りん酸形燃料電池の現状と今後の展望

The Current Status and the Future Prospects of Phosphoric Acid Fuel Cell

腰 一 昭*

Kazuaki KOSHI

Key Words: Fuel Cell, Phosphoric acid, City gas, Digester gas, Bio gas, Hydrogen high efficient clean energy saved

1. 緒 言

近年、地球温暖化防止や環境保護に関し、世界的な関心が非常に高まっている。気候変動に関する政府間パネル（IPCC 第4次評価報告書）において、「観測結果から気候システムの温暖化には疑う余地がなく、世界平均気温の上昇のほとんどは、人為起源の温室効果ガスの増加によってもたらされた可能性がかなり高いこと、また既存技術及び今後数十年で実用化される技術により温室効果ガス濃度の安定化は可能であり、今後20～30年間の緩和努力と投資が鍵となる。」という評価が公表された。

これらの温室効果ガス削減の重要なツールとして、高効率でクリーンな発電装置である燃料電池の実用化、普及に向けた開発が行われている。

燃料電池には、使用される電解質の種類によって、アルカリ形（AFC）、固体高分子形（PEFC）、りん酸形（PAFC:Phosphoric Acid Fuel Cell）、熔融炭酸塩形（MCFC）、固体酸化物形（SOFC）があり、動作温度、規模、用途などが異なる。それらの中で、200℃付近で作動するりん酸形燃料電池は、普及型の燃料電池としては、最も早く実用化されている。

本稿では、燃料電池の開発経緯の紹介、りん酸形燃料電池の具体的な導入事例とその運転実績について報告すると共に、今後の展開について述べる。

2. りん酸形燃料電池開発の経緯

りん酸形燃料電池の開発は1970年代、米国のTARGET計画、GRI計画、FCG-1計画などUTC社を中心に進められた。90年代にUTC社の子会社であるONSI社が200kWの開発を行い、米国、欧州、日本を中心に100台以上の販売を行った。UTC社はPEFCの開発に専念するといわれていたが、2008年2月のFC-EXPOで次期400kWの開発を行っていることを発表し、2009年より販売を開始した。

わが国では1970年代の2度の（1973年、1978年の）

石油危機を契機に石油代替エネルギー研究開発としてサンシャイン計画、ムーンライト計画が策定・実行された。1990年代に入り、これら計画と地球環境技術開発を一体化したニューサンシャイン計画が発足した。この計画では産学官連携の下、独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）を通じたエネルギー・環境技術の研究開発の推進体制が整備され、新エネルギー技術及び省エネルギー技術の確立・実用化・導入促進のためにフィールドテスト事業が進められた。実使用条件下で数多くの信頼性データが得られ、1990年代後半からは、「新エネルギー事業者支援対策事業」や「地域新エネルギー導入促進事業」による補助金制度などで普及拡大が図られている。

富士電機は、1973年にりん酸形燃料電池の開発に着手し、前記ムーンライト計画では離島向けメタノール燃料の200kW機、電力事業向け1MW、5MW機の開発を手掛けた。さらに、オンサイト向けでは50kW、100kW、500kWを開発し、ガス会社及び電力会社の協力のもと、100台を超えるフィールドテストを実施してきた。1998年には、それらの経験とノウハウを反映させた100kW商用機の販売を開始し、現在までに25台を出荷している。燃料電池本体の最長累積運転時間は52,000時間に達し、オーバーホールを行った装置では80,000時間を超えて運転している装置もある。2006年からは、60,000時間の設計寿命を持つ商用機の販売も開始した。このようにりん酸形燃料電池は各種燃料電池の中で唯一、耐久性と信頼性の面で実用化段階に達した燃料電池である。Table 1に商用機の導入実績とその累積運転時間を示す。これまでの主な導入先は、病院、ホテル、オフィスビル、下水処理場などである。

3. りん酸形燃料電池のシステム構成と特徴

りん酸形燃料電池の発電原理は、水素と酸素の電気化学反応による直接発電である。電解質にりん酸を用い約200℃で作動するため、都市ガスなどの炭化水素を改質した水素を主成分とした改質ガスを燃料として利用できる。改

*富士電機システムズ株式会社（〒191-8502 東京都日野市富士町1番地）
Fuji Electric Systems Co., Ltd. (1, Fuji-machi, Hino-City, Tokyo 191-8502 Japan)

