

# 燃料電池自動車の開発動向について

- 開発動向調査および動力システム分析 -

成澤和幸\* 林田守正\* 倉嶋大輔\*\* 室岡絢司\*\* 紙屋雄史\*\*\*

## R&D Trend Survey of Fuel Cell Vehicles

- R&D Trend Survey and Power System Structural Analysis -

by

Kazuyuki Narusawa\* Morimasa Hayashida\* Daisuke Kurashima\*\* Kenji Murooka\*\* Yushi Kamiya\*\*\*

### Abstract

Among the major issues in recent years, global warming and environmental disruption as well as depletion of fossil fuels caused by exhaust emissions from various power sources of automobiles are crucial. Then automakers are under pressure to develop a new type of vehicle equipped with a clean power source replacing the conventional internal combustion engine. The objective of our studies is to reveal a new power system achieving both higher efficiency as well as a compact and lightweight body for fuel cell (FC) vehicles which have been the focus of the world's attention as the new type of vehicle. This report covers the investigation and analysis of the R&D trend for FC vehicles (FCVs) in the world and aims at giving a direction for the future effort to design the power system. The results of the investigation are summarized as follows:

- 1) PEM fuel cells are the most suitable for vehicles by reason of high power density and easy operation.
- 2) As for fuel storage and supply, an approach based on hydrogen cylinders is advantageous to designing a more simple power system and to putting into market for the time being. Otherwise, gasoline reforming has advantage with regard to fuel supply making the best use of current infrastructure.
- 3) The hybrid FC system in combination with batteries or ultracapacitors, which is expected to achieve high efficiency, is a promising power system for urban vehicles with energy regeneration. Otherwise, single FC system is still under development because of its simple configuration and cost benefits.
- 4) As for energy storage device, the introduction of Ni-MH battery is increasing rapidly and the performance of ultracapacitors is improving these days.
- 5) As for electric motor, high performance permanent magnetic motor is progressively put into use in Japan. The induction motor is, however, often used in foreign countries for its durability and cost

---

原稿受付：平成 14 年 9 月 20 日

\* 環境エネルギー部

\*\* 国土館大学

\*\*\* 群馬大学 (環境エネルギー部客員研究員)

## 1. 燃料電池自動車の開発動向

本研究は、内燃機関自動車の代替方式として現在注目されている燃料電池自動車の開発動向を詳細に分析することを目的としている。各国において研究開発された燃料電池自動車の一覧を Table.1~ Table.3 にまとめる。合計で、33 の企業・研究開発機関における 91 車種の情報を収集した。

### 2. 開発車における燃料電池動力システムの分析

本章では、開発動向調査によって得られた燃料電池自動車の情報を分析した結果をまとめる。

#### 2.1. 自動車搭載に適した燃料電池について

開発車において搭載された各種燃料電池の特徴を Table.4(a)にまとめる。

燃料電池自動車の研究初期において試験的に搭載が試みられた方式は、当時、定置型電源システム用として研究開発が進行していたリン酸型であった。この研究によって得られたノウハウが、現在の燃料電池自動車研究へと受け継がれているわけであるが、近年、本方式に関する特別な研究は行われていない。

アルカリ型については、後述の固体高分子型と同様に高パワー密度などの特長を有することに加えて、触媒に高価な白金を必ずしも必要としないため、コスト削減の面で期待されている。しかし、電解液がアルカリ性で CO<sub>2</sub> 被毒を起こすため、燃料改質による粗製水素は利用できない。また、酸素側においても空気による酸素供給ができないため、酸素を車に搭載する必要がある。

固体高分子型については、高パワー密度、低温作動、長寿命などの優れた特性を有している。

この他にも、メタノールを直接燃料電池に供給できるダイレクトメタノール型が注目されているが、低パワー密度のため自動車搭載は難しい。

以上のことから、固体高分子型が自動車搭載用燃料電池の本命であると言える。採用件数については、Fig.1(a)に示すように、国内、国外においても多数の開発車が固体高分子型燃料電池を搭載している状況である。

#### 2.2. 燃料の貯蔵と供給の方法について

燃料電池自動車における燃料の貯蔵と供給の方法としては、水素直接貯蔵方式、ならびに炭化水素系燃料改質方式の 2 種類が存在する。各方式の特徴を Table.4(b)にまとめる。

水素直接貯蔵方式は、当然ながら水素を直接自動車に補給するため改質器が必要なく、車上のシステ

ムがシンプルになる点が最大の特長となる。また、車両からの排気もゼロエミッションと同等となるが、水素補給インフラの構築が必要となる。本方式には、圧縮水素、液体水素、水素吸蔵合金方式が存在する。圧縮水素方式については、長所としては豊富な実績があげられるが、航続距離の問題が存在する。液体水素方式については、長所として一回の燃料補給あたりの航続距離がガソリン車なみに実現できる点があげられるが、1 日あたり 1% 以上といわれるボイルオフガスの問題がある。水素吸蔵合金方式については、長所として高体積エネルギー密度のためコンパクト化が可能となる点があげられるが、実績不足であると言わざるを得ない。

炭化水素系燃料改質方式については、燃料補給ならびに補給インフラの構築が容易で、さらに航続距離が稼げる点が特長と言える。しかし、改質器の存在による車両上の容積・重量的問題や、応答性・始動性、そして不純物を含む改質ガスに起因する燃料電池発電特性悪化などの技術的な問題が存在する。

採用件数を Fig.1(b)に示す。圧縮水素貯蔵方式については、初期の研究において多く採用されていた。そのうち、メタノール改質方式のブームが 98 年ころから数年間あったため採用件数は一時ペースダウンしたものの、現在第二次ブームとなっている。これは、各自動車メーカーが公言していた実用化の時期が近づいたため、実績のあるシステムが見直されたことが理由である。これと並び、ガソリン改質方式が近年伸びはじめている。これは燃料補給インフラの面で有利なため、技術確立の後に自動車の短期間での大量普及が期待できることが理由である。これ以外の液体水素、吸蔵合金、メタノール改質方式の研究はスローペースになってきている。

