

論文・解説

25 プレマシー ハイドロジェン RE レンジエクステンダーEV の開発

Development of Premacy Hydrogen RE Range Extender EV

森本 賢治*1 Kenji Morimoto	今井 一雄*2 Kazuo Imai	内田 浩康*3 Hiroyasu Uchida	堂園 一保*4 Kazuho Douzono
為貝 仁志*5 Hitoshi Tamegai	胡本 博史*6 Hirofumi Ebisumoto	野村 裕之*7 Hiroyuki Nomura	水戸部 典朗*8 Noriaki Mitobe

要約

プレマシー ハイドロジェン RE レンジエクステンダーEV は、2009 年リース販売の水素ハイブリッド車「プレマシー ハイドロジェン RE ハイブリッド」をベースとして高電圧バッテリーの大容量化、プラグイン化及びエンジン正味熱効率の改善を行った。熱効率の改善は、希薄燃焼や混合気形成の最適化などにより達成することができた。これらにより、日常の利便性向上と水素や電気などのクリーンなエネルギーで走行可能な航続距離を従来車に比べ大幅に向上させた。更に、希薄燃焼時の NOx 排出量低減のためにシリーズハイブリッドの特性を生かした排気ガス処理システムを開発した。本稿では開発の狙いと織り込み技術について紹介する。

Summary

Based on the Mazda Premacy Hydrogen RE Hybrid launched in 2009, a new Premacy Hydrogen RE Range Extender EV adapts a larger high-voltage battery, plug-in-system and a thermal-efficiency-improved engine. The thermal efficiency was improved by lean burn and optimization of mixture formation and others. Also an exhaust emission treatment system which utilizes series hybrid characteristics was developed to reduce NOx emission at the lean burn. As a result, daily usability and driving range with clean energy are significantly improved. The development purpose, technologies and results are introduced in this paper.

1. はじめに

中国、インドなど新興国での自動車の普及加速など世界の自動車の需要は増え続けている。それに伴い、自動車による環境問題、エネルギー問題がますます深刻化すると考えられる。これら諸問題への対応策として、従来の石油中心から、石油に加えて CNG や LPG、あるいはバイオ燃料、電気、水素等へのエネルギーの多様化が進むものと考えられる。そうした中で、自然エネルギーを含むさまざまな 1 次エネルギーから製造可能な水素は、電気エネルギーと並んで究極のクリーンなエネルギーとして位置づけられている。水素を燃料とする自動車では、エネルギー変換効率の高い燃料電池自動車の開発が日本を中心として積極的に進められており、2015 年には量産型の燃料電池自動車の販売開始が発表されている⁽¹⁾。一方、水素エンジンは、燃

料電池と比較してエネルギー変換効率では劣るものの、信頼性が高く比較的安価に製造可能であるため、マツダはロータリエンジン（以下 RE）をベースとした RX-8 ハイドロジェン RE を開発し 2006 年にリース販売を開始した⁽²⁾。更にシリーズハイブリッド化による車両効率を向上させたプレマシー ハイドロジェン RE ハイブリッドを開発し、2009 年にリース販売を開始した⁽³⁾。



Fig. 1 Exterior Styling

*1~8 技術研究所
Technical Research Center

そして、このたび更に諸性能を向上させたプレマシー ハイドロジェン RE レンジエクステンダーEV (Electric Vehicle) を開発した (Fig. 1)。本稿では、この車両の開発の狙い、開発技術について紹介する。

2. 開発の狙い

2.1 クリーンエネルギー航続距離の向上

プレマシー ハイドロジェン RE ハイブリッド (以下 従来車) では、水素エンジンにより走行中の燃料消費に基づく CO₂ 発生ゼロでの航続距離 200 km を達成した。本車両では、水素エンジンの熱効率の向上及びエンジン制御最適化により水素運転時の航続距離の向上を図り、更に高電圧バッテリーの大容量化とプラグイン化により、水素や電気などのクリーンなエネルギーで走行可能な航続距離 (以下クリーンエネルギー航続距離) の大幅延伸を狙いとした。具体的には、クリーンエネルギー航続距離 350 km 以上を目標とした。また、日常の走行は EV のみで走行できるように、100 km 以上の EV 走行可能距離を目標とした。なお、プラグイン化に伴い、水素と電気の両エネルギーが利用できることから水素自動車の利便性向上が果たされたため、従来車で採用していたガソリン併用システムは廃止した。

