

燃料電池自動車における燃費計測法の開発

Development of Fuel Economy Measurement Method for Fuel Cell Vehicle

青 柳 暁*

Satoshi AOYAGI

須賀川 修**

Osamu SUKAGAWA

白 坂 卓 也*

Takuya SHIRASAKA

吉 澤 直 樹**

Naoki YOSHIZAWA

要 旨

純水素形燃料電池車における種々の燃費計測法の中から、直接的な計測法で精度も高く比較的安価に製作できる質量法の特徴に着目し、燃料供給配管内の圧力変動による測定誤差や配管内に混入する空気によって水素純度が低下するといった問題を解決することで、実用的な燃料電池自動車の燃費計測法を開発した。本開発では、世界初の市販燃料電池乗用車である Honda FCX の燃費計測を支援するとともに、同車の EPA(米国環境保護庁)で行われた世界初の燃料電池車公式認可試験に計測装置を提供した。

ABSTRACT

A practical fuel economy measurement method has been developed for fuel cell vehicles. The weight method was selected for study from among the various fuel economy measurement methods available for pure hydrogen-type fuel cell vehicles as a direct measurement method which was accurate and could be produced at a comparatively low cost. Solutions were provided to the drawbacks of measurement errors caused by pressure variations in the fuel pipes and lowered hydrogen purity due to air entering the pipes. This development project assisted in fuel economy measurements for the Honda FCX, the world's first market-ready fuel cell vehicle; it also provided measurement system for the Environmental Protection Agency (EPA) tests of the same vehicle, which resulted in the world's first confirmatory test of a fuel cell vehicle.

1. ま え が き

近年、燃料電池車の開発が加速する中で、その性能評価法についても同様な開発の加速が望まれている^{(1), (2)}。特に米国では EPA(米国環境保護庁)で行われる純水素形燃料電池車の公式認可テストに対応できるような、精度が高くかつ実用的な燃費計測法の開発が必要不可欠である⁽³⁾。

一方、ガソリン、ディーゼルエンジンなど内燃機関の燃費計測は、吸気と排気の炭素量が同じであることを利用した「カーボンバランス法」が国際標準とされており、排ガス中の炭素量を計測することで燃料消費量を知ることができるが、燃料電池車ではこのような原理が応用できず、各メーカーが独自の計測法を採用している。本開発では開発が最も望まれている純水素形燃料電池車の種々の燃費計測法を比較検討し、精度が良く汎用性に優れ比較的安価に装置を製作できる計測法の開発を試みた。

*和光基礎技術研究センター

**本田技研工業(株)

2. 開発のねらい

開発のねらいは以下の4つである。

(1)測定精度

米国の燃費計測モードである CITY と HWY において、SAE(米国自動車技術会)で定められた SAE-J2572 規格で要求される測定精度 $\pm 1\%$ を満足すること。

(2)汎用性

国内、米国において使用可能なこと。特に米国認定燃費モードのような複数のフェーズから構成されるモードにおいても、フェーズごとに燃料消費量を測定できるようにすること。

(3)製作コスト

カーボンバランス法によるガソリン車用燃費計測装置より安く、200 万円以下で製作できること。

(4)標準化

世界的に認知度の高い EPA の公式認可試験に採用され、試験結果である燃費値が公式値として認定されること。

3. 測定方式の選択

3.1. 代表的な測定方式

3.1.1. 質量法

水素燃料の質量を直接はかりで測定する手法で、ガソリン車のカーボンバランス法でもその原理が校正基準法として用いられている。誤差の発生因子が少なく、精度の良いばかりを使えば高い測定精度が期待できるが、燃料供給配管内の圧力変化による誤差が発生したり、水素タンク接続時に空気が同配管内に混入し水素純度が低下するといった問題がある。具体的には Fig. 1 に示される計測用に準備した水素タンクの質量を試験前後で測定し、その質量差から燃料消費量を測定する。燃料消費量 $W(g)$ は以下の(1)式によって算出される。

$$W = W_i - W_f \quad (1)$$

W_i : 水素タンク試験前質量(g)

W_f : 水素タンク試験後質量(g)

3.1.2. 流量法

供給燃料の流量を常に測定し積算することで燃料消費量を測定する手法である。配管内の圧力変化による誤差はないが、過渡時の精度や誤差も積算されるといった問題がある。具体的には Fig. 1 に示される流量計 1 の検出値を積算し燃料消費量 $W(g)$ は(2)式によって算出される。

$$W = \frac{\sum Q}{22.414} \times m \quad (2)$$

Q : 燃料流量(NL/sec)

m : 水素分子量 2.016(g/mol)

