電力システムへの燃料電池活用の展望

正員 藤田 吾郎*

Overview of Fuel Cell for Power System

Goro Fujita*, Member

Fuel cell is a provisional energy source in 21st century to handle the construction of hydrogen-based sustainable energy societies. This report focus on variety types of fuel cells and their practical applications as dispersed energy source systems. Their contribution for power system will be expected regarding efficiency and exploitation of renewable energy. Especially, SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) system is a prospective energy system to serve electric and thermal energy for its highest operation temperature so that the environmental issue would be handled.

キーワード：燃料電池，マイクログリッド，コージェネレーション，需給制御

Keywords: fuel cell, micro grid, cogeneration, supply and demand control

1. はじめに

2005年1月，東京ビックサイトでFC EXPO 2005（第1回国際燃料電池展）が開催された。3日間の展示期間の中では100件を越すメーカー展示を初め，国内外の研究者による基調講演や研究成果発表フォーラムなど，大盛況であり，これからの水素社会の発展に期待が持てるイベントでもあった。

燃料電池は燃焼反応を伴わずに燃料から直接に電気エネルギーを取り出すことができ，化石燃料を燃焼させる従来の発電システムに比べて高効率で環境に優しいため国内外で開発が進められている^{(1)~(3)}。

燃料電池の原理は良く知られるように，水の電気分解反応とは逆の動作となり，電解質を2つの電極ではさんだセルに，酸素と水素を供給すると直流と熱が発生する。電解質の種類により表1のような分類が可能である。

燃料源としては水素を直接供給する場合と，都市ガスやバイオガスを改質器を通して供給する場合がある。また直流はインバータを介すれば電力供給へ，熱は熱源として使用することでコージェネレーションシステムが達成できる。

燃料電池の開発当初は，比較的動作温度の低いPAFCやPEFCの話題が多かったが，これらはコージェネレーションには向かず，効率向上にも限度がある。これに対してMCFCやSOFCは動作温度も高く，大規模エネルギー供給用として適している。課題は高温に長時間耐える部品の構成や，システム構成である。これらの研究開発は国内外で進んでいるが，本稿では大規模エネルギーの供給に焦点をあてて事例と将来動向について説明することとする。

2. 分散型電源としての導入事例

2・1 一般電気事業者による燃料電池実施試験設備⁽⁴⁾

一般電気事業者の燃料電池に対する取り組みは比較的早く，負荷平準化を目的とした燃料電池実施試験設備の設置が1990年代に相次いだ。やや古い数字となるが，1998年度末時点の燃料電池適用実績は7社で13件，合計1400kWとなっている。すべてPAFCであり，大部分が発電所，変電所，または研究所における設置となっている。

2・2 ビール工場での使用 ビール工場では，容器類や配管などの洗浄で発生する比較的濃度の低い排水と，麦かすの残渣駅等の濃度の高い残渣液がある。これらを嫌気性発酵させバイオガスに還元分解することで，燃料電池をコージェネレーション運転することが可能となる⁽⁵⁾。このような設置例は1990年代後半より数例がある。例えば茨城県取手市のキリンビール取手工場では2003年4月にMOFC型燃料電池250kW機が導入されている。発生したすべての電力と蒸気はキリンビールが購入して同工場が使う。工場で使う電力の約4%，蒸気の約1%が燃料電池に置き換わり，二酸化炭素排出量は約2%削減できる。また電気料金も安くなる。実用性を調べて他工場への導入を検討している。

2・3 汚泥消化ガスの利用 (株)荏原製作所は下水処理場から発生する消化ガスを燃料とするPEFC発電システムを苫小牧市の西町下水処理センター内に設置して，2001年より実証試験を行った⁽⁶⁾。消化ガスを利用した実証試験は世界でも初めての試みである。本実証試験設備は荏原バードが納入するバードジェネレーションシステム社製の定置式250kW級PEFCユニットと，消化ガスの精製装置から構成されている。この本精製装置は炭酸ガス吸収に大量の処理水を使用することなく，PEFCからの排熱を有効活用するという特徴がある。下水処理場で発生する

* 芝浦工業大学工学部電気・情報系（電気工学科）

〒108-8548 東京都港区芝浦 3-9-14

Department of Electric Engineering, Shibaura Institute of Technology

3-9-14, Shibaura, Minato-ku, Tokyo 108-8548

表 1 燃料電池の分類⁽²⁾⁽³⁾

Table 1. Classification of fuel cells.