2.2 熱効率の向上と排気エミッション性能の両立

水素エンジン車は、燃料中に炭化水素 (以下 HC) が存在しないため排気エミッション (以下 EM) 上の課題は燃焼により生じるサーマル窒素酸化物 (以下 NO_x) の発生のみである。NO_x 排出量の低減技術として、空気過剰率 (以下 λ) = 1 で運転し三元触媒による浄化技術が使用されてきた⁽⁴⁾。この方法は、NO_x の浄化には極めて有効であるが $\lambda=1$ で運転する必要があるため、熱効率では希薄燃焼に劣る。そこで熱効率の向上と EM 性能を両立させるため、希薄燃焼下での NO_x を浄化するシステムを開発することを狙いとした。

3. 開発結果

3.1 クリーンエネルギー航続距離の向上

(1) 熱効率の向上

水素は内燃機関の燃料として用いる場合、Table 1 に示すように、混合気中の水素の割合が $\lambda=1$ で約 30% を占めるため、予混合で燃料を供給すると体積効率の低下を招く。

対策としては吸気行程終了後、燃料を噴射する筒内直噴方式が有効である。RE は、構造上燃焼圧力のかからない位置に直接噴射弁を設置することが可能であり、低圧での噴射が可能となる。Fig. 2 に示すように、噴射圧 0.6MPa の低圧噴射弁を長軸の位置に配置した。なお、低圧で噴射できるメリットは、特に高圧タンク

を燃料タンクとして用いる場合、低圧まで燃料を消費できることである。本開発においても、低圧直接噴射の水素 RE をベースとした⁽⁵⁾。

1) 希薄燃焼

Table 1 に示すように、水素は可燃混合気範囲が極めて広いためこの特性を活用して超希薄燃焼が可能である。希薄燃焼は $\lambda=1$ 燃焼と比較して、比熱比の上昇や燃焼温度の低下による冷却損失の減少から正味熱効率が向上する要素がある。反面希薄燃焼は、燃焼速度が低下し、等容量が低くなることや、出力が低くなることから相対的に摩擦損失の割合が増すことから正味熱効率が低下する要素もある。したがって正味熱効率 (以下 η_e) は、これらの要素がバランスした点で最大値を示す。Fig. 3 に示すように、本エンジンでは、 $\lambda=2.3\sim 2.5$ において η_e はベストとなった。

Table 1 Characteristics of Hydrogen

	H ₂	Gasoline
chemical formula	H ₂	C _{7.5} H ₁₇
Minimum Ignition Energy (mWs)	0.02	0.24
Combustible Limit (Vol %)	4-75	1.0-7.6
Adiabatic Flame Temperature at theoretical mixture (deg.C)	2045	2200
Laminar Flame velocity at theoretical mixture(cm/sec)	265	40
Volume percentage of Fuel in Mixture at theoretical mixture (Vol %)	29.53	1.7
Heat value at theoretical mixture (MJ/m ³)	2.98	3.55

