Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-07-02

燃料電池を用いた家庭用コージェネレーションシステムに関する研究

前田，和茂

(Degree)
博士（工学）
(Date of Degree)
2010-09-25
(Date of Publication)
2011-02-18
(Resource Type)
doctoral thesis
(Report Number)
甲5067
(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1005067

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。

博士論文

燃料電池を用いた
家庭用コージェネレーションシステムに関する研究

平成 22 年 7 月

神戸大学大学院工学研究科

前田和茂

内容梗概

本論文は、家庭におけるエネルギー消費量と CO_2 排出量の削減という観点から、代表的な家庭用エネルギー供給システムの比較評価を行い、その中で特にシステムの導入効果が高いと考えられる家庭用 PEFC（Polymer Electrolyte Fuel Cell）コージェネレーションシステムを取り上げ、その最適な構成、運転制御方法に関する研究をまとめたものである。

第 1 章では、本研究の背景となる最近の家庭用 PEFC コージェネレーションシステムに関する状況を述べ、本研究の目的を示した。

第 2 章では、日本におけるエネルギー需要と CO_2 排出量に関する状況分析を行うことで、課題とその解決策の方向性を示し、本論文で評価対象とする家庭でのエネルギー需要データについて考察を加えた。

日本国内のエネルギー消費量と CO_2 排出量は年々増加しており、部門別でみると家庭部門の増加が著しい。家庭部門における課題は、動力用として消費される電力に起因することがわかった。これらのことから、家庭部門での電力消費による一次エネルギーと CO_2 排出量の削減に効果があると期待されている家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの導入が、対策として効果的である可能性があるとの結論を得た。

第 3 章では、家庭用エネルギーシステムを比較評価し、それぞれのシステムの導入効果を明確にした。

商用電力と従来型ガス給湯器による従来システムを基準に置き、潜熱回収型給湯器、自然冷媒ヒートポンプ式給湯器、家庭用 PEFC コージェネレーションシステムを実際の需要データを用いて比較評価を行った。自然冷媒ヒートポンプ式給湯器については、深夜電力時間帯を主な運転時間帯に設定する運転、家庭用 PEFC コージェネレーションシステムについては、Daily Start and Stop（DSS）運転を適用した。潜熱回収型給湯器は 3 システム中、最も削減量が小さくなった。一次エネルギー削減に関しては自然冷媒ヒートポンプ式給湯器が家庭用 PEFC コージェネレーションシステムを上回る結果となったが、CO_2 排出削減量に関しては家庭用 PEFC コージェネレーションシステムが優位であることがわかった。

第４章では、著者らが開発した運転計画法を搭載している家庭用 PEFC コージェネレーションシステムのフィールドテスト結果を用いて、その導入効果を実運転データにより評価することで確認した。

このシステムに採用されている運転計画法では、需要予測によって連続運転である電力負荷追従運転、出力上昇運転、出力抑制運転と不連続運転が自動選択される。そこで、エネルギー需要の大小それぞれの特徴的な運転例を評価し、従来システムや電力需要追従運転と比較して優位性を有することを示した。

第５章では、第３章と第４章で明らかにした課題を解決すべく、家庭用 PEFC コージェネレーションシステムに関し、その導入効果を最大化するシステム設計、運転方法を提案、評価した。

運転計画周期とその運転評価期間を 24 時間に固定する DSS 運転計画法に対して、運転計画周期とその運転計画を評価する評価期間を 24 時間に加えて 48 時間とする新たな運転計画法の適用により、導入効果を大幅に向上ができることを示した。

また、出力上昇運転は、部分負荷効率が低いシステムでは有効であり、出力抑制運転は起動損失が大きいシステムでは有効であったが、PEFC の技術開発に伴い、その重要性が薄まった。そこで、出力上昇運転の考え方を発展させ、蓄電池導入によりさらに導入効果の向上が可能であることを示した。

第６章では、集合住宅に対する PEFC コージェネレーションシステムの適用例を示し、その導入効果について評価を行った。

集合住宅では PEFC システムが高密度で多数台設置される。また、システムの一層の小型化が要求される。そこで、外部から水素を供給して運転する水素駆動の PEFC コージェネレーションシステムを提案し、その特徴を生かし、電力融通による住棟全体での一次エネルギー削減を図る運転計画法を提案、実証、評価した。

第７章では、本研究で得られた成果の総括を行った。

目次

1. 緒論 1

2. 日本国内の家庭部門におけるエネルギー需要 8

2.1. 緒言 8

2.2. 日本国内のエネルギー消費量と CO_2 排出量 8

2.3. 家庭部門の需要家分布 １２

2.4. 結言 １５

3. 家庭用エネルギー供給システムの評価 １６

3.1. 緒言 １６

3.2. 従来の家庭用エネルギー供給システム １７

3.3. 家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの導入効果 ３１

3.4. 結言 ４３

4. 家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの実運用結果の評価 ４４

4.1. 緒言 ４４

4.2. 評価対象とする家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの特徴 ４５

4.3. 熱の需給を考慮した新たな運転計画法 ４６

4.4. 実運転結果の評価 ５０

4.5. 結言 ５８

5. 家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの改善 ５９

5.1. 緒言 ５９

5.2. 運転計画法の改善によるシステム導入効果の向上 ６０

5.3.　蓄電池の搭載によるシステム導入効果の向上 ７１

5.4.　結言 ８３

6.　集合住宅への家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの適用 ８４

6.1.　緒言 ８４

6.2.　集合住宅用エネルギーシステム ８５

6.3.　集合住宅用水素 PEFC コージェネレーションシステムの運転計画法 ８７

6.4.　集合住宅での実証 ９３

6.5.　結言 ９８

7.　結論 ９９

付録１　定数・記号一覧 １０１

付録２　データの形式について １０３

謝辞 １０５

参考文献 １０６

研究業績一覧 １１１

1. 緒論

2009 年 6 月、日本国政府は温室効果ガス排出削減中期目標として 2020 年までに 2005 年比 15 %減という目標を設定した。その後の政権交代に伴い、民主党・国民新党・社民党の連立政権により、同年 9 月には排出枠取引等も含めて 1990 年比 25 %減という新たな目標を掲げた。低炭素社会に向けた取り組みは、新たな局面を迎えつつある。しかし、現時点まで CO_2 排出量の減少効果は表れておらず、目標の達成は極めて難しいと言わざるを得ない(1)(2)。

そのような状況の下、家庭用固体高分子形燃料電池（PEFC：Polymer Electrolyte Fuel Cell）コージェネレーションシステムが、家庭部門の CO_2 削減に大きな効果を発揮する分散電源システムとして期待されている。

家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの市場導入は、2005 年から新エネルギー財団により行われている「定置用燃料電池大規模実証事業」(3)(4)で国家プロジェクトとして実施されてきており、2008 年度にはこの事業での新規サイト募集は終了し、2009 年度からは世界に先駆けてエネファームの商品名で販売が開始された。家庭用 PEFC コージェネレーションシステムは、普及段階に入ったと言える。

PEFC を初めとする燃料電池に関する技術開発については、例えば、第 171 回国会（平成 21 年通常国会）に民主党が提出した「地球温暖化対策基本法案」第 17 条に太陽光や風力の新エネルギー等とともに、燃料電池を温室効果ガスの排出の抑制に資する革新的な技術の開発を促進し、環境保護、経済成長及びエネルギーの分野における安全保障に資する社会基盤を確立するために必要な技術と位置付けられており、今後も引き続き、国の方針として燃料電池に関する技術開発が強力に推進される。

家庭用のエネルギー供給システムとしては、省エネルギー、省 CO_2 の目的で潜熱回収型給湯器、ガスエンジン給湯器（家庭用ガスエンジンコージェネレーションシステム）、自然冷媒ヒートポンプ式給湯器等の高効率給湯器の導入が、家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの導入に先立って、補助金等の施策のもとに進められてきた。

さらには、新エネルギー財団により実証研究事業として固体酸化物形燃料電池（SOFC：Solid Oxide Fuel Cell）コージェネレーションシステムの導入が開始され始めている。

しかしながら、家庭用エネルギー供給システムの中で家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの導入効果については、大規模実証事業での成果報告(3)(4)をはじめ、様々に行われてきたが、システム構成を考慮に入れたものや、その他の省エネルギーシステムとの比較検討により一次エネルギー並びに CO_2 排出量の削減効果について総合的に評価がなされた報告は多くない。

そこで本論文では、商用電力と都市ガス瞬間式給湯器による従来のエネルギー供給システムと、自然冷媒ヒートポンプ式給湯器、家庭用 PEFC コージェネレーションシステムのそれぞれについてシミュレーションモデルを提示し、エネルギー需要データを用いたシミュレーションにより、一次エネルギー並びに CO_2 排出削減量の評価を行う。

本論文で使用するエネルギー需要データは、大阪ガスが家庭用ガスエンジンコージェネレーションシステムの開発にあたり、フィールドテストを行った時に取得したものの内、データ欠損等が少なく、前後のデータから欠損の補完が可能であったものである。27 の需要家の連続した 365 日の電力需要、給湯需要と水温が 1 分毎に記録されている。

従って、本論文で評価対象とする需要家は、大阪ガスの供給地域であり、家庭用コージェネレーションシステムを設置できるだけの敷地面積を有することになる。関西地域は、気候的には日本国内では平均的な地域と考えられるので、このデータによれば日本国内の平均的な評価ができると考えられる。

図 1.1 に家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの基本構成を示す。

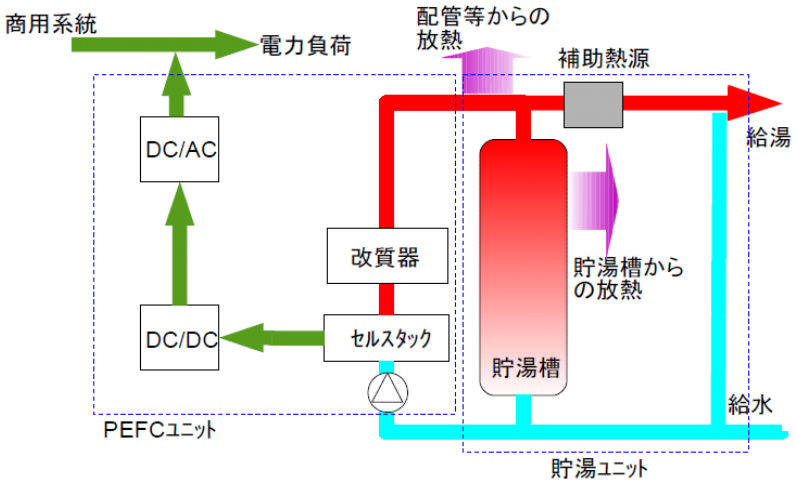


図 1.1　家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの基本構成

システムはPEFCユニットと貯湯ユニットの2つのサブシステムから構成されている。都市ガス等の外部から供給される原燃料を改質器で水素が主成分のガスに改質する。改質ガスは、MEA（Membrane Electrode Assembly）で空気中の酸素と反応し、電力が発生する。発生した電力はコンバーター・インバーターで電力変換され商用系統に連係される。この電力は、商用電力に優先して需要家の電力負荷へ供給されることになる。

通常、発電電力は定格出力と最小出力の間で電力需要の大きさに追従するように制御されるが、追従遅れ等の原因で完全には一致しない。また、電力需要が最小出力を下回る場合、余剰電力は商用系統側に逆潮流することになる。逆潮流への対応は電力事業者によって程度の差はあるものの基本的には認められない。従って、潮流を監視し、余剰電力を処理するシステムが別途必要となる。

改質器とセルスタックでは排熱が発生するので、これを回収し、貯湯ユニットにある貯湯槽に温水として蓄える。先述の余剰電力処理装置がヒーターによるものの場合は、ヒーターで発生した熱も排熱と一緒に回収される。温水の温度は概ね60 ℃前後になるように流量制御される。

貯湯槽が温水で満蓄状態になると、冷却水を確保することができなくなるので運転継続できず停止せざるを得ない。停止させずに運転継続させたい場合は、ラジエータ等を併設し、冷却水を確保できるようにする必要がある。

貯湯槽に蓄えられた温水は、水道水を混ぜることによって所望の温度に制御し、給湯需要に合わせて供給される。貯湯槽内の温水の温度が低く、所望の温度に満たない場合は、補助熱源器により加熱し、適切な温度に制御される。

コージェネレーションシステムはその名前の通り、電力と熱がシステムから併給され、それぞれを独立して設定することができない。加えて、PEFCの発電効率は商用電力の発電効率よりも低いので、発生する電力と熱を有効利用しないと省エネルギーにはならない。しかし、海外の研究[5][6]では、発電所効率が日本と比べて低いことや商用系統との非連係独立のシステムも想定されること等によると思われるが、排熱を利用しないシステムが提案されており、PEFCの特性を考慮したシステムとは言い難い。

日本国内であっても、初期の家庭用PEFCコージェネレーションシステムは、電力需要を賄うことが第1として考えられていたため、単に電力需要を賄うように電力負荷追従運転し、例えば、電力需要の小さな状態が一定時間継続したり、貯湯槽満蓄状態にな

ったりした場合に停止し、貯湯槽の湯が使われ、電力需要がある程度の大きさ有る場合に再起動するといった程度の運転制御が行われているだけであった。

研究開発が進捗し、需要予測に基づいた DSS（Daily Start and Stop）運転が採用されるようになった[(7)(8)]。即ち、1 日の電力需要と給湯需要を予測し、予測した電力需要に追従して発電した結果、予測した給湯需要を賄うだけの排熱が回収できるような運転時間帯を求めるような運転計画法である。

しかし、図 1.2 に示す PEFC の起動特性からもわかるように、PEFC の起動、厳密には改質器の起動には、高温の反応温度まで昇温する必要があり、比較的大きなエネルギーが必要となる。従って、1 日に 1 回、必ず起動停止することが適切ではない場合があることは容易に想像できる。また、1 日の運転周期の最後に大きな給湯需要があるということを DSS 運転では前提としているが、必ずしもそうではない。

そこで、それらの課題に着目した研究[(10)~(13)]もなされてきた。

家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの運転計画を立案する上では、家庭のエネルギー需要を精度よく予測することは重要であるが、その予測手法については本論文では扱わない。

文献(10)~(13)に示される運転計画法は、熱の需給に合わせて発電電力を制御する運転方法、即ち、排熱が余剰になる場合は、発電電力を抑制し、排熱が不足する場合は発電電力を電力負荷よりも大きく設定する運転が取り入れられている点と、熱の余剰が大きい時に適用される不連続運転での運転計画の周期を 1 日以上の長期に拡張することを一部取り入れている点である。

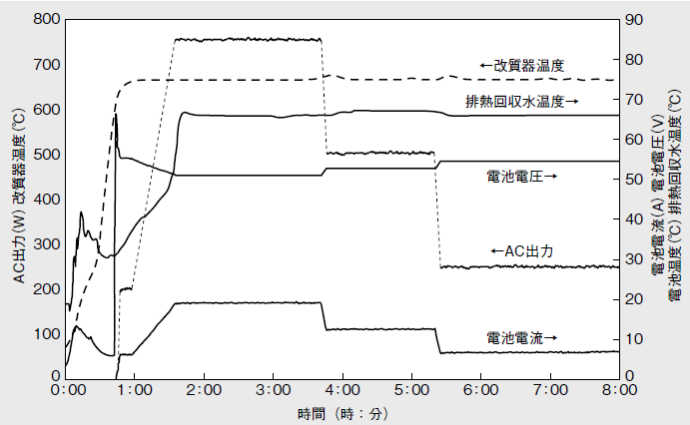


図 1.2　PEFC の起動・運転特性例（参考文献(9)より引用）

熱の需給に合わせて発電電力を制御することは、例えば、出力を抑制する運転では起動損失が大きいという前提があり、起動停止によるシステムの信頼性低下を軽減するという目的もあった。また、出力上昇による運転は PEFC の部分負荷効率が低いという前提があった。

しかし、PEFC の研究開発の進捗により、起動損失は小さくなりつつあり、部分負荷効率は改善され、信頼性低下も解決されてきた。これらのことから、熱の需給に合わせて発電電力を制御する運転計画法の優位性は薄れつつある。また、ここで提案されている運転計画法には 24 時間以上の長周期で運転計画を行う考え方を取り入れていたものの、発電する時間帯を最初の 24 時間の一部に制限するという不完全な手法であった。

本論文では、そのれらの問題点を解決し、48 時間を運転計画の周期としながら 24 時間の運転計画周期を内包する新たな運転計画方法を提案する(14)。

また、従来、PEFC システムの導入効果を向上させる目的で蓄電池や電気 2 重層キャパシタを適用する提案がされているが、運転計画にまでには十分言及されていない(15)(16)。

先に述べた、発電電力を電力需要よりも大きく設定する出力上昇による運転では、余剰電力をヒーターで熱に変換し、不足する排熱を補うことで給湯需要を賄うようにした。しかし、発電電力を電力需要よりも大きく設定するが、給湯需要は出力を上昇させることで増加した排熱でのみ賄い、余剰電力を蓄電するような運転計画法を適用すれば、さらなる省エネルギーと省 CO_2 を達成することができると考えられる。

本論文では、蓄電池を用いた熱主の運転計画方法を提案し、その効果を評価する。

日本国内の家庭部門における需要家数は、集合住宅の占める割合は大きいが、家庭用 PEFC コージェネレーションシステムは先述したように、設置スペースがある程度必要で、集合住宅への設置は難しい。しかし、文献(17)(18)では、家庭用 PEFC コージェネレーションシステムを集合住宅へ適用するための研究、提案がされている。

集合住宅に家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの適用する場合の運転計画法に関しては、文献(8)(19)等の提案があり、集合住宅ではないが比較的密集した戸建て住宅を想定している文献(20)で示されるものがある。

文献(8)で示される運転計画法はDSS運転が適しているという前提のもと考察されているため、PEFCコージェネレーションシステムを個別設置するよりも大型のものを集中設置する方がよいという他の文献と異なった結論を得ている。

文献(19)では、住戸間での電力融通を想定しながら、コストとCO_2排出量を目的関数としてそれらが両立する最適解を求めている。最適解を求めると計算量が膨大となるため、実システムに適用する場合には、計算量が大きな障害なると懸念される。また、コストについては原燃料を供給する事業者の施策が大きく影響するため普遍性がなく、また、原油高騰等の情勢に大きく左右されてしまうことも課題である。

文献(20)に示される運転計画法は、複数の需要家で改質器、水素駆動PEFC（改質器を内蔵しないPEFC）を共用し、相互間で電力と熱を融通することを前提としている。この提案でも最適化の目的関数をコストとCO_2排出量としている。この手法についても、文献(19)と同じ懸念が残る。また、熱融通を含めると初期の設備投資が大きくなることは実用化を困難にする。

本論文では、起動停止に関する制約がほとんどない水素駆動のPEFCによる電力融通を前提とする運転計画法を提案する。具体的には運転計画の対処となる単位時間毎の一次エネルギーを全ての需要家に対して求め、その値が優れた出力から順に選択、決定する手法を提案している。

本論文で示す内容は以下の通りである。

第2章では、日本国内のエネルギー消費とCO_2排出量を分析することにより、家庭部門に対して何らかの対策が必要であることを示す。加えて、本論文での評価に用いる需要家毎のエネルギー需要を新エネルギー財団が実施した定置用燃料電池大規模実証事業で得られた需要家のエネルギー需要と比較して乖離がないことを示す。

第3章では、従来の家庭用エネルギー供給システムとして、商用電力と従来型瞬間式ガス給湯器、高効率給湯器として潜熱回収型ガス給湯器、自然冷媒ヒートポンプ式給湯器、そして家庭用PEFCコージェネレーションシステムのそれぞれのシミュレーションモデルを提示し、家庭用PEFCコージェネレーションシステムの運転計画法としてDSS運転を採用した場合について、一次エネルギー消費量とCO_2排出量について評価を加える。特に、家庭用PEFCコージェネレーションシステムについては、機器構成の違いによるシステム導入効果の比較評価を行う。

第 4 章では、文献(10)~(13)に示される運転計画法を採用した家庭用 PEFC コージェネレーションシステムにより実施されたフィールドテスト結果を評価し、その有効性を示す。

第 5 章では、第 3 章で評価に用いた運転計画法である DSS 運転の問題点を指摘し、その問題点を解決した、少ない計算量でありながら 48 時間の長期間で運転計画を評価することで、より適切な運転計画が実現できる運転計画方法を提案し、家庭用 PEFC コージェネレーションシステムは一次エネルギーと CO_2 排出量に関して高い削減能力を有することを示す。

さらに、家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの導入効果を向上させるため、蓄電池のシステムへの搭載と、その蓄電池の導入効果を向上させる運転計画法を提案し、一次エネルギーと CO_2 排出量の削減能力がさらに向上させることが可能であることを示す。

第 6 章では、現状の家庭用 PEFC コージェネレーションシステムでは設置が困難な集合住宅への家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの導入を想定し、水素駆動の PEFC コージェネレーションシステムの適用により、需要家間の電力融通実現する運転計画法を提案し、その効果を評価、実証する。

第 7 章では、本研究で得られた成果を総括する。

2. 日本国内の家庭部門におけるエネルギー需要

2.1. 緒言

本章では、統計資料等をもとに、日本国内でのエネルギー消費量と CO_2 排出量の経年的変化を部門別に分析することで、解決されるべき課題が家庭部門にあることを明らかにし、有効な対策手段についての方向性を示す。

また、高効率の家庭用エネルギー供給システムの導入対象となる需要家を明確にし、その分布を推定する。

2.2. 日本国内のエネルギー消費量と CO_2 排出量

日本国内での省エネルギー、CO_2 排出量削減の努力は様々な方面で継続して行われている。図 2.1 に部門別 CO_2 排出量の推移を示す。1990 年度比では、CO_2 排出量はほとんどの部門で増加しているが、近年に限ると概ね横ばいか減少傾向で推移している。しかし、例外的にエネルギー転換部門では増加が著しい。このエネルギー転換部門で転換されたエネルギーを最終的に消費した部門に配分して評価しないと、課題が明確とならず対策立案ができない。

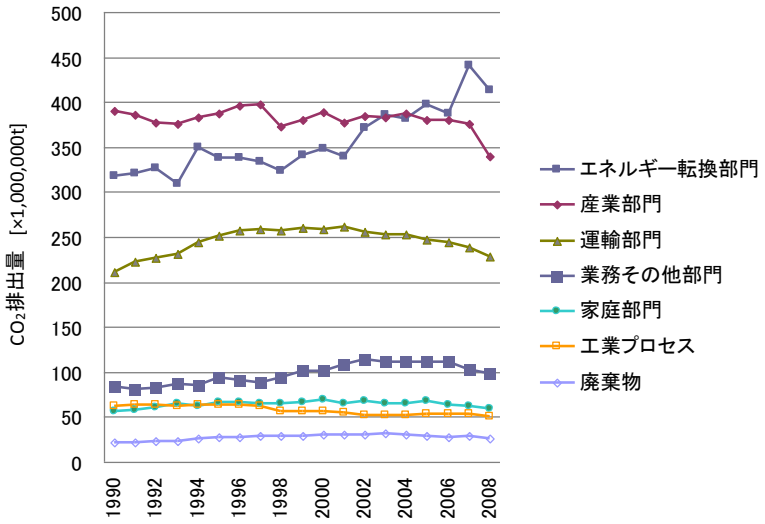


図 2.1 部門別 CO_2 排出量の推移
（国立環境研究所のデータをもとに作成）

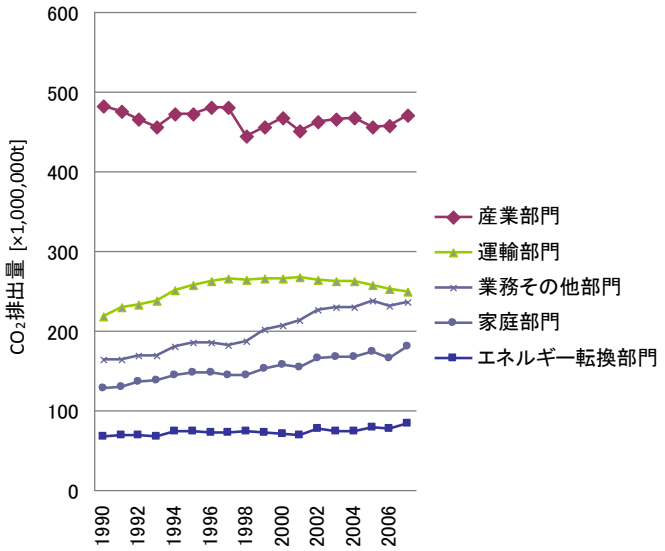


図 2.2　エネルギー起源 CO_2 排出量
（環境省　平成 22 年版環境統計集をもとに作成）

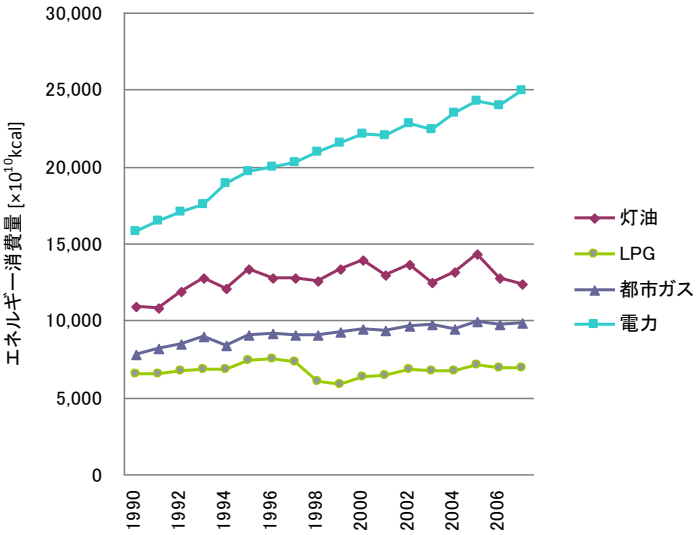


図 2.3　エネルギー源別家庭部門エネルギー消費量
（環境省　平成 22 年版環境統計集をもとに作成）

図 2.2 に各部門でのエネルギー起源の CO_2 排出量を示す。エネルギー起源の CO_2 排出量は、特に業務その他部門と家庭部門で増加傾向にあり、何らかの対策が必要であることがわかる。

業務その他部門は、卸小売り、事務所ビル、官公庁、ホテル等がその大部分を占める。この部門は、他の部門に当てはまらないものが全て含まれているため、1 つの部門とし

て課題抽出、対策立案するには馴染まない。そこで、本論文では、家庭部門での CO_2 排出量増加が現時点で解決すべき大きな課題の１つとして捉えることにする。

図 2.3 にエネルギー源別の家庭内でのエネルギー消費量の推移を示す。CO_2 排出量と同様、家庭部門ではエネルギー消費量が増加傾向にあり、省エネルギーへの取り組みが CO_2 排出量削減と同じく必要であることがわかる。また、その内訳では電力消費の増加が著しく、この電力消費の増加に如何に対応するのかが最大の課題であることがわかる。

家庭での電力エネルギーの消費は、エネルギー消費量を抑制する直接的な方法、例えば、従来よりも消費電力の少ない家電製品に交換する、こまめに電源を切る等の方法や、消費電力や CO_2 排出量を機器に表示することで「見える化」を図り、エネルギーの節約を促す方法等がある。しかし、これらは消極的な対策であり、その有効性は生活者の態度次第となる。それとは別に、最終的に使用できるエネルギー（二次エネルギー）量は従来のままであっても、そのエネルギーを得るために必要なエネルギー、即ち、一次エネルギー量を減少させる、言い換えるとエネルギー変換効率を向上させる方法がある。

また、家庭部門で消費される灯油、LPG、都市ガスの多くは熱として消費されると予想されるため、家庭部門で消費される電力と熱を賄うために消費される一次エネルギーを削減するようなエネルギー供給システム、即ち、家庭用コージェネレーションシステムの導入が効果的であると予想される。

図 2.4 に家庭部門での世帯当たりの用途別の消費エネルギーの推移を示す。近年は動力用が最も多く、増加傾向にある。動力用の内訳は、照明・テレビ・冷蔵庫・パソコン等いわゆる空調以外の家電製品が消費するエネルギーで、電力によるものである。

動力用に次いで給湯用として消費されるエネルギーが大きい。しかし、90 年代前半は増加傾向にあったが近年は減少傾向で推移している。

厨房用、冷房用は他の用途に比べると 3 分の 1 程度にすぎない。家庭では、厨房機器や冷房機器は全時間帯の内で極短い時間しか使用されないこと等によると考えられ、家庭でのエネルギー需要を考える上で、これらはあまり重要ではないと言える。ただし、冷房用は短期間・短時間に消費のピークが集中するので、電力の需給計画を考える上では重要である。

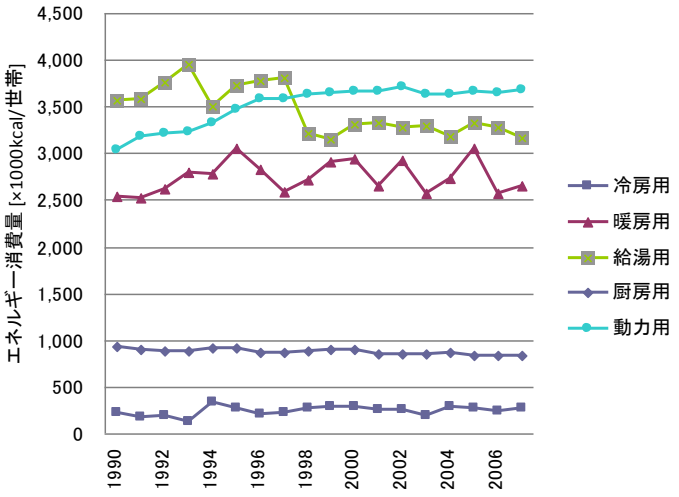


図 2.4　家庭部門世帯当たり用途別エネルギー消費量
（環境省　平成 22 年版環境統計集をもとに作成）

以上のように、統計データから浮かび上がってくるのは、家庭部門でのエネルギー消費、CO_2 排出量は単調に増加しており、全く歯止めが効いていない現状である。その主要因は家庭内での家電製品が消費する電力エネルギーが増加し続けていることであると考えられる。

図 2.4 に示されるように、動力用と給湯用、それぞれで消費されるエネルギーの大きさを二次エネルギーで評価すれば、その大きさに大差はなく、給湯用のエネルギーを減らすことが非常に重要な課題のように見える。しかし、例えば文献(3)(4)で用いられている発電所の効率 0.369、一般的なガス給湯器効率 0.78 等を用いて一次エネルギーで評価をすれば、動力用として給湯用の 2 倍以上の一次エネルギーを消費していることがわかる。従って、家庭部門では動力用として消費される一次エネルギーの削減が重要であり、給湯用として消費される一次エネルギーの削減についての優先順位は相対的に下がることになる。この観点からすると、従来進められてきた高効率給湯器の導入は、あまり的を射た対策ではなかった可能性がある。

2.3. 家庭部門の需要家分布

本論文では、自然冷媒ヒートポンプ式給湯器や家庭用 PEFC コージェネレーションシステムについて検討を加えるので、評価対象とする需要家はこれらシステムが設置可能であることが前提となる。そのため、集合住宅やいわゆる狭小住宅と呼ばれる住宅は評価対象から除外される。参考のため、図 2.5 に家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの設置に必要なスペースを示す。なお、自然冷媒ヒートポンプ式給湯器も家庭用 PEFC コージェネレーションシステムと同程度の設置スペースが必要である。

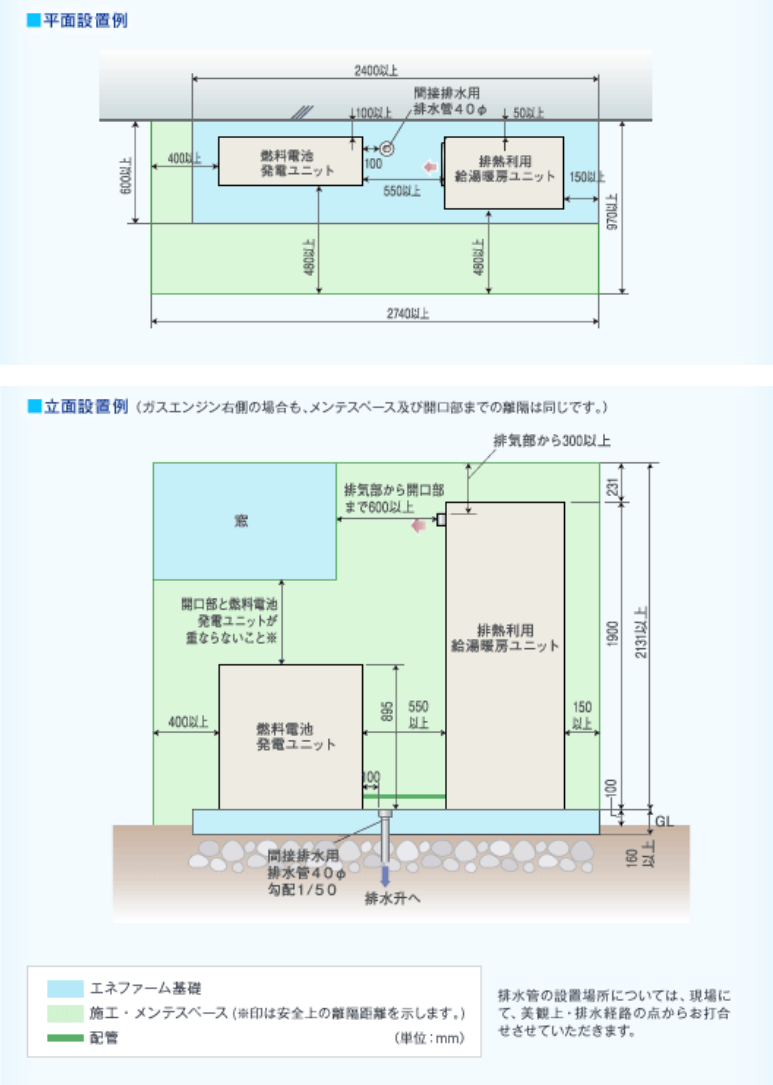


図 2.5　家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの設置例
（http://www.ene-farm.info/products/index.html　より引用）

家庭用 PEFC コージェネレーションシステムは、市場導入のために新エネルギー財団により大規模実証事業が実施されており、事業の報告書[(3)(4)]には参加した需要家のエネルギー需要の分布と平均値が示されている。表 2.1 に平成 18 年度と 19 年度の事業で得られたエネルギー需要量の平均値を、図 2.6、図 2.7 にその分布を示す。これらの中には例外的に集合住宅が極一部含まれているが、基本的には戸建て住宅で、家庭用 PEFC コージェネレーションシステムを設置できるスペースを有している。また、設置事業者として、都市ガス事業者の東京ガス、大阪ガスの占める割合が比較的高くなっているので、都市圏の住宅の割合が高いと考えられる。

平均値よりも少し需要の小さな領域に分布する需要家が多い一方、エネルギー需要が非常に大きな領域にも極少数ではあるが需要家が存在していることがわかる。

表 2.1 の値から全 889 サイトのエネルギー需要の平均値を求めると、電力需要 7.947 MWh/year、給湯需要 18.589 GJ/year という数値が得られる。

本論文で評価に用いるエネルギー需要データの分布を図 2.8 に示す。図 2.8 のデータは、大阪ガスが家庭用ガスエンジンコージェネレーションシステムの開発時に取得したもので、サンプリングタイムは 1 分、連続した 365 日で構成されている。これらの電力需要の平均は 6.11 MWh/year、給湯需要の平均は 16.7 GJ/year で母集団の標準偏差を推定して求めると 1.29 MWh、6.06 GJ であった。大規模実証事業[(3)(4)]の需要データと比べて小さな値にとどまるのは、評価用データは都市部に限定されているため住宅規模がそれほど大きくないことに起因していると考えられる。このことは、大規模実証事業の分布と比べると平均値付近に集中しており、平均値から大きく離れた需要家が存在していないことからも推測できる。

以上のことから、本論文の評価に用いる需要データは、平均から大きく乖離した特殊な需要家が存在しない点では異なるが、標準偏差の値等、全体のばらつき範囲を考慮すれば適用に問題はないと考えられる。

需要家の地域による気候の違いについては、注意する必要がある。一般的に寒冷な地域では温暖な地域と比べて、消費するエネルギーが多くなるからである。図 2.8 に示した評価用データは、経済産業省・国土交通省告示第二号別紙第 1[(21)]に記載される地域の区分においてⅣb 地区が主体（一部Ⅳa 地区とⅢ地区）で構成されており、これらの地域は全体の地域区分Ⅰ～Ⅵに対して、ほぼ中央値となる気候であり、人口も多いと考えら

