

# 5 kW 級固体高分子形燃料電池コージェネレーションシステム 準商用機の開発とビジネス展開

## 5 kW PEFC Co-Generation System for Businesses

山 中 康 朗 エネルギー・プラント事業本部電力事業部開発部  
 松 山 俊 哉 エネルギー・プラント事業本部電力事業部開発部 部長代理  
 松 尾 貴 寛 エネルギー・プラント事業本部電力事業部開発部  
 濱 田 行 貴 エネルギー・プラント事業本部電力事業部開発部  
 大 原 宏 明 技術開発本部総合開発センター環境・化学システム開発部

当社では都市ガス燃料および石油系液体燃料を使用する最小規模の熱電併給システムとして、5 kW 級 PEFC コージェネレーションシステムの開発・商品化を進めている。これまでに合計 15 台を出荷し、フィールドでの試験を通じて貴重なデータを取得してきた。2004 年度にはこれらの結果をフィードバックした都市ガスを燃料とする商用プロト2号機を開発し、運転試験を通じて所定の性能を確認した。本稿では、当社の PEFC コージェネレーションシステムの特長と商用プロト2号機の紹介ならびに今後の開発とビジネス展開について報告する。

IHI is now developing 5 kW Polymer Electrolyte Fuel Cell ( PEFC ) systems as the smallest practical type of co-generation system. IHI has produced 15 units of Prototype 1 fuelled by natural gas/kerosene/LPG, and various examinations and field tests were carried out by a user. The town gas Prototype 2 system was developed based on the results, which achieved at higher performance, compactness, cost reduction and better utilization. The Prototype 2 system and the business structure are discussed.

## 1. 緒 言

燃料電池は、従来の内燃機関などに比べて発電効率が高く、静寂性に優れるほか、大気汚染の原因となる NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>、PM などの排出が少ないという特長をもっており、環境に優しい省エネルギーシステムとして、その実用化が期待されている。そのなかでも、固体高分子形燃料電池 ( PEFC ) は、ほかの燃料電池に比べて作動温度が低く、エネルギー密度が高い特長をもつことから、起動停止特性に優れるとともにコンパクト化が可能であり、現在、最も注目されている。また比較的小容量域でも高い効率を維持できることから、これまで市場として考えられていなかった家庭用や小規模業務用など、民生分野における CO<sub>2</sub> 削減および環境問題の解決策の一つとして期待が高まっている。

当社では PEFC コージェネレーションシステムを分散型電源の最小出力域を担う商品として位置づけ、小規模業務用などを対象に 5 kW 級 PEFC コージェネレーションシステムの開発を進めている。