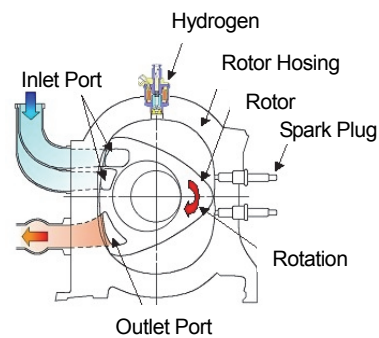


Fig. 2 Hydrogen RE

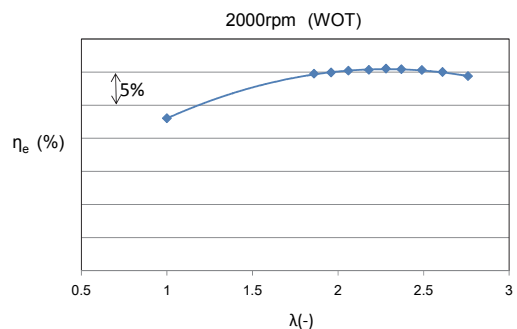


Fig. 3 Lean Characteristics of B.T.E

2) 混合気形成最適化

低圧直接噴射式エンジンでは、噴射弁の位置、噴射方向、噴射タイミング、噴射期間等多くのパラメータが影響するため、実験的に最適諸元を求めるには莫大な試作及び評価を要す。そこで、数値解析(CFD)により混合気分布の解析を行い、熱効率が最大となるインジェクタの位置、噴射方向や噴射率等の仕様を求めた⁽⁶⁾。解析の結果、燃焼に最適な混合気分布は、Fig. 4に示すように、燃焼室中央からロータ回転方向進み側にかけて水素を重点的に配置する分布であり、それは噴射方向を長軸方向から燃焼室方向に5度傾けて噴射率を従来比2倍にした仕様で実現できることが分かった。これにより従来水素REと比較して正味熱効率を4%改善した。

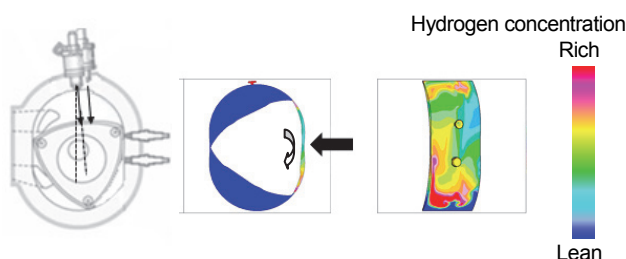


Fig. 4 Best Configuration and Distribution of Hydrogen by CFD

3) シール類最適化

ガソリンを燃料とするサイド排気ポート方式ロータリエンジンでは、内部 EGR 低減のためカットオフシールを採用している⁽⁷⁾。一方水素を燃料とした場合、着火性に優れることからカットオフシールの廃止が可能となる。カットオフシールはサイドハウジングを摺動するため、廃止により機械抵抗を低減できる。その他水素専用であるため燃焼室シールクリアランスへのカーボン付着が極微量であるため、各シールクリアランスをガソリン併用仕様と比較して小さくすることが可能である。これにより漏れ損失の低減が図れた。

以上の希薄燃焼、混合気形成最適化、シール類最適化等により、従来水素 RE と比較して 2000rpm 全負荷において、正味熱効率を 30%改善した。

(2) プラグイン化とハイブリッドシステム

1) 水素自動車プラグイン化のメリット

プラグイン化による EV 化は、クリーンな電気エネルギーによる航続距離の延伸だけでなく、水素自動車の利便性向上にも寄与する。

経産省は現在約 1400 基の急速充電器の EV スタンドを 2014 年度までに約 3 万 6000 基に拡充する計画を立てている。したがって今後大幅な EV スタンドの増加が見込まれる。また、車庫等車両保管場所でエネルギーの補給が可能であるという利便性を持つ。

一方水素ステーションは、2015 年に 4 大都市圏とそ

の間の高速道路を中心として 100 か所、2025 年に 1000 か所程度の建設が計画されているが、当面限定された地域での運用に止まる。なお、EV は充電時間が急速充電でも約 30 分必要であるのに対して水素は 5 分以下で充填が可能であるというメリットを持つ。

以上の状況を踏まえて、通常利用時は保管場所での充電により EV で運行し、一充電で走行できる距離を超えた場合には、水素ステーションのある地域では水素で運行し、水素ステーションのない地域に出かけた場合には、EV で運行するという使い方が可能となる。

2) 車両諸元とレイアウト

本車両は、シリーズ式ハイブリッドであるプレマシー ハイドロジェン RE ハイブリッドをベース車両として、高電圧バッテリーを大容量化しプラグイン化した。

Fig. 5 に車両レイアウト、Table 2 に車両諸元を示す。高電圧バッテリーはモジュール化し、バッテリーコントロールユニット、電装品と共にリヤシート下部に配置した。電池容量は、日常の走行を充電した電気による EV 走行で賄えるように、100km 以上走行可能な容量とし、また電池出力は、国内の代表的な走行モードとして JC08 を仮定し、それを EV モードで走行可能な出力とした。以上の条件を満足するバッテリーとして電池容量 20kWh、最大出力 70kW のリチウムイオンバッテリーを搭載した。

