

# トヨタにおける燃料電池自動車の開発

大仲 英巳

トヨタ自動車株式会社

〒410-1193 静岡県裾野市御宿1200

## Development of TOYOTA Fuel Cell Hybrid Vehicle(FCHV)

Hidemi Onaka

Toyota Motor Corporation

1200Misyuku Susono Sizuoka 410-1193

Fuel Cell Vehicle is the nearest one to an “ultimate eco-car” that offers solutions to energy and emissions issues. Toyota Motor Corp. has been developed the fuel cell technologies, fuel cell vehicles and various applications using the fuel cell from 1992. On December 2002, Toyota began limited marketing of the hydrogen-powered TOYOTA FCHV in the United States and Japan. On 2005, new FCHV model was introduced to the market with the improvements of the fuel cell and fuel cell system. TOYOTA FCHV-adv. introduced on June, 2008, has following significant features (1)Improved sub-zero startup (2)Improved fuel efficiency (3)Great extended cruising range (4)Improved durability of the fuel cell stack. The performances of the FCHV-adv. is established close to the current gasoline powered vehicle. We focused the development to the cost reduction issue for the commercialization and the sustainable mobility.

**Keywords:** fuel cell hybrid vehicle, sub-zero startup, fuel efficiency, cruising range, durability

### 1. はじめに

地球温暖化や石油の枯渇などのグローバルな環境問題に対して、自動車側の早急な対応が求められている。地球温暖化の原因とされるCO<sub>2</sub>の排出の20%近くは、自動車によるものであり、石油の消費の大半は自動車が占めている。従来の内燃機関の効率改善、内燃機関HVの導入拡大に加えて、バイオ燃料の活用、更には電気・水素の活用など、エネルギー源の多様化とCO<sub>2</sub>削減を進めていく必要がある。水素を燃料とする燃料電池車は、従来の内燃機関に比べて2倍以上の高い効率を有し、排出するのは水だけであり、燃料となる水素は石油に頼らず多様な物から作ることができるなど、自動車に関わる環境問題をすべて解決できるポテンシャルを持った究極のエコカーである。

ここでは、水素をエネルギー源とした燃料電池自動車のトヨタ自動車での開発と普及に向けた課題への取り組み状況を紹介する。

### 2. トヨタの燃料電池技術

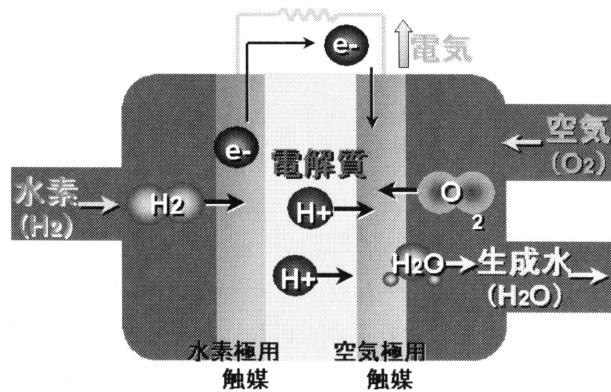


図1. トヨタの燃料電池技術開発

トヨタでは1992年より燃料電池の開発を始め、その基幹技術である燃料電池（FCスタック）は当初より自社開発・自社生産するとともに、図1に示す様な各種応用製品をグループ各社と協力して開発している。

### 3. 燃料電池とは？

燃料電池とは、水素と空気中の酸素の電気化学反応にて電気を発生させる装置で、電池という名前であるが小さな発電機である。図2にその原理を示している。燃料電池には、いくつかの種類があるが、自動車用には固体高分子形の燃料電池が最適と考えられ、各社でこのタイプの燃料電池の開発が進められている。固体高分子形とは、溶液ではない固体の高分子膜をイオンが通る電解質とする事から、そのように呼ばれる。燃料電池のマイナス極(水素側)に水素が供給されると、水素は電極の触媒上で電子を放出し、電子と水素イオン(プロトンと呼ぶ)とに分かれる。この電子が燃料電池の外部回路をマイナス極からプラス極(空気側)に流れることで、電気が発生することになる。水素イオンは、マイナス極から高分子電解質膜を通して空気側へ移動し、空気側の触媒上で、酸素と水素イオンと電子が結合して水となる。水素が電気的に反応する為、効率が非常に高いのが特徴である。