## 2. PEFC コージェネレーションシステムの概要

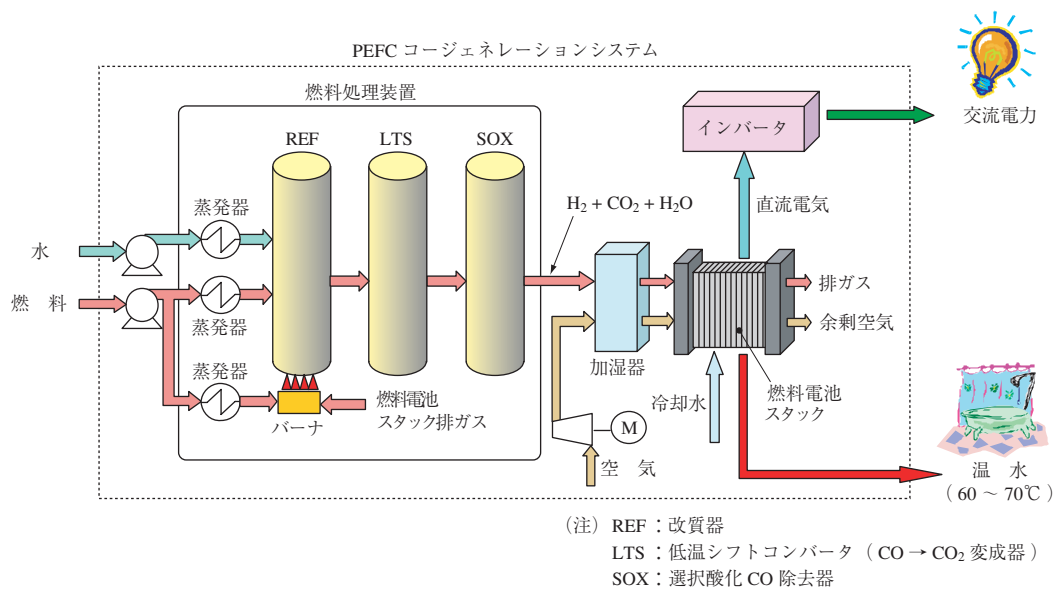
### 2.1 システム構成

5 kW 級 PEFC コージェネレーションシステムフロー概念図を第 1 図に示す。都市ガス、LPG もしくは石油系液体燃料などの炭化水素系燃料を水蒸気とともに燃料処理装置に供給し、CO 濃度を 10 ppm 以下まで低減した水素リッチな改質ガスを取り出し、燃料電池スタックに供給する。燃料電池スタックでは改質ガス中の水素と、空気ブロワで供給された空気中の酸素とが、電気化学的に反応し発電が行われる。

燃料電池スタックで発生した直流電気は、インバータで交流に変換されて発電電力として取り出される。また発電とともに 60~70℃の温水が得られる。

### 2.2 システムの特長

一般的な都市ガスを発電に使用する燃料とする装置に加えて、比較的改質の難しい灯油などの石油系液体燃料を使用する装置もラインナップに加えており、燃料インフラに合わせた装置の提供が可能である。またラジエータによっ



第 1 図 5 kW 級 PEFC コージェネレーションシステムフロー概念図  
Fig. 1 System flow of 5 kW class PEFC co-generation system

て、熱回収なしの運転が可能であり、需要に合った電気および温水の自由な供給形態が可能となっている。

### 3. 商用プロト 2 号機の開発

#### 3.1 商用プロト 2 号機開発の経緯

当社ではそれまでの要素研究、初号機の開発を経て、商用プロト 1 号機を 2002 年度に開発した<sup>(1)~(3)</sup>。これを都市ガス・灯油・LPG などの燃料対応機に展開することで、これまで合計 15 台を製造し、社外において各種試験、フィールドテストを実施し、貴重なデータを取得してきた<sup>(4)</sup>。

これらの実績を基にして 2004 年度に、よりいっそうの高性能化、コンパクト化、コスト低減、運用性向上を目指した商用プロト 2 号機を開発した (第 1 表)。

#### 3.2 商用プロト 2 号機燃料処理装置の開発

燃料処理装置は都市ガスや石油系液体燃料などの原燃料を改質して、燃料電池スタック反応に必要な水素を含む燃料に改質するとともに、改質ガス中の CO 濃度を燃料電池スタックに供給することができる 10 ppm 以下まで低減する装置で、PEFC コージェネレーションシステムの性能、サイズなどを決定する大きな構成機器の一つである。当社では 5 kW 級 PEFC コージェネレーションシステム用として専用の燃料処理装置を開発しており、商用プロト 1 号機において、改質器、低温シフトコンバータ (LTS)、選択酸化 CO 除去器 (SOX) などの反応温度の違う複数の化学反応器と、バーナ、蒸発器などの機器類を一体化し、高性能断熱容器に収めた構造とすることで、コンパクト化および