充電システムは、CHAdeMO (チャデモ) 規格に準拠した充電器による急速充電と AC200V 電源から充電を行う普通充電の 2 つの充電方式に対応した。Fig. 6 に示すように車両右側面の後方に普通充電用と急速充電用の充電口を並べて配置した。

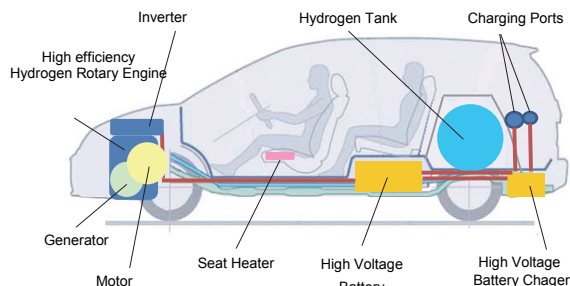


Fig. 5 Vehicle Layout

Table 2 Vehicle Specification

Size (Length×Width×Height)		4.565×1.745×1.620 m
Weight		1920 kg
Seat Capacity		5 passengers
Max Speed		150 km/hr
Driving range (JC08mode)		over 350 km
Motor	Type	AC IPM Synchronous
	Max Power	110kW
Generator	Type	AC IPM Synchronous
	Type	13B Hydrogen Rotary Engine
Engine	Displacement	0.654L × 2rotor
	Compression Ratio	10:01
	Type	Lithium-ion
High Votage Battery	Normional Volt	346V
	Capacity	20kWh
	Hydrogen Fuel Tank	150L/35MPa

Fig. 7 にメータを示す。従来車のメータからガソリン燃料計を廃止し、EV 走行で必要となる表示を追加した。EV 選択時には①が点灯し、水素選択時には②が点灯する。③、④は各々の残量計である。⑤は普通充電並びに急速充電中に点滅し充電状態であることを知らせる。パドルスイッチにより減速エネルギー回生量を、通常回生（ガソリン車のエンジンブレーキ相当の減速 G となる回生量）、強回生または回生なし（以下コースティング）の 3 段階に変更可能としている。通常回生時には⑥が点灯し、強回生時には⑦が点灯する。コースティング時には、⑥、⑦いずれも消灯する。また、回生が行われている間は⑧が点灯し回生の有無を知らせる。なお、コースティングは、高速走行中にアクセルを OFF した時の減速 G を小さくすることでアクセルの頻繁な ON-OFF を少なくする効果が期待できる。

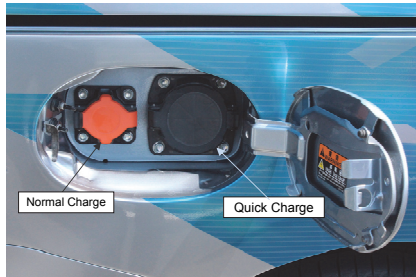


Fig. 6 Ports for Battery Charge

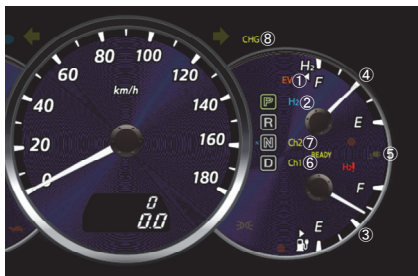


Fig. 7 Meter

3) EV とハイブリッドモード

プラグインハイブリッド車は、走行に伴いバッテリーの電力を消費する CD モード（Charge Depleting mode）とバッテリー収支をバランスさせながら走行する CS モード（Charge Sustaining mode）を持つ。一般的には前者は EV モード、後者はハイブリッドモードとも呼ばれる。

Fig. 8 にフル充電から走行時間の経過に伴う高電圧バッテリーの充電率（以下 SOC : State Of Charge）の変化を示す。IG-ON 時に、SOC が一定量（Fig. 8 中の Center of SOC at CS mode）以上ある場合には、EV モードが選択され、走行により電気が消費されて SOC が一定量に達すると自動的にハイブリッドモードに切り替わる。この一定量は、目標とする一定時間全開加速を行い SOC の維持が困難な場合にも、バッテリー出力、

