燃料電池技術開発の現状と将来展望

Present Status and Future of Fuel Cell Technology

笛 木 和 雄*

Kazuo FUEKI

Key Words: Energy Engineering, Fuel Cell, Fuel Cell Power Generation, Phosphoric Acid Fuel Cell, Molten Carbonate Fuel Cell

1. はじめに

近年、燃料電池の技術開発が急速に進み、新発電技術のうち最も実用化の早い一つとして多くの人の関心を集めている。燃料電池開発の現状と将来展望について概観するのが本稿の目的である。

1.1 燃料電池の原理 図1は燃焼器、内燃機関、燃料電池の比較を示したもので、取り出すエネルギーが燃焼器では熱、内燃機関は機械的エネルギーであるのに対し、燃料電池では電気エネルギーになる。発電の原理をりん酸形燃料電池を例として図2に示す。電池は電解質と正極、負極の二つの電極から構成されるが、この場合は電解質はりん酸で、正極には酸素、負極には水素が供給される。負荷を介して両極を連結すると、水素と酸素では水素の方が還元力が強いので

のように電極に電子 e^- を与え、この電子は負荷を通して正極に到達し、ここで

の反応で O_2 を還元する。また、電解液中では負極より正極に H^+ が移動して電流を運ぶ。負荷を流れる電流の方向は電子の流れとは逆なので、外部回路では酸素極のほうから水素極のほうへ電流が流れることになる。

1.2 燃料電池の分類 燃料電池は用いる電解質の種類により、酸形、アルカリ形、熔融炭酸塩形、固体電解質形に分類される。用いる電解質の種類により作動温度も大体きまり、水溶液の酸

形、アルカリ形は室温から 200°C 位まで、熔融炭酸塩形は 650° 付近、固体電解質は 1000°C 付近で稼動する。燃料としては水素、一酸化炭素、などの気体燃料、メタノールやヒドラジンなどの液体燃料が用いられる。燃料電池は、電解質、作動温度、燃料などの特徴によって区別して呼称される。

1.3 発電装置としての燃料電池の特徴 発電装置としての燃料電池の特徴は次のとおりである。

A	B
燃 焼 器.....	熱エネルギー
内 燃 機 関.....	機械的エネルギー
燃 料 電 池.....	電気エネルギー

図1 燃焼器、内燃機関と燃料電池の比較

図2 りん酸形燃料電池の原理

* 東京大学工学部 (〒113 東京都文京区本郷 7-3-1)。

(1) 発電効率が低い 燃料+酸素（あるいは空気）を出発点として電力を得る諸方式のうち、現在最も広く用いられているのは、いうまでもなく、火力発電であるが、最新鋭火力でも発電効率は40%程度で、頭打ちといわれている。図3は火力発電のエネルギー変換プロセスと各段階の効率を示したもので、これからわかるように効率頭打ちの原因は変換が多段であることと、熱エネルギーの形態を通過するため、カルノー効率の制限を受けることにある。燃料電池は化学エネルギーから電気エネルギーへの直接変換で、もちろん熱の形態を取ることはない。その意味で、原理的に100%に近い変換効率が可能で、実際にも50~60%の効率は達成している。

図3 火力発電のプロセスと効率

図4 発電システムの出力と熱効率

(2) 騒音が少ない 電池の放電過程は無音で、ガスや液の供給・循環のためのポンプ類の騒音が少し出るのみで、低騒音である。

(3) 大気汚染物質の放出が少ない 燃料電池では、触媒や材料の劣化を防ぐために脱硫等には留意しており、また、最も温度の高い装置は改質装置で温度も900°C程度であるため、NO_xの発生も極めて少ない。すなわち大気汚染物質の放出は極めて少ない。

(4) 小規模でも効率が低い ガソリンエンジンは小形であるが熱効率は20%程度であり、ディーゼルエンジンは1000 kW以上、蒸気タービンやガスタービンは10万 kW以上にしないと効率40%近くにはならない（図4参照）。従って熱機関+発電機の組合せによる発電システムでは規模をある程度大きくしないと効率が向上しない。これに対し燃料電池発電システムでは100 kW程度でも40%前後の値が得られており、小規模でも大規模でも高い発電効率が得られる。

