燃料電池の最先端技術

瀬谷　彰利（せや　あきとし）

1　まえがき――燃料電池とは

最近，ゼロエミッションの自動車用や家庭用としてしばしばマスコミに登場する燃料電池は，水素と酸素の化学反応による発電装置である。燃料電池は，①同じ発電容量のほかの発電装置と比較して発電効率が高い（**図1**），②窒素酸化物，硫黄酸化物をほとんど排出しないクリーンな排気，③発電は化学反応によるので低騒音であるといった特徴を持つ。このように燃料電池は従来の発電装置と比較して環境負荷が小さい革新的な発電装置である。

通常，**図2**に示すように燃料電池の発電部であるセルは，水素をイオンにする水素極，イオンを通す電解質層，イオンと酸素を反応させる酸素極から構成される。燃料である水素は都市ガスなどの炭化水素から触媒反応により得る。**図3**に示すように発電装置としては，セルを多数直列に接続した電池スタック，原燃料である炭化水素などから水素を触媒反応で生成する燃料改質装置，直流を交流に変換するインバータ，ポンプやブロワなどの補機，全体を制御する制御装置から成る一種のまとまった化学プラントであり，必要とされる技術は多岐にわたる。

電池スタックは，電解質層の種類によって固体酸化物形，溶融炭酸塩形，りん酸形，固体高分子形，アルカリ形の5種類に分類される。その中で実用となっているのはりん酸を電解質として使用するりん酸形のみである。最近は，電解質層として，数十μmの高分子膜を使用する固体高分子形が自動車用や家庭用として脚光を浴びており，グローバルな開発競争が激化している。

富士電機の燃料電池技術は，1961年に研究開発を開始してから40年以上の歴史を持ち，上述の5種類すべての研究開発を行った。現状では，実用化までこぎつけたりん酸形燃料電池の事業化と，固体高分子形燃料電池の研究開発を精力的に実施している。

図1　各種発電装置の発電効率比較

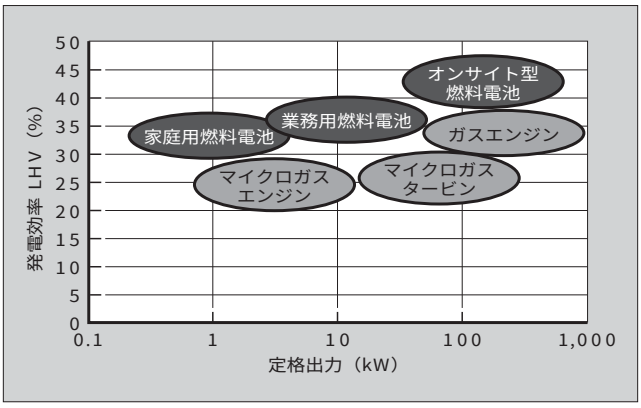


図2　固体高分子形燃料電池の発電原理

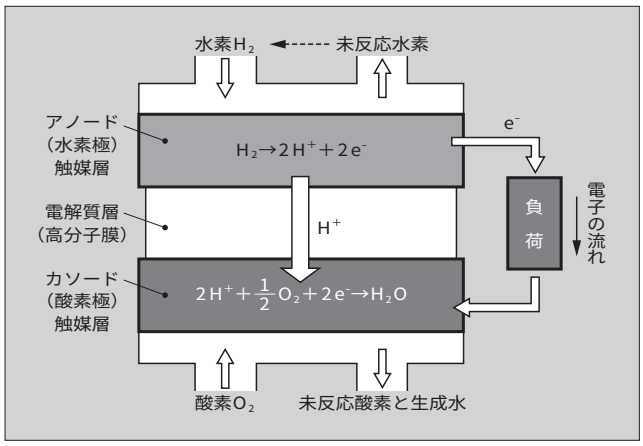
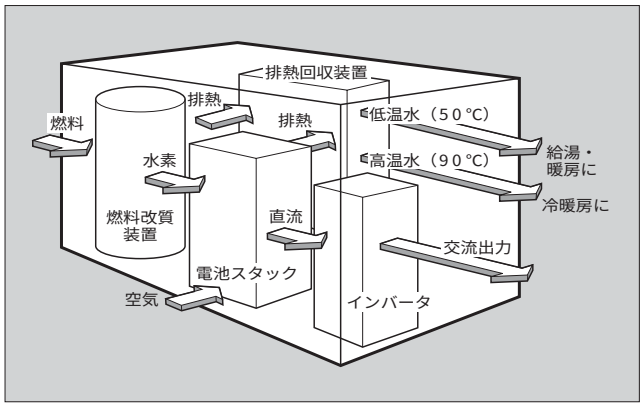