信頼性を考慮した下限閾値（Fig. 8 中の Under limit）を下回らないように設定した。

また、運転席のマニュアルスイッチにより EV モードとハイブリッドモードを、任意で選択できる仕様とした。すなわち、SOC が高い状態においても、ハイブリッドモードの選択が可能であり、優先的に、水素を使用することもできる。この結果、移動経路中の EV スタンドと水素ステーション場所を考慮して、任意にエネルギーを選択できる。

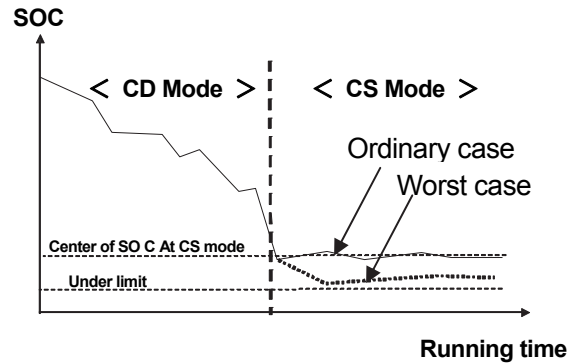


Fig. 8 Change of SOC by Driving Time

4) 発電制御法

ハイブリッドモードにおいて、電力収支バランス、熱効率、走行フィーリングの三つの要求を高い次元でバランスさせる発電制御法を開発した(8)。この制御法では、熱効率を考慮した発電量モデルにおいて電力収支と走行フィーリングとを考慮した評価関数を逐次最小化しながら目標発電量を決定するモデル予測制御法を用いた。モデル予測制御法と車速に対するエンジン始動停止条件とを組み合わせることで、三つの要求を高い次元でバランスする発電制御法を構築できた。Fig. 9 に JC08 モード走行中の熱効率分布を示す。NVH 上有利な比較的低いエンジン回転数を使用しながら、熱効率の高い領域での運転が可能となった。

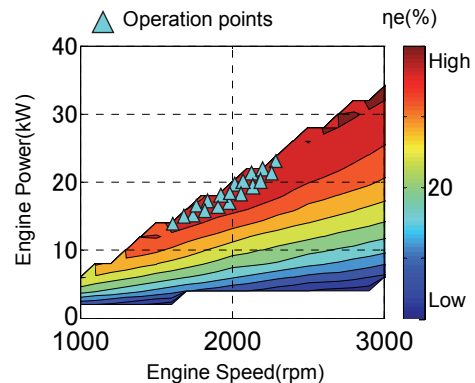


Fig. 9 Operation Points at JC08 Mode

次に、この制御の車内騒音への影響を確認した。加速初期のエンジンの吹き上がりや、所定速度以下では

エンジン回転数の上昇を抑えることで、静かで違和感のないフィーリングを実現した。車内騒音は、ベースのガソリン車比 3dB 低減を目標とした。Fig. 10 に車内騒音の測定結果を示す。EV モード及びハイブリッドモードで全域にわたり目標を達成できた。

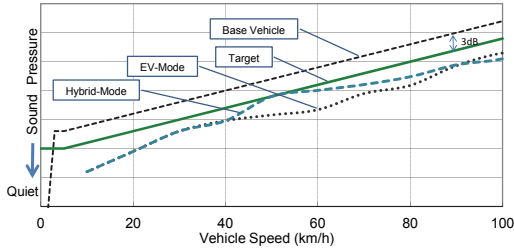


Fig. 10 Sound Pressure at Front Seats

5) 走行性

本車両はシリーズハイブリッド車なので、EV モード、ハイブリッドモード共に車両はモータにより駆動される。その結果、駆動トルクの緻密なコントロールが可能となり、Fig. 11 に示すように、ガソリン車では得られないリニアで滑らかな加速性を実現できた。

