

燃料電池総論

燃料電池開発の現状と課題

岡野一清

九州大学工学府大学院

〒290-0006 千葉県市原市若宮6-8-5

Overview of Fuel Cell Development

Kazukiyo Okano

Kyushu University, Faculty of Engineering

6-8-5 Wakamiya Ichihara City, 290-0006

Recently, market introduction of PEFC has been started for backup powers and forklift trucks, and for residential fuel cells following commercialization of PAFC and MCFC in the 1990s. But durability of cells and cost reduction of fuel cell systems are still important issues to be solved. Status of basic research for fuel cell technologies and development of fuel cell applications on PAFC, MCFC, PEFC and SOFC are introduced.

Keywords: PAFC, MCFC, PEFC, SOFC, DMFC

1. はじめに

燃料電池は大気汚染物質を排出しない高効率発電装置として期待されてきたが、地球温暖化が世界共通の重要課題となった現在はCO₂削減効果が大きい発電装置としての期待が高まっている。燃料電池開発はアルカリ形燃料電池（AFC）から始まり、数十年に及ぶ長い研究開発の歴史を有しているが、1990年代後半に商品化を達成したり、リン酸形燃料電池（PAFC）、熔融炭酸塩形燃料電池（MCFC）に次いで2007年から米国で純水素固体高分子形燃料電池（PEFC）のバックアップ電源などが商品化され、2009年から日本で家庭用燃料電池の市場導入が開始された。また、固体酸化物形燃料電池（SOFC）も世界各国で実証試験レベルまで開発が進み発電装置の実用化が期待されるようになってきた。全ての形式の燃料電池が長期の研究開発を余儀なくされている主な要因は、セルの耐久性向上、発電システムの信頼性向上、コスト低減など難度の高い課題の解決に多額の研究開発資金と長期間を必要とするからで、これらの課題は現在も解決に至らないものがかなり残されており商品化や普及の障害となっている。現在、世界各国で政府、大

学、研究機関、企業などにおける研究開発努力により各種燃料電池発電装置の開発が進む一方で、基礎技術も国のプロジェクトなどにより著しく研究が進み燃料電池の実用化に貢献している。特にPEFCやSOFCに対しては新しい基礎技術研究への取り組みが数多く行われている。燃料電池は各種用途の発電装置や自動車ほかの輸送機関へ利用されることが期待されているので、本文では燃料電池の基礎技術研究への取り組みや、実用化を目指した燃料電池発電装置開発の世界の現状、および商品化と普及の課題を中心に総括する。

2. 各種燃料電池の基礎研究の現状と課題

2.1. 燃料電池セルの耐久性の現状と課題

最近の燃料電池の要素技術研究はPEFCとSOFCに重点が移っているが、セルの耐久性の課題解決が重要なテーマとなっている。過去にPAFCは、先行した米国の技術に追いつくためにセルの基礎技術が未熟な状態のまま発電装置のシステム開発を先行させたため、効率の悪い製品開発を行ったとの反省がある。各種燃料電池の実用化に必要とされる基礎技術の中では性能劣化が少な

いセルの技術を確立することが最優先の課題である。セルの性能劣化は極めて繊細な構造の触媒層と電解質で構成される電極において複雑な物質移動を伴う電気化学反応を利用する燃料電池の宿命とも言うべき課題である。

当面の目標とされている最低40,000時間の耐久性の保証は大々的普及のために必要な要件なので、その研究が各燃料電池の開発当初から続けられている。

しかしPAFC以外は40,000時間に近づいているが保証できるまでには至っていない。各種燃料電池は触媒、電解質、電極構造や材料、運転温度などが異なるためセルの劣化要因は多種多様である。PAFCは電解質のりん酸の飛散(蒸発)が耐久性を損なう主要な要因であったので、セル内のりん酸の挙動を解析と実験で究明した結果、基材に多量のりん酸を保持しながらフラディングを起こさずにりん酸を適量配置する毛管力の制御に成功して耐久性が改善された[1]。