れるため、この点から日本全体での平均的な評価を行うには適しているデータと考えられる。

表 2.1 定置用燃料電池大規模実証事業設置サイトのエネルギー需要平均値[(3)(4)]

年度	電力需要 [MWh/year]	給湯需要 [GJ/year]	件数
H18 年度	8.076	18.324	433
H19 年度	7.824	18.840	456
全体平均	7.947	18.589	889

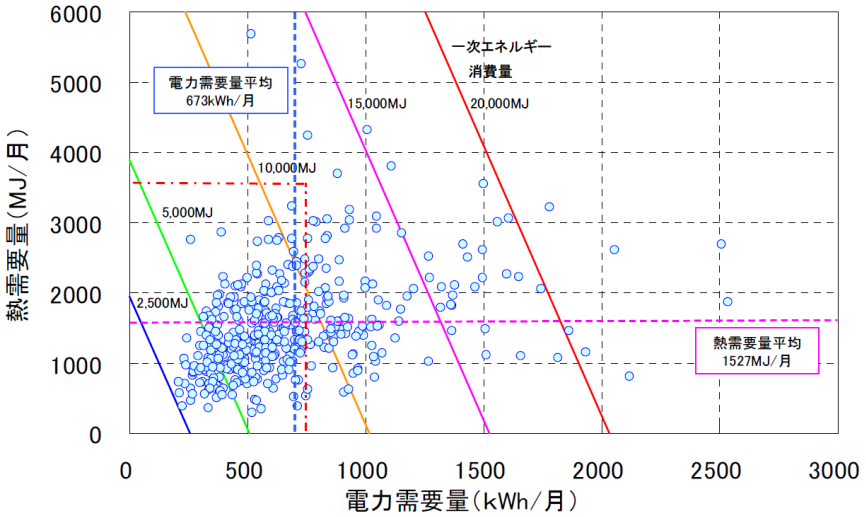


図 2.6　平成 18 年度サイトの需要分布（2007 年 1 月～2007 年 12 月の平均）
（平成 19 年度定置用燃料電池大規模実証事業報告会資料[(3)]から引用）

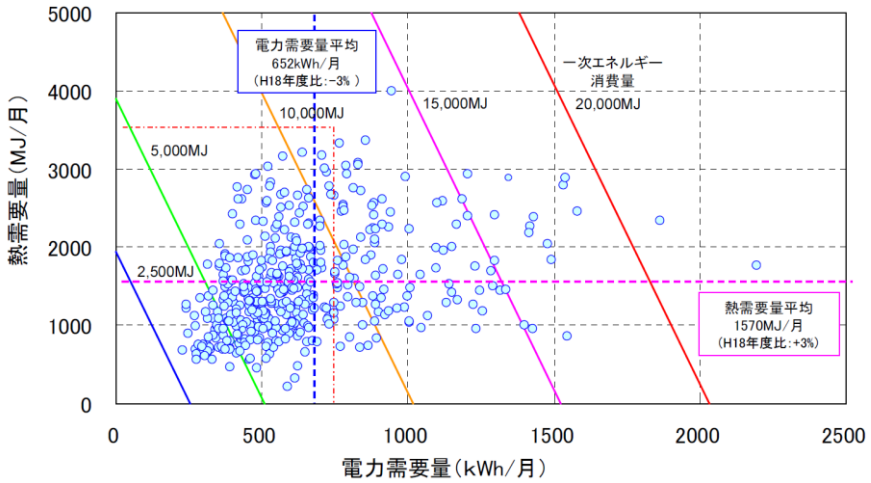


図 2.7　平成 19 年度サイトの需要分布（2008 年 1 月から 2008 年 12 月の平均）
（平成 20 年度定置用燃料電池大規模実証事業報告会資料[(4)]から引用）

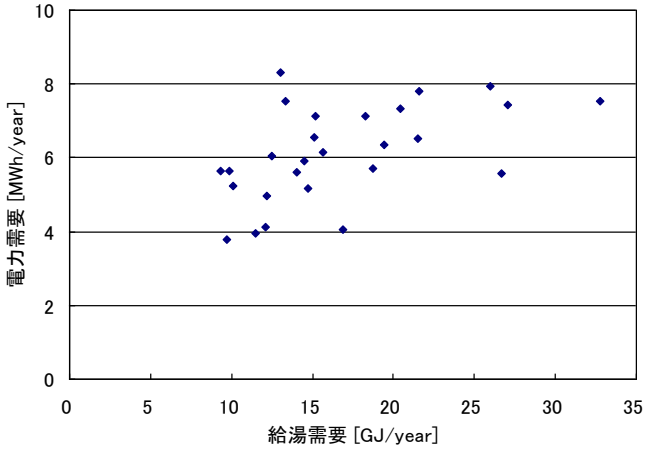


図 2.8　評価用需要データ分布

2.4.　結言

日本におけるエネルギー消費と CO_2 排出量の内訳と年次の推移を分析した結果、家庭部門については継続的な増加が確認され、何らかの対策が急務であることが明らかとなった。特に、電力消費に起因する一次エネルギーと CO_2 排出量の増加が大きく、これを如何にして削減するかということが重要な課題と考えられる。

家庭部門での二次エネルギー消費量は、動力用に次いで給湯用が多く、そのような背景もあり、高効率給湯器の普及が促進されている。しかし、一次エネルギー消費量は給湯用に比べると動力用は 2 倍以上の大きさとなる。このことから、動力用に対する対策が重要であることがわかる。

給湯用として消費される一次エネルギーと CO_2 排出量を削減するのみならず、動力用、即ち、電力のために消費される一次エネルギーと CO_2 排出量を合わせて削減することができれば、家庭部門での課題解決のための有効な手段と成り得ると考えられる。

そのような条件を満足する可能性のある家庭用エネルギー供給システムとして、家庭用 PEFC コージェネレーションシステムが期待される。次章では、家庭用 PEFC コージェネレーションシステムも含め、種々の家庭用エネルギー供給システムについて比較評価を行う。

3. 家庭用エネルギー供給システムの評価

3.1. 緒言

前章で明らかにしたように、家庭部門での一次エネルギーの消費量と CO_2 排出量を増加から減少に反転させることが最重要課題であり、それは生活者のライフスタイルを改める程度では解決できない。また、一度手にした豊かな生活を一次エネルギー消費量と CO_2 排出量の削減のために、全ての人々が諦めざるを得ないような消極的対策は現実的ではない。課題解決には技術革新で臨むべきであり、事実、そのための研究、技術開発が多方面でなされている。

自然エネルギーを活用した、太陽光発電システム、風力発電システム、太陽熱温水器等も課題解決策の１つと成り得る。しかし、これらのシステムが供給するエネルギーは、需要と一致するようには制御されない。特に太陽光発電システム、風力発電システム等は、その発電電力量を正確に予想できず、商用電力系統と協調して運用するためには、大容量の蓄電システム等、電力系統を安定に保つためのシステムを別途導入する必要があり、大規模に導入することは難しいと考えられる。

上記理由により、自然エネルギーによるエネルギー供給システムは、本論文で扱う家庭用エネルギー供給システムからは除外する。

本章では、課題解決のための技術開発成果の１つである家庭用エネルギー供給システムとして、潜熱回収型給湯器、自然冷媒ヒートポンプ式給湯器、家庭用 PEFC コージェネレーションシステムを取り上げ、それらのシミュレーションモデルを提案し、シミュレーションを行うことで、従来から家庭部門でのエネルギーを賄ってきた商用電力とガス給湯器との比較評価を行い、導入効果を評価する。

特に家庭用 PEFC コージェネレーションシステムについては、業務用コージェネレーションシステムで一般的に採用され、家庭用 PEFC コージェネレーションシステムへの適用も報告されている DSS 運転を採用し、一般的な家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの導入効果という観点で評価を行う。

3.2. 従来の家庭用エネルギー供給システム

3.2.1.商用電力

系統電力の発電効率や CO_2 排出係数は、各電力供給事業者から公表されている。表 3.1 に主な電力供給事業者の発電効率と CO_2 排出係数を示す。各事業者から公表されている発電所効率は、HHV（Higher Heating Value）・LHV（Lower Heating Value）、発電端・送電端等の条件が統一されていない。HHV・LHV の換算は燃料の発熱量により異なるために燃料の構成比が必要であり、これらの数値を使っての評価は難しい。

事業所等の使用エネルギーの算出方法を規定する「エネルギーの使用の合理化に関する法律施行規則」[22]には昼間（午前 8 時から午後 10 時まで）9,970 kJ/kWh、夜間（午後 10 時から翌日の午前 8 時まで）9,280 kJ/kWh の値（ともに HHV 基準）が記載されており、CO_2 排出量の算出方法を規定する「温室効果ガス排出算定・報告マニュアル Ver.2.4」[23]には、555 gCO_2/kWh の係数が記載されている。本論文では、商用電力の評価にはこの値を用いることとする。

ところで、コージェネレーションシステムのような分散電源の導入効果を評価する場合は、CO_2 排出係数には、上記の値（全電源での平均値）が用いられず、火力発電所の値が用いられるのが一般的である。文献(22)によれば、温室効果ガスの排出削減のための個別対策の導入による削減効果を評価する方法については、個々の対策の実態に即した合理的な方法により評価する必要があり、たとえば対策前の排出量と対策後の排出量の差を求める方法の他、対策によって削減効果が見込まれる期間に影響を受ける電源が想定できる場合には当該電源の排出係数を電気の削減量に乗じて算定する方法があるとされている。この考え方に基づいて、PEFC 等のコージェネレーションシステムでは、中央環境審議会地球環境部会目標達成シナリオ小委員会中間取りまとめによる火力平均係数 690 gCO_2/kWh が用いられ、文献(3)(4)でも、この数値を用いた評価が行われている。

本論文では、最新の火力発電所の排出係数の向上を反映させる意味で、あえて文献(22)の値による評価を行った。参考のため、最近の火力発電所での CO_2 排出係数の推移を図 3.1 に、火力発電所の効率の推移を図 3.2 に示す。図からも分かるように世界的には CO_2 排出係数、発電効率は向上の傾向にあるが、日本に関しては、元々諸外国より優れていたこともあるが、近年については向上していると言えない。

表 3.1　事業者別発電効率・CO_2 排出係数一覧

事業者名	火力発電所効率 [%]	CO_2 排出係数 [$kgCO_2/kWh$]	実績年度
北海道電力(株)	39.3 (発電端)	0.588	2008
東北電力(株)	―	0.469	2008
東京電力(株)	45.6 (LHV)	0.418	2008
中部電力(株)	46.1 (LHV　発電端)	0.455	2008
関西電力(株)	41.7 (LHV)	0.355	2008
四国電力(株)	―	0.378	2008
九州電力(株)	39.2 (HHV　送電端)	0.374	2008

CO_2 排出係数は京都メカニズムクレジット反映前の数値
（表中の数値は各事業者の CSR レポート、アニュアルレポート等を参照）

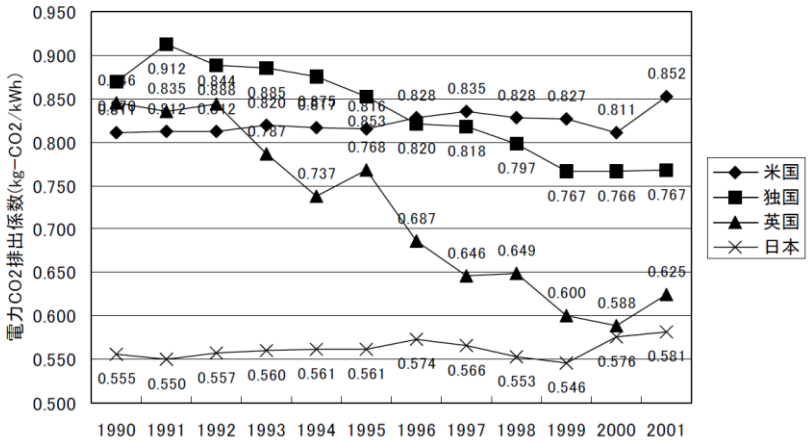


図 3.1　火力発電所 CO_2 排出係数の推移
（環境省第２回地球温暖化対策技術検討会配布資料
http://www.env.go.jp/earth/gijyutsu_k/02/ref_03_2.pdf　から引用）

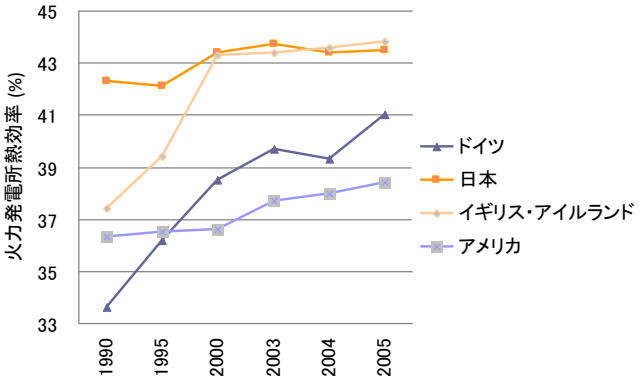


図 3.2　火力発電所熱効率（LHV 基準　暦年実績）
（東京電力(株)，環境行動レポートより作成）

3.2.2.従来型給湯器と潜熱回収型給湯器

家庭の給湯需要を賄う給湯器の燃料としてはガスや灯油等があるが、寒冷地を除けばガスのシェアが圧倒的に大きく[24]、ガスの中では天然ガスのシェアが大きく、特殊な場合を除き、貯湯式ではなく瞬間式である。そこで、本論文では天然ガスを燃料とする瞬間式の従来型給湯器、潜熱回収型給湯器を前提とする。

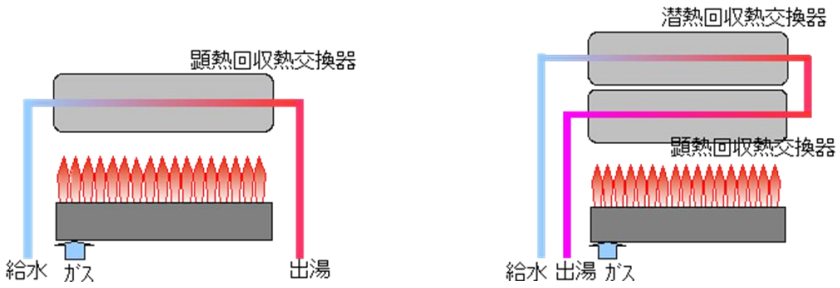
従来型給湯器とは、天然ガス、LP ガス等の燃料を燃焼させ、燃焼排ガスから顕熱を熱交換器で回収することで、温水を作る装置である。通常熱交換器は熱伝導性の良い銅で作られているため、熱回収効率を上げすぎると熱交換器で潜熱を回収することになり結露が発生する。結露水は排気ガスと反応して酸性となり、熱交換器を腐食させてしまうので、熱回収効率を高くすることができない。

潜熱回収型給湯器は、従来型ガス給湯器に用いられている顕熱回収熱交換器とは別に耐腐食性に優れる潜熱回収熱交換器を備えたものである。図 3.3 にそれぞれの構造を模式的に示す。

これら給湯器の効率は、給湯行為に依存することが文献(25)(26)で示されており、給湯行為の継続時間が長いほど効率が高くなり、前回の給湯行為からの時間間隔が短いほど効率が高くなる。またその一方、給水温度に関わらず効率は、ほぼ一定の値となる。これは、低水温時は排ガス温度との温度差が大きくなるため熱交換器の効率は向上するが、冷えている機器自体の温度を上昇させるために一部の熱が使用されることで全体の効率は低下し、それらが相殺されるからである。

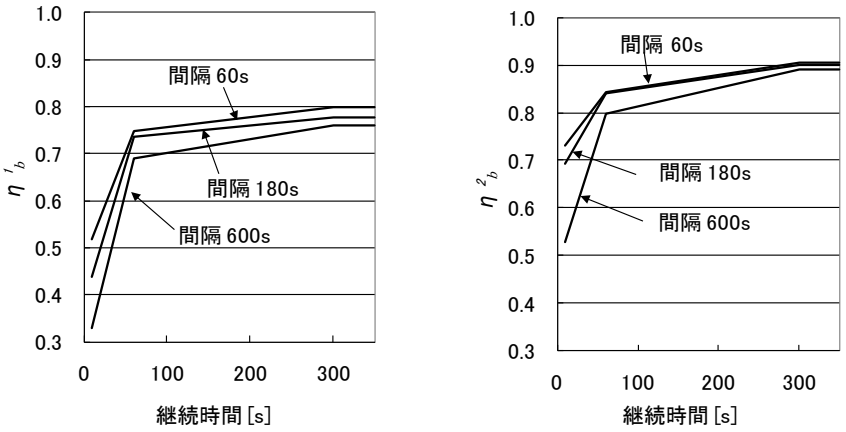
本論文では図 3.4 に示す給湯器効率 η_{jb} を用いて評価を行う。ただし、j は給湯器の種類を示し、j=1 は従来型給湯器、j=2 は潜熱回収型給湯器を表す。

なお、給湯行為の継続時間は需要データが 1 分区分の熱量で構成されているため、出湯温度を 42 ℃、出湯流量を 10 L/min と仮定して算出している。また、実際には高温の設定がされている等の理由で熱量が大きく 42 ℃、10 L/min の条件では 60 秒を超えるような場合は、次の時間区分に熱量を持ち越して求めるようにしている。



(a)　従来型給湯器の構造　　(b)　潜熱回収型給湯器

図 3.3　ガス給湯器の構造



(a)　従来型給湯器効率　　(b)　潜熱回収型給湯器効率

図 3.4　ガス給湯器の効率（文献(25)のデータから作成）

従来、給湯器の評価は、平均的な効率を用いて行われることが一般的であるが、現実には図 3.4 に示したようにその効率は給湯行為の違いによって大きく変化する。本論文では、その他のシステムと比較評価することもあり、実際の試験の値を適用できる 4 章・6 章を除く評価では、図 3.4 に示す効率の変化をシミュレーションモデルに反映をさせる。

発電所効率は「エネルギーの使用の合理化に関する法律施行規則」[22]により、昼間（8 時から 22 時まで）η_{ppD}=9970 kJ/kWh、夜間（0 時から 8 時まで、22 時から 0 時まで）η_{ppN}=9280 kJ/kWh であり、CO_2 排出係数は「温室効果ガス排出算定・報告マニュアル Ver.2.4」[23]では、発電所の CO_2 排出係数 K_{ppCO2}=555 gCO_2/kWh、都市ガスの CO_2 排出係数 K_{13ACO2}=0.0506 gCO_2/kJ と定められている。

商用電力と従来型給湯器による従来システムでの一次エネルギー Q_{CONVPE}[kJ] と CO_2 排出量 $Q_{CONVCO2}$[gCO_2]は以下の式により求められる。

$$Q_{CONVPE} = \sum_{t}^{DayTime} D_E(t) \times \frac{\eta_{ppD}}{k_1} + \sum_{t}^{NightTime} D_E(t) \times \frac{\eta_{ppN}}{k_1} + \sum_{t}^{AllDay} \frac{D_H(t)}{\eta^1{}_b} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3.1)$$

$$Q_{CONVCO2} = \sum_{t}^{AllDay} (D_E(t) \times \frac{K_{ppCO2}}{k_1} + \frac{D_H(t)}{\eta^1{}_b} \times K_{13ACO2}) \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3.2)$$

ただし、電力需要 $D_E(t)$[kW]、給湯需要 $D_H(t)$[kJ]、従来型給湯器効率 $\eta^1{}_b$とし、k_1=60 min/h とし、単位時間 t は 1 分単位であり、DayTime とは昼間 8 時 00 分～21 時 59 分、NightTime は夜間 0 時 00 分～7 時 59 分、22 時 00 分～23 時 59 分を表す。同様に AllDay とは 0 時 00 分～23 時 59 分を表す。

全く同様に、商用電力と潜熱回収型給湯器による一次エネルギーQ_{CondPE}[kJ]と CO_2 排出量 $Q_{CondCO2}$[gCO_2]は以下の式により求められる。ただし、潜熱回収型給湯器効率を $\eta^2{}_b$ とする。

$$Q_{CondPE} = \sum_{t}^{DayTime} D_E(t) \times \frac{\eta_{ppD}}{k_1} + \sum_{t}^{NightTime} D_E(t) \times \frac{\eta_{ppN}}{k_1}) + \sum_{t}^{AllDay} \frac{D_H(t)}{\eta^2{}_b} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3.3)$$

$$Q_{CondCO2} = \sum_{t}^{AllDay} (D_E(t) \times \frac{K_{ppCO2}}{k_1} + \frac{D_H(t)}{\eta^2{}_b} \times K_{13ACO2}) \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3.4)$$

従って、潜熱回収型給湯器を適用した場合の従来システムに対する一次エネルギー削減量 F_{cond}[kJ]と CO_2 排出削減量 F_{cond}[gCO_2]は次式で求められる。

$$F_{condPE} = Q_{CONVPE} - Q_{condPE} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3.5)$$

$$F_{condCO2} = Q_{CONVCO2} - Q_{condCO2} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3.6)$$

さらに、潜熱回収型給湯器を適用した場合の従来システムに対する一次エネルギー削減率 R_{cond} と CO_2 排出削減率 R_{cond} は次式で求められる。

$$R_{condPE} = \frac{F_{condPE}}{Q_{CONVPE}} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3.7)$$

$$R_{condCO2} = \frac{F_{condCO2}}{Q_{CONVCO2}} \quad \cdots\cdots (3.8)$$

図 3.5 に従来型給湯器でのシミュレーション例を示す。給湯継続時間や前回の給湯行為からの間隔による給湯行為の違いにより効率は変化し、32.8 %から 80.0 %の値をとる。

図 3.6 に、電力需要を商用電力で賄い、給湯需要を従来型給湯器で賄うシステムでの一次エネルギー量と CO_2 排出量を求めた結果を、表 3.2 に 27 需要家での平均値を示す。以降、このシステムを従来システムとして基準に置き、他システムの評価はこの従来システムの値からの変化量（削減量）で評価を行う。なお、給湯需要に対して正の相関があるが、一直線上に分布しないのは、電力需要の影響によるものである。

図 3.7 に潜熱回収型給湯器を適用した場合の一次エネルギー削減量と CO_2 排出削減量を、図 3.8 に一次エネルギー削減率と CO_2 排出削減率を示す。また、27 需要家での平均値を表 3.3 に示す。27 需要家平均で、一次エネルギー削減量（率）は 4.5 GJ/year（5.2 %）、CO_2 排出量削減量（率）は 230 kgCO_2/year（4.8 %）となる。

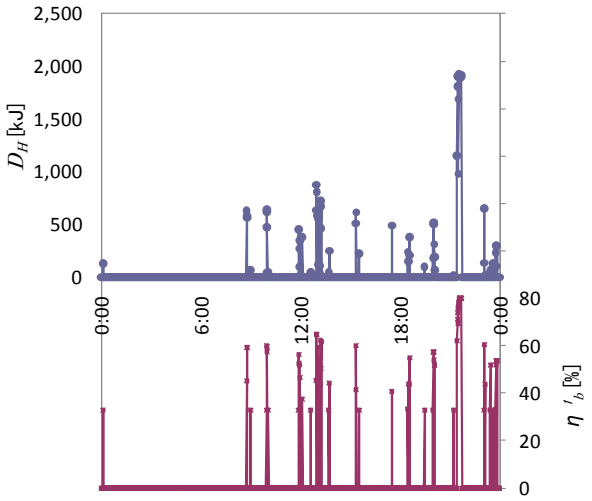
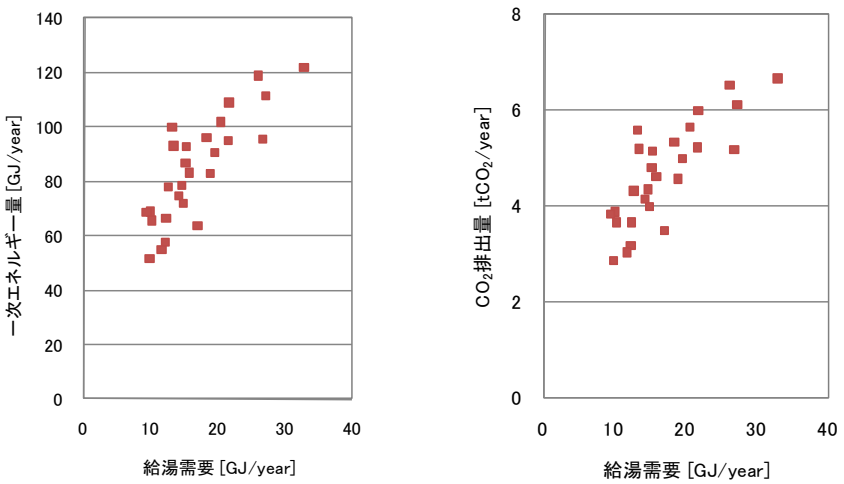


図 3.5　従来型給湯器のシミュレーション例

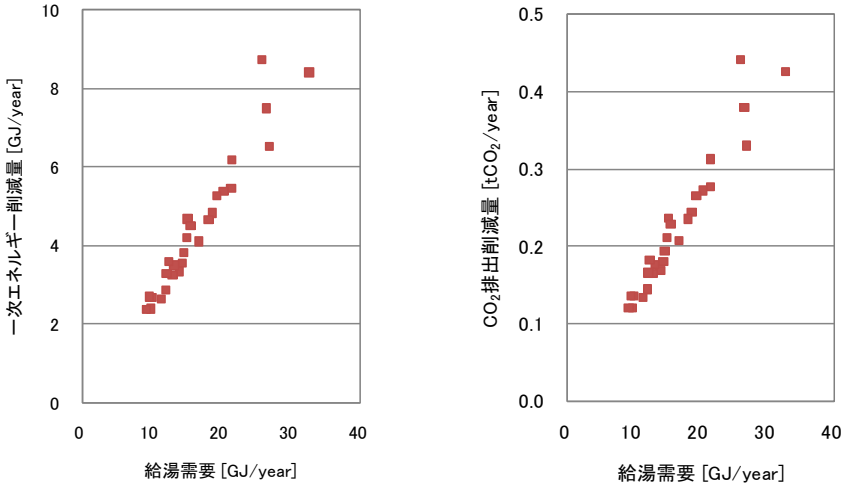


(a)　一次エネルギー量　　(b)　CO_2 排出量

図 3.6　従来システムでの一次エネルギー量と CO_2 排出量

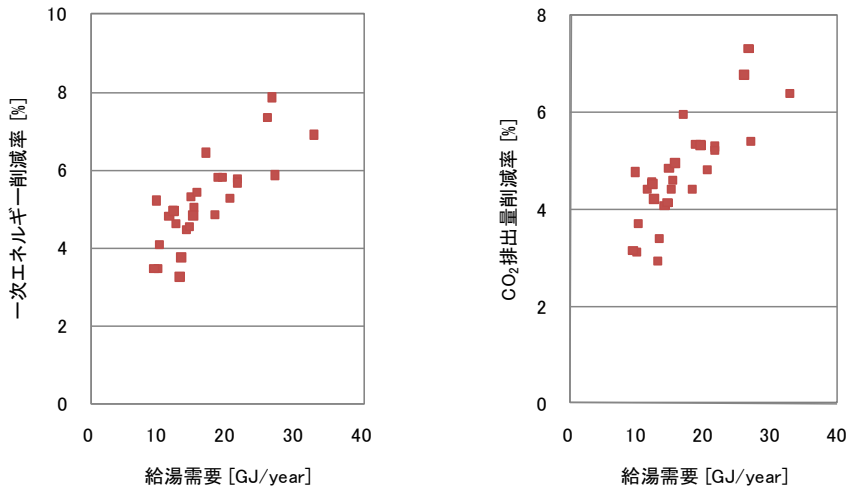
表 3.2　従来システムでの一次エネルギー量と CO_2 排出量（27 需要家平均）

項目	数値
一次エネルギー量 [GJ/year]	84.4
CO_2 排出量 [kgCO_2/year]	4660



(a)　一次エネルギー削減量　　(b)　CO_2 排出削減量

図 3.7　潜熱回収型給湯器適用による一次エネルギー削減量と CO_2 排出削減量



(a)　一次エネルギー削減率　　(b)　CO_2 排出量削減率

図 3.8　潜熱回収型給湯器適用による一次エネルギー削減率と CO_2 排出削減率

表 3.3　潜熱回収型給湯器導入効果（27 需要家平均）

項目	数値
一次エネルギー削減量 [GJ/year]	4.5
一次エネルギー削減率 [%]	5.2
CO_2 排出削減量 [kgCO_2/year]	230
CO_2 排出量削減率 [%]	4.8

潜熱回収型給湯器は、従来型給湯器と基本原理は同じで単に熱回収効率を向上させたものであるので、その導入効果は限られるが、給湯需要に比例して確実に一次エネルギーと CO_2 排出量を削減することができる。次節以降で述べる自然冷媒ヒートポンプ式給湯器と家庭用 PEFC コージェネレーションシステムは比較的大きな設置スペースが必要であるが、潜熱回収型給湯器は、従来型給湯器と大きさがほとんど変わらないので、設置スペースに余裕のない集合住宅や小規模の戸建住宅に適した家庭用エネルギー供給システムと言える。

3.2.3. 自然冷媒ヒートポンプ式給湯器

自然冷媒ヒートポンプ式給湯器とは、冷媒として CO_2 を用いたヒートポンプを熱源とした貯湯式の給湯器である。ヒートポンプの性能である COP（Coefficient of Performance）は、図 3.9 に示すように外気温度と図中 65 ℃~90 ℃の範囲の値で記載されている出湯温度によって変化する。本来は、図 3.9 に記載されている各点での COP を用いて、モード遷移を考慮して評価すべきである。しかし、現行の市販品に対してこれらの詳細な数値やモード遷移条件を明確に開示する文献を見いだせなかった[27]~[29]。そこで、除霜運転、ヒートポンプの起動停止時や沸き上げ終了に発生すると予想される損失等、カタログに記載されていない損失を無視することで、自然冷媒ヒートポンプ式給湯器のシミュレーションモデルを作成している。

シミュレーションで用いた自然冷媒ヒートポンプ式給湯器の機器構成モデルを図 3.10(a)に示す。ヒートポンプから出力された熱は、貯湯槽までの配管で一部放熱して失われ、さらに貯湯槽に貯湯されている間に放熱により一定割合で失われる。

ヒートポンプは、図 3.10(b)に示すように水温 $T_W(t)$[℃]に対して COP 値 $H_{COP}(t)$、出力 $H_{out}(t)$[kW]の特性を持っている装置として扱っている。このヒートポンプ特性は 2008 年度に発売されていた自然冷媒ヒートポンプ式給湯器のカタログを参照し、最高性能であったものの数値を採用している。

シミュレーションで用いたパラメータを表 3.4 に示す。配管放熱は一般的な施工条件を想定して経験的に得られた値を使用し、貯湯槽放熱は実際に放熱試験を実施し、その結果から算出している。

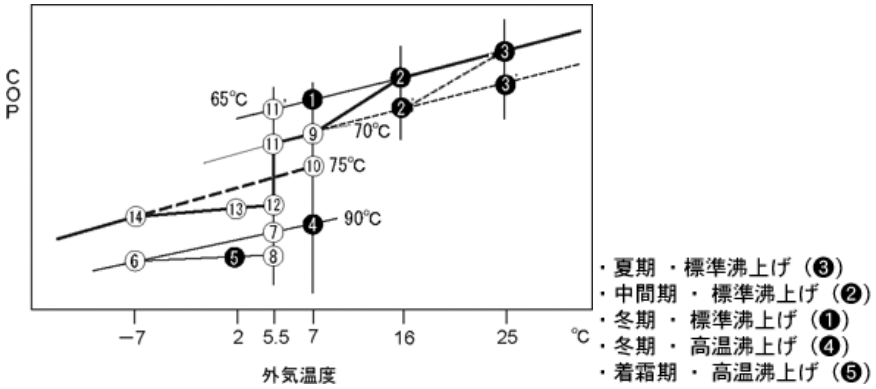
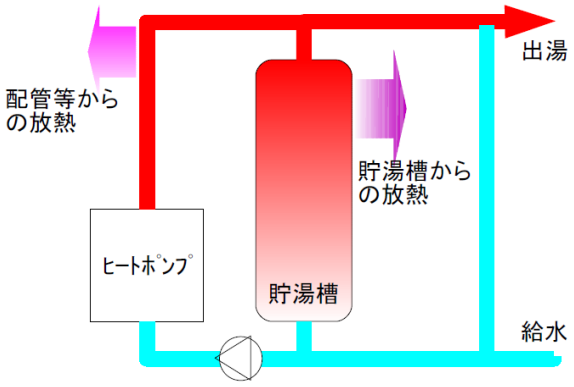
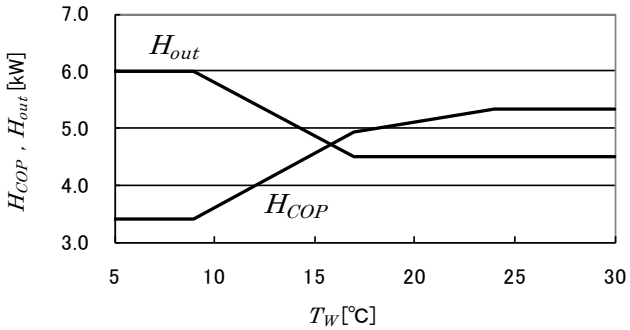


図 3.9　ヒートポンプ単体性能の全温度領域への展開
（社団法人日本冷凍空調工業会 http://www.jraia.or.jp/frameset_p_heatpump.html から引用）



(a)　自然冷媒ヒートポンプ式給湯器の構成



(b)　ヒートポンプ特性

図 3.10　自然冷媒ヒートポンプ式給湯器のシミュレーションモデル

表 3.4　自然冷媒ヒートポンプ式給湯器のパラメータ

項目	値
貯湯容量	460 L
配管等からの放熱	熱出力の 10 %
貯湯槽からの放熱	貯湯熱量の 0.63 %/h
貯湯温度	65 ℃

市販されている自然冷媒ヒートポンプ式給湯器には複数の運転方法が搭載され、需要家が選択できるようになっている。しかし、電気温水器の本来の導入目的が電力需要の平準化であること、自然冷媒ヒートポンプ式給湯器導入が時間帯別契約を前提として行われていること等から、電力事業者が定める深夜電力の時間帯（本論文では 0 時～7 時、23 時～0 時）の運転を優先する設定が需要家によって選択されていると推定できる。そのような背景を考慮して、図 3.11 に示す運転計画法を採用する。

自然冷媒ヒートポンプ式給湯器の運転方法を深夜電力の利用を基本として、 深夜時間帯のみの運転で給湯需要が賄えない場合は、給湯需要の発生する深夜時間帯外の直近の

運転で賄うこととした。具体的には、予測される給湯需要を賄うための運転時間帯を需要発生時刻の当日の深夜時間帯、前日の深夜時間帯、当日の給湯需要発生直前の時間帯の順に設定する。図中の薄灰色帯は深夜電力時間帯、濃灰色帯は給湯需要による湯切れ発生時刻、①～⑤の数字は運転時間帯設定の優先順位、矢印は運転時間帯設定順（湯切れ発生直前から過去に向かって運転時間帯として選択）を示す。運転時間帯設定は原則として給湯需要を賄うための必要最低限の時間とし、その最短時間は 15 分とした。また、給湯需要量は既知として本運転方法に従うので、実際の運転では行われている、湯切れ回避のための余分な貯湯、例えば貯湯量が減少してきた場合、一定量の貯湯量を確保するための沸き増しの運転は行わないようにした。従って、この運転方法ではほぼ理想的な結果が求められることになる。

図 3.10(b)に示したように、水温 $T_W(t)$[℃]の関数として、ヒートポンプの COP 値 $H_{COP}(t)$、ヒートポンプ出力 $H_{out}(t)$[kW]が求められる。図 3.11 の運転計画方法に基づいて給湯需要 $D_H(t)$[kJ]を賄うように運転計画 $H_{drive}(t)$（ヒートポンプを運転する場合 $H_{drive}(t)=1$ とし、ヒートポンプを運転しない場合 $H_{drive}(t)=0$ とする）を決定すると、ヒートポンプで消費される電力エネルギーは $H_{in}(t)$[kW]は次式で求められる。

$$H_{in}(t) = \frac{H_{out}(t)}{H_{COP}(t)} \times H_{drive}(t) \cdots\cdots (3.9)$$

また、時間帯 t の最初に既に蓄熱されている熱量を示す時間帯初期貯湯熱量 $S_H(t)$[kJ]は、配管等からの放熱 γ_p、貯湯槽からの放熱 γ_T、k_1=60 min/h、k_2=3600 J/Wh とすると、次式により求められる。

