

大阪ガスにおける家庭用PEFC コージェネレーションシステム開発の取り組み

中島 浩、澤田 雄治、越智 雅人
大阪ガス株式会社 家庭用コージェネレーションプロジェクト部
大阪市此花区北港白津1丁目3番4号

Development of Residential PEFC for Home use

Hiroshi NAKAJIMA, Yuji SAWADA, Masato OTI
Residential Cogeneration Development Department, Osaka Gas Co., Ltd
3-4 Hokko Shiratsu 1-Chome, Konohana-ku, Osaka

Osaka Gas has been developing PEFC cogeneration system for Japanese residential market since 1999, and we have developed its fuel processor and CO preferential oxidation catalyst for this application. The fuel processor has already achieved the targeting thermal efficiency, which is above 82% (HHV), its targeting durability over 90,000 hours can be also expected from our test results, and, CO concentration is reduced below 1 ppm.

Since the year before last, we have started the joint development programs individually with four promising manufactures. So, we will introduce these activities of PEFC cogeneration systems development.

Key words: Fuel Cell, PEFC, Residential Cogeneration, Natural Gas, Reformer

1. はじめに

固体高分子形燃料電池（PEFC）は、小型で高出力密度であることから比較的高い発電効率が得られ、低温で作動できるため起動停止が容易で保管も容易であることから、自動車用と共に家庭用燃料電池システムとして急速に開発が進められている。家庭用固体高分子形燃料電池（PEFC）システムは、電気と同時に発生する熱を利用するコージェネレーションシステムであることから高いエネルギー効率を得ることができるため、省エネルギーと二酸化炭素（CO₂）排出量削減に大きく寄与できる。

こうした中、家庭用PEFCの技術開発を促進するため、2005年度から3年間の計画で国の「定置用燃料電池大規模実証事業」が開始された。大阪ガスは、大規模実証事業に参画して実住居に家庭用PEFCシステムを導入し、一般家庭の実使用条件での実測データを収集することで初期市場段階における開発課題を抽出するという大規模実証実証の目的に則り、セルスタックを中心とした長期耐久性の確立と一層のコストダウン開発に取り組

んでいく考えである。

本稿では、現状の開発状況並びに当社独自の触媒及び水蒸気改質プロセス技術を活用して家庭用PEFC用に開発した「小型改質装置」と家庭用PEFCコージェネレーションシステムを最適に運転制御する「学習運転制御」及びこの制御機能を有した「排熱利用給湯暖房ユニット」を主に報告する。

2. 家庭用PEFCコージェネレーションシステム

家庭用PEFCコージェネレーションシステムの概要を図1に示す。都市ガスなどを燃料としてPEFCで発電された電気は、系統連系によって消費機器に供給される。一方、発電時に発生する排熱は温水として回収されるが、電気と温水の需要には時間的にズレが存在するため、一旦貯湯タンクに溜めておき、必要に応じて風呂や給湯、床暖房等に供給される。貯湯タンクを持つ排熱利用ユニットは、湯の不足時に給湯負荷を補うバックアップボイラーと、従来の暖房をまかなう暖房用ボイラーを有している。

表1 大阪ガスの商品化目標仕様

定格発電容量	700W	~	1kW
T/D (W)	250 / 500 / 700		300 / 500 / 750 / 1000
発電効率	>27.0% >30.5% >31.5%		>27.0% >30.0% >31.0% >31.5%
排熱回収効率	>23.0% >34.0% >39.0%		>24.0% >33.0% >38.0% >41.0%
貯湯温度	6.0℃ 以上		
系統連系	逆潮なし系統連系		
運転形態	連続運転&SS(起動停止) 運転・ステップ追従		
耐用年数	10年		