MCFCはカソード材料のNiOから電解質中へのNi溶出、セパレータの金属材料の腐食、マトリックスの劣化などの課題があったが大きく改善が図られた。

PEFCはセルの劣化要因として電解質膜の劣化、白金触媒のシンタリング、触媒担体の腐食、対CO被毒性の低下ほか挙げられるが、国のプロジェクトなど産・官・学の協力による劣化機構の解明が大々的に進められた。また、性能向上のための電極における諸現象の解明が国や民間のプロジェクトで行われた。X線や中性子線ラジオグラフィ、MRIその他各種解析ツールを駆使したセル内の物質移動の解析、水の移動の可視化、Ptの分散状態と溶解や担体腐食の関係、電解質膜の劣化の機構ほか従来未知であった諸現象の解明が進み、耐久性や特性向上に関する多くの知見が得られた。米国エネルギー省(DOE)ではPEFCの耐久性の目標を定置用は2011年に40,000時間、起動停止を頻繁に行う自動車用は2015年に5,000時間としている[2]。

SOFCは高温に起因する酸化や熱衝撃によるセルの劣化、Crの被毒による空気極の性能劣化、集電材の酸化劣化の課題があり、研究と対策が進められている。

全ての燃料電池セルの耐久性の目標は以前から40,000時間とされてきたが、燃料電池の大々的普及を目指すためには90,000時間(約10年)程度が望ましいので更なる研究とその成果が期待される。

2.2 その他の要素技術研究

2.2.1 燃料電池セルの研究

前記の燃料電池の耐久性に関する研究のほか、燃料電池の性能向上やコスト低減に係る重要な要素技術研究が各国で行われている。

PEFCに使用する非白金のカソード酸素還元触媒の開発、触媒量の低減、触媒層の構造や物性と特性との関係、また、運転条件との関係の解明、電解質膜の改良、セル材料に関する計測・解析技術、性能向上を図る電極構造の研究などが多くの大学、研究機関、企業等で進んでいるほか、次世代燃料電池技術として新しい触媒、電解質、膜電極接合体などの研究も行われているので将来が期待される[3]。

SOFCは1,000℃級であった作動温度を700℃台以下に低温化したブレークスルーにより実用化に向けて大きく前進したが、さらに低温化の研究が各所で行われている。触媒に次いでセルの性能や耐久性を左右する電解質については、PEFCでは高温、低加湿、高安定性の電解質膜の研究、SOFCでは低温化するための電解質の薄膜化、異種材料の高度分散、電極の多孔化などセラミック材料の製造技術研究が進められている。

直接メタノール形燃料電池(DMFC)では高性能化を阻害する最大の要因であるメタノールの透過を最小にし、高イオン伝導性を有する電解質膜の開発が期待される。

2.2.2 発電装置の補機部品

現在、各種燃料電池セルの基礎研究に注目が集まっているが、機械的技術による発電装置の補機部品の耐久性の研究も重要である。定置用燃料電池発電装置は無故障で長期連続運転できることが求められているので、水のポンプや空気ブロワーなど可動機構を持つ部品類、センサー類ほかの部品は長期間の連続運転に耐える耐久性が必要となる。一般にこれらの部品は燃料電池で使用される条件での耐久性が検証されていないものが多く、発電装置の開発初期には部品故障の問題が数多く発生するので事前の対策が必要である。