	液体電解質形燃料電池		固体電解質形燃料電池	
	りん酸形燃料電池 (PAFC)	熔融炭酸塩形燃料電池 (MCFC)	固体酸化物形燃料電池 (SOFC)	固体高分子形燃料電池 (PEFC, PEM)
電解質	りん酸 (液体)	熔融炭酸塩 (液体)	安定化ジルコニア (固体)	高分子膜 (固体)
電解質内電荷担体	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻	H ⁺
作動温度	150～200℃	600～650℃	800～1000℃	80～100℃
反応物質	水素	水素, CO	水素, CO	水素
燃料	天然ガス, メタノール, LPG, ナフサ, 灯油	天然ガス, メタノール, LPG, ナフサ, 灯油, 石炭	天然ガス, メタノール, LPG, ナフサ, 灯油, 石炭	天然ガス, メタノール, LPG, ナフサ, 灯油
電極	多孔質カーボン	多孔質ニッケル等	酸化ニッケル等	多孔質カーボン
触媒	白金	不要	不要	白金
発電システム熱効率	45～45%	50～65%	55～70%	30～40%
特徴	CO 含有量に制限 白金触媒を使用	CO 含有可 燃料内部改質が可能	CO 含有可 燃料内部改質が可能	CO 含有制限が厳しい 作動温度が低い
主な用途	コージェネレーション 分散電源	コージェネレーション 分散電源 大容量電源 (火力代替)	コージェネレーション (高電/熱比型) 分散電源 (中～大容量) 大容量電源 (火力代替)	コージェネレーション 分散電源 (小～中容量) 可搬用電源

PAFC : Phosphorous Alkaline Fuel Cell MCFC : Molten Carbonate Fuel Cell SOFC : Solid Oxide Fuel Cell PEFC : Polymer Electrolyte Fuel Cell.
ただし海外では PEM (PEMFC) : Proton Exchange Membrane Fuel Cell (プロトン交換膜型燃料電池) と呼ばれる

消化ガスはメタン 60%, 炭酸ガス 40% からなり, 従来より消化槽の加温用温水ボイラの燃料や, 発電用ガスエンジンやガスタービンの燃料として使用していた。本センターは市内 3 処理センターの汚泥を集約処理していたが消化ガスの発生量が多く, 1981 年から消化ガス利用によるガス発電設備を導入したが, 設備の老朽化により別の消化ガス利用方法を模索中であった。

また 2002 年 3 月より, 山形市浄化センターでは, 汚泥処理過程で発生した消化ガスを燃料とした富士電機製 100 kW りん酸形燃料電池システム 2 台が稼働している。燃料電池の排熱を消化槽のプロセス加温熱源として利用するシステムは国内初である。環境負荷が低く稼働率が高く同種システムの導入拡大に寄与することが期待される。発電効率は 38%, 熱効率は 49%, 総合効率は 87% となっている。

2・4 家庭用燃料電池コージェネレーションシステム

東京ガス(株)は, 荏原パワード(株), 松下電器産業(株)各社と共同開発を行ってきた PEFC コージェネレーションシステムを世界に先駆けて 2005 年 2 月から市場投入している。本システムは快環シナジー生活をキーワードに掲げ, 「快適な暮らしと環境負荷低減を相互にかつ持続的に向上する」を基本コンセプトとして開発された。1 kW 機が投入開始され, 発電効率は 31% 以上, 熱回収効率は 40% 以上 (いずれも HHV), 貯湯槽容量は 200 リットル, 燃料は都市ガス 13A である。

2005 年度末までに限定 200 台を, 東京ガス供給エリア内でメンテナンス体制の整った地域に投入する予定である。また FC パートナシップ契約を募集して, システム利用に関する運転データや使用感等の意見を収集している。2008 年度以降には年間数千～数万台の販売を目指している。

2・5 NEDO の実証試験 温室効果ガスによる地球

温暖化を回避するため, 2003 年度よりエネルギーの利用に関する特別措置法が施行され再生可能エネルギーの導入促進が進められている。またエネルギー基本計画では分散型電源の位置づけが今までも増して重要になっており, 今後これらの導入が環境保全, 省エネルギーの観点から欠かせない事項である。このような再生可能エネルギーや分散型電源を導入するためには, 新しい配電システムの構築が重要と考えられる。そしてマイクログリッドのような新しいエネルギー需給制御システムの構築が望まれている。

NEDO (独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構) では, 複数の系統連系技術実証試験を実施している。この実証試験の概要については, すでに発表が多数あることから, ここでは燃料電池の活用に話を限定したい。このうちエネルギー等地域集中実証研究では, 新エネルギープラントを 2005 年開催の愛知万博に設置して, 新エネルギー導入の評価を行っている⁽⁷⁾。国内で行われている試験の中でも新エネルギーシステムを数多く取り入れながら公開運転しており, 愛知万博開催中に多くの方が見学したことであろう。このプラントはマイクログリッドを構成している。

