燃料電池の開発状況

株式会社東芝 電力システム社燃料電池事業推進部 白 岩 義 三

Development of Fuel Cell Power Plant

Yoshimi Shiraiwa

System Engineering Group, Fuel Cell Systems Division,
Power Systems & Services Company, Toshiba Corporation

Since the control of greenhouse gas emissions is now an international issue of growing importance, the Fuel Cell Power Plant (FCPP) is increasingly expected as one of the most promising new technologies.

Phosphoric acid fuel cell power plants have been introduced at various commercial applications aimed at increasing overall energy efficiency while minimizing impact on the environment. ADG (Anaerobic Digester Gas) fueled FCPP and biogas fueled FCPP have been developed. Both ADG and biogas are produced from the methane fermentation process at water treatment facilities. In addition, a new application has been developed with waste-methanol, which is discharged from the product cleaning process in semiconductor industry.

And the new application for FCPP has been developed as a premium power supply for important load, providing constant voltage and constant frequency.

Polymer electrolyte fuel cells are applicable to various fields such as residences, and automobiles, and are developing with quick steps.

分類：U₇ 電気，Y₈ 物理化学，X₃ 大気

1. はじめに

燃料電池は小型で高い発電効率を有し、環境特性に優れた新しい発電装置として、環境問題の重要性が増している現在、分散電源やコージェネレーションシステム、さらには電気自動車の電源などへの適用に期待が高まっている。中でも、りん酸形燃料電池 (PAFC) はその開発が完了し、本格的普及を推進すべき段階に到達している。また、固体高分子形燃料電池 (PEFC) は定置用から自動車用まで幅広い用途に適用が可能であり、現在実用化のための開発が進められている。

2. 燃料電池の種類と特徴

燃料電池は、水素と酸素を電気化学的に反応させ、燃料から直接的に電気エネルギーと熱エネルギーを同時に取出すことのできるエネルギー変換装置である。燃料電池の酸素/水素の両電極の間には電解質と呼ばれるイオン透過層があるが、この電解質の種類によって、表1に示す5種類に代表される。ここではりん酸形と固体高分子形の2つのタイプの燃料電池に焦点を当て、その特徴や構成、適用例、開発動向等を紹介する。

表 1 燃料電池の種類と特徴

	りん酸形 (PAFC)	固体高分子形 (PEFC)	溶融炭酸塩形 (MCFC)	固体電解質形 (SOFC)	アルカリ形 (AFC)
電解質	りん酸水溶液	スルホン酸基 高分子膜	Li-Na/Li-K 系 炭酸塩	ジルコニア系セラ ミックス	水酸化カリウム 水溶液
動作 温度	200℃	70～90℃	650～700℃	900～1,000℃	60～90°
燃料	天然ガスやLPG などを改質した水 素リッチガス	天然ガスやLPG などを改質した水 素リッチガス	天然ガスや石炭ガ スを改質した水素 リッチガス	天然ガスや石炭ガ スを改質した水素 リッチガス	純水素
発電 効率	35～42% (LHV)	30～40% (LHV)	45～60% (LHV)	45～60% (LHV)	～60% (LHV) (純水素・純酸素)
用途	中小規模分散 電源/コージェネ	自動車用や小規模 分散電源	中大規模分散電源 やコンバインドサイ クル	中大規模分散電源 やコンバインドサイ クル	宇宙/軍事など特 殊用途

図 1 未利用エネルギーの種類とそれを利用することによる200kW燃料電池にて発電可能量

3. りん酸形燃料電池の現状

3.1 りん酸形燃料電池の実用化

りん酸形燃料電池の開発は、日本においては1980年代より本格化し、その後20年間にわたり、国の支援による開発プロジェクト、フィールドテスト等の助成制度、及び民間の努力により進められてきた。その結果として、りん酸形燃料電池は効率、環境特性等の性能面のみならず、耐久性、信頼性を格段に向上でき