#### 2.3. 動力システム構成と運転方法について

燃料電池を自動車に搭載する際、これを単独で用いる方式と、バッテリーなどの補助電源デバイスと組み合わせるハイブリッド方式が考えられる。各方式の特徴を Table.4(c)にまとめる。

単独方式は、電源が 1 系統となるためシステムがシンプルになる。しかし、回生エネルギーの再利用が不可能であり、また、特に氷結温度からの始動性や、改質方式採用時における負荷応答性に関して問題を抱えてしまう。

一方、ハイブリッド方式は、回生エネルギーの再利用が可能のため、高効率なシステムを構築できる点が特長と言える。また、自動車の始動時や、緊急

時における電力供給が補助電源より可能となるため、安全性、信頼性の面で優れた方式となる。しかし、当然ながらシステムは複雑になる。

採用件数を Fig.1(c)に示す。現状では、燃料電池単独方式とハイブリッド方式の開発数は同程度となっている。これは、総合的特性として若干劣っていることは否定できない単独方式ではあるが、システムが単純で開発が容易であるために、採用数が未だに、特に海外において伸びているためである。ハイブリッド方式における燃料電池と補助電源の容量比については、近年同比率型は減少し、逆に燃料電池主体型、燃料電池が補助的なレンジエクステンダ型の両者に明確に分類されるようになってきた。これは、開発する燃料電池自動車のコンセプト、具体的には燃料電池主体のマイルドなハイブリッドか、もしくは電気自動車の航続距離を伸ばすための補助的燃料電池システムか、が明確化してきたことが理由と考えられる。

## 2.4. 補助電源デバイスについて

燃料電池自動車においては、前項の分類のうちハイブリッド方式を採用した場合に補助電源デバイスが必要となる。各方式の特徴を Table.4(d)にまとめる。

現状では、蓄電池の単独採用が大多数である。ウルトラキャパシタについては、高充放電効率、高パワー密度、などの優れた特性が注目に値するが、高パワーの持続が困難で、さらにエネルギー密度が低いなど若干扱いにくい点も存在する。

採用件数を Fig.1(d)にまとめる。蓄電池においては、エネルギー密度、パワー密度などの特性は、鉛型、ニッケル水素型、リチウムイオン型の順で向上するわけであるが、現状ではニッケル水素型の搭載が急激に伸びている。また、ウルトラキャパシタについては、ここ数年の技術の進歩と製作コストの削減より使用法が大きく変化し、それに伴い採用件数が急激に伸び始めた。具体的には、以前は小容量のものを満充電から空の状態まで効果的に使用するために DC・DC コンバータを介して利用することがほとんどであったが、近年は、コンバータを用いることなく、燃料電池に直結することが可能になり、効率向上が図れるようになった。また、ウルトラキャパシタは蓄電池と比較して電圧変動が大きい特性を有しているが、これは燃料電池も同様であるため、直結させる場合のデバイス間の相性が良好である事も新たな採用の理由となっている。

## 2.5. 動力用モータ方式について

燃料電池自動車においても、電気自動車同様、様々な方式のモータが採用されている。各方式の特徴を Table.4(e)にまとめる。

大きく、直流モータ、交流モータに分類されるが、開発初期においては直流モータの採用が多数を占めたものの、現在では高効率・小型軽量化・高信頼性を目的とした交流モータの採用が主流である。ここで注目されるのは、交流モータのうち、国内においては小型軽量化で有利な永久磁石型同期モータが、それに対して国外では、低コスト、高信頼性の面で有利な誘導モータが、ほぼ全ての開発車において採用されており、大変興味もたれる。

採用件数を Fig.1(e)に示す。現在、同期モータにおいて更なる特性向上を目指した、同期力・リラクタンس力併用型モータや、同期モータと直流モータの長所を併せ持つブラシレス DC モータなどが、次世代の動力用モータとして検討されており、今後の研究の進展が期待される。

## 3. まとめ

本研究では、各国の燃料電池自動車の最新開発動向を調査し、種々の分析を行った。市販車は間もなく登場することと思われるが、これがいきなり内燃機関自動車に代わって爆発的に普及する事は考えにくい。現状をふまえると、燃料電池自動車の普及は段階的なものとなることが予想される。第一段階は燃料補給場所が限られるバスやタクシー、そして官公庁所有車などを対象とした圧縮水素貯蔵方式、第二段階は個人所有の乗用車を対象としたガソリン改質方式、最終的には、水素補給インフラが十分に普及した後、再び水素貯蔵方式、という具合である。これを実現するために、自動車本体ならびに燃料補給インフラの構築に関して、さらなる研究開発を推進していく必要がある。