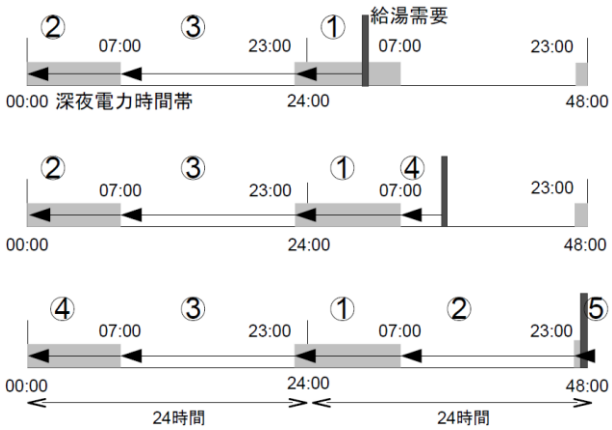


図 3.11　自然冷媒ヒートポンプ式給湯器の運転方法

$$S_H(t) = S_H(t-1)\times(1-\gamma_T) - D_H(t) + H_{out}(t-1)\times(1-\gamma_p)\times\frac{k_2}{k_1} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3.10)$$

湯切れしないことを意味する $S_H(t-1)\times(1-\gamma_T) - D_H(t) \geq 0$ を常に満足するように $H_{drive}(t)$は設定されることになる。

(3.9)式で求められる $H_{in}(t)$を用いて、一次エネルギーQ_{HPPE}[kJ]と CO_2 排出量 Q_{HPCO2}[gCO_2]は、それぞれ次式により求められる。

$$Q_{HPPE} = (\sum_{t}^{DayTime}(D_E(t) + H_{in}(t))\times\eta_{ppD} + \sum_{t}^{NightTime}(D_E(t) + H_{in}(t))\times\eta_{ppN})\times\frac{k_2}{k_1} \cdots (3.11)$$

$$Q_{HPCO2} = \sum_{t}^{AllDay}(D_E(t) + H_{in}(t))\times\frac{K_{ppCO2}}{k_1} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3.12)$$

従って、自然冷媒ヒートポンプ式給湯器を適用した場合の従来システムに対する一次エネルギー削減量 F_{HPPE}[kJ]と CO_2 排出削減量 F_{HPCO2}[gCO_2]は次式で求められる。

$$F_{HPPE} = Q_{CONVPE} - Q_{HPPE} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3.13)$$

$$F_{HPCO2} = Q_{CONVCO2} - Q_{HPCO2} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3.14)$$

さらに、自然冷媒ヒートポンプ式給湯器を適用した場合の従来システムに対する一次エネルギー削減率 R_{HPPE}と CO_2 排出削減率 R_{HPCO2}は次式で求められる。

$$R_{HPPE} = \frac{F_{HPPE}}{Q_{CONVPE}} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3.15)$$

$$R_{HPCO2} = \frac{F_{HPCO2}}{Q_{CONVCO2}} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3.16)$$

図 3.12 にシミュレーション結果の 1 例を示す。給湯需要を賄うため、深夜時間帯の給湯需要に最も近い時間帯に運転している。しかし、貯湯するための深夜電力時間帯が、給湯需要が発生する時間帯と大きく離れているため、放熱で貯湯熱量が失われている。この放熱量は、例えば深夜時間帯 6:00 に貯湯し、20:00 に消費したとすると放熱時間は 14 時間になり、放熱で失われる熱量は貯湯熱量の 8.5 %になる。

評価結果として、図 3.13 に一次エネルギー削減量、CO_2 排出削減量を、図 3.14 に一次エネルギー削減率、CO_2 排出削減率を、27 需要家の平均値を表 3.5 に示す。27 需要家平均で、一次エネルギー削減量（率）は 11.8 GJ/year（13.7 %）、CO_2 排出削減量（率）は 475 kgCO_2/year（10.0 %）となり、何れの値についても潜熱回収型給湯器を上回る評価結果が得られた。

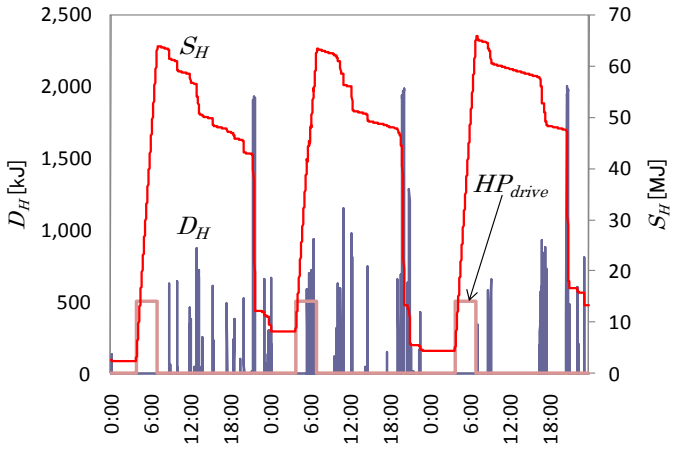
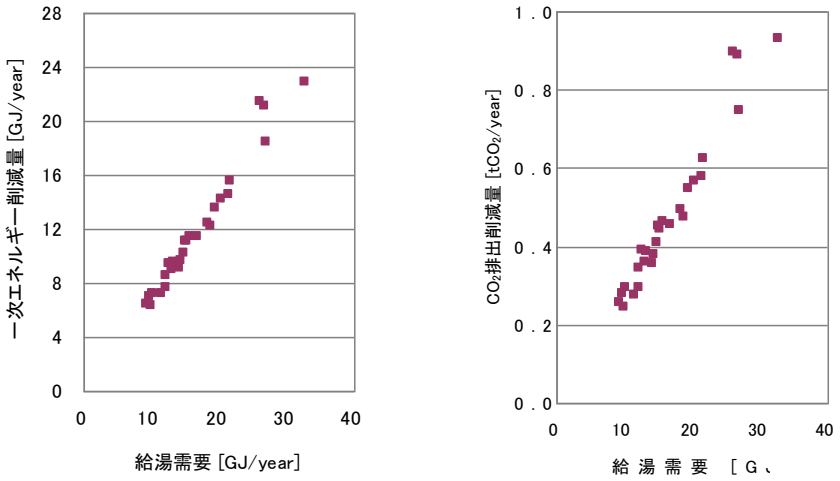
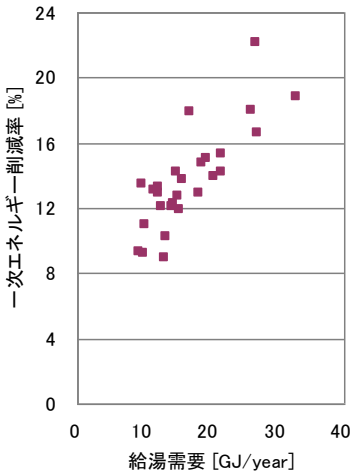


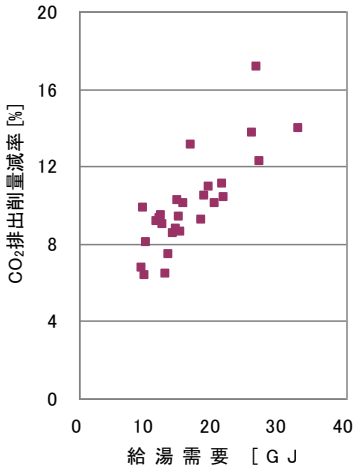
図 3.12　自然冷媒ヒートポンプ式給湯器のシミュレーション例



(a)　一次エネルギー削減量　　(b)　CO_2 排出削減量

図 3.13　自然冷媒ヒートポンプ式給湯器による各削減量





(a)　一次エネルギー削減率　　(b)　CO_2 排出量削減率

図 3.14　自然冷媒ヒートポンプ式給湯器による各削減率

表 3.5　自然冷媒ヒートポンプ式給湯器導入効果（27 需要家平均）

項目	数値
一次エネルギー削減量 [GJ/year]	11.8
一次エネルギー削減率 [%]	13.7
CO_2 排出削減量 [kgCO_2/year]	475
CO_2 排出量削減率 [%]	10.0

3.3. 家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの導入効果

3.3.1. 家庭用 PEFC コージェネレーションシステムのシミュレーションモデル

本節では、家庭用 PEFC コージェネレーションシステムのシミュレーションモデルを示し、家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの導入効果を見積もる。

図 3.15 に家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの構成を示す。システムは 2 つのサブシステムから構成されており、一方が PEFC ユニット、もう一方が貯湯ユニットである。PEFC ユニットは改質器、セルスタック、系統連係インバータ等で構成され、貯湯ユニットは補助熱源器や貯湯槽で構成されている。

基本的な動作は、改質器で都市ガス等の原燃料を改質し、水素が主成分の改質ガスとし、MEA（Membrane Electrode Assembly）で改質ガス中の水素と空気中の酸素を反応させることで、電力と熱を得ている。発電された電力は系統連係インバータで交流に変換され、電力負荷に供給される。改質器とセルスタックで発生した熱は、回収されて貯湯槽に温水として蓄えられ、給湯需要を賄うように供給される。発電電力で不足する電力は商用系統から購入し、排熱で賄いきれない給湯需要は、内蔵の補助熱源により賄う。

現在販売されている家庭用 PEFC コージェネレーションシステムには、ラジエータ搭載のものと非搭載のもの、補助熱源器として従来型給湯器を採用したものと潜熱回収型給湯器を採用したもの等、構成の異なるものがある。

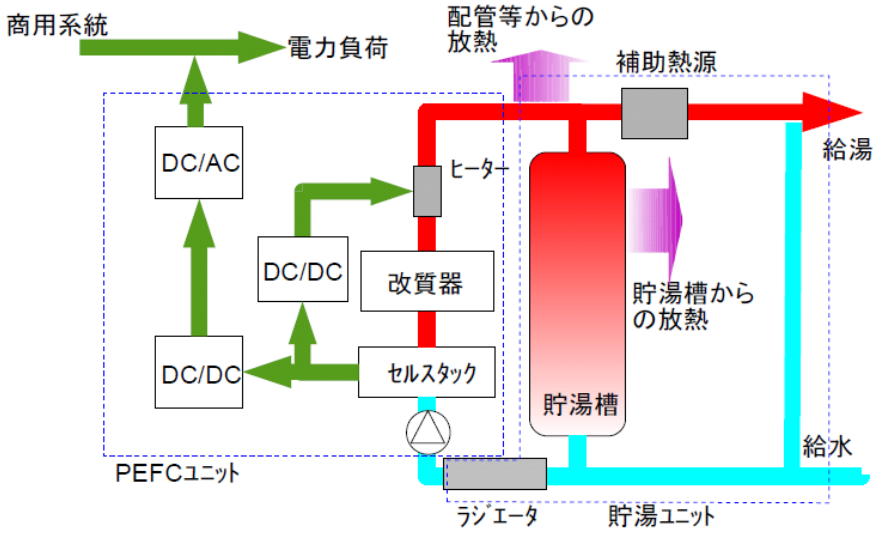


図 3.15　家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの構成

PEFC は適切な冷却を行わないと、セルでの湿度制御、排気からの水回収（水自立）、耐久性等様々な点で悪影響があるため、冷却水の確保ができない状態では停止せざるを得ない。PEFC の冷却水には貯湯槽の水が用いられる（正確には一次冷却水は純水が用いられ、貯湯水は二次冷却水として、一次冷却水の冷却に用いられる）ため、貯湯槽が湯で一杯になると冷却水の確保ができなくなり停止することになる。しかし、ラジエータを搭載すれば、常に十分温度の低い（二次）冷却水を供給することが可能となり、運転継続が可能となる。

このラジエータを使った運転は、予測のずれや外れが生じた場合に特に有効に働くと考えられるので、今回のシミュレーション評価のように需要予測が既知の条件では、ラジエータ搭載の効果は大きくならないことが予想される。また、一次エネルギー削減のみを目的とする場合、ラジエータの作動は発生させた熱エネルギーの廃棄を意味することになるため搭載効果は大きくならない。しかし、実際にはエネルギー需要が既知ではない。さらに CO_2 排出量の削減を主目的と考える場合は、熱を廃棄しながらの運転も許容される場合がある。本論文では、主にラジエータ搭載による CO_2 排出量削減効果を評価することも目的としているため、搭載・非搭載の両構成について評価を行う。

補助熱源器は、貯湯がなくなるか、貯湯温度が設定温度以下になった場合に設定温度の湯を供給するために貯湯水を設定温度まで加熱するために搭載され、従来型給湯器を適用したものと潜熱回収型給湯器を適用したものがある。家庭用 PEFC コージェネレーションシステム導入効果の評価の本質的な部分ではないが、補助熱源器として図 3.4 に示した特性を持つ従来型給湯器と潜熱回収型給湯器の両方について評価を行う。

図 3.16 に今回想定する PEFC の発電効率 η_{Efc}、排熱回収効率 η_{Hfc} の発電電力 $G_E(t)$ に対する特性を、表 3.6 にシステムの主なパラメータの値を示す。想定する PEFC の性能は、現状のトップランナー性能ではなく、経年劣化等も含めて確実に担保されると予想できる値に設定している。その他のパラメータについても同様で、現行の実力と比較して余裕のある値に設定している。

発電電力は電力需要に追従することを基本とするが、発電電力の商用系統への逆潮流回避のために買い電力保証(電力需要よりも小さな値に発電電力の制御目標値を設定すること)と、余剰電力を図 3.15 に示したヒーターにより熱に変換することで逆潮流を発生させないシステムとなっている。ヒーターにより余剰電力を変換して発生させた熱は排熱とともに回収するものであるので注意されたい。

シミュレーションでは 1 分前の電力需要に対して追従するようにして、実機で発生する制御の無駄時間による追従遅れを再現している。運転計画においては、自然冷媒ヒートポンプ式給湯器の評価と同様、エネルギー需要を既知としている。

家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの運転方法としては、文献(7)には販売されている家庭用 PEFC コージェネレーションシステムに DSS 運転法が搭載されていることが記載されており、文献(8)には DSS 運転を想定した評価がされている。

また、文献(30)には、1 日を 3 つの時間帯に分け運転計画をする提案がなされている。この運転計画法では、給湯需要をそれ以前の運転で賄うように運転計画をすること、(明確に 24 時間ではないが) 1 日を運転計画とその運転の評価期間としていることから、基本的な思想は DSS 運転と同じと考えられる。

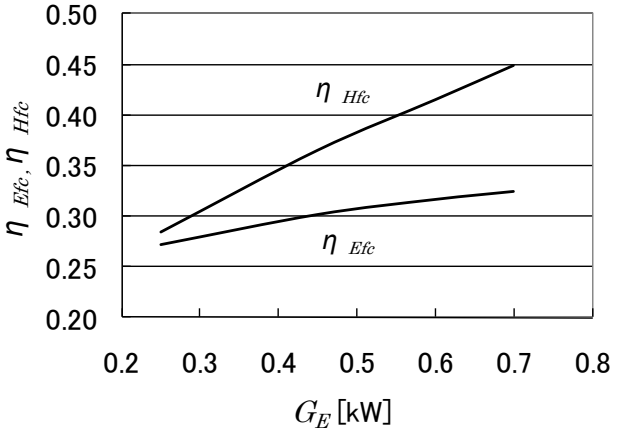


図 3.16　PEFC の効率特性（HHV 基準）

表 3.6　家庭用 PEFC コージェネレーションシステムのパラメータ

項目	値
定格発電電力/最小発電電力	700 W / 250 W
買い電力保証値	35 W
出力上昇速度	15 W/min
出力下降速度	60 W/min
起動時消費電力	0.5 kWh
起動時消費ガス	0.5 kWh
待機電力	20 W
貯湯容量	200 L
配管等からの放熱	回収熱量の 10 %
貯湯槽からの放熱	貯湯熱量の 1.2 %/h
排熱回収温度	65 ℃

そこで、本章では家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの既存の運転計画法として DSS 運転を採用した場合の家庭用 PEFC コージェネレーションシステムで期待できる一次エネルギーと CO_2 排出削減量の評価を行うことにする。

図 3.17 に本章で評価する運転計画法のフローチャートを示す。運転計画は、①24 時間分の電力・給湯需要予測データを読み込む。②運転開始時刻を 0 時～24 時までの任意の時刻に定め、③停止時刻を運転開始時刻以後、24 時までの時刻に任意に定める。④仮決定した運転時間帯を電力需要追従運転した場合のシミュレーションを行う。⑤シミュレーション結果に従い評価関数の値を求め、⑥評価関数の最大値を検索（逐次比較）し、⑦最大となる運転計画を最終的に運転計画法として採用する。⑧続く 24 時間分の電力・給湯需要予測データを読み込み、運転計画を繰り返す。シミュレーションでは、起動時刻と停止時刻の検索は 15 分を単位時間としている。

運転計画を決定するための運転計画の評価関数として一次エネルギー削減量を採用した場合と CO_2 排出削減量を採用した場合の 2 種類の運転方法を想定・評価した。2 つの評価関数を想定したのは、一次エネルギー削減量と CO_2 排出削減量は基本的には正の相関関係があるが、原燃料による CO_2 排出係数の違いで、熱電比によっては相関が崩れる場合が想定されるからである。

運転を評価する指標としては、上記の 2 つ以外に例えば、文献(30)では最適化の目的関数として運用コストを想定しており、文献(19)(20)では運用コストと CO_2 排出量を一次結合した関数を目的関数としている。しかし、運用コストはエネルギー事業者の経営戦略等の非技術的な要因によって決定される料金設定に大きく左右されるために普遍性がなく、本論文では扱わないことにする。

評価関数値は次のようにして求められる。

PEFC の発電電力を $G_E(t)$[kW]、PEFC の発電効率、熱回収効率をそれぞれ η_{Efc}、η_{Hfc}、配管からの放熱を γ_p、余剰電力処理ヒーターの効率を η_{ht}、時間区分の最初に貯湯されている熱量である時間帯初期貯湯熱量を $S_H(t)$[kJ]、平均貯湯温度を $S_t(t)$[℃]、排熱回収温度を Rt[℃]とすると、貯湯湯量 $Q_{HW}(t)$ [L]は次式で表される。

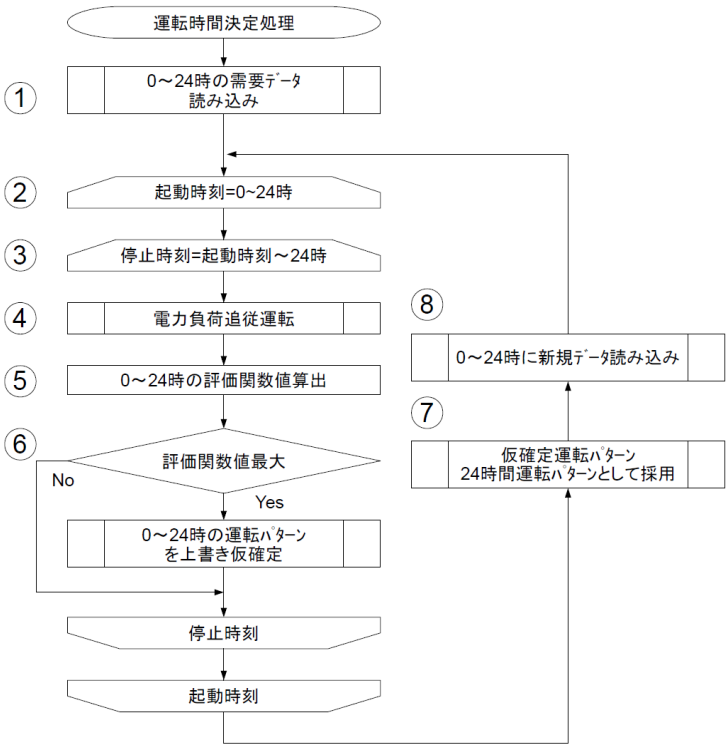


図 3.17　DSS 運転計画法フローチャート

$$Q_{HW}(t) = Q_{HW}(t-1) - \frac{D_H(t)}{k_3 \times k_4 \times (S_t(t-1) - T_W(t))} + \frac{G_E(t) \times \frac{\eta_{Hfc}}{\eta_{Efc}} + (G_E(t) - D_E(t)) \times \eta_{ht}}{k_3 \times k_4 \times (Rt - T_W(t))} \times \frac{k_2}{k_1} \cdots\cdots (3.17)$$

ただし、k_1=60 min/h、k_2=3600 J/Wh、k_3=4.19605 kJ/kcal、k_4=1.0 g/cm^3 とおき、$S_t(t-1) - T_W(t)=0$ の場合は第 2 項を 0 とし、$G_E(t) - D_E(t)<0$ となる場合は $G_E(t) - D_E(t)=0$ とし、第 1 項－第 2 項が負になる場合は第 1 項－第 2 項を 0 とする（システムは $Rt - T_W(t)=0$ とはならないことを前提に設計されている）。

なお、cal は本来、1 g の水の温度を標準大気圧下で 1 ℃上げるのに必要な熱量（水の比熱は温度により変化するのでこの定義も見直されている）であるが、本論文では水の比重を k_4=1.0 g/cm^3 とし、以降、1.0 kg の水を 1.0 L と換算して取り扱い、係数 k_4 も式の上で省略する。

貯湯槽放熱率を γ_T、配管からの放熱を γ_p、余剰電力処理ヒーターの効率を η_{ht} とすると、時間帯初期貯湯熱量 $S_H(t)$[kJ]、平均貯湯温度 $S_t(t)$[℃]は次式で表される。

$$S_H(t) = k_3 \times Q_{HW}(t-1) \times (S_t(t-1) - T_W(t)) \cdots\cdots (3.18)$$

$$S_t(t) = \frac{S_H(t) - D_H(t) + (G_E(t) \times \frac{\eta_{Hfc}}{\eta_{Efc}} + (G_E(t) - D_E(t)) \times \eta_{ht}) \times \frac{k_2}{k_1} \times (1-\gamma_p)}{k_3 \times Q_{HW}(t)} \times (1-\gamma_T) + T_W(t) \cdots\cdots (3.19)$$

ただし、(3.18)式で、$S_t(t-1)-T_W(t)<0$ の場合は $S_t(t-1)-T_W(t)=0$ とし、(3.19)式で、第 1 項が負となる場合は第 1 項を 0 とし、$S_H(t)-D_H(t)<0$ となる場合は $S_H(t)-D_H(t)=0$ とし、$G_E(t)-D_E(t)<0$ となる場合は $G_E(t)-D_E(t)=0$ とし、$Q_{HW}(t)=0$ の場合は $S_t(t)=T_w(t)$ とする。

(3.18)式で表される貯湯熱量 $S_H(t)$を用いて、家庭用 PEFC コージェネレーションシステムを導入した場合の一次エネルギー量 Q_{FCPE}[kJ]と CO_2 排出量 Q_{FCCO2}[gCO_2]は次式で表される。ただし、η_{jb}は補助熱源器効率で図 3.4 に示した特性に従い、j は給湯器の種類を表し、j=1 は従来型給湯器、j=2 は潜熱回収型給湯器である。

$$Q_{FCPE} = \sum_t^{AllDay} \left(\frac{G_E(t)}{\eta_{Efc}} \times \frac{k_2}{k_1} + \frac{D_H(t) - S_H(t)}{\eta^j{}_b}\right) + \sum_t^{DayTime} (D_E(t) - G_E(t)) \times \frac{\eta_{ppD}}{k_1} + \sum_t^{NightTime} (D_E(t) - G_E(t)) \times \frac{\eta_{ppN}}{k_1} \cdots\cdots (3.20)$$

$$Q_{FCCO2} = \sum_t^{AllDay} (D_E(t) - G_E(t)) \times \frac{K_{ppCO2}}{k_1} + \sum_t^{AllDay} \left(\frac{D_H(t) - S_H(t)}{\eta^j{}_b} + \frac{G_E(t)}{\eta_{Efc}} \times \frac{k_2}{k_1}\right) \times k_{13ACO2} \cdots\cdots (3.21)$$

(3.20)(3.21)式で $D_E(t)-G_E(t)<0$ の場合は $D_E(t)-G_E(t)=0$ とし、$D_H(t)-S_H(t)<0$ の場合は $D_H(t)-S_H(t)=0$ とする。

運転計画の評価関数として用いられる一次エネルギー削減量 F_{FCPE}[kJ]と CO_2 排出削減量 F_{FCCO2}[gCO_2]は次式で表される。

$$F_{FCPE} = Q_{CONVPE} - Q_{FCPE} \cdots\cdots (3.22)$$

$$F_{FCCO2} = Q_{CONVCO2} - Q_{FCCO2} \cdots\cdots (3.23)$$

さらに、家庭用 PEFC コージェネレーションシステムを適用した場合の従来システムに対する一次エネルギー削減率 R_{FCPE} と CO_2 排出削減率 R_{FCCO2} は次式で求められる。

$$R_{FCPE} = \frac{F_{FCPE}}{Q_{CONVPE}} \cdots\cdots (3.24)$$

$$R_{FCCO2} = \frac{F_{FCCO2}}{Q_{CONVCO2}} \cdots\cdots (3.25)$$

貯湯湯量 $Q_{HW}(t)$[L]は運転に関する物理的な制約条件として働き、貯湯槽容量 Q_{HWmax}[L]が上限となる。

$$Q_{HW}(t) \le Q_{HW\max} \cdots\cdots (3.26)$$

ラジエータ非搭載のシステムでは貯湯湯量 $Q_{HW}(t)$[L]が貯湯槽容量 Q_{HWmax} に達すると停止せざるを得ない。ラジエータ搭載のシステムでは、貯湯湯量 $Q_{HW}(t)$[L]が貯湯槽容量 Q_{HWmax} に達すると、それ以降、貯湯熱量 $S_H(t)$がほぼ一定値（但し、$S_t(t)$、$T_W(t)$の関数）となる。(3.17)式では $Q_{HW}(t-1)$が固定値 Q_{HWmax} となり、PEFC の排熱と余剰電力に起因する熱量は無効となり、発電電力のみが寄与することとなって、一次エネルギー削減、CO_2 排出量削減のどちらについても悪化することになる。貯湯湯量 $Q_{HW}(t)$[L]は、(3.17)式にある給湯需要 $D_H(t)$[kJ]が発生するか、(3.19)式にある貯湯槽放熱 γ_Tによらない限り、なくならないので、何れのシステムであっても貯湯が貯湯槽を占有している限り運転に影響を与え続けることになる。

ところで、以上の式では簡単のために省略したが、発電開始時には起動時消費電力と消費ガスが計上され、発電電力 $G_E(t)$=0 の時は待機電力が電力需要 $D_E(t)$に加算される。また、$G_E(t)$の制御目標値は $D_E(t)$から買い電力保証値を減じた値であり、その変化速度には以下の制約がある。負荷追従上昇速度を G_{up}[kW/min]、負荷追従下降速度を G_{dn}[kW/min]とすれば、

$G_E(t-1) \ge G_E(t)$ の時は、

$$G_E(t-1)-G_E(t)\le G_{dn} \cdots\cdots (3.27)$$

$G_E(t-1)\le G_E(t)$ の時は、

$$G_E(t)-G_E(t-1)\le G_{up} \cdots\cdots (3.28)$$

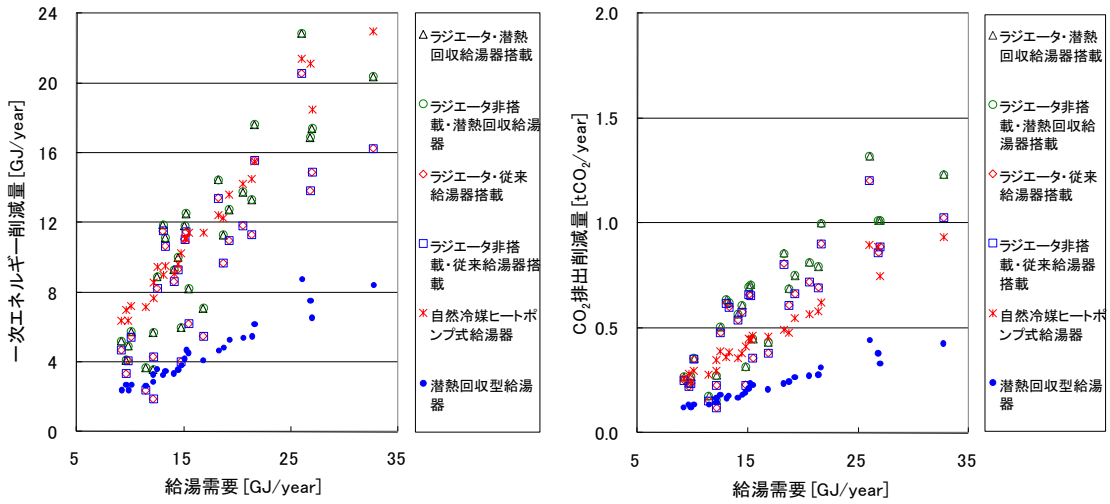
3.3.2. 家庭用 PEFC コージェネレーションシステムのシミュレーション結果

図 3.18 に運転計画の評価関数を一次エネルギー削減量とした場合の一次エネルギー削減量と CO_2 排出削減量を、図 3.19 に同条件における各削減率を、自然冷媒ヒートポンプ式給湯器と潜熱回収ガス給湯器の値とともに示し、表 3.7 に評価関数を一次エネルギー削減量とした場合の 27 需要家の平均値を示す。

評価関数を一次エネルギー削減量とした場合、ラジエータ非搭載・搭載で優位差はほとんど認められない。補助熱源器の仕様による差は一次エネルギー削減率で 1.8 ポイント[1]、CO_2 排出量削減率で 1.3 ポイントであった。

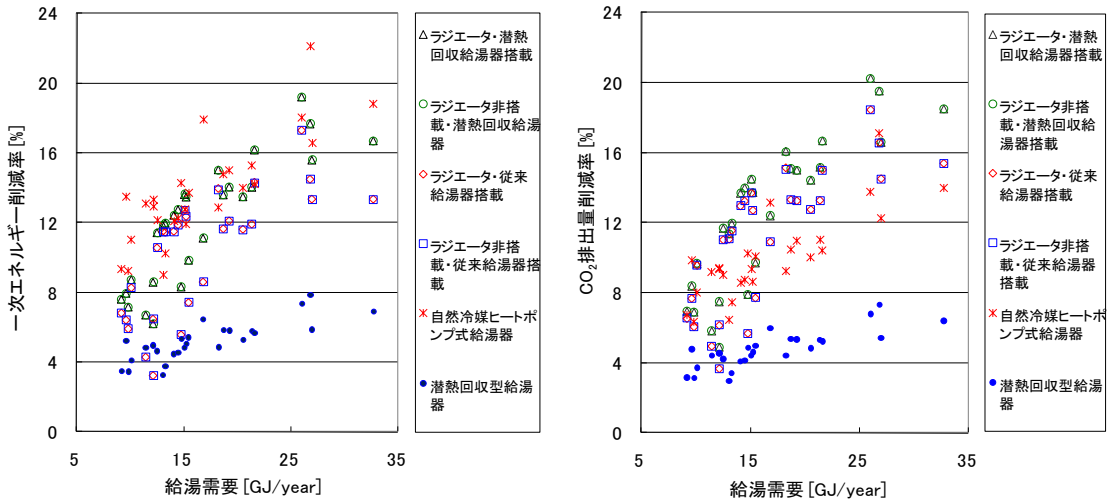
次に、図 3.20 に運転計画の評価関数を CO_2 排出削減量とした場合の一次エネルギー削減量と CO_2 排出削減量を、図 3.21 に同条件にける各削減率を、自然冷媒ヒートポンプ式給湯器と潜熱回収ガス給湯器の値とともに示し、表 3.8 に評価関数を CO_2 排出削減量とした場合の 27 需要家の平均値を示す。

[1] パーセント値の増減を表す場合、正式にはパーセントポイント（percent point）と記載されるが、日本では一般的ではないため、本論文ではポイント（point）と記載する。



(a)　一次エネルギー削減量　　(b)　CO_2 排出削減量

図 3.18　評価関数を一次エネルギー削減量とした場合の各削減量

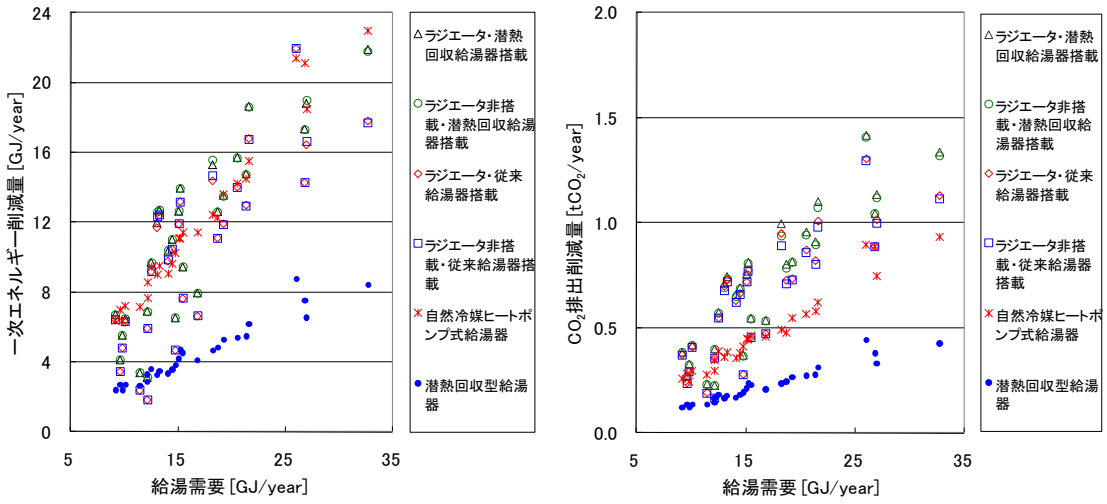


(a)　一次エネルギー削減率　　(b)　CO_2 排出量削減率

図 3.19　評価関数を一次エネルギー削減量とした場合の各削減率

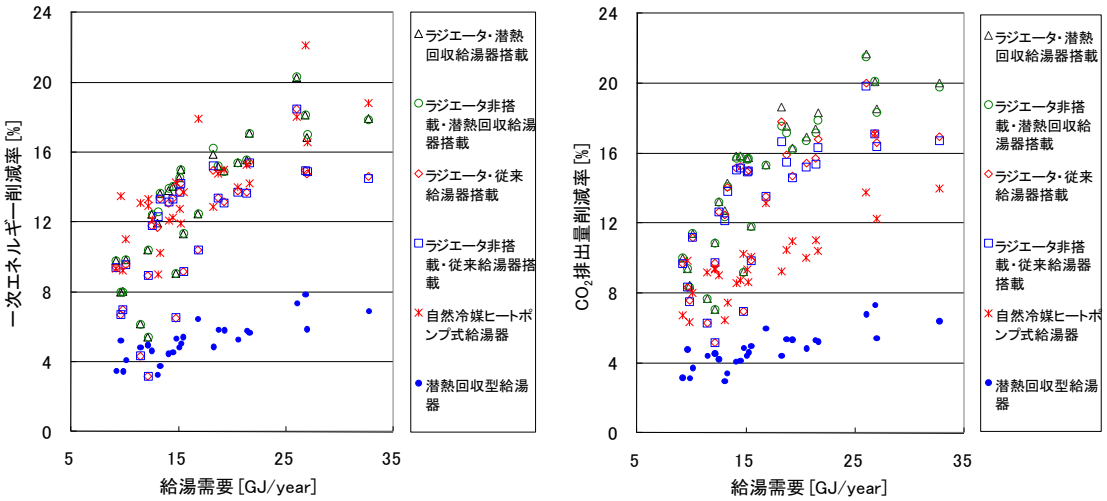
表 3.7　評価関数を一次エネルギー削減量とした場合の結果（27 需要家平均）

ラジエータ	搭載		非搭載	
補助熱源器	従来型	潜熱回収	従来型	潜熱回収
一次エネルギー削減量 [GJ/year]	9.3	10.8	9.3	10.8
一次エネルギー削減率 [%]	10.3	12.1	10.3	12.1
CO_2 排出削減量 [kgCO_2/year]	555	620	555	620
CO_2 排出量削減率 [%]	11.2	12.5	11.2	12.5



(a)　一次エネルギー削減量　　(b)　CO_2 排出削減量

図 3.20　評価関数を CO_2 排出削減量とした場合の各削減量



(a)　一次エネルギー削減率　　(b)　CO_2 排出量削減率

図 3.21　評価関数を CO_2 排出削減量とした場合の各削減率

表 3.8　評価関数を CO_2 排出削減量とした場合の結果（27 需要家平均）

ラジエータ	搭載		非搭載	
補助熱源器	従来型	潜熱回収	従来型	潜熱回収
一次エネルギー削減量 [GJ/year]	10.4	11.7	10.4	11.7
一次エネルギー削減率 [%]	11.6	13.1	11.6	13.1
CO_2 排出削減量 [kgCO_2/year]	645	708	637	700
CO_2 排出量削減率 [%]	13.1	14.4	13.0	14.3

