

■ 特 集 ■ 省エネルギー

燃料電池による民生用省エネルギーシステム

The Energy Conservation System by Fuel Cell

森 英 雄*
Hideo Mori

はじめに

燃料電池は化学エネルギーを電気エネルギーに変換するエネルギー変換装置であり、その変換効率が高くかつ排熱回収も可能である事などから省エネルギー性を高く評価され、最近では日本においてもアメリカからの燃料電池の導入や国産化技術開発の促進の動きがみられるようになってきた。ここでは、民生用省エネルギーシステムについて述べるが、民生用としては最も実用化が近いといわれる天然ガスを燃料とする燃料電池の開発についても述べる。

1. 燃料電池の原理

水素を空气中で燃焼させれば、酸素と反応して水と熱を生ずる。燃料電池はこの酸化反応を電池の中で電気化学的に行なわせ、反応のエネルギー（自由エネルギー変化分）を直接電気エネルギーの形で外部へ取り出す“エネルギー変換装置”である。これは電気エネルギーを外部へ取り出すという意味で燃料電池といわれているが、燃料と酸素源を供給する限り、電気エネルギーを連続的に長期間にわたってとりだせるので、従来の電池（一次電池、二次電池）の様に電池内にもっている活性物質を発電により消費してしまうと電気の発生を停止してしまうものとは異なっており、どちらかといえば、発電装置あるいはエネルギー変換器とよぶ方がふさわしいであろう。

図-1は、典型的な燃料電池である水素-酸素燃料電池を示したものである。一般に電池はイオン電導性の電解質と電子電導性の2つの電極（陽極と陰極）とで構成されている。この図では燃料として水素、酸化剤として酸素を用いており、水素極（陰極）、酸素極（陽

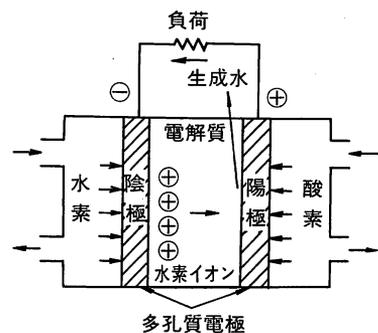
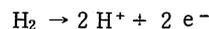


図-1 水素-酸素燃料電池（酸性電解質の場合）

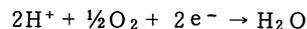
極）は多孔質の炭素などからなり、その表面には水素や酸素を活性化するための触媒（白金など）が添加されている。この場合の電気化学反応は、電解質が酸性でもアルカリ性でもおこるが、前者の場合の反応は次の如くなる。

○反応（酸性電解質の場合）

• 水素電極（陰極）反応



• 酸素電極（陽極）反応



• 電池反応 $\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$

外部から陰極へ供給された水素は電極に吸着し、触媒作用により水素イオンとなって電解質の中にはいり、陽極に移動する。その際、生じた電子を外部回路へ流す。酸素は、電極に吸着して活性化され、外部回路から電極へ流れこんだ電子を受け、電解質中の水素イオンと反応して水を生成する。このように電気化学反応を行なう物質（水素と酸素）、これを活物質というが、これが外から連続的に供給される電池が燃料電池と定義されている。

* 大阪瓦斯株式会社技術開発室 課長
〒541 大阪市東区平野町5-1

2. 燃料電池の効率

現在の発電方式は、火力発電やディーゼル発電など熱機関によるエネルギー変換が一般的であり、この場合、

燃料の化学エネルギー→熱エネルギー→機械エネルギー→電気エネルギー

という複雑な変換過程が採用されている。この変換過程のうち、熱エネルギー→機械エネルギーの変換効率は次のカルノー（Carnot）の式に従うので45%程度が最高となり、燃料から電気エネルギーまでの全効率は、最新鋭の火力発電所でも約40%程度である。