燃料電池の理論効率  $\Delta G/\Delta H = 83\%$  (水素)

図2. 固体高分子形燃料電池の原理

図3に燃料電池の構造を示している。燃料電池はその両側に電極触媒が塗布された高分子電解質膜を、空気の通路と水素の通路が構成されたそれぞれのセパレータでサンドイッチされた構造になっている。この一つの組み合わせをセルと言い、このセルを数百枚重ねてパッケ

ージにしたものを、燃料電池スタック、またはFCスタックと呼んでいる。一般に燃料電池と言うと、この燃料電池スタックの事を言い、このスタックが、ケースに入れられて実際の車両に搭載されている。

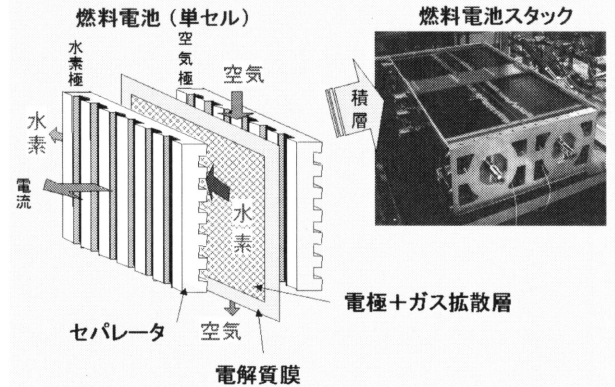


図3. 燃料電池の構造

### 4. 燃料電池システム

トヨタの燃料電池システムは、ハイブリッドシステムである。内燃機関HVがエンジンと2次バッテリーの組み合わせのハイブリッドであるのに対して、FCスタックと2次バッテリーの組み合わせのハイブリッド構成となっている。基本的なハイブリッドの作動は、ガソリンエンジンの場合と同じであり、減速時やブレーキ時にエネルギー回生を行うと共に、FCスタックと二次電池を最適に制御して元々の燃料電池の効率の高さを更に高めている。それゆえ、燃料電池自動車ハイブリッドシステム（FCHVシステム）と呼んでいる。FCHVシステムの構成を図4に示す。

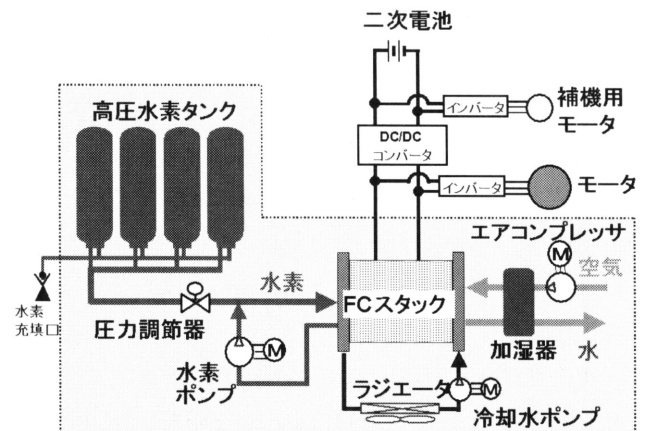


図4. FCHVシステム

FCスタックを作動させるための水素と空気の供給系、そしてスタックで発電する際に発生する熱を放散・制御する冷却系で構成されている。水素は高压タンクに貯蔵されており、最新の車両では最高70MPaに圧縮されており、圧力調整器で約2気圧（絶対圧）に減圧されてスタックに供給される。また空気は、エアーコンプレッサで加圧し水素よりやや高めの圧力でスタックに供給されている。

FCスタックの電解質膜には、その水素イオン(プロトン)のスムーズな移動のために適当な水分が必要であり、その水分の補給のための加湿器が設置されている。この加湿器は、スタックで生成した水が排出される経路でその水分のみを供給される空気に戻す役割を行っている。