**Table. 1 (a). Development of FCVs in North America (Part 1)**

| <b>Company name</b>                        | <b>Ballard Power Systems</b>  |  |   |   |
|--|---|--|---|---|
| <b>Type (Base vehicle)</b>                 | Bus, Phase 1 Bus  | Bus, Phase 2 Bus   | Bus, Phase 3 Bus  | Bus, Phase 4 Bus :ZEbus   |
| <b>Year of development</b>                 | 1993  | 1995   | 1997  | 1999  |
| <b>Pictures</b>                            |  |  |  |  |
| <b>Type of FC (Output)</b>                 | PEM<br>(Ballard 93kW)   | PEM<br>(Ballard 205kW)   | PEM<br>(Ballard 205kW)  | PEM<br>(Ballard 205kW)  |
| <b>Fuel storage</b>                        | Compressed H <sub>2</sub>   | Compressed H <sub>2</sub>  | Compressed H <sub>2</sub>   | Compressed H <sub>2</sub>   |
| <b>Auxiliary power unit</b>                | None  | None   | None  | None  |
| <b>FC-Auxiliary power unit power ratio</b> | 10:0  | 10:0   | 10:0  | 10:0  |
| <b>Type of motor</b>                       | DC 80kW   | AC induction 160kW   | AC induction 160kW  | AC induction  |

| <b>Company name</b>                        | <b>Energy Partners</b>   |   |  |  |
|--|--|---|--|--|
| <b>Type (Base vehicle)</b>                 | SUV, Green car   | Golf cart, Genesis  | SUV, Gator   | Passenger car (Chevy Lumina)   |
| <b>Year of development</b>                 | 1993   | 1995  | 1996   | 1997   |
| <b>Pictures</b>                            |  |  |  |  |
| <b>Type of FC (Output)</b>                 | PEM<br>(15kW)  | PEM<br>(7.5kW)  | PEM<br>(10kW)  | PEM<br>(20kW)  |
| <b>Fuel storage</b>                        | Compressed H <sub>2</sub>  | Compressed H <sub>2</sub>   | Compressed H <sub>2</sub>  | Compressed H <sub>2</sub>  |
| <b>Auxiliary power unit</b>                | Lead-acid battery (9kW)  |   |  |  |
| <b>FC-Auxiliary power unit power ratio</b> | 6:4  | 10:0  |  |  |
| <b>Type of motor</b>                       | AC synchronous 44kW  | DC 7kW  | DC 8kW   | AC induction 59kW  |

**Table. 1 (b). Development of FCVs in North America (Part 2)**

| Company name                               | Ford  |  |   |   | GM  |
|--|---|--|---|---|---|
| <b>Type (Base vehicle)</b>                 | Passenger car, P2000  | SUV, P2000SUV  | Passenger car, FC 5   | Passenger car, Focus FCV (Focus)  | Van, Six- Passenger electrovan  |
| <b>Year of development</b>                 | 1999  | 1999   | 1999  | 2000  | 1967  |
| <b>Pictures</b>                            |  |  |  |  |  |
| <b>Type of FC (Output)</b>                 | PEM (Ballard 67kW)  | PEM (Ballard)  | PEM (Ballard)   | PEM (Ballard 75kW)  | (Union Carbide 5kW)   |
| <b>Fuel storage</b>                        | Compressed H <sub>2</sub>   |  | Reformed methanol   | Compressed H <sub>2</sub>   | Liquid H <sub>2</sub>   |
| <b>Auxiliary power unit</b>                | None  |  |   | None  |   |
| <b>FC-Auxiliary power unit power ratio</b> | 10:0  |  |   | 10:0  |   |
| <b>Type of motor</b>                       | AC induction 67kW   |  |   | AC induction 67kW   |   |

| Company name                               | GM   |   |  |  |  |
|--|--|---|--|--|--|
| <b>Type (Base vehicle)</b>                 | Passenger car, Fuel Cell EV-1  | Passenger car, PRECEPT  | Pickup truck (Chevrolet S-10)  | AUTOnomy   | HY-wire  |
| <b>Year of development</b>                 | 1998   | 2000  | 2001   | 2002   | 2002   |
| <b>Pictures</b>                            |  |  |  |  |  |
| <b>Type of FC (Output)</b>                 | PEM  | PEM (GM 105kW)  | PEM (GM 25kW)  | PEM (GM 100kW)   | PEM (GM 94kW)  |
| <b>Fuel storage</b>                        | Reformed methanol  | Chemical hydride  | Reformed gasoline  |  | Compressed H <sub>2</sub>  |
| <b>Auxiliary power unit</b>                | Ni-MH battery  | None  | Battery  |  | None   |
| <b>FC-Auxiliary power unit power ratio</b> |  | 10:0  |  |  | 10:0   |
| <b>Type of motor</b>                       | AC induction 102kW   | 85kW  |  | Wheel-drive motor × 4  |  |

**Table. 1 (c). Development of FCVs in North America (Part 3)**

|  |   |   |   |
|--|---|---|---|
| <b>Company name</b>                        | Daimler Chrysler (Chrysler)   |   |   |
| <b>Type (Base vehicle)</b>                 | SUV,<br>Jeep Commander  | SUV,<br>Jeep Commander 2  | Mini van,<br>Town & Country Natrium   |
| <b>Year of development</b>                 | 1999  | 2000  | 2001  |
| <b>Pictures</b>                            |  |  |  |
| <b>Type of FC (Output)</b>                 | PEM<br>(Ballard)  | PEM<br>(Ballard)  | PEM<br>(Ballard)  |
| <b>Fuel storage</b>                        | Reformed gasoline   | Reformed methanol   | Sodium borohydride (NaBH4)  |
| <b>Auxiliary power unit</b>                | Battery   | Ni-MH battery (90kW)  | Li-Ion battery (40kW)   |
| <b>FC-Auxiliary power unit power ratio</b> |   |   |   |
| <b>Type of motor</b>                       |   | AC induction × 2  | AC 35kW   |

|  |  |  |  |
|--|--|--|--|
| <b>Company name</b>                        | International Fuel Cells   |  | Georgetown University  |
| <b>Type (Base vehicle)</b>                 | Bus,<br>Generation I Bus   | Bus,<br>Generation II Bus  | Bus,<br>Methanol Transit Bus   |
| <b>Year of development</b>                 | 1994   | 1998   | 2000   |
| <b>Pictures</b>                            |  |  |  |
| <b>Type of FC (Output)</b>                 | Phosphoric acid<br>(Fuji Electric 55kW)  | PEM<br>(IFC 110kW)   | PEM<br>(dbb 100kW)   |
| <b>Fuel storage</b>                        | Reformed methanol  | Reformed methanol  | Reformed methanol  |
| <b>Auxiliary power unit</b>                | Ni-Cd battery (60kW)   | Ni-Cd battery  | Lead-acid battery  |
| <b>FC-Auxiliary power unit power ratio</b> | 5:5  |  |  |
| <b>Type of motor</b>                       | DC 74kW  | PM 175kW   | AC induction 185.5kW   |