た。日本では、これまで民生用（業務用）や産業用として50kW～200kW容量のプラントを中心に100台以上が稼動してきたが、そのうち13台が商用化を前提とした耐久性の目標である累積運転4万時間を越えている。りん酸形燃料電池は、今まさに商用化段階にある。燃料電池発電設備の製造コストも開発段階に比べ、飛躍的な低減を達成しているが、今後の本格的普及のためには量産化によるさらなるコストダウンの推進が必要であるとともに、燃料電池の特徴を活かした

新しい付加価値の創造とこれを用いた新用途の開拓及び市場導入の推進が重要である。

3.2 新用途への適用技術開発と市場導入事例

3.2.1 未利用エネルギーの燃料電池への適用

燃料電池は、水素を燃料として用いる発電装置であり、一般に都市ガスやLPGなどの炭化水素類から水素を作り発電に使用している。これらの燃料の代りに今まで利用されずに捨てられていた食品工場等の排水や下水汚泥の嫌気性処理の際に発生するメタンリッチガスや工業廃棄物等をエネルギー源として活用できれば環境改善、省資源、経済性等多くの点で有効なシステムの構築が可能となる。

燃料電池の燃料として、利用可能な廃棄物及びその量を、産業、市民生活、農業/畜産の分野毎に当社にて調査した一例を図1に示す。200 kWの容量の燃料電池で、定格発電するために必要なガスを発生する設備を集計すると、総発電可能量は140 MWに相当する。これら未利用エネルギーを燃料とした燃料電池の具体例を以下に紹介する。

1) メタン発酵ガス（バイオガス/消化ガス）の適用

食品排水、生ごみ、下水汚泥等を嫌気性処理した際に発生するメタン発酵ガスはバイオガスあるいは消化ガスと呼ばれ、60～70%のメタンガスと40～30%の

図2 サッポロビール(株)千葉工場に設置された燃料電池

二酸化炭素で構成されるため低位発熱量が22～25 MJ/Nm³の低カロリーガスである。これらのバイオガス/消化ガスは燃焼の安定性や排ガスの性状等の点から従来ボイラーや熱機関での利用に技術的配慮が必要であったが、電気化学的反応で発電する燃料電池の場合、その適用が比較的容易である。

(1) 食品工場への適用例

バイオガスへの適用例として、サッポロビール(株)千葉工場への導入事例を紹介する。本設備は「新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法(新エネ法)」による導入助成事業の適用対象となっている。

図2に設置状況を、図3にシステムを示す。ビール工場の有機性廃水をメタン発酵槽にて浄化する際に発生したバイオガスは、その中に含まれる不純物(硫化水素、塩類、アンモニア等)を除去する前処理装置を経由して燃料電池発電設備に供給される。燃料電池発電設備では、約80 Nm³/hのバイオガスから200 kWの電力と740 MJ/hの熱を生成する。電力は工場内の系統に連系され、熱は工場内の熱利用設備の熱源に利用されている。本システムの導入により、ビール1klの製造に要する使用電力の約6%、石油燃料の約2%を削減できたことが評価され、新エネルギー財団主催の1998年度の新エネ大賞において「新エネルギー財団会長賞」を受賞した。なおアサヒビール(株)四国工場にも同時期に200 kW燃料電池を導入し、バイオガスにて運転を開始している。

(2) 下水処理場等への適用例

当社は、1994年から1998年にかけて横浜市下水道局との共同研究により、消化ガスによる燃料電池発電システムを開発した。200 kW燃料電池発電設備を用いて5000時間以上に及ぶ実証試験を行い、メタン濃度約60%の希薄ガスでの定格発電運転と安定性、耐久性を実証した。この成果により、日本初の消化ガス燃料電池実用機が1999年11月に横浜市北部汚泥処理センターに納入され、良好に運転中である。設置状況を図4に示す。この燃料電池システムは、(財)環境調