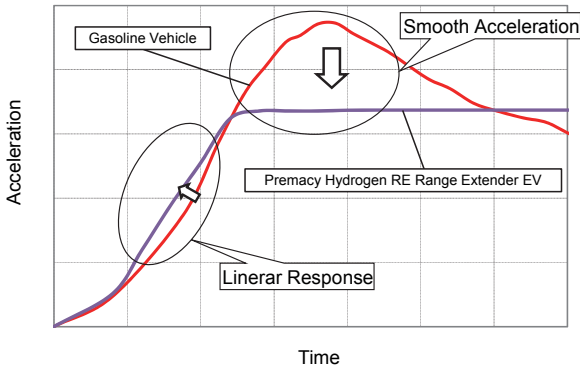


Fig. 11 Comparison of Acceleration

6) クリーンエネルギー航続距離

以上開発した水素エンジン及びハイブリッド制御による水素航続距離向上とプラグイン化による EV 航続距離のプラスにより、従来車と比較してクリーンエネルギー航続距離を大きく延伸した。Fig. 12 に1回のエネルギー補給で可能な航続距離を示す。JC08 モードで EV 航続距離は 116km、総航続距離は 350km であり、いずれも目標を達成した。

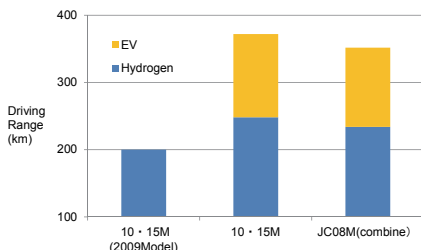


Fig. 12 Clean Driving Range

3.2 排気 EM 浄化システム開発

(1) 浄化システム

前述のように本車両では、NOx 浄化と熱効率との両立を目指し、希薄燃焼を前提として NOx の低減を図った。

まず、希薄燃焼による NOx 低減ポテンシャルを調べた。後処理は用いずに、JC08 モードを走行した。Fig. 13 左欄に現行の国内規制値、SU-LEV 適合値と共に触媒なしの測定値を示す。図に示すように希薄燃焼だけで、現行の JC08 モードの規制値 0.05g/km をクリアできるが、SU-LEV 0.013g/km には未達であった。

SU-LEV に適合するため、後処理による NOx の浄化システムを検討した。後処理としては、NOx の発生量、システムの簡便性等を考慮して、NOx 吸蔵還元触媒を採用した。これは、希薄燃焼で発生した NOx を触媒により吸蔵し、所定量蓄積後リッチ燃焼により NOx を還元 (以下リッチパージ) する手法である。しかしながらこの手法を水素エンジンに適用する場合、リッチ時に燃焼速度が速いため、特に高負荷で燃焼音が増大する。

そこで、本システムではエンジン出力と車両駆動力を独立して制御できるシリーズハイブリッドの特性を活かし、リッチパージを無負荷で行うことで、リッチ燃焼時の水素エンジン燃焼音の課題を解決した。EM システムを Fig. 14 に示す。構成は Pre-Cat (Pd/Rh+Pt) と Main-Cat (Pt/Rh) とした。

