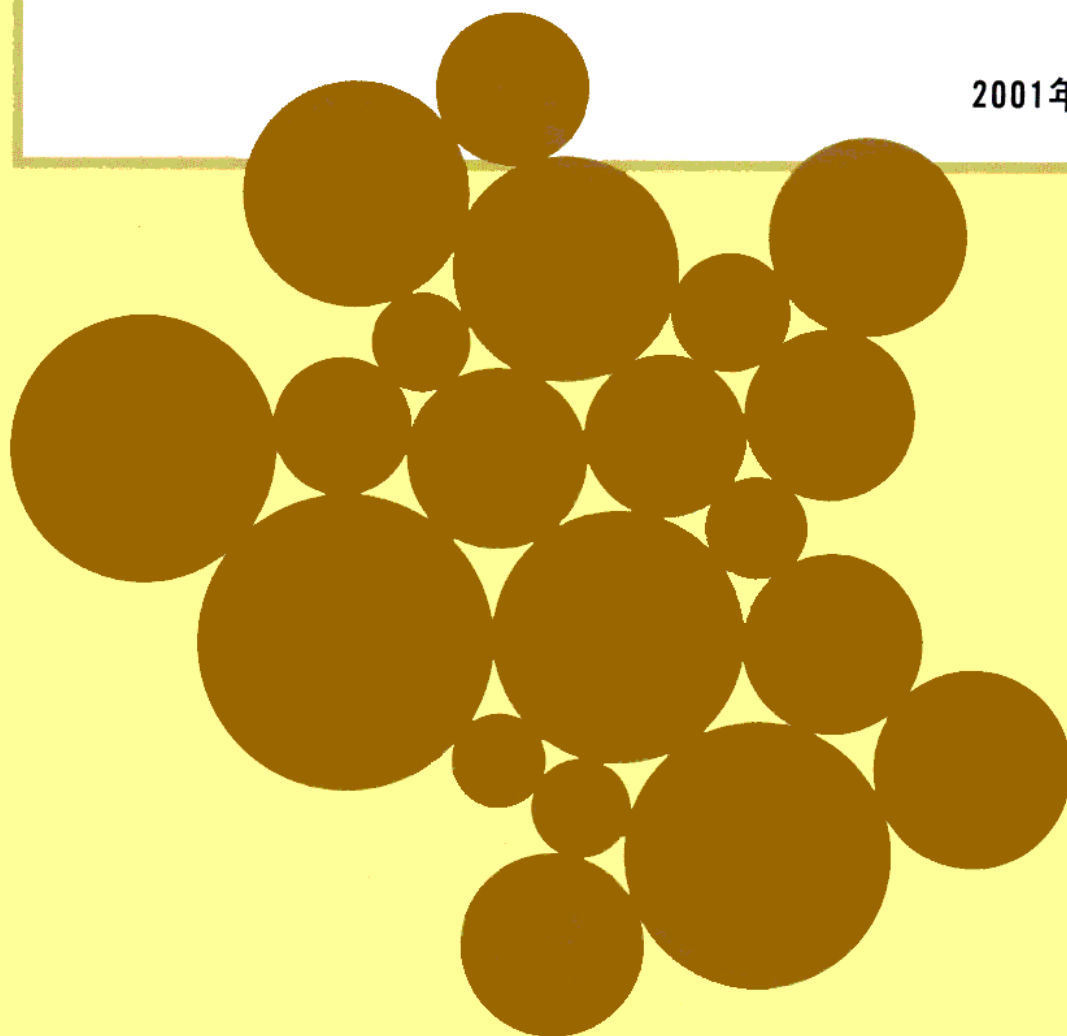


新エネルギーの展望

固体高分子形燃料電池

2001年3月



まえがき

新エネルギーとは、今後の技術開発によって実用が期待されるエネルギーの全般を指しており、その開発は石油危機を契機として国の内外で活発に展開された。

しかし、石油危機が去ると新エネルギーに対する社会の関心は薄らぎ、特に経済性の点からその早期実用化に対する期待度も低下したように見えた。

ところが、最近顕在化してきているといわれる地球温暖化問題において、その主原因が化石エネルギーすなわち在来形エネルギーの多消費によることが明らかになり、したがって今日新たな視点から新エネルギー開発の重要性が喫緊の課題として認識されるようになってきた。

燃料電池は、その原理に基づき高発電効率が得られ、また燃焼反応でないため窒素酸化物等の発生が皆無または非常に少ないなど優れた環境特性を有することもあって、その利用する燃料の種類を問わず、わが国のエネルギー政策上では新エネルギーとして位置付けられている。燃料電池には、りん酸形燃料電池（P A F C）、固体高分子形燃料電池（P E F C）、固体酸化物形燃料電池（S O F C）、および熔融炭酸塩形燃料電池（M C F C）等の種類があるが、それぞれの目的に応じた特徴を有していることもあり、その実用化および普及・促進を目指して関係者の多大な努力が続けられている。

とりわけP E F Cは、上記の一般的特徴に加えて電池本体がコンパクトであること、反応温度が低いこと、実用化時期が早いと見込まれる等から、自動車用または家庭用の熱電併給装置として、近年多方面からの注目を浴びるようになってきた。

そこで、本書では同技術に対する認識を深め、今後の展望を考えられる際のご参考となることを願って、原理等の基礎的な話からはじめて、主要構成技術の概要、課題、あるいは経済性などを取りまとめた。

同編集に際しては、当所高倉毅プロジェクト試験研究部部長、蓮池宏同部主管研究員の協力を得て、エネルギー技術情報センター（センター長 小川紀一郎）において作成した。

おわりに、このシリーズの刊行は、財団法人電力中央研究所からの委託業務「エネルギー技術情報に関する調査」の一環をなすものであり、同研究所に対して深く謝意を表す。

2001年3月

財団法人 エネルギー総合工学研究所
理事長 秋山守

新エネルギーの展望

固体高分子形燃料電池

目 次

はじめに	1
1 P E F Cの原理と位置づけ	2
1.1 燃料電池の位置づけ	2
1.2 P E F Cの原理	3
1.3 P E F Cの特徴	6
2 P E F Cの特性と技術概要	7
2.1 P E F Cの性能	7
2.2 主要構成技術の概要	9
3 P E F C の開発状況	15
3.1 開発の歴史（概要）	15
3.2 P E F Cの適用に関するニーズの特徴	17
3.3 海外におけるP E F Cの取組み	17
3.4 日本におけるP E F Cの取組み	21
3.4.1 日本政府の取組み	21
3.4.2 N E D Oの研究開発	21
3.4.3 日本の企業の取組み	23
4 P E F Cの経済性	27
4.1 コスト目標	27
4.2 コストの構成	28
5 P E F Cの課題	30
5.1 自動車用の場合	30
5.2 定置用の場合	32
6 P E F Cの将来展望	33
7 あとがき	35

はじめに

燃料電池の技術開発が行われてから久しいが、ここにきて固体高分子形燃料電池（PEFC, Polymer Electrolyte Fuel Cell）の動向があらわだしい。

わが国におけるPEFC開発の初期においては、その対象は定置用特に家庭・業務用の電気・熱供給用あるいは分散型電源用が中心とされ、しかも技術的および経済性面に関し既存の技術との隔たりが大きいこともあってか、研究期間は長期化が予想され、研究内容は基礎研究面が重視され、さらに研究予算面では国の予算に少なからず依存するという形で進められてきた。しかし、最近、自動車用特に米国カリフォルニアにおけるZEV（ゼロエミッション車）の導入計画（2003年以降新車販売台数の10%をZEVとする計画）に見られる地域的な規制動向、それを受けたようなビッグスリーによる量産化計画、あるいは日本でもトヨタ自動車等による実用化計画発表などもあり、にわかにその実現が現実の様相をおびてきた。

自動車における研究開発推進の特徴は、基本的には自社資源を集中的に投入して短期実用化を狙った進め方をしているところにある。ここに自動車メーカーの実用化間近な燃料電池に対する戦略製品としての位置付けと期待の大きさが窺い知れる。しかし燃料電池システム全体の研究開発・実用化には莫大な資金が必要とされる。しかも、燃料の選択によってはそのシステム構成も大きく異なってくる。

従って現在は自動車メーカーといえどもシステムの全ての範囲にわたって自社で研究を進めるよりも部分的に進んだ他企業と組んで研究開発を進めたほうが時間的にも費用面でも研究開発の実効があがると見られているようである。

また、PEFCの場合、燃料が純水素であれば、そのまま利用できるが、その他の燃料の場合、必ず純水素への転換装置（改質装置）が必要である。改質には燃料の種類によって温度レ

ベルが異なり、例えばメタノールでは約300℃、ガソリンでは約700～800℃の改質反応時の温度が必要であり、特に起動時の時間短縮を要求される自動車の場合は、この燃料選択によって技術開発の難易あるいは性能が大きく左右される。

各メーカーがそれぞれの燃料電池を独自に開発したとしても、燃料の種類により発電システムの内容が異なるので、最終的に選ばれる燃料が確定するまではシステムも固まらない。一方、燃料選択は、燃料製造、輸送、給油システム等のインフラに関係し、また燃料選択自体が地球環境問題との関連もあり一企業、業界、あるいはもしかしたら日本のみでも決められない問題を含んでいる。現実には、どのような燃料が選択されても対応可能なような検討が進められているのであろうが、早い時期にその方向性を決定することは重要なことである。そのような視点もあり、業界、企業を超えた情報の連絡機関としては既に「燃料電池開発情報センター（FCDIC）（昭和61年発足）」等が存在していたが、最近経済産業省資源エネルギー庁の諮問機関である「燃料電池実用化戦略研究会」の発足（平成11年12月）、あるいは主に自動車用の早期実用化を重点的に検討・協議する「燃料電池実用化推進協議会」の発足（平成13年4月）等による超企業、団体としての動きがあり注目される。

一方、研究開発面に関しては、燃料電池は小渕政権下の政府が2000年を前にして発表したミレニアムプロジェクトの目玉の一つとして挙げられ、これをうけて平成12年度および平成13年度大きく進展した同技術関連予算のもとに特に定置式を中心とした研究開発がその加速化の実効をあげるべく取り組まれている。

PEFCは、まさに時の技術ではあるが、まだまだ実用化までには解決すべき大きな課題を抱え、その解決のためには技術面のブレークスルーも必要であろう。

そのうち最も大きな課題は、技術開発と大いに関係するが経済性の確保といわれる。特に自

動車用の場合、比較とされるガソリンエンジンが成熟した技術であるためにそれと並ぶためには現在より二桁のコストダウンが必要といわれている。

このような問題を抱えてはいるが、冒頭述べたようにPEFCへの期待は内外で急速に高まってきている。

本書は、PEFCの原理・特徴等の基礎的な点からはじめて、技術の位置付け、課題、現状等を比較的平易に記述するよう心がけたものであるが、本書が同技術を理解される際の一助になることを期待するものである。

1 PEFCの原理と位置づけ

1.1 燃料電池の位置付け⁽¹⁾

エネルギーの種類としては、力学エネルギー、熱エネルギー、電気エネルギー、化学エネルギー、光エネルギー等多くの種類があげられている。また、エネルギーは系の中では使っても物のように減ることなく別の形で保存される。これは、エネルギーの保存則あるいはエネルギー第一法則として知られているところである。

しかし実際にはエネルギーの種類によってその性質が大きく異なり、エネルギーによって良質のエネルギーと低質のエネルギーがあることが知られている。例えば、電気エネルギーから熱エネルギー、力学エネルギーへの転換に際しては、その転換効率は90%以上にのぼるのも稀ではないが、熱エネルギーから電気エネルギーへの転換に際しての同効率はせいぜい高くても約50%程度である。

このようなことから「熱エネルギー」はエネルギーの種類上最も低品位のものといわれ、そのため「エネルギーの究極の形態」あるいは「エネルギーの墓場」ともいわれる。

化学エネルギーである燃料から電気エネルギーへの変換、すなわち発電を行う場合には、従来の方法では燃料を燃焼させて（一般にボイラで）熱エネルギーに変換し、さらに蒸気タービン等で力学的なエネルギーに変換して、さらに発電機を経て電気エネルギーを得るという数段階の手順を踏んでいる。この手順は長年の実績ある技術であり何らその実用性には問題ないわけであるが、もし化学エネルギーから一挙に電気エネルギーが得られたらその手順は簡単になり、高効率化あるいは経済性向上など従来技術では得られない特長が期待される。

燃料電池は、まさにこの化学エネルギーから熱エネルギーを介することなく直接に電気エネルギーへと進むエネルギー変換技術であり、その点画期的発電技術であるといえる。

図1-1は、各種エネルギーの関係を示したも

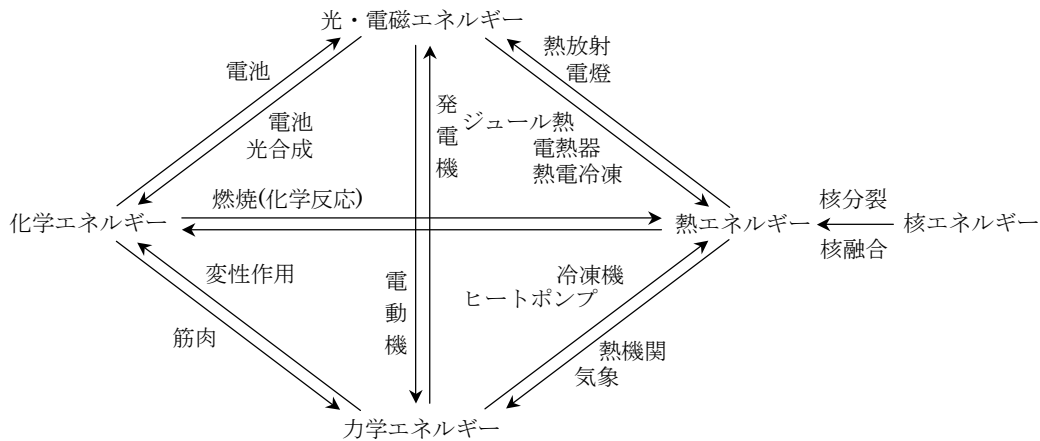


図1-1 エネルギー変換の例

(出典：斎藤孝基他，エネルギー変換)⁽¹⁾

のである。

そこで燃料電池の特徴をまとめると、同技術は従来の発電方式では到底得られない高効率発電が可能、またボイラ、蒸気タービン等を必要としない簡素化された機器構成により経済的発電が可能、さらに環境保全上問題とされる燃焼時の窒素酸化物、煤塵等環境汚染物質の発生がない、あるいは高効率であるがために二酸化炭素の発生も少ない等の特長をもった技術である。しかし、一方では完成された技術でないのだからそれらの特長は全て確認されたものではなく実証あるいは検証が必要とされる。

以上は、燃料電池の種類に拘わらず共通的な特徴であり、本書を展開するにあたっての基本的認識として述べたものである。

1.2 P E F Cの原理

ここではPEFCの原理面の特徴を説明しながら、燃料電池の一般的原理そのものにも若干触れることとする。

燃料電池とはその用語に「発電」が入っていないが、前述のように燃料のもつ化学的エネルギーから電気エネルギーに変換するれっきとした発電システムを意味する。

その基本としては、燃料の一形態でもある水素 (H₂) を電解質を介して酸素 (O₂) と相対峙させる時、まず水素を導入した極 (これをア

ノードまたは燃料極と称す) は水素がイオン化して電解質を通して反対極 (カソードまたは空気極) へ移動し、同時にイオン化した時放出される電子 (e⁻) は、電解質を通らずに導線を伝って外部へ抜け出しいわゆる電流となる。

一方、カソード側に導入されたO₂は、電解質を通して入ってくる水素イオンと外部の導線を通して入ってくる電子 (e⁻) と反応して水となって排出される。

この状態を示したのが図1-2である。

燃料電池は、水素と酸素の化学反応により発電
水の電気分解の逆反応
 $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + \text{電気} + \text{熱}$
(電気化学反応により電気+熱エネルギーが発生)

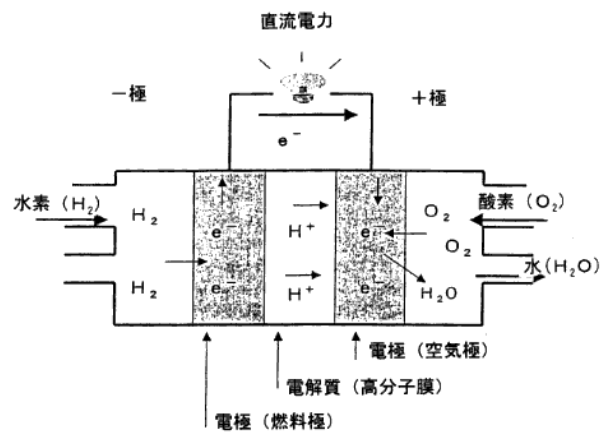


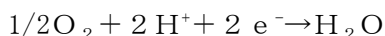
図1-2 固定高分子形燃料電池の仕組み

(出典：燃料電池実用化戦略研究会報告)⁽²⁾

従って、アノードでは



カソードでは



全体としては



の反応が行われる。

以上が簡単な燃料電池の原理であるが、問題は電解質に相対峙して水素と酸素をおいても特に常温で何等反応は起らず反応を起すためには高温が必要といわれる。その概要は後述するが、高温タイプの燃料電池である熔融炭酸塩形燃料電池(MCFC)や固体酸化物形燃料電池(SOFC)はその原理を応用したものである。

低温で反応を起こさせるためには触媒の力を借りる。触媒は、分子を原子に解離し、さらに電子をはぎ取り、イオンにまで変化させる性質を持っている。この反応は極めて早く平衡に達する。そのためにPEFCの温度レベルでも強い触媒反応作用を持っているものとして最もよく知られたものが白金である。

例えば、前述のようにアノードでは水素分子が触媒の作用により水素イオンと電子に分離されるわけであるが、ここで仲介をなす電解質はイオンは通すが電子は通さぬ性質のものである