	Operating Site	Fuel	Date of delivery	Operating time(h)	
1	Hospital	City Gas	Aug-98	44,265	●
2	Hotel		Mar-99	86,950	◎
3	College		Apr-00	41,735	●
4	Office Building		Mar-01	42,666	●
5	Office Building		Mar-01	48,734	●
6	Office Building		Jul-00	56,369	◎
7	Office Building		Jul-00	48,269	○
8	Demonstration	Digester Gas	Jul-01	10,952	
9	Training	City Gas	Dec-01	58,961	◎
10	Sewage	Digester Gas	Mar-02	60,438	◎
11	Disposal Plant		Mar-02	60,704	◎
12	Hospital	City Gas	Jul-03	50,604	◎
13	College		Oct-03	42,322	
14	Exhibit facilities		Nov-03	45,507	
15	Office Building		Jan-04	43,784	◎
16	Hospital		Mar-04	41,157	
17	Exhibit facilities		Mar-06	26,911	◆
18	Hospital		Mar-06	24,449	◆
19	Hospital		Mar-06	24,558	◆
20	Sewage Disposal Plant	Digester Gas	Dec-06	22,000	◆
21			Dec-06	21,434	◆
22			Dec-06	21,607	◆
23			Dec-06	21,617	◆
24	Office Building	City Gas	Sep-07	12,916	◆
25	Office Building	City Gas	Jan-09	3,055	◆

- operation ended
- in operation (more than 40,000 hours)
- ◎ in operation (has been overhauled.)
- ◆ in operation (Design lifetime is 60,000 hours.)

Table 1 100 kW PAFC operating sites (as of May, 2009)

Fig.1 System configuration of PAFC

質ガス中の一酸化炭素は電極触媒（白金）の被毒物質であるが、反応温度が200℃付近なので、PEFCと異なり1%程度まで許容できる。

都市ガスやLPガスを燃料にするりん酸形燃料電池パッケージ内には、燃料電池本体のほか、都市ガスやLPガスを水素に改質する燃料改質系の機器と発電した直流電力を交流に変換するインバータ、装置内の各機器を制御する制御装置、燃料電池本体の冷却器、反応により生成した水を回収するための水・蒸気系の機器類から構成される。更に、

Fig.2 Energy electricity and efficiency at a training center

起動・停止時にパッケージ内の可燃ガスを放出・置換するための窒素供給設備、排熱処理設備なども必要である。

システム構成を Fig.1 に示す。

燃料電池本体、燃料改質系機器は触媒を用いた化学反応装置であり、運転と共に性能が低下していく。設計寿命として5年間（4万時間）を目指して開発を行ってきており、現状では7.5年間（6万時間）まで伸びている。開発当初は燃料電池本体の性能低下が問題となったが、リン酸の保持、改質触媒の劣化改善及びセル内ガスの最適供給制御などの解決を図ってきた。

りん酸形燃料電池では部分負荷でも定格負荷のときと同じ発電効率を保持するという特徴がある。このため昼は定格負荷、夜は部分負荷での運転を行っても発電効率は40%以上となる。

4. りん酸形燃料電池の導入事例

4.1 都市ガス利用の事例

代表的な運用事例として、宿泊設備を伴う研修施設（6階建て延床面積6,000 m²、宿泊室81室）へ導入した事例を紹介する。この施設は、燃料電池の熱利用に関しては、高温水（90℃）を温水焚吸式冷温水機（10RT）の熱源として施設内の厨房の冷房に利用している。また、低温水（50℃）は熱交換器を介して給湯予熱に利用されている。

研修施設の電力需要は、昼間多く夜間は少ないため、燃料電池の発電量もそれに合わせたパターン運転を実施している。研修施設の稼働に合わせて昼間は75%出力、夜間は40%出力とし、電力需要が少ない休日は、40%出力で運用している。ここでの燃料電池の発電量と発電効率の年間推移を Fig.2 に示す。年平均の発電効率（送電端）は計画通りの40%であった。12月の発電量が他の月に比べて低いのは、燃料電池の定期点検による停止期間があったためである。また、年平均の排熱回収効率（高温排熱と低温排熱

Fig.3 Application example using digester gas

Fig.4 The concept of carbon neutral

の合計)は12.4%であった。この理由は、施設側での熱需要が少なかったためである。

4.2 下水処理場における消化ガス利用の事例

下水処理場で発生する消化ガスは、メタンが約60%、二酸化炭素が約40%であり、微量の硫化水素、シロキサンなども含まれる。硫化水素、シロキサンは、メタンから水素を取り出す改質装置の触媒を劣化させる問題があるが、脱硫装置を拡充し、前処理設備を設けることによって、安定運転を可能にしている。以下に某市の下水処理場の導入事例を紹介する。

