

燃料電池車の開発状況

Present Stage of Fuel Cell-powered Automobile Development

トヨタ自動車株式会社

中 村 徳 彦 Norihiko Nakamura

1 はじめに

21世紀を迎え、次世代の自動車用原動機として、燃料電池が世界中で注目を集めているが、ここではトヨタ自動車の燃料電池車の開発状況、燃料電池から車両、燃料インフラについて説明したい。

2 燃料電池車の位置付け

図-1は環境問題に対応するトヨタの全貌を示している。ガソリン、ディーゼルエンジンの改良はもとより、天然ガス、電気自動車までの広い技術についてチャレンジしている。その中でもプリウスに代表されるハイブリッド技術は燃費向上、排気低減に大きな効果が有り、全てのパワートレーンに適用可能な技術である。トヨタではこのハイブリッド技術と燃料電池を組み合わせ、最も究極のエコカーに近い技術としてFCHV (Fuel Cell Hybrid Vehicle) を開発している。

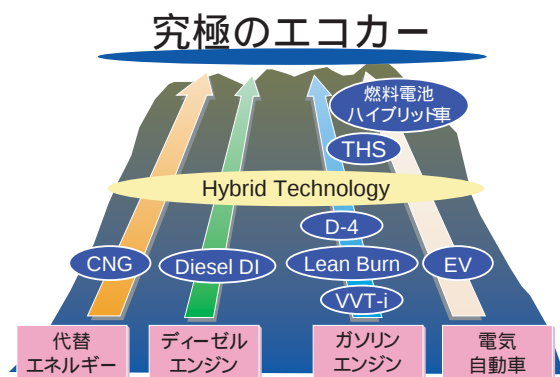


図-1 トヨタのエコカーへの取り組み
Fig.1 Toyota's concept for CO₂ reduction

3 燃料電池（種類、原理、構造）

各種燃料電池の特質を表-1に示す。燃料電池の原理は古くからグローブ卿によって発見され、効率の高さから種々の開発が進められてきたが、容積の割には出力が小さく、主として定置用として開発されてきた。しかし近年高分子膜が電解質として着目され、小型軽量化が可能

となってから応用範囲が広がり急激に発展してきた。

固体高分子形（PEM型）燃料電池は出力密度に加えて冷却水温度も従来の内燃機関に近く、熱バランスも従来の自動車に近く扱いやすいので、将来の自動車用原動機として熱い注目をあびている。

表-1 燃料電池の種類

Table 1 Types of Fuel Cells

	アルカリ形 (AFC)	固体高分子形 (PEFC)	リン酸形 (PAFC)	熔融炭酸塩形 (MCFC)	固体酸化物形 (SOFC)
電解質	KOH	高分子膜	H ₃ PO ₄	Li ₂ CO ₃ -K ₂ CO ₃	ZrO ₂
イオン導電種	OH ⁻	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻
燃料ガス	水素/酸素	改質ガス/ 空気	改質ガス/ 空気	改質ガス/ 空気	改質ガス/ 空気
運転温度	常温	80	200	650	1000
主な用途	宇宙	自動車、 ポータブル	コジェネ、 分散電源	電力事業	コジェネ、 分散電源



燃料電池自動車用に活発に研究開発中

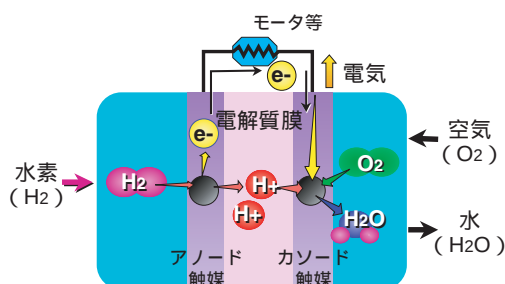
燃料電池の作動原理を図-2に示す。燃料の水素はアノード触媒上でプロトンと電子に分かれ、プロトンは薄い固体高分子の電解質膜を通してカソード側に流れる。電子は外部でモーター等を回して仕事をした後カソード側に流れる。一方カソード側には空気中の酸素が供給され、三者はカソード触媒によって反応し水を生成する。全体の反応式は水素と酸素1/2モルから水1モルが生成すると云う大変簡単な式になる。この時に得られる電気エネルギーの効率は

$$\Delta G / \Delta H = 83\% \text{ (水素の場合)}$$

ΔG : ギブスの自由エネルギー

ΔH : エンタルピー

となり、カルノーサイクルの制約を受ける事が無いので従来の熱機関に比べると著しく高い効率が可能である。又、燃焼に伴う排気ガスが生じないので、大変クリーンであるのが大きな特徴である。