**Table. 2 (a). Development of FCVs in Europe (Part 1)**

| <b>Company name</b>                        | Daimler Chrysler (Daimler Benz)   |  |   |   |   |
|--|---|--|---|---|---|
| <b>Type (Base vehicle)</b>                 | Van, NECAR I (MB-100)   | Van, NECAR II (V-class)  | Bus, NEBUS  | Passenger car, NECAR 3 (A-class)  | Passenger car, NECAR 4 (A-class)  |
| <b>Year of development</b>                 | 1994  | 1996   | 1997  | 1997  | 1999  |
| <b>Pictures</b>                            |  |  |  |  |  |
| <b>Type of FC (Output)</b>                 | PEM (Ballard 50kW)  | PEM (Ballard 50kW)   | PEM (Ballard 190kW)   | PEM (Ballard 50kW)  | PEM (Ballard 70kW)  |
| <b>Fuel storage</b>                        | Compressed H <sub>2</sub>   | Compressed H <sub>2</sub>  | Compressed H <sub>2</sub>   | Reformed methanol   | Liquid H <sub>2</sub>   |
| <b>Auxiliary power unit</b>                | None  | None   | None  | None  | None  |
| <b>FC-Auxiliary power unit power ratio</b> | 10:0  | 10:0   | 10:0  | 10:0  | 10:0  |
| <b>Type of motor</b>                       | AC induction 30kW   | AC induction 33kW  | AC induction  | AC induction 33kW   | AC induction 55kW   |

| <b>Company name</b>                        | Daimler Chrysler (Daimler Benz)  |   |  |  |  |
|--|--|---|--|--|--|
| <b>Type (Base vehicle)</b>                 | Passenger car, NECAR 5 (A-class)   | Go-cart   | Passenger car, NECAR 4 Advanced (A-class)  | Van, Sprinter FC (Sprinter)  | Bus, Citaro FC (Citaro)  |
| <b>Year of development</b>                 | 2000   | 2000  | 2001   | 2001   | 2001   |
| <b>Pictures</b>                            |  |  |  |  |  |
| <b>Type of FC (Output)</b>                 | PEM (Ballard 75kW)   | Direct Methanol (3kW)   | PEM (Ballard 75kW)   | PEM (Ballard 75kW)   | PEM (Ballard 250kW)  |
| <b>Fuel storage</b>                        | Reformed methanol  | Methanol  | Compressed H <sub>2</sub>  | Compressed H <sub>2</sub>  | Compressed H <sub>2</sub>  |
| <b>Auxiliary power unit</b>                | None   | None  |  | None   |  |
| <b>FC-Auxiliary power unit power ratio</b> | 10:0   | 10:0  |  | 10:0   |  |
| <b>Type of motor</b>                       | AC induction   |   |  | AC induction   | 190kW  |

**Table. 2 (b). Development of FCVs in Europe (Part 2)**

| Company name                        | Renault   |  | Opel  |   |   |
|-------------------------------------|---|--|---|---|---|
| Type (Base vehicle)                 | Wagon (Laguna Estate)   | Mini van (Sintra)  | Mini van (Zafira)   | Mini van, HydroGen 1 (Zafira)   | Mini van, HydroGen 3 (Zafira)   |
| Year of development                 | 1996  | 1998   | 1998  | 2000  | 2001  |
| Pictures                            |  |  |  |  |  |
| Type of FC (Output)                 | PEM (De Nora 30kW)  | PEM (GM 50kW)  | PEM (GM 50kW)   | PEM (GM 120kW)  | PEM (GM 129kW)  |
| Fuel storage                        | Liquid H <sub>2</sub>   | Reformed methanol  | Reformed methanol   | Liquid H <sub>2</sub>   | Liquid H <sub>2</sub>   |
| Auxiliary power unit                | Ni-MH battery   | Battery  | Battery   | None  | None  |
| FC-Auxiliary power unit power ratio | range extender (2:8 ~ 3:7)  |  |   | 10:0  | 10:0  |
| Type of motor                       | AC synchronous  | AC induction 50kW  | AC induction 50kW   | AC induction 55kW   | AC induction 60kW   |

| Company name                        | VW   |   |  |  | ESORO  |
|-------------------------------------|--|---|--|--|--|
| Type (Base vehicle)                 | Passenger car (Golf-IV)  | Passenger car (Golf)  | Passenger car (Jetta)  | Passenger car, Bora HYPOWER (Bora)   | HyCar  |
| Year of development                 | 1997   | 2000  | 2000   | 2002   | 2001   |
| Pictures                            |  |  |  |  |  |
| Type of FC (Output)                 | PEM (Ballard 20kW)   | PEM (Ballard)   | PEM (Siemens 75kW)   | PEM (PSI 48kW)   | PEM (6.4kW)  |
| Fuel storage                        | Reformed methanol  | Reformed methanol   | Liquid H <sub>2</sub>  | Hydrogen   | Compressed H <sub>2</sub>  |
| Auxiliary power unit                | Ni-MH battery  | Battery   | Ni-MH battery  | Ultracapacitor (50kW)  | Ni-MH battery  |
| FC-Auxiliary power unit power ratio | range extender (2:8 ~ 3:7)   |   |  | 5:5  |  |
| Type of motor                       | 50kW   |   | AC induction 75kW  | AC induction 75kW  | AC induction 35kW  |