* 効率は HHVベースnet値、排熱回収率は本体出口基準、排熱温度は貯湯タンク温度

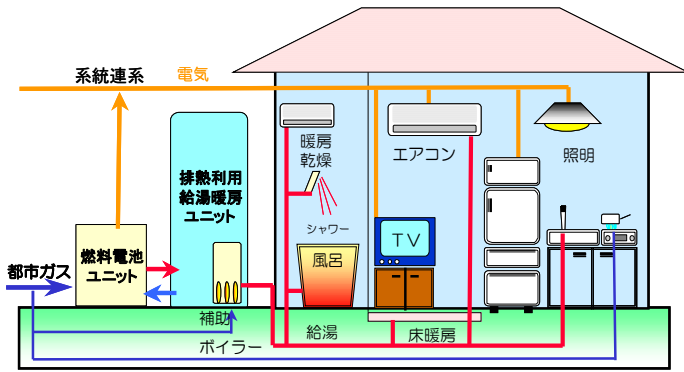


図1 家庭用PEFCコージェネレーションシステム

わが国における一般戸建て住宅での電力及び熱需要の負荷パターンを図2に示す。この図は、冬季・夏季・中間季における各需要についての時刻パターンを示しているが、電力負荷は平均で1kW以下であり、昼間を含めて効率の高い定格付近で運転するためには1kW以下の発電容量が適している。熱需要は夏季と冬季で4倍以上も大きく異なるため、部分負荷で高い効率を得ることや熱需要に合わせた最適運転制御が重要となる。代表的な家庭の需要パターンから、部分負荷での効率を考慮して省エネルギー性・CO2排出量削減・経済性を計算すると、最適発電容量は0.5~1.0kWとなる。大阪ガスでは、家庭用PEFCの導入時における要求性能について、これまでの技術開発の知見、ユーザに受け入れられるための必要仕様及び一般の家庭用商品として満足される技術レベルを基に詳細検討を行い、初期導入時における実現可能で必達すべき目標仕様を設定し、商品化開発に取り組んでいる。表1に大阪ガスの商品化目標仕様の主要項目を示す。

PEFCシステムの構成を図3に示す。PEFCでは、現状のインフラを活用して、都市ガスやLPGなどの燃料を

改質して水素を取り出すシステムが最も有効である。燃料改質装置と電池本体(セルスタック)の運転は密接に関係しており、セルスタックで発電された直流電流はインバータで交流に変換されて出力される。一方、燃料改質装置とセルスタックで発生する排熱は排熱回収装置で回収され、温水として出力される。

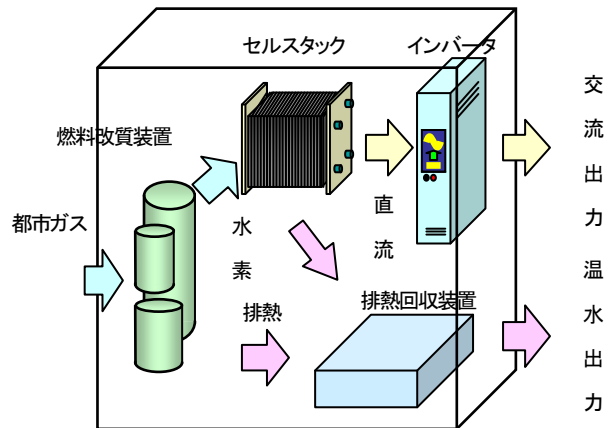
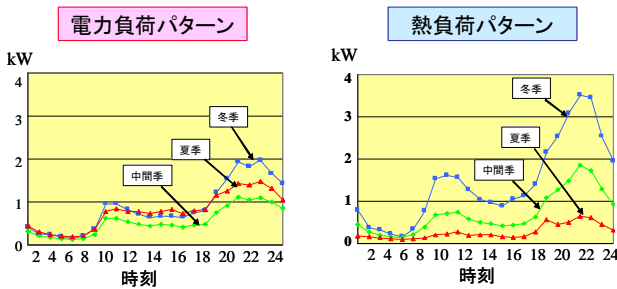