図3　燃料電池発電システムの基本構成



瀬谷　彰利

りん酸形燃料電池，固体高分子形燃料電池の電池スタック技術開発に従事。現在，事業開発室燃料電池部長。化学工学会会員。

2　高度な技術と豊富なノウハウの結晶――富士電機のりん酸形燃料電池

2.1　実用化したりん酸形燃料電池

富士電機は 1998 年に 100 kW りん酸形燃料電池の一次商品機をリリースした。合計 10 台（社内発電装置も含む）がすべて順調に運転されており，現時点で目標寿命の 4 万時間に対して 3 万 5,000 時間の運転実績を誇るサイトもある。さらに，低コスト化した第二次商品機を 2001 年にリリースし（外観を**図 4**，仕様を**表 1** に示す），2003 年 4 月末時点で 5 台（社内発電装置を含む）出荷され，順調に運転されている。

りん酸形燃料電池を実用化しているのは，全世界で 2 社のみである。富士電機は，発電装置の主要コンポーネントである，電池スタック，燃料改質装置，インバータ，熱交換器などを自社開発しており，それらをコンパクトな発電システムのパッケージとしてまとめる高いエンジニアリング技術も保有している。

図 4　第二次商品機の設置例

表 1　第二次商品機の仕様

項　目	仕　様
定格出力	100 kW（交流送電端）
出力電圧，周波数	200 V（50 Hz），220 V（60 Hz）
発電効率	40 %（LHV，交流送電端）
熱利用効率，熱供給形態	47 %（LHV），90 ℃温水・50 ℃温水
燃料仕様，消費量	都市ガス13 A，22 m^3/h（Normal）
排気特性	NOx：5 ppm以下，SOx：検出限界以下
騒音特性	65 dB（A）（機側1m平均値）
代表寸法・質量	2.2 m（W）×3.8 m（L）×3.0 m（H），10 t
設置場所	屋外・屋内
運転・出力方式	全自動運転，系統連系

2.2　りん酸形燃料電池スタックの高度な技術

発電装置の心臓部である電池スタックのセルの発電性能や信頼性，耐久性の向上のためには，①酸素極の電極触媒層の高性能化，②液体の電解質であるりん酸のセル内での挙動の制御がポイントである。

①に関しては，電極触媒層を形成する触媒（カーボン担体上に微細な白金合金を担持）の耐久性，触媒とりん酸との混合状態が重要である。そのため，その触媒については基礎的研究の成果をもとに自社開発し，自社で製造している。さらに，電極を最適な状態に設計するために，電極に使用する部材の表面電位まで計測・制御する研究を行い[(1)]，その成果をもとに量産技術を確立している。

②に関しては，運転とともに蒸発していくりん酸を考慮し，常にセル内各部分のりん酸量を最適に保つ技術が必要不可欠である。富士電機では，りん酸蒸発速度の定式化[(2)]はもちろん，平たいセル面内の電流分布や温度分布をシミュレーションする技術[(3)]を開発し，それとあわせてセル面内のりん酸移動についてモデル化することに成功した[(2)]。さらに，運転中のりん酸の挙動について，毛細管力以外の新しい駆動力の存在を明らかにするなど[(4),(5)]，先端的な研究をベースに実用技術を構築している。

2.3　りん酸形燃料電池の改質・システム技術

原燃料である炭化水素を 700 ℃近い温度で水蒸気改質反応させる改質器は，熱交換機能を内蔵したシンプルなシングルチューブ式を採用している[(6)]。その設計のため，反応速度・温度分布シミュレーション技術を開発[(6)]し，熱応力解析もあわせた設計技術を確立している。また，脱硫器（改質器の前段で原燃料に含まれる硫黄を除去する）と CO（一酸化炭素）変成器（改質器の後段でガス中の CO 濃度を低下させる）を一体化し，コンパクト性追求のため角形にするという工夫が盛り込まれている。