**Table. 2 (c). Development of FCVs in Europe (Part 3)**

|  |   |  |   |   |
|--|---|--|---|---|
| <b>Company name</b>                        | Ansaldo Ricerche Srl.   | PROTON MOTOR   | Neoplan   | Coval H2 Partners   |
| <b>Type (Base vehicle)</b>                 | Bus<br>(Macchi-Ansaldo city bus)  | Bus, Bayern-Bus II<br>(Neoplan MIC N8012)  | Bus,<br>Midi bus N 8008 FC  | Pickup truck  |
| <b>Year of development</b>                 | 1997  | 2000   | 1999  | 1998  |
| <b>Pictures</b>                            |  |  |  |  |
| <b>Type of FC (Output)</b>                 | PEM<br>(De Nora 45kW)   | PEM<br>(PROTON MOTOR 80kW)   | PEM<br>(De Nora 220kW)  | PEM<br>(De Nora 6.5kW)  |
| <b>Fuel storage</b>                        | Liquid H <sub>2</sub>   | Compressed H <sub>2</sub>  | Compressed H <sub>2</sub>   | Compressed H <sub>2</sub>   |
| <b>Auxiliary power unit</b>                | Lead-Acid battery   | Flywheel (100kW)   | Ni-MH battery   | Lead-Acid battery   |
| <b>FC-Auxiliary power unit power ratio</b> |   | 4:6  | 7:3   |   |
| <b>Type of motor</b>                       |   | 70kW × 4   | AC induction 45kW × 2   | 63kW  |

|  |  |   |  |  |  |
|--|--|---|--|--|--|
| <b>Company name</b>                        | Zevco  |   |  |  |  |
| <b>Type (Base vehicle)</b>                 | Utility vehicle,<br>TUG M3   | Van<br>(London Taxi)  | Utility truck<br>(Coval H2 Partners truck)   | Van<br>(Iveco delivery van)  | Van<br>(Coval delivery van)  |
| <b>Year of development</b>                 | 1998   | 1998  | 1999   | 1999   | 1999   |
| <b>Pictures</b>                            |  |  |  |  |  |
| <b>Type of FC (Output)</b>                 | 2.5kW  | Alkaline<br>(ZeTek 5kW)   | Alkaline<br>(ZeTek 5kW)  | Alkaline<br>(ZeTek 7kW)  | Alkaline<br>(ZeTek 5kW)  |
| <b>Fuel storage</b>                        |  | Compressed H <sub>2</sub> and O <sub>2</sub>  | Compressed H <sub>2</sub>  |  | Compressed H <sub>2</sub> and O <sub>2</sub>   |
| <b>Auxiliary power unit</b>                |  | Battery   |  |  | Battery  |
| <b>FC-Auxiliary power unit power ratio</b> |  | range extender  |  |  |  |
| <b>Type of motor</b>                       | Motor × 2  |   | DC 63kW  | 68kW   | DC 63kW  |

**Table. 2 (d). Development of FCVs in Europe (Part 4)**

|  |   |  |   |   |
|--|---|--|---|---|
| <b>Company name</b>                        | EUREKU  | Scania   | MAN   |   |
| <b>Type (Base vehicle)</b>                 | Bus<br>(Van Hool city bus)  | Bus,<br>Scania FC Midi City Bus  | Bus, Low floor Bus<br>(NL 163 BZ)   | Bus, Low floor Bus<br>(NL 223)  |
| <b>Year of development</b>                 | 1995  | 2001   | 1999  | 2001  |
| <b>Pictures</b>                            |  |  |  |  |
| <b>Type of FC (Output)</b>                 | Phosphoric acid<br>(Elenco 78kW)  | PEM<br>(De Nora 60kW)  | PEM<br>(Siemens 120kW)  | PEM<br>(De Nora 120kW)  |
| <b>Fuel storage</b>                        | Liquid H <sub>2</sub>   | Compressed H <sub>2</sub>  | Compressed H <sub>2</sub>   | Liquid H <sub>2</sub>   |
| <b>Auxiliary power unit</b>                | Ni-MH battery   |  |   |   |
| <b>FC-Auxiliary power unit power ratio</b> |   |  | 8:2   | 8:2   |
| <b>Type of motor</b>                       | 200kW   | 155kW  | AC induction 75kW × 2   | 75kW × 2  |

|  |  |   |  |  |
|--|--|---|--|--|
| <b>Company name</b>                        | Irisbus  | Peugeot   |  | FIAT   |
| <b>Type (Base vehicle)</b>                 | Bus  | Mini van<br>(Partner)   | Mini van<br>(Partner)  | Passenger car,<br>Seicento Fuel Cell (Seicento Elettra)                              |
| <b>Year of development</b>                 | 2001   | 2000  | 2001   | 2001   |
| <b>Pictures</b>                            |  |  |  |  |
| <b>Type of FC (Output)</b>                 | 60kW   | PEM<br>(Nuvera 30kW)  | PEM<br>(H Power 5.5kW)   | PEM<br>(7kW)   |
| <b>Fuel storage</b>                        | Compressed H <sub>2</sub>  | Compressed H <sub>2</sub>   | Compressed H <sub>2</sub>  | Compressed H <sub>2</sub>  |
| <b>Auxiliary power unit</b>                | Battery  | Ni-MH battery   | Ni-MH battery  | Lead-Acid battery  |
| <b>FC-Auxiliary power unit power ratio</b> |  |   |  |  |
| <b>Type of motor</b>                       |  | 33kW  | 36kW   | AC induction 30kW  |