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

η : 熱効率
 T_1 : 流入流体の絶対温度
 T_2 : 流出流体の絶対温度

一方、燃料電池は熱機関ではないので、カルノーサイクルの制限は全く受けず、熱機関と比較する場合の熱効率には、自由エネルギー変化量 ΔG で表される燃料から得られる電気エネルギーと、エンタルピー変化量 ΔH で示される燃焼反応として熱エネルギーの形で得られるエネルギー量の比

$$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H}$$

ΔG :自由エネルギー変化量
 ΔH :エンタルピー変化量

で表われ、表1の水素-酸素燃料電池の理論熱効率のように高い値が期待できる。実際の燃料電池の場合

表1 水素-酸素燃料電池の理論熱効率

T(°K)	$\Delta H(\text{cal}/\text{m}\ddot{o})$	$\Delta G(\text{cal}/\text{m}\ddot{o})$	$\eta = \Delta G/\Delta H$
400	- 58,040	- 53,520	0.92
500	- 58,270	- 52,360	0.90
1,000	- 59,210	- 46,030	0.78
2,000	- 60,260	- 32,310	0.54

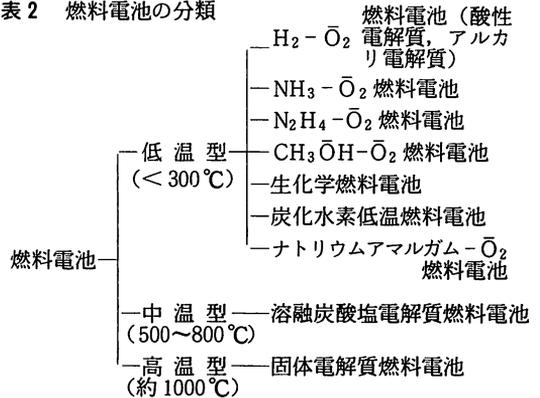
には、電極の活性化分極、電解液の電気抵抗その他により系としての損失があるが、水素-酸素燃料電池の場合、現在までに60%を越す効率が得られている。このように、燃料電池は電気化学反応によるエネルギー変換を行っており、高い変換効率を期待する事ができ、その面からも、省エネルギー的側面をもった装置であるという事ができよう。

3. 燃料電池の種類

燃料電池の可能性は1839年、W. Groveの実験によ

り実証されたが、以後100余年は余り華々しい発展はみられず、特殊な用途以外には実用化されなかった。それがジェミニ5号やアポロ宇宙船のような宇宙開発用として技術開発が積極的に行なわれ、その成果をもとにしてその後、無線用電源などの軍用としての実用化と共に、民生用としてターゲット計画（後述）などの実用化研究が進められてきた。

表2 燃料電池の分類

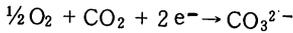


燃料電池の種類としては、燃料の種類、電解質の種類ならびに作動温度の組合せにより、表2のように分類される。一般の民生用発電装置という観点からみると、活物質としては、天然ガスや石油などの炭化水素などを改質して水素と一酸化炭素として利用する方式が主なものとなる。その様な点からみてリン酸を電解質とする燃料電池、アルカリ金属炭酸塩を用いる熔融炭酸塩燃料電池、酸化ジルコニウムなどの固体電解質を用いる固体電解質燃料電池が重要な燃料電池と考えられ、その技術の実現可能時期にあわせて、それぞれ第一世代、第二世代、第三世代の燃料電池と呼ばれている。

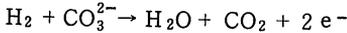
第一世代燃料電池は濃厚リン酸塩溶液を使用して130°C~190°Cで反応させるもので、後述する様に、天然ガスを燃料とし、米国UT社(United Technologies社)を中心としてかなり開発を進めており、ガス、電力業界・エネルギー省(DOE)と組んでTARGET計画、FCG-1計画などを通して商品化研究の段階にまで達しているものがある。

第二世代燃料電池は、ナトリウム、リチウムなどの炭酸塩の混合物から成る熔融塩を電解質とする燃料電池で、500°C~800°Cで作動させるもので、電気化学反応は下記のとおりである。