図3 PEFCシステム



出典：財団法人産業創造研究所 想定家庭：のべ床面積150m² 4人家族 平成9年度家庭設置型小規模分散型エネルギーシステムに関する調査報告書

図2 一般戸建て住宅での電力・熱需要の負荷パターン

図4に目標効率の各構成要素へのブレイクダウンを示す。燃料改質装置の熱効率は、「改質システムに投入した原燃料の熱量のうち実際にFCで発電に寄与する水素に変換された熱量の割合」で定義されるプロセス熱効率を用い、電池の効率を「発電に寄与した水素の熱量のうち直流の電力に変換された割合」と定義することにより、最終的な送電端効率を各部の効率の積で表すことができる。改質装置において、定格81%以上(HHV)という高いプロセス熱効率を得るためには、アノードオフガスを改質燃料として利用する水蒸気改質方式のみで達成可能である。セルスタックの発電効率48.5%(HHV)は、これに相当する約720mVの電圧が得られることである。イ

ンバータ効率は、1kW級PEFCでは直流電流が30~50V程度しかないため、DC昇圧部の効率も含んだ効率である。システム内で自家消費されるポンプ・ブロワ等の補機の消費電力低減は重要な課題であり、補機損失は10%以下に抑えなければならない。[1]

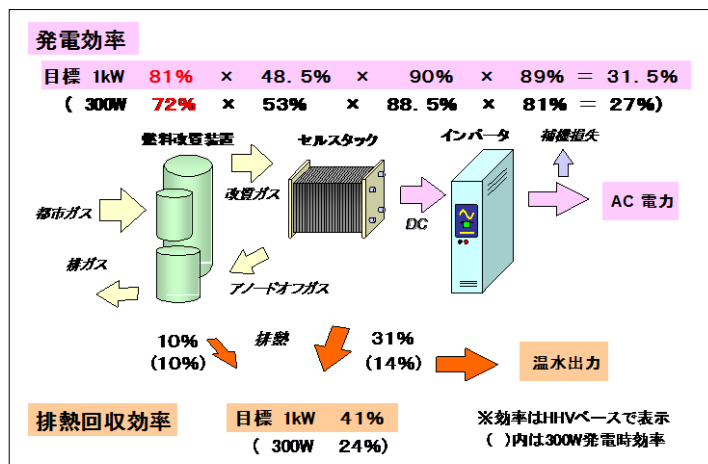


図4 目標効率の各構成要素へのブレークダウン(1kW)

3. 現状の開発状況

(1) 燃料改質装置の開発

大阪ガスでは、独自の触媒技術を活用して1989年にリン酸型燃料電池用水蒸気改質プロセスを開発し、すでに実プラントにおいて5万時間以上触媒無交換で耐久性を実証している[2]。このプロセス技術と新に開発したCO選択酸化触媒[3]を組み合わせ、500W~2kW級のPEFC用天然ガス改質装置(OG式改質装置)を開発してきた[4]。特に、OG式改質装置は超高次脱硫触媒や高活性改質触媒を用いているため、LPG燃料についても天然ガス用と完全な互換性を有している。図5に1kW級OG式改質装置の外観写真を、表2に主な仕様を示す。

OG式改質装置は、オールインワン、大量生産による低コスト化が容易な構造であるとともに、小型・高効率で耐久性に優れているため、家庭用燃料電池コージェネレーションシステムには最適である。以下に特徴を示す。

- 1) 全ての構成要素(脱硫部、水蒸気改質部、CO変成部、CO除去部、水蒸気発生部、バーナ、熱交換器)が、一つのパッケージに収納されている。
- 2) 大阪ガス式高性能触媒による低S/C、低O₂/CO運転と、放熱ロスを抑制した各反応器の配列、構造により、82%以上(1kW級 HHV)を達成している。

3) 高性能CO選択酸化触媒を使用することで、改質装置出口ガス中のCO濃度を安定して1 vol.ppm 以下まで低減することが可能である。従って、セルスタックにおける改質ガス中のCOによる電圧低下がほとんどない。