**Table 3 (a). Development of FCVs in Asia (Part 1)**

| Company name                        | MAZDA   |  |   |   | TOYOTA  |
|-------------------------------------|---|--|---|---|---|
| Type (Base vehicle)                 | Cart  | Passenger car, DEMIO-FCEV (Demio)  | Passenger car, DEMIO-FCEV (Demio)   | Passenger car, PREMACY-FCEV (PREMACY)   | SUV (RAV4LV)  |
| Year of development                 | 1992  | 1997   | 1999  | 2001  | 1996  |
| Pictures                            |  |  |  |  |  |
| Type of FC (Output)                 | PEM (Ballard 7.8kW)   | PEM (MAZDA 20kW)   | PEM (Ballard 50kW)  | PEM (Ballard)   | PEM (TOYOTA 20kW)   |
| Fuel storage                        | Hydrogen-absorbing alloy  | Hydrogen-absorbing alloy   | Hydrogen-absorbing alloy  | Reformed methanol   | Hydrogen-absorbing alloy  |
| Auxiliary power unit                | None  | Ultracapacitor (20kW)  | None  | Battery   | Lead-Acid battery   |
| FC-Auxiliary power unit power ratio | 10:0  | 5:5  | 10:0  | 10:0  |   |
| Type of motor                       | DC 5.5kW  | PM 40kW  | AC synchronous 50kW   | AC induction 65kW   | PM 45kW   |

| Company name                        | TOYOTA   |   |  |  |  |
|-------------------------------------|--|---|--|--|--|
| Type (Base vehicle)                 | SUV (RAV4LV)   | SUV, FCHV-3 (KLUGER V)  | SUV, FCHV-4 (KLUGER V)   | SUV, FCHV-5 (KLUGER V)   | Bus, FCHV-BUS 1 (HINO HU2PMEE)   |
| Year of development                 | 1997   | 2001  | 2001   | 2001   | 2001   |
| Pictures                            |  |  |  |  |  |
| Type of FC (Output)                 | PEM (TOYOTA 25kW)  | PEM (TOYOTA 90kW)   | PEM (TOYOTA 90kW)  | PEM (TOYOTA 90kW)  | PEM (TOYOTA 90kW × 2)  |
| Fuel storage                        | Reformed methanol  | Hydrogen-absorbing alloy  | Compressed H <sub>2</sub>  | Reformed gasoline  | Compressed H <sub>2</sub>  |
| Auxiliary power unit                | Ni-MH battery  | Ni-MH battery (21kW)  | Ni-MH battery (21kW)   | Ni-MH battery (21kW)   | Ni-MH battery  |
| FC-Auxiliary power unit power ratio |  | 8:2   | 8:2  | 8:2  |  |
| Type of motor                       | PM 50kW  | PM 80kW   | PM 80kW  | PM 80kW  | PM 80kW × 2  |

**Table. 3 (b). Development of FCVs in Asia (Part 2)**

| <b>Company name</b>                        | <b>HONDA</b>  |  |   |   |   |
|--|---|--|---|---|---|
| <b>Type (Base vehicle)</b>                 | Passenger car, FCX-V1 (EV-Plus)   | Passenger car, FCX-V2 (EV-Plus)  | Passenger car, FCX  | Passenger car, FCX-V3 (EV-Plus)   | Passenger car, FCX-V3 (EV-Plus)   |
| <b>Year of development</b>                 | 1999  | 1999   | 1999  | 2000  | 2001  |
| <b>Pictures</b>                            |  |  |  |  |  |
| <b>Type of FC (Output)</b>                 | PEM (Ballard 60kW)  | PEM (HONDA 60kW)   | PEM (HONDA 60kW)  | PEM (Ballard 62kW)  | PEM (HONDA 70kW)  |
| <b>Fuel storage</b>                        | Hydrogen-absorbing alloy  | Reformed methanol  | Reformed methanol   | Compressed H <sub>2</sub>   | Compressed H <sub>2</sub>   |
| <b>Auxiliary power unit</b>                | Ni-MH battery   | Ni-MH battery  | Battery   | Ultracapacitor  | Ultracapacitor  |
| <b>FC-Auxiliary power unit power ratio</b> |   |  |   |   |   |
| <b>Type of motor</b>                       | PM 49kW   | PM 49kW  | PM 49kW   | PM 60kW   | PM 60kW   |

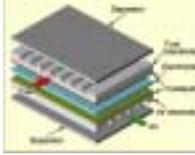
| <b>Company name</b>                        | <b>HONDA</b>   |   | <b>NISSAN</b>  |  |
|--|--|---|--|--|
| <b>Type (Base vehicle)</b>                 | Passenger car, FCX-V4 (EV-Plus)  | Passenger car, FCX (EV-Plus)  | Passenger car (R'nessa)  | SUV, Xterra-FCV (Xterra)   |
| <b>Year of development</b>                 | 2001   | 2002  | 1999   | 2000   |
| <b>Pictures</b>                            |  |  |  |  |
| <b>Type of FC (Output)</b>                 | PEM (Ballard 78kW)   | PEM (Ballard 78kW)  | PEM (Ballard 10kW)   | PEM (Ballard)  |
| <b>Fuel storage</b>                        | Compressed H <sub>2</sub>  | Compressed H <sub>2</sub>   | Reformed methanol  | Compressed H <sub>2</sub>  |
| <b>Auxiliary power unit</b>                | Ultracapacitor   | Ultracapacitor  | Li-Ion battery   | Li-Ion battery   |
| <b>FC-Auxiliary power unit power ratio</b> |  |   |  |  |
| <b>Type of motor</b>                       | PM 60kW  | PM 60kW   | PM   | PM   |