消化ガス利用の適用例をFig.3に示す。りん酸形燃料電池(100kW×2台)がベースロード用電源として使用されており、ガスエンジンは消化ガスの余剰分をピークカット発電として運用されている。また、排熱は高温水、低温水を一系統として取り出し、循環させ、汚泥との熱交換を行い、消化槽の加温に利用されている。

本下水処理場の消費電力は約1,000kWであり、2台の100kWりん酸形燃料電池とガスエンジンを合わせて約40%を負担している。2002年3月より運転が開始され、運転時間44,000時間を経過した2007年6月にオーバーホールを実施し、その後も運転を継続している。燃料電池の発電電力量と発電効率は、大きな変動はなく、年間を通してほぼ一定であった。平均発電電力量は1,496MWhであり、これを負荷率(発電電力÷定格出力)でみると、87%の高い負荷で運転されていた。また、平均排熱利用量は、1,059MWhであった。ガス組成が不安定な消化ガスを利用する場合においても、りん酸形燃料電池は、安定に稼動する実績を示している。

下水汚泥や有機性廃棄物の嫌気性発酵によって生じる下水消化ガス、バイオガスは再生可能エネルギーとして位置付けられている。これらのガスは動植物に由来し、ガス中に含まれるカーボン、大気中のCO₂が光合成により植物に取り込まれ、固定されたものである。これらのガスで燃料電池発電し、排出されるカーボンは、再び光合成で植物に固定される。ゆえに、大気中のCO₂総量の増減には影響を与えないのでカーボンニュートラルと呼ばれる。Fig.4にその概念図を示す。

消化ガス、バイオガスの利用は、大気中のCO₂(温室効果ガス的一种)を増加させないため、すなわちCO₂を削減する上から、今後は、これらのガス利用が加速すると期待される。

このような消化ガスを利用した事例実績からCO₂削減量を算出した例を以下に示す。

CO₂の削減量は、消化ガス発電によって削減する購入電力量からの発生CO₂量(1)と排熱利用によって削減したボイラー燃料(A重油相当)からの発生CO₂量(2)の和として求められる。

$$\text{削減購入電力量によるCO}_2\text{量} = P \cdot A \quad \cdots (1)$$

ただし、

P: 削減購入電力量 = 発電電力量 [kWh]、

A: 単位電力量あたりのCO₂排出量 [kg-CO₂/kWh]

排熱利用による削減ボイラー燃料によるCO₂量

$$= Q \cdot B / C \cdot D \cdot E \quad \cdots (2)$$

ただし、

Q: 排熱利用量 [kWh]、

B: 単位換算 [MJ/kWh]、

C: ボイラー効率 (0.85)、

D: 排出係数 [kg-C/MJ] (A重油相当)、

E: CO₂換算 [CO₂/C] (44/12)

(1) より

$$1,496 \cdot 10^3 [\text{kWh}] \cdot 0.555 [\text{kg-CO}_2/\text{kWh}] = 830 [\text{ton-CO}_2]$$

(2) より

$$1,059 \cdot 10^3 [\text{kWh}] \cdot 3.6 [\text{MJ/kWh}] / 0.85 \cdot 0.0189 [\text{kg-C/MJ}] \cdot (44/12) [\text{CO}_2/\text{C}] = 311 [\text{ton-CO}_2]$$

上記(1)と(2)から、100kW機2台を消化ガスで運転したことによるCO₂削減量は「1,141 ton-CO₂/年」となる。

5. りん酸形燃料電池の用途拡大

燃料電池は水素の持つ化学エネルギーを電気と熱エネルギーに換え、取り出すことができるエネルギー変換装置

である。換言するとクリーン水素発電装置である。りん酸形燃料電池は従来、都市ガスを燃料とするコージェネレーション用途がほとんどであったが、Fig.5 に示すように様々な燃料源に含まれる水素の利用が想定される。富士電機では、それらの用途開発を進め、普及拡大と導入採算性を満たすコストダウンを達成した。