4) 50,000時間の運転実績を有するリン酸形燃料電池システムの実機に搭載された改質装置や15,000時間以上の固体高分子形燃料電池用天然ガス改質装置で蓄積されたデータに基づき、天然ガスベースの都市ガスを原料とした場合、いずれの触媒(脱硫触媒、水蒸気改質触媒、CO変成触媒、CO選択酸化触媒)も交換せずに90,000時間の運転(連続使用で約10年間)が可能な設計である。

5) 水蒸気改質部とCO除去部の2ヶ所の温度制御で運転が可能であり、その他の反応部は自立的に最適な温度分布になるように設計している。

6) プレス加工と自動溶接により製造可能なプレート形反応器をほとんど全ての反応器に共通して使用することにより、量産時の低コスト化が可能である。

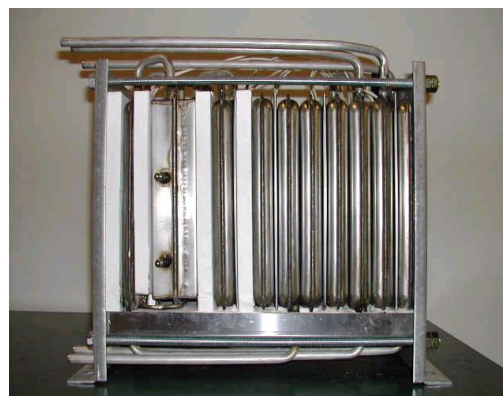


図5 1kW級OG式天然ガス改質装置

表2 1kW級OG式改質装置の主な仕様

改質効率	82% (HHV)**
メタン転換率	92%
設計寿命	90,000時間
最高使用圧力	20kPa
寸法	280W×445D×395H
目標価格(量産時)	5万円未満
※ 改質効率=電池消費水素熱量/供給天然ガス熱量	

性能試験は、原料には13A都市ガス、改質水にはイオン交換水を使用し、改質装置の燃料には、PEFCセル燃

料極オフガスを模擬したドライの混合ガス（組成：H₂ 49vol%, N₂ 6vol%, CH₄ 3vol%, CO₂ 42vol%）を使用した。また、改質反応温度は、メタン転換率が92%になるよう温度調整を行っている。改質効率は次式により求めた（熱量はHHVベース）。

$$\text{改質効率(\%)} = \frac{\text{改質ガス熱量} - \text{模擬オフガス熱量}}{\text{供給都市ガス熱量}} \times 100$$

各試験の結果を以下に示す。

1) 触媒寿命評価試験

図6に1kW級改質装置を使用して、初期の改質効率およびCO濃度と、9万時間相当の運転時間を模擬した触媒を使用した場合の改質効率およびCO濃度を示す。改質装置の触媒寿命として、当初目標である改質効率とCO濃度 (<1ppm) を実現し、9万時間（連続使用で約10年間）後においても有意な劣化がないことを確認した。

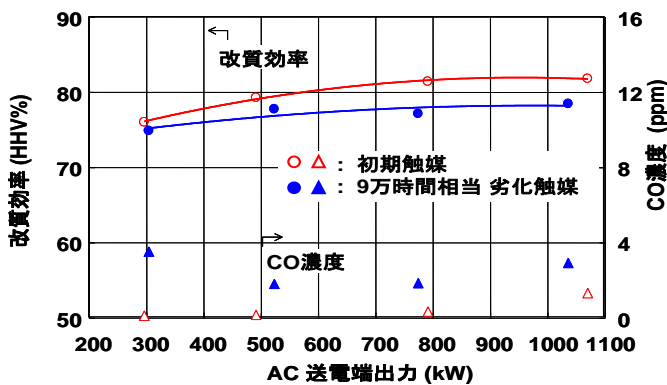


図6 OG式改質装置の初期性能と9万時間後の性能

2) 連続耐久試験

1 kW級改質装置を使用して、改質S/C（改質用水蒸気と原料中の炭素とのモル比）は2.5~2.7とした場合の連続耐久試験を行った。100%負荷における改質効率とCO濃度の経時変化を図7に示す。

