

需要の不確実性を考慮した  
家庭用エネルギー管理システムの  
運用計画に関する研究

Operational Planning Method for  
Home Energy Management System  
Considering Demand Uncertainty

2015年2月

吉田 彬

Akira YOSHIDA





需要の不確実性を考慮した  
家庭用エネルギー管理システムの  
運用計画に関する研究

Operational Planning Method for  
Home Energy Management System Considering  
Demand Uncertainty

2015年2月

早稲田大学大学院 基幹理工学研究科  
機械科学専攻 動力・エネルギー工学研究

吉田 彬

Akira YOSHIDA



**Operational Planning Method for Home Energy Management System  
Considering Demand Uncertainty**

Approved by:



Dr. Amano, Yoshiharu, Supervisor  
Department of Applied Mechanics and Aerospace Engineering  
Waseda University

Date Approved:

*2, 6, 2015*



## 目次

目次	i
図表目次	v
記号表	ix
概要	xii
<b>第1章 序論</b>	<b>1</b>
1・1 背景	1
1・1・1 コージェネレーションシステム概要	3
1・1・2 家庭用コージェネレーションシステムの現状	4
1・1・3 運用計画問題	6
1・1・4 Home Energy Management System	7
1・2 従来研究	8
1・2・1 エネルギーシステムの運用方策・導入評価	8
1・2・2 エネルギー需要特徴	9
1・2・3 不確実性下における意思決定問題	10
1・3 目的	11
1・4 本論文の構成	13
<b>第2章 PEFC-CGS の特性評価試験</b>	<b>15</b>
2・1 概要	15
2・2 システム構成	15
2・3 実験条件およびデータ解析	21
2・4 結果	24
2・4・1 PEFC 負荷追従・起動・停止特性	24
2・4・2 HWT 放熱特性	30
2・4・3 PEFC・GB 入出力特性	34
2・5 本章のまとめ	38
<b>第3章 PV-BT 組込み型 FC-CGS の省エネルギー性評価</b>	<b>39</b>
3・1 概要	39
3・2 対象システム	39
3・2・1 太陽電池・蓄電池組込み型 PEFC システム	39
3・2・2 太陽電池・蓄電池組込み型 SOFC システム	40

## 目次

3・2・3 比較基準システム	41
<b>3・3 最適運用計画問題</b>	<b>42</b>
<b>3・4 各種システムの省エネルギー性評価</b>	<b>43</b>
3・4・1 前提条件	43
3・4・2 比較検討システム	47
3・4・3 計算結果および考察	48
(a) 年間省エネルギー性	48
(b) 年間機器稼働状況および最適システム運用方策	51
<b>3・5 本章のまとめ</b>	<b>55</b>
<b>第4章 エネルギー需要特徴の分類と省エネルギー性評価</b>	<b>57</b>
<b>4・1 概要</b>	<b>57</b>
<b>4・2 電力・給湯需要データ</b>	<b>58</b>
<b>4・3 検討対象システム</b>	<b>59</b>
4・3・1 PEFC-CGS	59
4・3・2 比較基準システム	60
<b>4・4 最適運用計画問題</b>	<b>61</b>
4・4・1 目的関数	61
4・4・2 制約条件	61
<b>4・5 エネルギー需要特性分類手法</b>	<b>64</b>
4・5・1 混合ガウス分布による時系列の近似	65
4・5・2 KL 情報量による需要時系列同士の距離行列の生成	67
4・5・3 距離行列に基づく階層的クラスタリング	68
<b>4・6 数値実験結果</b>	<b>69</b>
4・6・1 年間・日間省エネルギー率	69
4・6・2 家庭間のエネルギー需要特性の比較分析	71
4・6・3 エネルギー需要時系列の分類	72
<b>4・7 本章のまとめ</b>	<b>81</b>
<b>第5章 確率計画法を用いた家庭用 PEFC システムの運用方策の検討</b>	<b>83</b>
<b>5・1 概要</b>	<b>83</b>
<b>5・2 不確実性下における最適運用計画問題</b>	<b>83</b>
5・2・1 決定論的最適運用計画手法	85
5・2・2 確率論的最適運用計画手法	87
<b>5・3 結果および考察</b>	<b>88</b>
5・3・1 数値実験条件	88
(a) システム係数	88
(b) エネルギー需要および PV データ	89

5・3・2	ならし効果および一次エネルギー消費量	91
5・3・3	入力シナリオ数の影響	94
5・3・4	SPによる最適運用方策	96
5・4	本章のまとめ	98
<b>第6章 予測に基づく HEMS 運用計画手法</b>		<b>101</b>
6・1	概要	101
6・2	対象システム	102
6・3	予測に基づく HEMS 運用計画手法	103
6・3・1	提案手法	103
(a)	予測手法	103
(b)	運用計画手法	104
(c)	運用成績評価手法	106
6・3・2	比較手法	107
6・4	数値実験	107
6・4・1	前提条件	107
6・4・2	予測結果	108
6・4・3	予測に基づく運用方策	110
6・4・4	各システムにおける運用費	111
6・4・5	実現値に対する運用結果	112
6・5	本章のまとめ	115
<b>第7章 結論</b>		<b>117</b>
7・1	本論文の成果	117
7・2	今後の展望	122
7・2・1	運用方策と実時間制御の接続	122
7・2・2	エネルギー需要予測	122
7・2・3	システム境界の拡張	123
<b>謝辞</b>		<b>125</b>
<b>参考文献</b>		<b>127</b>
第1章		127
第2章		130
第3章		131
第4章		131
第5章		132
第6章		133