1. 反応式
 アノード: $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$
 カソード: $\frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$
 全 体: $\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$

2. 理論効率 $\Delta G/\Delta H = 83\%$ (水素)

図-2 燃料電池の作動原理

Fig.2 Principles of Fuel Cell Operation

図-3はPEM型燃料電池の構造を示したものである。電解質膜と触媒は2枚のセパレータによって挟まれている。各々のセパレータには水素の通路と空気の通路が切っており、ガスの拡散と反応で生成した水の排出を行っている。この1組の燃料電池をセルと呼んでいる。1セルの出

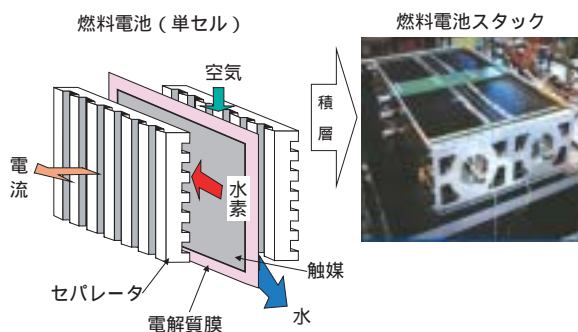


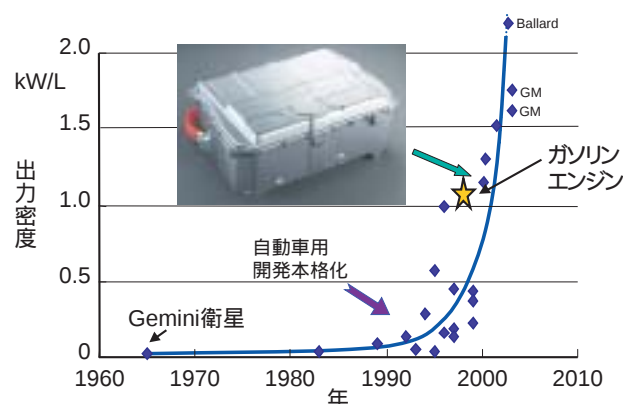
図-3 燃料電池の構造

Fig.3 Fuel Cell Structure

力電圧は1V以下と低いため、これを数百セルシリーズに重ねて使用するが、パッケージにしたものを燃料電池スタックと呼んでいる。通常、燃料電池と云うのは、このスタックアッセンブリを示している。

電解質膜、触媒の成分に加え、セパレータの構造、スタック方法等に各社のノウハウがある。

図-4は燃料電池スタックの出力密度の向上を示したものである。燃料電池が米国ジェミニ衛星に使用された当時から比べると、この近年の出力向上は驚く程でガソリンエンジンの出力密度を超えつつある。将来は大変コンパクトな燃料電池が出現し、車のパッケージまで大きく変化する可能性がある。



出典：トヨタ 資料、General Motors data、IFC data
 Ballard Power Systems Inc 資料
 De Nora 資料
 服部正策 編、燃料電池/電気自動車、横川書房 ('73.5)

図-4 燃料電池の高性能化

Fig.4 Improved Fuel Cell Capabilities

FCHV-3



燃料:水素(吸蔵合金)
 航続距離:300km
 最高速:150km/h

MOVE FCV-K-



燃料:水素(高圧)

FCHV-4



燃料:水素(高圧)
 航続距離:250km
 最高速:150km/h

トヨタFCスタック



燃料:水素(高圧)
 乗車定員:60人
 最高速:80km/h

1992:燃料電池車の開発着手

FCHV-5(燃料改質FC車)



燃料:CHF(クリーンガソリン)
 (CHFから水素に改質)

家庭用FCコージェネシステム



貯湯槽

本体

燃料:天然ガス
 出力:1kw

図-5 トヨタの燃料電池技術

Fig.5 Toyota's Fuel Cell Technology

4

トヨタの燃料電池車

図-5にトヨタの燃料電池を使った車両を示す。

FCHV-3・4・5は水素の貯蔵法によって分類した車だが、燃料電池は基本的に同じ仕様である。日野自動車、ダイハツ工業とも協力しつつ、大型都市バスと軽自動車についても燃料電池車を開発している。