ので、前述のようにイオンは、電解質（この場合、固体高分子膜）を通り、電子は外部回路の電導体を通ってともにカソードに至り、酸素との反応を完結し水を生成するわけである。

なお、導電率は高分子膜の水分含有量に著しく影響を受けることが知られており、そのため水分の供給による加湿が重要とされている。

従ってこの膜を加湿し適切かつ均等な湿潤状態に保つことがPEFCにおいては電解質の性能維持のため重要である。以上における電子の流れが電流（但し、電流の方向という場合は電子の流れとは逆）であり電気エネルギーを産み出す。

以上の考え方に基づく固体高分子膜の作動原理特にイオンが伝播するメカニズムの概要を図1-3に示す。

このように、燃料電池においては、反応物質（水素等の燃料と酸素）、触媒、および電解質の存在がとりわけ重要であるといわれる。

ところで、白金系触媒は、一酸化炭素と非常に結合し易く、結合した後は活性を失ういわゆる触媒の被毒作用が起るので、燃料中の一酸化炭素の濃度はあるレベル以上にならぬように厳しく制限される必要がある。

図1-4に、改質装置から燃料電池本体を経て

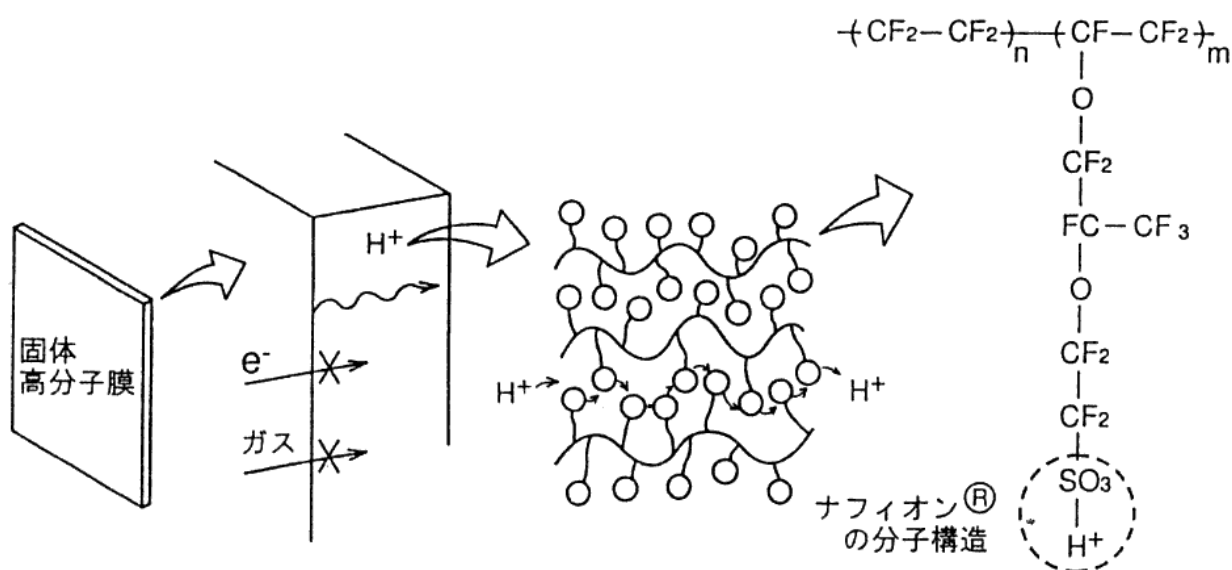


図1-3 固体高分子膜の動作原理

(出典：光田憲朗，バッテリー技術シンポジウム，1998)⁽⁵⁾

電気出力となる迄の燃料電池発電システムの概念を示す。

以上はPEFCの原理を中心として説明したものであるが、先にも紹介したとおり燃料電池にはその他りん酸形(PAFC)、溶融炭酸塩

形(MCFC)、固体酸化物形(SOFC)がそれぞれの目的と特徴の下に研究開発が進められている。ただしそれぞれの詳細は本書の目的から外れるのでここでは省略するが、表1-1に各種燃料電池の概要を示す。

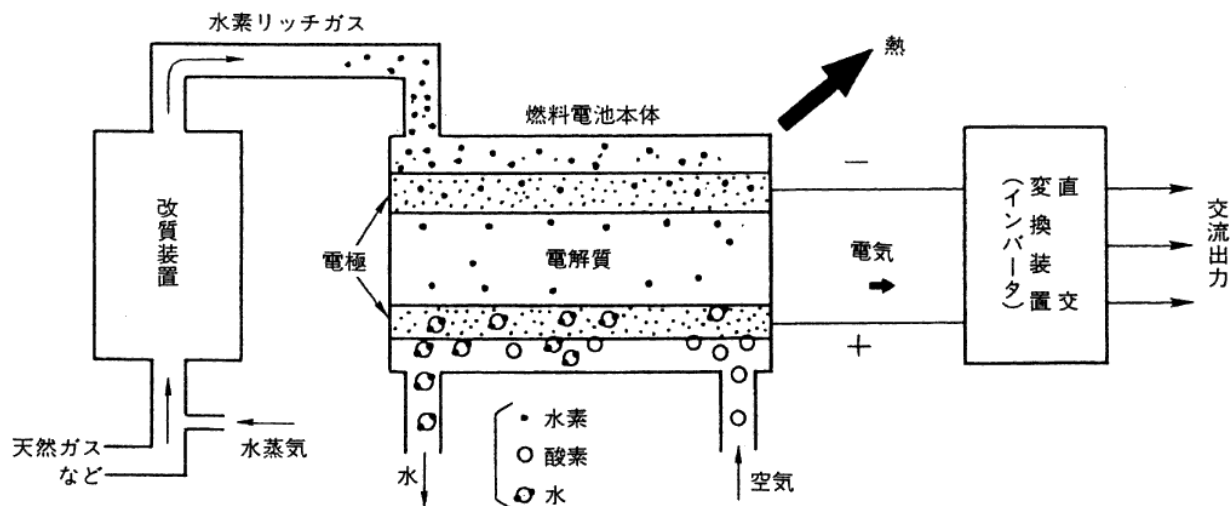


図1-4 燃料電池発電システム

(出典：本間琢也，季報エネルギー総合工学 第23巻 第3号)⁽⁶⁾

表1-1 燃料電池の種類と特徴

	りん酸形 (PAFC)	溶融炭酸塩形 (MCFC)	固体酸化物形 (SOFC)	固体高分子形 (PEFC)
電解型	リン酸水溶液	リチウム・ナトリウム系炭酸塩 リチウム・カリウム系炭酸塩	ジルコニア系 セラミックス	高分子膜
作動温度	200℃	650℃～700℃	900℃～1000℃	70℃～90℃
燃料	天然ガス(改質) メタノール(改質)	天然ガス 石炭ガス化ガス	天然ガス 石炭ガス化ガス	水素 メタノール(改質) 天然ガス(改質)
発電効率 (HHV)	35%～42%程度	45%～60%	45%～65%	改質ガスを用いた 場合、30%～40%
特徴	ほぼ商用化段階	高発電効率 内部改質が可能	高発電効率 内部改質が可能	低温で作動 高エネルギー密度 移動用動力源及び 小容量電源に 適している

(出典：固体高分子形燃料電池，通産省・NEDO資料)⁽⁷⁾

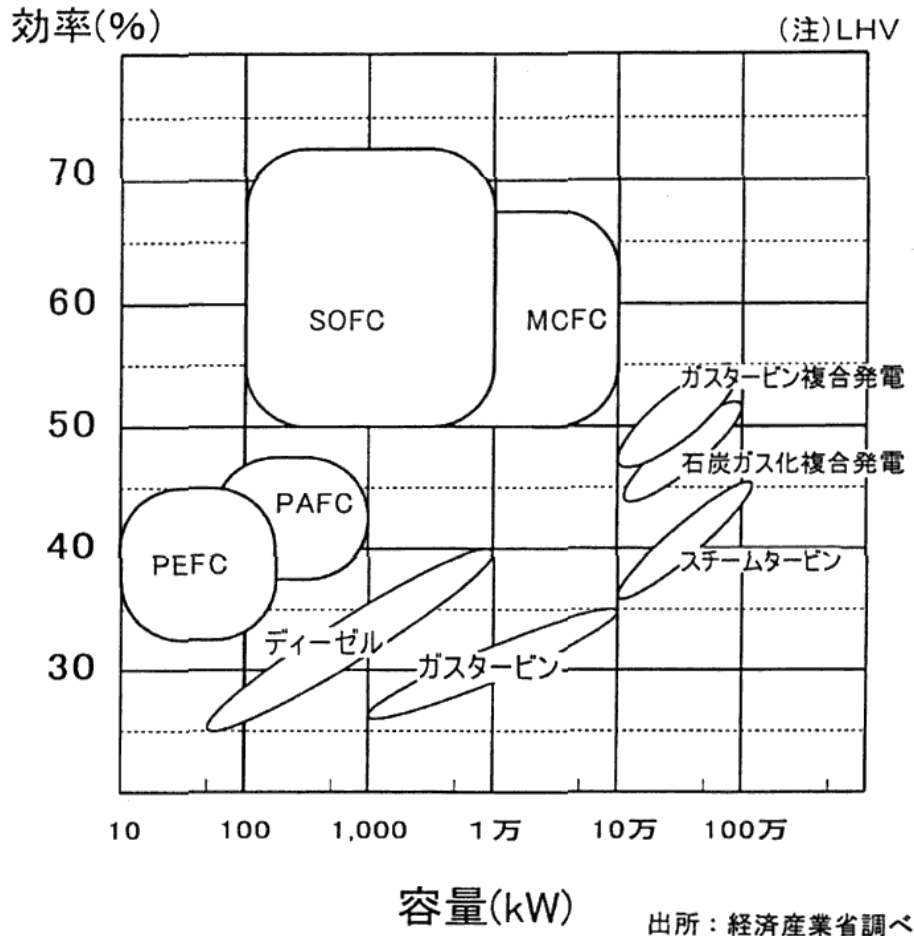


図1-5 各種発電システムの発電効率

(出典：燃料電池実用化戦略研究会報告)⁽²⁾

また、図1-5に各種燃料電池の容量（出力規模）と効率の関係を示す。

1.3 PEFCの特徴

以上の原理的な性質もふまえ一般的にあげられるPEFCの特徴をまとめると次のとおりである⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

まず利点としては、

- ① 作動温度が低い（70～90℃）ため取り扱いが容易、起動時間が速い等、起動性・運転操作性に優れる。
- ② 電流密度が高いこともあり、小型軽量化が可能。

すなわち小容量電源用および移動用電源に適している。

- ③ PEFC単体の発電効率（HHV基準）は35%～50%（改質を含むと約30～40%）、熱利用も行うコージェネ適用の総合効率では65%以上も期待でき、発電効率あるいはエネルギー利用効率は（他の小規模熱機関等と比較し）高い。

- ④ 電解質が固体の高分子膜であるため、電解質の逸散の心配がなく、メンテナンスが容易で長寿命が期待できる。
- ⑤ NO_x、SO_x、煤塵の排出はなく、環境特性に優れる。
- ⑥ 発電に際し、回転部がないため騒音、振動の問題がない。
- ⑦ 酸性型イオン交換膜であるため、燃料ガス中にCO₂を含有していても支障ない。

次に課題としては、以下が挙げられる

- ① 白金触媒を使用するため改質ガス等燃料中の一酸化炭素（CO）により被毒を受ける。そのため、COの除去・低減度合（通常10ppm以下）が厳しく要求される。
- ② 膜が含水状態で動作するため、加湿などの水分管理が必要。
- ③ 特に上述①の関係もあり石炭ガス化ガス等COを多く含むガスの利用は困難である。

2 P E F Cの特性と技術概要

2.1 P E F Cの性能

ここでは燃料電池の一般的性能から概説し、その過程でP E F Cの性能面の特性について述べる。

(1) P E F Cの理論効率^{(2) (6) (10)}

燃料電池の場合の最終的反応は前述のように水素と酸素から水を生成する次の反応による。



すなわち、水素が燃えて、水になる時の反応として、エネルギー変化（これを ΔH と称す）に注目すると、 ΔH の値はベースとなる温度レベルで決っており、25℃の場合（生成する H_2O 1 molあたりとして）286KJ/molのエネルギーとなる。すなわちこれは水素の発熱量（生成する水が液体の場合、高位基準）というべき値である。

燃料電池は、このエネルギーの変化を電気と熱の形にして取出すシステムであり、そのために用いられる式が次式で表示されるギブスの式である。（この反応式は等温等圧反応をベースとして熱力学の基本状態式等を用いて導き出されたものである。）

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S$$

ここに、

ΔG は、取出し得る電気エネルギーあるいはギブスの自由エネルギー変化

ΔH は、反応熱あるいは燃焼熱あるいは反応のエンタルピー変化

Tは、システムの温度（絶対温度）

ΔS は、反応によるエントロピー変化を表わす。

さて、水素の場合、常圧で25℃条件において、上記式の値はそれぞれ一定の値となる。

その値は、 ΔG は約237KJ/mol、 $T \Delta S$ は約49KJ/molである。

この時の燃料が持っている全エネルギーから取出し得る電気エネルギーの比率を理論効率と

いい、この場合は、

$$\Delta G / \Delta H = 83\%$$

の値となる。すなわち、電気エネルギーに83%、残りの熱エネルギー（熱放出）が17%ということの意味する。

さて、水素と酸素を燃焼させると上記の ΔH に相当する286KJ/molの熱は出るが、仕事（又は他のエネルギー）はそのままでは取出不い。

しかし、燃料電池で直接水素と酸素を前述の

考え方のように電解膜を通して反応させ電気エネルギーを取出すことができれば、 ΔG である237KJ/molが得られることを意味する。

図2-1は、この概念を示したものである。

なお、上記の値は取出し得る理論上の最高効率を示したもので、実際の効率は、電気が発生する（電流が流れる）と同時に種々の損失が発生するため同値より低くなる。

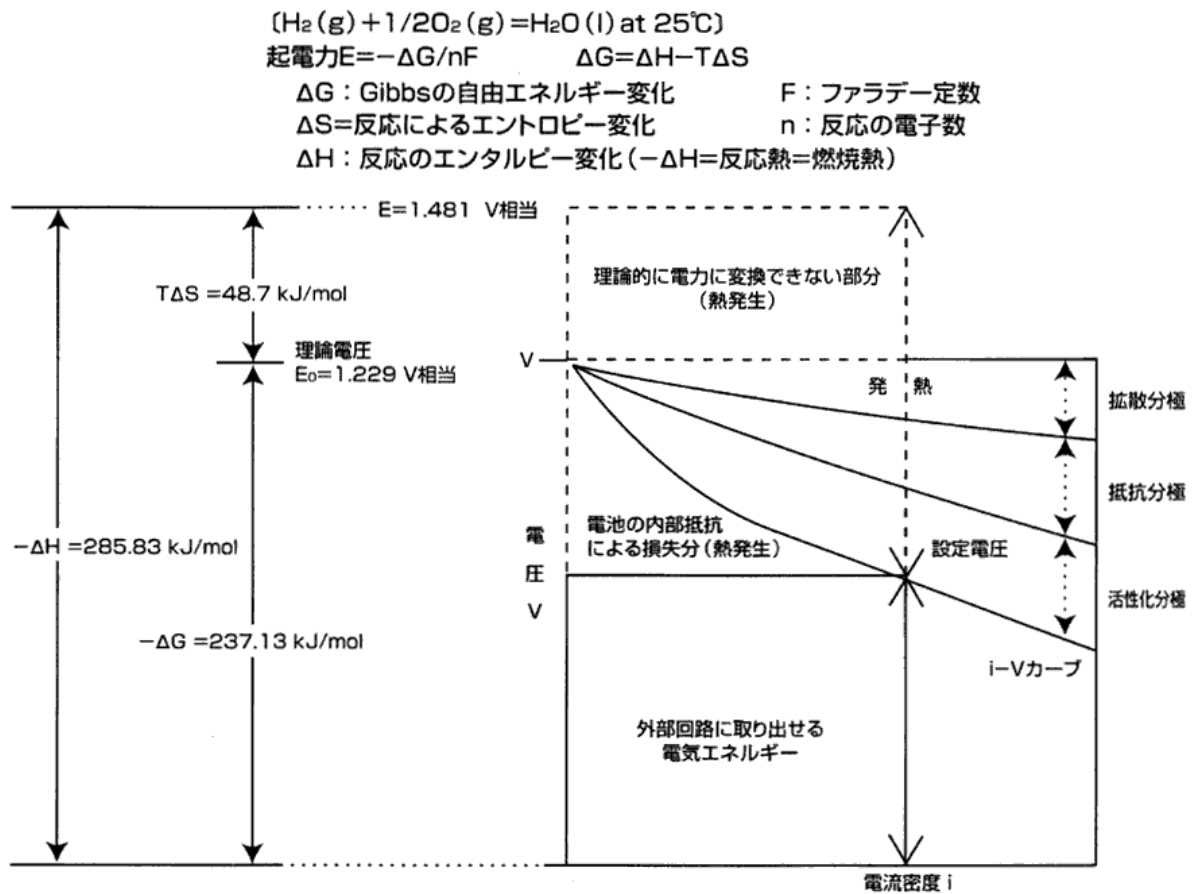


図2-1 燃料電池の単セル特性とエネルギーの関係

(出典：固体高分子形燃料電池，通産省・NEDO資料)⁽⁷⁾

(2) 実際のエネルギー効果

燃料電池のような電子とイオン間の電荷の授受により反応が進むいわゆる電気化学反応では、電池の起電力 (E_0) は、前述の電気エネルギー (ΔG) と反応する電子の数によって次のように整理されることが知られている。

$$E_0 = -\Delta G / nF$$

ここに、 F はファラデー定数といわれる物理

定数であり、

$$F = 96,500 \text{ クーロン/mol}$$

また、水素分子の場合は、電子数 (n) = 2 であるので上式により、

$$E_0 = 1.23 \text{ ボルト}$$

という理論的電圧（これを起電力）が示される。

理論的といったのは、電流が流れると理論効

率の場合と同様電池内での種々のエネルギー損失が発生し電圧が低下するためである。なお、起電力が低下する現象を分極と呼ぶ。

分極現象には、次のとおり3つの種類がある。

電極などが活性化のためのエネルギーを必要とするために起因する「活性化分極」、電極と電解質間等の抵抗に起因する「抵抗分極」、そして電極における反応物質の補給、生成物の除去等に起因する「拡散分極」である。