## 图表目次

Table 1.1	Summary of purchasable residential FC-CGS	5
Table 2.1	Summary of instrumentation used in PEFC-CGS experimental setup	17
Table 2.2	Specification of PEFC-CGS experimental setup	18
Table 2.3	Total amount of energy consumption and output of PEFC-CGS	29
Table 2.4	Energy balance of primary energy consumption and energy supply	30
Table 2.5	Extended uncertainty based on measured values	38
Table 3.1	Efficiency of PEFC	45
Table 3.2	Efficiency of SOFC	45
Table 3.3	Electricity consumed by pumps	46
Table 3.4	Conversion factor of primary energy	47
Table 3.5	Several systems compared by numerical analysis	49
Table 3.6	Annual values of optimal operational results of several systems compared	52
Table 4.1	Efficiency of PEFC	60
Table 4.2	System specifications	60
Table 4.3	Characteristics of two houses	72
Table 4.4	Demand groups	73
Table 5.1	System specifications	89
Table 5.2	Numerical result for 30 scenarios (S=30)	92
Table 6.1	Added constraints for operation in real time	106
Table 6.2	System specifications	107
Table 6.3	Electricity and fuel prices	108

## 图表目次

Fig. 1.1	Picture of an “ENE·FARM”	6
Fig. 1.2	Concept of HEMS	8
Fig. 2.1	Picture of FC unit, HWT unit and GB	16
Fig. 2.2	Schematic diagram of PEFC-CGS experimental setup	16
Fig. 2.3	Energy flow of gas, thermal and power for identifying FC parameter	25
Fig. 2.4	Power consumption of GB, FC and HWT unit for identifying FC parameter	26
Fig. 2.5	Temperature profile of passing through PEFC for identifying FC parameter	26
Fig. 2.6	Temperature profile of passing through GB for identifying FC parameter	26
Fig. 2.7	Temperature profile of ambience for identifying FC parameter	27
Fig. 2.8	Temperature profile in HWT for identifying FC parameter	27
Fig. 2.9	Water-flow-rate profile between HWT and FC for identifying FC parameter	27
Fig. 2.10	Water-flow-rate profile from HWT via GB to demand for identifying FC parameter	28
Fig. 2.11	Water-flow-rate profile from GB to HWT for identifying FC parameter	28
Fig. 2.12	Water-flow-rate profile from water to HWT for identifying FC parameter	28
Fig. 2.13	Water-flow-rate of PEFC unit at a day	29
Fig. 2.14	Energy balance in terms of primary energy consumption	30
Fig. 2.15	Energy flow of gas, thermal and power for identifying HWT parameter	31
Fig. 2.16	Power consumption of GB, FC and HWT unit for identifying HWT parameter	31
Fig. 2.17	Temperature profile of passing through PEFC for identifying HWT parameter	32
Fig. 2.18	Temperature profile of passing through GB for identifying HWT parameter	32
Fig. 2.19	Temperature profile of ambience for identifying HWT parameter	32
Fig. 2.20	Temperature profile in HWT for identifying HWT parameter	33
Fig. 2.21	Water-flow-rate profile between HWT and FC for identifying HWT parameter	33
Fig. 2.22	Water-flow-rate profile from HWT via GB to demand for identifying HWT parameter	33
Fig. 2.23	Water-flow-rate profile from GB to HWT for identifying HWT parameter	34
Fig. 2.24	Water-flow-rate profile from water to HWT for identifying HWT parameter	34
Fig. 2.25	Gas consumption and PEFC output	35
Fig. 2.26	Power and thermal output of PEFC unit	35
Fig. 2.27	Overall net electric efficiency of PEFC unit	36
Fig. 2.28	Overall thermal efficiency of PEFC unit	36
Fig. 2.29	Water flow rate of PEFC unit at steady state	37
Fig. 2.30	Gas consumption and thermal output of GB unit	37

Fig. 3.1	PEFC system with PVS and BT	40
Fig. 3.2	SOFC system with PVS and BT	41
Fig. 3.3	Conventional system with PVS and BT	42
Fig. 3.4	Daily average values of energy demands in each month	44
Fig. 3.5	Performance characteristics of PEFC	45
Fig. 3.6	Performance characteristics of SOFC	45
Fig. 3.7	Characteristic values of several pieces of equipment	46
Fig. 3.8	Power output from PVS	47
Fig. 3.9	Annual energy saving ratio of PEFC and CS, (a) Case- $\alpha$ , (b) Case- $\beta$	51
Fig. 3.10	Annual energy saving ratio of SOFC	51
Fig. 3.11	Power supplying ratio from each source of PEFC	54
Fig. 3.12	Power supplying ratio from each source of SOFC	54
Fig. 3.13	Power supplying ratio from each source to electricity demand to BT	54
Fig. 3.14	Daily optimal operation of PE+PVS+BT(6) on November 9th, (a) Case- $\alpha$ , (b)Case- $\beta$	55
Fig. 3.15	Daily optimal operation of BT on November 9th	55
Fig. 4.1	Analysis framework of relationship between primary energy consumption and demand profiles	58
Fig. 4.2	Measured demand, (a) annual, (b) daily	59
Fig. 4.3	Schematic diagram of PEFC-CGS	59
Fig. 4.4	Schematic diagram of CS	60
Fig. 4.5	Sample of fitting Gaussian Mixture Model, (a) Hot water demand, (b) Electricity demand	66
Fig. 4.6	Distribution of primary energy reduction ratio in optimal operation, (a) annual, (b) daily, (c) DHW demand vs daily primary reduction ratio with contribution ratio, (d) frequency of primary energy reduction ratio	70
Fig. 4.7	Daily primary energy reduction ratio, (a) House A, (b) House B	73
Fig. 4.8	Clusters in Group B, (a) primary energy reduction ratio, (b) averaged demand patterns, (c) dendrogram	75
Fig. 4.9	Clusters in Group C, (a) primary energy reduction ratio, (b) averaged demand patterns, (c) dendrogram	76
Fig. 4.10	Clusters in Group D, (a) primary energy reduction ratio, (b) averaged demand patterns, (c) dendrogram	77
Fig. 4.11	Clusters in Group E, (a) primary energy reduction ratio, (b) averaged demand patterns, (c) dendrogram	78
Fig. 4.12	Clusters in Group F, (a) primary energy reduction ratio, (b) averaged demand patterns, (c) dendrogram	79
Fig. 4.13	Cluster histograms labeled from a monthly perspective, (a) House A, (b) House	