図3 サッポロビール(株)千葉工場燃料電池設備のシステム構成

図4 横浜市北部汚泥処理センターに設置された燃料電池

査センターが主催する第27回環境賞（2000年度）において「優良賞」を受賞した。

また、家畜（牛、豚、鶏等）の排泄物も、メタン発酵により浄化できるとともに、貴重な未利用エネルギーとなる。NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）は、国際研究協力事業（グリーンエイドプラン）の一環として「メタン発酵ガス燃料電池発電システムの実用化に関する研究協力」を1999年度から4年計画で進めている。豚の糞尿を発酵させて得られるメタンリッチガスで燃料電池を運転し、クリーンな電力と熱エネルギーを供給するとともに、廃液は水処理設備で浄化、固形分は堆肥化して農業に活用することで環境汚染を防止するトータルシステムを中国と協力して広東省の養豚場に建設し、運転研究を行う計画である。豚約1万頭の排泄物で200kWの発電ができる見通しである。

2) 工業廃棄物への適用

(1) 半導体製品製造工場（排メタノール）への適用

半導体工場や液晶工場の製造プロセスから排出される排メタノール等のアルコール系物質は、従来産業廃棄物として処理業者に有償で引き渡され、焼却等の手段で、有効に活用されることなく処分されていたが、これを積極的に燃料電池で利用することにより資源の有効利用を図ることが可能となる。排メタノール中の不純物を除去した後、メタノールを気化させることにより、通常の高スループットと同じように燃料電池発電設備の燃料として利用できる。セイコーエプソン（株）豊科事業所には、排メタノールを燃料とした200kW燃料電池発電設備2台（図5参照）が設置され、得られた電力は工場の系統に連系され、工場内で消費される。システムを図6に示す。また、同時に発生する熱は蒸気と温水の形で、空調や工場の製造プロセスで使用する純水の加温に利用されている。200kW×2台の燃料

電池の導入により、工場から発生する二酸化炭素を14.5%削減でき、年間重油換算で337klのエネルギーを削減することができた。なお、この設備は工業廃棄物を燃料電池の燃料として使用したりサイクル性と先進性が評価され、1999年度の新エネ大賞にて「新エネルギー財団会長賞」を受賞した。

(2) ガス化溶融炉ガス/排水素への適用

ガス化溶融炉は、従来、ごみ焼却の過程で生成されていた人体に有害なダイオキシンの発生を厚生省の規制値よりもはるかに少ないレベルに押さえることができたことから現在注目を浴びている環境に優しいごみ処理設備である。この設備から生成されるガス中には、水素、二酸化炭素、一酸化炭素を含んでいることから燃料電池の燃料として利用可能である。この環境性に優れたガス化溶融炉と燃料電池を組合せたシステムが川崎製鉄（株）千葉製鉄所に導入（図7参照）され、発電運転を開始した。燃料電池の水素供給源として、上記のほかに半導体工場のシリコンウェハー製造プロセス、電気分解やソーダ製造プロセス等からの副生水素も利用可能である。

3.2.2 高品質・高信頼性電力供給システム

1) 系統連系/自立運転（GC/GI）切替え

燃料電池は通常コージェネレーションシステムとして系統連系運転を行っているが、系統に停電が発生した時に自動的に自立運転に切替え、一種の非常電源として運用することが可能である。標準的には変換装置に内蔵のブレーカは機械式であるため、切替えには停電検出時間も含めて1～2秒程度時間がかかるが、サイリスタスイッチを組合せれば1/2サイクル程度の瞬断で切替えが可能となる。これは、コージェネレーションを基本機能とする燃料電池にSPS（常時系統給電型UPS（無停電電源装置））と同等な機能を付加するものである。図8にこの無瞬断切替えシステムの構