3. 各種燃料電池発電装置の現状と課題

3.1. PAFC発電装置

100kW、200kW級の業務用燃料電池として燃料電池の商品化に先鞭を付けたPAFCは、セルの耐久性、発電シ

システムの信頼性の課題を解決し、コストは技術的改良開発により当初の約10,000,000円/kWから1/10以下に低減された。耐久性は40,000時間を保証し60,000時間レベルまで改良が進んでいるが競合するガスエンジンよりコストが高いため販売量は少ない。現在世界では米国UTC製の200kWと400kW、富士電機製の100kWの3機種だけが市販されているが、用途拡大のために下水汚泥や食品廃棄物からのバイオガス利用、LPガス燃料と組み合わせた非常用電源兼用機などが開発されている。特にバイオガスを利用する燃料電池は環境・エネルギー問題への貢献が大きいので導入量を増やすことが望ましい。韓国では国の燃料電池導入促進政策を受けてSamsung Everland/GS Power社にUTC製400kW12台が導入され、世界一の4.8MW燃料電池発電所が建設される[4]。PAFCは最も完成度の高い業務用燃料電池であり、その特長を生かした市場の育成が望まれる。

3.2. MCFC発電装置

米国のFuel Cell Energy (FCE) 社がMCFCを商品化して250kW～2,800kW級発電装置を販売している。

下水汚泥利用などで米国を中心に2008年までに世界で64台、19MWが導入された[5]。ところが、2006年に韓国で燃料電池導入促進政策が発表され、補助金のほかに通常の電気料金の3倍で発電電力を購入する制度が実施されたため、発電事業用に2,000kW級燃料電池を導入する動きが始まり、2007年度ゼロであった導入台数が2008年7.5MW、2009年9.6MWと市場が急拡大された。このように国の支援策の効果は非常に大きいものがある。ドイツではFCEのスタックを使用しCFCS社が発電装置を製作し、20台以上を出荷している。また、イタリアのAFCo社も開発を続けている。

MCFCは米国で数多く導入されているが、DOEとカリフォルニア州のプロジェクトで、下水汚泥利用のFCE製300kW MCFCのアノード排ガス（組成： $H_2/H_2O/CO/CO_2=10/40/5/45\%$ ）を取り出して加圧し、PSAで精製して99.99%の水素を製造する電力、熱、水素供給システムがAir Products社によって建設される。

カリフォルニア州オレンジカントリーの下水処理場に設置され、1日100kgの水素を製造する。今後燃料電池車の普及に応じて燃料電池と水素ステーションを兼ねた利用方法が増えることも予想される。図1に水素を製造するMCFCのフロー図を示す[6]。

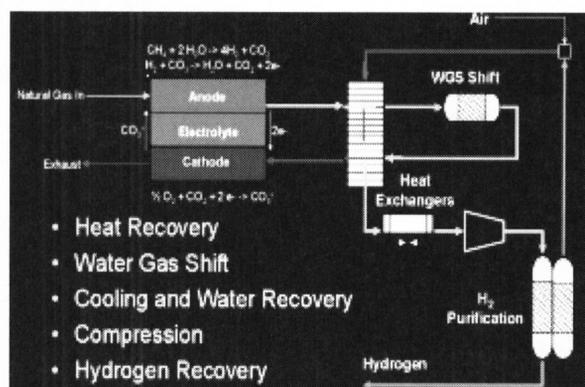


図1. MCFCの水素製造フロー図

3.3. PEFC発電装置と応用機器

3.3.1. 家庭用燃料電池

家庭用燃料電池に関心を示している国は日本のほかにドイツ及び欧州、米国、韓国、中国ほかがあるが、日本が世界のリーダーシップをとっている。その要因は燃料電池メーカー各社や、販売を手がけるガス、石油業界が技術開発と市場導入に熱心に注力したことが挙げられる。また、短期間で実用的発電装置が開発できたのは、2005年度から2008年度までに3,307台の燃料電池を製作し、各地で実証運転を行った国の実証事業の大きな成果である。実証事業を通じて各メーカーは4年間に多数の燃料電池を製作して運転検証ができたので、設計や製造技術の改良を繰り返す機会が与えられ実用技術を急速に育成することができた。その結果、開発初期に頻発した装置の故障は激減して発電システムの信頼性が著しく向上し、当初約10,000,000円/kWであったコストは3,000,000円/kWまで低減が進んだ。