图表目次

B	80
Fig. 5.1 Schematic diagram of energy system	84
Fig. 5.2 Operational planning framework of residential energy system	85
Fig. 5.3 Daily demand data at one year	90
Fig. 5.4 Daily demand and PV data with date index	90
Fig. 5.5 Primary energy consumption for each scenario	93
Fig. 5.6 PEFC-CGS operating time of WS model	93
Fig. 5.7 Expected value of result for 30 scenarios	94
Fig. 5.8 Difference of primary energy consumptions	95
Fig. 5.9 Performance of SS model	96
Fig. 5.10 PEFC-CGS operating time of SS model	96
Fig. 5.11 Expected values of result of two models for seven scenarios	96
Fig. 5.12 Comparison of HWT operations	97
Fig. 5.13 Comparison of BT operations	98
Fig. 5.14 Comparison of FC operations for seven scenarios, (a) WS at $\omega_1$ , (b) WS at $\omega_2$ , (c) WS at $\omega_3$ , (d) WS at $\omega_4$ , (e) WS at $\omega_5$ , (f) WS at $\omega_6$ , (g) WS at $\omega_7$ , (h) SS	98
Fig. 6.1 Flow chart of HEMS operational planning method	102
Fig. 6.2 Schematic diagram of energy system	103
Fig. 6.3 Electricity rate and PV-FIT	108
Fig. 6.4 Predicted and realized electricity demand	109
Fig. 6.5 Predicted and realized hot water demand	109
Fig. 6.6 Predicted and realized PV output	110
Fig. 6.7 Predicted and realized comfortable temperature bound	110
Fig. 6.8 Planned PEFC operation based on prediction	111
Fig. 6.9 Planned BT operation based on prediction	111
Fig. 6.10 Daily operational cost of each system compared	112
Fig. 6.11 Operation of CS+BT against realized values using proposed HEMS operational method with 5 scenarios	113
Fig. 6.12 Operation of CS+BT against realized values using conventional method	113
Fig. 6.13 Operation of PE+PV+BT against realized values using proposed HEMS operational method with 5 scenarios	114
Fig. 6.14 Operation of PE+PV+BT against realized values using proposed HEMS operational method with 1 scenarios	114
Fig. 6.15 Operation of PE+PV+BT against realized values using conventional method	115

## 記号表

$a, \check{a}$	component index of the Gaussian mixture distribution	
$A$	technology matrix	
$b$	component index of the Gaussian mixture distribution	
$\mathbf{b}$	right-hand side vector	
$\mathbf{c}$	objective vector	
$c$	specific heat	
$C$	conversion factor	
$d$	date index	
$\mathcal{D}$	distance measure	
$\mathcal{D}$	distance matrix	
$e, E$	electricity,	kWh, kWh/h
$f, f'$	probability density function	
$\tilde{f}, \tilde{f}'$	Gaussian probability density function	
$g, \check{g}, G$	gas flow rate,	Nm <sup>3</sup> /h
$H$	heating value	MJ/Nm <sup>3</sup>
$J$	primary energy consumption,	MJ/day
$k$	discretized index	
$K$	number of discrete value	
$M$	big-M	
$N$	penalty coefficient	
$p$	probability	
$p, p'$	Gaussian mixture distribution	
$\tilde{p}, \tilde{p}'$	biased Gaussian mixture distribution	
$p$	probability	
$P$	pressure,	kPa
$q, Q$	heat,	kWh, kWh/h
$R$	heat-to-power ratio	
$s$	scenario index	
$S$	number of scenarios	
$t$	discretized time index	
$T$	number of time index	
$\mathbf{x}$	vector of continuous variables	
$V$	tank capacity	L
$z$	binary variable	
$\mathbf{z}$	vector of binary variables	
$Z$	binary parameter	

## 記号表

### Greek symbol

$\alpha$	slope	
$\beta$	intercept	
$\gamma$	contribution ratio	
$\delta t$	sampling period,	h
$\eta$	efficiency	
$\theta$	temperature,	°C
$\lambda$	unknown parameters	
$\mu$	mean vector	
$\xi$	realization of random variable	
$\pi$	mixing coefficient	
$\rho$	water density	
$\Sigma$	covariance matrix	
$\varphi$	primary energy reduction ratio	
$\omega$	scenario index	
$\Omega$	set of scenarios	

### Subscripts and Superscripts

$a, \check{a}$	component index of the Gaussian mixture distribution
air	air
AUXS	auxiliary
$b$	component index of the Gaussian mixture distribution
B	boiler
BT	battery
buy	bought
C	controller
CS	conventional system
day	daytime
dem	demand
E	non-HVAC electricity demand
e	electricity
$\tilde{f}, \tilde{F}$	probability density function
FC	fuel cell
g	gas
gas	gas
gen	generalized
gm	Gaussian mixture distribution
H	electric heater
x	