マイクログリッドは, 様々な新エネルギー導入を目指した小規模 (一般には 10 MW 未満) の小規模電力系統を指しているが, 図 1 のように商用大規模電力系統と連系することもある。

新エネルギーとは具体的には太陽光発電, 風力発電, 燃料電池等を示し, エネルギーの安定供給の確保や二酸化炭素排出量低減のための地球環境問題への対応等からこれらの導入促進が求められている。しかしながら, これら新エネルギーが大量に導入されると電圧変動や高調波, 短絡容量の増大などが発生して, 電力品質の大幅低下が危惧される。

そこで, 本プロジェクトでは, 太陽光発電 (330 kW), NaS

図 1 マイクログリッドの概念図

Fig. 1. Schematic diagram of SOFC.

図 2 愛知万博にて実証運転中の SOFC

Fig. 2. SOFC demonstration in Aichi Exposition.

電池(500kW),PAFC(800kW),MCFC(500kW),SOFC(40kW,図2)の各発電設備,メタン発酵システムなどを組み合わせた複合型のマイクログリッドを構築している。各発電設備の需給運用では,制御室を設置して,燃料費や効率最適化を目的とした最適運用が実施可能である。また,2005年9月の愛知万博終了後は系統連系を開いた単独運転試験の後,施設を移設して,2006年以降は中部臨空地区での実証試験が予定されている。

3. 分散型電源としての高効率複合システムの期待

以上はこれまで電力供給に実用化となった燃料電池の動向について示した。いくつかはコージェネレーションであるが,現在開発途上にあるMCFCやSOFCを用いた複合システムを構築すれば,さらに効率の高い適用が考えられる。余熱を再生することを考えると,ガスタービン機を用いた複合型の発電プラントも可能となる。その中でもSOFCは高い発電効率を得られ,作動温度が高く排熱を有効に利用できることから,大規模容量までの幅広い適用が期待されている。

特にSOFCは運転温度が約1000℃と高いことから排熱

の有効利用により高効率の発電システムが可能となる。以下,三菱重工業による試算⁽⁸⁾を列挙する。

(1) SOFC + 排熱回収システムでは熱利用度が高い蒸気が回収でき,都市ガス焼き50kW級システムで送電端発電効率45%(LHV以下同様),総合効率80%が期待できる。

(2) SOFC + ガスタービンシステムでは天然ガス焼き20MW級で送電端発電効率60%となり,ボイラ水や冷却水が得にくい内陸部の発電設備として期待できる。

(3) SOFC + ガスタービン + 蒸気タービンの複合発電システムでは天然ガス焼き700MW級で送電端発電効率70%が期待できる。

(4) 石炭ガス化炉 + SOFC + ガスタービン + 蒸気タービンの複合発電システムでは送電端発電効率60%が期待できる。

小規模複合発電システムの構築ではマイクロガスタービンが必要だが,空気圧縮機出口の空気をほぼ全量抽気し,SOFCを経由して燃焼器に戻すとともに,燃料としてはSOFCで反応後の低カロリーガスを燃焼させるため,既製品はそのまま利用できない。

4. SOFCの開発動向

4.1 低温作動SOFCシステムの開発 関西電力(株)と三菱マテリアル(株)は共同で,1kW級低温作動SOFCシステムを開発し,都市ガスを燃料とした1kWの発電実験に成功した。また,発電効率は現在の世界的水準である25~30%を大幅に上回る40%を達成した。さらに,SOFCの排熱から90℃の温水として熱を回収することにも成功し,将来の高効率な燃料電池として実用化・商品化へ向けて大きく前進している。低温作動型とは800℃程度以下を示し,耐熱材料費を削減できるというメリットがある。既に開発されているモジュール単体による発電試験では,発電効率50%を達成している。セル単体の試験では1200時間の耐久性試験を経て,他の燃料電池に比べて非常に劣化の少ないことが確認されている。2006年度末を目途に中型店舗や小工場等向け数十kW級システムの実用化・商品化に取り組む予定である。

4.2 大学における取り組み 地球温暖化を抑止できる持続型社会に近づくためには,エネルギー起源の二酸化炭素排出を抑制できる新しいエネルギー変換技術の構築が必要である。このために展開すべき研究課題は多数あるが,電力需要がエネルギー総需要の伸び率よりも高い割合で伸びていることと,社会の個性化やコンパクトシティ化等によりエネルギー需要の時間的変化と空間的不均一が顕在化していることなどを考えると,燃料電池に基盤を置く高効率分散電源の基礎研究が重要である。芝浦工業大学先端工学研究機構エネルギーフロー研究センターでは,我が国の大学・研究機関では唯一の現有設備である100W級SOFC(図3)と基盤設備として実用容量である2kW級SOFCを新たに導入し,主として次の研究を行っている。

(1) SOFCの高効率分散電源ユニットとしての適正拡

図3 SOFC 実験装置

Fig. 3. SOFC experimental experiment.

