

# 家庭用燃料電池コージェネレーション システムの最適運転制御

井関 孝弥

家庭分野における省エネルギーとCO<sub>2</sub>排出抑制を実現する有力な手段として、固体高分子形燃料電池を用いた家庭用燃料電池コージェネレーションシステムの本格普及が始まりつつある。このシステムの基本構成と機能について紹介するとともに、システムに高いエネルギー利用効率を実現させるべく、起動・停止を最適なタイミングで自動的にを行っている制御（最適運転制御）の考え方について説明する。

キーワード：コージェネレーション、燃料電池、運転制御、省エネルギー、CO<sub>2</sub>排出抑制、需要予測

## 1. はじめに

エネルギー資源の有効利用（省エネルギー）と地球温暖化の防止（CO<sub>2</sub>排出抑制）は、人類の未来を左右する極めて重要な課題である。このような課題の解決に近づく有力な技術的手段として、大規模発電所で発電して消費場所に送電する従来型の発電形態（集中型発電）だけではなく、消費場所で少しずつ電気を発電して利用するという発電形態（分散型発電）がある。分散型発電は、発電時に発生する熱の同時利用（コージェネレーション）が比較的容易に実現可能であり、かつ送電ロスを伴わないため、エネルギーの利用効率が高い。

東京ガス㈱は、家庭における分散型発電を実現するため、燃料電池、なかでも小型化が可能で起動・停止が容易な固体高分子形燃料電池（PEFC：proton-exchange membrane fuel cell）に注目した。そして、1999年に家庭用PEFCコージェネレーションシステムの開発に着手し、2003年には荏原バラード㈱および松下電器産業㈱（現パナソニック㈱）それぞれとの共同開発を開始した。その結果、2005年2月には家庭用燃料電池コージェネレーションシステムとして世界初の商品化（限定市場導入）を実現した。

その後、多数のエネルギー事業者とシステムメーカーから、同様の家庭用PEFCコージェネレーションシステムが商品化されており、現在、これらのシステ

ムはすべて「エネファーム（ENE・FARM）」の統一名称で呼ばれている。「エネファーム」は、経済産業省・資源エネルギー庁・新エネルギー財団が主体となって実施された「定置用燃料電池大規模実証事業」によって、2005年度から2008年度までの間に3,307台が日本全国の一般家庭に設置されるに至った。また、2009年度には世界初の量産販売が予定されており、今後、本格的な普及拡大が見込まれている。

「エネファーム」の高い省エネルギー性能およびCO<sub>2</sub>排出削減性能は、前述の「定置用燃料電池大規模実証事業」などによって実証されている[1]～[4]。例えば、2008年の実績（トップ機種）では、1次エネルギー削減量が12.18 GJ/年（削減率25%）、CO<sub>2</sub>排出削減量が1.2 t-CO<sub>2</sub>（削減率39%）であった[4]。これらの高い実績は、PEFC自体の高い発電効率による部分が多いが、最適運転制御（起動・停止を最適なタイミングで自動的に行う制御）の貢献も決して小さくない。そこで、本稿では「エネファーム」の最適運転制御の考え方について説明する。

## 2. 「エネファーム」の基本構成と機能

「エネファーム」の最適運転制御について述べる前に、「エネファーム」の基本構成と機能について紹介しておく。図1は「エネファーム」の基本構成を示したものである。通常、「エネファーム」は、燃料電池ユニットと貯湯ユニットのふたつのユニットから構成され、これらの間は、熱回収ラインおよび通信線で接続されている。参考のため、図2に「エネファーム」の外観例、表1に「エネファーム」の仕様例（いずれも、東京ガス2009年度発売モデル）を示す。