表 3.9　評価関数を一次エネルギー削減量から CO_2 排出削減量に変更した場合の各削減量・削減率の変化（27 需要家平均）

ラジエータ	搭載		非搭載	
補助熱源器	従来型	潜熱回収	従来型	潜熱回収
一次エネルギー削減量 [GJ/year]	1.1	0.9	1.1	0.9
一次エネルギー削減率 [point]	1.3	1.0	1.3	1.0
CO_2 排出削減量 [kgCO_2/year]	90	88	82	80
CO_2 排出量削減率 [point]	1.9	1.9	1.8	1.8

評価関数を CO_2 排出削減量とした場合、一次エネルギーに関してはほとんど差異がないが、CO_2 排出削減に関してはラジエータ搭載の優位性が確認できる。このことから、熱を廃棄しながらの運転では、一次エネルギーの削減については向上がほとんど望めないが、CO_2 排出削減に関しては向上する場合があることがわかる。

表 3.9 に評価関数を一次エネルギー削減量から CO_2 排出削減量に変更した場合の各削減量・削減率の変化を示す。評価関数は一次エネルギー削減量を適用するよりも CO_2 排出削減量を適用する方が優位である。これは、一次エネルギー削減量で運転を評価した場合、評価期間後に発生する（特に）給湯需要は運転計画の評価に反映されないので、運転時間が短くなる傾向が現れ、CO_2 排出削減量で評価した場合、電力需要が大きければ運転が継続され易い傾向となるので、年間で評価した場合にこのような結果になると考えられる。

具体的には以下の通りである。

本論文の条件、発電所の CO_2 排出係数 555 gCO_2/kWh，都市ガス CO_2 排出係数 0.0506 gCO_2/kJ を用いて、家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの発電に伴う CO_2 排出量と、家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの発電電力と同じ電力を発電するために発電所から排出される CO_2 量が等しくなる PEFC 発電効率 η_{Efc}[%]は、

$$\frac{G_E}{\eta_{Efc}} \times 3600 \times 0.0506 = G_E \times 555 \cdots\cdots (3.29)$$

となり、32.8 %という結果が得られる。即ち、PEFC の発電効率が 32.8 %を超える発電電力以上での運転であれば排熱の利用がなくても CO_2 排出量削減となることを意味し、今回想定した PEFC では定格発電時の効率にほぼ相当する。その一方、PEFC の定格運転時の効率であっても発電所より発電効率はかなり低く、排熱の有効利用がなければ一次エネルギーの削減が期待できないことになる。

よって、CO_2 排出量で運転計画を評価すると給湯需要が小さくても電力需要が大きければよいので運転時間が長くなる傾向、一次エネルギーで評価すると熱需要も必要になるので運転時間が短くなる傾向が現れる。

シミュレーションの結果、評価期間後に発生する給湯需要が運転計画の評価に反映されないことは、DSS 運転方法の本質（1 日の給湯需要を賄うような運転時間帯を決定すること）であるが、その 1 日以降への配慮が全くなされないことが、最大の欠点であることがわかった。

3.4. 結言

従来システムである商用電力と瞬間式ガス給湯器を基準として、低炭素社会実現のため導入が進められている潜熱回収型給湯器と自然冷媒ヒートポンプ式給湯器、さらに家庭用 PEFC コージェネレーションシステムについて、導入した場合の一次エネルギー削減量と CO_2 排出削減量を提案したシミュレーションモデルにより比較・評価した。

現在、家庭部門における高効率のエネルギーシステムとして導入が進められている自然冷媒ヒートポンプ式給湯器では CO_2 排出量削減率として 6.4～17.1 %が得られるという結果となった。新たな政府削減目標の内、排出枠取引を除外した実質の削減目標は 10～15 %程度といわれている。今回の評価では、自然冷媒ヒートポンプ式給湯器については無視した損失等があり、実際はこの数値より劣ると考えられるが、それらの損失を無視した今回の評価であっても CO_2 排出削減率は平均で 10.0 %程度であり、CO_2 排出削減率 25 %（真水分 15 %程度）の達成には、自然冷媒ヒートポンプ式給湯器の導入だけでは困難と判断される結果が得られた。

これに対して、DSS 運転による家庭用 PEFC コージェネレーションシステムを導入した場合には、今回の評価モデルとして想定した程度の PEFC 性能でも、7.1～21.7 %（ラジエータ、潜熱回収給湯器搭載、CO_2 評価運転）の CO_2 排出量の削減が可能であることが明らかとなった。また、今回提案した運転計画法によれば評価関数を CO_2 排出削減量とすることで，一次エネルギー削減量が極大値とはならないものの CO_2 排出量を大幅に削減できることを示した。加えて、家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの構成として、ラジエータ搭載の有効性も同時に明らかとなった。家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの CO_2 排出量削減率が最も高くなった構成は、ラジエータ搭載、潜熱回収型補助熱源器、CO_2 排出量を評価関数とした場合で、27 需要家平均 14.4 %となり、家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの導入により削減目標達成の可能性があることがわかった。

3.3.2.節で触れたように、本章で適用した家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの運転計画法には改善の余地が残されており、さらなる一次エネルギーと CO_2 排出量の削減が期待できる。

次章以降では、その運転計画法改善の手法および、その改善の効果について述べる。

4. 家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの実運用結果の評価

4.1. 緒言

本章では、過去に筆者が開発した運転計画方法による運転制御を搭載した家庭用コージェネレーションシステムのフィールドテスト結果について評価を行い、その効果を示す。

3 章で示したように家庭用 PEFC コージェネレーションシステムを実際の需要家に設置して、従来から適用され、文献(7)(8)等でも提案されている DSS 運転によれば、商用電力と従来ガス給湯器による従来の家庭用エネルギー供給システムを使用する場合と比較して、ある程度の省エネルギー性を発揮できるのみである。

それは、DSS 運転は 1 日の給湯需要を適切に賄うような運転時間帯を決定することを目的としており、それ以降の需給について何の考慮もしていないことにある。また、起動時の損失が大きいことを前提にすれば、できる限り起動回数を減らすことができるような運転計画法が必要である。加えて、部分負荷効率が低い場合は電力負荷に追従する運転が適切かどうかという検討も必要である。

そこで、より高い省エネルギー性を実現するため、特に家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの運転計画方法に注目した研究が進められてきた。PEFC の発電効率は、商用系統の発電効率と比較して低いので、その排熱を有効利用できない限り省エネルギーとならない。家庭用 PEFC コージェネレーションシステムに求められる運転計画方法は、従来の電力需給に追従して運転するだけではなく、熱の需給に従って運転、即ち、必要に応じて電力需要とは異なった発電電力で運転するものである。

本章で評価する家庭用コージェネレーションシステムは、上記したように排熱を有効利用することに主眼をおいた運転計画方法が搭載されたシステムである(10)~(13)。

もちろん家庭用 PEFC コージェネレーションシステムを数理モデルで表し、予測したエネルギー需要に対して数値解析的に最適な運転計画を立案することは可能である。しかし、現実には家庭での需要予測は難しいため、結果的には最適な運転とはならない。また、家庭用 PEFC コージェネレーションシステムは民生機器（いわゆる白物家電）であり、それほど高性能な演算性能は有していないため、商品に適用できるかどうかと

いう課題が現実問題として懸念される。本論文で提案する運転計画法は、最適解ではないにしても比較的よいと思われる運転計画を的確に選択、立案する手法である。

4.2. 評価対象とする家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの特徴

本章で評価対象とする図 3.15 に示した家庭用 PEFC コージェネレーションシステムには幾つかの特徴がある。

第 1 に、3.3.1.節で示したように、余剰電力処理ヒーターが搭載されていることである。この余剰電力処理ヒーターについて、詳細に説明を加えておく。通常、家庭用 PEFC コージェネレーションシステムで発生した余剰電力は再生可能エネルギーによる電力ではないため、商用系統に逆潮流することができない（技術的にできないのではない）。従って、系統への逆潮流を阻止するための何らかの手段が必要となる。

余剰電力処理ヒーターは、エコウイルという商品名で販売されている家庭用ガスエンジンコージェネレーションシステムで採用されている。このエコウイルは、部分負荷効率が低いため、定格出力でのみ運転するように設計されている。そのため、余剰電力処理機能が必須として搭載されている。

家庭用 PEFC コージェネレーションシステムは、電力需要に追従して発電電力を制御することが可能であるため、初期に試作された多くのシステムは、この余剰電力処理機能を搭載していなかった。しかし、電力需要に追従するように制御しても実際には逆潮流（いわゆる、染み出し）が発生し、その電力量は無視できないと考えられるようになり、余剰電力を熱として回収するために、余剰電力処理ヒーターが搭載されるようになった。

この余剰電力処理ヒーターを積極的に使う、即ち、発電電力が電力需要を上回るように出力制御することで熱電比を制御するような運転計画法を適用することで、より高い省エネルギーが達成できる可能性がある。

この運転計画のコンセプトは、排熱で賄いきれない給湯需要を、補助熱源器により賄うよりも余剰電力処理ヒーターで賄った方が省エネルギーであるならば、補助熱源器ではなく余剰電力処理ヒーターを用いるというものである。

小さな電力需要しかない場合、電力需要に追従する運転では効率が低くなる。しかし、大きな給湯需要が予想される場合、電力需要よりも大きな電力を発電し、余剰電力処理ヒーターにより熱を発生させることで給湯需要を PEFC からの熱出力（排熱とヒーターで発生した熱）で賄うことを可能にすると同時に、PEFC の総合効率（発電効率と排熱回収効率）を向上させることができる。

余剰電力処理ヒーターで発生する熱$H_p(t)$[kW]は、次式で求められる。ここで、電力需要を$D_E(t)$[kW]、給湯需要を$D_H(t)$[kJ]、余剰電力処理ヒーターの効率をη_{ht}とする。

$$H_p(t) = (G_E(t) - D_E(t)) \times \eta_{ht} \quad \cdots\cdots (4.1)$$

ただし、$G_E(t) - D_E(t) < 0$ の場合、$G_E(t) - D_E(t) = 0$ とする。

第 2 の特徴として、ラジエータが搭載されていることである。ラジエータは冷却水温度が上限を超えないようにするためのもので、このラジエータの働きについては、既に 3.3.1 節で述べた通りである。

4.3. 熱の需給を考慮した新たな運転計画法

運転計画法は、予測された給湯需要に合わせるように構成されている。それは、PEFC の発電効率は発電所の効率より低いからである。そのため、電力と給湯の需要予測が重要となる。ただし、需要予測方法については、本論文では言及しない。

提案する運転計画法のフローチャートを図 4.1 に示す。大きくは連続運転モードと不連続運転モードの 2 つの運転モードがあり、連続運転モードは、熱の需給に合わせてさらに 3 つの運転モードに分かれる。運転モード・運転計画の決定は、需要予測とともに PEFC の効率、起動ロス、待機電力、補助熱源器の効率等を反映して決定される。

連続運転モードとして電力負荷追従運転と全時間帯最小出力による抑制運転モードで運転した場合、一次エネルギーが最小になるように起動時刻と停止時刻を決定した不連続運転モードの 3 つのモードでの一次エネルギー量を、需要予測とシステムのパラメータに従って求め、比較し、連続運転モードか不連続運転モードのどちらが適当かを選択する。

不連続運転モードが選択された場合は、一次エネルギー削減量が最大となる起動時刻とその運転で得られる排熱量を求める。ただし、一次エネルギーを求める期間（評価期間）

は 24 時間、48 時間、72 時間である。この運転モードでは、評価期間は最大 72 時間にまで延長されるが、起動時刻と停止時刻は最初の 24 時間の範囲に限定される。

実運転では、求められた起動時刻に発電を開始し、電力需要に追従するように運転し、求められた排熱量を実際に回収した時点で発電を終了する。

連続運転モードが選択された場合は、熱の需給に合わせて 3 つの運転モードから適切な運転モードを選択する。排熱が余る場合は、出力を抑制し、廃棄する熱を減少させることで一次エネルギーが小さくなるように出力とその時間帯を選択し、決定する。逆に排熱が不足する場合は、出力を上昇させ、排熱量を増加させるとともに、余剰電力をヒーターで熱に変換し熱不足を解消することで一次エネルギーが小さくなるように出力とその時間帯を選択し、決定する。そして、その運転計画で求められた単位時間当たりの一次エネルギー削減量が最小となった値を求める。そして実運転では、求めた単位時間当たりの一次エネルギー削減量の最小値よりも一次エネルギー削減量が大きくなる出力が存在する場合、その時間帯はその出力で運転するようにする。

以上のような運転計画法により、不連続運転モードでは不完全ながら DSS 運転の課題の解決を、連続運転の出力上昇運転モードでは、効率の低い部分負荷運転を避けると同時にシステムの熱電比制御を、出力抑制運転モードでは、起動損失の低減を実現する。

表 4.1 に家庭用 PEFC コージェネレーションシステムのパラメータを示す。これらのパラメータの値は開発当時のシステムのものであり、3.3.1 節で示したパラメータの値とは異なり、例えば起動時の損失は大きい。

また、本章では、発電所の効率は、開発当時の「エネルギーの使用の合理化に関する法律施行規則」の値である η^{old}_{pp}=0.366 を適用し、給湯器の効率は、実機から得られた値である η_b=0.7 としている。また、配管等からの放熱量も同様にフィールドテストの結果から得られた 0.209 MJ/min を採用している。

図 4.2 に PEFC の効率特性を示す。図 3.16 に示した効率特性と比べると部分負荷時の効率が低い。

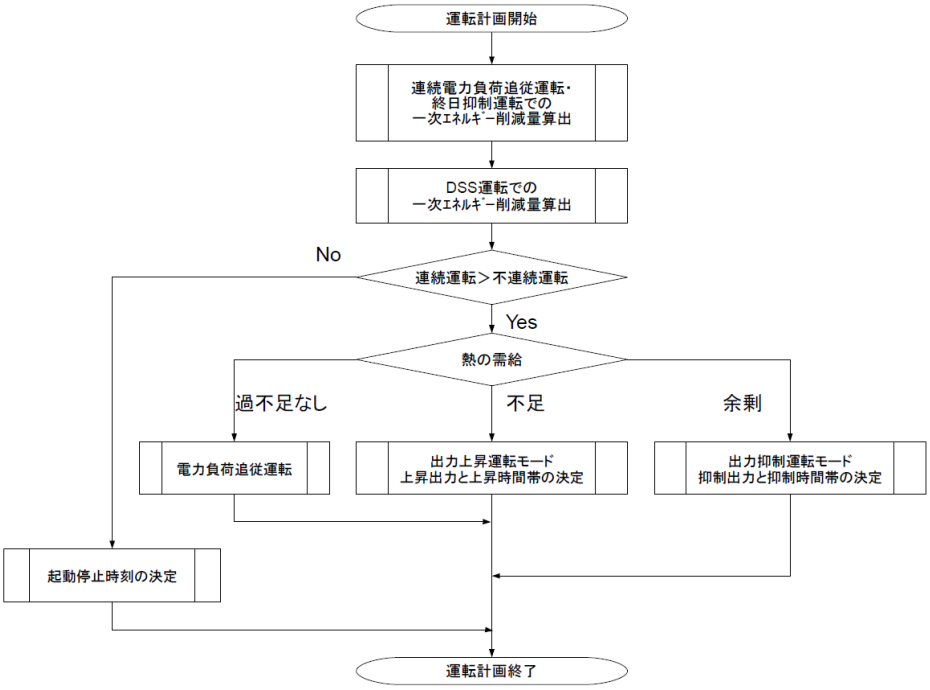


図 4.1　運転計画法のフローチャート

表 4.1　家庭用 PEFC コージェネレーションシステムのパラメータ

項目	値
定格発電電力/最小発電電力	750 W / 250 W
買い電力保証値	30 W
出力上昇速度	15 W/min
出力下降速度	60 W/min
起動時消費電力	0.7 kWh
起動時消費ガス	0.63 kWh
待機電力	45 W
貯湯容量	200 L
配管等からの放熱	0.209 MJ/min
貯湯槽からの放熱	貯湯熱量の 1.2 %/h

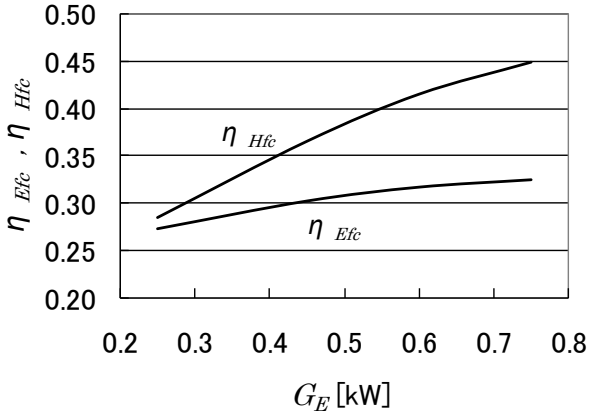


図 4.2　PEFC 効率特性

電力需要・給湯需要は共に年間の季節変化で変動するが、その変動幅は一般的に電力需要に比べて給湯需要の方が大きい。従って、運転計画法が様々な給湯需要の変化に対応できるのであれば、その運転計画法は年間を通じて有効に機能するということができる。

具体的には、例えば冬季のように大きな給湯需要が予測された時は、連続運転モードの電力負荷追従運転と余剰電力処理ヒーターを用いた出力上昇運転のどちらが適しているかを必要となる一次エネルギーを基準にして選択する。

夏季のように、連続運転モードでは熱が余ることが予測された時は、連続運転モードと不連続運転モードのどちらが適切か選択する。連続運転モードが選択された場合は、ラジエータを使って電力負荷追従運転した場合に必要となる一次エネルギー量と特定の時間帯にも出力抑制させて運転する出力抑制運転モードで必要となる一次エネルギー量を求め、それら運転モードの内で一次エネルギー量の小さな方を、連続運転モードでの運転計画として選択する。

なお、出力上昇運転モード、出力抑制運転モードでは、運転計画実行中 30 分毎に実際の貯湯熱量に従って、出力上昇、出力抑制する時間帯を再計算により調整するようにしている。

4.4. 実運転結果の評価

実際の PEFC システムでの運転と仮想的な従来運転とで運転条件を完全に合わせて直接比較評価することは困難なので、本節では、実際のシステムに関する評価は、実際の運転パターンを用いた運転シミュレーションを、予め取得した効率データ等のパラメータを適用することで、一次エネルギー量、CO_2 排出量を求めている。

4.4.1. 大きな給湯需要が予測された場合

実際のシステムでの運転結果を図 4.3 に示す。前章と同じく、電力需要 $D_E(t)$[kW]、給湯需要 $D_H(t)$[MJ]、時間帯初期貯湯熱量 $S_H(t)$[MJ]である。

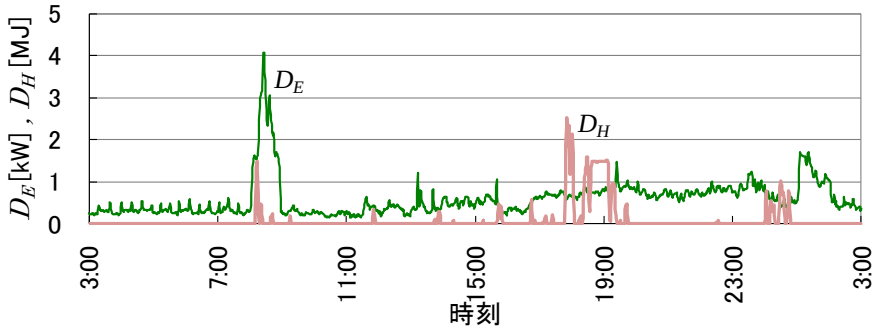
図 4.3(c)中の A_b で示される値は、補助熱源器の追いだき、即ち不足熱量（単位は MJ）で、次式により求められる。

$$A_b(t) = D_H(t) - S_H(t) \cdots\cdots (4.2)$$

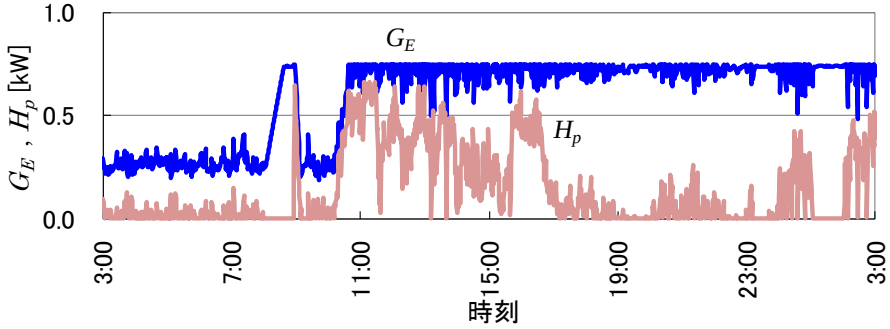
ただし、$D_H(t) - S_H(t) < 0$ の場合、$D_H(t) - S_H(t) = 0$ とする。

図 4.3(c)に示すように、この運転結果では、19:00 と 00:30 に補助熱源器が作動している。運転計画時に熱不足が発生することが予測されたため、図 4.3(b)に示すように 18:00 から発生する大きな給湯需要を予測したため、10：30 以降、電力需要以上の出力で発電を行い、余剰電力をヒーターによる熱 $H_p(t)$に変換し、貯湯熱量 $S_H(t)$の一部として貯湯される。その結果、従来の電力負荷追従運転と比べると補助熱源器で賄われる熱は減少する。

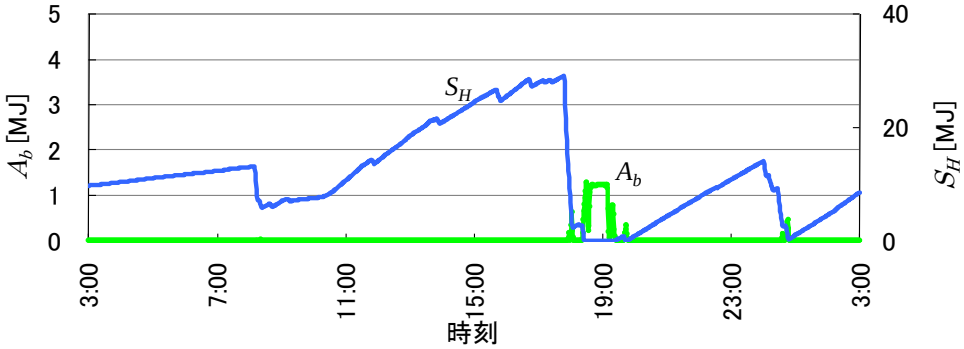
次に、図 4.4 に、図 4.3 と同じエネルギー需要に対して従来運転方法である電力負荷追従運転を行った場合の結果を示す。図 4.3(b)に比べて図 4.4(a)では電力負荷に追従した運転であるために、$Hp(t)$の発生量が少なくなっている。その結果、図 4.3(c)と比較して図 4.4(b)では 18:00 頃の補助熱源器で賄われる熱量が増加している。



(a)　エネルギー需要パターン



(b)　発電電力と余剰電力処理ヒーター出力

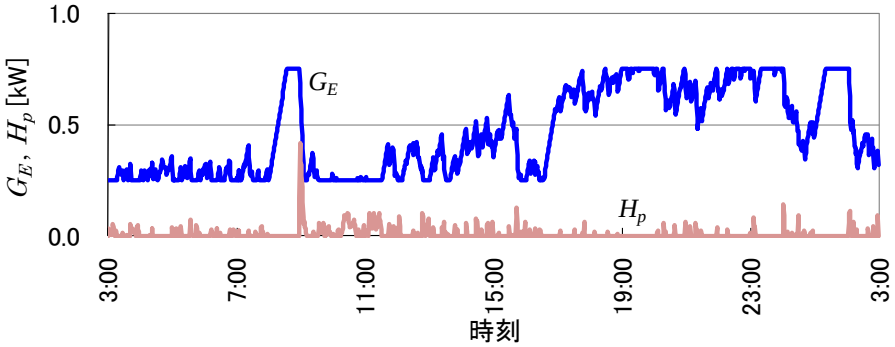


(c)　時間帯初期貯湯熱量と不足熱量

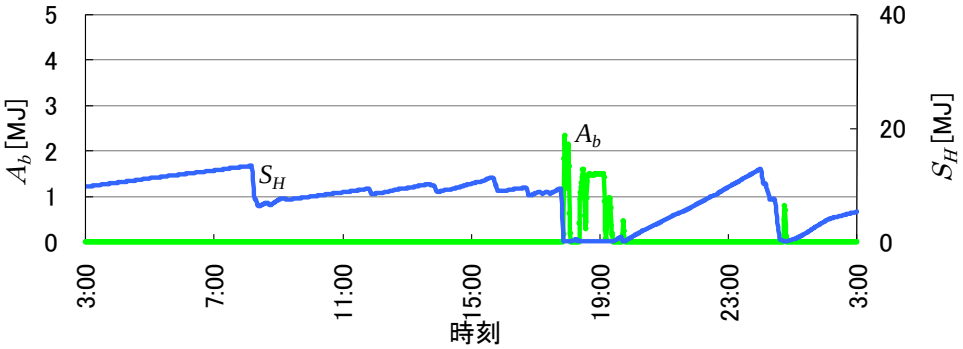
図 4.3　出力上昇モード

この運転結果と従来運転方式の比較結果を表 4.2 に示す。詳細に見ると、提案の運転方法では補助熱源器で消費される一次エネルギーは給湯器で消費される一次エネルギーと比較して 95.4 MJ/day 減少し、購入電力量は一次エネルギーで 112.1 MJ/day 減少する。その一方、PEFC に投入される一次エネルギーは 154.1 MJ/day となる。結果として、提案運転方法は従来システムに比べて、一次エネルギーで 53.4 MJ/day の削減が実現されている。

同様に、従来の運転方法と比べると、購入電力の一次エネルギーは 5.0 MJ/day 減少し、補助熱源器での一次エネルギー消費は 33.3 MJ/day 減少するが、その一方、PEFC に投入される一次エネルギーは 23.2 MJ/day 増加する。結果として、15.1 MJ/day の一次エネルギーが削減される。



(a)　発電電力と余剰電力処理ヒーター出力



(b)　時間帯初期貯湯熱量と不足熱量

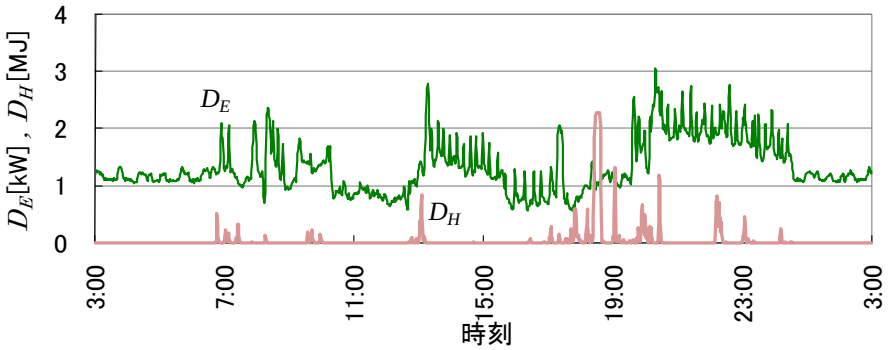
図 4.4　電力負荷追従運転

表 4.2　提案運転計画法と電力負荷追従運転との比較

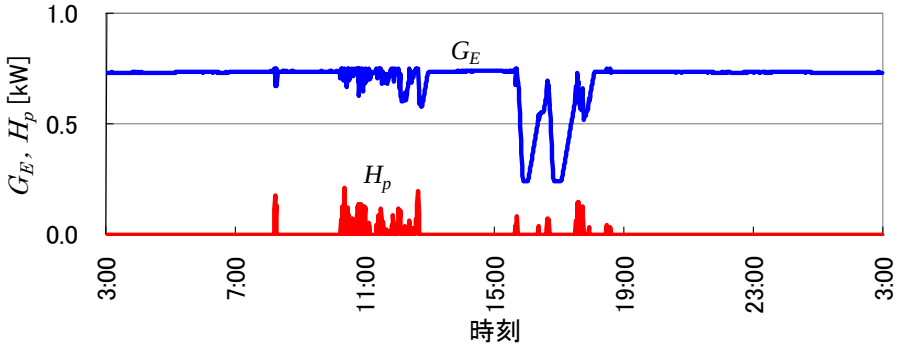
	一次エネルギー削減量 [MJ/day]	一次エネルギー削減率 [%]	CO_2 排出削減量 [kgCO_2/day]	CO_2 排出削減率 [%]
提案運転方法 出力上昇モード	53.4	15.9	3.35	18.9
従来運転方法 電力負荷追従運転	38.3	11.4	2.56	14.4

4.4.2. 小さな給湯需要が予測された場合

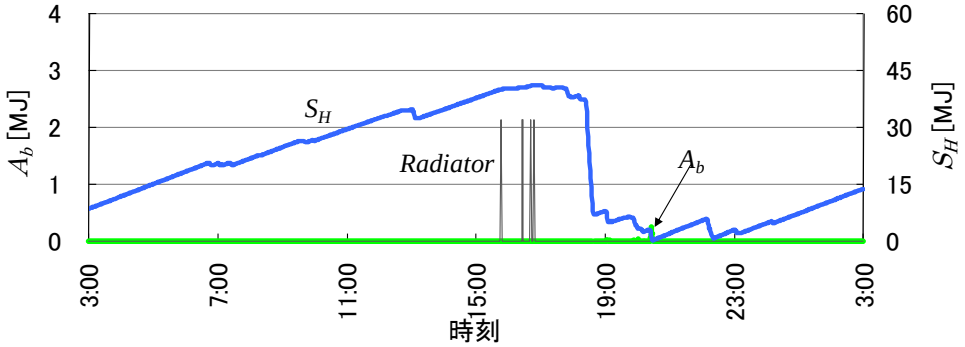
実際の運転例を図 4.5 に示す。図 4.5(c)に示すように 16:00 から 17:00 の時間帯で度々ラジエータが作動している。そして、ラジエータの作動と同期するタイミングで熱の余剰を極力減らすために発電電力が抑制されている。熱を捨てながら連続運転をしているのは、起動に伴う損失が廃棄するエネルギーよりも大きいと運転計画時に判断されたからである。



(a)　エネルギー需要パターン



(a)　発電電力と余剰電力処理ヒーター出力



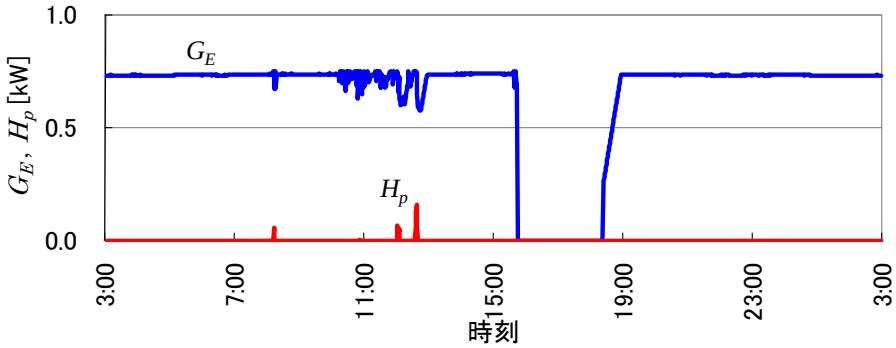
(c)　時間帯初期貯湯熱量と不足熱量

図 4.5　出力抑制モード（ラジエータ搭載）

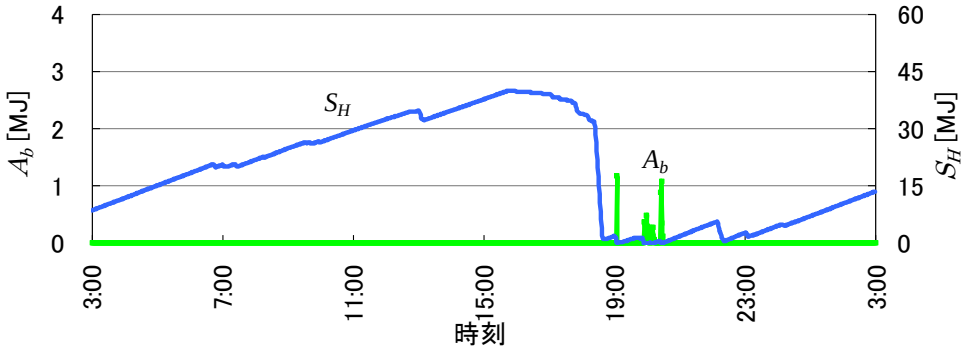
比較の運転例として、ラジエータ非搭載のシステムを想定した運転結果を図 4.6 に示す。

図 4.6(b)に示すように 15：45 頃に貯湯槽は温水で満蓄状態となり、PEFC は停止せざるを得ない状態となる。一旦停止すると、貯湯槽に十分な空きができるまで起動できず、起動時には 9.2 MJ の一次エネルギーが必要となる。

表 4.3 に評価結果を示す。この値の詳細は、提案運転計画方法では、従来システムと比べると、従来システムの給湯器に比べて補助熱源器で消費される一次エネルギーは 95.8 MJ/day 減少し、購入電力の一次エネルギーは 166.3 MJ/day 減少する。その一方、PEFC で一次エネルギーを 187.4 MJ/day 消費する。その結果、一次エネルギーを 74.7 MJ/day 削減できる。



(a)　発電電力と余剰電力処理ヒーター出力



(b)　時間帯初期貯湯熱量と不足熱量

図 4.6　電力負荷追従運転（ラジエータ非搭載）

表 4.3　提案運転計画法（ラジエータ搭載）と電力負荷追従運転（ラジエータ非搭載）との比較

	一次エネルギー削減量 [MJ/day]	一次エネルギー削減率 [%]	CO_2 排出削減量 [CO_2/day]	CO_2 排出削減率 [%]
提案運転方法 出力抑制運転モード ＋ラジエータ搭載	74.7	18.4	4.75	21.2
従来運転方法 電力負荷追従運転＋ ラジエータ非搭載	55.6	13.7	3.65	16.3

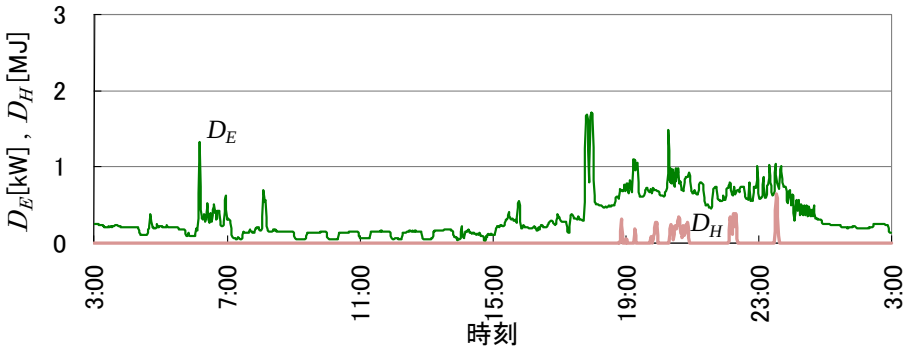
同様に図 4.6 に示したラジエータ非搭載システムでの電力負荷追従運転と比較すると、補助熱源器で消費される一次エネルギーが 9.9 MJ/day が減少し、購入電力の一次エネルギーは 22.3 MJ/day 減少する。その一方、PEFC へ投入する一次エネルギーは 13.1 MJ/day 増加する。結果として、19.1 MJ/day の一次エネルギーの消費を減少させることができる。

さらに、別の運転例として給湯需要が非常に小さい場合を図 4.7 に示す。PEFC は 14：10 頃に運転を開始し、22：10 頃に停止している。連続運転ではラジエータで廃棄する熱が PEFC の起動に要するエネルギーより大きくなる例である。このような場合は、電力需要の大きな時間帯で給湯需要の直近のみ運転することになる。また、貯湯槽に当日予測された給湯需要を賄うだけの十分な貯湯がある場合、当日は起動しないということもあり得る。そのような場合、1 回の運転で 2 日分の給湯需要を賄うような運転が選択される場合もある。