2009年度から国の補助金を得て市場導入が進んでいるが、大々的普及のためにはさらなる技術的改良と量産効果で500,000円/kWのコストを達成する必要がある。

3.3.2. バックアップ電源

停電に備える通信施設のバックアップ電源用純水素PEFCの普及が2007年頃から海外で始まった。

北米では多発する自然災害による長時間の停電事故が増加し、バッテリー式から純水素燃料電池式への転換が急速に進んでいる。バックアップ電源用燃料電池は40,000時間の耐久性が要求されないほか、容量が1kW～50kWで、5kW以下が半数以上を占める単純で小型のシステムなのでコストが比較的安価である。燃料の水素は市場に流通しているボンベを補給するだけで容易に長時間運転ができるなどの特長がある。

72時間用システムの設備、保守、運転の年間総コストは、バッテリー式で\$47,318、3kW燃料電池式では\$33,901で、Tax creditによる補助を受けると\$32,014になるとDOEが発表している。Relion社など大手のメーカーは数百台の燃料電池を毎年各通信会社に納入し、IdaTech/Ballard社はインドから30,000台を受注している。

北米の市場規模は約\$42億である。図2にRelion社の1.2kW屋内型と4kW屋外型を示す[7]。

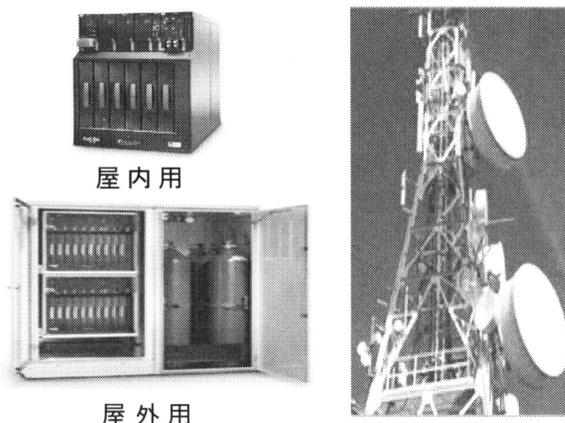


図2. 通信施設用燃料電池式バックアップ電源

3.3.3. 燃料電池フォークリフト

カナダ、米国では屋内で数十台のフォークリフトを24時間運転する大規模な物流センターが多数あり、8時間ごとに充電済みのバッテリーと交換を要するバッテリー式に代わり、屋内ステーションから5分で水素が充填できる燃料電池フォークリフトが2007年から大々的に普及する様相を見せている。燃料電池メーカーのBallard社、Plug Power社、Hydrogenics社などが4~20kW級の純水素燃料電池をフォークリフトメーカー各社に供給しているが、Plug Power社は2010年に1,100台を納入すると発表している。北米のフォークリフト市場は200,000台/年といわれている。

3.3.4. 燃料電池自動車

乗用車用燃料電池は80~100kW級で、マイナス30°Cで始動可能、頻繁な起動停止に耐える耐久性、小型軽量、極端な低コストなど燃料電池としては最も厳しい条件が求められる。国内では自動車各社が自社開発を行ってきたが、当初の燃料電池と比較してセルの改良による出力密度倍増、金属セパレータの採用などで大幅な小型化を達成し、低温始動性の確立や耐久性の向上も図られ、トヨタ、日産、ホンダは世界トップレベルの燃料電池を

自社開発して搭載している。

これらの燃料電池を搭載した燃料電池車は車両効率60%の目標を達成し長年にわたる国内外での実証運転試験を経て技術的にはほぼ完成の域に達しているが、コスト低減の課題が残されている。期待が先行している燃料電池車であるが、世界のメーカー8社が2015年から市場導入を開始すると共同発表を行ったので、国の導入支援策を受けて水素インフラ整備が加速され、燃料電池車が早期に普及することが期待される。