HW	hot water demand
HWT	hot water tank
$i$	start-up term
in	inlet
KL	KL divergence
night	night time
out	outlet
$p, p'$	probability density function
P1,P2,P3	pump
PVS	photovoltaic system
r	reversed
R	radiator fan
rate1, rate2	piecewise-linear term
SS	single stage
symm	symmetrized
up	start-up
w	water
WS	wait-and-see
X	system
Y	device

## 概要

本論文は、「需要の不確実性を考慮した家庭用エネルギー管理システムの運用計画に関する研究」と題し、7章から構成される。

次世代家庭用エネルギーシステムとして、燃料電池コージェネレーションシステム (FC-CGS) が開発されている。FC-CGS は貯湯槽 (HWT) を持つことで、機器の瞬時熱出力を大きく上回る需要に対応すべく設計されている。また、起動・停止に時間を要することから、運用方策を予め適切に決定することで、システムの潜在能力を最高度に発揮し、省エネルギー・省コストとなることが知られている。一方で、自然エネルギーの積極的活用促進の観点から太陽光発電 (PV) の大量導入が進んでいる。自然エネルギー源の出力は天候依存で制御が困難であることから、大容量の PV を電力系統へ連系することで電圧等の電力品質への影響が懸念されており、PV と組み合わせて蓄電池 (BT) を備え付けることで、PV 出力の変動を吸収する試みがなされている。同時に、次世代の通信機能付き電力計であるスマートメータへの入れ替えが進展している。スマートメータは電力需給の合理化を目的としたデマンドレスポンス (DR) 信号を電力システムの運用者より受信する機能を持ち、家庭用エネルギーシステムがその DR 信号に対応する節電行動を実施することで、家庭、地域単位でのエネルギーの合理的利用を実現することが期待されている。しかし、現在のところ FC-CGS, PV, BT 等の家庭用エネルギーシステムは機器毎に独立した運用・制御を行っており、DR 信号には利用者自らが手動で対応せざるを得ない。そのため需要家毎に DR 信号に対する応答性が異なることが課題とされている。この課題の解決策として、DR 信号へ対応しつつ家庭用エネルギーシステムの全体最適運用を目的として、機器間の情報通信を用いて家庭単位のエネルギー管理を一括して行う Home Energy Management System (HEMS) が提唱されている。HEMS 概念のひとつの発端は、Building Energy Management System (BEMS) であると考えられる。BEMS は多くの場合、安価な夜間電力を利用する蓄熱槽の合理的



運用，機器稼働状態の監視・制御，送水温度の設定値等を適切に運用することで，中小ビル 1 棟あたりのエネルギー利用効率を高める役割を果たしている．このような BEMS では夜間電力や蓄熱槽を活用するため，熱負荷予測に基づく運用計画が必要であり，そのアルゴリズムは大別して 3 つのステップから構成される．すなわち，翌日のエネルギー需要特徴を予測するステップ，予測された需要時系列パターンに基づき BEMS 運用者の利得を最大化するシステム全体の運用方策を事前に決定するステップ，ならびに実現値に対して運用方策に基づき実際に運用を行うステップである．BEMS と同様の役割を担うことを，家庭部門における HEMS が技術的に可能とするには，前述の特徴を持つ FC-CGS，PV，BT 等の家庭用エネルギー機器を取りまとめ DR 信号に対応しつつ，予測需要の不確実性下においてシステム全体が最適となる運用を行うアルゴリズムが必要となる．換言すれば，予測情報に基づく HEMS 運用技術が課題となっている．HEMS の現状としては，エネルギーの使用状況を閲覧する機器に留まっており，例えば Echonet Lite 等機器間通信のための標準化プロトコルが策定された段階である．そのプロトコルを用いる通信機能を備えた家庭用エネルギー機器の販売が開始されたものの，その機器の普及には長い期間を要することが見込まれ，また，HEMS のためにエネルギー機器自体にどのような機能を備えるべきかという点については十分に議論されていない．したがって，HEMS とその管理下におく家庭用エネルギー機器の開発指針を明らかにすることが，HEMS の有効性を高めることに貢献すると考えられる．

以上の背景を踏まえ，本論文は HEMS 開発の技術課題を解決するために，翌日の予測情報に基づく HEMS 運用計画手法を構築することを目的としている．その際に，HEMS 管理下には次世代エネルギー機器として FC-CGS，PV および BT を構成要素に持つシステムを検討対象としている．また，数値実験によって HEMS がシステム全体最適運用を達成した際の潜在能力を分析し，提案する予測に基づく HEMS 運用計画手法の有用性を定量評価し，HEMS とその管理下のエネルギー機器の開発指針を提示する．

## 概要

第1章は序論であり, 上記の問題点を抽出し, 従来研究の状況を述べている. また, 課題を明確化することで, 本論文の目的と位置づけを説明している.

第2章では, FC-CGS の運用計画問題の構築, すなわち, 数理モデルを提案し, FC-CGS の様々な条件下における実測データに基づき, モデル化方法を明らかにしている.