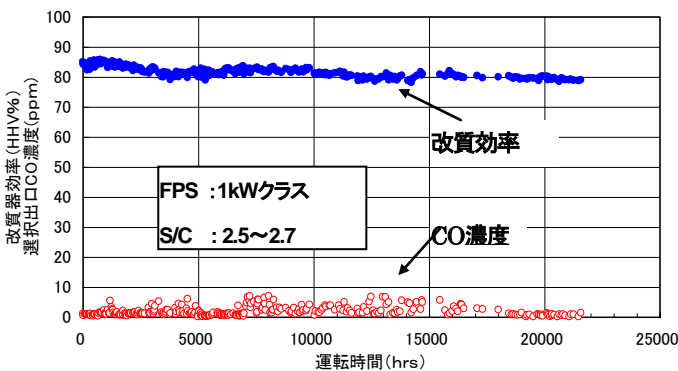


図7 連続耐久試験における改質効率とCO濃度の経時変化

本試験では、メタン転換率が92%になるよう改質温度の調整を行っていることもあり、20,000時間経過後も改質効率の変化はほとんど見られておらず、CO濃度も安定していることから、非常に良い性能を維持している。

3) 起動停止耐久試験

家庭用PEFCコージェネレーションとしては、業務用の装置に比較して、起動停止も頻繁に行われるため、500W級改質装置を使用して起動停止試験を行った。図8にその結果を示す。改質S/Cは2.5とし、起動時の負荷は100%、起動時間は約1時間、運転時間は2時間、起動間隔は4時間で行った。窒素パージについては、家庭用途では将来窒素を使用しなくなると考え、起動停止時の窒素パージを用いない方法で行った。

起動停止1,200回後も改質効率の変化はほとんど見られない。また、起動停止時の窒素を節約してからもCOは1ppm未満で安定しており、CO除去性能は非常に良い性能を維持している。

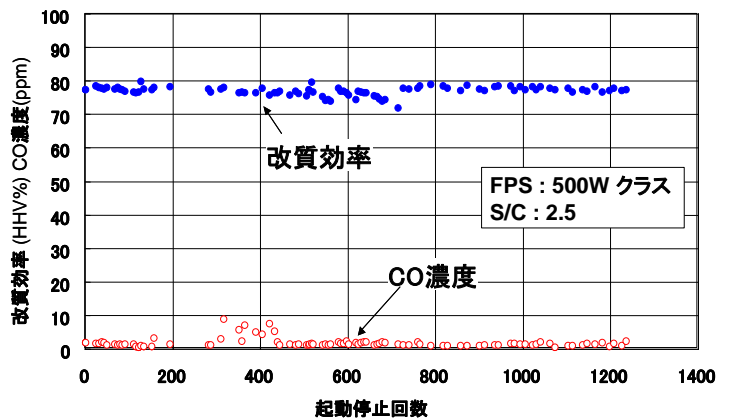


図8 起動停止試験における改質効率とCO濃度の経時変化

4) LPG用改質装置との完全互換性

家庭用のLPGは通常ボンベを切り替えながら使用するが、ボンベが空になる直前はLPG中の付臭剤由来の硫黄化合物や重質の炭化水素が濃縮する。そのため脱硫しきれずに改質触媒が被毒したり、改質触媒上で炭素が析出することなどによって改質性能が低下する。更にLPG中に不飽和炭化水素が多く含まれている場合には、その水添反応により脱硫用リサイクルガス中の水素が消費されることによっても、脱硫性能が低下する。また、家庭用PEFCで検討されている常温脱硫剤では、COSが除去できないという問題もある。OG式改質装置に用いている超高次脱硫触媒は、それ自体にCOSの除去性能もあ

り、LPG原料に対しても高度な脱硫性能を有している。また、高活性改質触媒は、ブタン原料で非常に低いS/C下においても炭素析出を起こし難いという特徴を持っている。

現在、国産有臭LPGボンベを用いて長期の耐久試験を実施中であり、既に窒素不使用起動停止300回、運転時間5,000時間以上の長期耐久性を確認している。LPG用改質装置は、使用するLPG中の硫黄負荷により寿命は天然ガス用より短くなるが、ハードウェアとしては天然ガス用と完全に互換性があり、量産時に共通仕様として製造できるためコストダウンが期待できる[5]。