・酸素極反応



・燃料極反応



・電池反応 $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$

この電池は熔融塩を用いるので材質面での困難性などがあるが、高価な触媒を必要とせず、また常温では反応し難い安価な燃料ガスを直接使用できるなどの利点もっている。

第三世代電池はジルコニアなどの固体が1000℃以上で酸素イオンの空格子点移動による酸性イオン電導性を示すことを利用するもので、石炭からの水性ガスを燃料として固体電解質燃料電池の発電所を作る計画なども進められたが、技術面でも、電極などの材料、薄膜化・集積化の製造技術など解決すべき問題が多くまだ基礎的段階であるといえよう。

以上、燃料電池全般について概観してきたが、ここで、民生用燃料電池として最も技術開発の進んでいる天然ガスを燃料とする燃料電池、とりわけ省エネルギー性に着眼をおいたTARGET計画関連を中心として話を進めていく。

4. 天然ガス燃料電池とターゲット計画

4.1. ターゲット計画

1967年にアメリカの主要なガス会社27社が集まって非営利研究開発法人「ガスエネルギー変換研究推進チーム」(Team to Advance Research for Gas Energy Transformation, Inc. : 略称TARGET)を組織し、アポロ宇宙船の水素-酸素燃料電池の開発および製作を行なったUT社に研究開発を委託して、9年計画で天然ガス燃料電池の開発に着手した。メンバー会社は、最終的には、日本2社(東京ガス、大阪ガス)、アメリカ32社、カナダ1社の計35社であった。この計画は民間資金のみ5000万ドルが投入され、民間ベースの研究開発としては世界最大規模のものであった。

4.1.1. ターゲット計画のスケジュール

ターゲット計画は9年計画で、3年間づつ3つの段階(Phase)にわかれていた。

1967年～1969年 (Phase I)

天然ガス燃料電池の基礎研究

1970年～1972年 (Phase II)

フィールドテストの実施

1973年～1975年 (Phase III)

商品化計画

1976年 (Post Phase III)

Phase IIのフィールドテストでは、12.5 kwのPC-11型天然ガス燃料電池64基を用いて、日本、アメリカ、カナダ各地の39個所で、アパート、ストア、レストラン、オフィス、一般家庭などの顧客に実際に設置して、各基2000時間以上、累計20万時間の公開運転が行なわれ良好な結果が得られた。

4.1.2. ターゲット計画による燃料電池の概要

ターゲット計画で開発している燃料電池をPower-cellと呼んでいるが、その構造は図-2のように、改質装置、燃料電池、インバータの3つの部分からなりたっている。燃料電池部分は図-3のように単電池を積層した構造になっている。

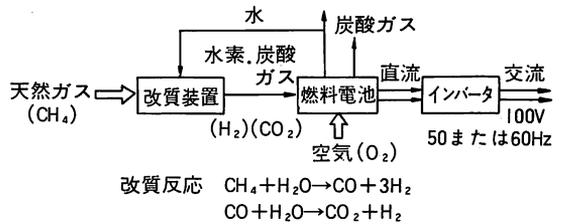


図-2 天然ガス燃料電池のフロー

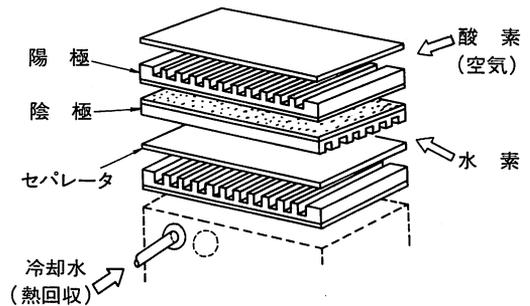


図-3 電池構造

ターゲット計画においては、数kw～数百kw/基の規模の天然ガス燃料電池を開発する計画であり、数基の並列運転を行えば、かなりの規模までカバーすることができる。

4.1.3. ターゲット計画による燃料電池の特徴

ターゲット計画に代表される天然ガス燃料電池は次のような特徴をもっている。

① 高い発電効率が発電装置の大きさにほとんど関係なく得られ、電力を必要とする場所で分散して発電する事ができる(オンサイト)ので、大規模集中化による環境問題もおこらない。