前述図2-1の右図は、この関係を示したもので、電流が大きくなると分極も増大する一般的傾向を示している。

2.2 主要構成技術の概要⁽⁸⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾

本書はPEFCの専門書ではないので技術の詳細は省略するが、ここではPEFCを構成する主要技術にはどのようなものがあり、どのような特徴と働きをなすのかという点を中心に述べる。

取扱う構成技術としては、「スタック」、
「電解質膜」、「電極触媒」、「セパレータ」、
および「改質器」である。

(1) スタック⁽¹⁰⁾

これまでの説明では、燃料電池は1つの膜をはさんで発電する一つのユニット（これを単セルという）の場合について示した。

単セルの電池電圧は通常0.6~0.8V程度なので、システム上必要な電圧を得るためには単セルを何段かくり返し重ねる（積層化）する必要がある。この積層化されたものがスタックと称されるものである。

このスタックは一般にボルト等で締付けられ一体化したものと組立てられる。

なお、PEFCの場合のスタックは、電極面が鉛直になるように水平方向に積層化するのが一般的である。これは、発電に伴って生成する水の流れを上から下向きにして（自重で）排出しやすくすること、またPEFCの場合、反応温度を比較的強く抑えるために冷却部（冷却板）の数が多いためによる。

図2-2は、スタックの概念を示したものである。

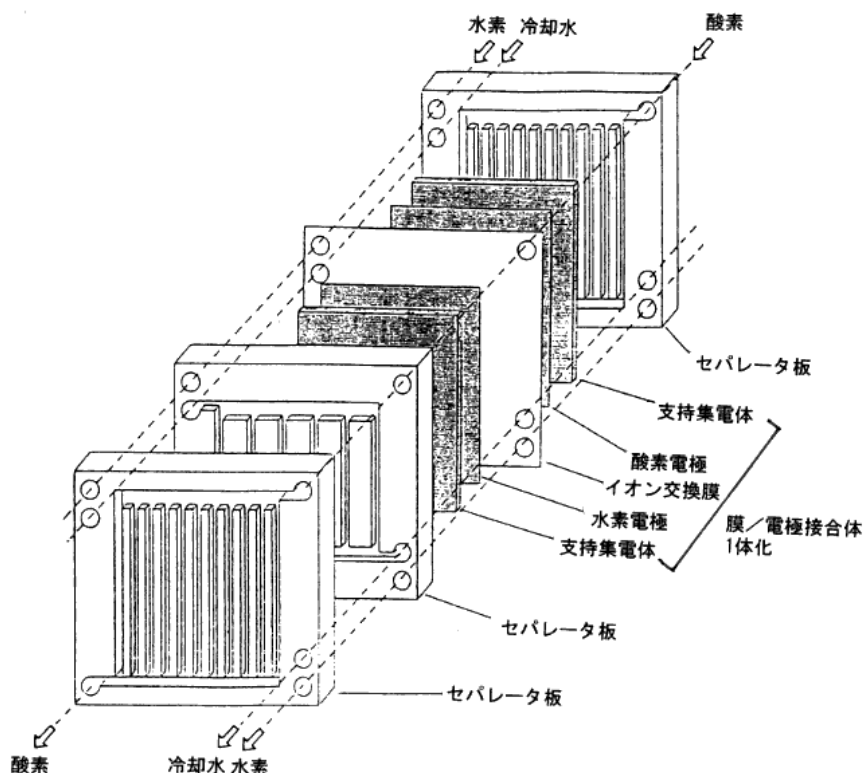


図2-2 PEFCの構造

(出典：燃料電池PEFC，燃料電池情報センター)⁽¹⁰⁾

次に単セルの部分構造をもう少し詳しく述べる。

単セルは、電解質膜（イオン交換膜）、触媒電極、支持集電体、セパレータ等により構成される。

それぞれの内容については後述するので、ここでは配置的關係のみ述べる。

イオン交換膜をはさんで（水素側，酸素側それぞれに）触媒電極が配置され，その外側にカーボンペーパー（又はカーボン布）から成る支持集電体が配置される。この部分は一般に熱圧着されて一体化されたものとして作られるが，これは膜／電極接合体とも呼ばれる。その外側にセパレータが配置されるが，これは燃料ガス，冷却水を流す溝をもった緻密なカーボン板であり，これが単セルの最外側の壁となる。

なお，セパレータは隔壁板，インターコネクタ，バイポーラプレート等とも呼ばれ，単セルを電氣的に接続する導電体である。また，カーボン以外の材質が用いられることもある。

(2) 電解質膜（イオン交換膜）

PEFCで使用される膜は，フッ素樹脂系イ

オン交換膜が一般に用いられる。

同イオン交換膜としては，米国デュポン（Du Pont社）のナフィオン（Nafion）膜，旭化成のアシプレックス（Aciplex）膜，旭硝子のフレミオン（Flemion）膜が知られている。これらは，いずれも水素イオン（プロトン）伝導性の高いものとして選ばれてきたものである。

例えば，ナフィオン膜の場合の構造は図1-3にも示したが，同膜に電極を接合した部分における写真を図2-3に示す。

このような膜はパーフルオロ系膜（又はパーフルオロスルホン酸系膜）と呼ばれるものであるが，製造工程が複雑でコストの大幅低減が困難なこともあり，その代替技術の研究がなされている。

前述の原理面からも伺えるように膜は薄い方が抵抗が少ない，さらに水分膨潤（加湿）が不要になる可能性もあり高効率化にも結びつくので極力薄肉化が求められる。現在20～50 μ mが実用レベルに達しているといわれるが，余り薄くすると温度が上がった時，水を含んでクリープしやすくなり強度が落ちるなど新たな問題発生が指摘されている。

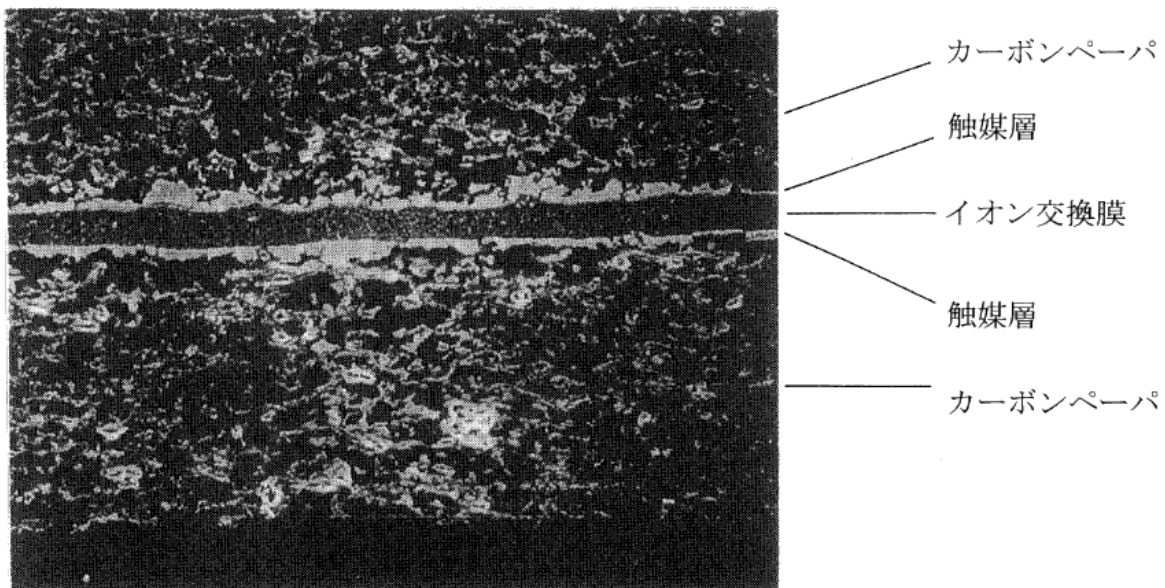


図2-3 膜／電極接合体の断面SEM写真

(出典：燃料電池PEFC，燃料電池開発情報センター)⁽¹⁰⁾

それらの問題に対処するための代替技術として特に低コスト化の観点から部分フッ素化膜、炭化水素系膜等の研究開発が進められているが、未だ前者をしのぐものは見つかっていない。またパーフルオロ系膜も量産化が進めばコスト低減の可能性もあり、今後の動向が注目される。

なお、PEFC膜自体は、手で触れても害の

ない無色透明のフィルムで、燃料電池の目的に適うように電子絶縁性を有し、またガスも透過させず（水素イオンのみ透過させるものであるが）、 $50\mu\text{m}$ 程度までの薄さとしても必要とされる差圧には耐える強度をもっているといわれる⁽⁷⁾。

同交換膜の模式図と写真を図2-4に示す。

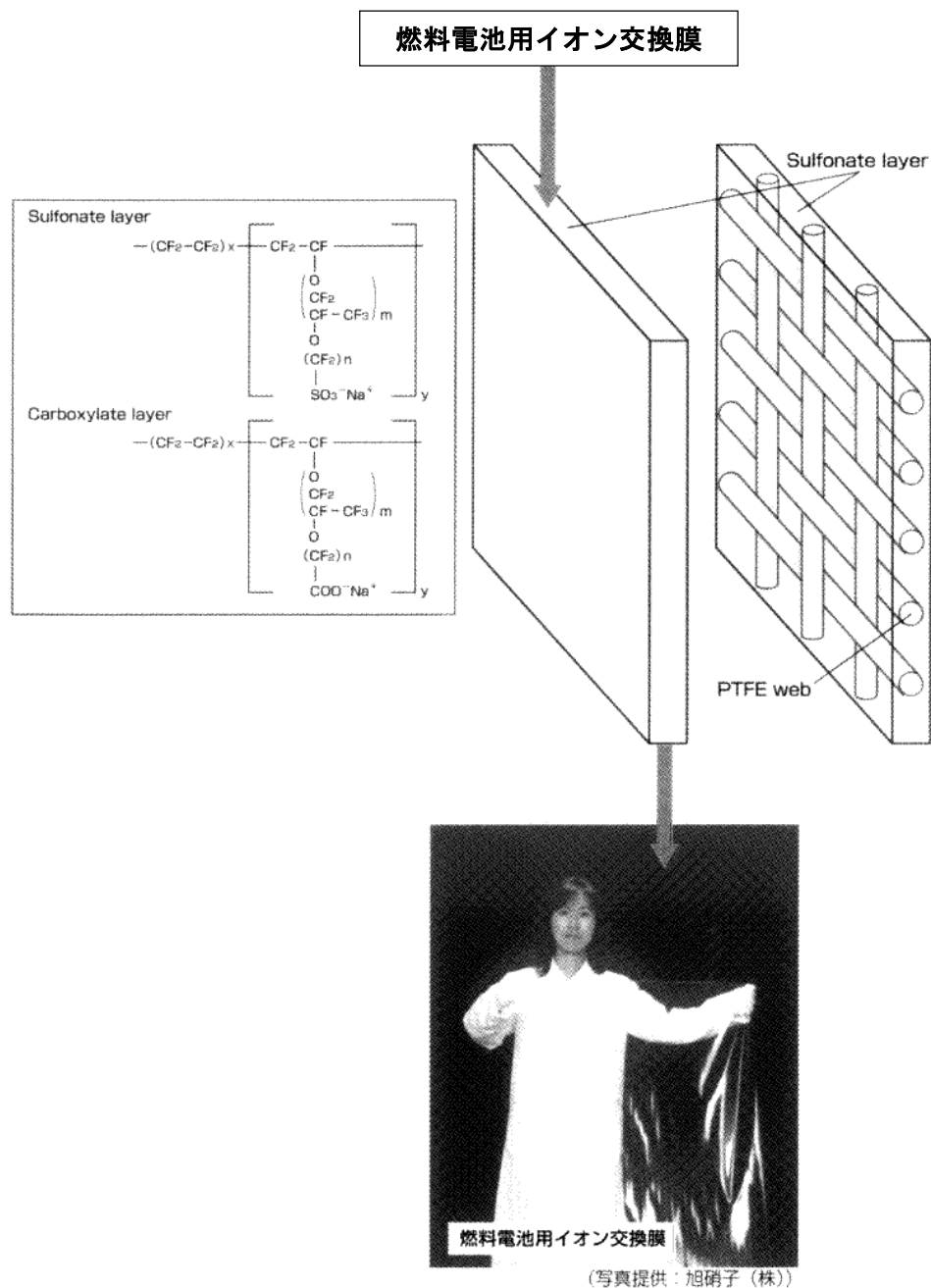


図2-4 イオン交換膜

(出典：固体高分子形燃料電池，通産省・NEDO資料)⁽⁷⁾

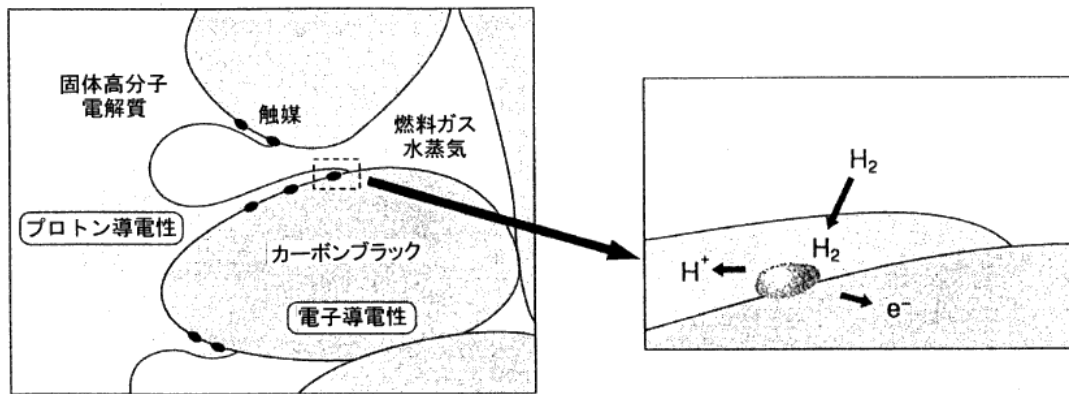


図2-5 反応が生じる三相界面部分の概念図

(出典：小黒啓介，化学 Vol. 54 No. 6)⁽¹⁵⁾

なお、本目的に沿った膜は現状では前述紹介の膜が最高位とされるが、現在世界各国の関係研究機関等により、化学構造からはじめて、耐久性、コストの面からより優れたものを目指して研究開発が進められている。最近、高分子膜自体で 20μ の厚さで、さらに膜に触媒電極を取り付けた状態でも $40\sim 50\mu$ の厚さにとどまった技術の開発・商品化の報告などもあり（例、米国W. L. ゴア&アソシエーツ社）、今後の同分野における研究開発の動向が注目される。

(3) 触媒（触媒電極）

燃料（水素）が水素イオンと電子に分かれる現象（酸化）は、前にも述べたが電解質膜があるだけでは反応せず触媒が必要である。同触媒としては、白金が最も適しているといわれる。また、発生した電子を集める電極としては一般にカーボンブラックが用いられるが、構造的には白金の触媒の粒子を同電極に薄く担持させたものが用いられる。これを触媒電極という。さて、白金を用いる場合の課題としては、白金は非常に高価であること、またCOに対する被毒の抵抗が極めて弱いという2つの問題がある（また将来白金が大量に使用されるようになると資源量からの制約もでてくることを指摘する向きもある）。

第1の問題に対しては、白金をいかに効率よく利用できるようにするかということを意味する、そのための有効手段の1つとして電極作動

面積の3次元化がある⁽¹²⁾。

電極反応はいわゆる3相界面といわれる電解質-触媒電極-反応ガス（水素）の界面で起るが、PEFCのように電解質が固体の場合は、同反応は接触界面に限定され、白金の利用率が低下するといわれる。このため膜と同じ材料から成る溶液を作り（例、Nafion溶液）、電極と膜との接合側に塗布（すると電極側に浸透）して、電極作動面積を3次元化する方法である。

図2-5はこの概念を示したものである。電解質、触媒電極、反応ガスはそれぞれミクロ的に見たら液相、固相、ガス相を呈しており、このように3相が同時に接触できる面積が大きいこと、そしてその様なところに白金が集中的に担持できれば、白金触媒のより効果的な利用が可能という見方から模式的に描かれた図である⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。

他の方法は白金の微粒子化である。粒子サイズを小さくすると（例えば5nm以下）、接触面積が拡大し、従って全体的に性能が上り白金量を低減できる⁽²⁴⁾。いずれにせよ、現在これらの対策によって単位面積あたり白金の使用量（白金担持量）は、かつての 4 mg/cm^2 から現在はその1/10レベル（ $1\sim 0.1\text{ mg/cm}^2$ ）迄可能となってきた。

しかし、将来のさらなる低コスト化のためには 0.01 mg/cm^2 台までの低減が必要という意見もある⁽¹³⁾。

白金を触媒とした時の第2の課題はこれも既

に述べたところではあるが、白金がCOに非常に弱い、すなわち被毒の問題である。これは純水素を利用する場合は問題とならず、メタノール、ガソリン等から改質して水素を取出す場合のCOガス濃度抑制の問題であり、結論的には、CO濃度を許容レベル（例えば10ppm）にまで下げることと、白金にルテニウム（Ru）等を混合して耐被毒性を高める材料・構造面の検討の2方向から対策が進められている。（詳細は燃料改質の項で述べる）