図5には、トヨタFCHV車両での各主要部品の搭載レイアウト例を示している。FCスタック、高压水素タンクのFC主要部品とモーターやパワーコントロールユニット、2次電池などのハイブリッド技術の組み合わせとなっている。

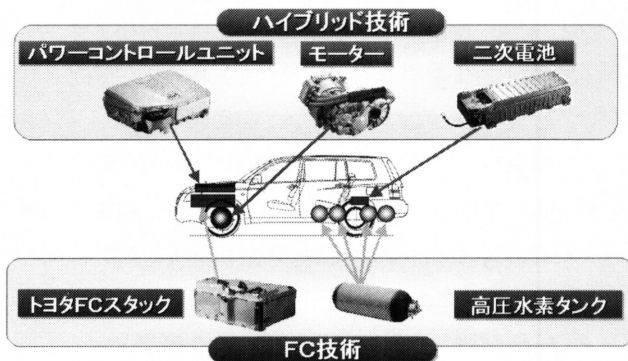


図5. 主要部品の搭載レイアウト

### 5. トヨタFCHVの変遷

トヨタFCHVは、2002年12月に世界で初めて日米での限定リース販売を開始した。その後、2005年7月に改良を加えて、国内で初めて新型車型式認証を取得したモデルを導入した。それまでのリース車の総数は39台、試験車を入れると市場走行車は62台に及んでいる。

更に2008年6月には、各種の性能を大幅に向上させた新型のトヨタFCHV-a d vを発表し、同年9月より順次お客様へのリースを開始している（図6）。このトヨタFCHV-a d vは、（1）-30℃の様な極

低温下での始動・走行性の確保、（2）燃費の大幅な向上と高压タンクの改良での水素貯蔵量の増大による航続距離の倍増、（3）FCスタックの耐久性性能の大幅向上など技術的には従来のガソリン車に近いレベルまで進歩して来ている。これらの改良については、7項の「普及に向けた技術課題と取り組み」の項でさらに詳述する。



図6. トヨタFCHV開発の変遷

### 6. 燃料電池自動車普及の条件

燃料電池自動車が普及するためには、下記の3条件が整う事が必要と考えられる。

- (1) 車の商品力向上
  - ・技術課題の解決, コスト低減, 商品魅力
- (2) 水素エネルギー社会の基盤整備
  - ・CO<sub>2</sub>削減を考慮した水素製造, 運搬, 貯蔵技術, 安全確保の規格・基準制定, インフラ整備
- (3) 社会ニーズの高まり
  - ・地球温暖化, 化石燃料枯渇, エネルギーセキュリティ等への対応

これらの条件の中で、社会ニーズの高まりは既に大きくなってきており、自動車の商品力の確保、特にコスト低減とインフラの整備とそのために必要な技術開発が大きな課題と考えている。

### 7. 普及に向けた技術課題と取り組み

普及に向けた燃料電池自動車の主要な技術課題を図7に示す。これらの課題は解決に向けて着実に改善されており、最新型トヨタFCHV-a d vにはかなり織り込まれている。以下に主な取り組み事例を述べる。

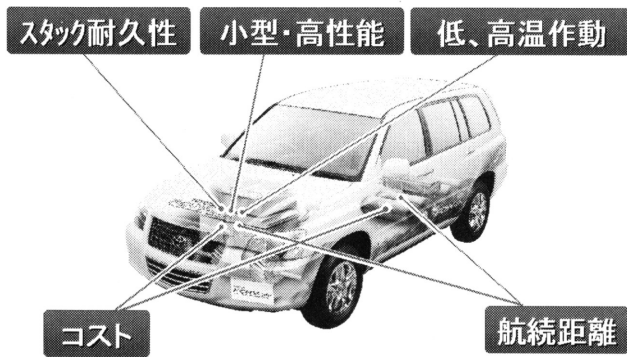


図7. 主要技術課題

8. 低温始動走行性能

燃料電池自動車の大きな課題のひとつが、発電時に排出される生成水が氷点下で凍結して発電が継続できなくなる問題である。低温始動走行性能を確保するためには、「低温下の始動・走行時」と「走行後、氷点下で放置時」などのいずれの場合でも、FCスタックやシステム部品の凍結による運転不能の状態が生じないように設計・制御する必要がある。これらの課題を解決するために、氷点下でのFCスタックセル内での凍結現象の可視化と凍結部位の特定・解析を行った。図8はその事例である。