図4 負荷分担の比較

Fig. 4. Comparison of load dispatch.

大のための動特性試験と制御モデルの構築

- (2) SOFC の電解質や電極などの要素材料開発と，セルシミュレータの開発ならびにセルスタックの最適設計指針の確立
- (3) 水素貯蔵と超希薄アフターバーナーの研究
- (4) 系統への連系と廃熱回収の研究
- (5) PEFC，風力，バイオマス発電などのクリーンエネルギーの研究

燃料電池システムは燃料電池本体をはじめ，インバータや改質器，さらにガスタービン等の補機を含む場合もあり，比較的複雑なシステム構成となる。一方，将来の電力需給制御への活用を考えた場合，一定出力の電源では他の自然エネルギーとの協調が難しくなる。図4に現在の電力供給

事業における負荷分担と，将来の新エネルギーの導入が進展した時点の負荷分担の比較例を示す。高い効率を背景として最終的に MCFC や SOFC の導入が進展したとしても，このままでは出力変動を許容しない，いわゆる硬直化電源の比率が高くなり，太陽光発電や風力発電といった自然エネルギー導入においては電力貯蔵設備の大量併設が必要とならざるを得ない。これらの燃料電池は高温動作であるがゆえに出力変動は現在のところ期待できないが，材料および制御技術の開発により，これらの問題も解決されることが期待される。また燃料電池システムの動的モデルの開発も課題となっており，改質器～燃料電池セル～インバータを統合した解析モデルの構築も目指している。

5. まとめ

本稿では，現在発展途上にある電力システム向け燃料電池の開発動向についてまとめた。燃料電池は水素社会の主役として注目され，小規模な発電システムは完成に近いが，効率改善や大規模化については，今後も研究開発が必要である。

一方，燃料電池に限らず，一般の分散型電源の普及は，電圧の不平衡や高調波の増大をもたらす恐れがあり，高調波を考慮した配電端電源設備の許容量に関する考察，フリッカの影響と測定手法，不平衡運転や高調波運転条件における評価基準，調相設備の運用手法などが論じられる必要がある。

よって燃料電池システムの普及は，システム単体の開発と，受け入れ側である電力システムとの調和性の考察にゆだねられているといえよう。

文 献

- (1) C.J. Andrews and S.A. Weiner: "Visions of a Hydrogen Future", *IEEE Power & Energy Magazine*, Vol.2, No.2 (2004-3/4)
- (2) 電気学会燃料電池発電次世代システム技術調査専門委員会：燃料電池の技術，オーム社 (2003)
- (3) 燃料電池 NPO 法人 PEM-DREAM：よくわかる最新燃料電池の基本と動向，秀和システム (2004)
- (4) 電力系統用パワーエレクトロニクス機器専門委員会：「電力系統用パワーエレクトロニクスの現状と設計・保守基準」，電気協同研究，Vol.57, No.2 (2001-10)
- (5) 池田伸一：りん酸形燃料電池の実用化に向けた各社の活動状況，日本電機工業会 (2002-3)
- (6) 篠崎 功・草間伸行・小川雅弘：「汚泥消化ガス燃料電池発電システム」，東芝レビュー，Vol.55, No.6 (2000)
- (7) 根本 宏：「『愛・地球博』で実証展示する新エネルギーシステム」，電学誌，Vol.124, No.8, pp.502-505 (2004-8)
- (8) 吉田行男・久留長生・武信弘一：「SOFC 実用化へ向けての取り組み」，三菱重工技報，Vol.40, No.4 (2003-7)

このほか各社個別の開発動向についてはホームページを参考とした

藤 田 吾 郎 (正員) 1970 年 1 月 12 日生。1992 年法政大学工学部電気工学科卒業。1994 年同大学工学研究科電気工学専攻修士課程修了。1997 年同博士課程修了。博士 (工学)。1997 年東京都立大学研究生。1998 年 4 月より芝浦工業大学工学部電気工学科講師。電力システムの制御に関する研究に従事。IEEE，計測自動制御学会，電気設備学会会員。