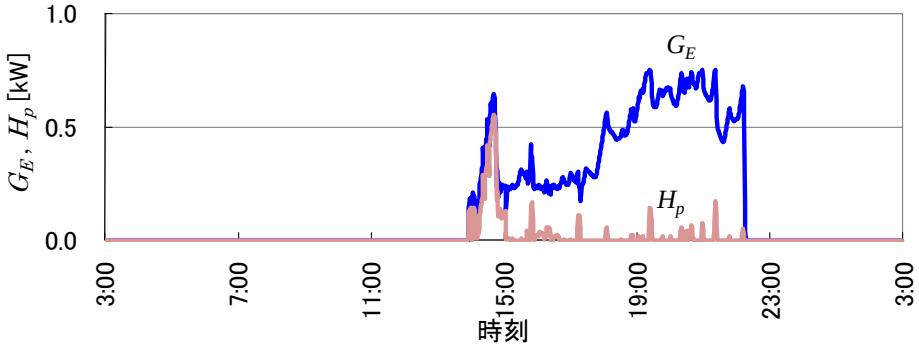
図 4.8 に従来運転計画法の例として電力負荷追従運転の場合を、表 4.4 に提案の運転計画法と電力負荷追従運転の結果の比較を示す。この値の詳細は、提案運転計画方法では、従来システムに比べると、給湯器に比べて補助熱源器で消費される一次エネルギーは 22.0 MJ/day 減少し、購入電力の一次エネルギーは 19.4 MJ/day 減少する。その一方、PEFC で一次エネルギーを 40.1 MJ/day 消費する。その結果、一次エネルギーを 1.3 MJ/day 削減できる。

同様に電力負荷追従運転と比較すると、PEFC へ投入する一次エネルギーは 63.1 MJ/day 減少する。その一方、補助熱源器で消費される一次エネルギーが 1.5 MJ/day 増加し、購入電力の一次エネルギーは 48.8 MJ/day 増加する。結果として、

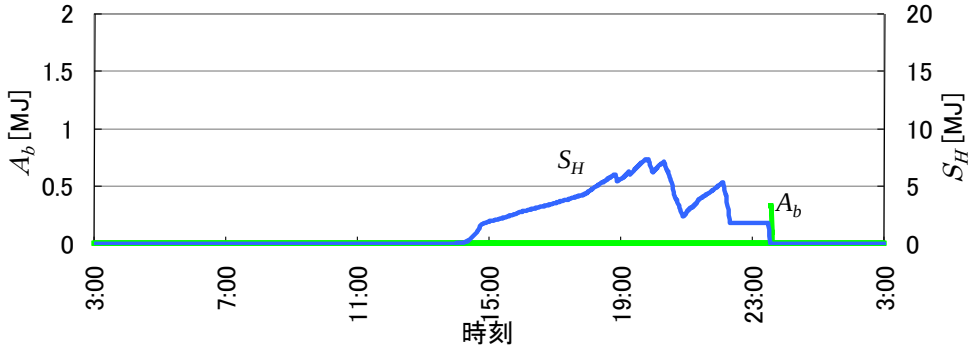
12.8 MJ/day の一次エネルギーの消費を減少させることができる。この例では、家庭用 PEFC コージェネレーションシステムを導入しても電力負荷追従運転であれば、従来システムより一次エネルギーの消費は増えてしまう。提案の運転計画法によれば、運転時間が極めて短いが、従来システムとほぼ同等の一次エネルギーとなる。



(a)　エネルギー需要パターン

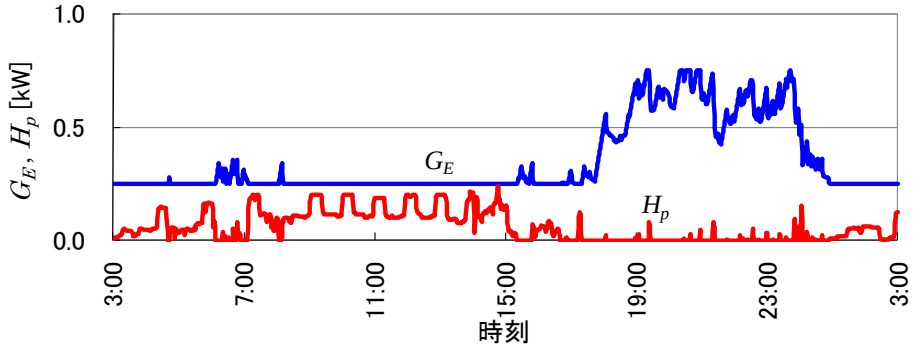


(b)　発電電力と余剰電力処理ヒーター出力

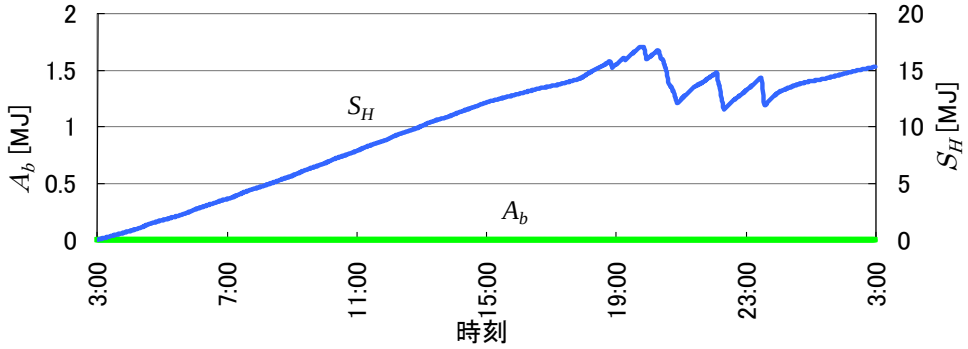


(c)　時間帯初期貯湯熱量と不足熱量

図 4.7　不連続運転



(a)　発電電力と余剰電力処理ヒーター出力



(b)　時間帯初期貯湯熱量と不足熱量

図 4.8　電力負荷追従運転

表 4.4　提案運転計画法（ラジエータ搭載）と電力負荷追従運転（ラジエータ非搭載）との比較

	一次エネルギー削減量 [MJ]	一次エネルギー削減率 [%]	CO_2 排出削減量 [kgCO_2/day]	CO_2 排出削減率 [%]
提案運転方法 出力抑制運転モード ＋ラジエータ搭載	1.3	1.3	0.18	3.2
従来運転方法 電力負荷追従運転＋ ラジエータ非搭載	-11.5	-11.3	-0.19	-3.4

4.5. 結言

予測した給湯需要に従って、運転モードを切り替える提案の運転計画法は、高い省エネルギー性を発揮することを実証した。

大きな給湯需要が予測された場合は、出力上昇モードを選択し、計画的に作り出した余剰電力をヒーターによって熱に変換することで、一次エネルギー削減量は 53.4 MJ/day、一次エネルギー削減率は 15.9 %となった。大きな電力需要と小さな給湯需要が予測された場合は、ラジエータによる連続運転モード（出力抑制運転モード）を選択し、一次エネルギー削減量は 74.7 MJ/day、一次エネルギー削減率は 18.4 %となった。小さな電力需要と給湯需要が予測された場合は、不連続運転モードを選択し、一次エネルギー削減量は 1.3 MJ/day、一次エネルギー削減率は 1.3 %となった。

PEFC 開発の進捗に伴い、起動損失や待機電力の低減、起動停止に対する信頼性向上しつつある。起動損失の低減により出力抑制運転モードにより効率の低い部分負荷であえて運転を継続する必要性が低くなり、部分負荷効率の向上により、効率の低い部分負荷での運転を回避し、効率の高い高出力で運転しながら価値の高い電気を価値の低い熱に変換するような出力上昇運転モードによる運転の必要性も薄れつつある。

次章では、そのような PEFC の開発進捗に合わせて、長周期の運転評価期間を持つ不連続運転を基本とした、連続運転を包含した新たな運転計画法と、出力上昇運転を応用した蓄電池搭載システムの運転計画法を提案し、その有効性を評価する。

5. 家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの改善

5.1. 緒言

3 章では、家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの導入効果について一通りの評価を行ったが、その運転計画法は従来から広く採用されている DSS 運転計画法によるものであり、家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの性能を必ずしも生かしたものであるとは言えない。4 章では、実機に搭載された文献(10)~(13)に示される運転計画法の有効性を、フィールドテスト結果を評価することにより確認したが、最近の PEFC の開発進捗による部分負荷効率の向上、起動損失の減少等により、4 章で示した運転計画法が整合しているとは言えない状況になりつつある。

家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの運転計画法として、例えば文献(30)(31)で示されているものがあるが、いずれも 1 日を周期として運転計画を立案することを基本としている。例えば、文献(30)では 1 日を 7 時~12 時、12 時~お湯張り開始時刻、お湯張り開始時刻~2 時の 3 つの時間帯に区切って起動判定を行うことで、DSS 運転に近い運転計画を行っている。文献(31)では確率計画法により最適な運転計画を求めるようにしている。明確に 1 日周期に限定した運転計画法であるとの記述はないが、示されている数値実験の結果等から、運転計画の最適化対象期間は 1 日であると判断される。しかし、1 日に複数回の起動を許容するような運転計画を行っており、PEFC との適合性に疑問が残る。

家庭用 PEFC コージェネレーションシステムは、排熱を蓄える貯湯槽が回収した排熱で満畜状態になり PEFC を停止させるか、排熱を有効利用せずにラジエータで廃棄させながら運転するかを選択しなければならない。また、温水として貯湯槽に蓄熱した排熱は、給湯需要として利用されるか放熱により温度低下しない限り貯湯槽に残り続ける（もし残った貯湯を後の時間に有効利用できたなら、その有効利用できた熱量は正当に評価すべきである）。この 2 点に着目し、DSS 運転計画法に相当する 24 時間の運転計画を内包しながら、より長期間である 48 時間の運転計画期間とその運転計画を評価する期間を持つ、新たな運転計画方法を提案し、3 章で得られた評価結果と比較し、提案運転計画法の優位性を検証する[14]。

さらに本章では、家庭用 PEFC コージェネレーションシステムへの蓄電池搭載に関する提案を行う。

従来、家庭用エネルギー供給システムに適用可能な高性能蓄電池は開発途上であったため、非常に高価で耐久性等にも課題が残されていた。そのため、蓄電池は実際には非常用等の高付加価値用途を除くと普及が進んでいなかった。近年、ハイブリッド自動車（HV）や電気自動車（Pure EV）の開発が急激な速度で進められており、蓄電池の高性能化、コストダウン等の技術開発の進捗もそれに伴って急速に進んでいる。移動体用蓄電池と蓄電システムをはじめとする定置用蓄電池とでは、蓄電池に対する要求仕様が異なるが、一般的には移動体用に比べると定置用の蓄電池への技術的要求は低い。そのため、今後は移動体用蓄電池をそのまま適用した、またはその技術を応用した定置用蓄電システムの開発、普及が期待できる状況となった。

その一方、家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの導入効果を向上させる提案として、蓄電池やキャパシタ等の蓄電素子を搭載する提案が文献(15)(16)等でなされている。しかし、いずれも電力の需給にのみ重点が置かれており、熱の需給を考慮した制御方法が提案されていない。

家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの導入効果の向上を図るべく、蓄電池をシステムに適用した、蓄電池を熱主運転の中で有効活用する新しい運転計画方法を提案し、その評価も合わせて行う。具体的には、家庭用 PEFC コージェネレーションシステムに従来の鉛蓄電池等と比べて高性能で、かつ、今後大幅な低価格化が期待される大容量リチウムイオン蓄電池を搭載したシステムを想定し、このシステムで消費する一次エネルギーと CO_2 排出量の削減効果をシミュレーションにより評価する。さらに蓄電池導入効果を向上させる家庭用コージェネレーションシステムの運転計画法を提案し、その運転方法適用の効果を示す。

5.2. 運転計画法の改善によるシステム導入効果の向上

5.2.1. 運転計画法の提案

3 章で評価を行った家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの運転計画法では、運転計画を立てる時間帯とその計画を評価する時間帯が 24 時間で一致しており、家庭用コージェネレーションシステムの特徴である温水が貯湯槽に存在している期間全体に亘って運転に影響を与えることについて考慮していなかった。

「影響を与える」とは、次のような意味を持つ。PEFC の発電効率は、商用電力の発電効率より低いため、排熱の有効利用を図らない限り、省エネルギー・省 CO_2 を達成できない。しかし、貯湯槽が一杯になってしまうとそれ以降、発生した熱はラジエータで廃棄されるだけで省エネルギー・省 CO_2 には貢献しない。また別の側面として、貯湯槽に蓄えられた排熱が利用されるタイミングは、当日に限らず翌日（24 時間の運転評価期間外）の可能性もある。もし、翌日までの放熱量を考慮しても、翌日に利用される給湯需要に備えて貯湯した方が有利なら、そのような運転計画が選択されるべきである。しかし、運転計画期間と評価期間が 24 時間で一致している場合は、翌日の評価ができないために、本来なら評価されるべき運転計画が正しく評価されず、家庭用 PEFC コージェネレーションシステムが本来持っている省エネルギー・省 CO_2 の効果を生かすことができなくなる場合が存在する。

そこで 48 時間先までの影響を運転計画に反映できる方法を新規に考案し、シミュレーションに適用した。なお、48 時間までとしたのは、それ以上長い期間では貯湯槽からの放熱量が大きくなるため、例えば 72 時間のような長期間を考慮した運転計画は成立し難くなるからである。

図 5.1 にその運転計画法のフローチャートを示す。

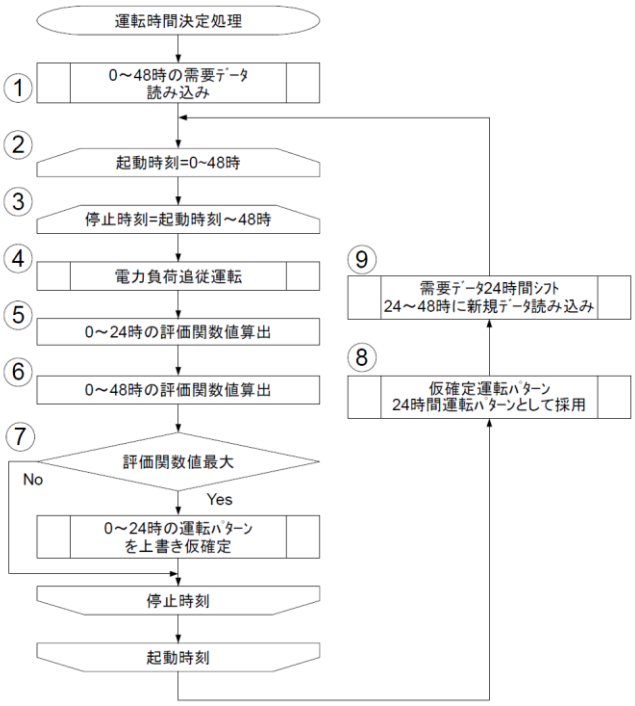


図 5.1　提案運転計画法のフローチャート

運転計画は、①48 時間分の電力・給湯需要予測データを読み込む。②運転開始時刻を 0 時～48 時までの任意の時刻に定め、③停止時刻を運転開始時刻以後、48 時までの時刻に任意に定める。④仮決定した運転時間帯を電力需要追従運転した場合のシミュレーションを行う。⑤シミュレーション結果に従い評価期間が 24 時間の評価関数の値、⑥評価期間が 48 時間の評価関数の値を求め、⑦評価関数の最大値を検索（逐次比較）し、⑧最終的に得られた運転計画の 0 時～24 時の部分を運転計画として採用する。⑨続く 24 時間分の電力・給湯需要予測データを読み込み新たな 48 時間分のデータとして運転計画を繰り返す。

なお、運転計画の評価に用いる評価関数は(3.22)(3.23)式が適用される。これらの式は評価期間が 24 時間の場合で表されているが、評価期間が 48 時間の場合は積算期間が 48 時間となり、得られた評価値を 2 で除して 24 時間平均の値として用いる。

⑤の工程で求めた評価関数値が最大のものをそのまま運転計画として選択すると、評価期間より長い期間で再評価すると適切な運転計画にならない場合が存在する。具体的には、24 時間の期間の終盤で停止するような運転計画では 24 時間の評価期間内では次回起動時の起動ロスが発生しないために、評価関数に対して停止することがマイナス要因とならず、そのような運転計画が適切な運転計画として選択される場合がある。しかし、実際には後の評価周期の運転計画では必ず起動損失が発生するため、その期間では評価関数に対して停止したことがマイナスの評価となる。その結果、24 時間より長い期間で見ると、必ずしも適切な結果とはならない。このような不整合を回避するため、24 時間以内に停止する運転計画とそうでない運転計画の評価関数値を比較する場合には、閾値として次回の起動損失に相当する値を設ける必要がある。具体的には、24 時間以内に停止するような運転計画で得られる F_{24} と 24 時間時間以内に停止しない運転計画で得られる F_{48} を比較する場合、次回起動時に必要となる一次エネルギー E_{up} を閾値として、$F_{24}+E_{up}$ と F_{48}（24 時間平均）を比較することとなる。

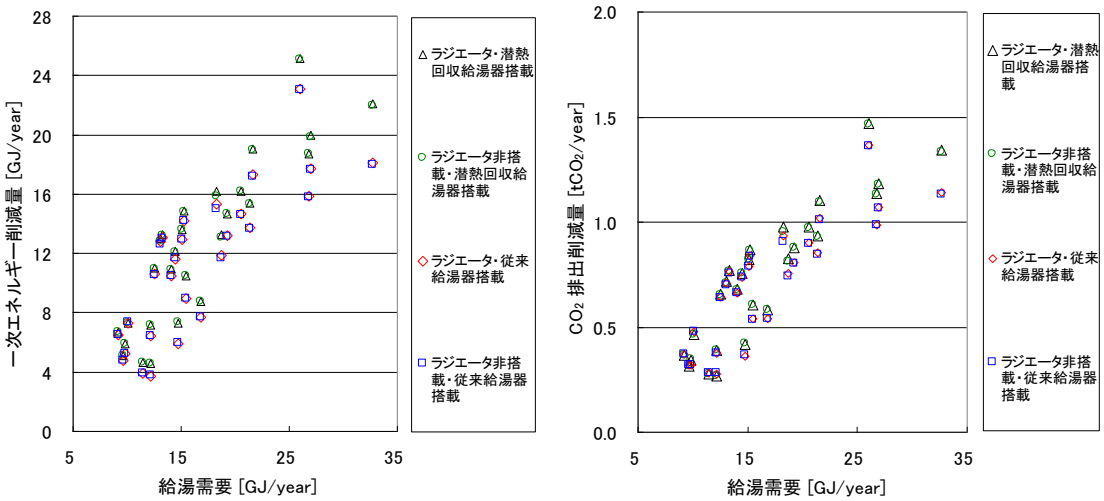
48 時間の終盤で停止する運転計画の場合も同様の事態が起こりえるが、⑧の工程では最初の 24 時間分の運転計画のみ採用するので、結果的に不整合は発生しないことになる。

5.2.2. 提案運転計画法の評価

商用電力・ガス給湯器を従来システムとして基準に置き、提案運転計画法を搭載した家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの導入による一次エネルギー削減量（率）と CO_2 排出量削減量（率）で評価した。提案の運転計画法は DSS 運転と同じく、熱の需給バランスで運転時間が定まるため熱主運転のシステムとして扱って問題は無いと考えられる。よって、評価結果は年間給湯需要と強い相関関係があることが必然的に予想されることから、年間給湯需要の関数として結果を評価する。

図 5.2 に家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの運転計画の評価関数を一次エネルギー削減量とした場合の一次エネルギー削減量と CO_2 排出削減量を、図 5.3 に同条件での各削減率を、表 5.1 に 27 需要家での平均値を示す。

補助熱源器の仕様の差異による影響は、一次エネルギー削減率と CO_2 排出量削減率それぞれについて、概ね 1 ポイント前後の向上が確認できる。補助熱源器は、排熱による貯湯で給湯需要を賄えない場合にのみ作動するものであるので、傾向として湯切れの発生しやすい給湯需要の大きい需要家では補助熱源を潜熱回収型給湯器とする効果は大きく、給湯需要の小さな需要家では効果は小さくなる。

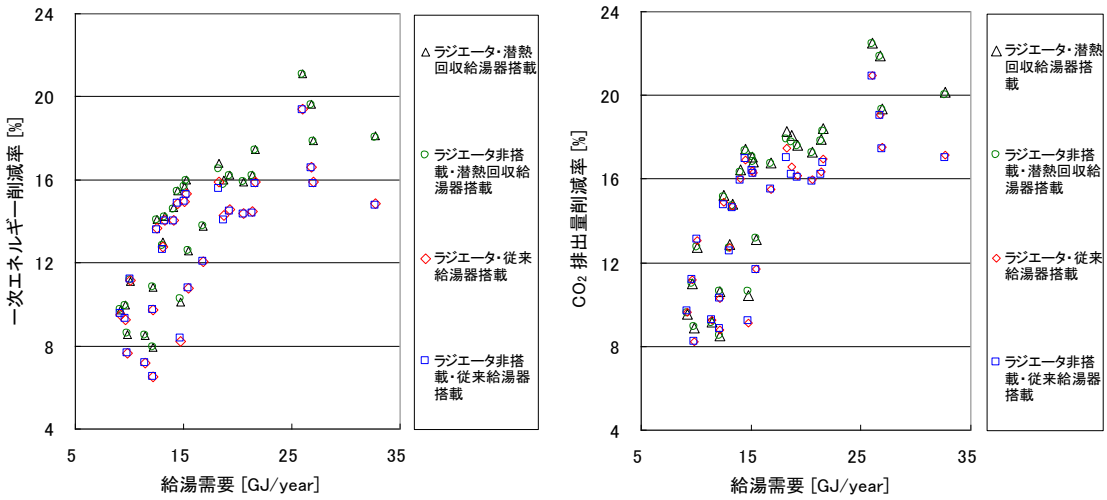


(a)　一次エネルギー削減量　　(b)　CO_2 排出削減量

図 5.2　評価関数を一次エネルギー削減量とした場合の各削減量

ラジエータ搭載の有無に関しては、評価関数が一次エネルギー削減量でエネルギー需要が既知であるとした評価なのでその差は小さいが、それでも CO_2 排出削減量の値を大きくすることに関して、ラジエータ搭載システムの優位性が確認できる。

表 5.2 に 3 章で表 3.7 に示した評価結果と比較した結果を示す。一次エネルギー削減率では 2.0~2.6 ポイント、CO_2 排出量削減率では 2.7~3.2 ポイント向上する。特に、補助熱源器として従来型給湯器を搭載しているシステムに提案の運転計画法を適用した場合の向上が大きい。



(a)　一次エネルギー削減率　　(b)　CO_2 排出量削減率

図 5.3　評価関数を一次エネルギー削減量とした場合の各削減率

表 5.1　評価関数を一次エネルギー削減量とした場合の結果（27 需要家平均）

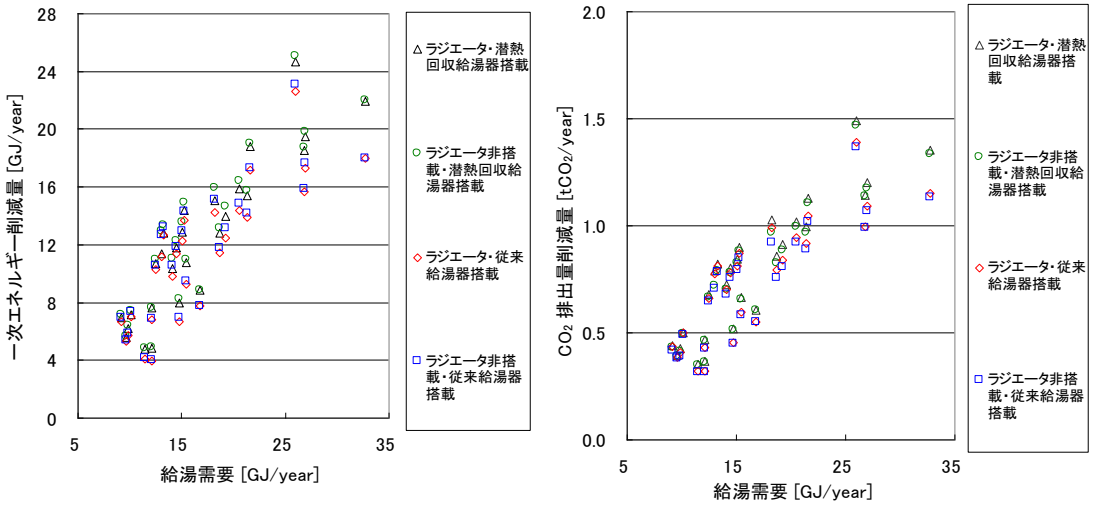
ラジエータ	搭載		非搭載	
補助熱源器	従来型	潜熱回収	従来型	潜熱回収
一次エネルギー削減量 [GJ/year]	11.4	12.5	11.3	12.4
一次エネルギー削減率 [%]	12.9	14.1	12.8	14.1
CO_2 排出削減量 [$kgCO_2$/year]	698	745	694	742
CO_2 排出量削減率 [%]	14.4	15.3	14.3	15.2

表 5.2　運転方法改善による各削減量・削減率の向上

ラジエータ	搭載		非搭載	
補助熱源器	従来型	潜熱回収	従来型	潜熱回収
一次エネルギー削減量 [GJ/year]	2.1	1.7	2.0	1.6
一次エネルギー削減率 [point]	2.6	2.0	2.5	2.0
CO_2 排出削減量 [$kgCO_2$/year]	143	125	139	122
CO_2 排出量削減率 [point]	3.2	2.8	3.1	2.7

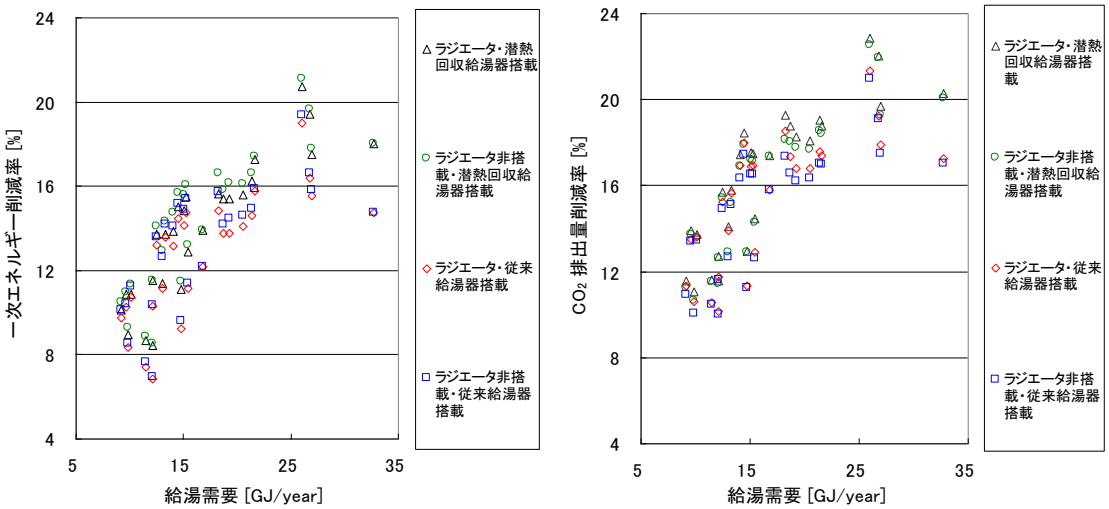
全く同じシステム構成で、運転計画評価期間を 24 時間から 48 時間に延長し、24 時間以内に停止する運転に対しては、次回起動時に発生する損失を閾値として設ける提案の運転計画法を適用すれば、このような改善が実現できる。

次に、図 5.4 に家庭用 PEFC コージェネレーションシステムで評価関数を CO_2 排出削減量とした場合の一次エネルギー削減量と CO_2 排出削減量を、図 5.5 に同条件での各削減率を、表 5.3 に 27 需要家の平均値を、表 5.4 に表 5.1 に示した値との比較を示す。



(a)　一次エネルギー削減量　　(b)　CO_2 排出削減量

図 5.4　評価関数を CO_2 排出削減量とした場合の各削減量



(a)　一次エネルギー削減率　　(b)　CO_2 排出量削減率

図 5.5　評価関数を CO_2 排出削減量とした場合の各削減率

一次エネルギー削減量については、ラジエータ搭載システムでは評価関数を一次エネルギー削減量から CO_2 排出削減量としたことで減少がみられるが、CO_2 排出削減量は大幅に向上している。実際の運転では、シミュレーションで考慮していない需要予測のずれ、外れが発生するのでラジエータ搭載の効果は更に大きくなることが予想される。

次に、表 5.5 に 3 章で表 3.8 に示した評価結果と比較した結果を示す。全ての削減量・削減率で、向上が確認できるが、表 5.2 に示した評価関数を一次エネルギー削減量とした場合よりはその向上は小さい。これは、3 章で適用した運転計画法では評価関数を一次エネルギー削減量とすることが適切ではないような結果が得られたのに対して、本章で提案する運転計画法では、評価関数による結果の差異が小さくなっているからである。

表 5.3　評価関数を CO_2 排出削減量とした場合の結果（27 需要家平均）

ラジエータ	搭載		非搭載	
補助熱源器	従来型	潜熱回収	従来型	潜熱回収
一次エネルギー削減量 [GJ/year]	11.2	12.3	11.5	12.7
一次エネルギー削減率 [%]	12.7	13.9	13.1	14.4
CO_2 排出削減量 [$kgCO_2$/year]	740	793	719	774
CO_2 排出量削減率 [%]	15.4	16.5	15.0	16.1

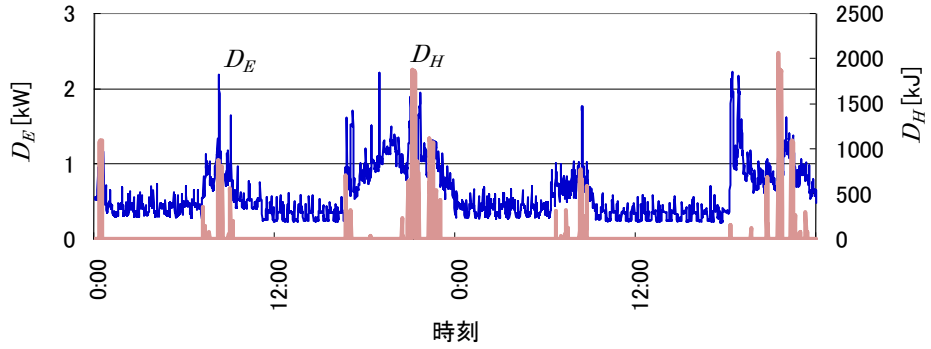
表 5.4　評価関数を一次エネルギー削減量から CO_2 排出削減量に変更した場合の各削減量・削減率の変化（27 需要家平均）

ラジエータ	搭載		非搭載	
補助熱源器	従来型	潜熱回収	従来型	潜熱回収
一次エネルギー削減量 [GJ/year]	-0.2	-0.2	0.2	0.3
一次エネルギー削減率 [point]	-0.2	-0.2	0.3	0.3
CO_2 排出削減量 [$kgCO_2$/year]	42	48	25	32
CO_2 排出量削減率 [point]	1.0	1.2	0.7	0.9

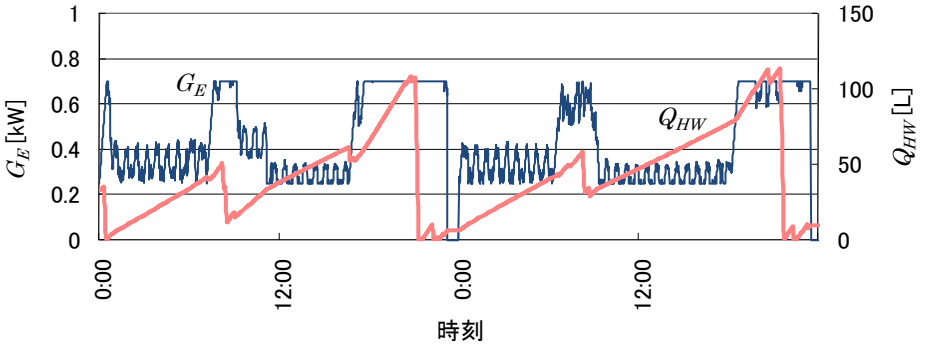
表 5.5　運転方法改善による各削減量・削減率の向上（27 需要家平均）

ラジエータ	搭載		非搭載	
補助熱源器	従来型	潜熱回収	従来型	潜熱回収
一次エネルギー削減量 [GJ/year]	0.8	0.6	1.1	1.0
一次エネルギー削減率 [point]	1.1	0.8	1.5	1.3
CO_2 排出削減量 [$kgCO_2$/year]	95	85	82	74
CO_2 排出量削減率 [point]	2.3	2.1	2.0	1.8

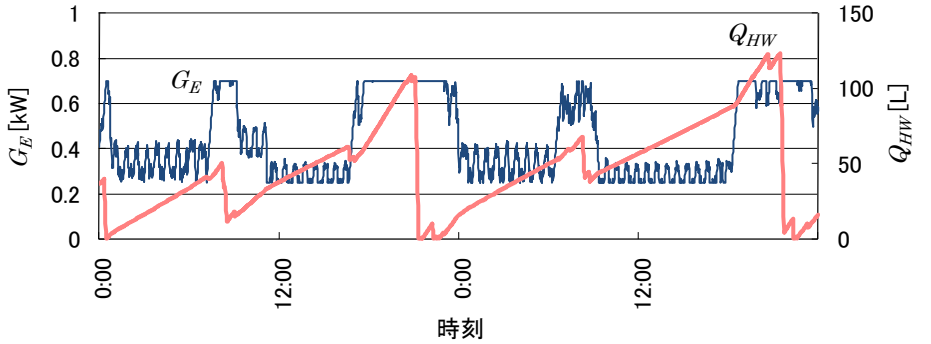
図 5.6 に、3 章で示した評価期間を 24 時間に固定した場合と本章で提案した評価期間を 48 時間にした場合のシミュレーション例を示す。評価期間が 24 時間に固定される場合は、翌日のエネルギー需要が運転評価に全く影響しないので、評価期間の終わりで停止する運転計画が選択されてしまっているが、評価期間を 48 時間として次回起動時に発生する損失を考慮する提案運転計画法では、停止する運転計画は選択されずに運転継続する。



(a)　エネルギー需要パターン



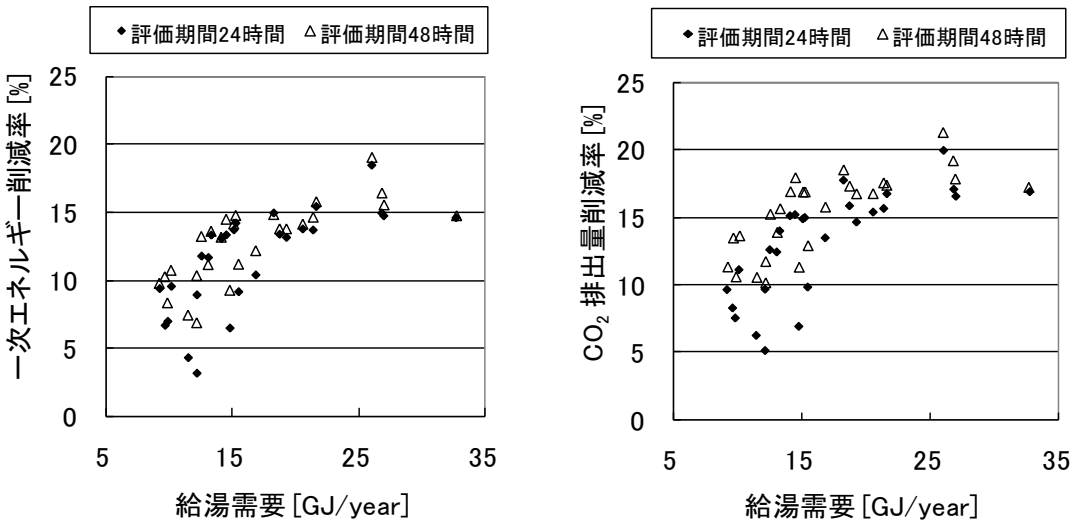
(b)　評価期間を 24 時間とした運転



(c)　評価期間を 48 時間とした運転

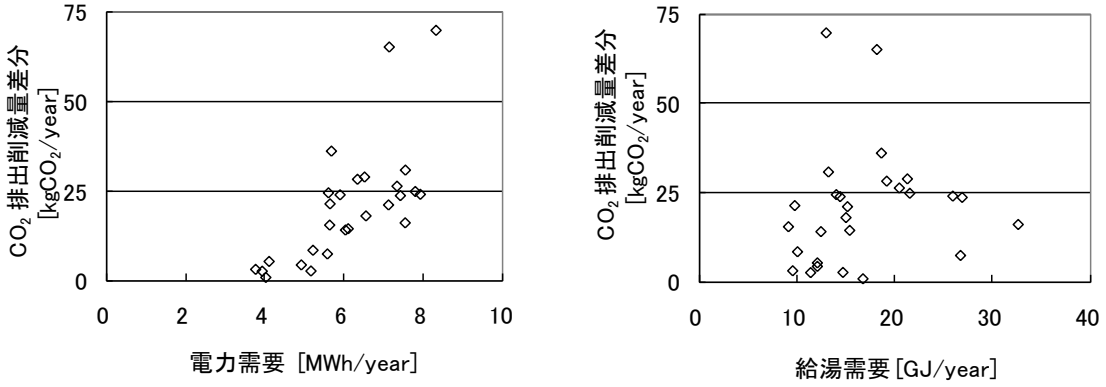
図 5.6　評価期間の違いによる運転比較

（ラジエータ・従来給湯器搭載、評価関数は CO_2 排出削減量）



(a)　一次エネルギー削減率比較　　(b)　CO_2 排出量削減率比較

図 5.7　運転方法改善による各削減量・削減率の向上



(a)　電力需要に対する CO_2 排出削減量差分　(b)　給湯需要に対する CO_2 排出削減量差分

図 5.8　ラジエータ搭載の効果

図 5.7 に、運転評価関数を CO_2 排出削減量、ラジエータ、従来給湯器搭載システムでの運転計画の違いによる需要家毎の一次エネルギー削減率と CO_2 排出量削減率を示す。給湯需要が小さな需要家では評価期間を 24 時間に限定した場合の悪化が著しい。これは、給湯需要の小さな需要家は DSS 運転が多く選択されるために、起動損失が増えるためである。しかし、提案の運転計画法を適用することで、連続運転の割合が増加し、適切に DSS 運転が選択されるようになり、一次エネルギー削減率と CO_2 排出量削減率は著しく改善する。