発電システムとしては，数多くの運転実績から得た貴重な経験を豊富なノウハウとして，配管設計や熱交換器，ポンプ選定などに改良を加えている。

以上のような最先端の基礎研究から得られた成果や多くのシミュレーション技術，豊富なノウハウの結晶である富士電機のりん酸形燃料電池は，初期性能はもとより稼動率もほぼ 100 %であり，実用機として非常に高い評価を得ている[(7)]。

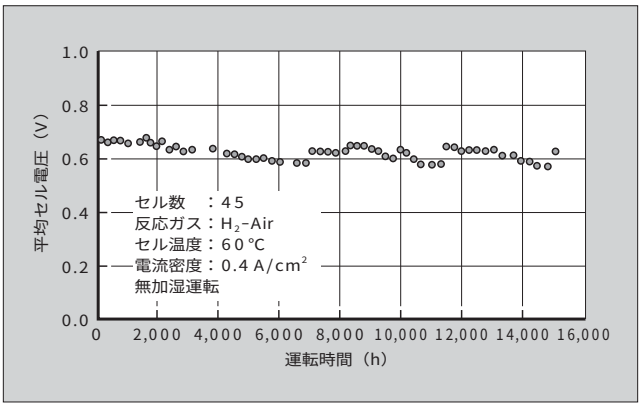
3　過酷な開発競争に勝ち抜く固体高分子形燃料電池

3.1　最先端技術の集大成の固体高分子形燃料電池スタック

富士電機は他社に先駆け 1989 年から固体高分子形燃料電池スタックの基礎的な研究開発を開始しており，小型の定置用発電装置としての実用化を目指し，りん酸形と同様に最先端の技術開発を推進している。

固体高分子形燃料電池の電池スタックは，電解質層であ

図５　固体高分子形燃料電池 1kW 級スタック運転評価結果



る固体高分子膜を湿潤状態に保ちつつ，余分な水分が他に悪影響を与えないように制御する技術がポイントである。

富士電機は，セル面内の微小部分を模擬した実験を通して，種々の条件でのセル内各部の水移動速度の実測を行い，その結果をもとにセル内水移動についてモデル化することに成功した[(8), (9)]。さらに，水の管理のために反応ガス流路は複雑な形状であるが，流路形状をシミュレーションに取り込み，セル面内での電流分布やガス流量分布に加え，セル面内の水分分布のシミュレーション技術を確立した[(10)]。このように，固体高分子形燃料電池で最重要な水管理技術において最先端を走っているといえる。

さらに，実用化時の鍵である電池スタックの耐久性向上についても，電池スタック電圧の低下要因を運転条件や材料変化，セル構造など広範に検討し，その対策仕様を決定し評価を実施している。電池スタックの耐久性評価は，**図５**に示すように 1kW 級で 1 万 5,000 時間を超えて評価しており[(11)]，公表されている中では最長評価時間と思われる。

3.2　豊富な経験を生かした固体高分子形発電システム

発電装置としては，まず，家庭用を視野に入れた 1kW 級のシステムをりん酸形で得られたノウハウを注ぎ込んで開発している。

燃料中の CO を 1％程度まで許容するりん酸形とは異なり，固体高分子形燃料電池スタックは，燃料中の CO を 10 ppm 程度まで減少させる必要がある。このため，微量の空気を燃料に混ぜ，水素（H_2）を燃焼させることなく選択的に CO を燃焼させる選択触媒燃焼技術の確立が要求される。この技術のポイントはその触媒層の温度を適正な温度範囲内に制御することであり，富士電機は，触媒層の冷却方式に工夫を加えた。その結果，2 段階で CO を選択燃焼させる方式が主流である中，1 段で CO 濃度を目標値以下まで低減できる技術を確立した[(12)]。

また，燃料改質装置は非常に小容量のため，放熱をできる限り減らし，吸熱反応が生じる改質触媒層に熱をいかに効率よく伝達するかがポイントであり，シミュレーションと実機での評価を通して改良を加えて，世界最高水準のコンパクトさと熱効率を追求している[(12)]。