**Table. 3 (c). Development of FCVs in Asia (Part 3)**

| Company name                        | DAIHATSU  |  | FUJI-HEAVY  | TOSHIBA   |
|-------------------------------------|---|--|---|---|
| Type (Base vehicle)                 | Light passenger car, MOVE EV-FC   | Light passenger car, MOVE FCV-K-II   | Light truck (SUBARU SUMBAR EV)  | Cart  |
| Year of development                 | 1999  | 2001   | 2001  | 1999  |
| Pictures                            |  |  |  |  |
| Type of FC (Output)                 | PEM (DAIHATSU 16kW)   | PEM (TOYOTA 30kW)  | PEM (MITSUBISHI HEAVY 10kW)   | PEM (TOSHIBA 1.2kW)   |
| Fuel storage                        | Reformed methanol   | Compressed H <sub>2</sub>  | Reformed methanol   |   |
| Auxiliary power unit                | Ni-MH battery   | Ni-MH battery  |   |   |
| FC-Auxiliary power unit power ratio |   |  |   |   |
| Type of motor                       | PM 32kW   | PM 32kW  | PM 40kW   |   |

| Company name                        | MITSUBISHI   |   | Osaka National Research Institute  | HYUNDAI (Korea)  |
|-------------------------------------|--|---|--|--|
| Type (Base vehicle)                 | Passenger car, MFCV  | Passenger car, Space Liner  | Light truck  | SUV (SANTA FE)   |
| Year of development                 | 1999   | 2001  | 1972   | 2000   |
| Pictures                            |  |  |  |  |
| Type of FC (Output)                 | PEM (MITSUBISHI HEAVY 40kW)  | PEM   | Hydrazine (5.2kW)  | PEM (IFC 75kW)   |
| Fuel storage                        | Reformed methanol  |   | Liquid hydrazine   | Compressed H <sub>2</sub>  |
| Auxiliary power unit                | Li-Ion battery   |   | Lead-Acid battery (2.5kW)  | None   |
| FC-Auxiliary power unit power ratio |  |   | 7:3  | 10:0   |
| Type of motor                       | PM 40kW  | Motor × 2   | DC 5kW   | AC induction 65kW  |

**Table. 4 (a). Characteristics of Fuel Cells Installed in Previously-Developed Vehicles**

| Type  | Phosphoric Acid<br>(and others)<br> | Alkaline<br> | Proton Exchange Membrane<br> | Direct Methanol<br> |
|---|--|---|---|--|
|   |  | (FC Control Ltd)  | (Globe Tech)  | (ElectroChem)  |
| <b>Power density</b>                                  |  |   |   | ×  |
| <b>Operation at room temperature</b>                  |  |   |   |  |
| <b>Vibration/ Impact resistance</b>                   |  |   |   |  |
| <b>Life span</b>                                      |  |   |   | ×  |
| <b>Ease of fuel supply</b>                            |  | ×   |   |  |
| <b>Cost per output</b>                                |  |   |   | ×  |
| <b>Number of applicable FCVs in the world (JAPAN)</b> | 3 (2)  | 5 (0)   | 77 (27)   | 1 (0)  |

**Table. 4 (b). Characteristics of Various Fuel Storage/ Supply Approaches**

| Type  | Based on hydrogen storage  |  |  | Based on reformed hydrocarbon fuel   |  |
|---|--|--|--|--|--|
|   | Compressed H <sub>2</sub> in Cylinder<br><br>(Siemens) | Absorbing alloy<br><br>(TOYOTA) | Liquid H <sub>2</sub><br><br>(BMW) | Methanol<br><br>(TOYOTA) | Gasoline<br><br>(GM) |
| <b>System on FCVs</b>                                 |  |  |  |  | ×  |
| <b>Emissions of vehicles</b>                          |  |  |  |  | ×  |
| <b>Range</b>  | ×  |  |  |  |  |
| <b>Weight density of onboard fuel</b>                 | ×  | ×  |  |  |  |
| <b>Volume density of onboard fuel</b>                 | ×  |  |  |  |  |
| <b>Ease of refueling and infrastructure</b>           | ×  | ×  | ×  |  |  |
| <b>Fuel storage stability</b>                         | ×  |  | ×  |  |  |
| <b>Cost</b>   |  |  |  |  | ×  |
| <b>Number of applicable FCVs in the world (JAPAN)</b> | 33 (8)   | 8 (6)  | 8 (0)  | 20 (9)   | 5 (1)  |

**Table. 4 (c). Power System Configuration and Operating Procedures on Previously-Developed Vehicles**

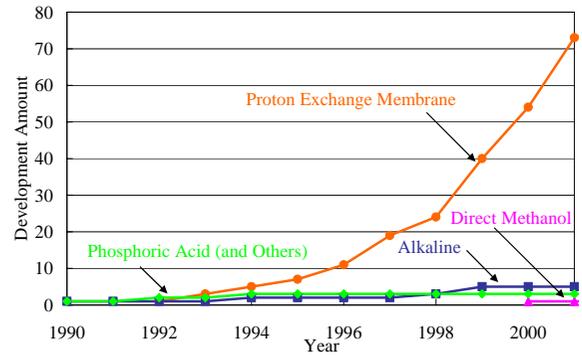
| System configuration<br>(Ratio between FC capacity and auxiliary power unit capacity)  | System based on FC only   | Hybrid system (FC and auxiliary power unit)  |   |   | without FC  |
|--|---|--|---|---|---|
|  | (10:0)  | (9:1) ~ (6:4)  | (5:5)   | (4:6) ~ (1:9)   | (0:10)  |
|  |  |  |  |  |  |
|  | (DaimlerChrysler)   | (MAN)  | (TOYOTA)  | (Zevco)   | (NISSAN)  |
| <b>Role of FC</b>  | The only power source   | Major power source   | Assisting the main power source   | Range extender  | -   |
| <b>FC operation procedures</b>   | Output is changed considerably according to the load requirement                  | Output is changed  | Only the switch is turned on and off  | always operated at the constant load (at the best efficiency point)                 | -   |
| <b>Performance/ Cost requirements for FC</b>   | High performance and low cost   | The current performance and cost level exceeds the requirement                     |   |   | -   |
| <b>Role of auxiliary power unit</b>  | -   | Absorption of regenerative energy  | Absorption and assisting the main power source                                      | The only power source   |   |
| <b>Performance/ Cost (including maintenance) requirements for auxiliary power unit</b> | -   | The current performance and cost level exceeds the requirement                     |   |   | High performance, long life and low cost  |
| <b>Characteristics</b>   | Simple system consisting of a single power source                                 | Highly efficient system capable of absorbing regenerative energy                   |   |   | Ordinary EV   |
| <b>Number of applicable FCVs in the world (JAPAN)</b>                                  | 24 (5)  | 8 (4)  | 6 (4)   | 7 (1)   | -   |