3.1.3. P/T 法(圧力法)

試験前後で水素タンクの圧力と温度を測定し、気体状態方程式などから燃料消費量を算出する手法である。具体的には Fig. 1 に示される圧力計と温度計から試験前後の水素タンクの圧力と温度を測定し、その変化から気体状態方程式などを使い燃料消費量を算出する。誤差の発生因子が多く配管内の圧力変化による誤差も発生する。燃料消費量 $W(g)$ は式(3)によって算出される。

$$W = \left(\frac{P_i \times V}{R \times T_i} - \frac{P_f \times V}{R \times T_f} \right) \times m \quad (3)$$

P_i : 水素タンク試験前圧力(Pa)

P_f : 水素タンク試験後圧力(Pa)

T_i : 水素タンク試験前温度(K)

T_f : 水素タンク試験後温度(K)

V : 水素タンク容量(m^3)

R : 気体定数 8.314(J/mol·K)

m : 水素分子量 2.016(g/mol)

3.1.4. 電流法

燃料電池スタックから出力される電流は発電に使われた燃料消費量に比例するという原理を用い、Fig. 1 に示される電流計の検出値を積算し燃料消費量を算出する。配管内の圧力変化による誤差も無く過渡時の精度も期待できるが、供試車両によっては、パージ水素と呼ばれる発電に使われずに排気された水素を流量法などを併用して測定する必要がある。よって流量法と同様の誤差積算やパージ水素の水分除去など課題が多い。パージ水素分を Fig. 2 に示す流量計 2 を用いて測定した場合の燃料消費量 $W(g)$ は式(4)によって算出される。

$$W = \frac{n \times m \times \sum I}{F} + \frac{\sum Q_p}{22.414} \times m \quad (4)$$