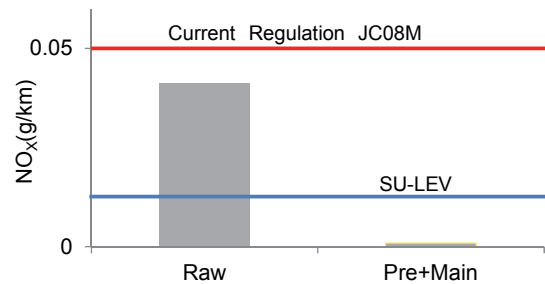


Fig. 13 NOx Emission

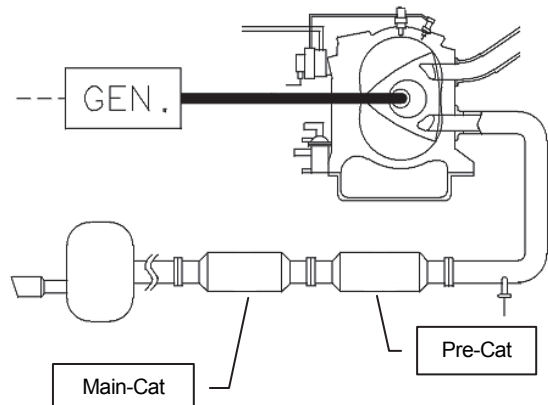


Fig. 14 Emission System

(2) 測定結果

定常走行時のリッチパージの挙動を Fig. 15 に示す。横軸は経過時間を示し、縦軸は上から、リッチパージ指示信号、エンジン回転数、充填効率、目標 λ 、実 λ 、ジェネレータトルク、モータ駆動トルクを示す。リッチパージ信号が OFF から ON になると、エンジンは、有負荷から無負荷に変更される。この間エンジン回転数は、ほぼ一定に保持されるが、充填効率は低下し、ジェネレータトルクは有負荷からゼロとなる。合わせて目標 λ はリーンからリッチに変化し、実 λ も追従して変化している。これら一連のリッチパージ制御中、モータ駆動力は一定に保持されており、ショックレスでリッチパージが実現できていることが分かる。

本システムの JC08 モードコンバインでの計測結果を Fig. 13 右欄に示す。SU-LEV 適合値より極めて低い排出レベルが得られた。

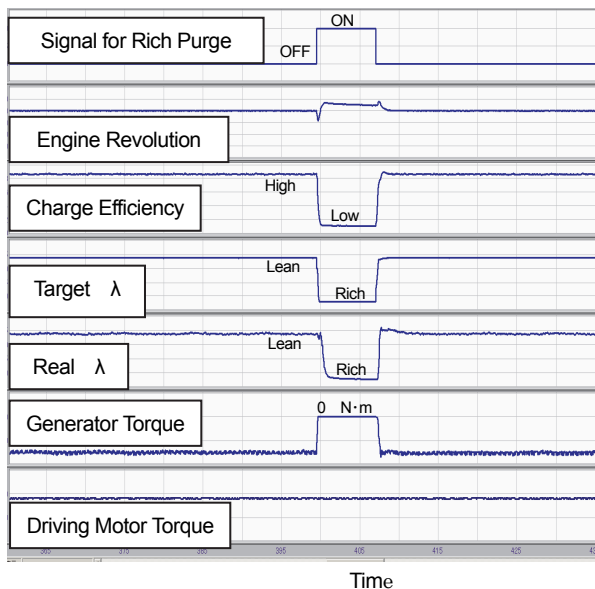


Fig. 15 Engine Behavior during Rich Purge

4. おわりに

水素、電気は究極のクリーンエネルギーであるが、インフラ整備の課題や航続距離の課題がある。これらの課題解決には今しばらく時間を要すると考えられる。今回水素を燃料とするシリーズ式ハイブリッド車をベースとして、電池を高容量化しプラグイン化することで、水素と電気の双方の弱点を補填できる環境対応車が開発できた。将来の CO2 問題や、エネルギー問題及び利便性を考慮した一つの解決策と考える。

本車両は、2013 年 1 月に認可を取得し、2013 年 6 月からリース販売を開始した。

参考文献

- (1) <http://www.meti.go.jp/press/20110113003/20110113003-1.pdf>
- (2) 柏木ほか：RX-8 ハイドロジェン RE の紹介，マツダ技報，No24，pp.135-138 (2006)
- (3) 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，pp.26-30 (2009)
- (4) 森本ほか：水素自動車の開発，マツダ技報，No14，pp.154-161 (1996)
- (5) 森本ほか：RX-8 ハイドロジェン RE の紹介，マツダ技報，No22，pp.132-138 (2004)
- (6) 大竹ほか：直接ガスエンジンの筒内混合状態に及ぼす噴射パラメーターの影響，自技会春季学術講演会，264-20135436 (2013)
- (7) 田島ほか：サイド排気ポート方式ロータリエンジンの概要，マツダ技報，No21，pp.18-23 (2003)
- (8) 大室ほか：電動車両の走行フィーリングを考慮した発電制御法，自技会春季学術講演会，35-20135070 (2013)

■ 著 者 ■



森本 賢治



今井 一雄



内田 浩康



堂園 一保



為貝 仁志



胡本 博史



野村 裕之



水戸部 典朗