いせき たかや

東京ガス㈱ 技術開発本部商品開発部  
〒116-0003 荒川区南千住3-13-1

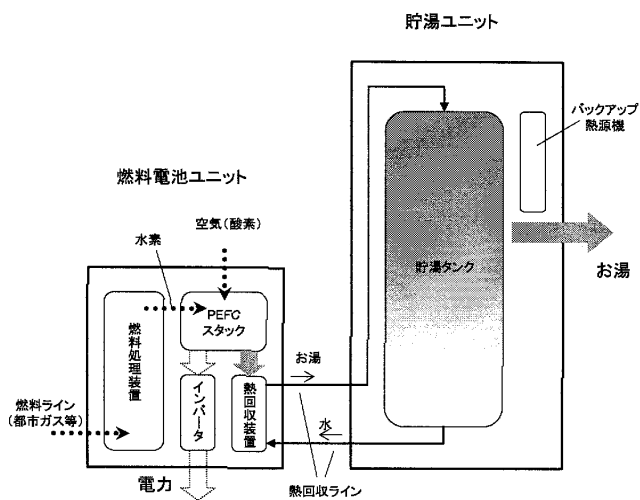


図1 「エネファーム」の基本構成

力に変換されたのち、家庭へ供給される。一方、電力と同時に発生した熱は、熱回収装置内にて熱回収ラインの水を温めるのに使われる。なお、燃料電池ユニットは、家庭の電力需要にあわせて発電電力を一定の範囲内で変化させること（電力負荷追従）ができる。ここで、家庭の電力需要に比べて発電電力が不足する場合は、不足分は商用電力系統から購入する電力で補われることになる。一方、家庭の電力需要が急減するなどして、一時的に発電電力が余剰になった場合には、余剰電力ヒータ（逆潮流防止ヒータ）によって、余剰分は熱（お湯）に変えられる。

一方、貯湯ユニットは、貯湯タンク、バックアップ熱源機（給湯器）などから構成される。貯湯タンクは、燃料電池ユニットから熱回収ラインを介して送られてきたお湯を蓄えるものであり、このお湯は家庭の給湯に利用される。なお、バックアップ熱源機（給湯器）が搭載されているので、お湯が蓄えられていない状態でも給湯が可能である。

パナソニック株式会社製

荏原パワード株式会社製

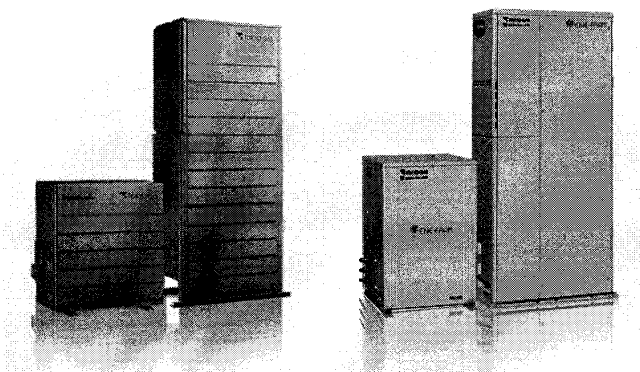


図2 エネファーム外観（東京ガス2009年度発売モデル）

表1 エネファーム仕様（東京ガス2009年度発売モデル）

		パナソニック製	荏原パワード製
定格発電容量		1.0 kW	
電力負荷追従範囲		0.3～1.0 kW	
発電効率（定格）		33%（HHV）以上、37%（LHV）以上	
熱回収効率（定格）		47%（HHV）以上、52%（LHV）以上	
熱回収温度		60℃以上	
貯湯タンク容量		200 リットル	
燃料		都市ガス13A	
燃料電池ユニット	寸法	780W×400D×860H (mm)	600W×450D×900H (mm)
	質量	125 kg	120 kg
貯湯ユニット	寸法	750W×480W×1,883H (mm)	800W×450D×1,840H (mm)
	質量	125 kg	140 kg
発売予定日		2009年5月1日	2009年7月1日
価格（本体+リモコン）		3,465,000円（税込）	3,465,000円（税込）

燃料電池ユニットは、燃料処理装置、PEFCスタック、インバータ、熱回収装置などから構成される。燃料処理装置は、燃料（都市ガスなど）を水素に改質するものであり、ここで得られた水素は、空気とともにPEFCスタックに導入される。PEFCスタックでは、水素と（空気中の）酸素との電気化学反応により直流電力を発生するが、この電力は、インバータで交流電