第3章では, これまで十分に検討がなされていない新たな家庭用エネルギー機器である PV・BT に対して FC-CGS と組み合わせた次世代家庭用エネルギーシステムの数理モデルを構築, すなわち, 混合整数線形計画法として定式化している. そして, 分枝限定法, 単体法等の解法を組み合わせることで目的関数である一次エネルギー消費量を最小化する最適運用方策を導出している. その際, FC-CGS の主機としては固体高分子形燃料電池 (PEFC) および固体酸化物型燃料電池 (SOFC) の双方を取り上げる. また, BT 蓄電容量についても市販家庭用据置型と電気自動車相当の容量の2つのケースを検討対象とする. さらに, PV 逆潮電力はシステムの一次エネルギー消費量に寄与しない, あるいは寄与するとした, 2つのケースを設定することで, 考える次世代家庭用エネルギーシステムの候補群を対象として数値分析を実施している. その結果, 次世代エネルギーシステムの潜在能力の最大値を明らかにしている. このとき, 需要特性がエネルギーシステム特性によく整合している場合には, 機器の持つ省エネルギー性が発揮されるが, 整合しない場合には, その省エネルギー性が十分に発揮されないことを明らかにしている. 以上の結果より, FC-CGS の省エネルギー性に寄与する需要特性の分析が, 機器の運用性能を評価する上で重要であることを明らかにしている.

第4章では, 需要特徴の分析手法を提案し, その具体的応用例として需要特徴がエネルギーシステムへ与える影響分析手法へ拡張している. 主機の熱電比の拘束が強い CGS においては, 主機の熱電比とエネルギー需要量の熱電比が整合した際に省エネルギー・省コストとなることが知られているものの, 家庭部門のエネルギー消費パター

ンの日毎・時刻毎の相対変動量は、民生部門の中の業務部門および産業部門と比較して顕著に大きい。そのため、CGS の潜在能力を發揮した運用を行えるかどうかは、設計段階ではなく日々の需要予測の精度に依存するところが大きい。しかし、時々刻々変動する家庭のエネルギー需要を正確に予測することは非常に困難である。そこで、翌日のエネルギー需要時系列パターンは、前日までに実現した需要時系列パターンに類似しているという仮定のもと、過去に実測した需要データと翌日に実現するであろう需要特性との類似度を判定し、分類することを提案している。ここでは、一般化 Kullback-Leibler divergence (KL 情報量) を用いて 1 日単位の需要時系列同士の距離を定義する手法を提案している。数値検討として、72 世帯に亘る実測のエネルギー需要量を対象に、1 日単位の時系列パターン同士の距離をそれぞれ算出し、ある日とある日の時系列パターン同士がどの程度異なるかという基準で定義された距離行列を作成してデータベース化している。この距離行列データベースに基づき階層的クラスタリングを実施することで、PEFC-CGS の省エネルギー性は、需要の 1 日の総量、熱電比および時系列パターンに影響されるものの、前者の 2 つが支配的要因であることを定量的に明らかにしている。

第 5 章では、不確実性下における運用計画問題の構築を行っている。古典的なエネルギーシステムの運用方策決定の方法論として、外生的に与えるエネルギー需要量を既知とする決定論的な最適運用計画問題が採用されてきた。しかし、家庭のエネルギー需要量は不確実性が高く、運用計画問題へ与えたエネルギー需要量が必ずしも実現しないという認識から、不確実な係数を有する系の運用方策決定の方法論として確率計画法 (SP) を用いる提案を行っている。数値実験により、不確実性を考慮した運用方策を用いると、将来の完全情報に基づく運用方策と比較して一次エネルギー消費量が 21% 増加することを明らかにしている。また、その際には、事前の運用計画を要する PEFC の運転時間を短縮し、運用計画が不要であるガスボイラおよび系統電力からのエネルギー供給が増加するという保守的な運用方策が採用される傾向にあること

## 概要

を示している。さらに、不確実性が増加してくると PEFC を使用しない運用方策が採用されるため、PEFC-CGS を活用するには予測シナリオの本数を増し過ぎず、予測精度を向上させる予測技術の必要性が示唆されている。

第 6 章では、HEMS の開発を目的としてその運用手法を提案している。提案手法は 3 つのステップから構成される。1 つ目のステップは、実用的な予測モデルとして用いられている Just-In-Time モデリング手法を用いてエネルギー需要時系列・PV 出力時系列パターンを予測を行っている。これは、第 4 章で提案した過去の需要時系列同士の距離を定義する手法に基づき構築したデータベースから、関係の深い因子から決定される類似波形を抽出することで、翌日のエネルギー需要・PV 出力時系列パターンを検索するものである。2 つ目のステップは、1 つ目のステップで予測されたエネルギー需要量・PV 出力を、第 5 章で提案した確率的最適運用計画問題へ外生変数として入力し、需要家の利得を最大化する運用方策を事前に決定するステップである。3 つ目のステップは、事前に計画された運用方策に基づき実際の需要実現値においてシステムを運用・制御し、1 日の運用成績を評価するというステップである。換言すれば、将来事象の不確実性下においてシステムの運用方策に関する事前の意思決定を行い、実時間においてその意思決定に基づき運用を履行した際の運用成績を評価している。次世代家庭用エネルギーシステム 8 種類を対象として、提案手法である HEMS 運用手法を用いて運用成績を評価したところ、運用計画が予測に基づかない比較手法に対して、省コストとなる傾向を示すことを明らかにしている。

第 7 章は結論であり、本論文で得られた結果を総括している。

以上より、従来の HEMS はエネルギー使用状況の閲覧に留まり、また、エネルギー機器毎に部分最適な運用を行っていた状況に対して、本論文では、予測に基づく確率的運用計画手法を用いた、全体最適となる HEMS を中核とした家庭用エネルギーシス

テムの最適運用計画手法を具体的に提案している。また、数値実験によりその提案手法の運用費用等の観点における有用性を示すことで、HEMS の具体的な開発指針の方向性を提示するものである。