図 5 セイコーエプソン(株)豊科事業所に設置された燃料電池

図 7 川崎製鉄(株)千葉製鉄所に導入された燃料電池

造図を示す。

2) UPS 融合システム

従来、重要負荷への安定電源確保のためには、UPS と長時間の電力供給用の非常用発電機を組合せた電源供給システムが用いられてきた。これと同等に機能し、かつランニングコストが従来の UPS に比べ有利な電源供給システムとして高品質・高信頼性電力供給システムを開発した。そのシステム構成を図 9 に示す。このシステムは、当社の 200 kW りん酸形燃料電池 PC 25™C に標準搭載されているインバータの代りに、DC/DC コンバータを組込み、燃料電池を直流出力型に改造し、その直流出力を 200 kVA の汎用 UPS の直流部分に接続したものである。

このような構成とすることにより、UPS 内のインバータにより直流出力を交流電力に変換し独立(重要)負荷へ供給すると同時に、交流/直流変換装置(整流器)を逆動作(双方向インバータ)させることにより、余剰直流電力を交流電力に変換し系統へ連系運転させている。さらにインバータ故障時のバックアップとして高速スイッチ(サイリスタ)による電力系統の直接受電機能や、都市ガス等の主燃料が絶たれた場合の予

図 6 セイコーエプソン(株)豊科事業所の燃料電池のシステム構成

図 8 系統連系/自立運転切換えシステム

備燃料への自動切換え機能の併用により電源信頼性を極めて高いレベルとすることができる。

その結果、長時間運転特性に優れる燃料電池は常用のコージェネレーションシステムを基本とした運転を継続しつつ、UPS と蓄電池を組合せた高信頼性電源システムの機能を同時に実現することができ、高効率で経済的かつ環境に優しい高信頼電源システムを実現できる。

本システムに代表される各種重要負荷対応電源は、東京ガス、大阪ガス、東邦ガスと当社が共同でシステム開発しており、現在、大阪工業技術研究所、東京都立科学技術大学及び東邦ガス本社の 3 ヶ所で順調に運転中である。高品質・高信頼性電源としての燃料電池システムは、今後の情報技術 (IT) の普及に向け、研究所や大学のみならず、オフィスや病院等の民間施設への導入も期待されている。

4. 固体高分子形燃料電池 (PEFC) の開発動向

4.1 PEFC の開発経緯

PEFC は、アポロより前の 1960 年代初頭のジェミニに採用された燃料電池であったが、電解質に使用された固体高分子膜の性能、コスト、耐久性等の問題により、地上向けの開発は 20 年以上の空白期間を生む結果となった。

1980 年代に入り、デュポン社が高性能ナフィオン膜 (フッ素系ポリマー樹脂) を開発し、引続きダウ社

図9 高品質・高信頼性電力供給システム

が膜の薄膜化に成功したことから、PEFCの開発が再開され、カナダのパラド社が1990年代初めに純水素を燃料としたバスへの実証機搭載を開始した。PEFCは電池動作温度が80℃以下であるため起動時間が短く、エネルギー出力密度を高くとれること、しかも電解質が固体であることから、車載用としての要求仕様（軽量、コンパクト、耐震、量産効果）に対しては、各種燃料電池の中で最も近い位置にある。また、排熱回収温度が低いことから冷房の熱源には適用したいが、数十kW級のオンサイト型から500W級の家庭/携帯用までの市場向けとして、発電と暖房/給湯を併せ持った熱電併給装置として活用が可能であり、21世紀初頭の商用化を目指して世界の電機メーカ、自動車メーカ、ベンチャー会社による開発競争が展開されている。

日本におけるPEFCの開発は1990年代頃から検討が始まり、NEDOのプロジェクトが1992年から始まった。このプロジェクトは1996年からフェーズIIに入り、電池スタックやシステムの開発が行われている。一方、自動車用燃料電池の開発気運の高まりの中でNEDOプロジェクト以外にも、多くの企業が開発を開始しており、特に自動車会社が積極的な活動を行っており、電池、改質器等の主要部品をはじめとする各構成機器の要素研究を含む総合的开发を推進している。また、量産規模という点においても、他の形式の燃料