3.3.5. 燃料電池バス

燃料電池バスは米国、欧州7カ国、日本、カナダなどで数は少ないが路線運行されている。中国では神力1号を開発し上海万博で運行する。バンクーバー冬季五輪で20台の燃料電池バスを導入したカナダでは五輪後も路線運行している。燃料電池バスはコストの低下に伴って、今後世界の各都市で導入量が増えるであろう。バス用燃料電池は従来120~200kW級の燃料電池が使用されているが、最近米国ではコスト低減のため、燃料電池の容量を16kW×2に低減した35フィート、37座席、最高速度96km/hのハイブリッドバスを製作し南部のコロンビアで実証運転を行っている。バスのコストは既存のエンジンバスの5倍以下を目標としている。図3にコロンビアの燃料電池バスを示す。



図3. 米国・コロンビアの燃料電池バス

3.3.6. 船舶、鉄道への応用

潜水艦や深海探査機は潜航時の航行をバッテリーに依存しているが、純水素燃料電池を搭載して海中で長距離航行ができる潜水艦がドイツで開発され、ドイツ、イタリア、韓国などの海軍に配備されている。燃料電池を利用した深海探査機は三菱重工が開発し、2005年に世界記録となる連続航走距離317kmを達成した。また、2008年にはハンブルグで運河の港に水素ステーションが設置

され、48kW燃料電池を2基搭載した100人乗りの運河遊覧船ZEMSHIPが就航している。図4に燃料電池遊覧船を示す。低騒音で環境性の良い小型燃料電池船は今後世界に普及すると思われる。

そのほかわが国では鉄道車両に燃料電池を利用するための研究が行われている。ディーゼル車の騒音や排気ガスなどの環境性が改善されるほか、電車の代替としても架線を不要にできる大きいメリットがある。JR東日本は130kWバス用燃料電池とバッテリーとのハイブリッドシステムで駆動する試験車両を小海線で試験走行させた。また、鉄道技術研究所でも試験車両の走行試験を行っている。鉄道車両への燃料電池の利用は水素インフラの設置が容易なので、燃料電池のコストが低減されれば実用化されると思われる。



図4. ドイツ・ハンブルグの燃料電池遊覧船

3.3.7. 移動用電源

ヨーロッパで直接メタノール型燃料電池 (DMFC) がキャンピングカーや軍用の移動用電源として普及し始めた。ドイツのSmart Fuel Cell社は100W以下の移動用電源を複数のキャンピングカーのメーカーから10,000台を受注したと発表している。メタノールを補給すれば長時間運転できる燃料電池はバッテリーと比較してメリットが多いので今後さらに市場が拡大するであろう。DMFCはシステムが小型軽量なので、効率や耐久性を問題としない移動用の用途に最適である。

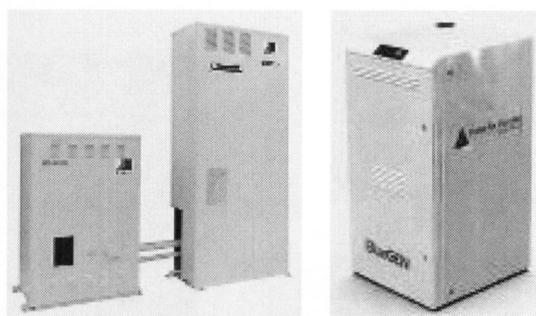
3.4. SOFC発電装置

3.4.1. 家庭用燃料電池

わが国では700W級のSOFC家庭用燃料電池が開発され、実証試験機の台数は2007年度29台、2008年度36台、2009年度は5社の製品で67台が設置されている。

40~45%の発電効率 (LHV) を達成しているが耐久性とコストについては課題が残されている。

海外ではオーストラリアの Ceramic Fuel Cell 社が2kW機を開発して日本のパロマ社で実証運転を行ったほか、ドイツのHeinsbergに生産工場を建設し、2010年にドイツほか欧州のエネルギー会社へ納入する。セルの劣化率は0.3%/1000時間とされている [8]。京セラ製700WSOFCと、燃料電池本体だけで給湯器は別置の Ceramic Fuel Cell 社の2kW SOFCを図5に示す。