(4) セパレータ（バイポーラプレート）

セパレータの役割は、単一の電池（セル）を複数枚積み重ねて、所要の電圧を得る際の各セル間のつなぎ（積層化機能）とその他必要な機能をもたせるために用いられる。

その他必要な機能としては、燃料や空気をセルに供給する供給通路の役目、電流（電子）を集めて取出す役割が必要とされる一方、ガスは通さず、更に高分子膜の表面が強酸性となるため耐酸強度の強い材料であることが要求される。そのための素材としては一般にカーボン板が用いられる。

上述のような用途に対してガス流路を形成するための溝加工など複雑な形状を有することになり、コスト面で占める割合も大きなものとなるので、樹脂モールドカーボンやプレス加工が可能な製造法を取り入れたカーボン板または発泡グラファイトの採用など、製造法を含めての検討がなされている。

その他チタンやステンレス等の金属類の適用も検討されているが抵抗が大きく、メッキ等の表面処理が必要になるという問題を有している。

(5) 改質器

① 改質器の役割

PEFCの燃料としては水素が理想的であるが実際には天然ガス、メタノール、ガソリンなどから水素に改質した上でPEFCに適用する必要がある。

その際、改質器に求められるのは、いかにそれに必要なエネルギーを少なくするか（改質温度を低くするか）、および起動時間をいかに短くするかという点である。

改質方法としては、水蒸気改質法と部分酸化法が用いられ、用途（発電用あるいは自動車用）に応じて使い分けられる。ただし、部分酸化の場合は酸素を用いて生成した水素の一部を消費するため効率が低下しやすいという問題が指摘されている。

（注．燃料改質の詳細は後述する）

一方、改質の場合一般にCOが必ず発生するが、そのため（その程度によっても異なるが）白金の被毒問題が生じる。

COは白金に強く吸着する性質をもっており、一旦白金に吸着したら触媒機能が失われる。これを防ぐには燃料ガス中のCO濃度を抑えるか、一旦白金に吸着したCOを酸化して取除くしかない。ただし、後者の場合でも燃料ガス中のCO濃度はある程度は低いレベル（例えば100ppm）にあることが必要とされる。その除去方法としては、シフト反応を利用したCO低減（ $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} (\text{g}) = \text{CO}_2 + \text{H}_2$ ）、選択酸化触媒によるCO除去、あるいはPSA（Pressure Swing Adsorption, 物理吸着法）等によるCO除去等があげられている。

一方触媒自体でCO被毒の耐久性を高める方法の一つとしては、前にも触れたが触媒に白金（Pt）に加えてルテニウム（Ru）を用いる方法がある。

白金とルテニウムを隣り合わせで配列することができれば、ルテニウムは酸素（O）を引きつける作用があるので、水分子から酸素を取り込み、隣接した白金上のCOを酸化してCO₂

に変わる役割をするといわれる⁽¹⁴⁾。

図2-6は、この関係を示したものである。

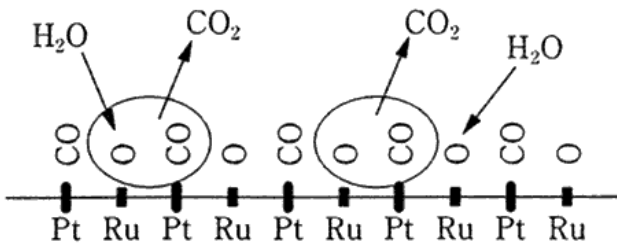


図2-6 ルテニウム (Ru) の役割

(出典：固体高分子形燃料電池の開発と応用，
(株)エヌ・ティー・エス)⁽¹⁴⁾

② 改質器の働き⁽⁶⁾⁽¹⁴⁾

ここで、改質器の働き（メカニズム）を概説する。

改質器全体のシステムは、図2-7に示されるとおり一般に脱硫器，改質器，CO変成器から構成される。

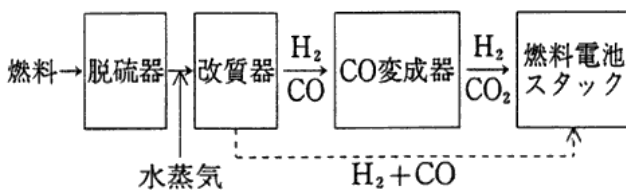


図2-7 燃料処理システムの概要

(出典：本間琢也，
季報エネルギー総合工学 第23巻 第3号)⁽⁶⁾

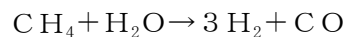
通常天然ガス，ナフサには5～100ppmの微量

のいおう分が含まれているので，脱硫器にて除去する。

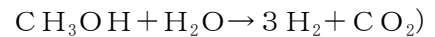
これは原理的には，製品水素の1部をリサイクルして脱硫塔において触媒介在（例 Ni-Mo 触媒）で約350℃の温度条件下で脱硫（水添脱硫）を行わせるものである。これにより仕上がりのおおう分は0.1ppmレベルまで処理される。

改質方法は2方法がある。

一つは，水蒸気改質である。例えばメタンの場合で示すと次式で表わされる。



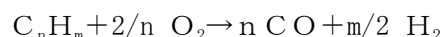
（メタノールでは，



この反応は，吸熱で外から熱を加える必要があり，また運転温度も天然ガスの場合は700℃～800℃，メタノールでは300℃位にする必要がある。

このように吸熱して高温にするため外から熱の供給を行う必要があるが，そのために熱交換器（例 プレートフィン形）を使った加熱が行われる。この加熱のための時間がかかることから特に自動車用では起動時間の短縮を図る目的で，吸熱ではなく発熱にして短時間で行う方法，即ち部分酸化法またはその組み合わせ方法が検討されている。

その場合の反応式は次のとおりである。



メタノールの場合の水蒸気改質法と部分酸化

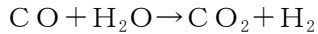
表2-1 メタノールの水蒸気改質と部分酸化改質の比較

	水蒸気改質方式	部分酸化方式
触媒 (例)	銅-亜鉛系触媒	ニッケル系触媒
改質温度	300℃	600℃
改質反応	$\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{H}_2 + \text{CO}_2$ 131kJ/mol 吸熱	$\text{CH}_3\text{OH} + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{CO}_2$ 155kJ/mol 発熱
改質ガス組成 (CO対策後推定値)	H ₂ : 63%, CO ₂ : 22% N ₂ : 4%, H ₂ O: 11%	H ₂ : 48%, CO ₂ : 20% N ₂ : 21%, H ₂ O: 11%
変換効率	726kJ/mol メタノール (HHV) ↓変換効率98% 711kJ/mol 水素 (HHV)	726kJ/mol メタノール (HHV) ↓変換効率65% 474kJ/mol 水素 (HHV)
始動性	△	○
負荷追従性	△	○

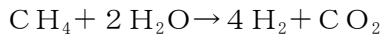
(出典：光田憲朗，バッテリー技術シンポジウム，1998)⁽⁶⁾

法の比較を表2-1に示す。

さて、以上の反応で出てきたCOは、次にCO変成器に導入される。これは、シフト反応と呼ばれるもので次の反応式による。これも触媒（Cu-Zn系）介在下で水蒸気を投入して行われる。



従って、前述の式と合わせた全体的反応としてはメタンの場合で示すと次式となる。



なお、実際にはこの反応器の出口でCOが全てなくなるのではなくて、一般に0.5~1%のCOが残る。燃料電池にはCOは例えば10ppm以下の低レベル迄低減する必要があり、そのためCOのみを除去する装置例えばCO選択酸化器等によりCOを除去する必要がある。メタノールの一般的な水蒸気改質の構成図を図2-8に示す。

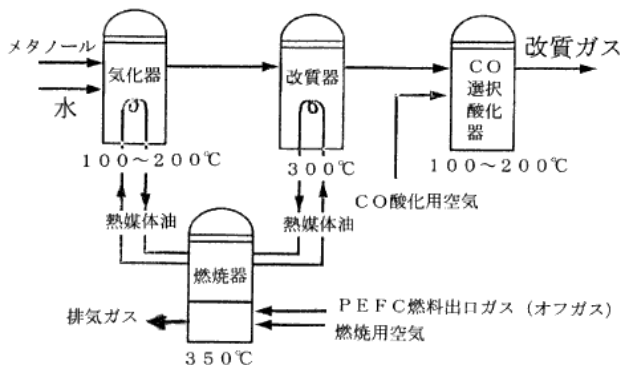


図2-8 メタノールの一般的な水蒸気改質の構成図
(ダイムラーベンツのNecar 3 など)

(出典：光田憲朗，
バッテリー技術シンポジウム，1998)⁽⁵⁾

3 P E F C の開発状況⁽⁷⁾⁽¹⁴⁾

3.1 開発の歴史 (概要)

(1) 欧米の歴史

P E F C は1950年代後半にアメリカのG E (ゼネラルエレクトリック) で開発がはじめられ、1960年代には早や出力1 kWの水素-酸素による燃料電池として宇宙船(ジェミニ)に搭載されたことはよく知られているところである。その時に使用された膜は炭化水素系のイオン交換膜で、これはスチレンとジビニルベンゼンから比較的安価に合成できたが、寿命が数百時間しか持たないという問題があった⁽¹⁴⁾。その後、アメリカのデュポン(Du Pont)は、その開発したイオン交換膜(ナフィオン)は耐久性にも優れたものでNASAの宇宙計画用としての採用を目指した。実際には1969年に生物衛星(Biosatellite)に搭載されている。これは、高分子鎖の中にHがない(パーフルオロ構造といわれる)もので、類似の高分子膜にテフロンがあるが、化学的に安定なこと熱的にも約100℃迄は耐える強度があることが特徴であった⁽¹⁴⁾。

その後スペースシャトル用電源を目指して改良が加えられた。ただし同シャトル用は性能面でアルカリ型燃料電池に及ばなかったとの理由で実採用に至らなかった(1974年)。

その後G Eは本技術を軍用への適用を目指して開発を進めたが、1984年にU T C (ユナイテッドテクノロジー) に技術と登録商標(S P E[®])を譲渡し、その開発は中止されている⁽⁷⁾。

なお、現在使用されているのはパーフルオロスルホン酸系といわれるイオン交換膜である。この膜の分子構造が第2.2-(2)項にて説明したものであるが、主鎖はテフロン^(※1)類似の構造であるが、主鎖にエーテル結合^(※2)を含んでおり、側鎖にスルホン酸基を持ったものである。現在、デュポン、ダウケミカル、旭化成工業、旭硝子が類似の膜を作っているが、大体基本構造は類似しているといわれる⁽¹⁴⁾。

※1 ポリテトラフルオロエチレンのDu Pont社の
商品名

※2 エーテル結合 -C-O-C-

その後、GEから技術導入したドイツのジーメンス (Siemens) は、潜水艦用として、また前述のUTC社は宇宙における太陽電池からの水電解による水素を利用したPEFCの研究開発を進めている。

しかし、本格的にPEFCの分散形電源 (定置) 用、あるいは自動車用としての適用に顕著な成果をあげたのはカナダのバラードパワーシステムズ (現在ダイムラー・クライスラー、フォードとの三社により共同研究実施) といわれる。

同社は、1980年に独自の研究を開始し、その後カナダ国防省の資金を得て本格的な研究へと進んでいる。同社はイオン交換膜としてダウケミカル社の膜 (Dow膜) を使って1987年に0.4Vで6 A/cm²というそれ迄にない高出力の実証データを得ている。

一方、アメリカのロスアラモス研究所 (Los Alamos National Laboratory) では、コスト低減の最大の課題でもある白金使用量 (白金担持量) の低減研究に取組み、それまでの必要量といわれた4 mg/cm²から0.45mg/cm²まで低減できるとする研究成果を得た。

膜に関しては、その後も色々な研究機関で研究が進められてきた。

例えば、前にも紹介したがW. L. ゴア&アソシエーツ社が開発した厚さ20 μ の高分子膜 (商品名ゴアセレクト) あるいは膜に触媒電極を取付けた厚さ40~50 μ の膜/電極接合体 (商品名プライメア) の例もある。

また、前述のフッ素系 (パーフルオロ系) 膜より更に高温強度、あるいはイオン伝導性で優れた膜の開発を目指した研究も盛んに行われているが、これに関しては未だ上述膜を超えた性能を有するものは正式には発表されていない。

以上は膜を中心として述べたが、PEFCを

システムとして見た研究開発は近年極めて盛んとなってきた。

欧米の場合は、自動車用への適用研究が先行している。特にカリフォルニア州の積極的取組姿勢を反映しビッグスリーを中心とした自動車メーカーあるいは石油メジャーがそれぞれの思惑と戦略の下にその研究開発にしのぎをけずっており、今や将にPEFCの夜明け前という状況を呈して来ている。

もちろん、この状況が日本へ影響するところ大であり、後述の日本の取組みが最近熱気を帯びてきている一因ともなっているといえよう。

(2) 日本の歴史⁽⁷⁾

日本での開発の歴史としては、製塩用海水濃縮技術あるいは力性ソーダ製造用食塩電解技術の発展の過程でイオン交換膜の研究開発が行われた。

同目的のためのイオン交換膜研究の実際の開発は企業によって行われた。

その第1は、旭化成による食塩電解用イオン交換膜 (パーフルオロイオン交換膜) である。

その第2は、旭硝子による同じく食塩電解用膜 (カルボン酸系フッ素樹脂膜) で1975年に「フレミオン」という名で商品化されている。

我が国の場合、燃料電池は一部 (1.2(1)項で) 概説したようにPEFCは、PAFC、MCFC、SOFCと並んでそれぞれ期待される特徴に応じたマーケットを狙って1980年代からその開発が進められてきた。その間1990年代後半には、PAFCのように技術的に実用化段階に入ったものもある。

日本での取組みの概要は大別すると分散電源用 (定置用あるいは可搬用) と自動車用に分けられる。

分散電源用は、家庭用又は業務用の発電あるいはコジェネ適用を狙った定置用とレジャー用・緊急用を狙った可搬用に分けられる。自動車用はバス・トラック等の大型車輛用と乗用車用に分けられる。

以下、それぞれの開発状況の概要を紹介するが、まずその適用に関する適用区分等の基本的考えを整理して示す。

3.2 P E F Cの適用に関するニーズの特徴

定置用と自動車用はそれぞれの用途に応じて要求されるニーズが異なるので開発状況の取り組みを述べる前にその特徴を簡単に紹介する。

まず発電効率に関しては、定置用の場合、最近の大型火力発電所における発電効率がコンバインドサイクルの採用等で非常に高くなってきているのでP E F C単独では同火力発電効率には敵わない。

(注、その点S O F CあるいはM C F Cは異なる位置付けとなる。S O F CあるいはM C F Cは電気出力による発電効率自体で火力発電より高いレベルが得られる可能性を持ち、いわゆる高効率分散型発電所として期待されるからである。)

従って燃料利用の総合的な利用効率をいかに高くできるかという視点から、コジェネレーションの採用が期待されている。もちろん、後述の自動車と比べてコスト目標レベルは厳しくないものの経済性が最終的な決定要因となることは論を待たないことである。

一方、自動車用では、現在のエンジンの効率が低い(例えば20数%)ためP E F C単体として例えば35%以上の発電効率が得られたら充分メリットがある。ただし、この場合も経済性が最終的な決定要因となるであろうが、その目標レベルは定置用と比べて極めて厳しい。さて、そのコストの目標レベルとはどのようなものだろうか。例えば、現在ガソリンエンジンはkWあたり2,000円といわれ、P E F Cの場合は効率の高いことを考えに入れてもkWあたり50ドル(約6,000円)には抑えたいといわれている。しかし、現状は約7,000ドル(約80万円)位なので2桁も下げる必要がある。

次に耐久性であるが、自動車用はおよそ5,000時間で12万kmの走行耐久性があればよい

といわれるが、定置用の場合は、40,000～60,000時間の耐久性と一桁大きい寿命が要求される。その他、起動時間の長短、環境特性等のニーズも異なるのでそれに見合った開発が必要とされる。

なお、P E F Cは自動車用および定置用の他可搬用即ち電子機器等のポータブル電源等のいわゆるマイクロフュエルセルとしての利用も考えられている。

3.3 海外におけるP E F Cの取り組み⁽²⁾

(1) 米国全般

P E F Cは海外、特に米国において宇宙利用を始めとして研究開発が進められ、発展してきたことは歴史の項で述べたとおりである。

定置用および自動車としての利用は、エネルギー省が中心となって運輸省、商務省等関係省庁の連携のもとに研究開発が進められてきた。

その活動の基になったのが「エネルギー政策法(Energy Policy Act of 1972)」と「水素プログラム法(S. M. Matsunaga, Hydrogen Research, Development and Demonstration Program Act of 1990)」といわれる。それらに基づき、「燃料電池プログラム」および「水素プログラム」が策定され、自動車用、定置用の研究開発に対する支援が行なわれることになった。

その中で、定置用としては、地方の電力システムの弱い所での燃料電池によるコジェネレーションシステムとしての適用が進められ、数十kWから200kW級の実証機を兼ねた設備が国立研究所や軍関連施設へ導入されてきているといわれる。

自動車用としては、クリントン前大統領が1993年に提唱した次世代自動車の技術開発を担う共同実施枠組み(P N G V ; Partnership for New Generation of Vehicle)の中で技術開発が推進されてきた。

P N G Vは、米国の国内自動車産業の国際競争力向上を目的として、具体的には、燃料消費率(燃費)に対して、2004年度に80マイル/ガ

ロン (33.4km/ℓ) 達成の目標値をかかげている。参画企業は、ゼネラルモータ (General Motor Corp) , フォード (Ford Motor Company) , およびダイムラー・クライスラー (Daimler Chrysler AG) のいわゆるビッグスリーの他に、部品会社, 大学, 国立研究所である。

ただし, 同PNGV計画では設定されたスケジュールを考えた場合, ディーゼル・ハイブリッド車が最有力とされ, 燃料電池自動車は, それより3~4年遅れると見られている。