第 1 表 5 kW 級 PEFC コージェネレーションシステム開発経緯  
Table 1 History of 5 kW class PEFC co-generation system development

| 項目 \ 年度                              | 2000        | 2001 | 2002 | 2003              | 2004             | 2005    | 2006 | 2007 ~ |
|--------------------------------------|-------------|------|------|-------------------|------------------|---------|------|--------|
| 要素研究                                 | 燃料処理装置要素研究  |      |      |                   | 燃料電池スタック開発, 製造技術 |         |      |        |
| 初号機<br>・発電効率：20%<br>・総合効率：68%        | 開発, フィールド試験 |      |      |                   |                  |         |      |        |
| 商用プロト 1 号機<br>・発電効率：31%<br>・総合効率：80% |             | 開発   |      | フィールド試験 (累計 15 台) |                  |         |      |        |
| 商用プロト 2 号機<br>・発電効率：35%<br>・総合効率：80% |             |      |      | 開発                |                  | フィールド試験 |      |        |

熱効率の向上に成功している<sup>(1)~(3),(5)</sup>。

また、伝熱構造の最適化によって最高使用温度を低減することで、一般的なステンレス鋼を構造材料に用いている。バーナはそれぞれの使用燃料に合せたものを新たに設計して、アノードオフガスと燃料の混焼ならびに燃料専焼の両方での運用を実現するとともにターンダウン比（定格燃料流量と制御可能な最小燃料流量の比）を大きくすることで、起動時から発電運転時までを一つのバーナのみでカバーしている<sup>(5)</sup>。

商用プロト 2 号機の燃料処理装置開発に当たっては、この基本コンセプトを維持しながら、反応器容量の最適化と LTS/SOX 反応器の完全一体化などを実施し、さらにコンパクト化を図った。また製作方法を見直し、設計変更などによって量産化の可能な構造にするとともに、よりいっそうの信頼性向上、メンテナンス性向上を図った。商用プロト 1 号機燃料処理装置と、商用プロト 2 号機燃料処理装置の比較を第 2 図に示す。15%の容積削減を実現し（17.8 l/kW）、また商用プロト 1 号機同様に水素発生量 4.6 m<sup>3</sup><sub>N</sub>/h 以上、改質率 96%以上、CO 濃度 10 ppm 以下の性能が得られた。本燃料処理装置はコンパクト性と性能において、業界トップクラスと自負している。

### 3.3 燃料電池スタックの開発

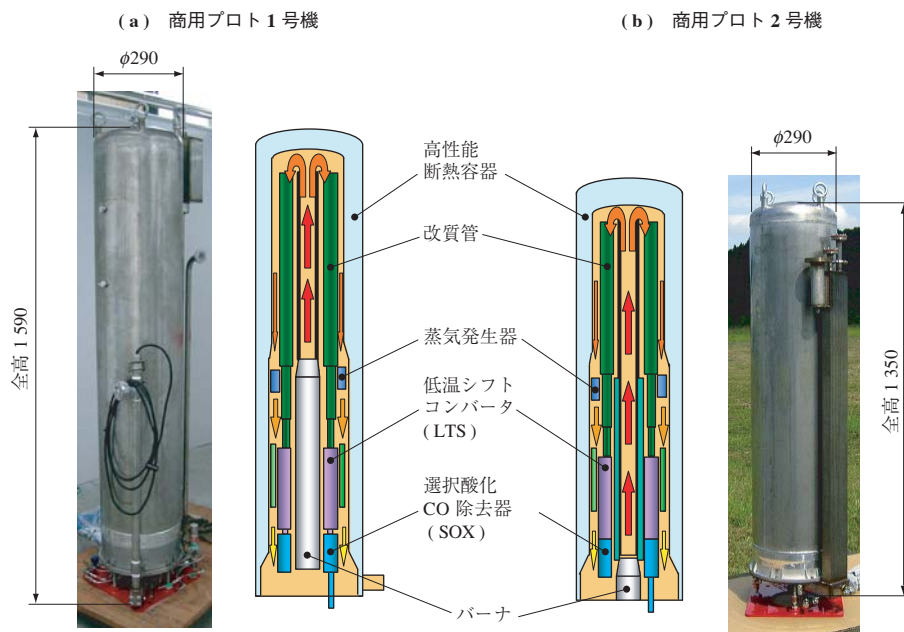
燃料電池スタックは、燃料処理装置で生成した改質ガス中の水素と、空気中の酸素を電気化学的に反応させて電気エネルギーを生み出す、PEFC コージェネレーションシス