### 3. 最適運転制御

「エネファーム」は、分散型発電によるコージェネレーションシステムの一つであり、その潜在的なエネルギー利用効率は非常に高い。例えば、図3に示すように、従来システム（火力発電所+送電線）の1次エネルギー利用効率が約37%（HHV）であるのに対し、「エネファーム」の潜在的な1次エネルギー利用効率は、電力と熱（給湯）をあわせて、約80%（HHV）にも達する（東京ガス2009年度発売モデルの場合）。ただし、実際に「エネファーム」に高いエネルギー利用効率を実現させるためには、最適運転制御が重要になってくる。現状、「エネファーム」の最適運転制御は、①熱主電従運転、②需要予測、③運転計画という3つの要素に基づいている。以下に、それぞれの要素の考え方を説明する。

#### ① 熱主電従運転

「エネファーム」は、最適運転制御により、給湯需要にあわせた運転（熱主電従運転）を行っている。すなわち、熱（お湯）を必要な分だけ貯めるような発電を行い、必要な熱（お湯）を貯め終わったら、電力需要があっても発電しない。このような運転を行う理由は、一般的な家庭では電力需要よりも給湯需要の方が小さいのに対し、「エネファーム」の発生する電力と熱では、熱の方が大きいからである。仮に、電力需要にあわせた運転（電主熱従運転）を行ったとすると、

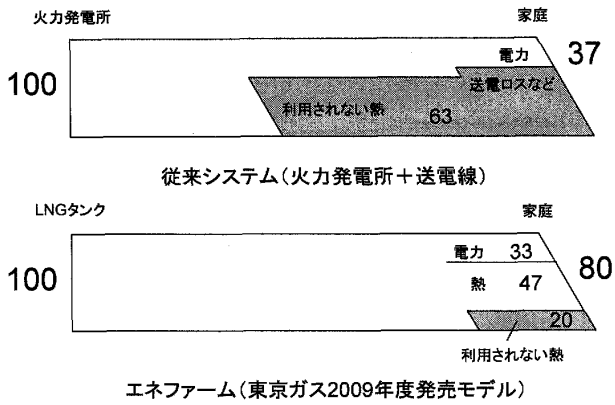


図3 従来型システムとエネファームの1次エネルギー利用効率 (HHV 基準)

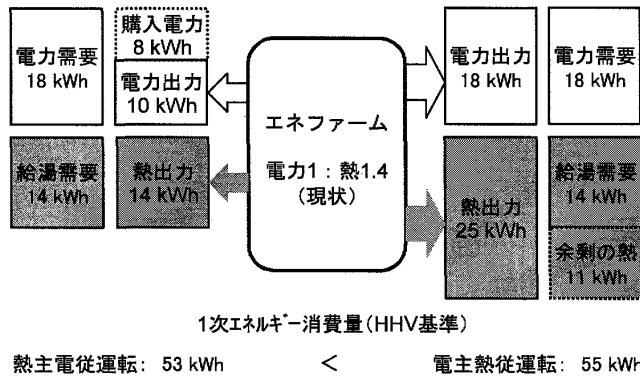


図4 熱主電従運転と電主熱従運転の1次エネルギー消費量比較

「エネファーム」は余剰の熱（お湯）を作ることになる。この熱は利用されことなく放熱により失われるので、エネルギー利用効率を下げてしまうことになる。

図4に、熱主電従運転と電主熱従運転の1次エネルギー消費量を比較した試算結果を示す。この試算では、1日の給湯需要が14 kWh (=50 MJ)、電力需要が18 kWhの家庭を想定しており、「エネファーム」の発電効率と熱回収効率をそれぞれ33%と47%、購入電力の1次エネルギー利用効率は37%（いずれもHHV）として試算した。試算の結果、1次エネルギー消費量（HHV）は、熱主電従運転の場合が53 kWh、電主熱従運転の場合が55 kWhとなり、熱主電従運転の方が2 kWhだけ省エネルギー性能が高い。ちなみに、従来システム（購入電力+従来型ガス給湯器（効率75%HHV））の場合、同じ需要に対する1次エネルギー消費量（HHV）は、67 kWhである。