なお, 燃料電池の燃料はガソリン, メタノール, 軽油等考えられる全ての燃料が対象と言われているが, ここ数年はガソリンに最も重点がおかれている様子である。

(2) カリフォルニア州

自動車用燃料電池の導入・普及においてカリフォルニア州は先導的な役割を果たしてきている。特に本技術の開発実用化へ大きな役割を示したのが, 同州の大気資源局 (CARB; California Air Resources Board) によるZEV (Zero Emission Vehicle) 規制 (1990年) の制定である。同規制は, メーカー毎に新車販売数に対して一定割合のZEV販売を義務付けたもので, 具体的には2003年以降に新車販売台数の10%導入を掲げた。同目標のためにインフラ整備, ZEVの開発促進, 導入のための補助を行うとしている。ただし, 同目標は, 1998年には10%のうちから6%は完全なZEVではない部分的ZEVでよいとする修正が行われ, 更に2001年には更なる修正が行われる予定といわれている。

そのうち燃料電池に関しては, カリフォルニア・フェエルセル・パートナーシップ (CFCP; California Fuel Cell Partnership) と称する燃料電池自動車開発, 実証のためのプログラムを推進している。同プログラムは, CARB, 自動車メーカー, 石油会社, 燃料電池開発会社等が共同して行うプログラムで, 当初同州のみの試験として見られていたが, 日本, EU,

他からの自動車メーカーの参画等もあり国際的研究プロジェクトとして注目されるようになったものである。同プログラムの概要を表3-1に示す。同CFCPの計画では, 2001年までに, 水素による燃料電池を使用したバスを20台, 2003年までには, 更にメタノール, ガソリンによる燃料電池自動車とバスをそれぞれ60台, および20台製作し, 市内運行の予定とされている。

(3) EU

EU各国の燃料電池への期待は, 再生可能エネルギー利用によるCO₂低減に寄与するという視点からの取組みに力点がおかれている様子である。

従って, 定置用としては, 総合熱効率を上げるために高効率型コジェネレーションのシステム, 自動車用としては, 燃料製造工程からの総合効率を問題とする評価が行われている。例えば, ドイツにおいては, 次世代の運輸燃料を検討する作業がドイツ政府と研究機関および自動車メーカー (例えばダイムラー・クライスラー) 等が共同して実施しており, 基本的には石油 (ガソリン) は使わない方向で検討開始した。そのため燃料製造から燃料電池による最終消費までの全工程を通して既存の方式に比べCO₂換算で何%削減できたか (目標例2008年迄に20%削減) という観点から11種類の候補を掲げ検討した。その結果, 2000年1月中旬評価では, 第1候補を水素, 第2, 第3の候補としては, メタノール, 天然ガスを含めた3種類に絞り込んだ。なお, ドイツ1国では, これ以上の絞り込みは行わず, EU全体としての次世代自動車用燃料の評価が行なわれる時 (2003年と想定) に最終的な候補選択を期待している。

海外におけるPEFCの開発状況を自動車用および民生用 (定置用) それぞれにまとめたものを表3-2および表3-3に示す。

表3-1 カリフォルニア・フュエルセル・パートナーシップ（CFCP）

1. 概要

- ① 自動車メーカー、石油会社、燃料電池メーカー及びカリフォルニア州政府の共同による燃料電池自動車の実走行試験を開始。
- ② 2000～2003年にかけて、乗用車及びバスを使用したデモ走行を行い、維持管理面と燃料供給インフラ関連の課題を抽出。
- ③ カリフォルニア州政府は燃料電池自動車の商業化に向け、最適な燃料選択に価値ある情報を提供。

2. 目的

- ① 実道路での燃料電池自動車の性能の確認。
- ② 水素・メタノールスタンド等代替燃料供給インフラ技術の可能性の実証。
- ③ 解決すべき課題を明確化し、商業化への道筋を探索。
- ④ 商業化のための市場整備として、市民の燃料電池自動車に対する意識を醸成。

3. 実施方法

同州ウエストサクラメント市の本部に参加自動車メーカー各社のオフィス・自動車保管倉庫及び燃料供給用水素ステーションを設置し、燃料電池車の市内走行テストを2003年まで繰り返す。

4. 参加メンバー

PARTNERS :

カリフォルニア州大気資源局(California Air Resources Board) : CARB,
カリフォルニア州エネルギー委員会(California Energy Commission) : CEC,
Daimler Chrysler AG (独), Ford Motor Company (米), Texaco (米),
General Motors Corporation (米), 本田技研工業株式会社, BP(英),
トヨタ自動車株式会社, Hyundai Motor Company (韓), Volkswagen AG (独),
日産自動車株式会社, Shell (蘭), Ballard Power Systems (加),
International Fuel Cells (米), South Coast Air Quality Management District (米),
Xcellsis (独), 米国エネルギー省, 米国運輸省,

ASSOCIATE PARTNERS :

AC Transit (米), Sunline Transit Agency (米), Air Products (米), Methanex (加),
Praxair (米), Proton Energy Systems (米), Hydrogen Burner Technology (米),
Pacific Gas & Electric (米), Stuart Energy Systems (加)

5. スケジュール

- | | |
|---------------------|--|
| フェーズⅠ (1999年) | : 計画・準備 |
| フェーズⅡ (2000年～2001年) | : 乗用車・バス計20台以下+ステーションのデモ
(使用燃料: 水素) |
| フェーズⅢ (2002年～2003年) | : 乗用車を60台, バスを20台程度まで増やし, デモ継続
(使用燃料: 水素, メタノール, ガソリン, その他) |

(出典: 燃料電池実用化戦略研究会報告)⁽²⁾

表3-2 海外における燃料電池自動車の開発状況

(2000年10月現在)

開発企業	発表年	車種	PEFC出力	燃料	走行距離	最高速度	備考
Ballard Power Systems(加)	1993	バス	90kW	水素(ホ ^ン ペ)	—	—	
	1995	バス	205kW	水素(ホ ^ン ペ)	400km	—	
Daimler Chrysler*1 (独/米)	1994	大型バン	50kW	水素(ホ ^ン ペ)	—	—	NECAR I
	1996	バン	50kW	水素(ホ ^ン ペ)	250km	110km/h	NECAR II
	1997	バス	190kW	水素(ホ ^ン ペ)	250km	90km/h	NEBUS
	1997	Aクラス	50kW	メタノール	400km	120km/h	NECAR III
	1999	Aクラス	55kW	液体水素	450km	145km/h	NECAR IV
Ford(米)	1999	セダン	(90hp)*2	水素(ホ ^ン ペ)	—	—	DOE、P2000 FCはBPS製
GM/Opel (米)/(独)	1998	セダン	(137hp)*2	メタノール	480km	128km/h	FCEV1
Renault/Volvo (仏)/(スウェーデン)	1997	バン	30kW	液体水素	500km	120km/h	European FEVER Project

*1: DaimlerChryslerのPEFCはBPS製

(出典: エネルギー総合工学研究所 作成)

*2: 動力源の総出力

表3-3 海外における民生用PEFCの開発状況

(2000年10月現在)

開発企業	用途	出力規模	燃料	備考
Ballard Generation Systems(加)	定置用	250kW	天然ガス	BPSの子会社 荏原と合弁企業設立
American Power(米)	家庭用	3kW	天然ガス、プロパン	EPRIが支援
Plug Power(米)	家庭用	7kW、4kW	水素、メタノール	GEと合弁企業設立
Northwest Power Systems(米)	家庭用	5kW	メタノール	PEFCはDe Nora (伊)製
H-Power(米)	家庭用	2kW	プロパン	ポータブル電源も販売
Siemens(独)	研究用	18kW	水素	東ガスで試験中

(出典: エネルギー総合工学研究所 作成)

3.4 日本におけるPEFCの取組み

3.4.1 日本政府の取組み⁽²⁾

日本政府の取組みとしては、経済産業省、国土交通省、あるいは農林水産省がそれぞれの立場や所掌する分野との関連から技術開発や事業の主導または補助支援を行っている。まず経済産業省関係では、燃料電池は1970年代から旧工業技術院のプロジェクトのサンシャイン計画（1974～）の中で研究が行われていたが、PEFCの研究は1992年度から開始されその後ニューサンシャイン計画（1993～）に引き継がれ、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）によるプロジェクトとして研究開発が進められている。

なお、同ニューサンシャイン計画では、将来の水素導入時代を想定して、例えば水素製造・輸送・貯蔵技術、水素供給ステーション等のインフラ関連の研究について水素利用国際クリーンエネルギーシステム（WE-NET）研究の一環においても研究が行われた。

一方、PEFCの実用化に向けた研究としては、2000年度からミレニアムプロジェクト（2000年という新たな千年紀（ミレニアム）を迎えるにあたり人類の当面する課題に応え、新しい産業の創造を生み出すための技術革新を行うとした小渕首相（当時）主導の重点対策。なお、その中で重点分野としては「情報化」、 「高齢化」、 「環境」が挙げられている。）の一環において、PEFCは環境分野の中で有望と位置付けられ、PEFCの安全性等に係る基準等策定のための討論・評価法確立を目指し、「燃料電池普及基盤整備事業」、更にその関連で試験装置の開発を行う「高効率燃料電池システム基盤技術開発事業」、あるいは実用化に必要な生産技術等の開発を行う「高効率燃料電池システム実用化技術開発事業」等の各事業が開始されている。なお、同じプロジェクトの一環ではあるが、以上の事業に先立ち1999年度に水素燃料貯蔵技術と改質技術の開発を行う「燃料電池実用化のための基盤技術の開発・実証」が

実施されている。

次に国土交通省においては、PEFCの自動車への適用を想定して、1999年度から「燃料電池自動車技術評価検討会」が開催されPEFC自動車導入に際しての安全性、環境性等が検討されている。また、同省では、定置用PEFCに対してコジェネレーションシステムが環境共生市街地に導入されたと仮定した場合のモデル的な住宅市街地整備への事業補助も行っている⁽²⁾。

更に、農林水産省では、バイオマス資源を用いてガス化および精製して燃料電池に供給し得る各種燃料製造の研究も行われている。

3.4.2 NEDOの研究開発⁽⁷⁾⁽¹⁷⁾

NEDOは、旧通商産業省工業技術院のニューサンシャイン計画の一環として平成4年から平成12年度を目標としてPEFCに関する基礎的研究および主に定置用への適用を狙っての研究開発を進めている。

研究のテーマは「発電システム技術開発」と「要素研究開発」に大別される。「発電システム技術開発」は、さらに10～数10kw級の業務用を想定した「高電圧型数十KW級分散電源システムの開発（東芝）」、通信用電源や、工事用、非常電源など主に屋外使用を想定した「高電流密度形十kw級可搬型電源システムの開発（三菱電機）」、更に数kw級の家庭用を想定した「常圧作動型数kw級家庭用電源システムの開発（三洋電機）」の3つの小テーマから成る。

次に、「要素研究開発」は、イオン交換膜の高耐久性と高性能化の視点から「高耐久性電池実用化のためのイオン交換膜に関する研究（旭化成工業）」および「高性能電池実用化のためのイオン交換膜に関する研究（旭硝子）」、更に電池構成材料のセパレータの材質としてカーボン材に代る金属板等を用いる「燃料電池構成材料の研究（アイシン精機）」の3つの小テーマから成る。なお、以上は平成12年度迄の取組みであり、平成13年度からは新たな取組みがなされることとなっている。

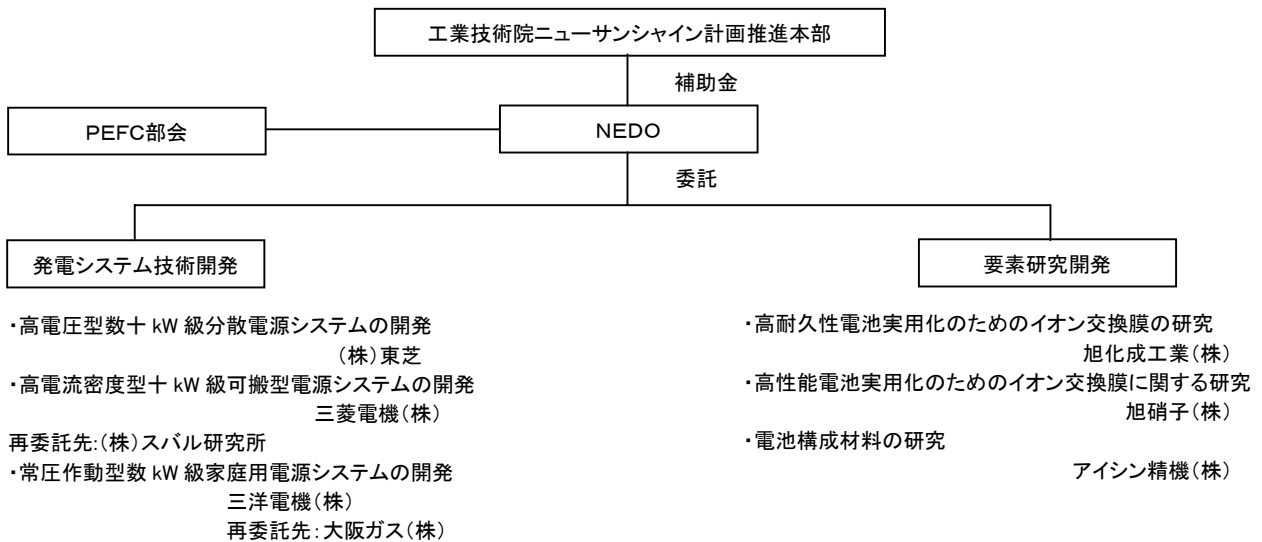


図3-1 研究開発体制

(出典：固体高分子形燃料電池，通産省・NEDO資料)⁽⁷⁾

同組織の概要を図3-1に示す。

次に「発電システム技術開発」に係わる3研究の概要を記す。

(1) 高電圧型数十kW級分散電源システムの開発
(17) (7)

天然ガスおよびプロパンを燃料として想定した30kW級コジェネレーションシステムを狙ったものである。研究の主体は燃料改質技術から始まりセル単体によるセル技術開発，それを組合せてスタック化した積層電池の開発，およびシステム設計等より成る。

中間成果（平成11年度）としては，電池本体では，目標性能（0.2A/cm²で750mV）を達成していることなどが報告されている。なお，30kW級の実用機の予測性能としては発電効率が40%（送電端LHVベース），熱供給を含めた総合効率は80%であることが試算されている。

10kW級スタックの写真と同機による電気出力特性をそれぞれ，図3-2および図3-3に示す。

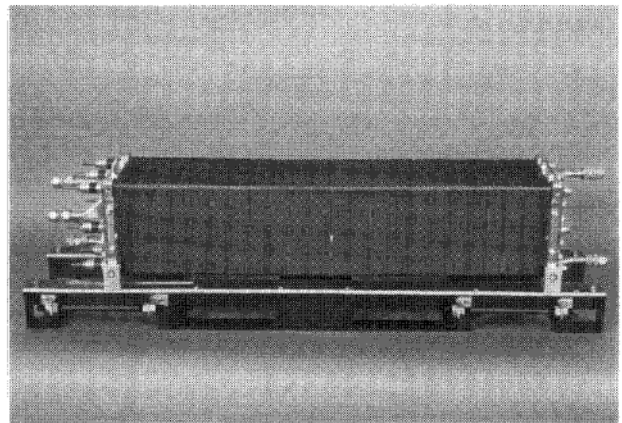


図3-2 10kW級スタック

(出典：NEDO提供)

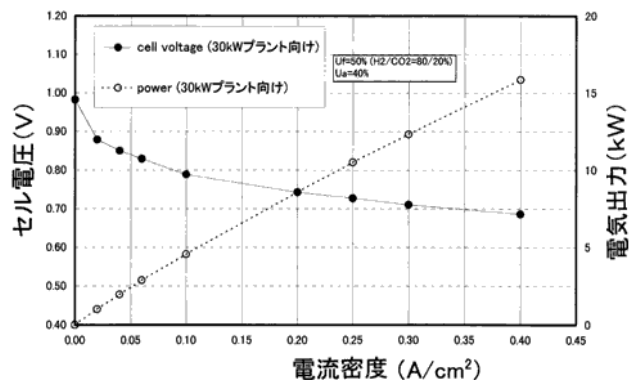


図3-3 スタック電気出力特性

(出典：NEDO提供)

(2) 「高電流密度型10kW級可搬型電源システムの開発」

メタノールを燃料として想定した10kW級の可搬型発電装置を狙ったものである。

研究の主体は、積層型メタノール改質器の開発、積層型燃料電池モジュールの開発、可搬型電源システム研究より成る。

中間成果（平成11年度末）としては電池本体に関しては一酸化炭素50ppmの改質模擬ガスの耐久性試験では良好な成果を得たが、メタノールを含有（含有量1%）するガスでは今後改善を必要とすることなどが報告されている。

図3-4に、5kW級メタノール改質器の写真を示す。

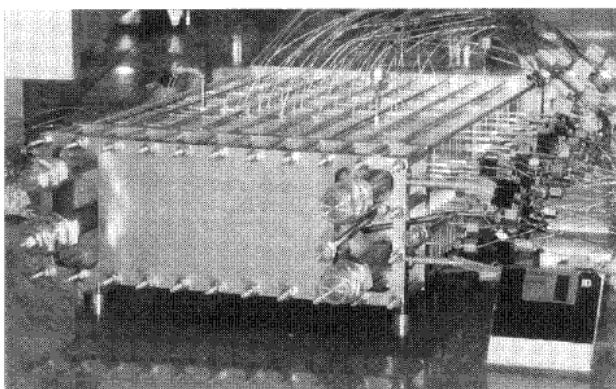


図3-4 扁平積層型5kW級メタノール改質器

（出典：NEDO提供）

(3) 常圧作動型数kW級家庭用電源システムの開発

天然ガスを燃料として想定した数kW級の家庭用発電装置の開発を狙ったものである。

研究の主体は、改質器を含む燃料供給装置の開発、燃料電池本体の開発、およびシステム化技術の開発より成る。中間成果（平成11年度末）としては、電池本体では1kWモジュール（スタック）による試験では良好な成績が得られたが、システム全体の試作機（1kW級サブシステム）による性能としては目標値にやや未達であり、以降の改善が期待された。