以上の要素技術を組み合わせた 1kW 級の第一次試作の発電装置（外観を**図６**に示す）は，連続 1,000 時間の運転も含め 3,000 時間を超える運転評価を実施している。さらに，初期性能としては商品レベルを狙った第二次試作発電装置を設計，製作中であり，まもなく試験を開始する予定である[(12)]。その仕様を**表２**に示す。

図６　1kW 級固体高分子形燃料電池（第一次試作）の外観

表２　1kW級固体高分子形燃料電池の主要仕様

区分 ＼ 項目	一次試作機（2001年）（3,090h発電試験終了）	二次試作機（2003年）	商品機仕様例
電気出力	1kW級	1kW級	500W～1kW
温水出力	60℃	60℃	＞60℃
寸法（W×H×D）	1,100×1,100×400（mm）	900×800×350（mm）	900×900×420（mm）（Dは壁面からの距離）
容積	480L	250L	——
発電効率	24％（LHV）（実績）	34.5％（LHV）（計画）	35％（LHV）

今後，定置用固体高分子形燃料電池の実用化のためには，信頼性・耐久性の向上とその実証や大幅なコストダウンが必要である。そのためには，初期性能の向上のみの追求では不十分であり，富士電機は先端的な基礎技術をきちんと固めることが，信頼性・耐久性の向上や大幅なコストダウン開発には必要不可欠だと考えている。先端的な基礎技術開発と製品化開発をうまく整合させながら，それらの結晶として優れた製品を開発することを目指している。

4　燃料電池，それは地球に優しい社会のキーテクノロジー

富士電機が実用化したりん酸形燃料電池は，最先端の基礎研究から得られた成果や多くのシミュレーション技術，豊富なノウハウの結晶であり，地球温暖化防止のためのキーテクノロジーとして育っていくだろう。そのため，排熱も有効利用し，総合効率 80％を達成しているコージェネレーション用としてホテルや病院，事務所などに普及さ

図７　下水汚泥消化ガス燃料電池システム

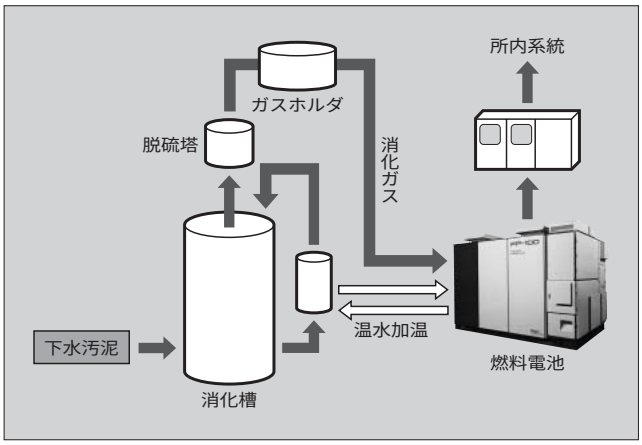
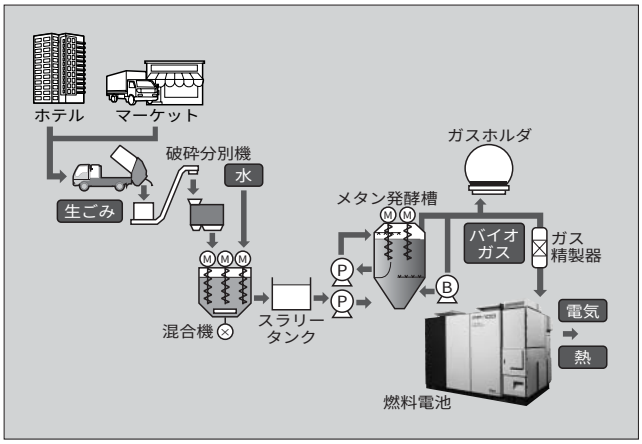


図８　生ごみメタン発酵燃料電池システム



せていきたい。さらに，現在，山形市浄化センターで順調に運転されている，**図７**に示すような下水汚泥を嫌気性発酵させた消化ガス（メタンが主成分）を利用した発電も大いに普及させていきたい。