## 第1章 序論

### 1.1 背景

個々の需要家におけるエネルギー消費を合理化する技術として、情報通信基盤を利用したシステム論的なアプローチが注目されている。省エネルギーに寄与する研究開発として、主に既存機器のエネルギー消費量削減、エネルギー消費量の少ない機器の積極的導入、ならびに地域・時間差を考慮したエネルギー需要量全体の削減という3つに分類できる。日本の家庭用エネルギー消費量は緩やかだが年々確実に増加している。2012年にはそのエネルギー消費量のうち冷暖房・空調用途を除く電力・給湯用途の消費量は72%に達した（住環境計画研究所，2013）。

これら電力・給湯用途のエネルギー消費量を低減させる目的で、次世代家庭用エネルギーシステムの中核機として、燃料電池コージェネレーションシステム（FC-CGS）が開発されている。FC-CGSは貯湯槽（HWT）を持つことで、機器の瞬時熱出力を大きく上回る需要に対応すべく設計されている。また、起動・停止に時間や燃料を要することから、運用方を予め適切に決定することで、システムの潜在能力を最高度に発揮し省エネルギーとなることで、運用コストの低減も期待できる。一方で、自然エネルギーの積極的活用の観点から太陽光発電（PV）の大量導入が進んでいる。自然エネルギー源の出力は天候依存で制御が困難であることから、PVと組み合わせて蓄電池（BT）を備え付けることで、PVの出力変動を吸収する試みがなされている。さらに、大量のPVを電力系統へ連系することで配電系統での電圧等の電力品質へ影響を与えることが懸念されており、その対応策として配電系統における潮流制御方式の研究が行われている。また、次世代の通信機能付き電力計であるスマートメータへの入れ替えが進んでいるが、単なる既存のメータ機能の代替に止まらず、電力需給の配電系統全体での合理的な潮流制御が模索されている。すなわち、デマンドレスポンス（DR）信号を電力系統の運用者より受信した需要家が、そのDR信号に対応して節電行動を実施することで、地域単位でのエネルギーの合理的利用を実現することが期待されて

## 第1章 序論

いる（中村，2012）．しかし，現在のところ FC-CGS，PV，BT 等の家庭用エネルギーシステムは機器毎に独立した運用・制御を行っており，DR 信号にはエネルギー機器側で自動的に応答するのではなく，需要家自らが手動で対応せざるを得ない状況にある．そのため需要家毎に DR 信号に対する応答性が異なることが課題とされている．この課題の解決策として，DR 信号へ対応しつつ家庭用エネルギーシステムの全体最適運用を目的として，機器間の情報通信を用いて家庭単位のエネルギー管理を一括して行うことが Home Energy Management System (HEMS) に期待されている．HEMS という概念の一つの発端は，Building Energy Management System (BEMS) であると考えられる．BEMS は安価な夜間電力を利用する蓄熱槽の合理的運用，機器稼働状態の監視・制御，送水温度の設定値等を適切に運用することで，中小ビル1棟あたりのエネルギー利用効率を高める役割を果たしている．BEMS は夜間電力や蓄熱槽を活用するため，熱負荷予測に基づく運用計画が必要であり，そのアルゴリズムは大別して3つのステップから構成される．3つステップとは，翌日のエネルギー需要特徴を予測するステップ，予測された需要時系列パターンに基づき BEMS 運用者の利得を最大化するシステム全体の運用方策を事前に決定するステップ，および実現値に対して運用方策に基づき実際に運用を行うステップである（Clarke et. al., 2002; Doukas et. al., 2007; Park et. al., 2011; Zhao et. al, 2013; 飯野他, 2011）．BEMS と同様の役割を担うことを，家庭部門における HEMS が技術的に可能とするには，前述の特徴を持つ FC-CGS，PV，BT 等の家庭用エネルギー機器を取りまとめ DR 信号に対応しつつ，需要の不確実性下においてシステム全体が最適となる運用を行うアルゴリズムが必要となる．すなわち，予測情報に基づく HEMS 運用技術が課題となっている．HEMS の現状としては，エネルギーの使用状況を閲覧する機器に留まっており，例えば Echonet Lite 等機器間通信のための標準化通信規格が策定された段階である．その規格を用いる通信機能を備えた家庭用エネルギー機器の販売が開始されたものの，その機器の普及には長い期間を要することが見込まれている．また，HEMS のためにエネルギー機器自体にどの



ような機能を備えるべきかという点については十分に議論されていない。したがって、HEMS とその管理下におく家庭用エネルギー機器の開発指針を明らかにすることが、HEMS の有効性を高めることに貢献すると考えられる。

### 1・1・1 コージェネレーションシステム概要

家庭用 CGS は系統電力・燃料・上水・空気を入力とし、電力・温水・排気・排水を出力する多入力・多出力系であると言える。また、発電時の冷却水としての温水を蓄熱する HWT を組み合わせていることが特徴である。さらに、熱電比は機器固有の値をもち、大きく変化することはない。一方、HWT に蓄熱することは、自然放熱を伴い、ポンプ等補機電力を消費するために若干のエネルギー損失に繋がるものの、電力・給湯需給が同時同量に発生する訳ではないため、突発的な熱需要への対応等、エネルギー需給の時間的変動を吸収するという観点で、HWT は総合的にエネルギーの利用効率を向上させるものとなっている。通常、主機は電力負荷に追従した発電を行い、回収した排熱は HWT に貯め、給湯需要の発生時に HWT の温水を使用する。給湯需要に対して HWT 内に十分な熱量が無い場合は、バックアップ用ガスボイラ (GB) で加熱した後に出湯する。このように、CGS は、主機で発電する際に生じる排熱を蓄熱し、給湯用途に利用することにより、燃料の持つエネルギーを高い総合効率で利用する機器である。