3 章でも述べたが、評価期間の終盤で発生した排熱は評価期間後に利用されるため、過小評価される傾向になる。今回提案している運転計画法では、評価期間を 24 時間に加えて 48 時間とすることと、24 時間以内に停止する運転計画に対しては次回起動時に発生する損失も加えて評価するように改善を行っており、過小評価の影響を軽減するようにしている。しかし、この結果から一次エネルギー削減量を評価関数とした場合に選択される運転計画よりも少し運転時間が長い運転計画が、より適切な運転計画であると予想される。評価関数を CO_2 排出削減量とした運転計画では先に述べたように運転時間が長くなるが、ラジエータ搭載システムの場合では排熱を廃棄する運転時間帯ができるため一次エネルギー削減量は減少する場合がある。一方、ラジエータ非搭載システムでは排熱廃棄の時間帯が発生しないため一次エネルギー削減量は大きくなる。

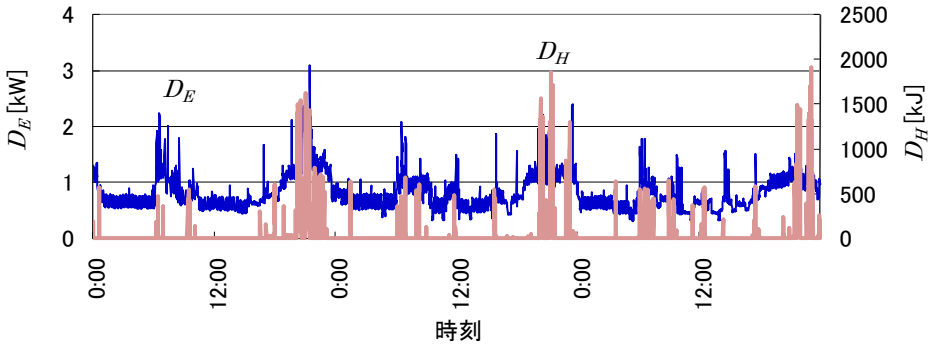
図 5.8 に運転評価関数を CO_2 排出削減量、従来給湯器搭載システムでの各需要家におけるラジエータ非搭載での削減量とラジエータ搭載での削減量の差分の分布を示す。ラジエータ搭載効果は電力需要量が大きい需要家ほど大きなり、熱需要の大小による影響はあまり受けなくなることがわかる。

これらの結果から、評価関数を CO_2 排出削減量とすれば CO_2 排出削減と一次エネルギー削減も両立が可能で、ラジエータ搭載によりさらに CO_2 排出削減が可能な構成とすることができると考えられる。

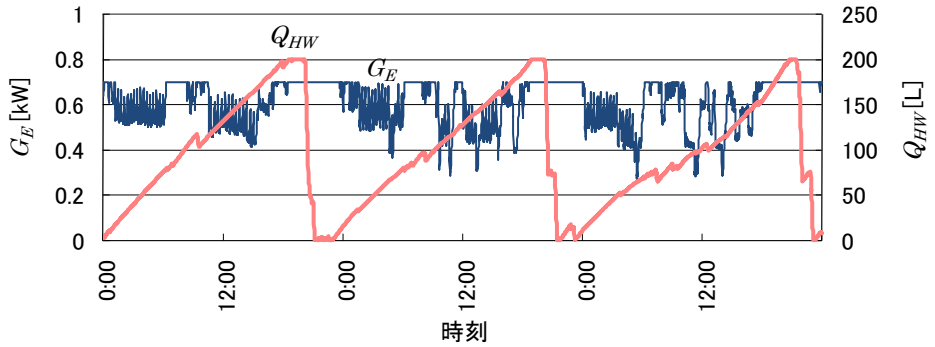
ラジエータ搭載の有無で差異が生じる典型例を図 5.9 に示す。一連の運転の中の 3 日間を示しており、ラジエータ搭載システムでは、1 日目と 2 日目の終わり付近で貯湯湯量が 200L に達し、その後大きな給湯需要が発生し、貯湯湯量は 0 まで減少している。この間、電力需要は大きく、定格電力で発電している。

ラジエータ非搭載のシステムでは、連続運転すると貯湯湯量が 200 L に到達するため、PEFC を停止させる時間帯をどこかに設定する必要がある。今回提案の運転ロジックでは、停止時間帯として、運転した場合に給湯需要の発生時刻から遠いために放熱量が多く、電力需要が比較的小さくなる時間帯が選択され、その時間帯が停止時間帯として選択されている。この停止の発生のため、結果的に余分な起動停止に必要なエネルギーが消費されるとともに CO_2 が排出される。このような例は偶然に発生するものではなく、日本の家庭におけるエネルギー需要パターンでは頻繁に表れる。日本の家庭でのエネルギー需要パターンは、夜間の電力需要は比較的大きく、1 日の最大の給湯需要る風呂湯はりも同時間帯に発生することが一般的であるためである。

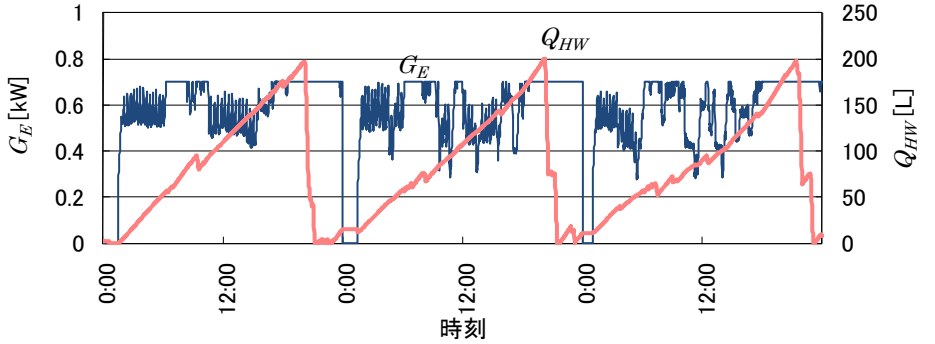
この 3 日間でラジエータ搭載システムでは一次エネルギーを 692 MJ 消費，CO_2 を 36.4 kg 排出し、ラジエータ非搭載システムでは一次エネルギーを 707 MJ 消費、CO_2 を 37.5 kg 排出している。



(a)　エネルギー需要パターン



(b)　ラジエータ搭載システムでの運転



(c)　ラジエータ非搭載システムでの運転

図 5.9　ラジエータ搭載・非搭載での運転比較

5.3. 蓄電池の搭載によるシステム導入効果の向上

5.3.1. 蓄電池搭載効果の検証

本節では、前節で評価した機器構成のうち、ラジエータを搭載し補助熱源器として従来型給湯器を採用したものを例として取り上げる。システムの運転計画法は 5.2 節で示した運転計画法を採用し、運転計画評価関数値については CO_2 排出削減効果が大きかった CO_2 排出削減量を採用する。

前節での評価結果により、図 5.10 に示すように 1 日に発生する不足電力、即ち、購入電力の値は 2.2～7.1 kWh/day、平均で 4.6 kWh/day であることがわかった。そこで、蓄電池容量を最大の不足電力量をほぼ賄えると予想される 8.0 kWh に仮設定し、蓄電池搭載システムの評価を行うことにする。

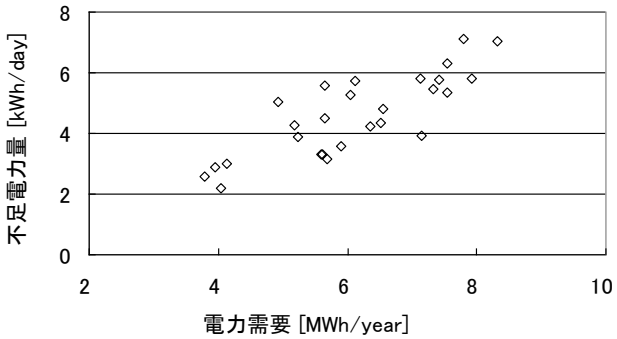


図 5.10　1 日当たりの不足電力量

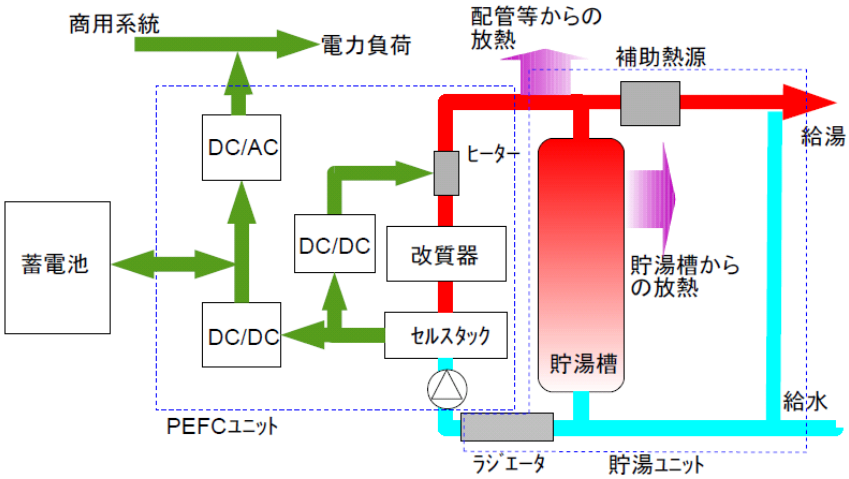


図 5.11　蓄電池搭載の家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの構成

図 5.11 に、想定した蓄電池搭載の家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの構成を示す。家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの直流昇圧コンバーターと系統連係インバータの間に蓄電池を挿入したこの構成では、図 3.15 で示したシステム構成に対して、蓄電池の充放電のために新たな電力変換段が追加されないので、コスト的、電力変換効率的に優れたものになる[16]。

蓄電池非搭載の家庭用 PEFC コージェネレーションシステムでは、逆潮流を防止するために発電電力の目標値を電力需要よりも小さな値に設定しながら運転する（買い電力保証制御）が、電力需要の急変等で逆潮流状態となった場合には、システム内に搭載されたヒーターを制御することで余剰電力を熱に変換して温水として回収する。逆潮流防止の観点からは、ヒーターによる余剰電力処理機能を搭載するので買い電力保証制御は必ずしも必要ない。しかし、買い電力保証制御がない場合、電力を熱に変換する量が相対的に増加することになり、一次エネルギー、CO_2 排出量削減の観点からは、望ましくない。このような状況を防止するためには、買い電力保証制御が必要となる。一方、蓄電池を搭載すれば蓄電池での充放電損失が発生するものの、余剰電力を熱としてではなく電力として使用できるようになるので、買い電力保証制御の必要性はなくなる。そこで、買い電力保証制御有無による一次エネルギー削減、CO_2 排出量削減の変化についても評価を行うことにする。

なお、余剰電力は蓄電池に充電されるが、蓄電池が満充電状態の時には蓄電池非搭載システムと同じくヒーターにより熱に変換される。表 5.6 に想定したリチウムイオン蓄電池モジュールの仕様を示す。システム出力を家庭の電力需要ピークの大部分を賄える 2.0 kW と設定し、組み合わせる PEFC の定格発電電力が 0.7 kW とした。よって、放電電力の最大値は 1.3 kW、充電電力の最大値は 0.7 kW となり、リチウムイオン蓄電池モジュールに要求される定格充放電電力は 1.3 kW に設定した。蓄電容量は、図 5.10 に示したように蓄電池非搭載システムでの不足電力量の最大値を基に定める。

表 5.6　リチウムイオン蓄電池モジュールの仕様

項目	値
定格容量 [kWh]	8.0
Wh 効率 [%]	94.0
Ah 効率 [%]	97.0
定格充電 / 放電電力 [kW]	1.3

充放電電力を $C_{batt}(t)$[kW]（正値は充電、負値は放電を示す）とすれば、貯湯湯量 $Q_{HW}(t)$[L]、平均貯湯温度 $S_t(t)$[℃]、蓄電量 $S_E(t)$[kWh]はそれぞれ次式で求められる。ただし、k_1=60 min/h、k_2=3600 J/Wh、k_3=4.19605 kJ/kcal である。

$$Q_{HW}(t) = Q_{HW}(t-1) - \frac{D_H(t)}{k_3 \times (S_t(t-1) - T_W(t))} + \frac{G_E(t) \times \frac{\eta_{Hfc}}{\eta_{Efc}} + (G_E(t) - D_E(t) - C_{batt}(t)) \times \eta_{ht}}{k_3 \times (Rt - T_W(t))} \times \frac{k_2}{k_1} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (5.1)$$

$S_t(t-1) - T_W(t)=0$ の場合は第 2 項を 0 とし、$G_E(t) - D_E(i) - C_{batt}(t)<0$ となる場合は $G_E(t) - D_E(i) - C_{batt}(t)=0$ とし、第 1 項－第 2 項が負になる場合は第 1 項－第 2 項を 0 とする。

$$S_t(t) = \frac{1-\gamma_T}{k_3 \times Q_{HW}(t)} \times (S_H(t) - D_H(t) + (G_E(t) \times \frac{\eta_{Hfc}}{\eta_{Efc}} + (G_E(t) - D_E(t) - C_{batt}(t)) \times \eta_{ht}) \times \frac{k_2}{k_1} \times (1-\gamma_p)) + T_W(t) \quad \cdots\cdots\cdots (5.2)$$

ここで、$Q_{HW}(t)=0$ の場合は $S_t(t)=T_W(t)$とし、$S_H(t) - D_H(t)<0$ となる場合は $S_H(t) - D_H(t)=0$ とし、$G_E(t) - D_E(i) - C_{batt}(t)<0$ となる場合は $G_E(t) - D_E(i) - C_{batt}(t)=0$ とする。

$$S_E(t) = \sum_{i=0}^{t} C_{batt}(i) \times \frac{1}{k_1} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (5.3)$$

蓄電池容量を S_{Emax}[kWh]とすれば、$0 \le S_E(t) \le S_{E\max}$ であり、$S_H(t)<0$ となる場合は $S_H(t)=0$ とし、$S_E(t)=0$ の場合は$C_{batt}(t) \ge 0$ のみ許容される。

なお、区分時間の初期の貯湯熱量を示す時間帯初期貯湯熱量 $S_H(t)$[kJ]は(3.18)式で求められる。

システムの最大出力電力を G_{max}[kW]とすれば，以下の関係が成り立つ。

$$0 \le G_E(t) - C_{batt}(t) \le G_{\max} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (5.4)$$

(5.2)式を用いて，家庭用 PEFC コージェネレーションシステムを導入した場合の一次エネルギー量と CO_2 排出量 Q_{FCPE}, Q_{FCCO2}はそれぞれ次式で表される。ただし、$\eta^1{}_b$は補助熱源器効率で図 3.4 に示した従来型給湯器の特性に従う。

$$
\begin{aligned}
Q_{FCPE} = (&\sum_{t}^{AllDay} \frac{G_E(t)}{\eta_{Efc}} + \sum_{t}^{DayTime} (D_E(t) - G_E(t) + C_{batt}(t)) \times \eta_{ppD} \\
&+ \sum_{t}^{NightTime} (D_E(t) - G_E(t) + C_{batt}(t)) \times \eta_{ppN}) \times \frac{k_2}{k_1} \\
&+ \sum_{t}^{AllDay} \frac{D_H(t) - S_H(t)}{\eta^1{}_b} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (5.5)
\end{aligned}
$$

ただし、$D_H(t) - S_H(t) < 0$ の場合は $D_H(t) - S_H(t) = 0$ とする。

$$
\begin{aligned}
Q_{FCCO2} = &\sum_{t}^{AllDay} (D_E(t) - G_E(t) + C_{batt}(t)) \times \frac{K_{ppCO2}}{k_1} \\
&+ \sum_{t}^{AllDay} (\frac{D_H(t) - S_H(t)}{\eta^1{}_b} + \frac{G_E(t)}{\eta_{Efc}} \times \frac{k_2}{k_1}) \times K_{13ACO2} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (5.6)
\end{aligned}
$$

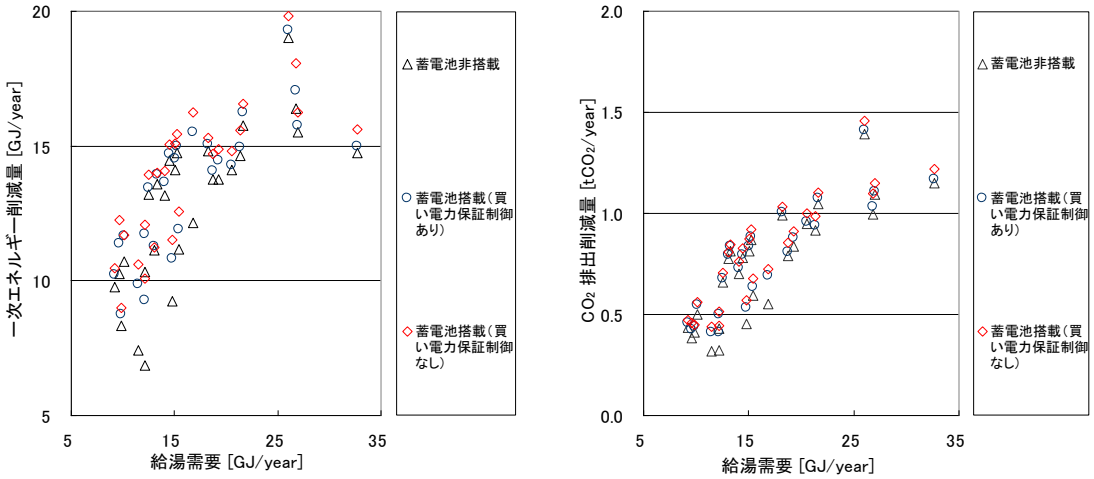
ただし、$D_H(t) - S_H(t) < 0$ の場合は $D_H(t) - S_H(t) = 0$ とする。

家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの運転計画の評価関数として用いる CO_2 排出削減量 F_{FCCO2}[gCO_2]は(3.23)式により求められる。

図 5.12 に一次エネルギー削減量、CO_2 排出削減量、図 5.13 に一次エネルギー削減率、CO_2 排出量削減率を、表 5.7 にシミュレーション結果の 27 需要家平均値を示す。図 5.12、図 5.13 からわかるように給湯需要の小さな需要家では蓄電池導入の効果がある程度確認できるが、需要の大きな需要家ではそれほど大きくない。給湯需要が小さな需要家は例外なく電力需要も小さなことから、PEFC の最小発電電力を電力需要が下回る時間が比較的長いため、その時間帯に蓄電池へ余剰電力が充電できるためと考えられる。

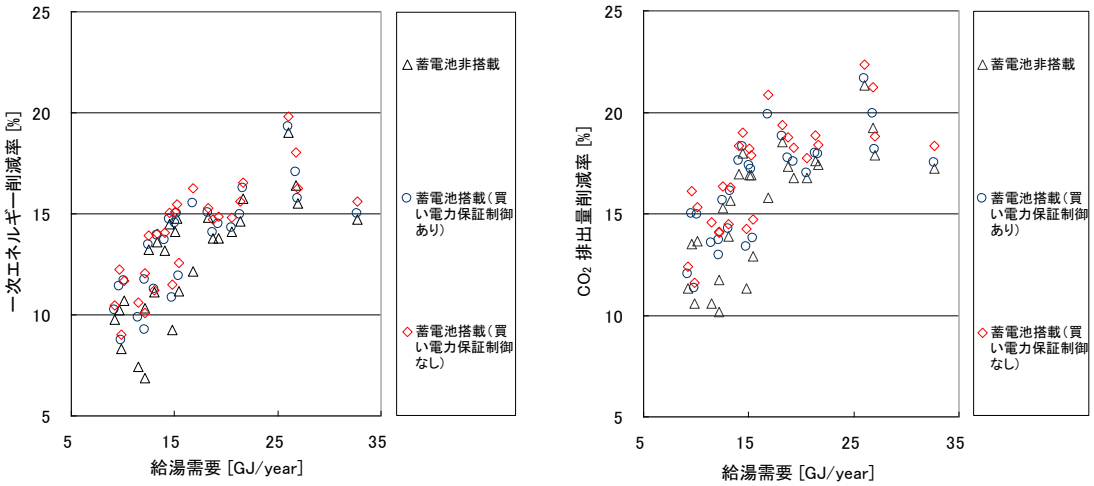
PEFC の出力変化速度は、表 3.6 に示したように上昇時は改質器への原燃料投入から反応により改質ガスが生成され実際に発電電力が増加するまでの時間が必要なため下降よりも遅く設定され、追従遅れ時に発生する余剰電力は少ない。従って、主な充電機会は電力需要が PEFC 最小発電電力を下回っている時に限られることからも上記理由が説明できる。

表5.7に示したように、家庭用エネルギー供給システムを商用電力・ガス給湯器として、蓄電池を搭載していない従来の家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの一次エネルギー削減量（率）と CO_2 排出削減量（率）は 11.2 GJ/year（12.7 %）、740 $kgCO_2$/year（15.4 %）であり、このシステムに蓄電池を搭載すると各削減量（率）はそれぞれ、0.5 GJ/year（0.8 ポイント）、38 $kgCO_2$/year（0.9 ポイント）向上する。さらに買い電保証制御を無くすと各削減量（率）はそれぞれ、0.4 GJ/year（0.5 ポイント）、32 $kgCO_2$/year（0.8 ポイント）向上する。



(a)　一次エネルギー削減量　　(b)　CO_2 排出削減量

図 5.12　各削減量の比較



(a)　一次エネルギー削減率　　(b)　CO_2 排出量削減率

図 5.13　各削減率の比較

表 5.7　蓄電容量 8 kWh のシステムに蓄電池を考慮しない運転計画法を適用した場合のシミュレーション結果（27 需要家平均）

	蓄電池非搭載	買い電力保証制御	
		適用	非適用
一次エネルギー削減量 [GJ/year]	11.2	11.7	12.1
一次エネルギー削減率 [%]	12.7	13.5	14.0
CO_2 排出削減量 [kgCO_2/year]	740	778	810
CO_2 排出量削減率 [%]	15.4	16.3	17.1
最大蓄電電力量 [kWh]	―	0.5	0.4

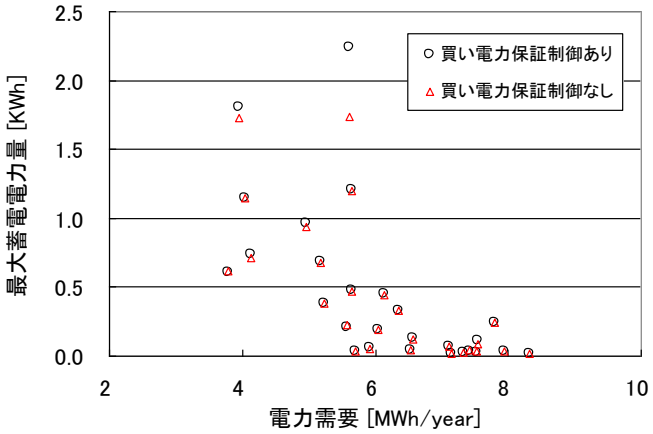


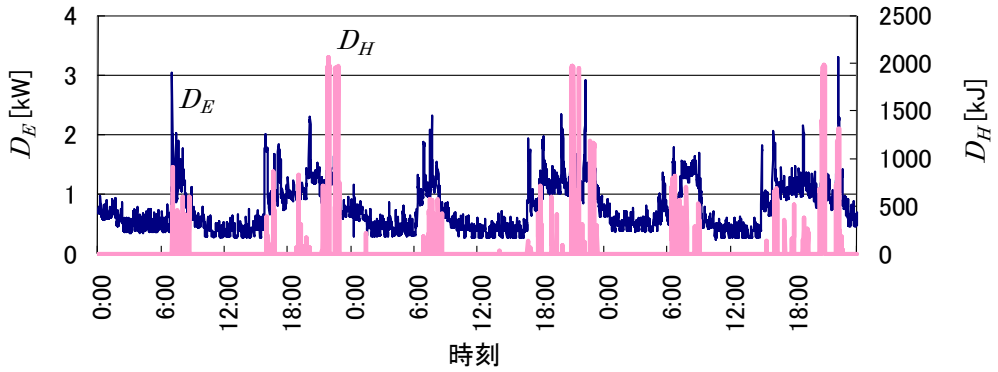
図 5.14　最大蓄電電力量

これらの結果から、蓄電池を考慮しない今回適用した運転計画方法では、蓄電池導入効果は極めて限定的であることがわかる。

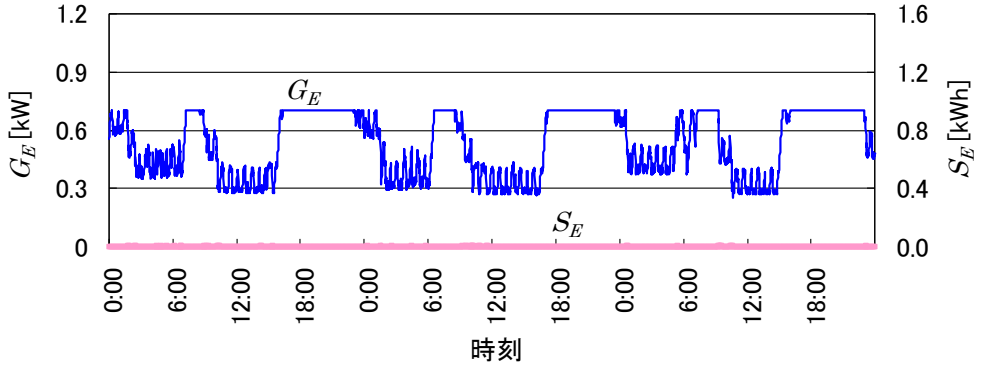
図 5.14 に需要家毎の年間の最大蓄電電力量を示す。蓄電電力量が大きいのは比較的電力需要が小さな需要家で, 電力需要が大きな需要家ではほとんど充電がなされていない。

図 5.14 での買い電力保証制御搭載のシステムでは非搭載システムと比較では、電力需要の小さな需要家では電力需要が最小発電電力を下回る時間帯が相対的に長くなるので、買い電力保証の分だけ充電電力が増え、最大蓄電量は大きくなる。しかし、電力需要の大きな需要家ではそのような時間帯が短くなる。結果的に買い電力保証制御搭載のシステムでは制御で発電電力が制限されるので表 5.7 に示されるように、一次エネルギー量、CO_2 排出量の削減の面で劣ることになる。

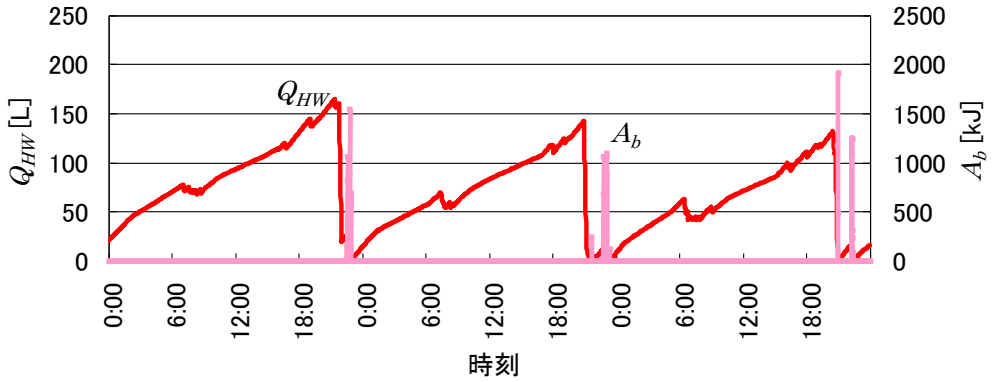
参考として、図 5.15 にシミュレーション例をに示す。通常の運転では余剰の発電電力がほとんど発生しないので、蓄電池の導入効果は極めて小さくなる。また、熱需要も排熱ではまかない切れず、補助熱源による給湯 $A_b(t)$が発生している。



(a)　エネルギー需要パターン



(b)　発電電力と蓄電電力量



(c)　貯湯湯量と不足熱量

図 5.15　蓄電池を考慮しない運転計画法でのシミュレーション結果

5.3.2. 蓄電池搭載を考慮した運転計画法

先に示した運転計画法による運転では充電機会が限られ、蓄電池導入の効果は大きくならない。そこで、蓄電池導入効果を改善する運転方法として図 5.16 に示す手法を適用

し、蓄電池導入効果の評価を行う。熱は需給の時間的なズレがあると放熱による損失が大きくなるが、電力に関しては自己放電による損失は無視できるほど小さい。よって、運転方法としては熱主電従運転が適当と考えられる。熱の需給に関係なく不足電力を完全に解消するように充電を発電出力の余裕のある時間帯に行うという電主運転も考えられるが、PEFC は発電効率が発電所効率より低くく、そのような運転では必ずしも省エネルギーにならないことが明らかなため、評価は行わない。

提案の運転計画法では、①図 5.1 に示した方法に従って電力需要に追従運転することを基本に運転評価関数を最大となる運転時間帯を決定する。その結果、②熱不足が予想される場合に、③熱不足発生より前の時間帯で熱余りが発生していなければ、③発電電力を電力需要に関係なく定格出力に設定する。即ち、放熱量を抑制するために定格出力で運転する時間帯を熱不足発生時刻のできる限り直前の時間帯に選び、蓄熱と充電の時間帯として運転する手法である。ただし、熱余りの発生が予想される時刻を跨いでそれよりも前の時刻は選択しない。この操作を、熱不足の予測が無くなるまで、または、熱余りのため選択できる時間帯がなくなるまでこの処理を繰り返す。

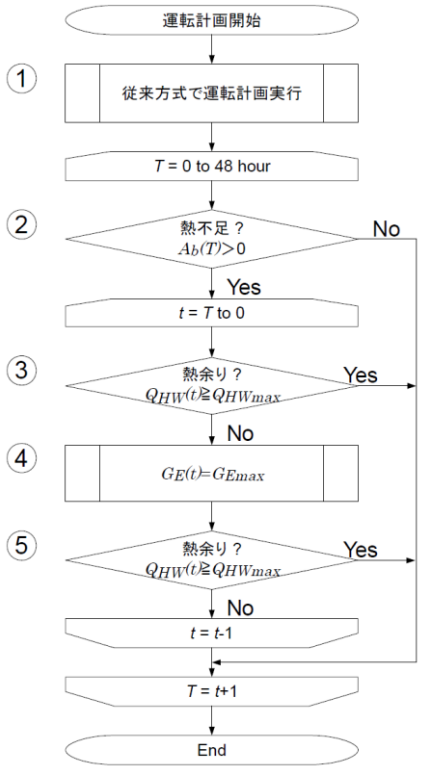
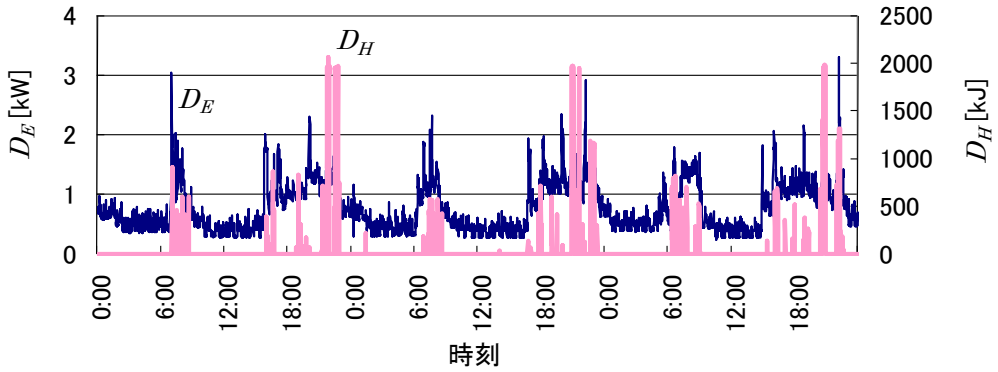
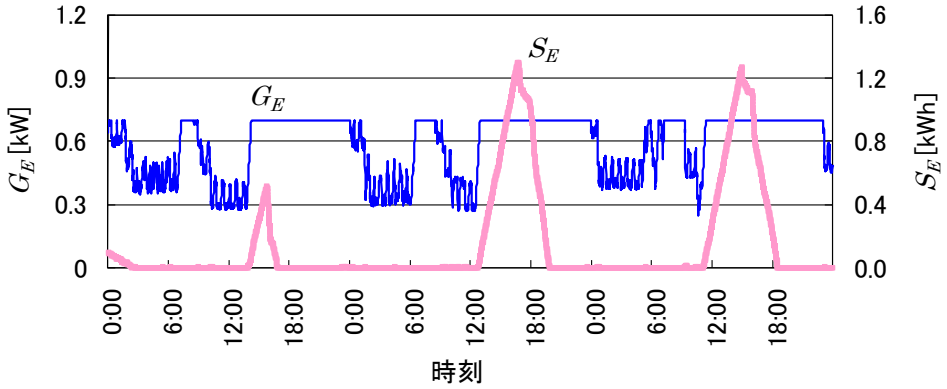


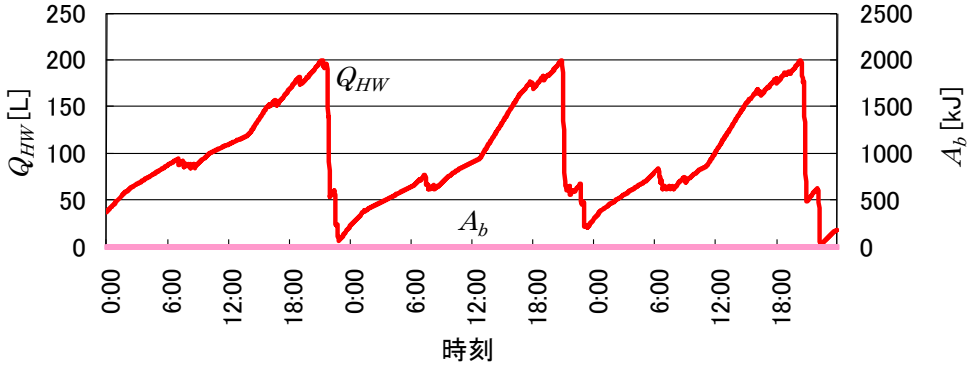
図 5.16　蓄電池を考慮した運転計画法



(a)　エネルギー需要パターン



(b)　発電電力と蓄電電力量



(c)　貯湯湯量と不足熱量

図 5.17　提案運転計画法でのシミュレーション結果

この運転計画法によれば、熱不足の発生が解消もしくは軽減されると同時に、高効率の定格出力での運転時間が長くなり、さらには、充電電力が増えるため蓄電池利用率向上、即ち蓄電池の導入効果を向上させることが可能になると考えられる。

図 5.17 に示すのは、図 5.15 に示したのと同じ需要に対して、提案運転計画法を適用した結果である。従来の運転計画方法では熱不足が発生した時刻の直前の時間帯で、熱需要を賄えるだけの排熱が得られるように、電力需要に関わらずに発電電力が定格発電電力に設定されている。その結果、熱不足の発生が回避され、発生した余剰電力を充電することで後の時間帯に発生する発電電力の不足も削減できている。

