

## 燃料電池電気自動車の性能測定・評価

岸 田 公 治\* ・ 三 浦 克 己\*\*

須 田 泰 之\*\* ・ 後 藤 祐 介\*\*

### A study on the performance and evaluation of a Fuel Cell Electric Vehicle

Koji Kishida, Katsumi Miura, Yasuyuki Suda and Yusuke Goto

Fuel Cell powered electric vehicles will penetrate the market in the 21st century. A small capacity vehicle of which a PEFC (polymer electrolyte fuel cell) is the prime power source was built and tested under various road conditions on the Awara campus.

This paper describes the system of the fuel cell vehicle and the main results of the drive test. The efficiency of the vehicle was thoroughly analyzed for the fuel cell and the conversion systems. The total efficiency (meter/kcal) was found to be better than the existing automobiles of same class. (The size was extrapolated.)

#### はじめに

20 世紀は、「自動車時代」すなわち車社会の時代であった。しかし、一方では、その車社会の発展の陰で、大気汚染・地球温暖化などによる社会問題が引き起された。さらに、石油資源があと 40 年程で枯渇すると言われており、それに加えて発展途上国におけるモータリゼーションの進展に伴い、石油資源の需要が増え続ける為、石油資源に代わるエネルギー源への転換が求められている。

エネルギー問題が重要課題である 21 世紀は「環境の時代」であり、「代替エネルギーの時代」と言える。燃料電池 (Fuel Cell: FC) を主電源とする燃料電池電気自動車 (Fuel Cell Electric Vehicles: FCEV) は、環境に優しい新技術と代替エネルギーを組み合わせた「クリーンエネルギー自動車」として、最も有力な新しい方式の自動車として急速に市場に展開するであろう。

本研究は、96 年に開発試作した「FCEV-MK II」を用いて、高効率 FCEV の実車製作に先立つ研究として、燃料電池電気自動車の種々の基本特性と性能を測定・評価した結果の一部を報告するものである。

---

\* 電気工学科    \*\* 電気工学科大学院生

## 1. 研究の目的

近年、大気中の二酸化炭素などの温室効果ガスによる地球温暖化現象の改善策の一つとして、ゼロ・エミッション車である電気自動車（Electric Vehicle：EV）の開発が進められているが、特に燃料電池駆動車（Fuel Cell Electric Vehicle：FCEV）が理想的な無排気車として最も有望視されている。

本研究では、本学で開発した小型の燃料電池駆動車を用いて、芦原学舎にていくつかの路面状況による走行テストを行い、車の起動時、走行中の速度変化時における水素流量の自動制御（追従性）など FCEV-MK II の性能を測定することによって、将来の実車製作に向けた基本データ

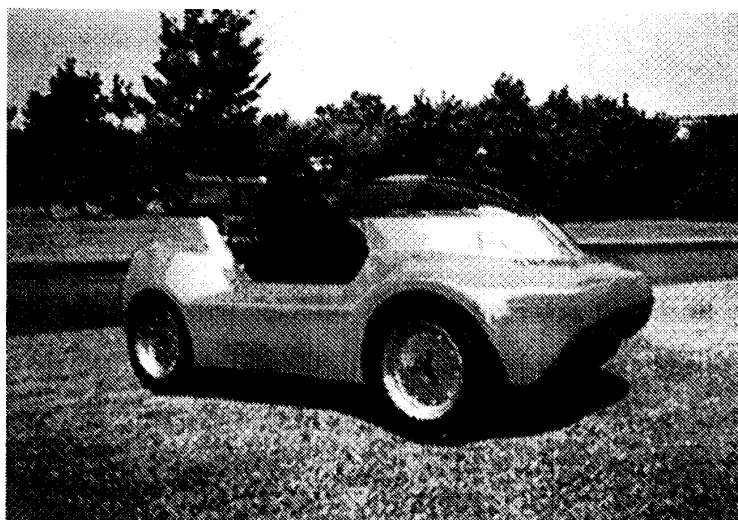


Figure 1 FCEV MK- II

の収集を行った。

Figure 1 は、テストに使用した FCEV-MK II である。

## 2. 燃料電池駆動車（FCEV-MK II）の概要

FCEV-MK II の車体に関する仕様を Table 1 に示す。また、システム構成図を Figure 2 に示す。

Table 1 FCEV-MK II 車体仕様

全 長	2.05 [m]
全 幅	1.20 [m]
全 高	0.95 [m]
車両重量（自重）	278* [kgf]
全面投影面積	1 [m <sup>2</sup> ]
車輪直径	0.4 [m]
トラクションモータ	ブラシレスDCモータ