電池が基本的には発電用のみであるのに対して、PEFCは自動車用という大きな潜在市場があり、劇的なコストダウンが実現できる可能性がある。

4.2 コージェネレーションシステムへの適用

現在、数多くの企業等でPEFCのコージェネレーションシステムへの適用開発が始まっているが、以下に代表的なシステムを紹介する。

4.2.1 NEDOプロジェクト

当社は、1992年度よりNEDOからの委託研究として定置型30kWPEFCシステムの研究開発を実施している。主要機器とともにシステム全体の設計、製作を行っており、2000年度末には試運転を開始した。本プラントは日本におけるPEFCの本格的なコージェネレーションシステムへの適用の第一歩として電気出力30kW、60～80℃の温水供給タイプのシステム開発が行われており、燃料はPAFCと同様に、都市ガスやLPGが考えられている。

表2に30kW燃料電池発電設備の開発目標を、また図10に30kW機のパッケージ外観図と内部構成機器を示す。この30kWシステムは、分散電源としての重要な使命の一つである省エネ性や地球環境への貢献に配慮し、開発目標として発電効率40%以上と高く設定している。また、システム運転圧力は、発電効率、運転信頼性、制御性等から常圧（大気圧+ α ）としている。さらに、パッケージ寸法と重量は、ビル等

表 2 30 kW 燃料電池発電設備の開発目標

出力	30 kW (交流送電端)
発電効率	40% (LHV, 送電端)
総合効率	80% (LHV, 電気+60℃ 温水)
サイズ	2.0 m (幅) × 1.5 m (奥行) × 1.8 m (高さ)
重量	2.0 ton
燃料	天然ガス/LPG
電池本体	運転圧力：常圧，内部加湿方式
燃料改質系	水蒸気改質 2 段 CO 選択酸化
インバータ	系統連系専用，トランスレスシステム

図 10 30 kW 機のパッケージ外観図と内部構成機器

の屋内への搬入と設置を考慮して設定した。このシステムはコージェネレーション設備としての利用に加え、停電時のバックアップとしての保安電源、さらにはコンピュータや通信設備等への高品質電源、直流電源等としての活用も可能であり、将来の適用市場の広がりが期待されている。

4.2 家庭用コージェネレーションシステム

PEFC は、その特性から家庭用小型コージェネレーションシステムにも適しており、ガス会社や電機メーカなどが開発を開始している。

当社では家庭用 PEFC として、1 kW 級システムの

図 11 燃料電池を用いた家庭用システムの概念図

図 12 燃料電池の特徴と分散電源に対する要求仕様

開発も行っている。平成 11 年度に PEFC による缶飲料の自動販売機を試作し、運転デモも行っており、この際の経験と技術が本システムの開発に大いに生かされている。図 11 に燃料電池を用いた家庭用システムの概念図を示す。定格出力は 700 W であるが、日本の一般家庭における電気と熱の消費パターンをもとに、経済性と環境性を考慮に入れて設定した値である。ま

た、当面の発電効率を30%に設定しているが、将来的には35%にまで高めていくことを目標としている。将来コストダウンが加速すれば、この分野も大きな市場に成長していくものと期待される。

4.2.3 分散電源としての適用

定置式PEFCの、もう一つの適用として分散電源用が考えられる。この小型分散電源は、昨今の電力自由化やマイクロガスタービンの登場などの影響で、特に注目され始めている分野である。図12に燃料電池の特徴と分散電源に対する要求仕様を示す。燃料電池が分散電源として最適なシステムであることが判る。燃料電池は、太陽光発電、電池電力貯蔵と同様に直流を発生する電力源であり、交流への変換ならびに電力系統との連系を行うためにパワーコンディショニングシステム(PCS)が不可欠となるが、小型化・高効率化のほかにも分散電源として必要な自立運転機能や無