3.4.3 日本の企業の取組み⁽²⁾

企業としての取組みは、それぞれの企業、業界の特徴にそって位置付けと取組み方法が異なる。前項では公的な資金で主に定置用を対象としたものを紹介したが、特に最近研究開発が盛んな自動車業界、電気機器業界等は費用工面を含め独自の研究あるいは限定された企業間の共同研究により実施しているところが多い。

従って、その成果は、大部分公表されないか、されるとしても概括的あるいは断片的であるため、ここでは、それぞれの企業の属する業界団体毎の取組状況を概説する。

以下、その中から代表的と思われる業界等を取りあげ、その動向を紹介する。

(1) 自動車業界

日本の自動車業界としての取組みは、本来の高効率性、低公害性として将来型エンジンの候補として各社が取組んでいたが、1996年頃から本格的な取組みがなされてきたと見られている。特にその契機となったのは、カリフォルニア州がZEV（Zero Emission Vehicle）規制を設け同州において2003年から一定台数の無公害車の販売を自動車メーカーへ義務付けると発表したこと、また欧米自動車会社がこれに呼応して燃料電池自動車製造の計画発表を行ったことが背景になっている。

国内で実用化目指して研究開発を進めているのは、トヨタ自動車、本田技研工業、日産自動車、三菱自動車、マツダ、ダイハツ、スズキ、富士重工業といわれる。

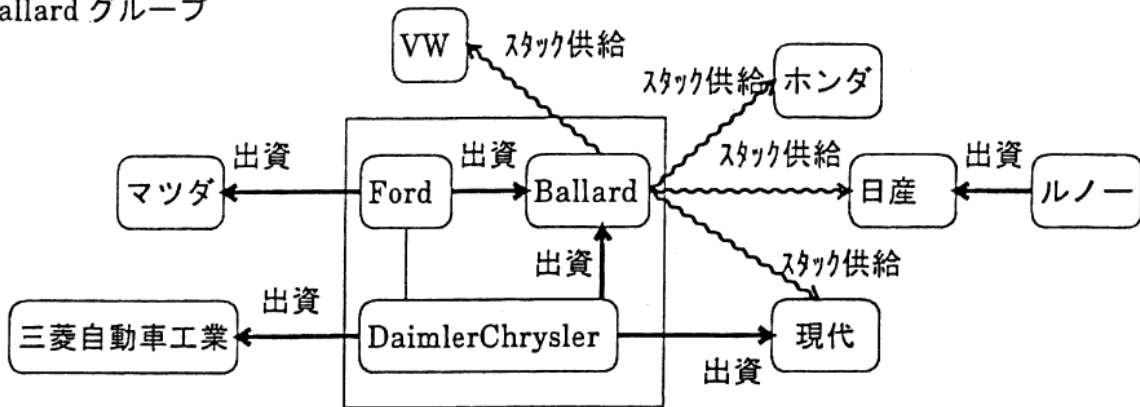
各社は、燃料選択（水素、ガソリンまたはメタノール等）と改質技術、電池本体製造技術、システム化技術の技術開発に際して、上流から下流まで全て一社で行なうか、部分的に先行している企業と手を結ぶかについて、それぞれの事情と方針のもとに選択を行い技術開発を進めている。

特に、燃料電池本体（スタック）と自動車メーカーの関係においては、①燃料電池はバラード

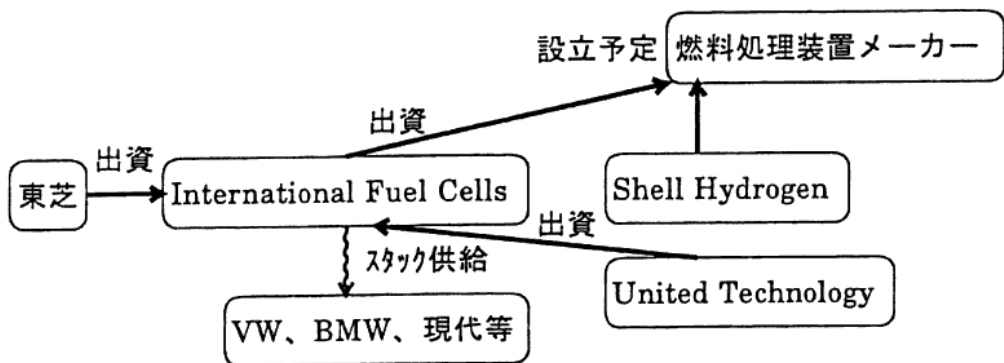
製を採用する（バラードグループ）、②燃料電池はインターナショナル・フュエルセル（IFC）製を採用する（IFCグループ）、③自動車メーカーが内製する（自動車メーカー内製グループ）、と大きく3グループに大別できる。

各グループと自動車メーカーの組合せの様相は図3-5に整理される通りである。また、後述する石油メーカーとの関係においても自動車メーカーの取組みには異なるものが見られるが、ここでは省略する。

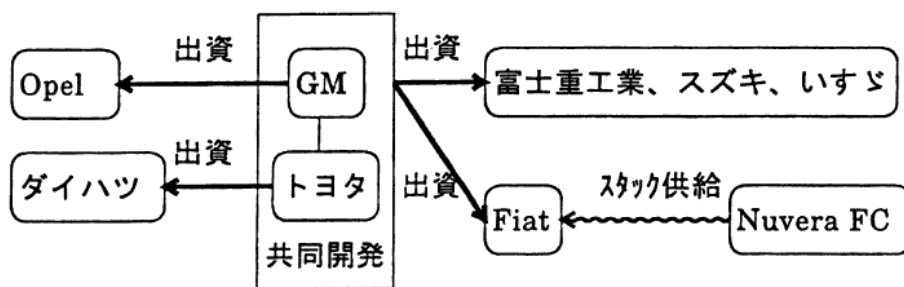
・ Ballard グループ



・ International Fuel Cells グループ



・ 自動車メーカー内製グループ



凡例
 — : 技術提携
 → : 出資
 ~ : スタック供給
 (単なるサブルの供給も含む)

図3-5 燃料電池スタックメーカーと自動車メーカーの関係

(出典：燃料電池実用化戦略研究会報告)⁽²⁾

各自動車メーカーにとって開発戦略を練る上での重要な課題は燃料の選択問題である。

燃料選択は、技術面のみならず、経済性、消費者の志向、および国の政策等との関係で決まる要素をもっているため、各社ともいずれの方式に決定されても対応可能な方向で取り組んでいると見られている⁽²⁾。

各社毎の開発概況を表3-4に示す。

(2) 電気機器業界⁽²⁾

電気機器業界は、PEFCを家庭電気機器の延長ととらえ、将来の家庭における電気と熱の製造機器（家庭用コジェネレーションシステム）の提供を狙うとともに新たな市場創造の期待も込めて取り組んでいる。従って、主対象は定置用コジェネレーションシステムであるが、可搬型、非常用電源等も視野に入れて開発を進めているといわれる。

同技術の普及・導入時にはさらに、既設系統電源、あるいは電気温水器を含む給湯設備との併存あるいは代替の問題があるため、常に現行システムと比べて利便性、信頼性、あるいは経済性面での比較・評価が行なわれ検証される必要がある。

この業界においても企業の取り組み方には、自主開発型と国内外での先進企業との共同開発型の2つがある。

定置用燃料電池の開発に係る国内企業の取組概要を表3-5に示す。なお同表は、備考欄にも記入されているようにその実施に際しては前述のNEDOプロジェクトによるもの、またその他のメーカーにおいても電力、ガス、あるいは石油関連企業との共同研究として実施するものがほとんどであるといえる。

(3) 石油業界⁽²⁾

石油業界は、燃料電池自動車は普及する少なくとも初期段階においては、既存の燃料供給体制の整備状況から判断して、燃料としてはガソリンを使用することが現実的であるという見解

に立っているといわれるが⁽²⁾、これは石油系燃料供給事業者として当然のことと思われる。

しかし、上述の「初期段階において…」の表現に見られるように将来水素時代が到来するとしたら同水素を燃料として捉える燃料供給の在り方、あるいは既存の自動車ユーザのみでなく新たな市場創造、さらにはこれを通して新規事業の可能性に対しても対応ができるよう取り組みの検討を行っているといわれている。

また、昨今求められるよりクリーンな自動車用燃料、特にいおう含有量の更なる低減に対して、燃料電池自動車が導入されたら燃料電池に適用するための技術的要求からも低いいおう化が求められることになるため、同技術の付随的効果としての期待も込められている様子である。

同業界としての取り組むべき技術課題は、ガソリンあるいは灯油から水素を製造する改質技術が中心になっていると思われる。

(4) ガス業界⁽²⁾

ガス業界の取組みは、燃料電池を現在の都市ガスを利用した熱利用機器の延長として捉え、従ってPEFCの特性に鑑み高効率の家庭用および業務用定置形コジェネレーションシステムの開発を狙う立場をとっている。

また、コジェネレーションシステムの導入に関しては、欧州が先行しているが、その点欧州の適用状況を参考にしながらも、気候風土の異なる日本のコジェネシステムの最適スタイルの導入を目指し使用形態の在り方を含めての検討も行なわれている。

さらに、同システムの開発は、ガス需要の拡大にもつながり得る新たな市場創造の可能性を秘めた技術としても期待している⁽²⁾。

従って、燃料電池本体あるいはシステムの技術開発に関しては、電気機器業界の方向性と類似した面を有しており、同業界と共同研究等により協力して取り組んでいるところがある。技術課題としては、したがって都市ガスからの高効率で経済性に優れた改質技術の開発とコンパクト

トなコジェネレーションシステムの開発が主体 になると思われる。

表3-4 国内における燃料電池自動車の開発状況

(2000年10月現在)

開発企業	発表年	車種	PEFC出力	燃料	走行距離	最高速度	備考
トヨタ	1996	RAV4	20kW	水素(MH)	250km	100km/h	FCは自社開発
	1997	同上	30kW	メタノール	500km	125km/h	同上
マツダ	1997	デミオ	20kW	水素(MH)	—	90km/h	FCは自社開発
	1999	同上	50kW	水素(MH)	170km	140km/h	FCはBPS製
日産	1999	ルネッサ	非公開	メタノール	300km	100km/h	FCはBPS製
ホンダ	1999		60kW	メタノール	—	—	FCは自社開発
	1999		60kW	水素(MH)	—	—	FCはBPS製
ダイハツ	1999	軽	16kW	メタノール	—	—	FCは自社開発
三菱自動車	1999		40kW	メタノール	—	—	FCは三菱重工製

(注1) トヨタは1999年10月に最大出力70kWのPEFC、およびコンパクトなメタノール改質器を発表

(注2) ホンダは2000年9月にカリフォルニアFCパートナーシップ向け燃料電池自動車発表(FCはBPS製60kW)

(注3) BPS=バラードパワーシステムズ

(出典：エネルギー総合工学研究所 作成)

表3-5 国内における民生用PEFCの開発状況

(2000年10月現在)

開発企業	用途	出力規模	燃料	備考
東芝	小型ビル用 自動販売機	30kW級 1kW級	都市ガス、プロパン LPG	NSS/NEDO
三菱電機	可搬型	10kW級	メタノール	NSS/NEDO
三洋電機	家庭用家庭用	2~3kW級 1kW	都市ガス 都市ガス	NSS/NEDO NEDO/ガス協会
松下電器	家庭用、自動車用 家庭用	数~数10kW 1kW	都市ガス、水素(MH) 都市ガス	自社開発 NEDO/ガス協会
松下電工	可搬型、家庭用 家庭用	250W~数kW 1kW	ブタン、都市ガス 都市ガス	BPSと提携 NEDO/ガス協会
アイシン精機	研究用	1kW	水素	東ガスで試験
富士電機	研究用	5kW	水素	関電と共研
三菱重工	研究用	5kW	都市ガス	東ガスと共研

(注) NSS=ニューサンシャイン計画

(出典：エネルギー総合工学研究所 作成)

(5) 電力業界⁽²⁾

電力業界は従来より燃料電池を高効率中小規模発電用（高効率分散電源）として期待し、その開発に取り組んできた。したがって燃料電池への期待は発電効率が在来技術より格別に高くなる可能性をまず第1に追求したものである。その点から、過去10年以上にわたり各種燃料電池（PAFC、MCFC、SOFC）の開発を実施しているが、とりわけ上述の期待に応えうる可能性を秘めた技術としてMCFC、あるいはSOFCへの関心が高い。

PEFCに関しては、「PAFCの経験を踏まえて将来の分散電源の一つとしてポテンシャルを有するか否かを検討するため、省エネルギー性、耐久性・寿命、保守・運用機能、安全性などの技術面とともに、経済性についても実機運転によるデータ収集を始めている」⁽²⁾状況と見られている。

このようにPEFCに関しては、分散電源としての可能性が追求されている訳であるが、その鍵は経済性、CO₂を含めた環境特性および運用性が既存の方式と比べてどれだけメリットがあるかということにつきよう。なお、出力変動調整やバックアップの系統連系等に際しての技術的な面の問題の有無とその検証がなされることはいう迄もないことであろう。

電力業界の立場は上述のように分散電源で、対象は主に業務用であり直接に家庭用としての利用までは指向していない。電気機器業界のように機器を売るのが目的ではなく、これらの提供を通して、総合的に電気、熱供給形態のベストミックスの一翼を担う供給者の立場をくずしていないと見られる。

東京電力が、2000年に東京ガス他と共同で設立したマイエナジー社が、自ら灯油、都市ガス等を燃料として分散型電源市場に参入したのもこの立場に沿ったものと考えられる。

4 P E F Cの経済性⁽⁶⁾

4.1 コスト目標

PEFCの普及に際しての重要な指標の一つとして経済性が挙げられる。定置用であれ自動車用であれ現在使われている技術あるいは方法がある以上、それに替えてでも新技術を使うということに対し人々を引きつける大義名分とともに経済的魅力は欠かせない要素である。さて、経済性を考える場合、用途が定置用か自動車用かで全くその目標が異なる。表4-1にその概要を示す。同表に見られるように、定置用の場合は、目標コストが15万円/kWに対し現状コストは80万円/kW以上であり、すくなくとも約5分の1以下に下げる必要がある。自動車の場合は、目標コストが50\$/kW（約6,000円/kW）（注、現在のガソリンエンジンでは約3,000円/kW）といわれ、現状コストは60万円/kWであり、2桁も下げなければならないとされる。これは非常に厳しいコスト目標である。

自動車の場合現在のガソリンエンジンが長年にわたって技術面のみならずコスト面でも改良が加えられ成熟してきた技術であり、それと比較されることになるからである。

表4-1 燃料電池のコスト目標

	定置用 ⁽¹²⁾	自動車用	
発電出力規模	1～2kW	5kW	
耐久性	4～60,000時間	5,000時間	
燃料	天然ガス	水素	ガソリン または メタノール
改質器	要	不要	不要
コスト目標 ⁽¹²⁾	150,000円/kW	6,000円/kW (50\$/kW)	
現状コスト (2000年末)	約800,000円/kW (7,000\$/kW)	約600,000円/kW (5,000\$/kW)	

（出典：本間琢也，

季報エネルギー総合工学 第23巻 第3号）⁽⁶⁾

一方、定置用に関しては、自動車と比較するとハードルはそれほど高くないといえる。そのような視点から、PEFCの実用化は自動車を

推進している関係者の間でも、まず定置用からという見方が強いようである。

図4-1は、定置用における燃料電池のコストとサイズの推移と見通しを紹介したものである。

4.2 コストの構成⁽¹⁶⁾⁽¹⁰⁾

自動車用の例でコストの内訳がどうなっているのかを紹介する。

50kW級PEFCでガソリンからの改質をベースとし、さらに年間50万ユニットの生産量があるとした場合のコスト試算をアメリカのADL (Arther. D. Little) 社が行ったものが文献発表されているので、その一部を紹介する⁽¹⁶⁾。

それによると出力50kWシステムの総コストが14,700\$ (約180万円)、単位出力あたりのコストが294\$/kW (約35,000円/kW)とされている。

また、システム全体としては、①燃料改質、②PEFCサブシステム、および③BOP (その他機器類)と組立費の3部分に分けた時に、

次のような比率となっている。

表4-2 自動車用燃料電池のコスト試算例

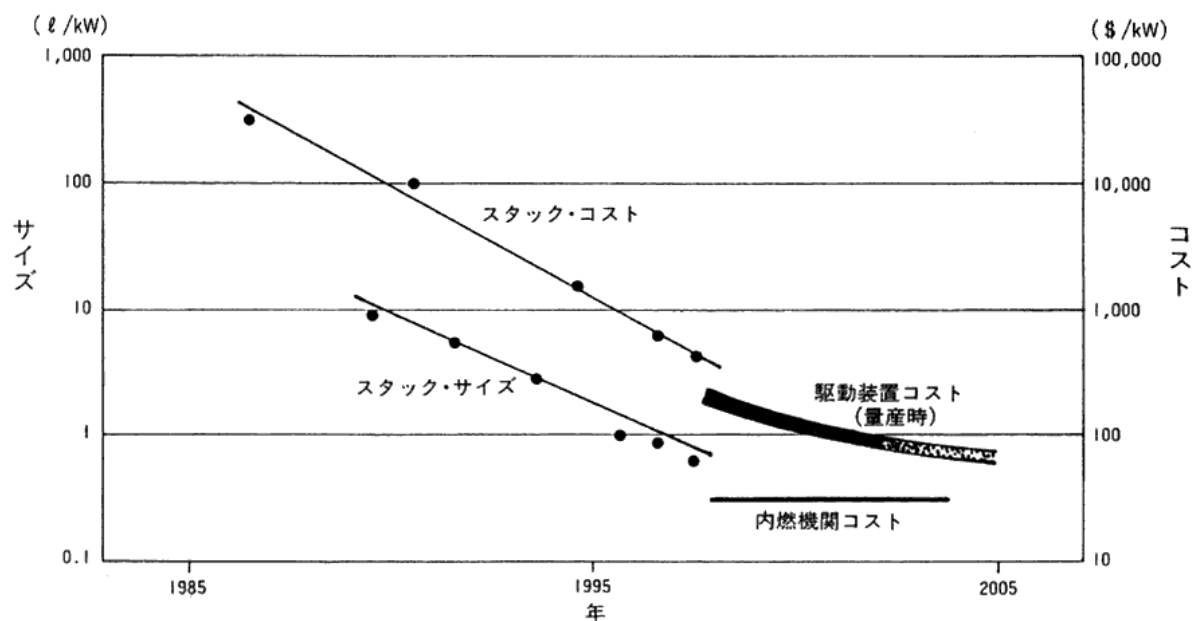
項目	割合 (%)	コスト (\$)
燃料改質	30	4,400
PEFC部分 (内、スタックコスト)	60	8,800 (7,050)
BOPと組立費	10	1,500
計	100	14,700