5) 今後の取り組み

OG式改質装置は、設計寿命9万時間の間に触媒交換が不要であることを、加速劣化手法により調製した9万時間相当劣化触媒を充填した改質装置で評価し、CO濃度が3~4ppmとなるものの装置全体としては十分な性能が得られることを確認した。また、部材の耐久性に関しては、長時間運転した改質器の金属組織分析を行い、減肉のトレンドから、構造材料としても9万時間の耐久性が見込めることを確認した。さらに、窒素パージレスの起動停止シーケンスを確立し、1,200回以上の起動停止でも劣化傾向が認められないことを確認した。

引き続き、改質装置のさらなる小型・高効率化、低コスト化、起動時間短縮といった改良を進めるとともに、商品機レベルで信頼性・耐久性の実証を行っていく。特に、OG式改質装置はLPG燃料について完全に互換性があり、天然ガス用とLPG用のPEFCシステムを共通仕様として製造することによりコストダウンが可能である。今後は、構造の最適化や共通化、量産化技術の確立による一層のコストダウンに向けた取り組みを実施していく。

(2) 学習運転制御の開発

家庭用PEFCコージェネレーションは、高い発電効率の実現が可能で比較的熱負荷が小さい家庭においてもメリットを享受することができる。メリットを最大限に引き出すためには、利用するユーザの電力及び熱負荷(需要特性)の違い、燃料電池ユニットの排熱温度や効率(性能特性)の違い、外気温度などの使用環境(条件特性)の違い等々、種々の特性を考慮した上で「一般家庭のお客様が何も操作することなしに自動的に最適に

制御される」ことが求められる。さらに、家庭用機器では一般に10年程度の寿命が望まれており、現時点の燃料電池は頻繁な起動停止の繰り返しによるセルスタックの耐久性劣化、発電効率の低下という耐久性とトレードオフの「運転条件」が存在する。大阪ガスでは独自に上記特性や条件に応じて耐久性を考慮しながら、自動的に最適運転制御が行える「学習運転制御」を開発した。

1) 排熱利用給湯暖房システム

図9にシステムの概要を示す。燃料電池システムの応答速度の遅れにより、電力負荷追従時であってもインバータ出力が逆潮流となる場合がある。その場合は別途設けられた余剰電力処理装置を作動させることにより、瞬時にヒーターを作動させ、逆潮流を抑制させる。燃料電池からの排熱は、燃料電池内に設けられた循環ポンプを利用して貯湯タンクを循環させ、成層状態で貯湯させている。貯湯タンクは一般家庭での温水の使用量を考慮して200Lとし、貯湯温度はレジオネラ菌などの繁殖を防止するために60℃以上としている。

燃料電池は定格での発電効率が高く、発電のみでも省エネルギー性が得られることから、貯湯タンクが満タンになった場合においても運転を継続させる手段として、ラジエーターを装備している。