効電力調整機能、及び系統連系に必要な制御・保護機能、単独運転検出機能などの開発も平行して行われている。

5. あとがき

21世紀は、地球温暖化防止を最優先した多種多様な燃料のベストミックス化と、大型電源/分散電源のベストミックス化を重視する時代になると予想されている。燃料電池は、その高い効率で二酸化炭素の排出量削減に寄与するだけでなく、地球規模において酸性雨の、また地域社会において大気汚染の原因となるNOx、SOx、ばいじんの排出がほとんどないクリーン性と静止型発電による静粛性等を備えており、21世紀にふさわしい最適なエネルギー変換装置として期待されている。21世紀には宇宙、船舶、車、地域社会、家庭を含む広い場で開花させたいと念じている。

大規模風力発電の導入事例とその特長

— 苫前グリーンヒルウィンドパーク —

株式会社トーメン 電力事業本部第一部 中村 成人

1. 風力発電の現状

世界的な地球環境への意識の高まりを背景に、90年代半ば以降欧米先進各国を中心に風力発電に代表されるいわゆる再生可能エネルギーの導入が急速に進んでいる。現在全世界で設置されている風力発電の総容量は約 12,500 MW、最大のドイツで 4,445 MW であるのに対し、未だ離陸期にある我が国の設置済み容量は 100 MW 程度と推測される。

トーメンは 1987 年に米国カリフォルニア州におけるプロジェクトを始めとして、現在までに欧米、日本の 6 ヶ国で合計約 700 MW の風力発電設備を建設・運営中である。

2. 苫前グリーンヒルウィンドパーク

1999 年 11 月、トーメンは日本で初めて且つ最大規模の集合型風力発電施設（1 MW×20）を、北海道苫前町に完成し運転を開始した。この施設は通産大臣の新エネルギー事業者としての認定に基づく補助金対象事業であり、且つ 17 年に亘り発電電力の全量を北海道電力に売電する我が国初の風力発電による卸電力事業でもある。その特長は下記の 4 点である。

- ・大規模化による大幅なコストダウン（風車はデンマーク製を採用）
- ・複数の運転員を常駐させることによる安全・安定操業の確保
- ・周辺環境との調和
- ・地域社会との共生

3. 風力発電の将来

欧米各国は政策的支援を含めて、今後積極的に風力発電の導入を促進していく方針を明らかにしている。日本においても漸く風力発電を始めとする自然エネルギー導入に関する本格的な関心と議論が高まるところとなって来た。風力発電の本格的且つ大量の導入に当たっては技術的、経済的な課題もあるが、これらを踏まえて種々の観点から、国民の一人一人が自分自身の明日のライフスタイルとエネルギーを選択する時期に来ているものと考えられるものである。

（本文 64 ページ）

燃料電池の開発状況

株式会社東芝 電力システム社燃料電池事業推進部 白岩 義三

燃料電池は小型でも高い発電効率（40%：LHV）を有し、窒素酸化物の発生量が少なく、硫酸化合物やばいじんの発生量がなく、低騒音でしかも振動もほとんどないことから環境特性に優れた発電装置として、環境問題の重要さが増している現在、分散電源やコージェネレーションシステム、さらには電気自動車の電源などへの適用に期待が高まっている。中でも、りん酸形燃料電池（PAFC）は、その開発が完了し、本格的普及を推進すべき段階に到達している。都市ガスや LPG を原燃料とした、燃料電池の発電電力とそれに付随して生成される熱を使用するコージェネレーションとしての利用形態が進む中、食品・紙パルプ工場等の排水や下水汚泥の嫌気性処理の際に発生するバイオガスや消化ガス、半導体製造工場から排出される排メタノールのような未利用エネルギーを燃料電池の原燃料とする新しいアプリケーションが開発され、発電運転を開始している。さらに、燃料電池の特徴を生かした高品質・高信頼性電力供給システムへの適用など、新しいアプリケーションがどんどん開発されている。

また、固体高分子形燃料電池（PEFC）は定置用から自動車用まで幅広い用途に適用が可能であり、