(出典：本間琢也，

日本エネルギー学会誌 Vol. 80 No. 886)⁽¹⁶⁾

また、PEFC部分(8,800\$)の中では、PEFCのスタックコストが7,050\$ (141\$/kW)と大半を占める。

さらに同スタックコストの内訳としては、膜・電極接合体(MEA)が、5,355\$で76% (全体からすると、約36%)でその大半を占めるが、さらに同MEAの約半分の47% (スタックに対しては約36%、全体からすると約17%)を電極触媒が占める。



出所：バラード社資料

図4-1 燃料電池のサイズとコストの推移

(出典：本間琢也，季報エネルギー総合工学 第23巻 第3号)⁽⁶⁾

一方、別の資料によれば、スタックのコスト20 \$ /kWの想定の下でのスタック中のコスト内訳が発表されている⁽¹⁰⁾。それによると最も高いのは、電極触媒の43%、次いでバイポーラプレート（セパレータ）19%、ガス拡散電極14%と続いており高分子膜は2%と小さい（図4-2参照）。

以上のことから指摘されることは、電極触媒

のコスト低減が最も重要であり、次いでセパレータとガス拡散電極のコスト低減が同様の比重で重要である。

なお、電極触媒のコスト中大きな位置を占めるのが白金の使用量といわれるが、現在では1 kWあたり1～2 g程度必要であるが、将来に半減あるいはそれ以下とする必要があるとされている。

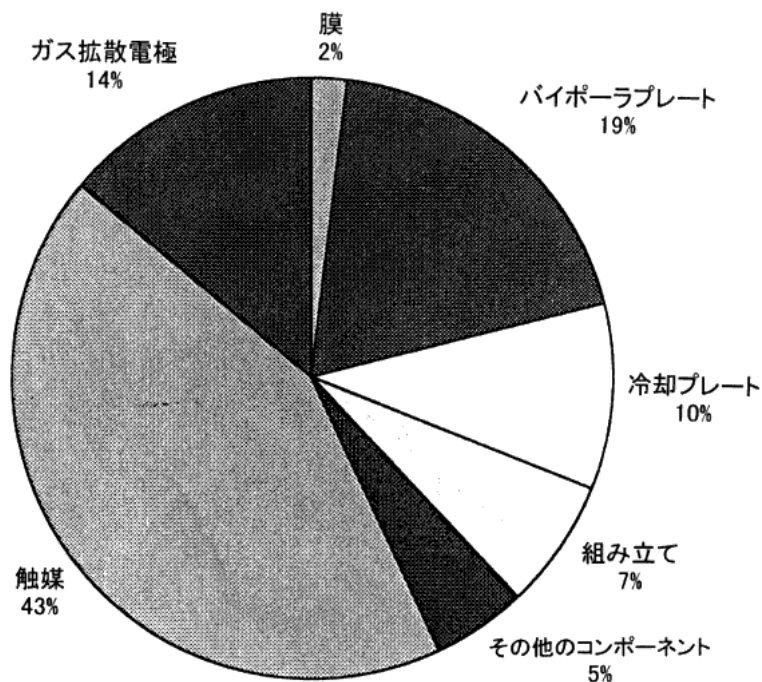


図4-2 スタックのコストシェア

(出典：燃料電池PEFC，燃料電池開発情報センター)⁽¹⁰⁾

5 P E F Cの課題

P E F Cの課題については、既に部分的には述べたところであるが、ここで改めてそれらの中から主な課題をとりあげ解説する。

5.1 自動車用の場合^{(10)~(2)}

(1) 小型化 (コンパクト化)

① 電池

自動車に搭載するためのハードルの第1が小型化即ちいかにコンパクト化して自動車用として与えられるスペースの中に収め得るかということである。

そのための第1は燃料電池本体 (スタック) の高出力密度の達成である。

自動車用のP E F Cの場合は、イオン交換膜の耐熱性の問題もあり作動温度は80℃、作動電流は0.5~1.0 A/cm²程度で研究が進められ、スタックの出力密度は1リットルあたり1kWを越すところも出てきた。この値は、スタック単体ではガソリンエンジンに匹敵するといわれるが、補機類、改質器、モータ等を含めたシステム全体でとらえると一層の出力密度の向上が必要である。

上述に関連した課題としては、イオン交換膜の性能向上および触媒の性能向上とともにコンパクトなスタック化構造などがあげられる。例えばイオン交換膜の性能向上に関しては、膜自体の出力向上、性能面で有利とされる高温化 (例えば100℃以上)、薄膜化と全体としての機械的強度等の向上などがあげられている。

そのため (特に高温化) の方向性およびコスト低減面でも有利な可能性のあるものとして非パーフルオロ系代替膜の開発が望まれている。

また、触媒に関しては、白金使用量を減じて触媒性能を維持、向上する技術およびCO被毒の影響がより少ない方向からの一層の研究開発が望まれる。

② 改質器⁽¹⁰⁾

水素以外の燃料を使用する時は改質器が必要

であるが、これがコンパクト化の一つの鍵を握っているともいわれている。

国内メーカーの開発例では、蒸発部、改質部、CO選択酸化部等の一連の技術を積層構造で一体化した例 (三菱電機) あるいは出力25kW用P E F C用改質システムとして直径30cm×長さ60cmに納めた例 (トヨタ) などが報告されている。

図5-1に、メタノール用積層構造の例を示す。

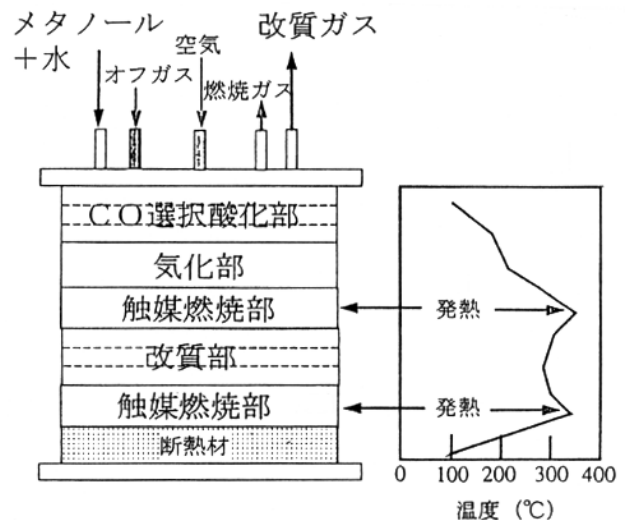


図5-1 メタノールの積層型水蒸気改質の構成図

(三菱電機がN E D O委託研究で開発中)

(出典：光田憲朗、

バッテリー技術シンポジウム、1998)⁽⁵⁾

アメリカのP N N L (Pacific Northwest National Lab) はマイクロチャンネル式を提案し、実用化されたら改質器は現在のサイズに比べ1/10にまで小さくなるとの発表もある。これらは一例であるが、各開発企業毎に改質器の性能向上とあわせて構造上、配置上のコンパクト化の研究が鋭意進められている。

③ 水素燃料貯蔵⁽²⁾

燃料として水素を使う場合は改質器が不要な代わりに水素の貯蔵装置が必要となる。

水素は、単位体積あたりのエネルギー密度が小さいという性質を有しているため、水素をどのような形態で貯蔵するかを選択が重要となる。

現在考えられる形態としては、大きく次の3方式が考えられるが、それぞれ一長一短があり、ニーズにあわせて検討を行うべきと考えられる。

- ・圧縮水素方式：現在の燃料電池の効率で400km以上走る場合、350気圧の圧力で170l以上のタンクが必要であり、コンパクト化の点では制約が大きい。
- ・液体水素方式：エネルギー密度が高く走行距離は長いですが、極低温維持のための断熱構造が必要、液化の際のエネルギー損失が大きい。
- ・水素貯蔵材料方式：水素貯蔵合金（メタル・ハイドライド）と水素貯蔵化学物質（ケミカル・ハイドライド）がある。前者は、水素貯蔵量が少い（重量比で2%程度）、高価である、寿命が短いなど課題が多い。後者は、水素貯蔵量は大きい（重量比で7～8%程度）が、再生時のエネルギー投入方法などシステムの検討と最適ハイドライドの選定などの課題を有す。

(2) 起動時間短縮と負荷変動応答性⁽¹⁰⁾⁽²⁾

燃料電池本体は温度も低く、反応速度も早いので、起動性および応答性に関しては特段の問題は指摘されていない。

しかし、改質器が設置される場合、例えばメタノール改質の場合は、反応温度が200～300℃でありこれを従来技術である水蒸気改質法によれば起動時間は約20分と長いですが、部分酸化改質法（POX）を適用する場合は数分のオーダーまで短くなってきている。ガソリンや天然ガス改質の場合は、反応温度が高くなる（600～1000℃）こともあり、車上での改質は課題が多い。前述のアメリカの次世代自動車の開発プロジェクトであるPNGVにおいては、起動時間を2分、応答性については定格出力の10%から

90%を20秒とする目標を掲げている。

なお、以上の起動時間の短縮を計るために実用は燃料電池とバッテリーの組合せが提案されている。

(3) 耐久性と信頼性⁽²⁾

耐久性に関しては、乗用車用では5,000時間（バス・トラック用では10,000～20,000時間）、定置用では40,000時間以上が必要とされている。現状では燃料電池スタックでは10,000時間はクリアしているといわれるが、さらに長寿命化・信頼性向上が必要である。一方、自動車用では特にコスト面が重視されるので、耐久性確保がコストに大きな影響を及ぼす場合は、その点からの検討が必要とされる。

なお、改質燃料を使う場合は、CO及び燃料中のいおう等に対する触媒の被毒の問題が耐久性面で大きな影響を及ぼすので、その点の検討が必要である。

一方、自動車用では、実際の走行中に空気中から吸入する不純物が耐久性に与える影響が充分解明されておらず、実走行による実証試験の積み重ねが必要となる。

燃料電池自動車の実用化の問題点を図5-2に示す。

- ・PEFCの高出力密度化による小型軽量化の実現
- ・起動時間が短く負荷変動に対する応答性が速い
- ・高い信頼性と適当な耐久性
- ・コストの低減（目標値\$50/kW）
- ・燃料の選択と燃料供給インフラの整備
1) 純水素, 2) メタノール, 3) ガソリン
- ・自動車の大きさの種類による燃料の選択
1) 路線バス, 2) 普通自動車, 3) 特殊用途車
- ・車載可能なコンパクトな改質器の開発
- ・ハイブリッド型燃料電池動力システムの設計
- ・実用化のための実証期間と普及の時期
- ・自動車会社による世界的連合の形成と開発戦略

図5-2 燃料電池自動車の実用化における問題点

（出典：本間琢也，

エネルギー総合工学研究所 月例研究会）⁽¹⁸⁾

5.2 定置用の場合

自動車以外に適用する場合の課題は、前項自動車と共通するところが少なくないが、その開発目標条件の相違もあり課題の位置付けはかなり異なった面がある。

(1) 耐久性

特に自動車用と比べより厳しい開発課題を課せられるのが耐久性である。

既に前述したところであるが、自動車用が5,000時間を目標とするのに定置用は40,000時間と1桁大きい寿命を要求される。

その対策の重点は改質ガスからのCO除去技術の開発、燃料電池スタックにおけるイオン交換膜、触媒および改質器中の触媒においてより

一層の耐久性に優れた材料、構造面の研究開発、および実際の条件下での実証試験による検証である。

(2) コジェネシステムの最適化

PEFCの場合、電池から発生する熱は、60～70℃程度と比較的低温であり、給湯や床暖房には適しているが、夏期の冷房需要（吸収式冷凍機を使用）には適してないといわれる。

このためシステム全体としての熱利用の最適化に加え、比較的低温でも作動可能な冷凍機の検討も含め総合的なシステム検討が必要と考えられる。

家庭用PEFCの構成イメージを図5-3に示す。

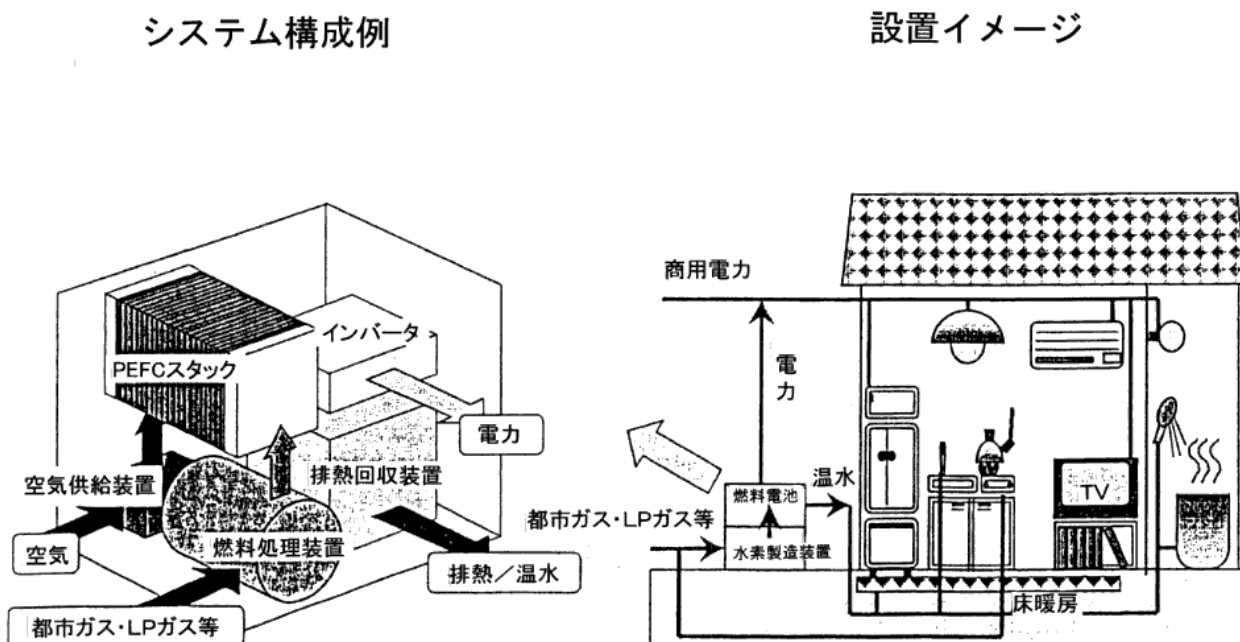


図5-3 家庭用燃料電池

(出典：燃料電池実用化戦略研究会報告)⁽²⁾

6 P E F Cの将来展望

燃料電池の実用化、普及・促進に関しての将来展望に関しては、定置用と自動車用とで異なる展開を見せるものと考えられる。

定置用は、実用性・耐久性が検証されコストが所定の目標範囲に入り、さらに法規制などを含めた懸案事項が解決されることが前提であるが、家庭用、業務用であれ、燃料は既存のインフラを使うことができる。しかし、自動車用は、自動車単独として実用化できたとしても、燃料の選択とその供給体制は社会システムとしての調整を要する課題であり、別の視点からの検討が必要である。そのような相違もあり、一様には展望を語ることはできない。そのためには官民あがての検討・協議の場が必要であり、前書きの欄でも述べたように、現在資源エネルギー庁の諮問機関である「燃料電池実用化戦略研究会」あるいは民間の協議機関である「燃料電池実用化推進協議会」等で一企業あるいは一業種を超えて検討されているものである。

ここでは、「燃料電池実用化戦略研究会」がとりまとめた「燃料電池普及に向けたシナリオ」等から展望に関連するものを取りまとめ紹介する。

まず、同シナリオにおいては、P E F Cの実用化・普及までには、解決すべき課題がまだ多く存在するという認識の下で、それらの課題解決を効率的に行って実用化にいたる手順として三つの期間に分けて考えている。

第1の期間は、現在から2005年頃までとして、これを基盤整備・技術実証段階と称している。第2の期間は、2005年ごろから2010年頃までで、これを導入段階としている。

第3の期間は、2010年以降でこれを普及段階としている。

第1の期間においては、定置用、自動車用ともに実用品（試供品的なものとして理解）が出始める。その間は、従って実用品の開発はメーカー等が鋭意進めるとしても、社会全体として検討・

準備すべき点を指摘し、その実行を提言している。

例えば、燃料電池の実用化・普及に向けた制度面および技術面での基盤整備にかかわることである。すなわち、燃料電池の安全性・信頼性に関する試験・評価手法の確立、必要な規制の見直し、燃料規格の確立、共通的・基盤的な要素技術に関する基本性能向上の推進、コスト低減の検討、さらにモデルハウスによる実証試験あるいは試作車の試験的走行等である。

第2の期間は、燃料電池の実用品、実用車の導入とその加速化を目指した取り組みの時期であるとして、例えば性能面の一層の向上、低コスト化の検討、さらに燃料供給体制の（段階的）整備や普及に関する環境整備等を行うとしている。

第3の期間は、燃料電池が本格的に普及していく期間として、燃料供給体制の整備が進むとともに量産効果により燃料電池の価格が低下し、市場が自立的に拡大していくものとしている。