テムの中核を成す機器である。当社は 1999 年にアメリカ MOSAIC 社のスタック設計・製作技術を導入して固体高分子形燃料電池スタックの製作を開始した<sup>(1)~(3)</sup>。2002 年からはこのスタック技術を基に自社開発に切替えて、数値解析を駆使した改良を加えることで 5 kW 級 PEFC コージェネレーションシステム用燃料電池スタックを開発してきた<sup>(6)</sup>。

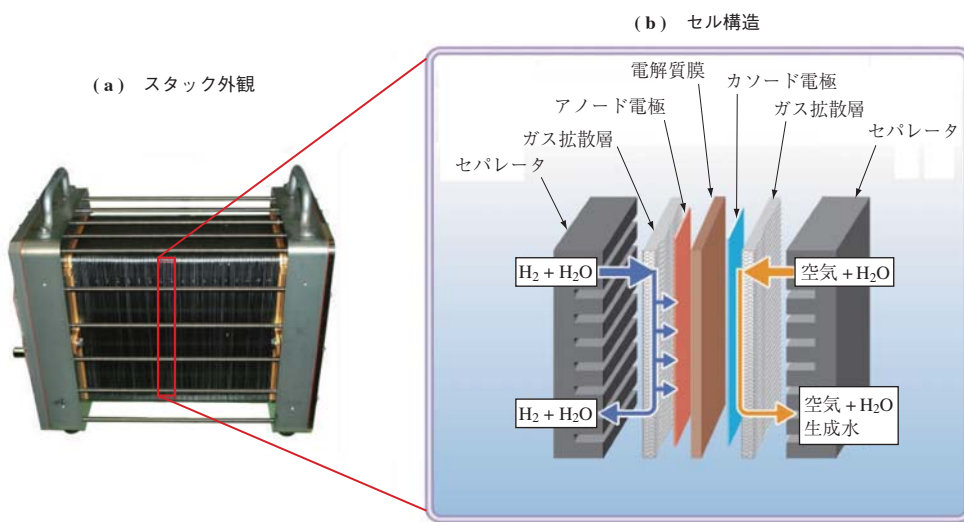
燃料電池スタックの外観とセル構成を第 3 図に示す。燃料電池のスタック 1 台でシステム運用条件を模擬した標準運転条件において DC 6.5 kW の発電出力が得られる。また現在の燃料電池スタックでは従来の機械加工でセパレータの溝を形成する方法ではなく、生産性に優れたモールド加工セパレータを採用することで、性能の向上と生産コストの引き下げを図った。

これらの燃料電池スタックは 300 cm<sup>2</sup> を超える大きな電極面積をもつとともに、300 mA/cm<sup>2</sup> 以上の高い電流密度を運用点とすることで燃料電池スタックの出力密度を高めて、出力当たりのスタック部材数を減らすことで、コスト削減とコンパクト化を図った。また、セパレータおよびスタック全体構造の流配設計を最適とすることで、アノード/カソードともに数 kPa の圧力損失に抑えながら、安定した電圧を得られるようにしており<sup>(7)</sup>、ポンプ、ブロワなどの補機動力削減と、機器選択の条件緩和を実現した。

第 4 図に燃料電池スタックの性能を示す。商用プロト 1 号機システムでのスタック実績を基に、① MEA（膜/電



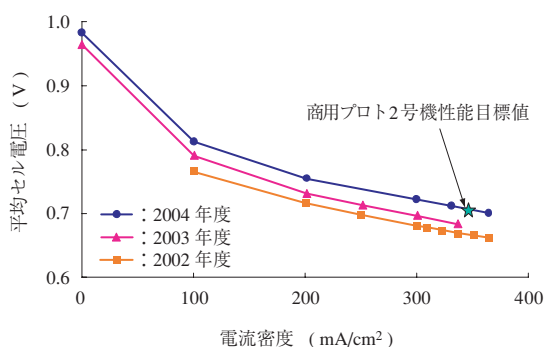
第 2 図 燃料処理装置比較（単位：mm）  
Fig. 2 Comparison of Prototype 1 and Prototype 2 fuel processor (unit : mm)