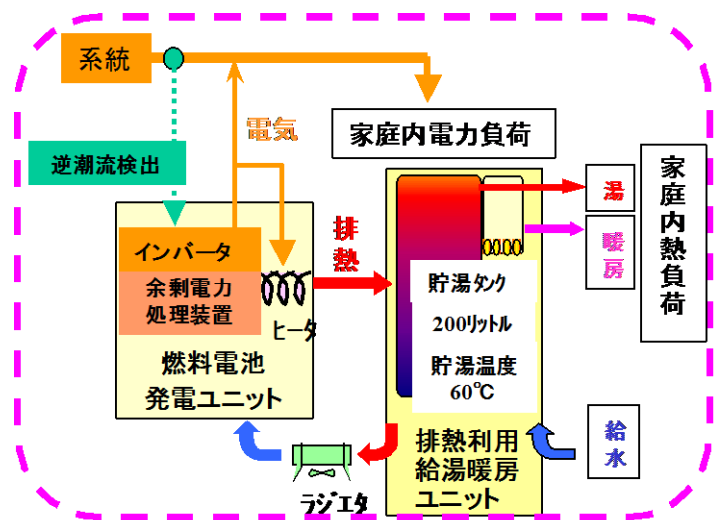


図9 排熱利用給湯暖房システムの概要

2) 燃料電池コージェネレーションシステムの運転方法

燃料電池の運転方法については、負荷追従運転や熱主運転など各種運転方法が提案されている。図10に各種

運転方法のパターンを示す。実際の燃料電池における発電効率や排熱回収効率は出力特性により異なるが、電力負荷追従運転においても熱が余る場合には出力抑制運転や、熱が不足する場合には出力上昇運転を行った方が省エネルギーとなる。このような運転は、可能な限り連続運転を延長させて起動停止時のエネルギーロスを減らすことや定格出力付近の高い総合効率で運転することにより、省エネルギーを増大させる効果を持つ。ここでの出力抑制とは予測負荷を元に熱余り、つまり、貯湯タンクの温水が満杯とならないように、その以前の時間帯出力を電力負荷に対して抑制させる運転を言う。一方、出力上昇とは電力負荷追従においても熱負荷が賅えない場合に熱不足、つまり、貯湯タンクの温水が空にならないように、その以前の時間帯出力を電力負荷に対して上昇させて運転する方法である。電力負荷に対してそれを上回る電気出力については、余剰電力処理装置とヒーターにて電気を熱エネルギーに変換して使用する。燃料電池ユニットの部分負荷効率が低い場合には、定格出力付近の高効率で運転できるため有効である。また、夏場の温水需要が極端に少ない需要家では、省エネルギー性及び耐久性や寿命に影響すると思われる起動回数を考慮した運転方法として、SS運転（数日単位で起動停止運転実施）を採用することにより、省エネルギー性向上と起動回数低減の両立を図ることができる[6]。

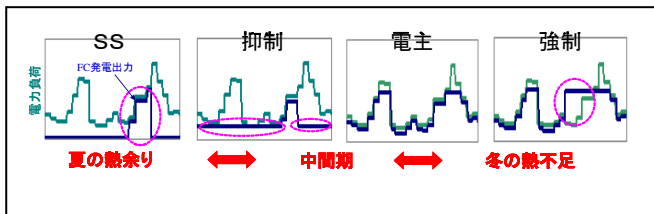


図10 各種運転方法のパターン

実際の家庭用PEFCコージェネレーションシステムでは、各家庭毎において蓄積した負荷から予測負荷を計算し、その予測負荷を元に省エネルギー性や経済性等を最大とするために、各パターンの運転を組み合わせる最適に制御する方法を確立する必要がある。

図11 に熱負荷と最適運転方法の関係を示す。黒線は、電力負荷追従運転時の省エネルギー率を表している。この結果より省エネルギー率最大の運転方法は、熱負荷大⇒熱負荷小に応じて、強制⇒電主⇒抑制⇒SSと推移し、本学習運転制御はこれら運転方法を自動的に最適に実

行するとともに、熱・電力負荷をより正確に予測出来る工夫を行っている。

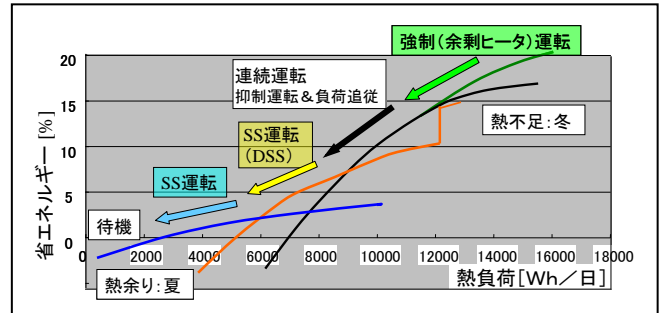


図11 熱負荷と最適運転方法の関係

図12 に5件の一般家庭の年間需要パターンにおいて省エネルギーを評価した結果を示す。最適運転制御により、負荷追従運転に比べて省エネルギー率は1～3.3ポイント向上し、家全体での年間の省エネルギー率は8～14%が得られる。図13に学習運転制御機能を有する排熱利用給湯暖房ユニットの仕様を示す。本ユニットは、ガス給湯器で標準化されているインテリジェント通信方式を採用しており、本通信方式を持つ各メーカーの燃料電池ユニットと一体化して運転することができる。