以上の背景の下に、2010年度および2020年度時点での普及導入目標を立案しているが、その概要を表6-1に示す。

表6-1 期待される燃料電池導入目標⁽²⁾

	2010年	2020年
燃料電池自動車	約5万台	約500万台
定置用燃料電池	約2.1百万kW	約10百万kW

(注) 「本試算は、今後、成長が見込まれる固体高分子形燃料電池について、その積極的な導入に向け燃料電池戦略研究会として期待する導入目標の位置付け。」と注記されている。

(出典：燃料電池実用化戦略研究会報告)⁽²⁾

なお、同試算にあたってのベースとしては、次のとおりである⁽²⁾。

まず自動車関係では、クリーンエネルギー自動車の導入が進むが、その中でも最初はハイブリッド車の導入が進むとしてその導入目標量を試算し（例えば1997年から導入が開始され、販売台数ベースで毎年1.6万台程度）、そのうち

燃料電池自動車の導入は2005年ごろからではあるがハイブリッド車の約半分が導入されるとして、2010年時点の累積（ストック値）では約5万台に上るとしている。

2010年以降は、燃料電池自動車が本格的に導入されると考えるが、2010年時点で乗用車の年間販売台数のおよそ3分の1程度が燃料電池自動車に変わると想定して、2020年までの累積導入量で約500万台に上るとしている。

また、定置用の考え方は、メーカー数社からのヒアリングによる年間販売見通しに基づき、家庭、業務のそれぞれについて積み上げ試算されたものである。なお、その際の1台あたりの設備容量は家庭用を1kWとし、業務用を約4kWと仮定している。

数値的な概要は以上のとおりであるが、導入目標の累積（ストック）の推移を自動車用と定置用それぞれに、図6-1および図6-2に示す。

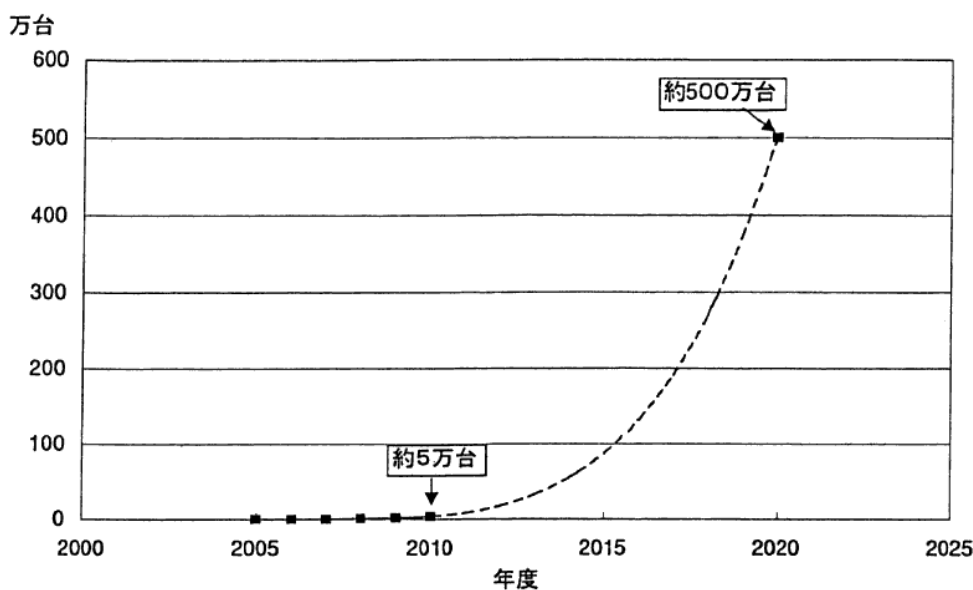


図6-1 燃料電池自動車の導入目標（ストック）

（出典：第9回燃料電池実用化戦略研究会資料，2001）

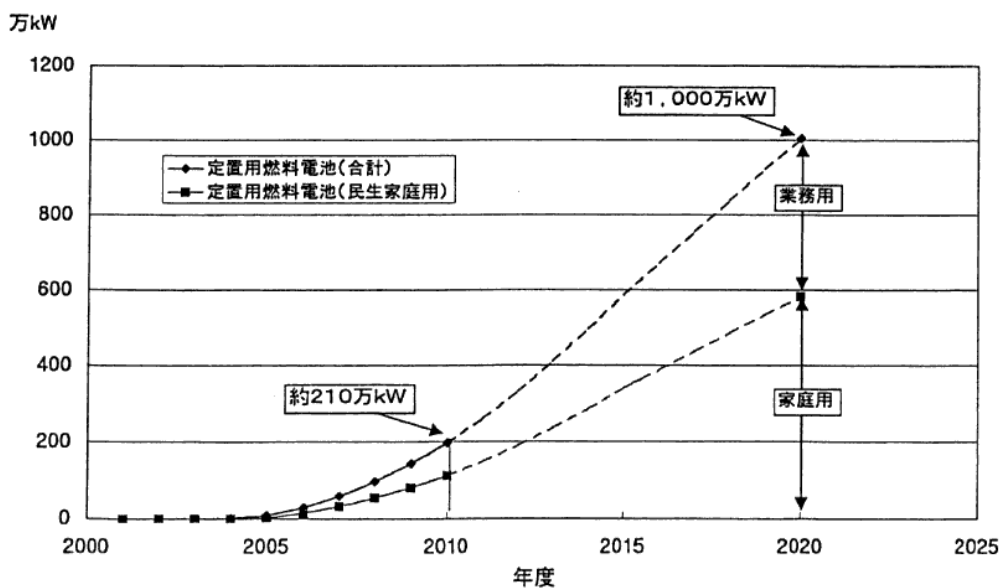


図6-2 定置用燃料電池の導入目標（ストック）

（出典：第9回燃料電池実用化戦略研究会資料，2001）

あとがき

1997年11月に旧ダイムラーベンツ社（現ダイムラークライスラー社）が燃料電池自動車を2004年にも量産化するという計画を発表し当時関係者を驚かせたが、その後トヨタ、ホンダ、マツダ、BMWなども相次いでしかもほぼ同時期に実用化を目指すという発表を行った。また、家電メーカーも定置形の燃料電池を2005年までに実用化するという計画を発表した。さらに、第6章にも述べたように資源エネルギー庁の諮問機関である「燃料電池実用化戦略研究会」は、わが国における導入目標（累積値）として2010年まで自動車用で約5万台、定置用（家庭用、業務用）で210万kWとの値を設定した。

このようにPEFCを取り巻く環境および将来展望は、一言でいえばバラ色に包まれているといっても過言ではないのかもしれない。しかし、課題の項でも述べたところではあるが、まだ多くの課題があることは事実である。特に、燃料の種類がガソリンか、メタノールか、あるいは天然ガスかによって燃料電池のシステム特に改質技術が大きく相違する。選択する燃料如何によってはその開発の難易度も大きく異なり、上述の実用化計画にも影響を及ぼしかねないであろう。かつてのビデオのVHSとベータの選択と同じように、世界規模のデファクトスタンダードとなるためには、種類毎の実績とそれを踏まえての議論が必要になるのかもしれない。また、かなり先の将来の話ではあろうが、定見とされる将来の水素時代がやってくる場合は、燃料電池用燃料も水素へ集約されることになるから、同選定に際しては、時系列的条件がつくのもかもしれない。なお、わが国の方式としては、ガソリン方式採用の方向性が有望である旨新聞発表されているが、その方針決定が、世界製品としての自動車の性質を考えた場合、世界の方向性とも相違することになった場合、世界的な展開で大きなハンデキャップを負うことになることが危惧される。また、技術内容をと

もなった経済的問題として燃料電池システムとしてのコストダウンがある。特に自動車用としては、冒頭にも述べたように二桁のコストダウン（例えばkWあたり600,000円から同約6,000円）を図る必要があるとされているが、その達成はきわめて困難な面があると見られ、従って自動車の場合は、その実用化に先立ち定置用から完成し、その運転経験を踏まえて自動車用に展開する方が良いとする意見もあるようである。

一方定置用としてみた場合、PEFCの利用先は、家庭用（数kW級）と業務用（数十kW級）が当面の開発目標規模とされている。かつて、PEFCは分散形電源（例えば数千kW規模以上）の候補として俎上に上ったことがあるようであるが、やはりその点に関する役割は高効率特性に優れたSOFCあるいはMCFCが期待されている（注、PEFCの発電効率は高々40%であるが、一方SOFCあるいはMCFCの発電効率は、複合発電として60%以上可能。詳細表1-1参照）。ただし、定置用の場合、発電効率のみではそれほどの高効率化は期待できないとしても、80℃前後の排ガスが出るのでその有効利用を図ればエネルギーの有効利用面で優れた方式であり、その点排ガスで温水を発生させるコジェネプラントとしての適用が望まれる。

次に、定置用の場合の経済的成立性は自動車の場合ほど厳しくないにしても既存のシステムと比較すると現状は一桁近く高いのでこれも相当の努力が必要と判断される。

以上のようにPEFCは未だ多くの課題を抱えており、燃料種類の選択、システム面の全てにわたって捉えた場合、前述の発表された時期までに量産機が実現することはかなり困難な面があると思われるが、しかしPEFCは確実に将来の適用先を約束された有望技術であることは間違いないし、ここ数年の間に急速に技術開発が進み実証機、実用機への展開が進むものと思われる。

なお、ここで現在同じように注目をされてい

るマイクロガスタービン（MG T）との相違に関する見解を簡単に述べる。

まず規模としてはPEFCが数kWから数十kWが適切とされるのに対し、MG Tでは現在開発が進められている範囲では30kW前後から数百kWであり、従ってその点から適用先が大きく分けられる。従って定置用としては、PEFCが一般家庭用から業務用と広い範囲で適用可能であるのに対し、MG Tは業務用、大型居住用（集合住宅等）、系統電源のない遠隔地用、非常用電源用等が想定されるものの一般家庭用としては大きすぎる。

また自動車用としては、PEFCは小型の乗用車に対しても適用可能でしかも環境特性に優れる（煤塵、NO_xの発生なし）が、一方MG Tはトラック、バスなどの大型自動車で環境特性面でも、燃料の燃焼によっているため煤塵、NO_x、SO_xが発生する。ただし、MG Tの場合でも、ガスエンジン或はディーゼル車と比較するとNO_x、煤塵の発生量は低いと考えられるのでその点での評価は必要であろう。

性能面、特に発電効率は、PEFCの場合単体で30～40%あるがMG Tの場合30%以下と低い。なお、MG Tの場合排ガス温度（排ガス熱回収装置出口）が約200℃と高いのでコジェネレーション用として適用する場合、吸収式冷凍機使用が比較的容易になり、その点冷房への適用上有利である。

なお、最近発電装置にガスタービンの代りにガスエンジンを使ったマイクロガスエンジン（MGE）が開発されてきており、その場合は1～10kW級も可能とされているが、効率面および環境特性面においては、同様にPEFCを凌駕することは困難であろう。

以上のように性能面、環境面ではPEFCが全般的に有利であるが、MG TがPEFCに比べ現時点で決定的に優れているのは、実用性と経済性といえる。

日本におけるMG Tの販売数の正式な数は不明であるが、アメリカでは2001年は産業用を主

対象として数千台にも上る設置台数が見込まれ、これは前年の数倍に上るレベルになるとの見方もある。これは、アメリカでは、その規模、条件下にもよるが、実用性と経済性が成り立つようになった結果と見ることもできよう。ただし日本では、未だMG Tの普及はそれほどではなく、特に経済性が日本の状況下では検討の余地があるようであるが、目標とする（コスト）レベルに対してかなり接近してきていると見られている。逆にPEFCのコストが下がらないと最終的には経済性が勝負であるので本来PEFC領域と想定されるかなりの部分でMG Tが採用される可能性がでてこよう。要はこれらの長所・短所を踏まえながらそれぞれの技術を適用していくことが肝要であると考ええる。いずれにしてもPEFCの特長は優れたものがあり、その利用の方向性は定まっているといえる。本書がその技術の概要を把握される際のご参考になることを願ってやまない。

最後に本書執筆に際しては、多くの図書、文献、あるいは専門家のご意見をいただいた。特に、図表類で本文中に引用を快く了承いただいた経済産業省資源エネルギー庁（省エネルギー部・新エネルギー部）、NEDO（水素アルコールバイオマス技術開発室）および燃料電池開発情報センターの関係各位、さらに引用文献に係る執筆者、出版社およびメーカーの関係各位に深甚なる御礼を申し上げます。

参考資料

- 1 齋藤孝基他, エネルギー変換, 東京大学出版会, 1995年6月
- 2 燃料電池実用化戦略研究会報告, 燃料電池実用化戦略研究会, 2001年1月
- 3 日本化学会編, キーテクノロジー電池, 丸善株式会社, 平成8年6月
- 4 安田和朗, 水畑 穰, 小黒啓介, 竹中啓恭, 地球にやさしいエネルギーⅡ, 「固体高分子型燃料電池の研究開発」, 燃料及燃焼, 第65巻第2号(1998年)
- 5 光田憲朗, 固体高分子型燃料電池の技術開発動向, バッテリー技術シンポジウム, 1998
- 6 本間琢也, 固体高分子形燃料電池の開発動向と実用化の見通し, 季報エネルギー総合工学, 第23巻第3号, 2000年10月
- 7 固体高分子形燃料電池, 通商産業省工業技術院, 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 平成12年5月
- 8 エネルギー新技術大系, 「第Ⅱ編機器・技術編, 第2章環境調和型エネルギー変換」および「第Ⅲ編実例応用編, 第1節分散型発電所」, (株)エヌ・ティー・エス, 1996年8月
- 9 高塚 汎, P E F C (固体高分子形燃料電池)の開発状況, 火力原子力発電, 平成12年8月
- 10 燃料電池P E F C, 基礎から応用まで, 燃料電池開発情報センター, 平成11年10月
- 11 駒橋徐, 燃料電池革命, B & Tブックス, 日刊工業新聞社, 2000年7月25日
- 12 竹中啓恭, 固体高分子型燃料電池の技術課題と開発動向, G S News Technical Report, 1998年12月
- 13 吉武優, 固体高分子形燃料電池の未来, 未来技術 第1巻第3号, 平成13年
- 14 固体高分子形燃料電池の開発と応用, (株)エヌ・ティー・エス, 2000年4月28日
- 15 小黒啓介, 水素を電気エネルギーに変える燃料電池, 化学 Vol. 54, No. 6 (1999)
- 16 本間琢也, 自動車用燃料電池, 日本エネルギー学会誌, Vol. 80, No. 886, 2001年2月
- 17 鴻野健二, 燃料電池は新エネの本命となるか『固体高分子型燃料電池基盤整備も始まった』, エネルギー 2000-5
- 18 本間琢也, 分散型電源としての固体高分子膜燃料電池(P E F C)の開発状況, エネルギー総合工学研究所 第170回月例研究会 平成11年6月
- 19 鴻野健二, 地球温暖化対策に貢献する燃料電池『12年度目標にP E F C各システムを検討』, E N E R G Y 1999-4
- 20 神谷信行, 太田健一郎, 水素とメタンの高効率エネルギー利用 -燃料電池, 二次電池への応用, 化学と教育, 46巻2号(1998年)
- 21 本間琢也, 燃料電池の現状と課題, 電気協会雑誌, 平成11年11/12月号
- 22 鴨下友義, 21世紀の新エネルギー④『燃料電池発電の現状とこれから』, 電気計算, 1999年7月
- 23 本間琢也, 21世紀を支える新エネルギー発電技術の展望『燃料電池技術の将来展望』ECO INDUSTRY Vol. 5, No. 1, 2000年1月号
- 24 安田和明, 固体高分子型燃料電池の研究開発, 大阪工業技術研究所報告, 1997
- 25 岸田純之助, 燃料電池自動車への期待, テクノカレント, 1998年8月
- 26 河津成之, 地球環境保全に向けてのキーテクノロジー『燃料電池開発のためのキーテクノロジー』, 自動車技術, Vol. 52, No. 7, 1998
- 27 坂田恭子, 進化する新エネルギー「燃料電池」燃料電池の開発動向と用途展望, エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, 1999. 1. 28~29
- 28 佐々木博一, 実用化近づく「燃料電池」, 日本エネルギー学会誌, 1999年9月
- 29 石田政義, 燃料電池の基礎知識, 日本エネルギー学会誌, 2001年2月

新エネルギーの展望

— 既刊一覧 —

燃料メタノール編	1987年1月発行	石炭の高度利用	1993年3月発行
太陽光発電編	1987年2月発行	水素エネルギー(改訂版)	1995年3月発行
燃料電池編	1987年3月発行	廃棄物発電	1995年3月発行
風力発電編	1988年1月発行	石炭灰の有効利用	1996年3月発行
石炭ガス化編	1988年3月発行	廃棄物発電(その2)	1996年3月発行
自動車用エネルギー編	1988年3月発行	低品位炭の改質技術	1997年3月発行
地球温暖化編	1989年2月発行	メタノール発電技術	1997年3月発行
二次電池編	1989年3月発行	電力負荷平準化	1998年3月発行
高温超電導編	1989年3月発行	非在来型天然ガス	1998年3月発行
地球発電編	1990年2月発行	(メタンハイドレート編)	
燃料電池(改訂版)	1990年3月発行	石炭ガス化複合発電技術	1999年3月発行
燃料用メタノール(改訂版)	1990年3月発行	廃棄物発電(その3)	1999年3月発行
太陽光発電(改訂版)	1991年3月発行	原子力発電技術	2000年3月発行
地球温暖化(改訂版)	1991年3月発行	原子燃料サイクル技術	2000年3月発行
エネルギー有効利用	1991年3月発行	固体高分子形燃料電池	2001年3月発行
水素エネルギー	1992年3月発行	マイクロガスタービン	2001年3月発行
風力発電(改訂版)	1992年3月発行		
電気自動車	1992年3月発行		
非在来型天然ガス	1993年3月発行		
地球温暖化対応	1993年3月発行		

2001年3月発行

発行所	財団法人 エネルギー総合工学研究所
	〒105-0003 東京都港区西新橋1-14-2
	新橋S Yビル6 F
電話	東京 (03) 3508-8891 (代表)

印刷 株式会社 日新