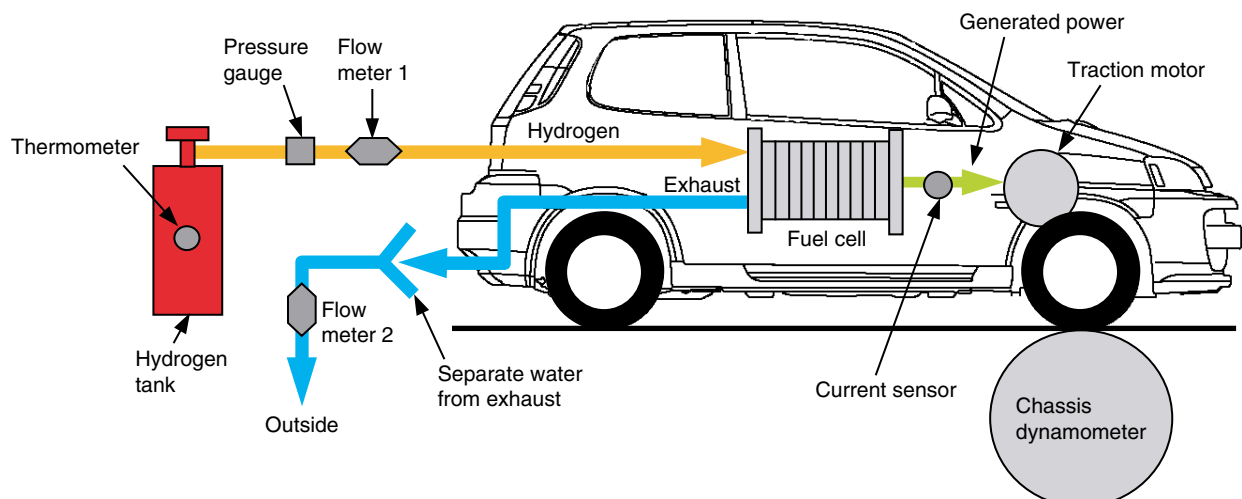


Fig. 1 Comparison of various method

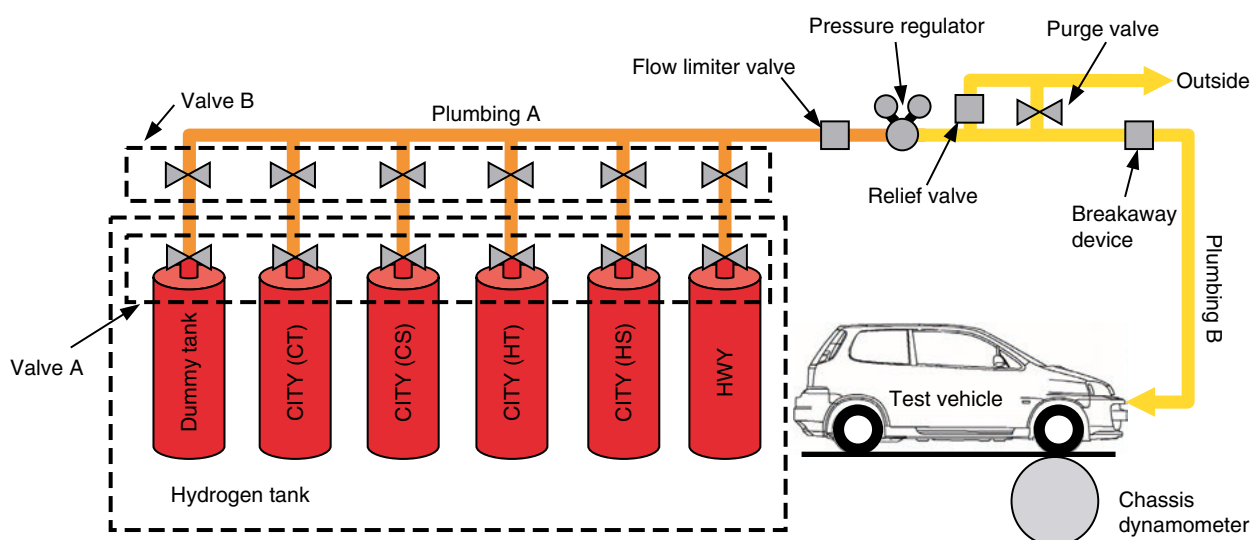


Fig. 2 Configuration of weight method system

I : 燃料電池の出力電流(A)

n : 燃料電池のセル数

F : ファラデー定数 9.64867×10^4 (C/mol)

m : 水素分子量 2.016(g/mol)

Q_p : パージ水素流量(NL/sec)

3.2. 質量法の採用

以下の理由により本開発では質量法を採用した。

- (1) 測定対象である水素を唯一直接的に測定しているため、本質的に誤差の発生因子が少ないこと。
- (2) 高精度のはかりが比較的入手しやすくなったこと。
- (3) 配管内の残留水素については対策の見通しがついたこと。

4. 測定精度

質量法の測定精度に影響する主要要因として配管内の圧力変化による誤差がある。さらに水素タンク接続時に配管内に混入する空気が水素純度を低下させるといった問題もある。これらについて以下の対策を行った。

配管内の圧力変化による誤差は Fig. 3 に示すように試験前後の圧力差によって発生するため、試験前後で配管内の圧力を一定に保てれば誤差は低減できる。そこで試験前に Fig. 2 に示すダミータンクを用いて、計測用水素タンクの水素を使わずに配管の圧力を所望の圧力まで上昇させた。さらに配管途中の水素タンクに近い場所にレギュレータを設けることで、Fig. 2 に示す配管Aの圧力変化は残るものの、配管Bでは圧力変化がなくなり誤差が低減できた。このとき加減速時も含めて供給圧力が車両側の許容最低圧力以下にならないようにレギュレータの減圧量を設定した。Honda FCX を供試車両とし供給圧力が許容最低圧力である