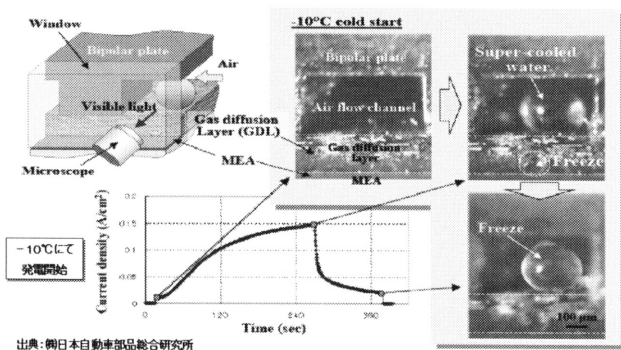


図8. 氷点下発電でのセル内部可視化

これらの可視化検討結果を活用して、セル構造の設計や制御の改良により水の残留防止や排出の促進を図った。

更に今回のFCHV-a d vのスタックは、セパレータにステンレス材を採用した。図9はこの熱容量の低減とそれによる昇温の効果を示している。熱容量の低減により昇温時間が半減できているのがわかる。

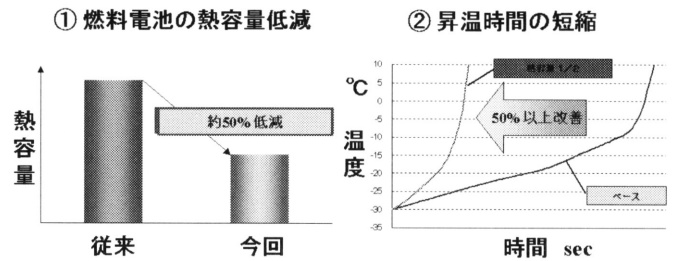


図9. 熱容量低減と昇温時間

この様に、セル設計やシステム制御などいろいろな改善を進め、 $-30^{\circ}\text{C}$ でも1分以内で始動・走行できる性能レベルが確保できた。図10はカナダでの寒冷地試験の様子を示している。実環境下で、外気温 $-37^{\circ}\text{C}$ からの始動・走行性も問題ない事を確認している。

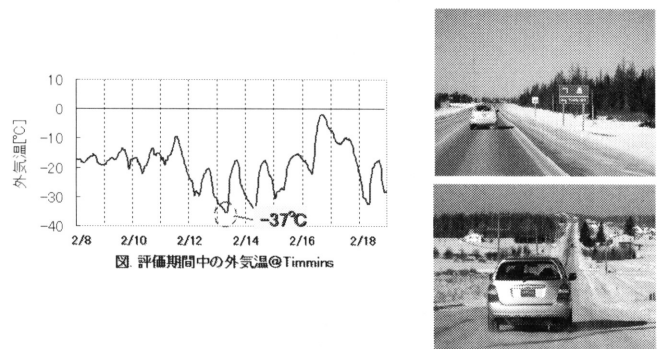


図10. カナダ (Timmins) 寒冷地評価

9. 実用航続距離

燃料電池自身は効率が非常に高いが、エネルギー源の水素がガソリン等の液体燃料に比較して体積エネルギー密度が小さく、加圧しても多くの水素を車載出来ないため、航続距離も大きな課題であった。トヨタFCHV-a d vでは、FCスタックを作動させる為のエアコンプレッサ等の補機損失を低減するなど、FC自身とFCシステムの改良により燃費を約25%と大幅に向上させた。図11はそれぞれの対策項目とその効果を示しており、右側のグラフはLA4モードでの燃費を旧モデルと比較したもので、25%の向上を示している。