京セラ製700W機

CFC製2kW機

図5. SOFC家庭用燃料電池

3.4.2. 業務用など各種用途のSOFC

各国でSOFC発電装置の開発が活況を呈してきた。

わが国ではNEDOや民間のプロジェクトで10kW級から150kW級システムが各社で開発されたほか、三菱重工(株)は200kW級SOFCとGTコンバインドサイクル発電システムの試験運転を2007年から行なっている。

欧州では大型SOFCシステム開発プロジェクトを2007年から3ヵ年計画で展開しており、英国のRolls-Royce FC Systems社、フィンランドのWartsilä社、デンマークのTopsoe Fuel Cells社が数百kWから1MW級のシステム開発を行っている。中でもWartsilä社は50kW~MW級の船舶用燃料電池の商品化を目指している。米国では石炭利用100MW級SOFCシステムの開発を最終目標としたSECAプロジェクトを展開しているが、2010年までのPhase2の目標は10kWシステムの開発となっている。

SECAとは別のDOEのプロジェクトでは約10社が長距離トラック用APU、商用電源、軍事用補助電源など3~10kW級のSOFCの開発を行っており実証運転が行われているが耐久性の課題は未解決である。そのほかに米国のベンチャー企業Bloom Energy社が最近100kWのSOFCシステムを\$7,000~\$8,000/kWで銀行や飲料会社など約10ヵ所に納入したことが発表されている[9]。カリフォルニアに設置されたBloom Energy製100kWSOFCを図6に示す[10]。

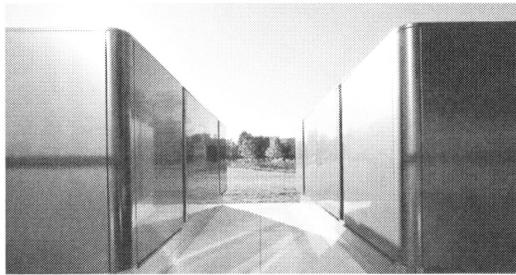


図6. Bloom Energy製100kW SOFC 2台

4. 燃料電池のコスト低減に関する課題

燃料電池のコスト低減は、最後まで残る最も難しい課題である。実証試験段階の燃料電池のコストは一般に市場要求価格の5~10倍であるが、量産すれば安くなると楽観視されることが多い。数十%のコスト低減ならともかく1/5~1/10という大幅なコスト低減は、コスト構成から見ても量産効果だけで達成できるものではない。

燃料電池のコスト構成は、燃料電池の種類によって多少の変化はあるが、一般的に図7に示すような構成になっている。燃料電池のコスト低減が容易でないのは、量産効果のない材料費の割合が高く全体コストの約50%程度を占めることである。白金やステンレスほかの素材や、部品類の素材を含む全ての素材のコストを積み上げたものを限界コストと称するが、燃料電池を量産しても市場に大量に流通している素材のコストは下がらないので、素材コストの合計がコストの下限となる。

一般に量産すれば学習効果でコストが大幅に低減されるといわれるが、図7に示すように燃料電池の場合は量産効果でコストが低減できるのは諸経費の負担分と、加工費と組立費などの製造コストが中心で、それらが仮に量産効果でゼロになっても全体コストは限界コストまでしか下がらない。従って大幅なコスト低減のためにはセルスタックの出力密度向上ほか主要部品の性能向上、構造の簡素化や小型軽量化など設計構造の改良、システムの簡素化、部品点数の削減、安価な材料の採用、新材料の開発、設計の標準化など技術的手段で限界コストを引き下げることが必要となる。材料・部品コスト低減の取り組みとしては数百から千点以上に及ぶ材料・部品の機能やコスト構成の内容を詳細に分析して、低減可能なコストの限界を調査し、その限界を引き下げするための技術的コスト低減活動を継続的に推進する必要がある。