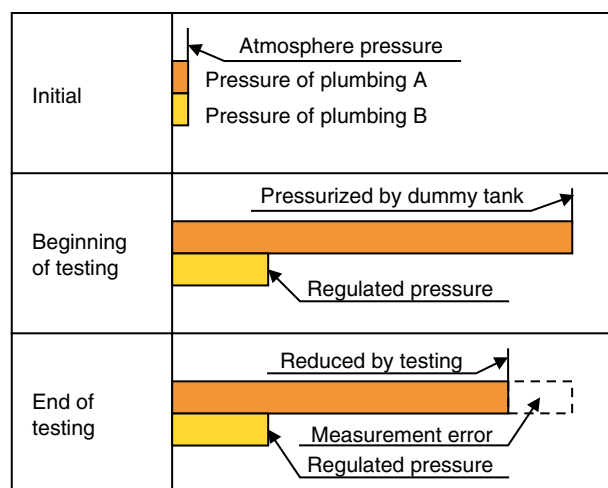


Fig. 3 Plumbing pressure and measurement error

0.7MPa 以上であることを、Fig. 4, 5 に示すように CITY 及び HWY の両モードで確認した。

ダミータンクとレギュレータを追加することで、配管内の圧力変化による測定誤差を低減し Fig. 6, 7 の効果を得た。最終的に SAE 規格で要求される測定精度 $\pm 1\%$ 以下を充分に満足することができた。CITY の各フェーズごとの測定精度についても Fig. 8 に示すように SAE 規格を満足している。それぞれの対策効果を明らかにするため、Fig. 6, 7, 8 の誤差は絶対値で示す。

燃料電池車に供給する水素燃料は、一般的に 99.99% クラスの非常に純度の高い水素が要求されるため、水素タンク接続時に配管内に混入するわずかな空気についても充分に対策しなければならない。そのため Fig. 2 に示すダミータンクの水素燃料をパージバルブから繰り返し外部放出することで、計測用水素タンクの水素を使わずにバルブ A とバルブ B 間に混入した空気を排除した。Fig. 9 にこの空気を排

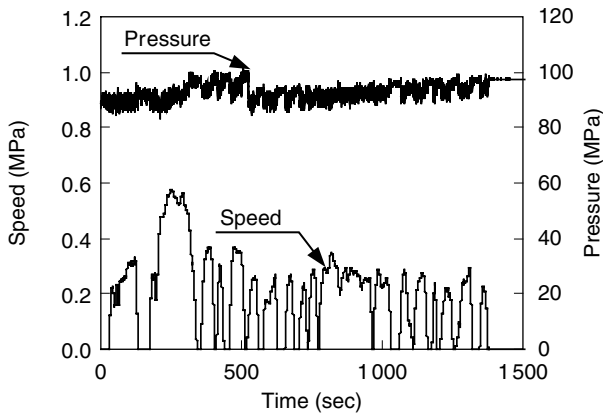


Fig. 4 Fuel supply pressure (CITY)

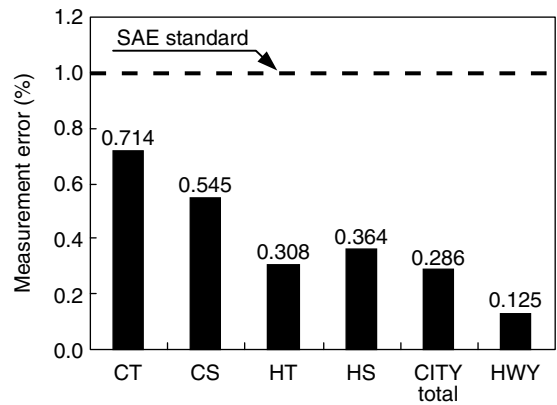


Fig. 8 Measurement error for each phase

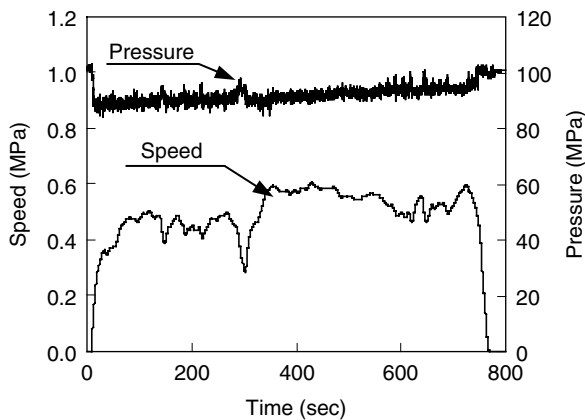


Fig. 5 Fuel supply pressure (HWY)