\* 車体重量（250 [kgf]）に回転部分相当重量（28 [kgf]）を加えたものである。なお、回転部分相当重量とは、モータや車輪などの回転運動による慣性のことであり、重量に換算したものである。

FCEV-MK II のシステムは大別すると燃料電池本体、ガス供給系、加湿・冷却系および電気駆動系から構成される。

## 2. 1 ガス供給系

PEFC スタックに燃料である水素、および酸化剤である空気を供給するシステムである。水素供給系には、車の必要とする電力に見合った水素流量を、利用率一定の条件で、即応制御する流量制御器が搭載されている。

## 2. 2 加湿・冷却系

主電源である PEFC スタックの性質上、電解質を加湿させる必要があるため、小型の貯水タンクおよびポンプを用いて、PEFC スタックに温度制御された純水を供給、循環させるためのシステムが必要である。また、このシステムは、発電中のスタックの熱損失を取り除く熱除去系としての役目も兼ねている。

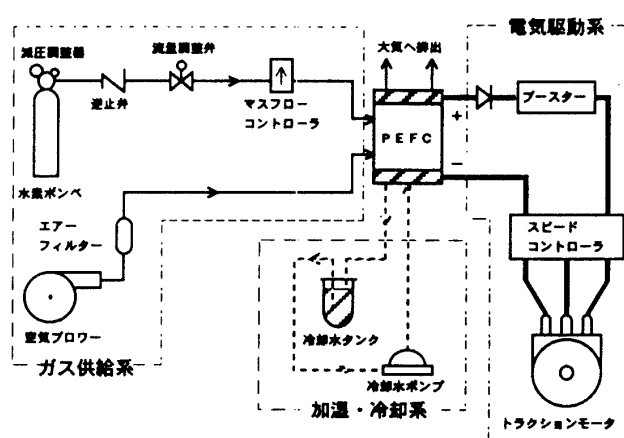


Figure 2 FCEV-MK II システム構成図

## 2. 3 電気駆動系

トラクションモータの入力電圧とスタックからの出力電圧との関係上、昇圧の必要があるため、ブースタであるバッテリーをシリーズ接続したハイブリッドシステムである。モータの型式は、同期機を用いた DC ブラシレスモータである。

## 3. 固体高分子型燃料電池 (Polymer Electrolyte Fuel Cell : PEFC)

PEFC は、電解質が固体であり、かつイオン導電性の高分子であることを特徴とする燃料電池である。常温での起動が可能なことや、他の燃料電池に比べて出力密度が高いことなどから、電気自動車用電源としての適用性において最も優れる。

### 3. 1 原理, 特徴

燃料電池とは, 燃料 (水素) と酸化剤 (空気) から電気化学反応を用いて電気エネルギーを取り出すシステムであり, 電池本体は, 電子伝導体である2つの電極と, イオン導電性をもつ電解質から構成される.

PEFC の長所および短所は以下に示すとおりである.

長所: ①高い出力密度 ( $0.6 \text{ W/cm}^2$ ) が得られ, 小型軽量化に有利である.

②室温からの起動が可能.

③電解質が固体で動作温度が低いため劣化の心配がない.

④電解質が固体であるため, 燃料/空気間の大きな差圧に耐えられる. (信頼性)

⑤電解質が固体であるため, 薄く ( $50 \mu\text{m}$ ) することが可能. (特性向上)

短所: ①電解質膜は含水しなければ, プロトン伝導性を示さない.

②動作温度が低いため排熱利用には適さない.

③CO が ppm オーダーの微量でも存在すると特性低下が早まる. (改質ガス使用時)

Figure 3 は, FCEV-MK II の主電源である PEFC スタックの側面図である. 右側に加湿部があり, ここを燃料ガスが通過することでガスが加湿され, 左側の発電部へ供給される. 発電部は単セルを 25 枚積層してスタックが構成され, 全セルは電氣的に直列に接続されている.