このような蓄エネルギー装置を含む多入力・多出力系である CGS を能率的に動かすためには、運用方策を合理的に決定することが肝腎であり、その適切な運用方策に従うことで CGS の持つ潜在能力を最高度に発揮し、省エネルギー・省コストとなることが知られている。

## 第1章 序論

### 1・1・2 家庭用コージェネレーションシステムの現状

家庭用という小規模なコージェネレーションシステムの主機には、国内ではガスインジン（本田技研工業，2013）および燃料電池（FC）が採用され、商品化されている。前者は起動・停止に掛かる時間が短いため運用方策の自由度が高いものの、正味発電効率が系統電力より劣るため普及の拡大には至っていない。後者は、早期の商品化を目的に2005～2009年まで定置用燃料電池大規模実証事業として3307台の固体高分子形燃料電池（PEFC）CGSを全国各地に設置し、運転データが計測・評価された。そして日本においては2009年にPEFC-CGSが販売されるに至っている。現在では、定格発電出力を0.7、0.75および1.0 kWとしたPEFCおよび固体酸化物型燃料電池（SOFC）の2種類のFC製品をパナソニック、東芝燃料電池システム、JX日鉱日石エネルギーおよびアイシン精機各社が製造し、東京ガス、大阪ガス、東邦ガスおよびJX日鉱日石エネルギー等エネルギーインフラ企業から“エネファーム”という名称で販売されている。表1.1に示すのはここ数年に販売されていた家庭用FC-CGSのカタログ仕様の要約であり、図1.1にはPEFC-CGSの概観写真を示す（東芝燃料電池システム，2011；パナソニックアプライアンス社，2013；JX日鉱日石エネルギー，2012；アイシン精機，2014）。家庭用FC-CGSの燃料は都市ガスあるいはLPガスを選択出来、また、電力に関しては通常は系統連携し運用しつつ、防災用として自立運転可能なモデルも選択可能である。PEFC-CGSは起動・停止にそれぞれ1時間程度要することから、事前に運用計画を設計し、1日のうちでどの時間帯に運転させるかが重要になってくる。一方SOFC-CGSは、起動・停止に関わる時間がより長いために、1日単位では起動・停止を実施せずに稼働させ続ける運用方策が主流になるものと考えられ、余剰温水の活用が課題である。

Table 1.1 Summary of purchasable residential FC-CGS

	Product maker	Panasonic co.		Toshiba fuel cell power systems co.		JX Nippon oil & energy co.		Aisin seiki co.	
		2012	2013	2009	2011	N/A	2012～	N/A	
	Year on sale								
	Reference tax-inclusive price in retail	yen	2,761,500	1,995,000	N/A	N/A	N/A	N/A	
	Type		PEFC	PEFC	PEFC	PEFC	PEFC	SOFC	
FC unit	Model		NA-0111ARS-K	NA-0813ARS-K	N/A	N/A	FCP-070CNA2	FCP-070CNC2	FCSS07A3N
	Rated power output	kW	0.75	0.75	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70
	Rated thermal output	kW	0.94	1.08	1.00	1.00	0.90	0.73	0.65
	Power output range	kW	0.25～0.75	0.20～0.75	N/A	0.25～0.70	N/A	N/A	0.05～0.70
	Thermal output range	kW	0.20～0.94	0.21～1.08	N/A	0.36～1.00	N/A	N/A	0.05～0.65
	Rated net electric efficiency (LHV)	%	40.0	39.0	35.0	38.5	35.0	43.0	46.5
	Rated thermal efficiency (LHV)	%	50.0	56.0	50.0	55.5	45.0	45.0	43.5
	Rated net total efficiency (LHV)	%	90.0	95.0	85.0	94.0	80.0	88.0	90.0
	Maximum gas consumption	kW	1.9	1.9	N/A	N/A	2.0	1.6	1.5
	Exhaust heat recovery temperature	°C	60～	60～80	60～	60～	60	75	N/A
	Warm-up time	min	N/A	N/A	60	60	60	120	N/A
	Battery design life	h	N/A	N/A	N/A	80,000	N/A	N/A	N/A
	Noise	db(A)	38	38	42	38	40	38	37
	Dry mass	kg	100	90	105	94	135	92	94
Size(height x width x depth)	mm	1,883x315x480	1,850x400x400	895x870x330	1,000x780x300	900x900x350	900x563x302	935x600x335	
HWT unit	Model		NAT-C11ARSA W6CU	NAC1513A	N/A	N/A	FCG-201-DR	SFCG-93	FCCT090A3N
	Water capacity	L	200	147	200	200	200	90	90
	Storage temperature	°C	N/A	60	N/A	N/A	N/A	N/A	70
	Dry mass	kg	125	55	110	100	105	94	94
	Size(height x width x depth)	mm	1,883x750x480	1,850x560x400	1,900x750x440	1,760x750x440	1,900x750x440	1,760x740x310	1,760x740x310



Fig. 1.1 Picture of an “ENE・FARM”

### 1・1・3 運用計画問題

電力および温熱を供給する多入力・多出力系である CGS において、電力負荷のみに追従すると、余剰温熱を廃棄せざるを得ない。このため、過去の履歴から学習することで、翌日の需要特性を予測し、事前の計画に基づき蓄熱槽に余剰温熱を貯め、温熱負荷が発生する度にそこから供給するという方式が採用されている(中島他, 2009)。CGS および蓄エネルギー装置を含むエネルギーシステムから、電力・温熱を合理的に供給するという問題は、10～60 分の離散時間間隔の運用計画問題 (operational planning problem) として微分代数方程式を用いて数学的に定式化され解かれる。運用計画は、安定性や制御性といった制御時間スケールより十分に長い時間における振