更に、高圧タンクも35MPaから70MPaに高圧化すると共に各種の設計的な工夫を加え、使用可能水素量を約1.9倍に増加させる事ができた。その結果、航続距離は10・15モードで、05モデル車の330kmから830kmと約2.5倍になった(図12)。エアコン等を使った実使用条件下での航続可能距離いわ

ゆる実用航続距離は約580kmとガソリン車と同等以上を確保できた。

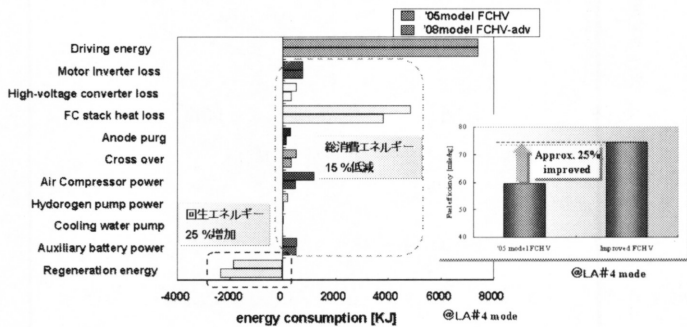


図1.1. 燃費向上結果

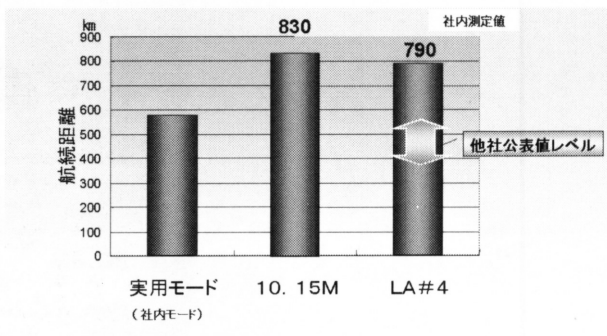


図1.2. トヨタFCHV-advのモード別航続距離

2007年の夏には、大阪→東京間約560kmをエアコンを使用するなど通常の使用条件で途中の水素補給無く完走し、目標のガソリン車同等以上の航続距離を実証した。しかしながら、これで問題が解決したわけではない。目標の500km以上の実用航続距離は実現したが、70MPaの高圧タンクは強度確保の為に多量のカーボンファイバーを使用しており、コストや車両搭載上はまだ体格が大きいなどの課題がある。小型軽量で安価な、新たな水素貯蔵システムの研究開発が大いに期待される。

### 10. FCスタックの耐久性

FCスタックの耐久性の課題は、電解質膜での亀裂の発生や劣化によりガスが膜を透過してしまうクロスリークの増大や、電極触媒の劣化による出力性能低下である。図1.3に耐久性の改良状況を示す。クロスリーク耐久性はここ数年間で大幅に改良され、ほぼ解決し、現在

はクロスリーク性能を維持しつつ、膜厚を薄くして性能向上を図る検討を進めている。電極触媒の劣化による性能低下も着実に向上してきており、通常の使い方では10年以上の耐久性が確保できている。

電極触媒の劣化を引き起こす要因はいろいろあるが、発生電圧が高電位の時やその電位の変動の繰り返しが、触媒に使用されている白金をイオン化させ、膜中に白金が溶出するのも劣化の要因の一つである。

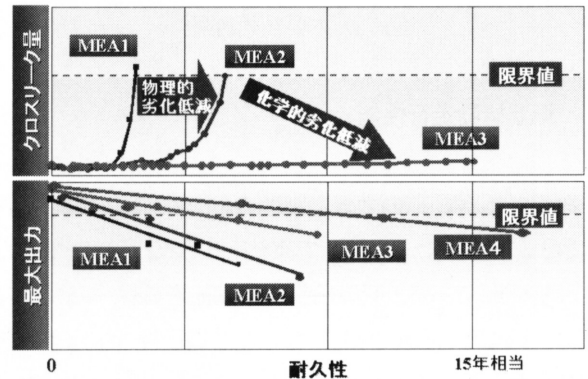


図1.3. FCスタック耐久性の改善

ひとつの対策として、この高電圧を回避する制御を行った効果を顕微鏡写真で観察した結果が図1.4である。黒い点の様に見えるのが白金の粒であり、高電位回避をしない場合(左側)に比べて制御をした場合(右側)は、白金の粒径拡大や特に膜側の白金の溶出が押さえられているのがわかる。