② 需要予測

「エネファーム」の最適運転制御では、過去の給湯・電力需要データ、現在の気温・水温データなどが

ら、未来の給湯・電力需要を予測している。これは、「エネファーム」は、給湯利用される熱量（貯湯量）を給湯利用される前に貯めておかなければならないからである。なお、家庭の給湯・電力需要は、工場などの場合と比べ日ごとの変化に富んでおり、これを予測することは難易度が高い。

「エネファーム」の具体的な需要予測のアルゴリズムは、エネルギー事業者やシステムメーカーごとに異なっているが、ここでは、東京ガス㈱が開発し、同社が販売する「エネファーム」（2005～2007年度発売モデル）に搭載された、需要予測アルゴリズム[5]について紹介する。この需要予測アルゴリズムは、予測の方法として「事例ベース推論」を採用している。具体的には、過去の3カ月間で現在と同じ曜日かつ同じ時間帯の需要データおよび気温データのなかから現在のデータに最も近いデータを有する日時を選び、選んだ日時から24時間先までの需要データを、現在から24時間先までの予測需要データとしている。

③ 運転計画

「エネファーム」の最適運転制御では、予測した給湯・電力需要データに対して最適な運転計画を立て、この運転計画に従って、起動・停止のタイミングを決定している。通常、最適化の目的関数としては、1次エネルギー消費量、CO<sub>2</sub>排出量、電力+燃料の購入コストなどが設定される。「エネファーム」には、表2に示すように、運転計画に影響を与えるいくつかの特徴があるため、結果的に同じ熱量（貯湯量）を貯めるとしても、起動・停止のタイミングによってはエネルギー利用効率が高くなる場合と低くなる場合がある。

「エネファーム」の具体的な運転計画のアルゴリズムは、エネルギー事業者やシステムメーカーごとに異なっているが、ここでは、東京ガス㈱が開発し、同社が販売する「エネファーム」（2005～2007年度発売モデル）に搭載された、運転計画アルゴリズム[5]について紹介する。この運転計画アルゴリズムでは、予測された給湯需要・電力需要に対し、24時間先までの1次エネルギー消費量をできるだけ小さくするような起動・停止の組み合わせを決定するものであり、正時ごとに運転計画を更新する。具体的には、起動・停止それぞれを1時間単位で走査し、起動がない（発電開始しない）場合、停止がない（連続発電する）場合も含めて、最も1次エネルギー消費量が少ない起動・停止の組み合わせを運転計画として採用している。

図5に、運転計画なし/ありによる起動・停止タイ

表2 運転計画に影響を与える「エネファーム」の特徴

エネファームの特徴	運転計画への影響
給湯利用される前に熱量（お湯）を、貯めておく必要がある。	給湯利用の直前に、必要十分な熱量（お湯）が貯まっている運転が望ましい。（早く貯めすぎると放熱ロスが生じる。）
定格出力付近で効率がが高く、低負荷領域で効率が下がる。	電力需要の大きい時間帯に発電する運転が望ましい。
起動してから発電開始するまでに一定の時間とエネルギーを要する。	一度の発電で熱（お湯）をためる運転が望ましい。（何度も起動停止を繰り返す運転はエネルギーロスが大きい。）
貯湯タンクが満量になると、発電を停止せざるを得ない。（システムによっては、ラジエータで熱を廃棄しながら発電を継続する。）	貯湯タンクが満量になる直前に、給湯利用があるような運転が望ましい。