**Table. 4 (d). Characteristics of Auxiliary Power Devices**

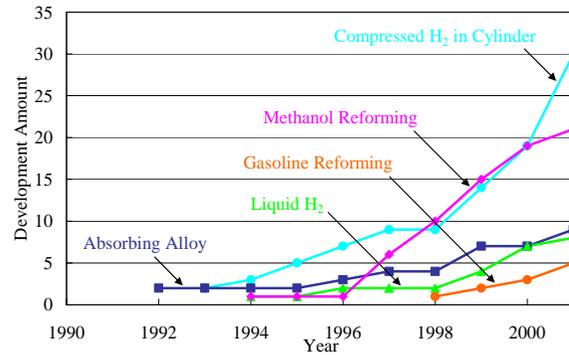
| Type  | Lead-Acid   | Battery<br>Ni-MH   | Li-Ion  | Ultracapacitor  | Others<br>(Flywheel, etc) |
|---|---|--|---|---|---------------------------|
|   |  |  |  |  |                           |
|   | (Shinkobe-Denki)  | (TOYOTA)   | (NISSAN)  | (HONDA)   |                           |
| <b>Energy density (Wh/kg)</b>                         |   |  |   | ×   | -                         |
| <b>Power density (W/kg)</b>                           |   |  |   |   | -                         |
| <b>Efficiency</b>                                     |   |  |   |   | -                         |
| <b>Life span</b>                                      |   |  |   |   | -                         |
| <b>Number of applicable FCVs in the world (JAPAN)</b> | 4 (2)   | 17 (9)   | 5 (4)   | 7 (5)   | 2 (1)                     |

**Table. 4 (e). Characteristic of Motors for Various Powers**

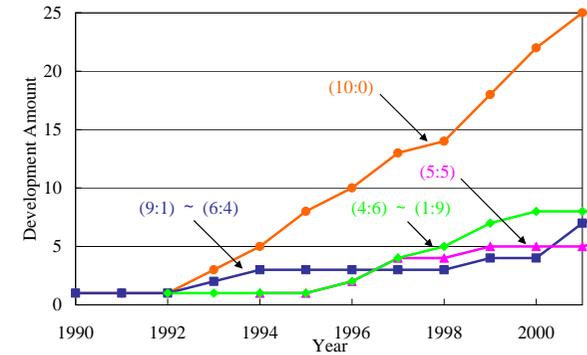
| Type  | DC Motor<br><br>(NISSAN) |            | AC Induction Motor<br><br>(ECOSTAR) |            | AC Synchronous Motor<br><br>(NISSAN) |            |
|---|--|------------|--|------------|---|------------|
|   | Motor  | Controller | Motor  | Controller | Motor   | Controller |
| <b>Power Density (Size)</b>                           | ×  |            |  | ×          |   | ×          |
| <b>Maintenance / Life Span</b>                        | ×  |            |  |            |   |            |
| <b>Efficiency</b>                                     | ×  |            |  |            |   |            |
| <b>Cost</b>   |  |            |  | ×          |   | ×          |
| <b>Number of applicable FCVs in the world (JAPAN)</b> | 10 (3)   |            | 24 (2)   |            | 24 (21)   |            |



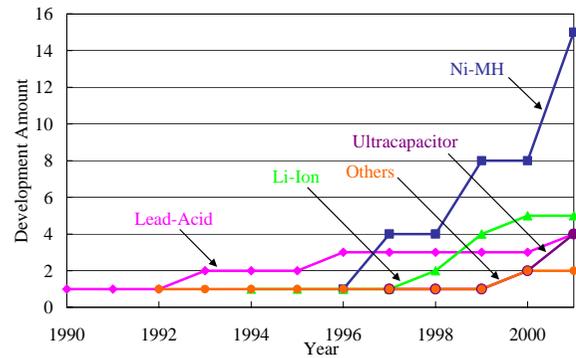
(a) Fuel Cell Types



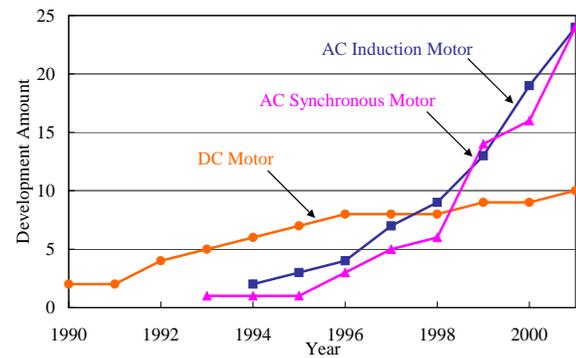
(b) Fuel Storage / Supply Approaches



(c) Power System Configuration



(d) Auxiliary Power Device Types



(e) Motor Types

Fig. 1. Annual Total of the Number of Adoption