更に、図1.5には別の劣化の要因として始動時と停止時のカーボン酸化の様子を示している。始動時は長時間の停止中に、膜を通して空気が水素側に透過し、ほとんど空気で満たされる事にもなる。始動時に水素を供給すると水素側に空気と水素が共存する状態が生じる。同様に、停止時は水素の供給が遮断された後、水素側に空気が徐々に透過し、水素と空気が共存する状態が発生する。このように燃料電池セルの水素側に水素と空気が共存した状態が生じると、セル電圧が1.5V以上という様な高電位となりカーボンの腐食(酸化)が発生する。結果としてCO<sub>2</sub>の発生が見られるようになる。このCO<sub>2</sub>自体は問題ではないが、カーボンが酸化により消失する事によって、カーボンに担持されていた白金が粒成長して反応表面積が低下したり、溶出しやすくなったりして、触媒性能の低下を引き起こす事になる。その他のいろいろな現象に対しても、この様な解析やその要因に応じた

対策により大幅に耐久性の向上が図られて来ている。

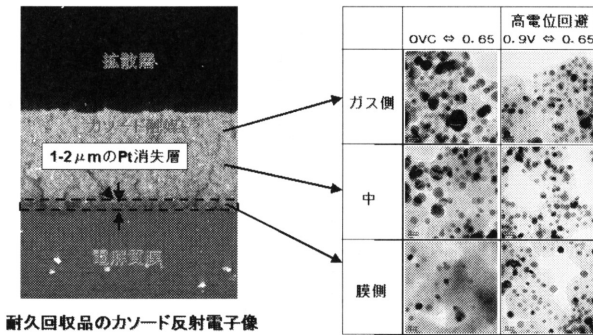


図14. 耐久試験後の触媒の変化

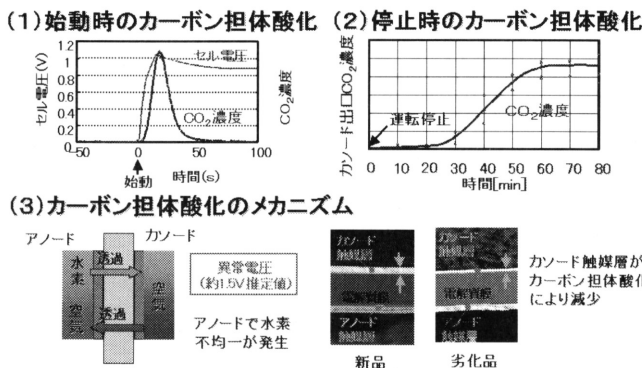


図15. 始動・停止時の触媒劣化メカニズム

11. コスト低減

燃料電池車の普及への残る最大の課題は、コスト低減である。図16に示すように設計・材料・生産技術等の改良で1/10を目指している。それが達成できれば、一般的に量産効果で更に1/10位が見込め、一般のお客様に使っていただける価格の達成が実現できると考えている。