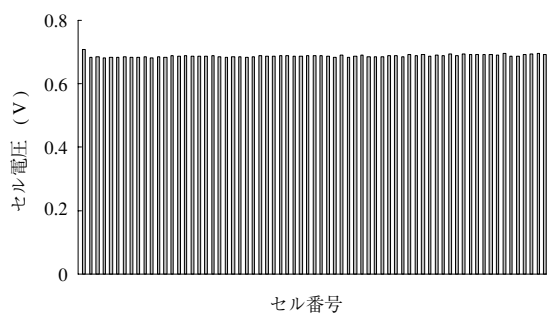
- (注) 1. 高燃料利用率での運転 (UF 80%以上) が可能  
 2. 大気圧下での運転が可能  
 3. 燃料電池に供給されるガスは、電解質膜を挟んで表裏にあるカソード側とアノード側に分配  
 4. スタックは、本構造を積み重ねて構成

第 3 図 燃料電池スタック外観とセル構成

Fig. 3 Structure of fuel cell stack



第 4 図 燃料電池スタック性能  
 Fig. 4 Performance of fuel cell stack



第 5 図 セル電圧分布  
 Fig. 5 Cell stack voltage distribution

極接合体 : membrane electrode assembly) ② セパレータ ③ シール部材 ④ その他セル構成部材の仕様 ⑤ 締付け構造, などを見直して性能の向上を図ってきた。この結果, セル性能は年々向上し, 2004 年度には当初目標としていた性能を達成することができた。第 5 図に燃料電池スタックのセル電圧分布を示す。75%以上の高い燃料利用率条件でも十分に均一なセル電圧分布が得られている<sup>(6)</sup>。

#### 4. 商用プロト 2 号機 PEFC コージェネレーションシステムの開発

PEFC コージェネレーションシステムは本体ユニット内部に, ① 燃料電池スタック ② 燃料処理装置 ③ 系統連系インバータ ④ 制御装置 ⑤ ポンプ, ブロワなどの補機類, などを装備した屋外仕様のパッケージ構造となっており, 燃

料電池スタックならびに燃料処理装置の特性を最大限に引き出すことで, シンプルで高性能なシステムの実現化を図っている<sup>(8)</sup>。

商用プロト 2 号機の開発に当たっては商用プロト 1 号機のフィールド試験結果を反映し, 次の項目に注力して開発を進めた。

##### (1) 信頼性の向上

商用プロト 1 号機システムのフィールド試験において, 十分な寿命性能を得られなかったポンプなどの機器類については, 機器メーカーとともに故障要因を特定した。商用プロト 2 号機では, この結果を基に機器の再選定とともにシステム構成を含む仕様を見直し, 信頼性の向上を図った。

##### (2) 補機動力削減と高性能化

システム性能の向上を図るために, 特に補機動力の



削減に重点をおいた。補機動力の大きな比率を占める空気ブロワ、ポンプ、換気ファンなどについては、システムとしての最適条件が得られるように仕様およびシステム構成の面からも見直しを行った。

### (3) コンパクト化

商用プロト 1 号機システムの機器配置を全面的に見直し、高密度に配置するとともに、保守の必要な機器を一面に集めることで、コンパクト化とメンテナンス性の両立を図った。特に装置裏面から一切のメンテナンス機器を一掃することで、建物に近接した設置を実現できるようにし、設置性の向上を図った。

### (4) 低コスト化

システムのシンプル化をよりいっそう進め、生産しやすい設計とすることで、量産時における低コスト化を図った。またより安価な機器類を選定できるようにシステム仕様の見直しを行った。

商用プロト 1 号機と開発した商用プロト 2 号機の外形比較を第 6 図に示す。ユニットサイズを従来比 30%削減することによって 0.24 m<sup>3</sup>/kW を達成し、十分にコンパクトなシステムを実現できた。また補機動力を従来比 35%削減したほか、制御入出力点数を半減することができた<sup>(8)</sup>。