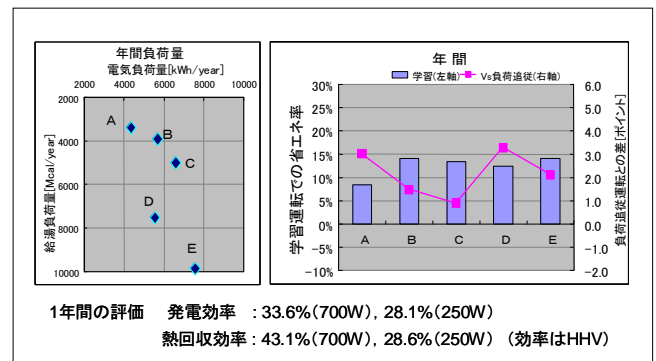


図12 最適運転制御による省エネ率の向上

3) 今後の取り組み

本学習運転制御は、ユーザの様々な負荷特性、異なる特性をもつ燃料電池ユニット、季節ごとの使用環境等々が変わった条件において、燃料電池を最適に制御することができる汎用の排熱利用ユニットを構成することを目標にしており、商用機としての開発を今年度上期中に完了する予定である。今後、大規模実証事業において設置規模を拡大してデータを収集することにより、学習運転制御の省エネルギー効果について検証を進めていく。

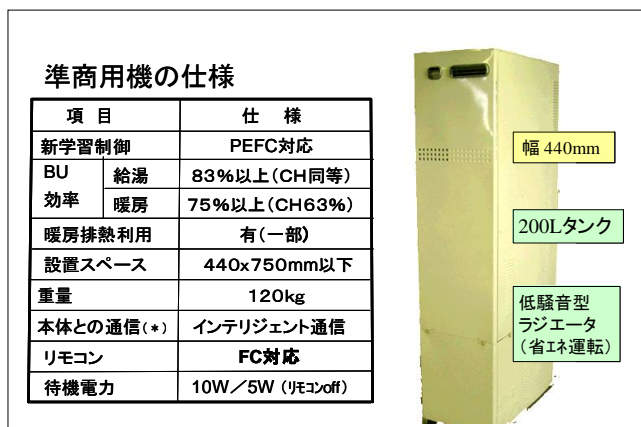


図13 排熱利用給湯暖房ユニットの仕様

4. おわりに

経済産業省では、「定置用燃料電池大規模実証事業」を2005年度より開始するなど、家庭用燃料電池の導入に向けた実用化開発の支援を推進されている。当社ではこのような制度に参画して、国、自治体、メーカーさま等と共に導入拡大に向けての開発を加速させていく。また、当社独自の技術である「燃料改質装置」や「学習運転制御を搭載した排熱利用給湯暖房ユニット」を各社の燃料電池と共用化していくことにより、家庭用燃料電池システムの商品化開発を加速させるとともに、仕様共通化等により一層のコストダウンを進めていく考えである。

参考文献

1. 田畑健ほか、第10回燃料電池シンポジウム講演予稿集, p. 84 (2003).
2. O. Okada, et al, Abstract of Fuel Cell Seminar, p. 321 (2000).
3. 越後満秋ほか、第8回燃料電池シンポジウム講演予稿集, p. 319 (2001).
4. N. Shinke, et al., Abstract of Fuel Cell Seminar, p. 292 (2000).
5. 高見晋ほか、燃料電池 Vol.4 No.1 2004 P.72
6. 榎本幸嗣ほか、第23回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集 p. 9 (2004).