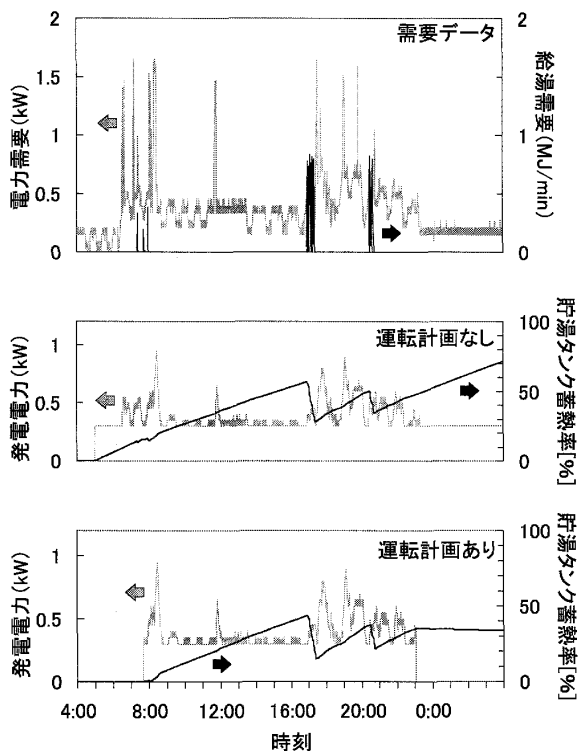


図5 運転計画なし/ありによる起動・停止タイミングの違い

ミングの違い（シミュレーション結果）を示す。このシミュレーションでは、初期状態（4時）での貯湯タンク蓄熱率を0%に設定し、与えられた給湯需要・電力需要（図5上段）に対し、翌日4時まで24時間の発電状況・貯湯タンク蓄熱状況を運転計画なしの場合（図5中段）と、運転計画ありの場合（図5下段）で比較した。ここで、運転計画なしの場合は、貯湯量が一定値以下になれば起動し、一定値以上になれば発電停止するような運転（成り行き運転）を想定しているが、この運転では、初期状態からすぐ起動して5時ご

ろに発電を開始し、翌日4時になっても発電を継続している。一方、運転計画ありの場合は、東京ガス㈱が開発した運転計画アルゴリズムを想定しており、この運転では、8時前に発電を開始し、23時ごろに発電を停止している。いずれの場合も、主要な給湯需要（17時台、20時台）は貯湯タンクのお湯で賄えているが、運転計画なしの場合には熱（お湯）を作りすぎているのに対し、運転計画ありの場合は、必要十分な熱（お湯）を作って発電停止しており、運転計画ありの方が、エネルギー利用効率の高い運転ができていることがわかる。

#### 4. おわりに

本格普及が始まりつつある家庭用燃料電池コージェネレーションシステムの基本構成と機能を紹介するとともに、①熱主電従運転、②需要予測、③運転計画の3要素からなる最適運転制御について説明した。現在のシステムは、この最適運転制御により高いエネルギー利用効率を実現されているが、将来のシステムでは、複数システムがおたがいに電力および熱を融通しあうような制御（複数台最適運転制御）を行うことで、全体としてさらに高いエネルギー効率を実現できると考えている。

#### 参考文献

- [1] 新エネルギー財団「平成17年度定置用燃料電池大規模実証事業報告会」資料, 2006.  
<http://happyfc.nef.or.jp/progress.html#d>
- [2] 新エネルギー財団「平成18年度定置用燃料電池大規模実証事業報告会」資料, 2007.  
<http://happyfc.nef.or.jp/progress.html#d>
- [3] 新エネルギー財団「平成19年度定置用燃料電池大規模実証事業報告会」資料, 2008.  
<http://happyfc.nef.or.jp/progress.html#d>
- [4] 新エネルギー財団「平成20年度定置用燃料電池大規模実証事業報告会」資料, 2009.  
<http://happyfc.nef.or.jp/progress.html#d>
- [5] T. Iseki and T. Bessho: "Operation Control and Operating Results of PEMFC Residential Cogeneration System," Abstracts for Oral Presentations, 2007 Fuel Cell Seminar and Exposition (San Antonio) (2007) 277-280.