## 5. 商用プロト 2 号機 PEFC コージェネレーションシステムの試験結果

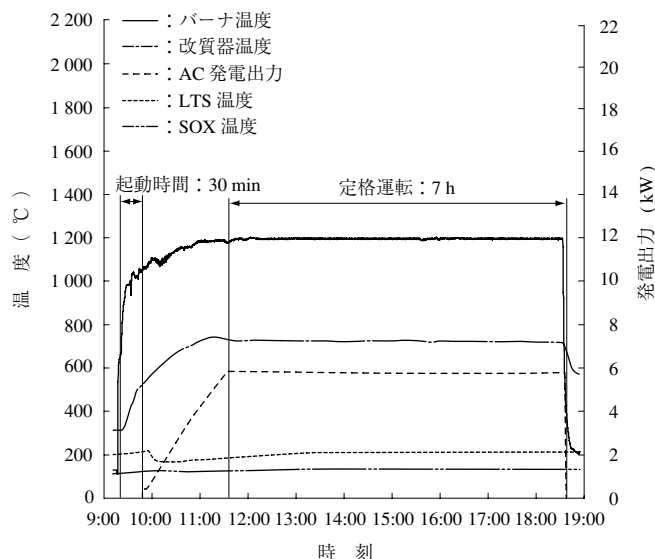
開発した商用プロト 2 号機の運転試験を実施した。試験結果として昼間時間だけ運転する、いわゆる DSS ( Daily Start and Stop ) 運転の一例を第 7 図に、定格運転時の性能データを第 2 表に示す。

DSS 起動で約 30 分で発電を開始しており、その後停止するまで燃料処理装置内部の各部温度も極めて安定している。また燃料処理装置出口の CO 濃度も 5 ppm 以下であり、安定した運転を実現していることが分かる。

定格時の性能として、送電端出力 5.3 kW、送電端効率 34.1% ( LHV )、排熱回収効率 52.0% ( LHV )、総合効率 86.1% ( LHV ) が得られることを確認した。

本試験で使用した燃料電池スタックは、性能が一世代前のものである。このため最新開発品スタックの性能データを考慮すると、開発目標としていた送電端効率 35% ( LHV ) は十分に達成することが可能である。

現在、運転健全性の確認のため、連続運転試験を実施中である。



第 7 図 DSS 運転特性

Fig. 7 Driving characteristics in DSS operation

(a) 商用プロト 1 号機



PEFC コージェネレーションユニット  
寸法：1 600 (W) × 700 (D) × 1 700 (H)

(b) 商用プロト 2 号機



PEFC コージェネレーションユニット  
寸法：1 290 (W) × 740 (D) × 1 350 (H)

第 6 図 プロト 1 号機とプロト 2 号機の外形比較 (単位：mm)  
Fig. 6 External form of Prototype 1 and Prototype 2 unit (unit : mm)

第2表 プロト2号機定格性能  
Table 2 Performance of Prototype 2 system

| 項            | 目      | 単位                  | 性能   | 備考  |
|--------------|--------|---------------------|------|-----|
| 燃料処理装置       | 燃料投入量  | l <sub>s</sub> /min | 22   |     |
|              | 改質器温度  | ℃                   | 687  |     |
|              | LTS温度  | ℃                   | 209  |     |
|              | SOX温度  | ℃                   | 133  |     |
|              | 出口CO濃度 | ppm                 | 4.7  |     |
| 燃料電池スタック     | 温度     | ℃                   | 70   |     |
|              | DC出力   | kW                  | 6.1  |     |
| 発電電力         | 送電端出力  | kW                  | 5.3  |     |
| 排熱回収         | 出口温度   | ℃                   | 65   |     |
|              | 出湯流量   | l/min               | 2.8  |     |
| 発電効率 (AC送電端) |        | %                   | 30.7 | HHV |
|              |        | %                   | 34.1 | LHV |
| 排熱回収効率       |        | %                   | 46.8 | HHV |
|              |        | %                   | 52.0 | LHV |
| 総合効率         |        | %                   | 77.5 | HHV |
|              |        | %                   | 86.1 | LHV |
| DSS          | 起動時間   | min                 | 約30  |     |