他に応用として家庭用の1kWコジェネシステムをアイシン精機と共同で開発している。トヨタの燃料電池車の特徴はハイブリッド技術を採用していることである。

5

トヨタのハイブリッド技術

図-6はプリウスのハイブリッドシステムとFCHV-4のハイブリッドシステムを比較したものである。エンジンを燃料電池に置き換えているので、電気—電気の組み合わせとなり、ハイブリッド化はプリウスより容易である。

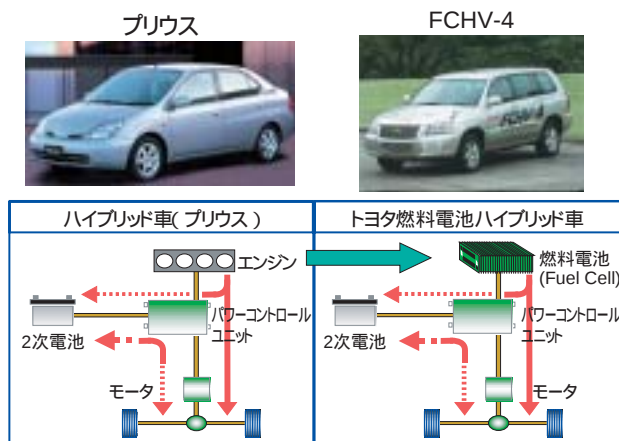


図-6 トヨタのハイブリッド技術
Fig.6 Toyota's Hybrid Technology

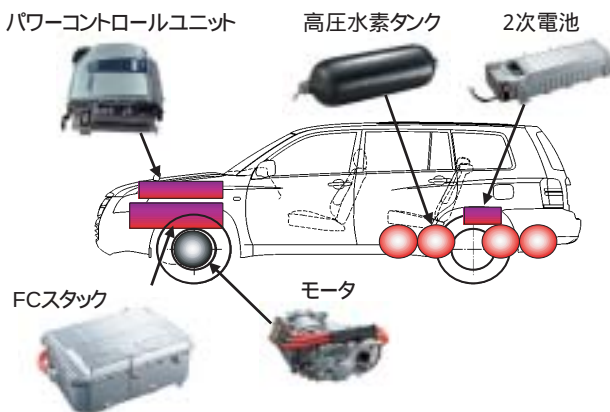


図-7 FCHVシステムのコンポーネント
Fig.7 FCHV System Components

図-7にFCHV-4のハイブリッドシステムのコンポーネント配置を示す。FCスタック、パワーコントロールユニット、駆動モーターをエンジンルーム内に納め、高圧水素タンクと2次電池をリヤの床下に置くことにより、乗員スペース、カーゴスペースをベース車両と全く同じにすることができた。

図-8はFCHV-4のエネルギー効率を示している。トータルエネルギー効率を計算するためには、原油（燃料）の井戸から車の走行までを総合して考える必要がある。原油を採掘し、輸送、精製してガソリンを製造し、それをサービスステーションに配って車のタンクに供給するまでの燃料効率率は88%程度と言われている。つまり原油の12%のエネルギーが途中のプロセスで失われてしまう。ガソリン車の10-15モード運転時の代表的な車両効率率は16%であり、総合効率（Well to Wheel）は14%になる。

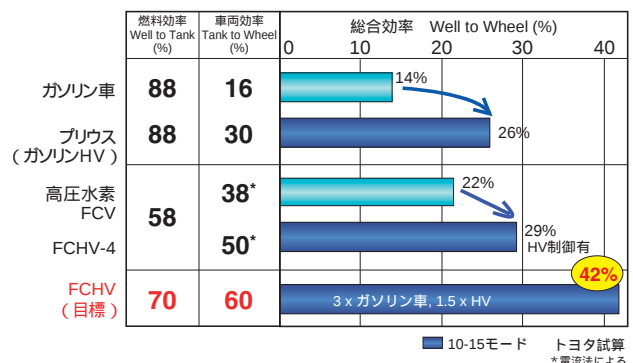


図-8 FCHVの総合効率
Fig.8 Well to Wheel Efficiency

プリウスに代表されるハイブリッド車の場合は、燃料効率率は88%で同じだが、車両効率が約2倍に改良され、総合効率も約2倍の26%になる。燃料電池車FCHV-4の車両効率は、ハイブリッドの効果もあってガソリン車の3倍以上の50%に達するが、天然ガスを改質して水素を製造する効率が現時点では低く約58%と言われており、総合効率は29%にとどまり期待した程良くない。