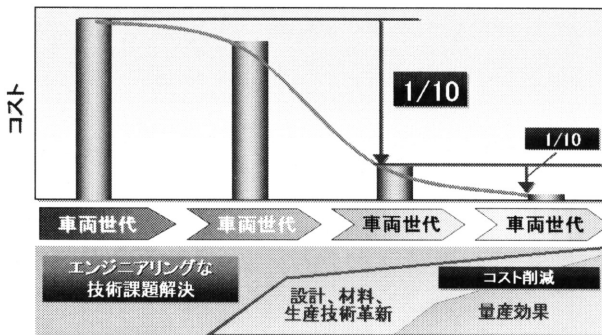


図16. コスト低減へのアプローチ

その為には、不要なデバイスの削減を含む徹底的な軽量・小型化を実現するシステムの簡素化が必須である。このシステムの簡素化は燃料電池の性能にかかっている。すなわち、燃料電池を安定して運転する為にいろいろなデバイス例えば加湿器などが追加されており、また燃料電池に供給する空気も燃料電池の性能によってエアポンプの容量や大きさの要求が支配される事になる。また、燃料電池の出力性能が向上すれば必要なセル面積が低減でき、コストに直接寄与することになる。

コスト低減のための燃料電池の各種性能を向上させるには、図17に示すような燃料電池の基礎的な研究開発がますます重要であり、精力的に取り組んでいる。この様な基礎的なメカニズム等が解明されることにより、性能や耐久性向上が図られるだけでなく、システムの簡素化にもつながっていく。更に、同じ機能がもっと安い材料でも実現でき、コスト低減に大きく寄与することになる。

セルモジュールの基礎研究例

目的:高性能・小型化、高耐久・高信頼性、低高温動作、低加湿、低コスト化など

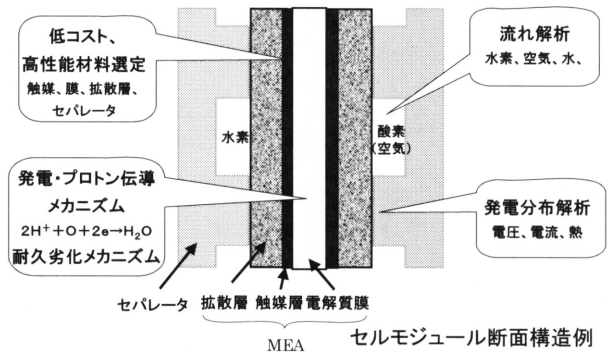


図17. 燃料電池の基礎研究例

12. 水素インフラの課題

6項で述べたとおり、燃料電池車の普及には自動車の開発の他に水素インフラの整備が不可欠である。図18に主要な課題を示す。単に水素ステーションを設置するというだけではなく、CO<sub>2</sub>排出量やコストを最小限に抑えた水素製造、運搬、供給技術の開発、大量の水素を安全に取り扱うための規格・基準の整備等が必要である。そのためのインフラ技術分野での研究開発の推進も重要である。この分野は、政府やエネルギーメーカーが中心となってご尽力いただく事になるが、トヨタ自動車としてもしっかり協力して進めて行きたいと考えている。

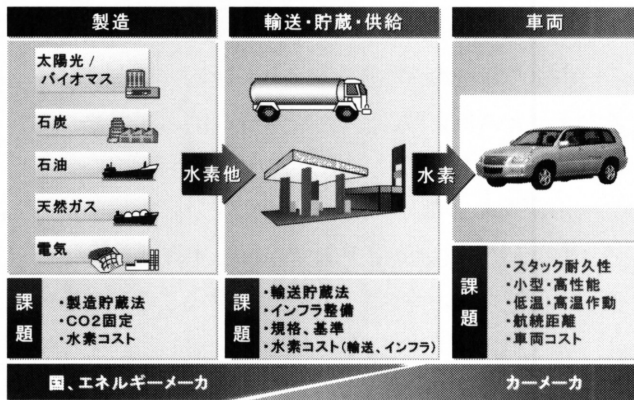


図18. 水素インフラの課題

13. 燃料電池車の位置付け

燃料電池車の他にも電気自動車やバイオ燃料自動車などの環境対応車があり、トヨタ自動車でもそれらの開発を進めている。それぞれ、特徴と同時に課題もあり、どれかひとつで環境問題に対応できるものではなく、それぞれに適した車両や使い方で棲み分けをしながらすべてをうまく活用していくべきと考えている。図19はその棲み分けの考え方を横軸に航続距離、縦軸に車両の体格をとって示している。