図5 各種発電方式の部分負荷と熱効率（定格負荷の熱効率を1とした比熱効率）

(5) 部分負荷でも発電効率が低い 熱機関は部分負荷になって定格出力に対する比率が低下すると熱効率が低下する。これに対して燃料電池では部分負荷率30%以上であれば定格なみの効率になる（図5参照）。

(6) 熱供給が容易 (1)~(4)の特徴を生かすと、人口密集地のビルにも燃料電池発電の設備を設置することが可能で、従って排熱を暖房、給湯等に利用できる。排熱利用による効率上昇は40%程度と見こまれ、発電効率40%と合わせて燃料の

図6 アメリカにおけるりん酸形燃料電池の開発

エネルギーが80%も利用できることになる。

2. リン酸形燃料電池

燃料電池のうちで現在最も開発の進んでいるのはリン酸形燃料電池である。

2・1 アメリカにおける開発 リン酸形燃料電池の開発はアメリカのガス事業と UT 社 (United Technologies Corp. 1985 年より International Fuel Cell Corp. と改称) による TARGET (Team to Advance Research for Gas Energy Transformation) 計画により始まった (図 6 参照)。この計画は天然ガスを用いて家庭やビルで発電を行い電力を供給するというもので、1 期 3 年、3 期の計 9 年の計画で始められ、参加ガス会社が資金の 2/3 を提供、残り 1/3 を UT 社が負担し、技術開発は UT 社が請け負うというものであった。我が国からも東京ガス、大阪ガスの両社が途中 (1972 年) から参加している。PC-11 と称される出力 12.5 kW の燃料電池発電設備が開発され、64 基が製造されてアメリカ各地 39 箇所ならびに日本では 2 箇所ですべて野外テストが行われた。この計画は当初 9 年の予定であったが、第一次石油危機もあったため、DOE も力を入れ、1 年

延長された。これに引き続いて GRI (Gas Research Institute) 計画が進められ PC-18 と呼ぶ 40 kW の装置が 49 基製造され野外テストが行われている。我が国でも東京ガス、大阪ガスの手で 1 基ずつのテストが行われている。

UT 社のリン酸形燃料電池を電力事業用として開発する FCG-1 計画は、DOE, EPRI (Electric Power Research Institute) の手で進められ、1 MW 規模の設備が UT 社で試験された。次に 4.5 MW のプラントがニューヨーク市の Consolidated Edison 社の発電所に建設された。1982 年に、東京電力も同じ 4.5 kW の設備を五井火力発電所の敷地内に建設した。ニューヨーク市のものは運転に至らなかったが、五井火力発電所のものは運転に成功した。電力事業用は PC-22 と呼ぶ 11 MW の装置が次に計画されている。

Westinghouse 社は DOE, EPRI の資金を得て空冷式の開発を行っている。空冷式は ER 社 (Energy Research Corp.) によって開発されたものであるが、Westinghouse 社がそのライセンスを受け大形化を進めている。現在は 10 kW であるが、次に 7.5 MW の計画がある。

2・2 燃料電池発電システム リン酸形燃料電池は燃料に水素、酸化剤に空気を使用する。しかし供給される燃料は天然ガスなので、これを水素に変換することが必要である。この化学的変換は改質反応

と、シフト反応

の 2 段で行われる。改質反応を行う装置を改質器、あるいはリフォーマと呼び、シフト反応を行う装置を転化器という。両者を改質器で総称することもあり、燃料電池の前に設けられる。また燃料電池で得られる電力は直流であり、一方商用電力は交流なので、直流を交流に変換する設備が必要となる。これがインバータである。従って燃料電池発電システムは改質部、燃料電池部、直交変換部の三つからなる (図 7 参照)。

2・3 電池構造 リン酸形燃料電池の負極の反応には式 (1) からわかるように H_2 , H^+ , e^- の三つの化学種が関与していて、 H_2 は気相、 H^+ は液相、 e^- は固相に存在する。また負極の反応には式