燃料電池、水素のような新しい技術を導入するのであればWell to Wheelの総合効率でガソリンエンジンの3倍以上にする必要があると考えている。このためには車両効率も現在より更に向上させ60%以上を、水素を造る効率も70%程度に高める必要がある。水素は種々の一次エネルギーから製造が可能であり、70%は達成可能であろうと思われる。

6

水素燃料

図-9は各種水素製造方法について示したものである。現在は石油，天然ガス，電気からの製造が主流だが，将来は太陽光，バイオ等のCO₂フリーのエネルギー源からの製造も期待されている。また日本では製鉄所，化学工場等から多量の副生水素が発生しており，それを利用することも現実性がある。

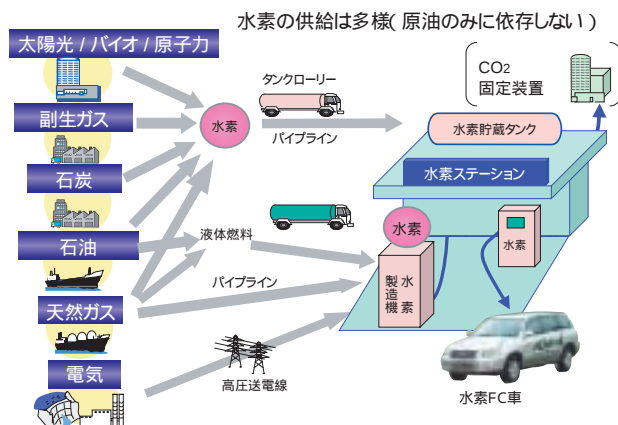


図-9 将来の水素社会

Fig.9 Image of Hydrogen Infrastructure

7

市場導入に向けた課題

燃料電池車を市場へ導入する場合の課題を表-2にまとめた。車用として一般に普及させるためには，解決しなければならない課題が未だ山積している。この中で燃料電池車に特有な低温，航続距離について説明したい。

表-2 市場導入へ向けた課題

Table 2 Issues for Market Introduction

1. 環境適合性

低温、高温、高地、電波障害、粉塵
雨、雪、塩水、温泉地（硫化水素）等

2. 安全性

水素、高電圧、衝突

3. 経済性

コスト（貴金属低減）、ランニングコスト

4. 航続距離（水素貯蔵技術）

5. 信頼性・耐久性

6. サービス性

7. リサイクル

触媒、スタック

図-10にFCHV-4の低温試験の様子を示す。燃料電池は原理上発電すると必ず水が生成され，この水は物理法則に伴い0℃以下では凍る。従って-10℃，-20℃で燃料電池車を始動すると生成した水が，あちこちで凍り，機能が

損なわれてしまう。単純にして大変やっかいな問題である。研究室では問題にもならなかったことが実用には大きな障害になる例である。

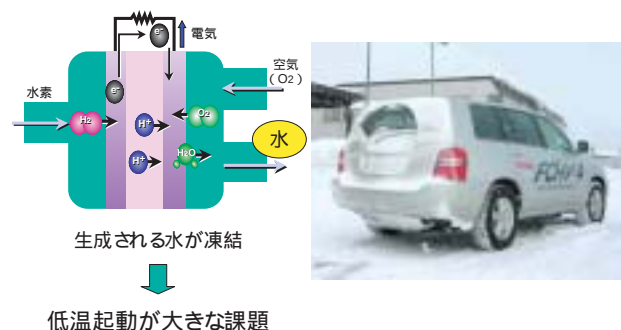


図-10 低温試験

Fig.10 Low Temperature Performance

図-11に水素の貯蔵技術を示す。FCHV-4は1kgの水素で約100km走行出来るので，充分な航続距離を確保する為には5kg以上の水素を貯蔵する必要がある。これは気体の場合には体積にすると56m³になり，高圧タンクでも容積が大きくなり過ぎて車に搭載は困難である。水素吸蔵合金タンクは容積を小さく出来るが，金属粉であるために重量が大きな障害になる。液体水素タンクは小型・軽量に出来るが，-253℃の液体水素は蒸発し続けるので，乗用車のような使い方では安全性も含めて実用化は困難であろう。カーボンナノチューブ，ケミカルハイドライド等の新技術の出現が期待される。