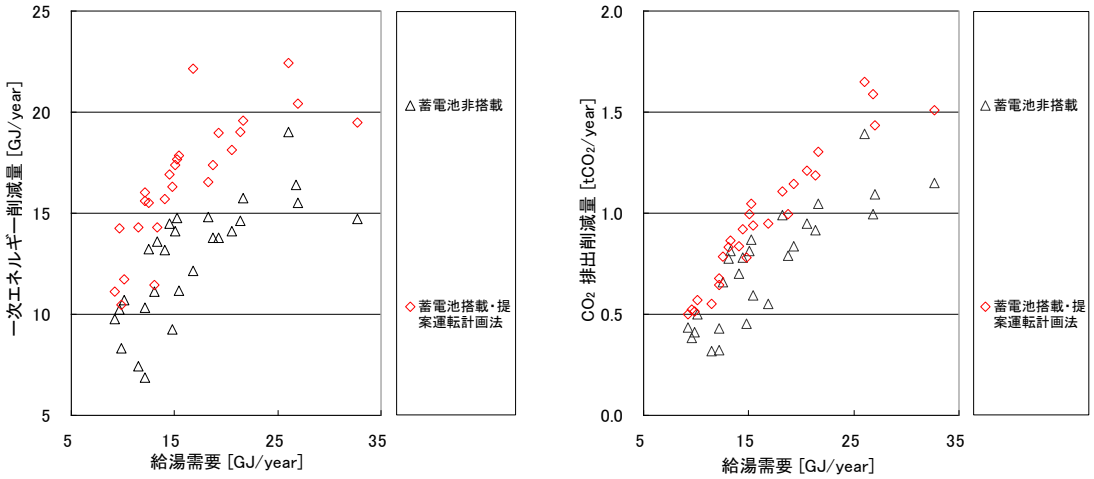
また、効率の低い部分負荷運転の時間を減少させ、効率の高い定格運転の時間を増加させることとなり、システムの総合効率も向上する。

このようにして熱の需給を改善すると同時に電力の需給も蓄電池を有効利用することで改善し、結果的に必要な一次エネルギー量と CO_2 排出量の削減が実現できる。

この運転計画法での、27 需要家それぞれのシミュレーション結果を図 5.18 に一次エネルギー削減量、CO_2 排出削減量、図 5.19 に一次エネルギー削減率、CO_2 排出量削減率を、27 需要家の平均値を表 5.8 に示す。

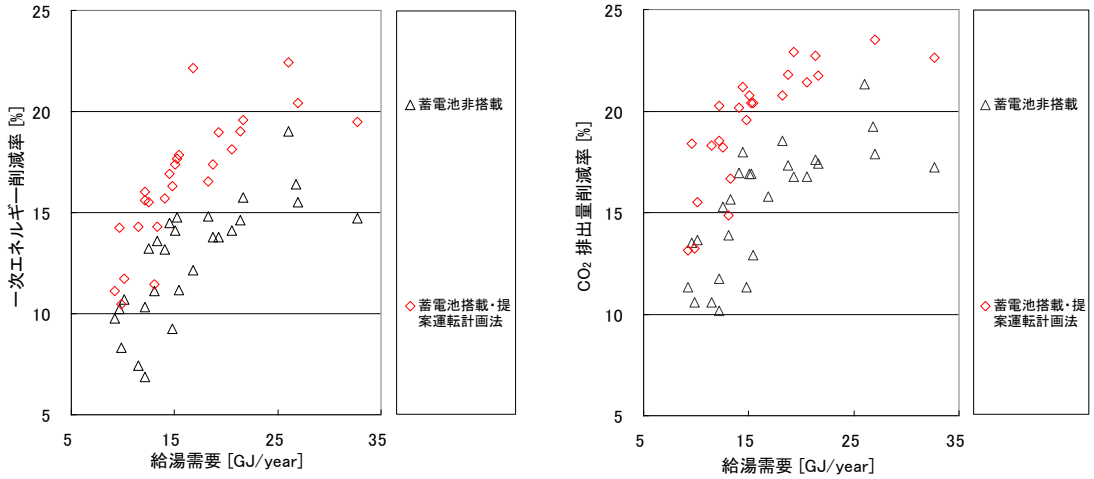
今回評価を行った従来の運転計画法を適用した場合は、充電機会が制約となるために電力需要が最小発電電力を下回る時間帯が長くなる需要の小さな需要家において蓄電池導入メリットが大きく、提案運転計画法を適用した場合では熱需要が制約となるために熱需要が大きい需要家ほど蓄電池導入メリットが大きくなる傾向が明らかとなった。

平均値では、一次エネルギー削減量（率）で 14.6 GJ/year（16.9 %）、CO_2 排出削減量（率）で 965 kgCO_2/year（20.4 %）となり、蓄電池の導入効果が大きく現れている。このように、蓄電池搭載メリットを向上させる提案の運転計画方法の適用により、蓄電池非搭載のシステムと比較して一次エネルギー削減量（率）と CO_2 排出削減量（率）はそれぞれ、3.4 GJ/year（4.2 ポイント）、225 kgCO_2/year（5.0 ポイント）と大幅に向上できることがわかった。



(a)　一次エネルギー削減量　　(b)　CO_2 排出削減量

図 5.18　各削減量の比較



(a)　一次エネルギー削減率(b)　CO_2 排出量削減率

図 5.19　各削減率の比較

表 5.8　蓄電容量 8 kWh のシステムに提案運転計画法を適用した場合のシミュレーション結果(27 需要家平均)

項目	値
一次エネルギー削減量 [GJ/year]	14.6
一次エネルギー削減率 [%]	16.9
CO_2 排出削減量 [kgCO_2/year]	965
CO_2 排出量削減率 [%]	20.4

5.3.3. 蓄電容量の最適化

蓄電池容量を 8.0 kWh とした場合の 27 需要家それぞれが 1 日に放電した電力量の累積曲線を図 5.20 に示す(延べ 27×365 日の日毎の充電電力を累積曲線として示したもの)。8.0 kWh の蓄電容量を使用した運転は 1 例のみであった。

そこで蓄電池容量をパラメータとして再評価を行ったところ表 5.9 と図 5.21 の結果が得られ、一次エネルギー削減量（率）と CO_2 排出削減量（率）の観点から蓄電池容量を 4.0 kWh 以上に大きくするメリットはないことがわかった。即ち、蓄電池導入効果は 1.0～2.0 kWh 程度でも十分大きく、蓄電池導入コスト低下に従い蓄電池容量の大容量化を進めることで、さらに高い効果が得られるが、その上限は 4.0 kWh 程度となることが明らかとなった。

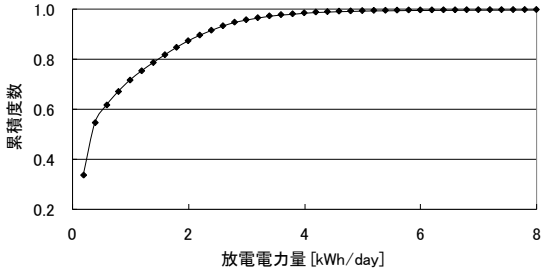


図 5.20 放電電力量の累積曲線

表 5.9　蓄電容量毎のシミュレーション結果 (27 需要家平均)

蓄電池容量 [kWh]	0.5	1.0	2.0	4.0	6.0	8.0
一次エネルギー削減量 [GJ/year]	13.6	14.0	14.4	14.6	14.6	14.6
一次エネルギー削減率 [%]	15.6	16.1	16.6	16.9	16.9	16.9
CO_2 排出削減量 [kgCO_2/year]	902	928	953	963	965	965
CO_2 排出量削減率 [%]	19.0	19.5	20.1	20.3	20.4	20.4

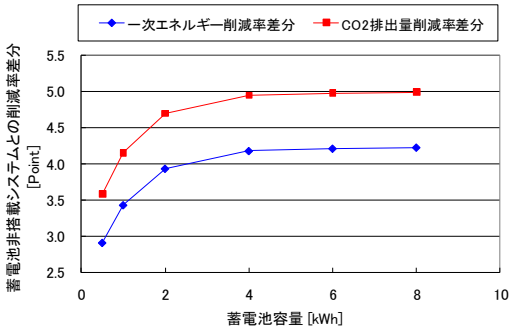


図 5.21　蓄電池容量の変化に対する各削減率の変化

5.4. 結言

3 章で示した運転計画法を、本章で提案した DSS 運転計画法に相当する 24 時間の運転計画を内包しながら、より長期間である 48 時間の運転計画期間とその運転計画を評価する期間を持つ、新たな運転計画方法運転計画法に改善することで、一次エネルギー削減率を 2.0~2.6 ポイント、CO_2 排出量削減率を 2.7~3.2 ポイント向上できることが明らかとなった。以上の結果より、低炭素社会の実現に向けた取り組みにおいて、家庭用 PEFC コージェネレーションシステムは、家庭用部門での CO_2 排出量削減に極めて効果的なシステムであると言える。

そして、蓄電池搭載によりさらに家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの導入効果を向上させることが可能となる。

しかしながら、単に蓄電池に余剰電力を充電し、発電電力が不足した時に放電するようにしただけではその導入効果は限定的であり、ラジエータ・従来型給湯器搭載で、運転評価関数を CO_2 排出削減量としたシステムでは、一次エネルギー削減率で 0.8 ポイント、CO_2 排出削減率で 0.9 ポイント向上するに過ぎない。

熱不足発生時刻の発生する直前の時間帯を定格出力で運転することで、蓄熱量と充電量を増加させる、新しい運転計画法の適用により、8.0 kWh の蓄電容量では、一次エネルギー削減率で 4.2 ポイント、CO_2 排出削減率で 5.0 ポイントの向上が可能であることを示した。さらに、蓄電池容量が 4.0 kWh の場合であっても 8.0 kWh の場合と比較して一次エネルギー削減率ではほとんど変化がなく、CO_2 排出削減率で 0.1 ポイント低下するだけであることを明らかにした。これにより、蓄電池容量としては最大でも 4.0 kWh 程度で十分であると判断される。

家庭用 PEFC コージェネレーションシステムをはじめ、Pure EV も商品化されている現在、高い環境性を持つ蓄電池を搭載した家庭用 PEFC コージェネレーションシステムが現実のものとなることが期待される。

次章では、家庭用 PEFC コージェネレーションシステムを集合住宅に適用し、集合住宅の住棟内で余剰電力を相互融通するシステム及び運転計画法について提案、評価を行う。

6. 集合住宅への家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの適用

6.1. 緒言

家庭部門での一次エネルギー削減と CO_2 排出量削減の効果が大きい家庭用 PEFC コージェネレーションシステムは、戸建住宅が主な導入対象と考えられており、集合住宅への導入に関する具体的検討はあまり進んでいないのが実情である。

集合住宅への PEFC コージェネレーションシステム導入に関する研究は、例えば文献(8)(19)や、集合住宅ではないものの複数の需要家に対する提案として文献(20)がある。

文献(8)では DSS 運転を前提として考察されており、集合住宅では個別設置ではなく、集中設置が優れるとの結論が得られている。

文献(19)では電力融通を前提とし、文献(20)ではシステムを水素製造装置、水素駆動 PEFC、貯湯ユニットに分割して複数の需要家で共有し、電力と熱の相互融通を前提としている。どちらの研究においても、目的関数を最適化する運転計画を求めており、明確に記載されていないが、その計算量は相当量あることが予想され、ターンアラウンドタイムが実用化の障害となるのではないかと懸念される。また、現実問題として、熱融通を実現するため（これは集中設置の場合も同じであるが）にはかなりの設備投資が必要となるので、このことも実用化を難しくすると予想される。

大阪ガス㈱は、東芝燃料電池システム㈱、㈱長府製作所と、国土交通省の住宅・建築関連先導技術開発助成事業に平成 17 年度から参加し、「集合住宅でのエネルギー効率利用に資する研究開発」として、集合住宅向けの水素燃料電池コージェネレーションシステムに関する技術開発・実証実験を共同で進めてきた[17][18]。

本章では、プロジェクトの中で筆者が開発した、水素駆動の集合住宅向け家庭用 PEFC コージェネレーションシステムを想定した、24 時間内に複数回の起動停止を許容することで 1 需要家においてエネルギー削減量を向上させるユニット制御方法と、比較的少ない計算量で実現可能な複数需要家間での電力融通を行う統合制御方法について、その詳細を示し、それらの運転方法を適用した実際の運転結果について、その省エネルギー効果について評価を加える[32]。

なお、本章では水素製造時の CO_2 排出係数が未公開であるため、一次エネルギー削減についてのみ評価を行う。

6.2. 集合住宅用エネルギーシステム

集合住宅ではセントラルタイプの大型コージェネレーションシステムが以前から実用化され、導入されている。セントラルタイプのいわゆる「マンションコジェネ」では、発電した電力で棟内の電力需要（各住戸と共用分）を賄うことを基本とする。系統電力は高圧で受電し、系統連係（いわゆるインバータ連係）するタイプものと、系統とコージェネレーションシステムとを排他的に切り替えるタイプがある。排熱は専用の配管で棟内を循環し、各住戸での給湯等のための熱源としてや、各住戸に設置された給湯器へ供給される水を予熱するための熱源として使われる。

しかし、大型のコージェネレーションシステムは設置スペースや騒音等の問題があり、今後は、小型で高効率の PEFC コージェネレーションシステムの導入が、PEFC の技術開発の進展とともに進められていくものと考えられる。

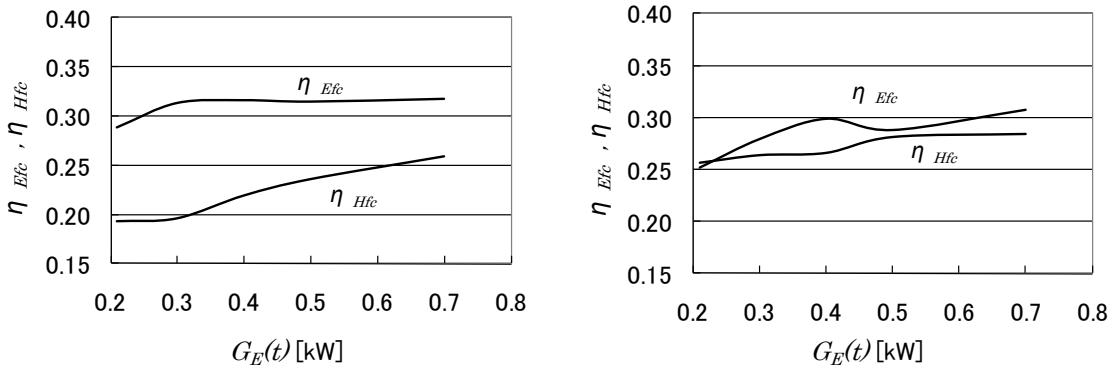
集合住宅に適用させるには、戸建て用システムと異なった技術開発が必要となる。その 1 つは、システムの小型化である。集合住宅に設置することを考えた場合、設置スペースとして考えられるのはパイプシャフト（上下水道配管、電力・ガスメーター等が収められているシャフト）もしくはパイプシャフトに相当する空間に限られ、ここに収めることができる大きさにする必要がある。しかし、現状の技術で小型化は難しく、機能削減による小型化が現実的である。そこで、戸建て住宅用の家庭用 PEFC コージェネレーションシステムから、FPS（Fuel Processing System：改質器）とラジエータを省略し、貯湯槽を小容量のものに変更したシステムを想定して検討を行う。

FPS の省略は、以下の理由による。集合住宅に PEFC コージェネレーションシステムを導入した場合、限定された区域にまとまった量の水素需要が期待されるので、外部から水素配管による水素供給や、大型の水素製造装置を共用スペースに設置して運用することが現実的に可能となる。そうすることで、PEFC コージェネレーションシステム内部に FPS を搭載する必要がなくなる。FPS が搭載されない水素駆動の PEFC コージェネレーションシステムでは、起動時に必要とされるエネルギーも無視できる大きさになるので、ラジエータ搭載の効果がなく、ラジエータの省略も妥当である。

また、系統連係点は高圧受電点となるので、棟内での逆潮流により系統に影響を与える恐れがなくなり、余剰電力処理機能の搭載も必要なくなる。

貯湯槽容量は、本来なら戸建て向けと同じく 200 L 程度、少なくとも 100 L 程度が省エネルギー性を発揮するには必要と思われるが、設置スペースから 50 L 程度が上限となる。また、詳細は後述するが排熱をデシカント除加湿器に利用することも想定しており、デシカント除加湿器に排熱を供給する場合は、排熱回収温度は高く設定される。

集合住宅用 PEFC コージェネレーションシステムとして用いられる水素 PEFC の効率を図 6.1 に、水素 PEFC コージェネレーションシステムのパラメータを表 6.1 に示す。効率特性は、図 6.1(a)に示す通常運転時の特性と、図 6.1(b)に示す排熱回収温度を高く設定した運転時の特性の 2 つがある。



(a)　通常運転時の効率　　(b)　排熱回収温度を高めた運転時の効率

図 6.1　水素 PEFC の効率特性（HHV・天然ガスベース）

表 6.1　集合住宅用水素 PEFC コージェネレーションシステムのパラメータ

項目	値
定格/最小発電電力	700 W / 210 W
追従速度	瞬時
起動時エネルギー損失	Negligible
待機電力	Negligible
貯湯槽容量	50 L
貯湯槽放熱	貯湯熱量の 2.1 %/h
配管放熱	90 kcal/h
排熱回収温度	通常 60 ℃ デシカント運転時 70 ℃

次節より、上記のシステムを前提とした水素駆動の集合住宅用 PEFC コージェネレーションシステムの運転方法について述べる。

6.3. 集合住宅用水素 PEFC コージェネレーションシステムの運転計画法

6.3.1.ユニット制御方法

集合住宅用 PEFC コージェネレーションシステムとして、起動停止が短時間で、起動に要するエネルギーが非常に小さい水素駆動の PEFC コージェネレーションシステムを採用することにより、従来の FPS 搭載型の PEFC コージェネレーションシステムのように起動停止回数に制限を加える目的で、連続運転や DSS 運転をベースとする運転計画を採用する必要がなくなる。また、貯湯槽容量が小容量であるたため、貯湯容量に制約された運転となる場合が多くなることが予想され、そのデメリットを最小限に押さえるような運転計画法が新たに必要となる。

以下、具体的に運転計画方法を説明する。

単位時間（1 分）毎の電力需要量を $D_E(t)$[kW]、給湯需要量を $D_H(t)$[kJ]、発電電力を $G_E(t)$[kW]、排熱回収量を $G_H(t)$[kJ]、単位時間の最初に貯湯されている熱量である時間帯初期貯湯熱量を $S_H(t)$[kJ]、貯湯槽放熱率 γ_T、貯湯槽に湯が滞留する時間である貯湯槽放熱時間 t_γ、水素 PEFC 発電効率を η_{Efc}、水素 PEFC 排熱回収効率を η_{Hfc}、k_1=60 min/h、k_2=3600 kJ/kWh とする。ここで、「エネルギーの使用の合理化に関する法律施行規則」(22)にある全日の発電所効率 η_{pp}=0.369、試作機の給湯器効率 η_{gb}=0.7 を適用する。

単位時間あたりのエネルギー削減量 $P_{ES}(t)$[kJ]は次式で表される。

$$
\begin{aligned}
P_{ES}(t) = & \left(\frac{k_2}{k_1} \times \frac{D_E(t)}{\eta_{pp}} + \frac{D_H(t)}{\eta_{gb}}\right) \\
& - \left(\frac{k_2}{k_1} \times \left(\frac{G_E(t)}{\eta_{Efc}} + \frac{D_E(t) - G_E(t)}{\eta_{pp}}\right) + \frac{D_H(t) - S_H(t)}{\eta_{gb}}\right) \\
& + \frac{(G_H(t) - \gamma_p) \times (1 - \gamma_T)^{t_\gamma}}{\eta_{gb}} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (6.1)
\end{aligned}
$$

ただし、$D_E(t)-G_E(t)<0$ の場合 $D_E(t)-G_E(t)=0$ とし、$D_H(t)-S_H(t)<0$ の場合 $D_H(t)-S_H(t)=0$ とし、$G_H(t)-\gamma_p<0$ の場合 $G_H(t)-\gamma_p=0$ とする。

ところで、水素 PEFC 排熱回収効率を η_{Hfc}、とおけば、$G_H(t)$は次式で表される。

$$G_H(t)=\frac{\eta_{Hfc}}{\eta_{Efc}}\times\frac{k_2}{k_1}G_E(t) \cdots\cdots(6.2)$$

また、排熱回収温度を Rt[℃]、水温を $T_w(t)$[℃]、貯湯湯量 $Q_{HW}(t)$[L]、平均貯湯温度を $S_t(t)$[℃]とすると、時間帯初期貯湯熱量 $S_H(t)$は(3.18)式で表される。

さらに、貯湯湯量 $Q_{HW}(t)$、平均貯湯温度 $S_t(t)$はそれぞれ次式で表される。

$$Q_{HW}(t)=Q_{HW}(t-1)-\frac{D_H(t)}{k_3\times(S_t(t-1)-T_W(t))}+\frac{G_H(t)}{k_3\times(Rt-T_W(t))} \cdots\cdots(6.3)$$

ただし、$S_t(t-1)-T_W(t)=0$ の場合は第 1 項－第 2 項を 0 とし、第 3 項が負となる場合は第 3 項を 0 とし、第 1 項－第 2 項が負になる場合は第 1 項－第 2 項を 0 とし、k_3=4.19605 kJ/kcal とおく（システムは $Rt-T_W(t)=0$ とはならないことを前提に設計されている）。

$$S_t(t)=\frac{S_H(t)-D_H(t)+G_H(t)-\gamma_p}{k_3\times Q_{HW}(t)}\times(1-\gamma_T)+T_W(t) \cdots\cdots(6.4)$$

ただし、第 1 項が負となる場合は第 1 項を 0 とし、$S_H(t)-D_H(t)<0$ となる場合は $S_H(t)-D_H(t)=0$ とし、$Q_{HW}(t)=0$ の場合は $S_t(t)=T_w(t)$とする。

ここで、貯湯槽容量を Q_{HWmax}とした場合に(6.3)式で求められた $Q_{HW}(t)$のうち、$Q_{HW}(T_{ovr})\geq Q_{HW\max}$ となる時間帯 T_{ovr}が存在する時、$t\leq T_{ovr}$ となる t のうちで、$P_{ES}(t)$を最小とする時間帯 Tss を求め、その時間帯をシステム停止時間帯と設定し、$G_E(Tss)=0$ とする。$Q_{HW}(t)$が全ての t に対して Q_{HWmax}を超えない場合は処理を終了し、超える場合はさらに別の停止時間帯 $T'ss$ を求め、$Q_{HW}(t)$が全ての t で Q_{HWmax}を超えないように運転計画すればよい。

なお、本章で想定する集合住宅用の水素 PEFC コージェネレーションシステムでは、貯湯槽容量が 50 L と小さいため、48 時間のような長期間について運転計画をする必要はない。24 時間、1440 個の t に対して運転計画をすれば十分である。

以上の説明では、貯湯槽容量を大幅に超える給湯需要が発生することを前提にしたが、給湯需要が極端に少なく貯湯槽容量一杯に貯湯すると多すぎるような場合は、時間帯 t の時点で給湯需要を賄うのに必要な湯量を $Q_{HWmax}(t)$として求めて、Q_{HWmax} が時間帯 t によって変化するように扱う必要がある。

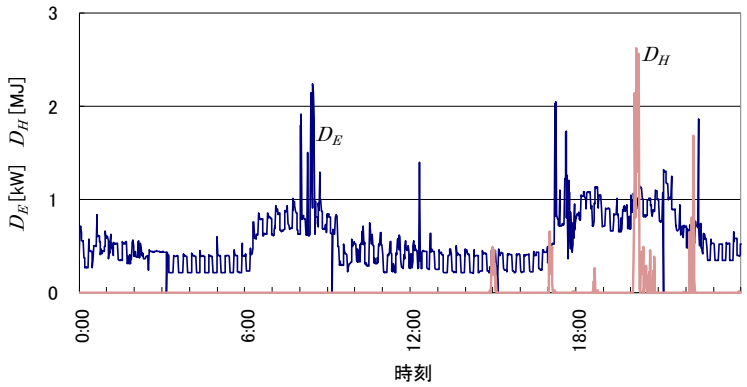
運転計画は予測需要に基づいて求められるが、実際の需要は予測と一致しない。電力需要の予測外れは排熱回収量にも影響を与えてしまうので、運転時間帯自体を決定する方法を採用すると、十分な省エネルギー効果が得られない場合がある。今回提案の方法では、運転計画の結果として、起動時間とその起動によって回収する排熱量のみを決定する。即ち、予定された時間に起動し、電力負荷に追従する運転を行い、予定した排熱量を回収した時点で停止させるように運転する。

以降のシミュレーションでは需要予測値を実際の需要の 30 分平均として求め、その予測に基づいた運転計画に従った運転を行っている。なお、一次エネルギー評価での都市ガスからの水素製造効率は 72 %と設定している。

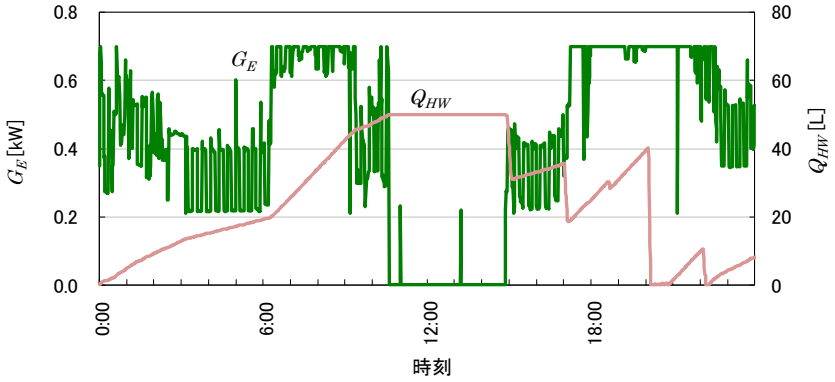
図 6.2 に、実際の集合住宅のエネルギー需要を用いた水素 PEFC コージェネレーションシステムの運転シミュレーション例を示す。給湯需要が午前中に全く発生しないため貯湯槽容量が制約になり、効率的な運転が難しい需要パターンの例である。

図 6.2(b)で示す従来の電力負荷追従運転では、貯湯槽が一杯になると停止、貯湯槽の熱が消費されて貯湯の余裕ができれば運転再開をする従来運転方法である。10 時半ごろに貯湯が完了し、給湯需要が発生する 15 時までほぼ停止する。

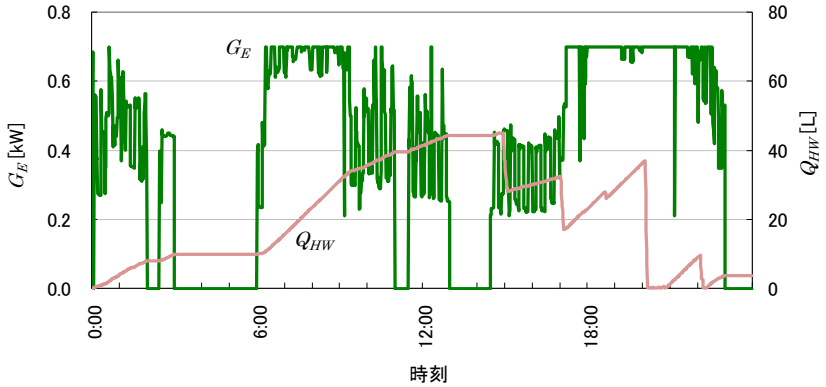
図 6.2(c)に示す提案方法では、給湯需要に合わせて計画的に貯湯をすることで、放熱による損失を極力削減し、かつ、水素 PEFC の効率が低くなる電力需要の小さな時間帯を停止時間帯として選択するようになり、結果として、主に 3 時から 6 時の給湯需要から遠く電力需要の少ない時間帯と 13 時から 14 時等の電力需要の少ない時間帯を停止時間帯として選択している。



(a)　エネルギー需要パターン



(b)　連続電力負荷追従運転



(c)　提案運転方法

図 6.2　水素 PEFC コージェネレーションシステムの運転シミュレーション結果

図 6.2 で示した例での 1 日収支の一次エネルギーを表 6.2 に示す。需要家で必要になる一次エネルギーは、水素 PEFC コージェネレーションシステムを導入していない場合は、184.7 MJ の一次エネルギーが必要である。水素 PEFC コージェネレーションシステムを導入すれば連続電力負荷追従運転方法であっても、177.7 MJ に削減することが

できる。さらに、提案運転計画方法によれば 176.1 MJ とすることができる。このように、水素 PEFC コージェネレーションシステムの導入で、7.0 MJ のエネルギーが削減できるが、提案運転方法を採用することで、さらに 1.6 MJ のエネルギー削減が可能となる。従来システム一次エネルギーから集合住宅用水素 PEFC コージェネレーションシステム一次エネルギーを引いた値を、従来システム一次エネルギーで除した値を一次エネルギー削減率と定義すると、一次エネルギー削減率も集合住宅用コージェネレーションシステム導入で 3.8 %になるが、提案運転方法採用により 0.9 ポイント改善し、4.7 %になる。貯湯槽容量が制約で能力発揮が難しい需要パターンのため値そのものは大きくないが、提案方式の優位性が確認できる。

表 6.2　一次エネルギー量と一次エネルギー削減率

適用システム		一次エネルギー量 [MJ/day]	一次エネルギー削減率 [%]
従来システム（発電所+従来型給湯器）		184.7	―
水素 PEFC コージェネレーションシステム	電力負荷追従	177.7	3.8
	提案運転方法	176.1	4.7

6.3.2.統合制御

集合住宅では、系統連係点は高圧受電点となるので、棟内での逆潮流については系統連係上の問題はなくなる。電力融通は、貯湯湯量 $Q_{HW}(t)$の値に余裕のあるシステムの発電電力 $G_E(t)$を負荷追従時に設定される値より大きな値に設定することで容易に実現でき、集合住宅全体でのエネルギー削減量を増大させることが可能となる。

具体的には、まず、需要家毎に水素 PEFC コージェネレーションシステムで賄えない不足電力を求め、集合住宅全体での不足電力 $Le(t)$を次式により求める。

$$Le(t) = \sum_i (D_E^i(t) - G_E^i(t)) \quad \cdots\cdots (6.5)$$

ただし、i は各需要家を表す。

この、$Le(t)$を賄うことができるシステムの候補として、時間帯 t で $Q_{HW}^i(t) < Q_{HW\max}$ となるものを選択し、そのような i に対して、電力需要 $D_E^i(t)$ の補正を行う。補正電力需要 $D_E'^i(t)$ は次式で求められる。

$$D'^{i}_{E}(t) = D^{i}_{E}(t) + Le(t) \quad \cdots\cdots (6.6)$$

この補正電力需要 $D'^{i}_{E}(t)$ により電力需要 $D^{i}_{E}(t)$ を置き換え、初期の $G^{i}_{E}(t)$ より、値の大きな補正発電電力 $G'^{i}_{E}(t)$ を用いる。即ち、各需要家で電力需要が初期の予測より不足電力 $Le(t)$だけ大きかった場合に発電電力 $G'^{i}_{E}(t)$ で得られる単位時間当たりのエネルギー削減量 $P'^{i}_{ES}(t)$ を求める。

$$\begin{aligned} P'^{i}_{ES}(t) = & \left(\frac{k_2}{k_1} \times \frac{D'^{i}_{E}(t)}{\eta_{pp}} + \frac{D^{i}_{H}(t)}{\eta_{gb}}\right) \\ & - \frac{k_2}{k_1}\left(\frac{G'^{i}_{E}(t)}{\eta_{Efc}} + \frac{D'^{i}_{E}(t) - G'^{i}_{E}(t)}{\eta_{pp}}\right) \\ & - \frac{D'^{i}_{H}(t) - S'^{i}_{H}(t)}{\eta_{gb}} + \frac{(G'^{i}_{H}(t) - \gamma_p) \times (1-\gamma_T)^{t\gamma}}{\eta_{gb}} \quad \cdots\cdots (6.7) \end{aligned}$$

ただし、$D'^{i}_{E}(t) - G'^{i}_{E}(t) < 0$ の場合は $D'^{i}_{E}(t) - G'^{i}_{E}(t) = 0$ とし、$D'^{i}_{H}(t) - S'^{i}_{H}(t) < 0$ の場合は $D'^{i}_{H}(t) - S'^{i}_{H}(t) = 0$ とし、$G'^{i}_{H}(t) - \gamma_p < 0$ の場合 $G'^{i}_{H}(t) - \gamma_p = 0$ とする。

ここで、$P'^{i}_{ES}(t) > P^{i}_{ES}(t)$、かつ、$P'^{i}_{ES}(t)$ を最大化する $G'^{i}_{E}(t)$ を求める。次に、補正電力需要 $D'^{i}_{E}(t)$、補正発電電力 $G'^{i}_{E}(t)$ の条件下で、$Q'^{i}_{HW}(t)$ を求めて、$Q'^{i}_{HW}(t) < Q_{HW\max}$ を満足する(i,t)の組み合わせの内で、各評価の時間帯 t 毎に、全ての i を通じて最大となる $P'^{i}_{ES}(t)$ を 1 つ選択する。

(3.18)(6.3)(6.4)式と同様にして、$Q'^{i}_{HW}(t)$、$S'^{i}_{t}(t)$、$S'^{i}_{H}(t)$ は次式で求められる。

$$Q'^{i}_{HW}(t) = \frac{S'^{i}_{H}(t) - D'^{i}_{H}(t)}{S'^{i}_{t}(t-1) - T^{i}_{W}(t)} + \frac{G'^{i}_{H}(t)}{St^{i} - T^{i}_{W}(t)} \quad \cdots\cdots (6.8)$$

ただし、$S'^{i}_{H}(t) - D'^{i}_{H}(t) < 0$ の場合は $S'^{i}_{H}(t) - D'^{i}_{H}(t) = 0$ とし、$S'^{i}_{t}(t-1) - T^{i}_{W}(t) \le 0$ の場合は第 1 項を 0 とする。

$$S'^{i}_{t}(t) = \frac{S'^{i}_{H}(t) - D'^{i}_{H}(t) + G'^{i}_{H}(t) - \gamma_p}{k_3 \times Q'^{i}_{HW}(t)} \times (1-\gamma_T) + T^{i}_{W}(t) \quad \cdots\cdots (6.9)$$

ただし、$S'^{i}_{H}(t)-D'^{i}_{H}(t)<0$ の場合は $S'^{i}_{H}(t)-D'^{i}_{H}(t)=0$ とし、$Q'^{i}_{HW}(t)=0$ の場合は第 1 項を 0 とし、第 1 項が負の場合は第 1 項を 0 とする。

$$S'^{i}_{H}(t)=k_3\times Q'^{i}_{HW}(t-1)\times(S'^{i}_{t}(t-1)-T^{i}_{W}(t)) \cdots\cdots (6.10)$$

ただし、$S'^{i}_{t}(t-1)-T'^{i}_{W}<0$ の場合 $S'^{i}_{H}(t)=0$ とする。

選択された $P'^{i}_{ES}(t)$ の最大値に対応する $G'^{i}_{E}(t)$ を $G^{i}_{E}(t)$ に置き換える。この新しい $G^{i}_{E}(t)$ を用いて、再度、不足電力 $Le(t)$ を求め、同様に新しい $G^{i}_{E}(t)$ を求める操作を続ける。最終的に、制約条件を満足する新しい $G^{i}_{E}(t)$ が存在しなくなる、または、不足電力 $Le(t)$=0 となった場合に、操作を終了し、最終的に選択されている $G^{i}_{E}(t)$ の内で、$G^{i}_{E}(0)$ を各需要家での発電電力指令値として採用し、その出力で運転を行う。この選択を単位時間毎に繰り返し行うことで、電力融通制御が実現できる。選択実施期間を短くすれば、制御精度は高くはなるが、水素 PEFC の発電電力追従速度が制約となる。

提案の方法で、現時刻での発電電力を決定するために将来の運転も含めて求めるのは、貯湯槽が一杯になると運転できない制約条件下の限られた運転時間の中で、現時刻に発電出力を上昇させるのが適当かどうかの判定を行うためである。