## 6. 今後のビジネス展開

第3表に5kW級PEFCコージェネレーションシステムを24時間運転可能な店舗などに導入した場合の導入効果試算の一例を示す。燃料種、燃料コストなどによってばらつきが生じるが、PEFCの導入によって、29~40%のCO<sub>2</sub>削減効果が得られ、ユーザのメリットは年間50万円程度と分かる。今後のエネルギー需要見通しでは家庭用や店舗、事務所などの民生分野の伸びが大きくなることが予想されており、5kW級PEFCコージェネレーションシステムはこの分野におけるCO<sub>2</sub>削減のための有効なツールとなり得ると思われる。

また一方で、定置用燃料電池の普及方針<sup>(9)</sup>によれば、2005~2010年の導入段階における導入目標は約210万kWと示されており、本格的な普及段階は2010年以降と示されている。2020年における導入目標は1000万kWとされており、PEFCコージェネレーションシステムのビジネ

第3表 5kW級PEFCコージェネレーションシステム導入効果試算例  
Table 3 Simulation of effects of 5kW class PEFC co-generation system

|  | 燃料金体系                                      | 灯油     | 都市ガス13A | LPG    |
|--|--|--------|---------|--------|
|  |  | 配送価格   | 業務用価格   | 業務用価格  |
| 5kW級PEFCコージェネレーションシステム導入後                        | 発電出力(kW)                                   | 5.0    | 5.0     | 5.0    |
|  | 温水出力(kW)                                   | 6.3    | 6.3     | 6.3    |
|  | 発電効率(%)                                    | 35     | 35      | 35     |
|  | 排熱回収効率(%)                                  | 44     | 44      | 44     |
|  | 総合効率(%)                                    | 79     | 79      | 79     |
|  | 年間燃料コスト(千円/y)                              | 587    | 677     | 892    |
|  | PEFC発電単価(円/kW・h)                           | 13.4   | 15.5    | 20.4   |
|  | 一次エネルギー(MJ/y)                              | 450514 | 450514  | 450514 |
|  | CO <sub>2</sub> 排出量(kg-CO <sub>2</sub> /y) | 32830  | 25513   | 29140  |
|  | 5kW級PEFCコージェネレーションシステム導入前                  | 買電料金体系 | 従量電灯C   | 従量電灯C  |
| 買電単価(円/kW・h)                                     |  | 22.19  | 22.19   | 22.19  |
| 買電費用(千円/y)                                       |  | 972    | 972     | 972    |
| 発電端CO <sub>2</sub> 排出量(kg-CO <sub>2</sub> /y)    |  | 30222  | 30222   | 30222  |
| 温水ボイラの燃料代(千円/y)                                  |  | 258    | 298     | 392    |
| 温水発生起源CO <sub>2</sub> 排出量(kg-CO <sub>2</sub> /y) |  | 16050  | 12473   | 14246  |
| 年間コスト(買電+ボイラ燃料)(千円/y)                            |  | 1230   | 1270    | 1364   |
| 一次エネルギー(MJ/y)                                    |  | 655962 | 655962  | 655962 |
| CO <sub>2</sub> 排出量(kg-CO <sub>2</sub> /y)       |  | 46272  | 42695   | 44468  |
| ユーザメリット(千円/y)                                    |  | 643    | 593     | 472    |
| 一次エネルギー削減量(MJ/y)                                 | 205448                                     | 205448 | 205448  |        |
| CO <sub>2</sub> 削減量(kg-CO <sub>2</sub> /y)       | 13442                                      | 17182  | 15328   |        |
| CO <sub>2</sub> 削減率(%)                           | 29   | 40     | 34      |        |