以下にそれらの水素供給源による燃料電池と電源セキュリティ向上などのアプリケーションを紹介する。

5.1 水素精製オフガス（製鉄所副生ガス）

製鉄所などにおいて、コークスを乾留する工程で排出される COG（コークス炉ガス）には、水素が 50 ～ 60% 程度含まれている。COG は、一般的に火力発電やボイラーの燃料として使用されているが、それら以外に COG を PSA（Pressure Swing Adsorption）で処理し、純度の高い水素を精製することにも利用されている。PSA 処理の前段階では不純物（タールやダストなど）を除去するため、水洗や多段のフィルターなどが設置されており、PSA 処理自体でも水素以外の不純物成分を吸脱着させる方式であるため、PSA オフガスの清浄度は相当に高い。

この COG の PSA オフガス（水素精製オフガス）は、副生的に発生する安価で清浄なガスであり、これを高効率でクリーンな燃料電池へ適用することで、省エネルギーや環境改善が期待できる。

5.2 純水素、副生水素（製油所、化学工場副生ガス）

製油所から発生する水素濃度 80% 程度の副生水素、或いは化学工場（ソーダ電解など）から発生する水素濃度 99.9% の副生水素を燃料とするりん酸形燃料電池発電システムの一例を紹介する。これら副生水素燃料のシステムの場合は、都市ガスや消化ガス燃料のシステムと異なり、改質装置が必要なく、シンプルなシステムで低価格な装置が実現できる。

水素濃度 80% 程度の副生水素を利用した場合のりん酸形

燃料電池発電システム（ワンウェイ方式）は、シンプル性と低価格を追求し、燃料電池で電気化学反応に利用されなかった排水素をそのまま排気筒で燃焼させるシステムとしている。副生水素の供給圧力は、ワンウェイで圧力損失が少ないため 25 ～ 45 kPa 程度である。

水素濃度 99.9% の副生水素を利用した場合のりん酸形燃料電池発電システム（リサイクル方式）は、99.9% の高濃度水素を燃料とするため、より高い発電効率システムを構築することができる。その理由は、燃料電池から出てきた排水素はそのまま排気せず、エゼクタによりセル入口に戻して利用し、高水素利用率を実現できるからである。エゼクタでは燃料である副生水素の圧力を駆動源として排水素をリサイクルさせるため、副生水素の供給圧力は 80 ～ 100 kPaG 程度となる。

5.3 電源セキュリティ向上（災害対応施設向け利用）

災害などで電気や都市ガスが遮断された場合、非常用発電機で電力を供給するのが一般的である。災害施設対応のりん酸形燃料電池を導入すれば、災害時に燃料を都市ガスから備蓄 LP ガスに切替えて発電が継続でき、電力と熱の供給が可能である。具体的には、LP ガスの発熱量は都市ガスの発熱量の約 2 倍であるため、水素をつくる改質条件が異なるが、りん酸形燃料電池は、燃料改質系で、一旦、水素に改質して発電するため、停止することなく発電を継続できる。この機能を具備したことで富士電機のりん酸形燃料電池は、2008 年に消防法の非常電源として認定された。なお、LP ガスの運転では、出力は 70 kW に制限されるが、50 kg ボンベで約 3 時間の給電が可能である。Fig.6 に災害時のアプリケーション概要を示す。

この用途は、通常時には、クリーンかつ省エネルギーのコージェネレーションとしての運転を行うとともに、都市ガス停止時には、備蓄 LP ガスにて運転でき、災害対応施

Fig.5 Application of 100 kW PAFCs

The first fuel cell that was certified by Japan Electric Association.

Fig.6 Application example for emergency use

《Hydrogen station》

Feature: PAFCs supply electricity and heat as well as hydrogen

Fig.7 Application for Hydrogen supply

設における電源セキュリティの向上に寄与できる特徴を有する。

5.4 水素供給機能

電気と熱に加え、水素供給もできるトリジェネレーションが可能な発電装置である。昼間はコージェネレーションとして電力と熱を供給し、負荷が少ない夜間には発電出力を下げ、余っている水素製造能力により水素ガスを取り出し、供給できるシステムである。例えば、燃料電池車に必要な水素ステーションは、現状では利用する車両が少なく、稼働率が低いが、本システムを適用すれば、昼間はコージェネレーションで省エネルギーに寄与し、夜間はトリジェネレーションで水素供給が可能となる（Fig.7 参照）。