6.4. 集合住宅での実証

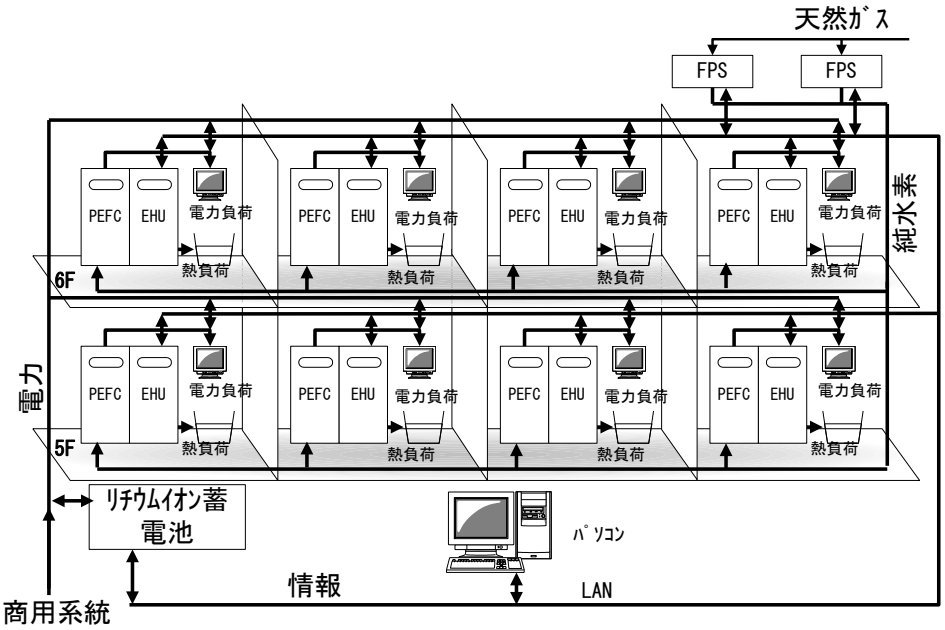
6.4.1. システム構成

国土交通省の事業として、水素 PEFC コージェネレーションシステムを集合住宅に設置し、実証を行った。その概要は、水素 PEFC コージェネレーションシステムを 8 つの需要家に 1 台ずつ設置し、水素供給は屋上に設置した 2 台の水素製造装置から行い、地下には電力融通のバッファとしてリチウムイオン蓄電装置を設置した。システム全体の構成図を図 6.3 に示す。

前節で、貯湯槽容量のため運転に制約があることについて述べたが、その制限を緩和するため、排熱を利用するデシカント除加湿器を各需要家に設置した。これは、24 時間換気と加湿もしくは除湿ができる空調機で、図 6.4 に示すように水素 PEFC の排熱を用いてデシカントローターを再生し、吸着した水分を除去するものである。排熱回収熱

量の全量をデシカント除加湿器で有効利用できるなら、貯湯槽容量に制限されることなく、運転継続が可能となる。

ユニット制御機能は水素 PEFC コージェネレーションシステム毎に、統合制御機能は水素コージェネレーションシステム等の装置と LAN で接続されたパソコンに搭載した。このことにより、単体ユニットのみでも複数台システムとしても運用可能なシステムとなった。統合制御機能には、水素製造装置、リチウムイオン蓄電装置の情報も取り込まれ、それらを含めた運転も可能である。全体の制御ブロック図を図 6.5 に示す。制御ブロックは下位のユニット制御と上位の統合制御の 2 階層構造になっている。通常は、ユニット制御がシステムを運転制御し、統合制御はユニット制御が計画した運転よりエネルギー削減量が大きくなる運転方法が存在する場合、統合制御がユニット制御に介入し、一時的にシステムを運転制御する。



EHU：貯湯ユニット

図 6.3　システム全体構成

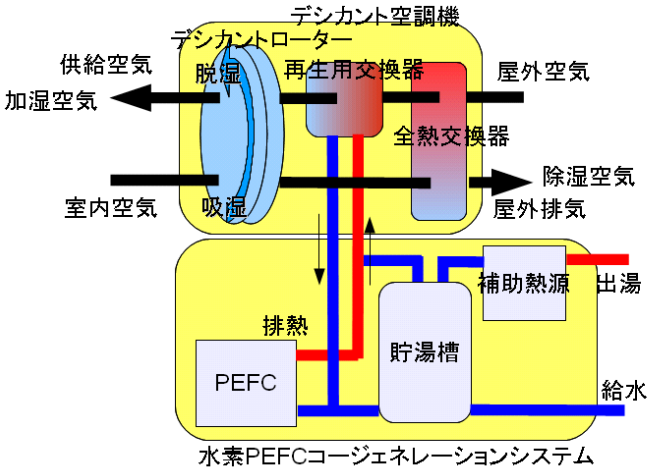


図 6.4　デシカント加湿器と水素 PEFC コージェネレーションシステム

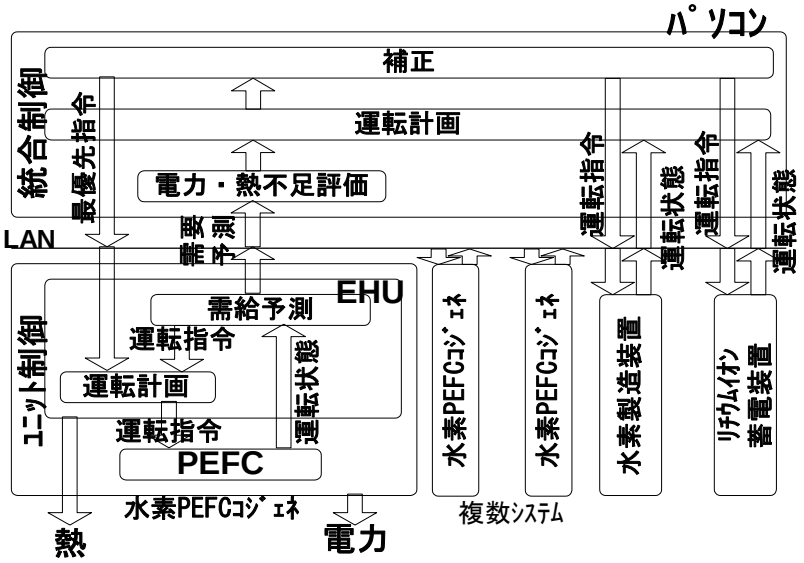


図 6.5　集合住宅用システム運転制御ブロック図

6.4.2. 実運転評価

図 6.6 に図 6.2 と同じエネルギー需要が発生した日の実際の運転結果を示す。統合制御による電力融通をしておらず、ユニット制御の評価に適した運転例である。停止時刻として、電力需要の少ない時間帯が選択されているのはシミュレーションと同じ傾向だが、給湯需要を少なく予測したためか、運転時間が短くなっている。

この運転で要した一次エネルギーを計算で求めると、177.5 MJ、一次エネルギー削減率は 3.9 %となった。シミュレーション結果との相違は、シミュレーション時に無視した需要予測誤差と電力需要への追従遅れに起因する。追従遅れのために発生する染み出しの逆潮流電力は、実際は他の需要家で利用されることになるが、シミュレーション評価では一次エネルギー削減量に反映させていない。

ところで、貯湯湯量が大きく 3 段階で表されているのは、貯湯槽に取り付けられている 3 つの温度センサの検出値から貯湯湯量を求めているためで、このような分解能になっている。また、貯湯槽での熱伝導等の影響を受け、水湯判定の境界が変化し、水素 PEFC が停止しているにもかかわらず湯量が増えたような値になる場合がある。

図 6.7 に統合制御による電力融通運転例を示す。試験対象となった需要家は、戸建て住宅と比較しても電力需要が大きい傾向があり、通常運転時は慢性的に電力不足、貯湯槽容量不足となった。先に述べたように、排熱をデシカント除加湿器で利用すれば、貯湯槽容量の制約が外れるので、出力を上昇させる電力融通運転についても熱的な制約がなくなり、他の需要家で発生している不足電力を補うために最大発電電力で発電する。その結果、発生した余剰電力は他の需要家で利用される。

電力融通時の運転では、仮想的にエネルギー需要パターンを変化させることになるので、従来の評価手法をそのまま使えないため、この需要家の電力需要を元々の電力需要と融通時の発電電力の大きい方の値とし、排熱の全量をデシカント除加湿器に供給する熱量とした。ただし、デシカント除加湿器での熱損失は 10 %と仮定し、従来システム・電力融通なし運転時のデシカント除加湿器への不足熱量の供給は、ガスボイラーにより行うが、高温水の追いだきを行うことから、その効率は前出の給湯器効率 η_{gb} より低い値である 0.65 を用いている。水素 PEFC 自体もデシカント除加湿器運転時には熱重視の運転に切り替え排熱回収温度を 70 ℃まで上昇させるため、効率特性が変化し、図 6.1(b) に示した効率となる。

評価結果を表 6.3 に示す。電力融通をしない場合でもデシカント除加湿器で熱を有効利用するので、従来システムで 276.2 MJ 必要であった一次エネルギーが 244.2 MJ、一次エネルギー削減率は 11.6 %となる。統合制御により電力融通するとさらにエネルギー削減効果は高くなり、一次エネルギーが 224.5 MJ、一次エネルギー削減率は 18.7 %となる。電力融通しない場合と比べ、エネルギー削減量は 19.7 MJ、一次エネルギー削減率 7.1 ポイント向上する。

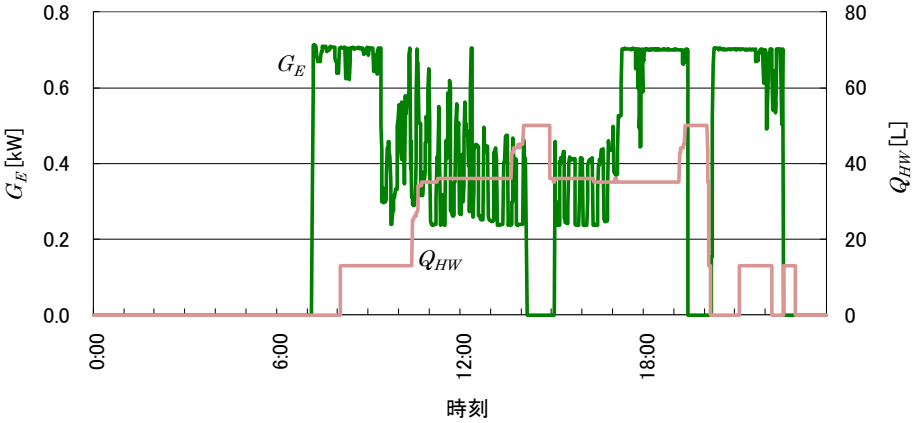


図 6.6　水素 PEFC コージェネレーションシステムの実運転結果

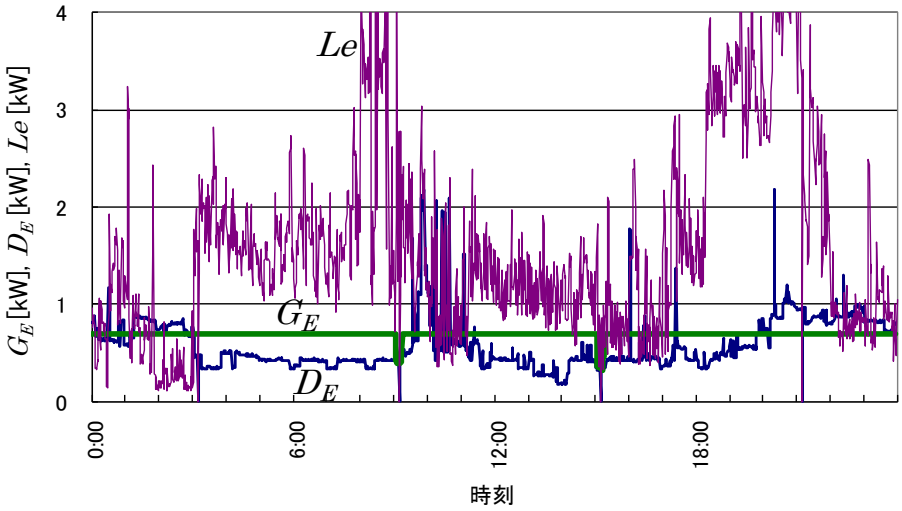


図 6.7　電力融通運転例（デシカント除加湿器による排熱利用時）

表 6.3　一次エネルギー量と一次エネルギー削減率

適用システム		一次エネルギー量 [MJ/day]	一次エネルギー削減率 [%]
従来システム（発電所+従来型給湯器）		276.2	―
水素 PEFC コージェネレーションシステム	電力融通なし	244.2	11.6
	電力融通あり	224.5	18.7

6.5. 結言

本章では、集合住宅用コージェネレーションシステムとして、水素駆動の PEFC コージェネレーションシステムを取り上げ、1 需要家でのエネルギー削減のための運転計画方法と、需要家間の電力融通により、集合住宅全体でのエネルギー削減量の向上を可能とする運転方法を提案した。

本論文で述べたユニット制御による運転例では、1 日あたり系統電力とガス給湯器を使った場合に必要な一次エネルギー184.7 MJ に対して、従来運転方法の水素 PEFC コージェネレーションシステム導入では 177.7 MJ、一次エネルギー削減率は 3.8 %となり、提案運転方法では 176.1 MJ、4.7 %に改善することをシミュレーションにより示した。実機運転でも、運転結果から一次エネルギーを求めると 177.5 MJ、3.9 %という結果が得られた。

さらに、集合住宅棟内での電力融通を実現する統合制御についても、その効果を実証した。統合制御による電力融通運転例では、従来システムに対して 51.7 MJ のエネルギー削減量、18.7 %の一次エネルギー削減率が得られ、電力融通しない場合と比較してもエネルギー削減量で 19.7 MJ、一次エネルギー削減率が 7.1 ポイント向上した。

以上のように、集合住宅での一次エネルギー削減には、水素 PEFC コージェネレーションシステムによる電力融通運転が非常に有効であることが示された。水素の製造方法や供給方法については法的な整備がなされていない等、現時点では課題も多いが、水素社会実現のため、今後も研究は継続して行われる必要があると考える。

7. 結論

本論文では、家庭用エネルギー供給システムとして、家庭用 PEFC コージェネレーションシステムによる一次エネルギーと CO_2 排出量削減について、その実現のためのシステムの最適構成と運転計画法を中心に述べた。

本研究で得られた成果は以下の通りである。

第２章では、日本におけるエネルギー需要と CO_2 排出量に関する現状分析を行うことで、現時点での課題が家庭部門での一次エネルギー消費量の削減と CO_2 排出量の削減であり、特に家庭での電力に起因する一次エネルギー消費量と CO_2 排出量の削減が重要であることを示した。また、その課題解決には、家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの導入が効果的である可能性があるとの結論を得た。

さらに、本論文で評価に用いる需要データの分布を示し、家庭部門の評価に用いることに問題がないことを確認した。

第３章では、家庭用エネルギー供給システムを比較評価し、それぞれのシステムに関し、導入効果を明確にした。

潜熱回収型給湯器は比較評価した３システム中、最も削減が小さく、一次エネルギー削減に関しては、自然冷媒ヒートポンプ式給湯器が家庭用 PEFC コージェネレーションシステムを上回る結果となった。しかし、CO_2 排出削減量に関しては、家庭用 PEFC コージェネレーションシステムが優位であることがわかった。

第４章では、定置用燃料電池大規模実証事業に先だって行われた著者らが開発した運転計画法を搭載した家庭用 PEFC コージェネレーションシステムのフィールドテストで得られたデータを基に、その導入効果を評価した。

排熱が不足する場合は出力上昇運転モード、排熱が余る場合は出力抑制モード、もしくは、不連続運転モードが選択され、その運転計画法が有効に機能することを確認した。

第５章では、第３章と第４章で明らかとなった課題を解決すべく、家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの導入効果をさらに向上させるシステム設計、運転方法を提案、評価を行い、その効果を確認した。

運転評価期間を 24 時間に固定する従来の運転計画方法に対して、新規に提案を行った、運転計画周期とその運転計画を評価する評価期間を 24 時間と 48 時間にする運転計画法を適用することで、導入効果を大幅に向上できることを示した。

さらに、システムへの蓄電池搭載に対応した運転計画法を提案し、その運転計画法の適用によって、システムの導入効果をさらに向上させることが可能であることを示した。

第 6 章では、集合住宅用のエネルギー供給システムとして、水素 PEFC コージェネレーションシステムの適用を提案し、その、起動損失が極めて小さく、起動に要する時間も短い特徴を生かし、24 時間内に複数回の起動停止することと、電力融通を前提とした運転計画法を提案した。

提案の運転計画法の適用により、一次エネルギー削減の向上が実現できることを、シミュレーションと実システムにより、評価、実証した。

以上述べたように、本論文は家庭用エネルギー供給システム、特に家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの導入効果を向上させる、システムの設計、運転計画法について新規な提案を行い、その有効性を確認したものであり、今後の家庭用 PEFC コージェネレーションシステムに関する技術開発と市場での導入拡大に寄与するものである。

付録 1　定数・記号一覧

本論文で用いた定数・記号を、以下にまとめて記載する。

項目	記号	数値	単位
発電所効率（昼間）	η_{ppD}	9970	kJ/kWh
発電所効率（夜間）	η_{ppN}	9280	kJ/kWh
発電所効率（全日）	η_{pp}	0.369	
発電所効率（省エネ法改正前　全日）	η^{old}_{pp}	0.366	
給湯器効率（固定値）	η_{gb}	0.7	
火力発電所 CO2 排出係数	K_{ppCO2}	555	gCO_2/kWh
都市ガス CO2 排出係数	K_{13ACO2}	0.0506	gCO_2/kJ
単位換算	k_1	60	min/h
単位換算	k_2	3600	J/Wh
単位換算	k_3	4.19605	kJ/kcal
水の比重	k_4	1.0	g/cm^3

項目	記号	論文中で主に適用される単位
電力需要	$D_E(t)$	kW
給湯需要	$D_H(t)$	kJ
従来型給湯器効率	η^1_b	
潜熱回収型給湯器効率	η^2_b	
従来システム一次エネルギー	Q_{CONVPE}	kJ
従来システム CO_2 排出量	$Q_{CONVCO2}$	gCO_2
潜熱回収型給湯器システム一次エネルギー	Q_{condPE}	kJ
潜熱回収型給湯器システム CO_2 排出量	$Q_{condCO2}$	gCO_2
潜熱回収型給湯器システム一次エネルギー削減量	F_{condPE}	kJ
潜熱回収型給湯器システム CO_2 排出削減量	$F_{condCO2}$	gCO_2
潜熱回収型給湯器システム一次エネルギー削減率	R_{condPE}	
潜熱回収型給湯器システム CO_2 排出削減率	$R_{condCO2}$	
水温	$T_w(t)$	℃
ヒートポンプの COP 値	$H_{COP}(t)$	
ヒートポンプ運転計画	$H_{drive}(t)$	
ヒートポンプ入力一次エネルギー	$H_{in}(t)$	kW
ヒートポンプ出力	$H_{out}(t)$	kW
ヒートポンプシステム一次エネルギー	Q_{HPPE}	kJ
ヒートポンプシステム CO_2 排出量	Q_{HPCO2}	gCO_2
ヒートポンプシステム一次エネルギー削減量	F_{HPPE}	kJ
ヒートポンプシステム CO_2 排出削減量	F_{HPCO2}	gCO_2

項目	記号	論文中で主に適用される単位
ヒートポンプシステム一次エネルギー削減率	R_{HPPE}	
ヒートポンプシステム CO_2 排出削減率	R_{HPCO2}	
PEFC 発電電力	$G_E(t)$	kW
負荷追従上昇速度	G_{up}	kW/min
負荷追従下降速度	G_{dn}	kW/min
PEFC 回収熱量	$G_H(t)$	kJ
PEFC 発電効率	η_{Efc}	
PEFC 熱回収効率	η_{Hfc}	
余剰電力処理ヒーター効率	η_{ht}	
余剰電力処理ヒーター出力	$H_p(t)$	kW
時間帯初期貯湯熱量	$S_H(t)$	kJ
不足熱量	$A_b(t)$	kJ
貯湯槽放熱率	γ_T	
貯湯槽放熱時間	t_Y	min
配管放熱	γ_p	
PEFC システム導入後一次エネルギー量	Q_{FCPE}	kJ
PEFC システム導入後 CO_2 排出量	Q_{FCCO2}	gCO_2
PEFC システムによる CO_2 排出削減量	F_{CO2}	gCO_2
貯湯湯量	$Q_{HW}(t)$	L
平均貯湯温度	$S_t(t)$	℃
排熱回収温度	Rt	℃
貯湯槽容量	Q_{HWmax}	L
充放電電力	$C_{batt}(t)$	kW
蓄電量	$S_E(t)$	kWh
蓄電池容量	S_{Emax}	kWh
システム最大出力電力	G_{max}	kW
PEFC システムによる一次エネルギー削減量	F_{PE}	kJ
PEFC システムによる単位時間当たりの一次エネルギー削減量	$P_{ES}(t)$	kJ
不足電力	$Le(t)$	kW

付録 2　データの形式について

本論文で使用したエネルギー需要データは、電力需要、給湯需要、水温の 3 種で構成されている。

電力需要は論文中では $D_E(t)$の記号で表され、kW を単位とする 1 分毎の電力需要の平均値である。

よって、例えば 1 日の電力需要を D_{EJ}[kJ]とすれは、次式で求められる。

$$D_{EJ} = \sum_{t=0}^{1439} D_E(t)\Delta t \cdots\cdots (\text{Ap.1})$$

ここで、Δt=60 sec である。

(3.1)式では、電力需要を kWh で求め、それに発電所効率（単位は kJ/kWh で、kJ は一次エネルギー、kWh は二次エネルギーの単位）を乗じて電力需要に相当する一次エネルギーを求めている。その詳細は以下の通りである。

1 日の電力需要 D_{EW}[kWh]は次式で表される。

$$D_{EW} = \sum_{n=0}^{23}\left(\frac{1}{60}\times\sum_{t=0}^{59} D_E(n\times 60+t)\right) \cdots\cdots (\text{Ap.2})$$

つまり、(Ap.2)式は 1 時間の平均電力需要[kWh]を 24 時間分積算し 1 日の電力需要[kWh]として求めている。

(3.1)式では効率が昼間と夜間で別の値が用いられるが、簡単のため、ここでは発電所効率を η[kJ/kWh]とおけば、1 日の電力需要一次エネルギー Q_{EPE}[kJ]は

$$Q_{EPE} = \sum_{n=0}^{23}\left(\frac{1}{60}\times\sum_{t=0}^{59} D_E(n\times 60+t)\right)\times\eta \cdots\cdots (\text{Ap.3})$$

(3.1)式では積算範囲の表記を簡単にして、昼間の時間帯を DayTime、夜間の時間帯を NightTime、1 日を AllDay としている。

上記したように、(Ap.1)式のように kW から kJ の値を直接求める場合と、(Ap.3)のように kW から kWh を求めて係数をかけて kJ の値を求める場合とがあるため、本論文

では(Ap.1)式のような場合でも k_1=60 min/h、k_2=3600 kJ/kWh という係数を設けて求めるように統一した。

つまりこの表記によれば、(Ap.1)式は、

$$D_{EJ} = \sum_{t}^{AllDay} D_E(t) \times \frac{k_2}{k_1} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{(Ap.1')}$$

(Ap.3)式は、

$$Q_{EPE} = \sum_{t}^{AllDay} D_E(t) \times \frac{\eta}{k_1} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{(Ap.3')}$$

その一方、給湯需要は論文中では $D_H(t)$の記号で表され、kJ を単位とする 1 分毎の給湯需要の合計値である。従って、1 日の給湯需要 D_H[kJ]は、電力需要と異なり次式で求めることができる。

$$D_E = \sum_{t=0}^{1439} D_E(t) \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{(Ap.4)}$$

なお、本論文では計算式を時間幅 1 分の時間帯 t の関数として扱っている。t=0 が先頭となり、365 日分その後に続く。つまり、1 日目のはじめは t=0 であり、2 日目のはじめは t=1440 である。

従って、t=0,1,2,‥‥となる 0 及び正の整数であり、t−1 とは、対象としている時間帯 t の 1 つ前、1 分前の時間帯の状態を指す。

謝辞

本研究の遂行と本論文をまとめるに当たり多くの貴重なご指導、ご助言を賜りました、神戸大学大学院工学研究科電気電子工学専攻八坂保能教授、竹野裕正准教授、米森秀登助教に深く感謝いたします。

本研究開始に際してご助言を賜りました、㈱ガスアンドパワー監査役本田國昭氏、㈱大阪ガス燃料電池システム部マネジャー栢原義孝氏に感謝いたします。

家庭用 PEFC コージェネレーションシステムの運転計画法の研究に関して様々なご助言を頂いた㈱大阪ガスリビング技術開発部早野彰人氏、資源海外開発部滝本桂嗣氏、燃料電池システム部桝本幸嗣氏に感謝いたします。

本研究のため様々なご指導、ご配慮を頂いた、大阪ガス燃料電池システム部長嘉数隆敬氏をはじめ、大倉良一氏、マネジャー川本将則氏、日本ガス協会技術開発部長田畑健氏に感謝いたします。

最後に、神戸大学大学院工学研究科電気電子工学専攻／工学部電気電子工学科電磁エネルギー物理学研究室の皆様に感謝いたします。

参考文献

(1) 環境省：平成 20 年度版 環境・循環型社会白書（2008）

(2) 環境省：平成 21 年度版 環境・循環型社会・生物多様性白書（2009）

(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 (2009)

(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 (2010)

(5) A. Bergen, L. Pitt, A. Rowe, P. Wild and N. Djilali：Experimental assessment of a residential scale renewable-regenerative energy system, Journal of Power Sources, Vol.186, pp.158-166 (2009)

(6) E.M. Stewart, A.E. Lutz, S. Schoenung, M. Chiesa, J.O. Keller, J. Fletcher, G. Ault, J. McDonald and A. Cruden：Modeling, analysis and control system development for the Italian hydrogen house, International Journal of Hydrogen Energy, Vol.34, pp1638-1646 (2009)

(7) 小山佳宣，小宮純，井関孝弥，山田洋司：家庭用燃料電池コージェネレーション「LIFEL」の商品化と運転事例について，コージェネレーションシンポジウム 2005 発表抄録集, pp.117-125 (2005)

(8) 乾義尚，武藤利英，前田哲彦：電力・給湯負荷に基づく集合住宅用 PEFCμCGS の容量と運転法の検討，電気学会論文誌, Vol.128-B, No.2, pp.451-458 (2008)

(9) 藤生昭，上田雅敏，松林孝昌，吉田晶一，冨賀見有吾：高い省エネルギー性を実現する家庭用燃料電池コージェネレーションシステム，三洋電機技報, Vol37, No1, pp.69-77 (2005)

(10) 桝本幸嗣，前田和茂，早野彰人，滝本桂嗣：家庭用ガスコージェネレーションシステムの運転制御方法について，第 23 回エネルギー・資源学会研究発表会, pp.9-12 (2004)

(11) 前田和茂, 早野彰人, 滝本桂嗣, 桝本幸嗣 : 家庭用燃料電池コージェネレーションシステムの運転方法及びフィールドテスト結果について, コージェネレーションシンポジウム 2005 発表抄録集, pp.91-98 (2005)

(12) K. Maeda, K. Masumoto and A. Hayano：A study on energy saving in residential PEFC cogeneration systems, Journal of Power Sources, Vol.195, pp.3779–3784 (2010)

(13) K. Maeda, M. Suzuki and H. Aki：R&D and Deployment of Residential Fuel Cell Cogeneration Systems in Japan, Proceedings of IEEE PES 2008 General Meeting 08GM0215 (2008)

(14) 前田和茂, 米森秀登, 八坂保能：家庭用 PEFC コージェネレーションシステム導入による一次エネルギー量と CO_2 排出量削減効果の評価, 電気学会論文誌, Vol.130-B, No.7, pp.640-650 (2010)

(15) 土井雄介, 石田政義, 安芸裕久 : 家庭用燃料電池-電気二重層キャパシタ蓄電システムの運用方策とエネルギーネットワークへの適用, 電気学会論文誌, Vol.128-B, No.5, pp.742-750 (2008)

(16) K. Maeda, A. Hayano, H. Tajiri：The Development of Lithium-ion Battery for Residential Fuel Cell Cogeneration System, Proceedings of. The 5th International Conference on New Energy Systems and Conversions, FC-4 (2001)

(17) 岩崎和一、金子隆之、坂田悦朗：1KW 級家庭用燃料電池の大規模と水素機開発の現状, 東芝レビュー, Vol. 62 No.2, pp50-53 (2007)

(18) 前田和茂 : 集合住宅向け水素燃料電池コージェネレーションシステムの開発, 科学と工業, Vol. 81-10, pp. 22-28 (2007)

(19) 林泰弘, 川崎章司, 松本純也, 友本篤志, 宮本英樹, 舟橋俊久, 奥野義道, 林孝則：燃料電池設置型集合住宅における最適熱電併給計画決定手法, 電気学会論文誌, Vol.128-B, No.10, pp. 1217-1226 (2008)

(20) H. Aki a, S. Yamamoto, J. Kondoh, T. Maeda, H. Yamaguchi, A. Murata and I. Ishii：Fuel cells and energy networks of electricity, heat, and hydrogen in residential areas, International Journal of Hydrogen Energy, Vol.31, pp. 967-980 (2006)

(21) 経済産業省，国土交通省：告示第二号別紙第 1 (2009)

(22) 経済産業省： エネルギーの使用の合理化に関する法律施行規則，別表第 3，経済産業省令（2006)

(23) 環境省，経済産業省： 温室効果ガス排出算定・報告マニュアル Ver.2.4, pp.Ⅱ-34 (2007)

(24) 下田吉之，山田幸男，岡村朋，谷口綾子，山口容平：家庭用エネルギーエンドユースモデルを用いた我が国民生家庭部門の温室効果ガス削減ポテンシャル予測，エネルギー資源学会論文誌, Vol.30, No3, pp.1-9 (2009)

(25) 前真之，福澤清，佐藤誠，鎌田元康，岩本靜男，近藤武士：給湯使用モードによる家庭用ガス・石油給湯器の熱効率測定法の標準化調査研究(第 1 報)研究の概要とガス瞬間式給湯器の効率基礎実験，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.71-74 (2006)

(26) 福澤清，前真之，近藤武士，佐藤誠，佐野隆之，鎌田元康，岩本靜男：給湯使用モードによる家庭用ガス・石油給湯器の熱効率測定法の標準化調査研究（第 5 報）実験条件の検討ならびに標準条件における効率実験例，空気調和・衛生工学会大会学術論文集, pp.87-90 (2006)

(27) 横山耕平，杉原英治，佐伯修，辻毅一郎：複数世帯のエネルギー消費実測データに基づく共用型ヒートポンプ給湯システムの導入効果，エネルギー資源学会論文誌, Vol.29, No2, pp.8-13 (2008)

(28) 井原匡哉，近藤武士，岩本靜男，倉渕隆，前真幸，鎌田元康：住宅用自然冷媒ヒートポンプ給湯機の貯湯槽内温度分布，空気調和・衛生工学大会学術講演論文集, pp.67-70 (2006)

(29) 東京電力：家庭用自然冷媒ヒートポンプ給湯器「エコキュート」の CO_2 排出削減量算定方法について，
http://www.tepco.co.jp/eco/support_plan/membership/co2/pdf/co2_eco.pdf
(2004)

(30) 山岸由佳，杉原英治，佐伯修，辻毅一郎：日々のエネルギー需要実測データに基づく住宅用コージェネレーションシステムの運用手法に関する研究，電気学会論文誌, Vol.128-B, No.3, pp.528-536 (2008)

(31) 田中洋一，福島雅夫：確率計画法によるコージェネレーションシステムの最適運用，電気学会論文誌, Vol.129-B, No.6, pp.765-775 (2009)

(32) 前田和茂：集合住宅用固体高分子形燃料電池コージェネレーションシステムの運転方法，パワーエレクトロニクス学会論文誌, Vol.34 pp.90-96 (2008)

引用データ等

(1) 国立環境研究所：日本の温室効果ガス排出量データ（1990～2008 年度）, http://www-gio.nies.go.jp/aboutghg/nir/nir-j.html (2010)

(2) 環境省：平成 22 年版環境統計集, http://www.env.go.jp/doc/toukei/index.html (2010)

(3) 北海道電力(株)：Fact Book 2009 (2009)

(4) 東北電力(株)：東北電力 NOW CSR Report 2009 (2009)

(5) 東京電力(株)：環境行動レポート, http://www.tepco.co.jp/eco/report/data/index-j.html

(6) 中部電力(株)：中部電力グループ, CSR 報告書 2009 (2009)

(7) 関西電力(株)：CSR Report 2009 (2009)

(8) 四国電力(株)：四国電力アニュアルレポート'09 (2009)

(9) 九州電力(株)：九州電力 CSR 報告書 2009 (2009)

研究業績一覧

学術論文

K. Maeda, K. Masumoto and A. Hayano：A study on energy saving in residential PEFC cogeneration systems, Journal of Power Sources. 195. pp.3779–3784, (2010)

前田和茂，米森秀登，八坂保能：家庭用 PEFC コージェネレーションシステム導入による一次エネルギー量と CO_2 排出量削減効果の評価，電気学会論文誌, Vol.130-B, No.7, pp.640-650 (2010) (掲載予定)

前田和茂，米森秀登，八坂保能：リチウムイオン蓄電池を搭載した家庭用 PEFC コージェネレーションシステム導入による一次エネルギー量と CO_2 排出量削減効果の評価，電気学会論文誌 B,(投稿中)

学術講演

国内

前田和茂，早野彰人，滝本桂嗣，桝本幸嗣：家庭用燃料電池コージェネレーションシステムの運転方法及びフィールドテスト結果について，コージェネレーションシンポジウム 2005 発表抄録集, pp.91-98 (2005)

前田和茂：集合住宅用固体高分子形燃料電池コージェネレーションシステムの運転方法，パワーエレクトロニクス学会論文誌. Vol.34 pp.90-96 (2008)

海外

K. Maeda, A. Hayano and H. Tajiri：The Development of Lithium-ion Battery for Residential Fuel Cell Cogeneration System, Proceedings of The 5th International Conference on New Energy Systems and Conversions, FC-4, (2001)

K. Maeda, M. Suzuki and H. Aki：R&D and Deployment of Residential Fuel Cell Cogeneration Systems in Japan, Proceedings of IEEE Power & Energy Society 2008 General Meeting, 08GM0215 (2008)

関連特許

４章関連

前田和茂, 早野彰人, 岩田伸, 高木博司, 吉村正博, 吉田哲：特許 4059778, 電力回収システム, 2003 年 2 月 26 日

前田和茂：特許 4397183, コージェネレーションシステム, 2003 年 6 月 30 日

滝本桂嗣, 早野彰人, 前田和茂：特許 03983208, コージェネレーションシステム, 2003 年 7 月 18 日

滝本桂嗣, 早野彰人, 前田和茂：特許 04465168, コージェネレーションシステム, 2003 年 7 月 18 日

滝本桂嗣, 栢原義孝, 前田和茂：特許 03992146, コージェネレーションシステム, 2003 年 7 月 31 日

滝本桂嗣, 栢原義孝, 前田和茂：特許 4367696, コージェネレーションシステム, 2003 年 9 月 30 日

桝本幸嗣, 前田和茂, 早野彰人：特願 2007-021767, コージェネレーションシステム, 2007 年 1 月 31 日

桝本幸嗣, 前田和茂：特願 2007-021768, コージェネレーションシステム, 2007 年 1 月 31 日

桝本幸嗣, 前田和茂, 早野彰人：特願 2008-093783, コージェネレーションシステム, 2008 年 3 月 31 日

５章関連

前田和茂, 早野彰人, 菊田治夫：特許 4454187, 電源装置, 2001 年 6 月 22 日

前田和茂, 早野彰人：特許 03821689, 電源装置の管理システム, 2001 年 11 月 8 日

前田和茂, 早野彰人：特許 03810307, 電源装置, 2001 年 11 月 27 日

早野彰人, 前田和茂, 田尻博幸, 栗山和哉, 加藤史朗, 矢田静邦：特許 4022726, 非水系二次電池モジュールの制御法, 2002 年 3 月 26 日

前田和茂, 早野彰人：特許 03964852, 分散型発電システム, 2003 年 10 月 22 日

前田和茂：特願 2006-130294, エネルギ供給システム, 2006 年 5 月 9 日

前田和茂：特願 2009-202001, コージェネレーションシステム, 2009 年 9 月 1 日

前田和茂：特願 2010-014535, コージェネレーションシステム, 2010 年 1 月 26 日

６章関連

前田和茂, 桝本幸嗣：特願 2006-299210, コージェネレーションシステム, 2006 年 11 月 2 日

前田和茂：特願 2006-334572, 集合式のコージェネレーションシステム, 2006 年 12 月 12 日