スタックでは, 電力に変換される際に生じる熱を冷却させるために3セルごとに冷却板を挿入している.

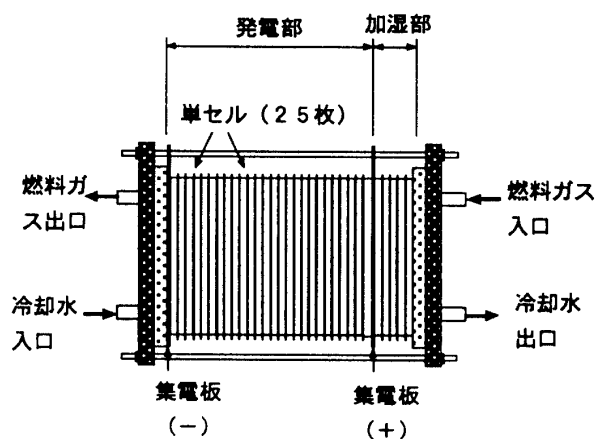


Figure 3 PEFC スタック

### 3. 2 効 率

燃料電池の総合効率 ( $\eta_{FC}$ ) は, 理想熱効率 ( $\eta_T$ ), 電圧効率 ( $\eta_V$ ) および電流効率 ( $\eta_C$ ) を乗じたもので与えられる.

$$\text{総合効率 } \eta_{FC} = \eta_T \times \eta_V \times \eta_C$$

ここに,

理想熱効率  $\eta_T$

$$\eta_T = \frac{\text{自由エネルギー変化}}{\text{水素の燃焼エンタルピー}} = \frac{\Delta G}{\Delta H_c}$$

電圧効率  $\eta_v$

$$\eta_v = \frac{\text{電池での実発生電圧}}{\text{理論開回路電圧}} = \frac{V}{E}$$

電流効率  $\eta_c$

$$\eta_c = \frac{\text{電池での発生電流}}{\text{電池本体での水素消費量に対応する理論電流}} = \frac{i}{i_f} = \text{利用率}$$

## 4. 走行性能と試験

FCEV-MKⅡの走行試験は、日本電気自動車試験法（案）、アメリカ規格（SAE J227a）、および国際規格（ITC TC69）を参考に、これらを燃料電池を電源とする場合に修正し、実施した。

### 4. 1 走行抵抗

#### （1）ころがり抵抗

自動車のころがり抵抗は、タイヤが路面をころがるときの抵抗であり、平坦な表面を走る場合、ころがり抵抗はタイヤの性質、構造および使用空気圧と荷重によってほぼ定まり、速度が増すにつれて増加することが知られている。

こころがり抵抗  $R_r$  [kgf] は、荷重を  $W$  [kgf] として、

$$R_r = \mu_r W \quad [\text{kgf}]$$

で表せると考える。

$\mu_r$  はころがり抵抗係数と呼ばれ、低速域（速度が 60km/h ぐらいまで）ではタイヤを標準空気圧で使用する場合、ほぼ定数と仮定して論ずる場合が多い。

#### （2）加速抵抗

加速抵抗とは、自動車が増速または減速しつつ走行する場合の慣性抵抗であって、減速する場合には負の値をとる。いま自動車の加速度を  $a$  [m/sec<sup>2</sup>]、総重量を  $W$  [kgf] とすると、加速抵抗  $R_a$  [kgf] は次式で表される。

$$R_a = \frac{a}{g}(1 + \phi) \cdot W \quad [\text{kgf}]$$

$$\text{ここで, } \phi = \frac{\Delta W}{W}$$

$g$ : 重力加速度 [m/sec<sup>2</sup>]

$\Delta W$ : 回転部分相当重量 [kgf]

回転部分相当量  $\Delta W$  は, モータの回転子, 車軸, 車輪などの回転運動による慣性抵抗のことで, あたかも自動車の重量がその分だけ増加したとして取扱う重量である.

### (3) 勾配抵抗

自動車がこう配角  $\alpha$  のある道路を登る場合には, 重力の路面に平行な成分がころがり抵抗として作用 ( $\mu_r \cos \alpha$ ) するのに加えて, こう配抵抗  $R_g$  が存在する.