図 7 リン酸形燃料電池発電システムの構成⁽¹⁾

図 8 リン酸水溶液燃料電池の単電池構造⁽²⁾

(2)にみられるように O_2 , H^+ , e^- , H_2O が関与していて, O_2 は気相, H^+ , H_2O は液相, e^- は固相に存在する. それ故, 両極の反応とも気・液・固の3相が会したところ, すなわち, 毛細管でいえばメニスカスの部分で起こると考えられる. この部分を3相帯という. 従って, 電極の反応を円滑に進めるために, 多孔質電極の内部に3相帯を安定にかつ多数つくり, 適当量の触媒を使用する. もう少し具体的に電極作製法の例を述べれば, 炭素繊維でつくったカーボン紙の上に炭素粉末とテフロンエマルジョンの混合物を薄く塗り, その上に触媒を担持した炭素粉末と何もつけていない炭素粉末とをテフロンエマルジョンで練ったものを第2層として薄く塗り, 全体で1mm程度の厚さに仕上げる. テフロンエマルジョンは顕著な撥水性があり, バインダの役目をすると同時に3相帯の安定形成に重要な働きをする. このようにしてつくられた電極は多孔質でガス拡散が速やかに起こり, 多孔質電極またはガス拡散電極と呼ばれる.

単セルの電池の起電力は0.7V程度であるから, 数百Vの電圧を得るためには, セルを多数積層しなければならない. 図8に積層電池の一部を示す. 図8(a)の電解質はSiC粉末とりん酸を混ぜてプレスして板状としたもので, SiC粉末のすきまに85%のりん酸が保持されている. 電極はガスの流路となる溝の付いた多孔質板の片側にガス拡散電極層をつけたものである. 単セルとその上下の単セルとの間にはセパレータが置かれる. これはセル間を直列接続すると同時に燃料ガスと空気が混じらないようにするためのものである. 図8(b)は溝がセパレータのほうに付き, 電極は平坦な点に特徴がある. 電池の温度を調節するために, 5セルごとに冷却管が一つ設けられる. 冷却材に水を用いる水冷式と空気を用いる空冷式とがある.

2・4 電池特性 図9にUT社のりん酸形燃料電池の特性を示す. 起電力は1.23Vであるが, 電流密度が大きくなると, 電池の内部抵抗のため電池内部の電圧降下が大きくなり, 端子電圧は低下する. 電流密度が大きくなっても端子電圧低下の少ないもの程性能のよい電池であるといえる. この図には1967年と1977年の時の電圧-電流曲線が与えられているが, 低電流密度の時は1967年のほうが性能がよく, 高電流密度の時は1977年の

E_c : カソードの電位, η_a : アノード分極

E : 端子電圧

	温度 °C	圧力 気圧	白金触媒量 mg/cm ²
1967 年	160	1	20
1977 年	190	3	0.75

図9 UT 社りん酸形燃料電池の進歩⁽³⁾

ほうが性能がよい. 低電流密度の時に1967年のほうが性能がよいのは, 触媒である白金の使用量が多いことによる. 高電流密度の時1977年のほうが性能がよいのは, 電圧降下の内訳からわかるように, IR降下と拡散の遅れによる電圧降下が小さくなったため, 材料や化学工学的な改良によるものと思われる.

2・5 わが国における技術開発 わが国のりん酸形燃料電池へのかかわりは, 既に述べたように, 東京ガス・大阪ガスの2社が1972年TARGET計画に参加した時から始まったが, 東京電力がUT社から4.5MWの燃料電池発電システムを導入することを決定したことにより, 電機メーカーが開発に着手した. 更にムーンライト計画によって昭和56年度より燃料電池発電技術開発のプロジェクトが始まり, その中心にりん酸形燃料電池が据えられ, このため, この電池に対する関心はとみに高まった. 表1はムーンライト計画の開発目標, 図10は開発スケジュールである. 現在火力発電所代替用1000kW1基を日立・東芝が協同で, 分散設置用1000kW1基を富士電機・三菱電機が協同でそれぞれ製造中で, 61年中にテストが行われる予定になっている. ムーンライト計画で取り上げられたりん酸形燃料電池はいずれも水冷式であるが, 三洋電機はER社の技術を導入し

て空冷式を開発しており、現在 50 kW 機を試験中である。

2・6 今後の技術開発課題 リン酸形燃料電池が実用化されるためには、(1) 効率向上、(2) 寿命、(3) 経済性の三つの課題を解決しなければならないとされている。

(1) 効率向上 燃料電池は原理的には高効率の期待できる発電方式であるが、現在まだその特徴が生かし切れていない。電池そのものの性能向上はもとより、改質器の効率向上、補機動力の低減、排熱の有効利用等の技術開発を進める必要がある。

(2) 寿命 200 mA/cm² 程度の電流密度で初期端子電圧が 0.7V 以上、4 万時間の運転後端子電圧降下が 10% 以内が一応の目標となっている。正極の電位を水素電極基準で 0.8V 以上にすると、白金触媒が急速に溶解することが見いだされているなど、材料面等で種々の問題を解決しなければならない。