また，生ごみを嫌気性発酵させ，そこから発電するという発電システムが神戸市で実証運転されており，順調に運転されている。このようにこれからの循環型社会実現に向け，**図８**に示すようなバイオマスエネルギー利用の燃料電池は大きなポテンシャルを持っている。

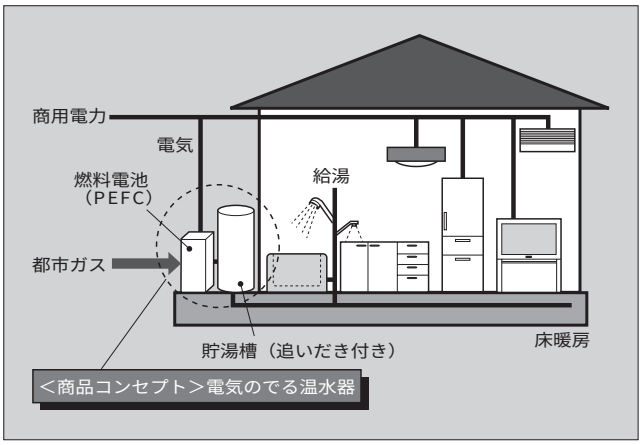
耐久性，信頼性，コストの問題をクリアし，自動車用に先駆け，固体高分子形の定置用燃料電池が**図９**に示す家庭用や 10 kW 程度の業務用として大きく普及する日がやってくるだろう。そのときに富士電機はそのトップを走っているように，先端的な基礎技術開発と製品化開発をうまく整合させながら，研究開発を加速していく。

自動車の多くが燃料電池車となったとき，りん酸形燃料電池の改質技術をベースに製品化している水素製造装置が，水素供給スタンドとして利用される日もやってくるに違いない。

5　あとがき

21 世紀に必ずややってくるであろう水素エネルギー社会，循環型社会といった地球に優しい社会構築の鍵を握る技術である燃料電池のトップメーカーとして，富士電機は社会に大きく貢献できると信じ，努力する所存である。

図９　家庭用燃料電池のコンセプト



参考文献

(1)　須藤業ほか．りん酸形燃料電池用電極の特性に及ぼす触媒・PTFE 粒子の分散・凝集状態の効果．電気化学および工業物理化学．vol.68, no.9, 2000, p.713.

(2)　岡江功弥ほか．PAFC におけるりん酸マネージメントの研究．第 7 回燃料電池シンポジウム予稿集．2000, p.57.

(3)　Asano, A. et al. Analysis and Characterization of Non-uniformity in Phosphoric Acid Fuel Cells. 電気化学および工業物理化学．vol.64, no.06, 1996, p.443.

(4)　瀬谷彰利，只野一郎．りん酸形燃料電池における発電中のセル内りん酸量分布．化学工学論文集．vol.27, no.2, 2001, p.223.

(5)　瀬谷彰利，只野一郎．りん酸形燃料電池におけるセル内りん酸量とセル電圧との関係．化学工学論文集．vol.27, no.6, 2001, p.766.

(6)　Yokoyama, H. et al. Development of On-site PAFC Power Plant. Proc. of International Conference on Power Engineering 2001, 2001, p.1504.

(7)　池田勇公ほか．りん酸形燃料電池の運転実績及び運用事例．第 9 回燃料電池シンポジウム予稿集．2002, p.313.

(8)　Takano, H. et al. The Relationship between the Humidity of Gasses and the Cell Performance of Polymer Electrolyte Fuel Cell. ECS Meeting Abstracts. vol.MA 99-2, 1999, p.418.

(9)　榎並義晶．固体高分子形燃料電池のアノード・カソード間の水移動について．第 42 回電池討論会予稿集．2001, p.544.

(10)　榎並義晶．固体高分子形燃料電池の面内分布シミュレーション．第 10 回燃料電池シンポジウム予稿集．2003, p.318.

(11)　高橋正樹ほか．富士電機における PEFC の開発状況．第 9 回燃料電池シンポジウム予稿集．2002, p.105.

(12)　中川功夫ほか．PEFC システムの開発状況．第 10 回燃料電池シンポジウム予稿集．2003, p.96.

e-Front runners

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。