こう配抵抗  $R_g$  [kgf] は, 次式にて表される.

$$R_g = W \cdot \sin \alpha \quad [\text{kgf}]$$

### (4) 空気抵抗

空気抵抗  $R_l$  [kgf] は, 自動車の全面投影面積を  $A$  [m<sup>2</sup>] とし, 対空気速度を  $V_a$  [km/h] とし,

$$R_l = \mu_l \cdot A \cdot V_a^2 \quad [\text{kgf}]$$

なる関係になるのが普通である.

ここで,  $\mu_l$  は空気抵抗係数と呼ばれるもので, 良好な流線形をした乗用車などでは 0.002 程度になるが, 普通は 0.003 程度となるものが多い.

## 4. 2 実験条件

### ○路 面

アスファルト面, 芝生面および勾配 5.2% のアスファルト面の 3 つについて行う.

### ○ガス利用率

空気利用率は最大負荷時において 30%, 水素利用率は 70% 一定にて行う.

### ○走行モード

静止状態からフルアクセル (15 [sec] 間) の後, フルブレーキによる静止までの 2 モードとする.

## 4. 3 実験結果

走行性能は, 発進時や定常走行時の電流・電圧値などの測定結果から, 電気的特性および走行性能について検討を行った. 走行試験結果の一例として, アスファルト (平坦) における走行結果を Figure 4 および Figure 5 に示す.

また、Table 2 は、各路面条件の走行試験結果である。

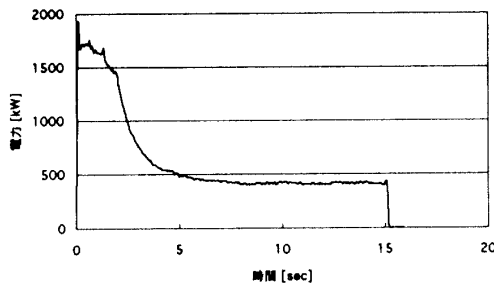


Figure 4 電力需要特性

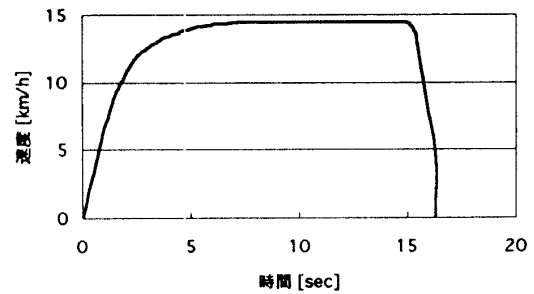


Figure 5 速度特性

Table 2 各路面状況における走行試験結果

路面状況	速度V [m/s] ( ) 内 [km/h]	初期加速度a [m/sec <sup>2</sup> ]	供給電力P [W]	起動時摩擦係数 $\mu_0$	動摩擦係数 $\mu_r$	勾配角 [°]
アスファルト平坦	4.02 (14.5)	1.8	420	0.18	0.03	
芝生	3.61 (13.0)	2.1	770	0.22	0.06	
アスファルト登坂	3.32 (12.0)	2.3	1000	0.18	0.03	

## 5. FCEV-MK II の性能評価

### 5. 1 燃料電池効率

右図に燃料電池の効率特性を示す。総合効率は利用率によって異なるが Figure 6 に見られるように、動作範囲においては 45~30% 以上の高効率での運転が可能である。

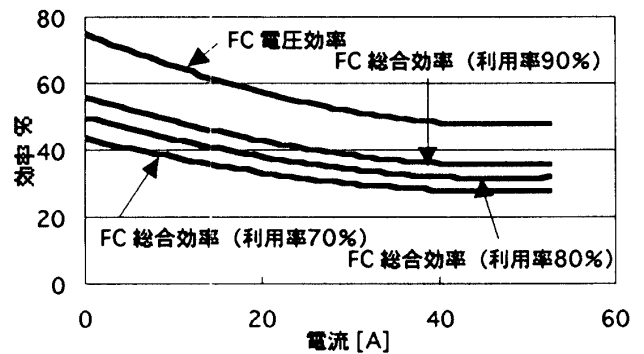


Figure 6 FC 効率特性

### 5. 2 水素流量特性

Figure 7 に、アスファルト（平坦）における時間に対する電流特性、それに対応する水素流量、および実際に流れた水素流量特性を示す。多少のオーバーシュートを許すような PID の値を設定することにより 0.4 [sec] 程度で直ちに理想流量に合致する特性が得られた。