② 無公害発電である。問題となる窒素酸化物の排

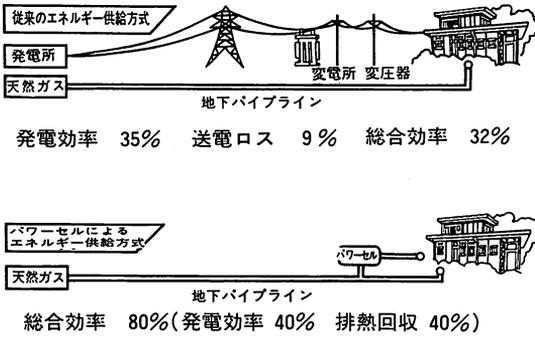


図-4 エネルギー供給方式と効率

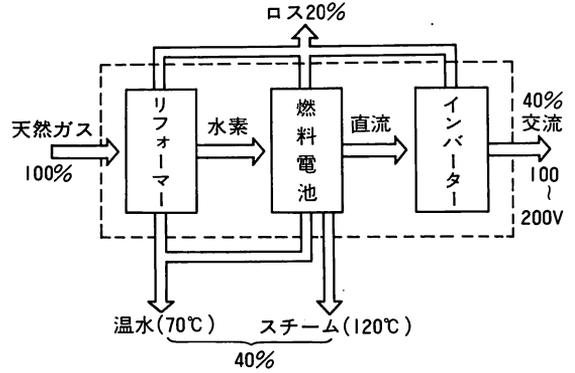


図-5 PC-18排熱回収システム

出もわずかであり、また、騒音問題もない。

③ エネルギー供給方式として合理的である。図-4にモデル的に示したが、燃料電池によるエネルギー供給方式は、エネルギーの輸送ロスも少なく、また、電気とガス両方のピーク時間の平均化ができるので、エネルギー供給方式として合理的である。

④小型で分散発電が可能であり、排熱回収をして給湯・暖房などに利用でき、一次エネルギーの利用効率は80%にまで高める事ができる。従って省エネルギー技術として最も有望である。

4.1.4. ターゲット計画以降のスケジュール

1975年にPhaseⅢを終了したターゲット計画は、翌年総合エネルギーシステムを確立するために排熱回収技術を重点にして開発が行なわれた。その後は第1号商品であるPC-18型(40kw)の開発がほぼ終了し、主としてコストダウンと耐久性向上を目的とした技術改良と商業用試作機による第2回目のデモンストレーション計画に重点が移っており、現在も続行されている(表3、図-5、図-6)。この段階では多額の資金を要する事などから、1977年からはアメリカエネルギー省(DOE)資金とUT社の資金で主として運用されている。すなわちアメリカ政府資金の受皿として、GRI(Gas Research Institute)が1977年に設立され、

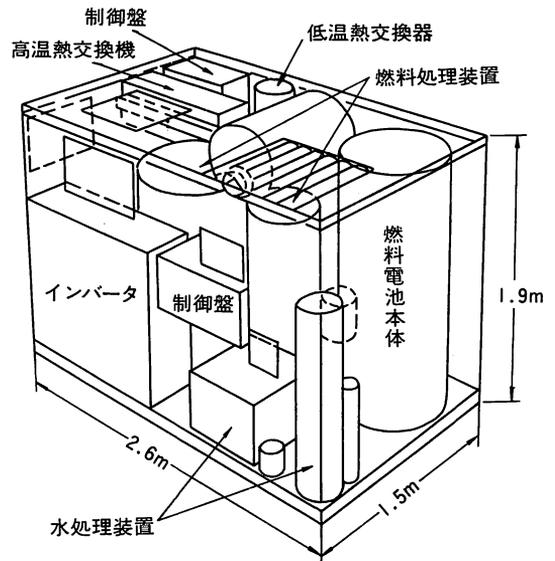


図-6 PC-18全体図

ターゲット計画はGRIに移管されている。従来のターゲットメンバー(日本2社を含む)は、GRIの内部に設立されたFuel Cell Advisorとして計画に参加している。

PC-18のフィールドテストをひかえ、現在、PC

表3 燃料電池性能推移(ターゲット計画関係)