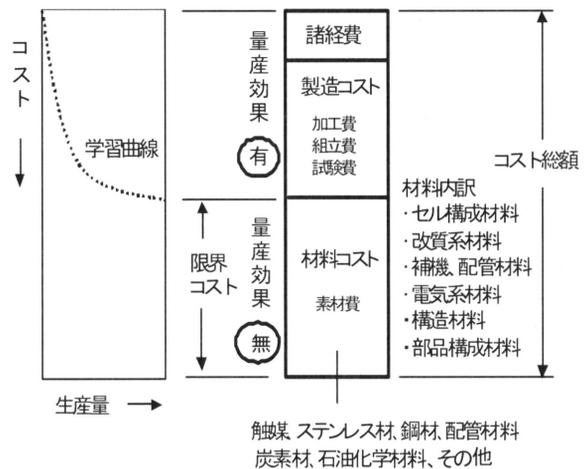


図7. 燃料電池のコスト構成

以上のような材料コストの低減に加えて製造コストの低減を図るためには、製造技術や試験・検査技術の開発、無駄のない生産システムや量産効果を最大にするための生産技術の研究、そして部品加工、組み立て、試験の自動化設備など、多額の生産設備投資も必要となる。

量産効果はこれらの製造技術や生産技術の研究開発と設備投資などのバックアップのもとに生み出される。

燃料電池の普及のためには、競合する製品との経済性比較で優位になるコストが要求される。業務用や家庭用などのコージェネレーション用燃料電池は、商用電力とガスボイラーや給湯器、またはエンジンコージェネレーション装置との競合になるので、燃料電池にとっては厳しいコストが要求される。

既存機器との競合では、燃料電池は最大の特長である優れた環境性、特にCO₂削減効果が大きい利点があるが、それが経済性評価に反映できるようになれば有利になる。

5. おわりに

長年にわたり世界中が期待していたPEFCが一部普及を開始したが、現状では最低限の市場要求レベルを達成したに過ぎないのでセルの耐久性改善とコスト低減への挑戦が今後も続けられねばならない。燃料電池は商品化段階に進んでも、売れる商品になって普及するまでは製品開発が終わったことにはならないので、さらなる質的向上とコスト低減を図るための研究開発から手を抜いてはならない。市場導入の準備ができた燃料電池に対して米国は2008年から各種燃料電池の市場を創出する

ための諸政策を打ち出しているが、燃料電池や燃料電池自動車は、商品化できても市場が形成され普及が軌道に乗るまでは効果的な導入支援を続けることが必要である。

燃料電池技術は発展の余地が多分に残されており、普及のネックとなっている耐久性とコストの課題が解決できれば、巨大な市場が開けて大きな経済効果を生むばかりでなく、水素社会の実現に大きく貢献できるので、更なるハイレベルの基礎研究や装置開発を根気よく続けることが望まれる。

参考文献

1. 瀬谷彰利、原田孝、りん酸形燃料電池の開発、富士時報Vol73, No.4, 2000. P215
2. Sunita Satyapal, Overview of Hydrogen and Fuel Cell Activities, JHFC Seminar 2010要旨集、P8
3. NEDO、燃料電池開発のNEDOプロジェクトの現状、日本における燃料電池の開発、FCDIC, 2009. P10-16
4. UTC Power Press release Oct. 29, 2008
5. 渡辺隆夫、国内外の熔融炭酸塩形燃料電池開発動向、第53回新エネルギー講演会、電機工業会、2008. P28
6. E.C.Heydom Presentation at NHA Conference 2009
7. 岡野一清、世界の水素・燃料電池の普及動向とその課題、燃料電池、Vol.9, No.1, 2009. P134
8. DEM44 Residential Power, 2009 Fuel Cell Seminar 調査報告書、FCDIC、P100-101
9. Homepage.greenoptimistic.com, 2010.03.03.
Homepage.earth2tech.com. 2010.02.24
10. Energy and Environment, NY Times. Com. 2010.2.23