(3) 経済性 各種の発電設備の固定費を表 2 にまとめて示す。燃料電池発電システムがその特徴を生かして市場性を獲得するためには、これらの固定費に匹敵する 20 万円/kW 程度にならないとされている。量産効果を考慮しても普及の初期には 40 万円/kW 程度にならない。現在どの程度の原価かわからないが、PC-18 の購入価格を出力で単純に割り算すると 375 万円/kW、4.5 MW のそれが 110 万円/kW ということであり、40 万円/kW よりかなり高い水準にあると思われる。今後安価な材料の使用、

項目	年度	56	57	58	59	60	61
リン酸形燃料電池							
(1) 要素技術		セル技術、積層技術、リフォーマ					
(2) 発電プラント 試作運転				基本設計、製作設計	製作	実証試験	
				中間評価			
溶融炭酸塩形 燃料電池		電池材料の探索、セル技術、積層電池、大形セル技術の開発					

図 10 ムーンライト計画「燃料電池発電技術」研究開発計画

工程の簡素化、信頼性向上等により、コストダウンをはからねばならない。

3. 溶融炭酸塩形燃料電池⁽⁴⁾⁽⁵⁾

3・1 溶融炭酸塩形燃料電池の原理 リン酸形燃料電池は最も開発が進んでおり、しばしば第 1 世代の燃料電池と呼ばれる。これに続く第 2 世代と考えられているのが溶融炭酸塩形燃料電池である。この電池は Na₂CO₃-K₂CO₃-Li₂CO₃ の溶融炭酸塩を電解質に用いる燃料電池で、作動温度は 650°C 付近である。図 11 に水素を燃料とした場合の原理図を示す。正極には O₂ (または空気) と CO₂ の混合ガスが供給され

の反応で CO₃²⁻ イオンを生ずる。CO₃²⁻ は電解質中を負極側に移動し、負極で

で、H₂O と CO₂ が生成する。溶融炭酸塩形燃料電池は両極において CO₂ の出入りを伴う。

3・2 溶融炭酸塩燃料電池の特徴 溶融炭酸塩燃料電池はリン酸形燃料電池にくらべて作動温度が高いので次のような利点がある。

(1) 高効率のシステムである。 溶融炭酸塩は導電率が高いので IR 降下が小さく、また分極

表 1 ムーンライト計画の目標
(1) リン酸形燃料電池システムの開発目標

項 目	目 標
出 力	1 000 kW 級
発 電 効 率	40% 以上
白金使用量	6.5 mg/W 以下
寿 命	40 000 時間
環 境	法令基準値以下
(将来) 経済性	在来気力発電方式と同等以上
設 置 場 所	都内または都市近郊に設置可能
設 置 面 積	発電用地と同等以下

(2) 分散設置用と火力発電所代替用の目標

	分散設置用	火力発電 所代替用
容 量 MW	20~30	100
温 度 °C	190	205
圧 力 kg/cm ² ・G	2~4	7~8
電 流 密 度 mA/cm ²	200	220
セル電圧 V	0.7	0.67

表 2 電源別発電原価について（昭和 59 年度運転開始ベース）

	建設単価 (kW 当たり) 万円	送電端発電原価 (kW・h 当たり) 円	燃料費 比率割
一般水力	63	21	—
石油火力	14	17	0.75
石炭火力	24	14	0.4
LNG 火力	19	17	0.65
原子力	31	13	0.25

(出典) 資源エネルギー庁（昭和 59 年 11 月）

図 11 溶融炭酸塩形燃料電池の原理⁽⁴⁾

も小さくなるので発電効率が高い。また排熱の温度が高いので燃料改質（吸熱反応）のプロセスヒートとして利用できるなど、多目的に利用できる。

(2) 低コストプラントが可能である。温度が高いので高価な貴金属触媒は不要である。また、電池の排熱を利用する内部改質が可能で、CO のまま利用可能なため転化器（ $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ の反応で H_2 をつくる装置）も不要であるため、システムが単純化される。いずれもプラントの低コスト化につながる。