	昭和48年時点(12.5kw機)	昭和55年現在(40kw機)
発電効率	35%	40%
排熱回収効率	回収装置なし	40%
重量	90kg/kw	68kg/kw
形状	電池 巾1.3×高1.1×奥行0.7m インバータ 巾0.7×高1.1×奥行0.7	電池・インバーター・排熱回収一体化 巾2.6×高1.9×奥行1.5m
スタート操作	手動	プログラム化

-18のテスト場所を選定するために、電気・熱負荷調査が行なわれており、日本では東京ガス、大阪ガスが数百ヶ所の建物から選定したホテル、レストラン、スイミングプール、スーパーマーケット、病院など計6ヶ所で詳細なデータ採取と解析を行なっている。

4.2. 大型燃料電池開発計画

リン酸電解質燃料電池で電力系統に入れる発電所を作る計画が1970年末から開始され、1973年末、アメリカの電力会社9社は26MWの配電用変電所規模の発電所を目標としてUT社と開発を開始した。これはFCG-1計画と呼ばれ、そのユニットは4.5KWの定格出力であり、その実証試験を1980年中にニューヨーク市で行なう予定であったが、やや遅れ気味となっている。日本においても東京電力がこの試験を1982年春から予定している。燃料としては、天然ガス、LPG、ナフサなどを使用する事ができる。

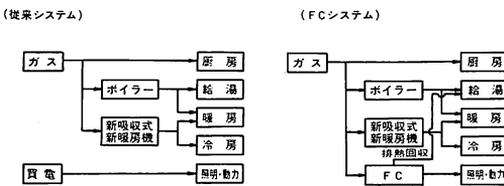
5. 燃料電池による民生用省エネルギーシステム

燃料電池は、エネルギー変換効率が高いこと、無公害であること、小型分散型であることなど、都市における新しいエネルギーシステムに最も適したものであるといえる。

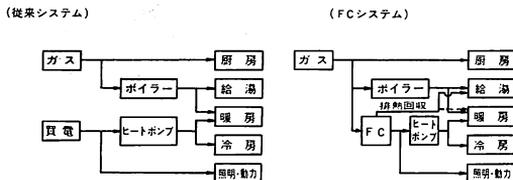
さらに燃料電池は、その排熱回収が非常に容易にでき(ターゲット計画関係ではPC-18が図-5に示した様な排熱回収システムをとっている)、即ちオンサイトで電気と熱を高効率で供給する事ができるので、これらを総合的に利用する事が考えられ、最近よくいわれるトータルエネルギーシステムとして燃料電池を主と

CASE-1 ガス給湯冷暖房システム

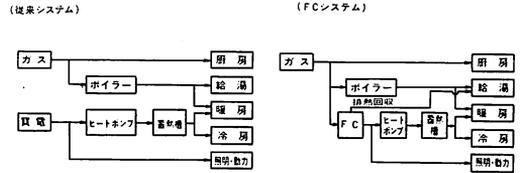
(1) (集合住宅ビジネスホテル)



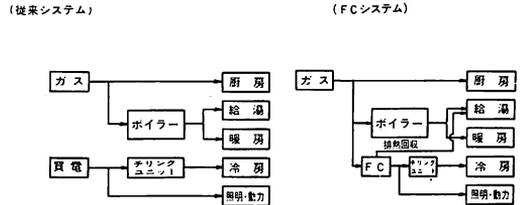
CASE-2 ガス給湯暖房+ヒートポンプシステム (集合住宅、ビジネスホテル)



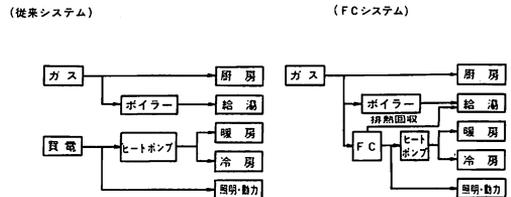
CASE-3 ガス給湯暖房+ヒートポンプ+蓄熱槽システム (ビジネスホテル)



CASE-4 ガス給湯暖房+チリングユニットシステム (レストラン)