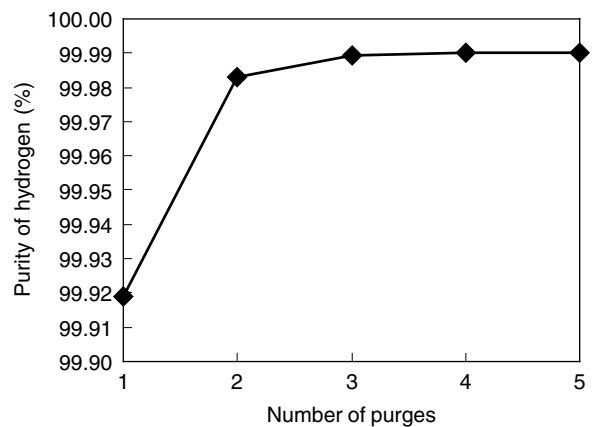


Fig. 9 Purity of hydrogen

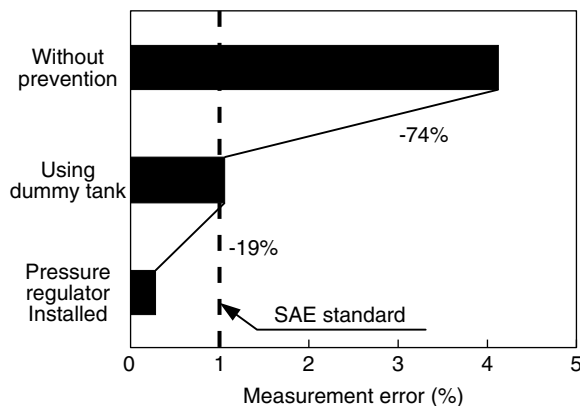


Fig. 6 Measurement error (CITY)

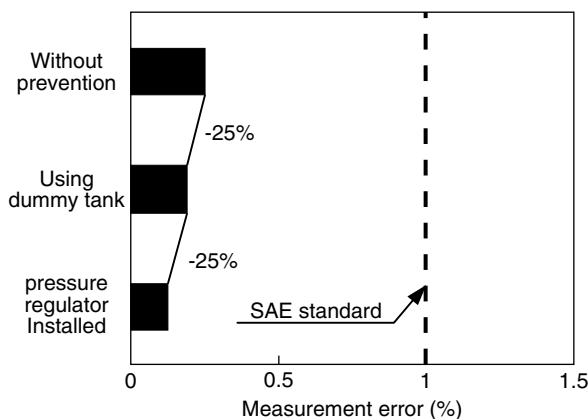


Fig. 7 Measurement error (HWY)

除する作業の回数と配管内の水素純度を示す。3回目以降は配管内の水素純度が99.99%以上となり要求精度をほぼ満足していることがわかる。

また安全性についても考慮し、配管外れ時の燃料漏れを抑制するため流量制限バルブを、レギュレータ故障時の圧力上昇異常を防止するため圧力リリーフバルブを、車両飛び出し時の燃料漏れを防止するため緊急遮断装置を Fig. 2 の配管AおよびBの途中に設けた。

5. 汎用性

水素タンクについては、Fig. 2 に示す水素タンクを接続する配管Aの高さを変えられるようにしたこと、水素タンクと一体化されているタンク元バルブのバルブAへ接続するための配管側コネクタの付替えを容易にしたことにより、国内と米国で一般的に入手可能な水素タンクを大きさを問わず計測用として使用できるようにした。

さらに Fig. 10 に示す CITY モードのような複数のフェーズから構成され、フェーズごとに燃料消費量を測定する必要がある燃費モードに対応するため、フェーズと同数の水素タンクを Fig. 2 に示す配管Aにカードル接続し、バルブBで各タンクを切り換えられるようにした。これによりフェーズごとの燃費計測が可能となった。

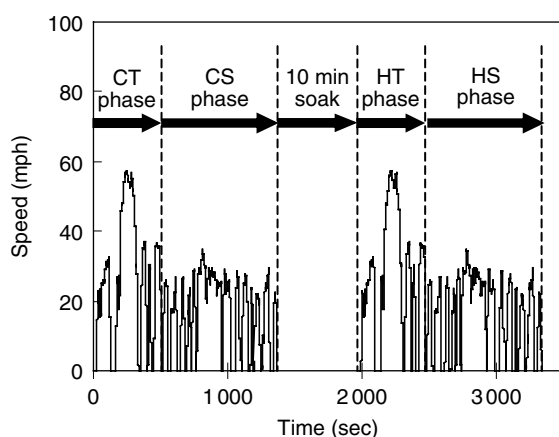


Fig. 10 Phases in CITY mode

6. 製作コスト

計測装置の諸元を Table 1 に示す。特殊な部品を使うことなく一般的に入手しやすい部品を使い、簡素に装置を構成することにより、製作コスト約 180 万円を達成した。これはガソリン車のカーボンバランス法と比較して安価に抑えられている。計測装置の実物写真を Fig. 11 に示す。