(3) 燃料の多様化がはかれる。天然ガスのみならず、石炭や重質油をガス化して得た燃料ガスも使用できるので、燃料の多様化がはかれる。

一方これとは裏腹に不利もある。例えば、温度が高いため、材料が腐食しやすいなどである。

3.3 電池構造 電解質板にはペースト式とマトリックス式がある。前者は $\gamma\text{-LiAlO}_2$ の粉末と炭酸塩の粉末を混合してプレスして板状に仕上げたものであり、後者は $\gamma\text{-LiAlO}_2$ の粉末とセラミック繊維とを混合して焼結し、多孔質セラミッ

図 12 内部改質形電池の構造⁽⁴⁾

その他

松下電産：セル要素技術

神戸製鋼：セル材料

住友電工：セル材料

図 13 溶融炭酸塩形燃料電池研究開発体制（昭和 59 年度以後）

ク板としたあと炭酸塩を含浸させたものである。正極は Li_2O をドーブした多孔性 NiO 板、負極は多孔性 Ni 板が用いられる。外部改質の場合には、電池構造はりん酸形と類似のものになり、内部改質の場合には燃料ガスの流れる通路に改質触媒を置き、電池の排熱を利用して改質する。図 12 にその構造を示す。

3.4 アメリカにおける技術開発 1982 年から 1985 年まで年間約 1 000 万ドルの研究開発費が支出されている。スポンサーは DOE, EPRI, GRI で DOE が最も多く 70～80% を支出している。GRI は 1983 年までは 7% 程度を支出していたが、以後は出していない。研究開発に携わっている主な会社は UT 社, GE, ER 社で、1976 年から 1987 年までの実績及び計画予算のうち、上記 3

社はそれぞれ 49%, 26%, 17% を受けている。現在は材料等の基礎研究, 小形セルによる積層化, スケールアップ (電極面積 0.72 m^2) などが行われている。

3・5 わが国における技術開発 ムーンライト計画の燃料電池発電技術開発計画の中で基礎研究が行われ, 現在 10 kW 規模の開発が進められている。図 13 は熔融炭酸塩形燃料電池の開発にかかわっている会社, 機関とテーマの一覧である。

4. メタノール燃料電池

天然ガスの海上輸送は現在 LNG で行われているが, メタノールとして輸送し, 火力発電力, 自動車の燃料などに利用するという考え方もある。メタノールは液体なので水素に比べればはるかに貯蔵性にすぐれており, メタノールを用いる燃料電池は興味深い。メタノール燃料電池は 1950 年代から研究され, メタノールを直接燃料に用いるものと, 水蒸気改質して H_2 をつくりこれを用いる間接形の 2 種類がある。簡便という点では直接形がすぐれているが, 特性が悪かったため, 実用化には至っていなかった。メタノール燃料の考え方が具体性を帯びてきた昨今, メタノール燃料電池が見直され, 再度の開発が始まっている。現在のところ直接形は電流密度 60 mA/cm^2 で端子電圧 0.4 V と性能は依然不満足で, 革新的技術の出現がまたれている。

5. おわりに

燃料電池開発の現状と今後の課題について一覧した。燃料電池発電技術は従来の発電技術とは原理的に大いに異なり, それだけに特色のある技術といえる。りん酸形も熔融炭酸塩形もアメリカが先行し, りん酸形では開発開始の時期で 10 年以上の開きがあり, かなりの立ち遅れがある。従ってわが国で実用化ということになった場合, 特許の問題がいろいろ出てくるのではあるまいか。これに対し, 熔融炭酸塩形はまだ開発初期段階といつてよく, 差は 3~5 年程度と考えられる。わが国独自の技術を産み出す余地は十分残されていると思われる。燃料電池の今後に大いに期待したい。

(原稿受付 昭和 61 年 1 月 8 日)

文 献

- (1) Lawrence, L.R., Jr., *Proc. 12th Intersociety Energy Conversion Eng. Conf.*, (1977), 319.
- (2) Johnson, W.H., ほか 4 名, *Proc. 13th Intersociety Energy Conversion Eng. Conf.*, (1978), 732.
- (3) Fickett, A.P., *Proc. Symp on Electrode Materials and Processes for Energy Conversion*, (1977), 546.
- (4) 吉沢監修, 燃料電池の技術と経済性, (昭 60), 103, CMC 社.
- (5) 新エネルギー総合研究開発機構, 熔融炭酸塩型燃料電池部会, 「熔融炭酸塩型燃料電池発電システムの研究開発状況と将来展望に関する調査報告書」, (昭 60).