CASE-5 ガス給湯+ヒートポンプシステム (レストラン、病院)



CASE-6 ガス給湯冷暖房システム (2) (病院)

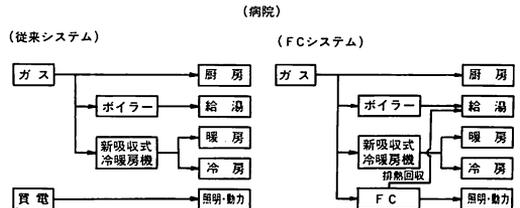


図-7 燃料電池トータルシステム例

して考えた場合、図-7に示す様に、いろいろなケースが考えられる。

これらの各種のケースの省エネルギー率は、それぞれの建物の電力、給湯および冷暖房の負荷パターンと燃料電池の熱・電力供給仕様のマッチングにより決まるが、一般的には、給湯負荷がかなり大きく、定期的存在すると考えられるレストラン、ホテル、集合住宅、病院などが比較的省エネルギー効果がより大きいといえよう。(PC-18の総合熱効率の一例を図-8に示した)。

ちなみに、PC-18を既存の建物にそっくり置かえた場合、既存システムに対しどの程度の省エネルギー

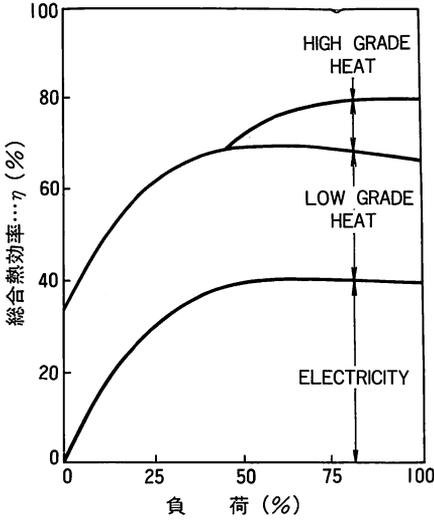


図-8 PC-18の総合熱効率

一がはかられるかを、実際に建物のデータから試算した例を図-9に示す。GRI計画として行なっている天然ガス燃料電池計画において、現在なされている電気・熱負荷調査や後に続くフィールドテストによってこれらの省エネルギー性を実証していく事が可能となるであろう。なお熱負荷と電気負荷が離れている様な場合に、例えば商用電力と直結する事が可能となれば燃料電池から出るエネルギーをより有効に使う即ち、より省エネルギー性の高いものになるであろう事は言うまでもない。

民生用省エネルギーシステムとしては、この様に各建物毎に燃料電池を導入する方式以外に、より広く地域のコミュニティ・エネルギー・センターとして燃料電池を設置し、発電の他に冷暖房、給湯などを広域的に行なう事も考えられ、このシステムが有効に動けばエネルギー節約量は更に増大することも可能であろう。

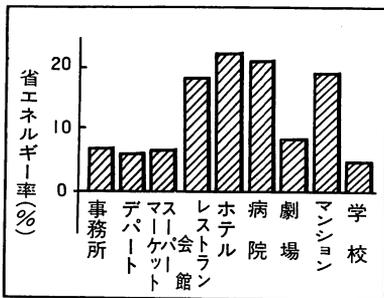


図-9 燃料電池システムの省エネルギー性 (例)

あとがき

以上、燃料電池の開発状況から民生用省エネルギーシステムという点について述べてきたが、エネルギー資源のほとんどを海外に依存している日本にとって、エネルギーの効率的利用をはかる為の新しいエネルギーシステムの開発は緊急の課題である。

最近では日本においても、通産省が燃料電池に関する省エネルギー面からみた最適システム設計(ソフト)の検討や燃料電池本体の開発(ハード)を積極的にとりあげており、民間においても電力業界・ガス業界・機器メーカーなどが国家的見地にたち、より一層の協力を行なうことにより、官民一体となって技術面・法制面などの点から、省エネルギー技術である燃料電池の開発・普及を強力に推進する方向を目指して進んでいく事が必須の事であろう。