バッテリーに溜めた電気で走る電気自動車(EV)は、家庭でも充電できるなどインフラの対応は比較的容易ではあるが、バッテリーに溜められる電気エネルギーが最新のリチウム電池でも少なく、1回の充電で走る航続距離が短く、充電にも時間がかかることから、市街地での短距離用途で軽・小型車に適する。バイオ燃料車は現在の車の小改良ですぐに普及できるが、バイオ燃料の供給が食料ではなく木や草などから作る技術が開発されたとしても量の確保に限界があり、世界の自動車に必要な燃料の10%程度しかまかなえないと考えられている。それゆえ、ガソリンとの混合で使ったり、本当に液体燃料でないと困るような用途、例えば飛行機などが適していると考えられる。自動車では、燃料使用量の少ない小型中型車用までが適用範囲と考えられる。燃料電池車は、航続距離が従来車並の航続距離が確保できるので、EVでは難しい中・大型自動車やバス・トラックに適している。

逆にいえば、大型バスや長距離トラックはEV等では

対応不可であり、なんとしても燃料電池で何とかしなければいけない用途である。

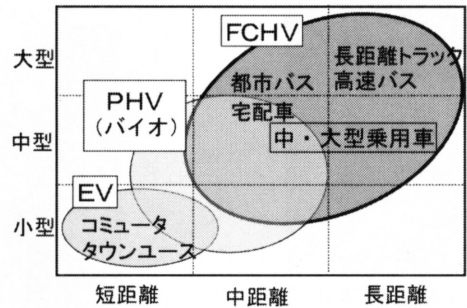


図19. FC車の位置づけ

14. 燃料電池車普及の見通し

燃料電池自動車の本格的な商用化を予測することは難しいが、地球環境問題からは一日も早い普及が必要であり開発が進められている。

図20は燃料電池実用化推進協議会(FCCJ)から2008年の7月にリリースされた燃料電池車普及シナリオである。エネルギー業界と自動車業界を中心に現在のデモ・技術実証の段階から、今後、社会実証を経て、商用水素ステーションの設置が開始され、2015年に一般ユーザーへの燃料電池自動車の普及開始を目標としている。

このためには、エネルギーメーカーや自動車メーカー等関係機関の緊密な意見交換のもとで相互理解を深めていく必要があり、政府や地方自治体の適切なサポートが重要である。

世界で使用されている約9億台の自動車は燃料電池自動車などの新しいエネルギー源の移動体に置き換わっていくには、インフラ整備、自動車の導入ともに時間

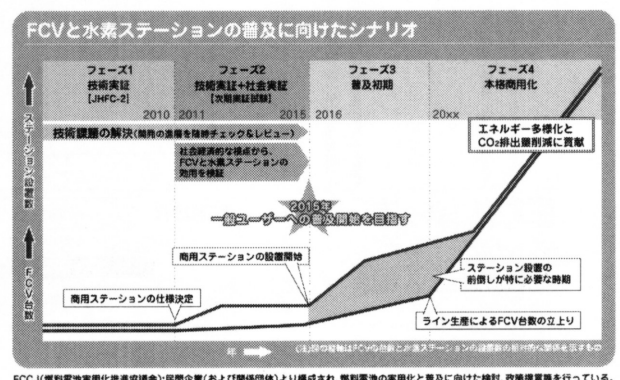


図20. 燃料電池車普及のシナリオ

も必要である。トヨタはFCの技術開発とともに大量生産に向けたFCスタックや水素タンクの生産技術開発にも積極的に取り組んでいる。

## 15. まとめ

エネルギー源多様化とCO<sub>2</sub>排出量削減の為、燃料電池自動車の開発と普及は重要かつ緊急な課題である。燃料電池車の普及に向けた技術課題は、実用航続距離500 km以上、低温始動走行性能-30℃確保、10年以上の耐久性確保など着実に進展している。現在は、更なる信頼性・耐久性向上と最大課題のコスト低減に注力するとともに、インフラ整備についても政府やエネルギーメーカーと協力し、2015年の普及開始に向けて準備を進めている。