab/Simulinkに入力してシミュレーションし、診断結果を検証した。机上で入力データを自由に生成できるため、誤判定しやすいケースの検証が容易になり、品質確認を効率化できた。

5. おわりに

本稿では、ノルウェー仕様のRX-8ハイドロジェンREを紹介した。

昨年、ノルウェーで型式認定を取得し、リースを開始している。2006年の夏にノルウェーに初めて招待されて3年半が経過したが、ノルウェーの要望に応えることができ、関係者一同うれしく思っている。

最後に、開発に協力して頂いたサプライヤ殿とHyNor、マツダモーターノルウェーの皆様に深くお礼を申し上げます。

参考文献

- (1) 柏木ほか：RX-8ハイドロジェンREの紹介，マツダ技報，NO.24，p.135-138（2006）
- (2) 齊藤ほか：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）
- (3) 齊藤ほか：水素自動車「RX-8ハイドロジェンRE」のデュアルフューエルシステム，日本機械学会 [No.09-114] 講習会教材，p.57-63（2009）

■ 著 者 ■



齊藤智明



桜井 茂



赤星英明



内田浩康



菅 俊也



木ノ下浩