6. 今後の展望

りん酸形燃料電池は数百 kW の容量では、もっとも高効率な分散型発電装置であり、様々な燃料種への対応や優れた環境性で普及拡大が期待される。

りん酸形燃料電池の普及拡大には、適用用途の拡大に加えて、設置工事の簡素化や導入採算性の向上が求められる。富士電機はこれらの開発を終え、2009 年にりん酸形燃料電池の新型機種（普及機）の販売を開始する。Fig.8 に普及機の構造、Table 2 に仕様を示し、以下にその特徴を記す。

- ①付帯設備の一体化を図り、1 ユニットに集約し、設置工事の簡素化と設置面積の低減を可能とした。
- ②パッケージ内機器配置を主機室と補機室に分け、機器放熱と給排気量の最適制御により -20℃～40℃の環境下への適用を可能とした。
- ③セルのりん酸濃度の制御により保温レス輸送を可能とした。

7. まとめ

日本は、議長国であった COP3 における京都議定書の温

Fig.8 Configuration of new 100 kW PAFC

Table 2 Specifications of new 100 kW PAFC

Rated output power	100kW AC
Output voltage	3Φ3W, 210V/220V
Output frequency	50Hz/60Hz
Electrical efficiency	42% [LHV(net)]
Thermal Output	Type 1) High-temperature Recovery Type 50kW (90 °C) Total efficiency: 62% [LHV]
	Type 2) Mid-temperature Recovery Type 123kW (60 °C) Total efficiency: 92% [LHV]
Exhaust gas	NOx : less than 5ppm [O ₂ 0%] SOx,dust : less than the detection limit
Consumption of gas	City gas : 22m ³ /h(Normal)
Weight	15ton City gas-fed type

※You can choose Type1) or Type 2)

室効果ガスの削減目標を厳守しなければならない。更に、2013年以降のポスト京都においても温室効果ガスの一種であるCO₂削減が、強化される見通しである。本稿で述べたように、りん酸形燃料電池は、他の電解質の燃料電池と比べ4万時間以上の高耐久性を持ち、各種燃料電池の中で、唯一商用化の段階にある燃料電池であり、これを適用することにより、以下の点で社会に貢献すると考えられる。

- ①地球温暖化防止 (CO₂削減の上積み目標クリア) に寄与
- ②資源の有効利用による、省エネとCO₂削減の達成
- ③利益追求型企業から環境配慮型企業への転換を推進 (CSR向上)

富士電機は、長年培った燃料電池技術を活用し、各種アプリケーションの適用拡大を進め、地球温暖化防止及び環境保護に真の意味で貢献し、持続可能な社会の実現に貢献していく所存である。

引用文献

- 1) 環境省ホームページ：「IPCC 第4次評価報告書について」(2007)、http://www.env.go.jp/earth/ipcc/4th_rep.html
- 2) 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)：「NEDO 20年史」(2000)、<http://www.nedo.go.jp/kankobutsu/nen-shi/nedo20years.pdf>
- 3) NEDO「りん酸形燃料電池寿命評価研究」共同研究成果報告書 (1997)
- 4) 燃料電池開発情報センター：「日本における燃料電池の開発」、pp.56-65 (2008)
- 5) 腰一昭、中島憲之、堀内義実：「りん酸形燃料電池の現状と今後の展開」、富士時報、Vol.81 No.3, pp.198-202 (2008)
- 6) 鈴木茂政、加藤茂実：「富士電機りん酸方燃料電池の発電装置の運転状況」、第12回燃料電池シンポジウム講演予稿集、pp.54-57 (2005)
- 7) 福村琢、伊藤誠、長谷川雅一、黒田健一、清田透、吉岡浩、岡嘉弘：「富士電機グループにおけるPAFCの取組について」、第14回燃料電池シンポジウム講演予稿集、pp.130-133 (2007)
- 8) 環境省、経済産業省：「温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル ver. 2.1」(2007) <http://www.env.go.jp/earth/ghg-santeikohyo/manual/index.html>
- 9) 清田透：「りん酸形燃料電池 (PAFC) の導入事例」、プラントエンジニアリング技術、Vol.39 No.10 (2007)
- 10) 東京ガス(株)：プレスリリース、<http://www.tokyo-gas.co.jp/Press/20040517-1.html>
- 11) 堀内義実、中島憲之、腰一昭、黒田健一、清田透、吉岡浩：「りん酸形燃料電池の普及について」、第16回燃料電池シンポジウム講演予稿集、pp.163-166 (2009)