- (注) 1. 効率表記はLHV基準とした。  
 2. PEFCコージェネレーションシステムの電気出力、温水出力ともすべて使い果たすものとした。  
 3. 貯湯槽効率80%、温水ボイラ効率80%とした。  
 4. 設備稼働率は100%とし、メンテナンス費用は考慮しない。  
 5. 発電端のCO<sub>2</sub>排出量の算定には、火力発電の年間平均値である0.69kg-CO<sub>2</sub>/kW・hを用いた。  
 6. 一次エネルギー削減量の算出における電力一次エネルギー換算は、9.830MJ/kW・h(火力平均・利用端効率36.6%相当)とした。  
 7. CO<sub>2</sub>削減率は、(1-PEFC導入後CO<sub>2</sub>排出量/PEFC導入前CO<sub>2</sub>排出量)×100%として算出した。

スを展開するに当たってはこのタイムスケジュールに則った装置開発が必須となる。現在、都市ガス燃料商用プロト2号機をベースにして、灯油、LPGなどの燃料対応機の開発を実施中であり、2005年度中にはこれらをフィールドに投入し、CO<sub>2</sub>削減効果、経済性の実証ならびに信頼性、メンテナンス方法などの確認を実施する予定である。

今後はこれらの商用プロト2号機フィールドテスト結果を基に、なおいっそうの性能向上と低コスト化を図った商用機を開発し、2010年度からの本格販売につなげる。

## 7. 結 言

商用プロト1号機のフィールド試験結果を反映して、準商用機として位置づける都市ガス燃料PEFCコージェネレーションシステム商用プロト2号機を開発し、運転試験を実施した。商用プロト1号機と比較して30%のコンパクト化と35%の補機動力削減および入出力点数を半減した。

開発した商用プロト2号機の運転試験の結果、DSS起動時間約30分、送電端効率34.1% (LHV)、総合効率86.1% (LHV)を確認し、システムとしての健全性を確認することができた。また最新型の燃料電池スタックを搭載することで、目標としている35% (LHV)の発電効率を十分に満足する見通しが得られた。

## — 謝 辞 —

灯油、LPGを用いたシステムの開発に当たっては、出光興産株式会社から触媒の提供を受け、また多くのご助言とご協力をいただきました。ここに記し、深く感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- (1) 山中康朗, 鈴木 彰, 水澤 実, 小林和典: 5 kW 級固体高分子形燃料電池の開発 石川島播磨技報 第42巻第6号 2002年11月 pp.298-302
- (2) 大原宏明, 山中康朗, 鈴木 彰, 水澤 実, 小林和典: 5 kW 級 PEFC 発電システムの開発 第19回 エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス Vol.19 2003年1月 pp.623-626
- (3) Y. Yamanaka, A. Suzuki, M. Mizusawa and K. Kobayashi: Development of 5 kW Polymer Electrolyte Fuel Cell Ishikawajima-Harima Engineering Review Vol.36 No.1 (2003.2) pp.14-18
- (4) 國分洋文, 大原宏明, 山中康朗, 水澤 実: IHI における PEFC コージェネレーションシステム開発状況 第12回燃料電池シンポジウム 2005年5月
- (5) 水澤 実: IHI における燃料電池改質器の開発状況 クリーンエネルギー 2003年6月
- (6) 山中康朗: 業務用 5 kW 燃料電池の開発事例 家庭用燃料電池の開発と課題 株式会社シーエムシー 出版 2004年12月 pp.171-179
- (7) 大原宏明, 山中康朗, 水澤 実, 鈴木 彰, 小林和典: 5 kW 級 PEFC コージェネレーションシステムの開発動向 クリーンエネルギー 2003年9月
- (8) 大原宏明, 山中康朗, 水澤 実: 5 kW 級 PEFC コージェネレーションシステムの開発動向 最新の水素技術 III 特集号 日刊工業出版株式会社 2005年
- (9) 燃料電池実用化戦略研究会: 燃料電池実用化戦略研究会報告 2001年1月