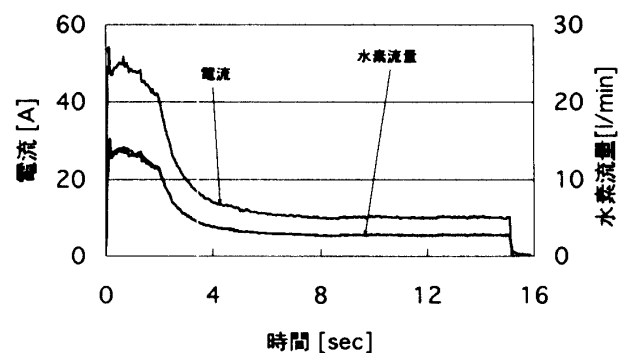


Figure 7 水素流量特性

### 5. 3 走行燃費

FCEV-MK II の走行燃費（2 モード）を水素消費量より求めると 21.6 [m/kcal] であった。実車を想定するにあたって、大型の FC を燃料利用率 90% で使用するものとして総重量 1.5 [t] とした場合、5.6 [m/kcal] となる。これは、某社ハイブリッド電気自動車 (28 [km/l]) をガソリンがもつ熱量 (7000 [kcal/l]) にて換算した 4.0 [m/kcal]、また 10 [km/l] の内燃機関

自動車 1.43 [m/kcal]と比較すると、燃料電池駆動電気自動車は、エネルギー効率の点で、より高い効率を達成できるという見通しを得た。

#### 5. 4 FCEV-MK II の効率

Table 3 に FCEV-MK II の燃料電池本体、モータ、車両およびその総合効率を示す。なお、車両効率とは、以下の式によって定義される。

$$\text{車両効率 } \eta_{EV} = \frac{\text{車の仕事率 (実測値)}}{\text{電動機の軸出力}}$$

Table 3 FCEV MK-II の効率

	FC効率 $\eta_{FC}$ [%]	モータ効率 [%]	車両効率 $\eta_{EV}$ [%]	総合効率 $\eta_{FCEV}^*$ [%]
アスファルト平坦 (加速時)	29.0	81.0	92.5	21.7
アスファルト平坦 (定常走行時)	38.0	78.0	95.1	28.2
芝生 (加速時)	29.0	84.0	75.2	18.3
芝生 (定常走行時)	31.0	85.0	93.2	24.6
アスファルト登坂 (加速時)	29.0	81.0	83.1	19.5
アスファルト登坂 (定常走行時)	30.0	86.0	94.3	24.3

\* 総合効率は、FC の燃料利用率 70% に対する値である。今後の実車では 90% が可能であり、その場合の  $\eta_{FC}$  は約 1.3 倍となる。

#### むすび

今回の FCEV-MK II による走行試験結果を要約すると、次のようになる。

- ①PEFC スタックの効率は、利用率によって異なるが、最高負荷時においても高効率（45～30%強）での運転が可能であり、FCEV の電源に適している。
- ②適切な PID の値を設定する事によって、車の起動時、走行中の速度変化時における水素流量の自動制御（追従性）は十分満足のできる結果が得られた。
- ③加速時、定常走行時の FCEV 総合効率は、路面の違いによって多少異なるが、利用率 70% において 20～30% であり、今後の実車における 90% 利用率の条件では、26～40% が期待値として得られた。

#### 参考文献

- (1) 高橋武彦：“燃料電池（第2版）”，共立出版，（1992）
- (2) 岸田公治，津村和昌，岩橋慶孝，加藤芳明：福井工業大学研究紀要 第27号，p23-29，（1997）
- (3) 岸田公治，加藤芳明，三浦克己，伊藤彰寛：福井工業大学研究紀要 第29号，p31-38，（1999）
- (4) 古浜庄一 監修：“自動車工学全書 8 電気自動車・新形原動機”，山海堂，（1980）
- (5) 平田賢 監修：“PEM 燃料電池入門”，環境新聞社，（1999）

（平成11年12月10日受理）