Table 1 Measurement system specifications

Type		SUK-1
Dimension	(mm)	W 2000 × D 500 × H 1940
Fuel supply pressure	(MPa)	0.9 ~ 1.0
Max. number of tank		6
Safety device		Pressure relief valve
		Flow limiter valve
		Break away device
Manufacture		A&D
Type		GP-30K
Max. mass	(g)	31 000.0
Min. mass	(g)	0.1



Fig. 11 Picture of measurement system

7. 標準化

自動車のエミッション規制を背景に、特に米国では高い水準の測定精度と再現性を燃費計測法に求めている。また EPA の公式燃費試験法に採択されることは、米国で販売される種々の車にその試験法が適用され、標準法のひとつとなることを示している。

本計測法及び計測装置の開発過程において EPA と協議を重ねることにより、標準試験法に必要な測定精度と再現性を確立することができた。その結果、本計測法及び計測装置が燃料電池車の公式試験法として EPA に採択され、2002 年に燃料電池車に対する世界初の公式燃費試験が Honda FCX に対して実施された。当該公式試験の結果を Table 2 に、またこの試験結果から算定された実用燃費値を示す燃費ラベルを Fig. 12 に示す。燃費ラベルとは、米国で販売されるすべての車両に貼付が義務づけられているもので、同国が認めたその車両の実用燃費値を示している。また Table 2 および Fig. 12 中の燃費単位は、水素燃料 1 kg あたりの走行距離 mile である。

Table 2 EPA fuel economy test result for FCX

Mode	Fuel economy (miles/kg Hydrogen)
CITY	56.8
HWY	61.7

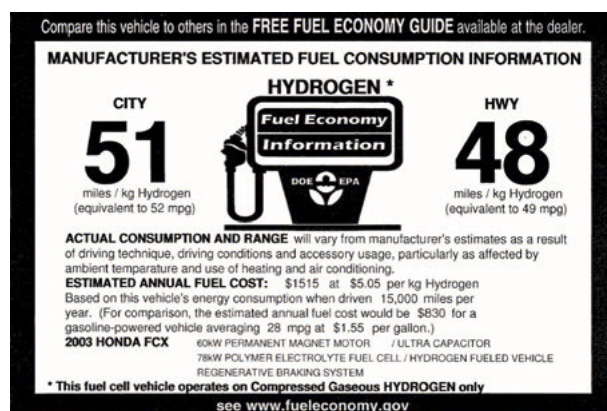


Fig. 12 EPA fuel economy label

8. まとめ

質量法の採用、測定誤差の低減、米国認定燃費モードに対応したことにより、以下の成果を得た。

- (1) 米国燃費認定モードである CITY と HWY において、測定精度は総消費燃料の 0.286%, 0.125% となり、SAE 規格である測定精度 $\pm 1\%$ 以下を十分に満足した。

- (2)国内だけでなく米国においても一般的に入手できる水素タンクを計測用として使用でき、水素タンクの切換え機構を設けることでフェーズごとの燃費測定も可能とする燃費計測装置を構築することができた。
- (3)燃費計測装置の製作コストは目標である 200 万円以下を満足する約 180 万円を達成した。これはガソリン車で使用されるカーボンバランス法を利用した燃費計測装置と比較しても安価である。
- (4)本計測法は、世界的認知度の高いEPAの公式燃費試験法に採択され、標準法のひとつとなることを示した。

謝 辞

本開発では、(株)鈴木商館をはじめ多くの関係者のご支援とご協力を頂きました。本誌面を借りて感謝いたします。

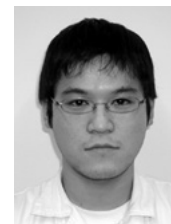
参考文献

- (1)渡辺 正五:燃料電池車の現状と将来, 自動車技術, 第 56 巻, 第 1 号, p.54-58(2002)
- (2)瀬古 俊之:代替燃料自動車の開発の現状と将来, 自動車技術, 第 53 巻, 第 5 号, p.15-20(1999)
- (3)黒田 英二ほか:水素直接形燃料電池自動車の燃費計測手法の検討, JARI Research Journal, 第24巻, 第10号, p.49-54(2002)

■ 著 者 ■



青柳 暁



白坂卓也



須賀川 修



吉澤 直樹