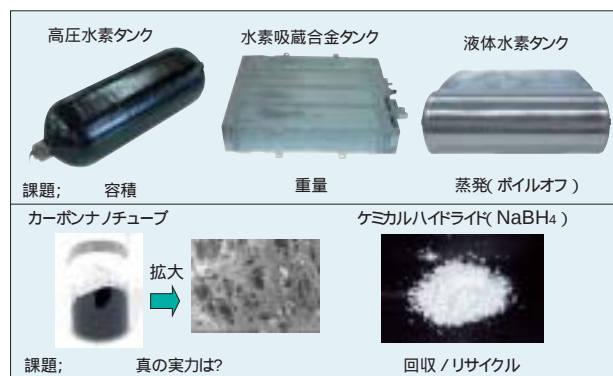


図-11 水素貯蔵技術

Fig.11 Hydrogen Storage Technology

8 燃料電池車の普及に向けて

図-12に燃料電池車の普及の予想ロードマップを示す。本格的な普及の始まりは2010年以降になるものと予想され、それ以前は主としてメーカー間の技術競争の時代になると思われる。

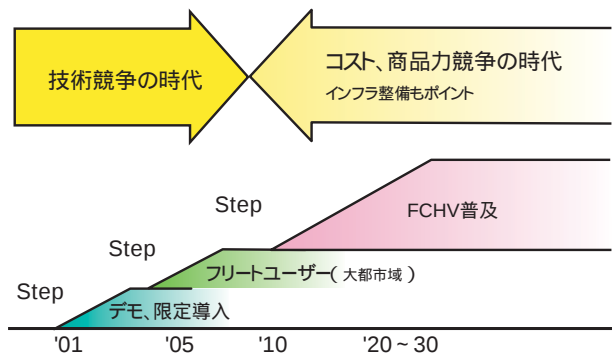


図-12 燃料電池車普及の予想ロードマップ

Fig.12 Forecast of FC Vehicle Market Introduction

燃料電池車の普及に向けた課題を図-13に示す。自動車メーカーのみならず、国、他の産業界、更には日本全体の水素エネルギー社会に対するコンセンサスが不可欠になる。

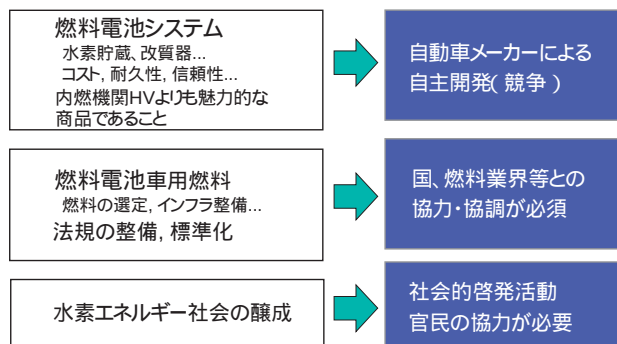


図-13 燃料電池車の普及に向けた課題

Fig.13 Challenges for market penetration of FCVs

図-14は長期的に見た世界的レベルでの燃料電池車の普及イメージである。トータルコストが内燃機関と同等になるまでは、本格的な普及にはならないだろう。その時期は2020年前後になると思われるが、クリーンでエネルギー効率の高い燃料電池車は必ず将来の豊かな車社会を実現してくれるものと信じて、日夜の開発に邁進して行きたいと思っている。

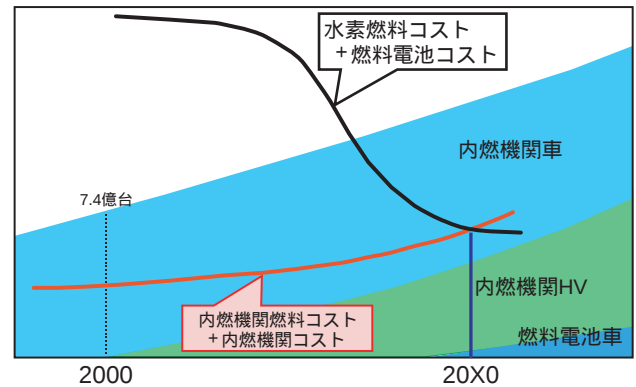


図-14 世界の燃料電池車普及イメージ

Fig.14 Image of the Global Commercialization of FC Vehicle

社外執筆者紹介



中村 徳彦
(なかむら のりひこ)
1965年トヨタ自動車株式会社入社。
ガソリンエンジン・ディーゼルエンジン開発に従事した後、
燃料電池開発業務に従事。
現在、技監。