る舞いに着目し、設定値、制御目的等の制御方策を変更することで目的に適った運用を実現する。換言すれば、運用計画は、合理的にプラント全体の制御方策、操業予定等を運用方策（operational strategy）として決定する技術体系と言える。

#### 1・1・4 Home Energy Management System

情報通信技術を用いてプラント内の全デバイスを一元管理し、プラント外の情報も適宜取得しつつ、プラント全体がある目的に対して最適となる運用を行う Energy Management System (EMS) に関する研究が進んでいる。EMS を家庭に適用したものが HEMS である。HEMS が家庭用エネルギー機器と通信するための Echonet Lite (林, 2013b) という標準化された通信規格が策定されており、様々な家庭用エネルギー機器が接続されたシステム全体の最適運用を行うことを目指している。HEMS に期待されている役割を次に述べる。家庭用蓄エネルギー機器が存在する場合には、あらかじめエネルギー需要量を見積もり、その見積もりに基づき各時刻のエネルギー流量を決定する運用計画が必要である。そのエネルギー需要は通常、人間の生活サイクルである 1 日を単位とした運用計画問題の評価期間である翌日の 24 時間に亘り予測される。したがって、運用計画立案のため予めある時刻で蓄積すべき量を予測する必要があり、HEMS における予測ステップと運用ステップとの接続が研究課題とされている。さらに、時刻毎の電力価格を設定して、デマンドレスポンス (DR) による電力需給調整を行う仕組みが検討されている (林, 2013b)。家庭において DR 信号に応答するには、スマートメータおよび HEMS という新たな要素を導入する必要がある。スマートメータは通信機能を持つ電力計であり、HEMS もまた通信機能を持つことで DR 信号を受信し、家庭用エネルギーシステムの一括制御を担うものと期待されている。従来の家庭用エネルギーシステムを構成する各要素は、独立した制御を実行しており、要素同士は互いの状態を把握することが出来ず部分最適な制御が実行されていた。また通信機能も持たないため DR 信号に対しては人力で応答する必要があった。節電要請であるところ

## 第1章 序論

のDR信号に応答する方策は、2通りに大別出来る。1点目は電動式ルームエアコンディショナー（AC）等の停止による電力需要の削減、2点目は家庭内の蓄電池（BT）、太陽光発電（PV）あるいはCGSから電力を供給することで系統電力からの購入電力を削減することである。この際、家庭用CGSの主機には前述の通り正味発電効率の観点でFCが採用される傾向にある。図1.2に示す通り、HEMSは、DR信号に対する応答の自動化、および家庭用エネルギーシステムを統合して全体最適となる運用・制御を実現するものと期待されている。

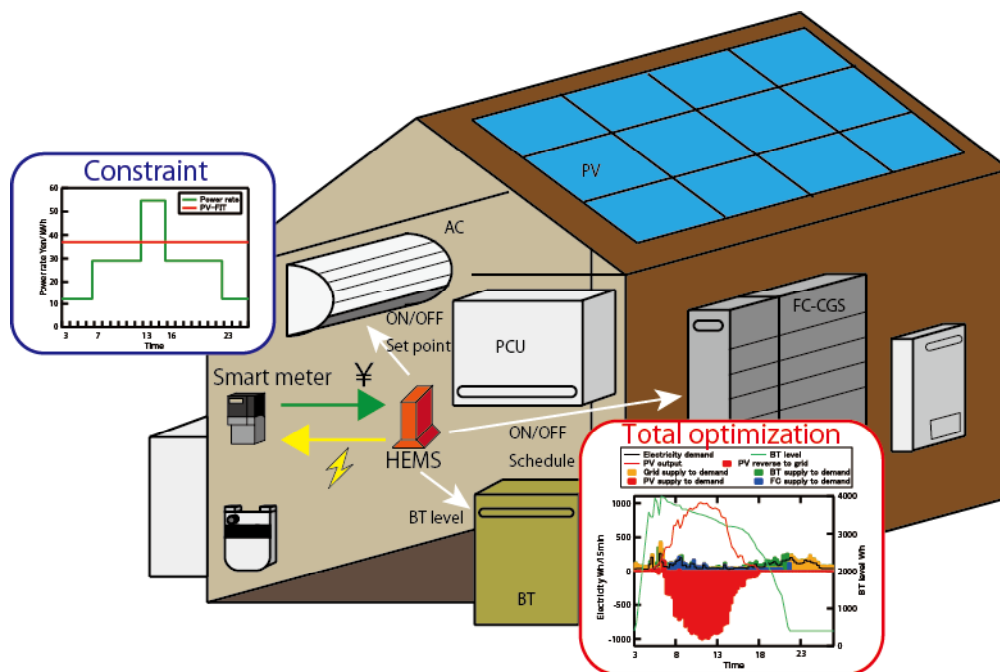


Fig. 1.2 Concept of HEMS

### 1・2 従来研究

#### 1・2・1 エネルギーシステムの運用方策・導入評価

多様な運用方策の代替案が存在するCGSの省エネルギー性評価に関しては、最適化手法等の方法論に基づく各種検討がなされてきた(Arndt et al., 2008; Dorer and Weber, 2009; 池田他, 2012; 伊東・横山, 1990; Yokoyama and Ito, 1995)。これらの検討においては、確定的な需要特性に対する、対象とした系の有する潜在能力を評

価する問題に対して、論理性に富む数理計画法に基づく数理モデル化手法を提示している。数理計画法およびシミュレーション法においては、数理モデルの係数の同定が重要であるものの、FC-CGS に関しては静的な特性のみならず、起動・停止コスト等の関連データは必ずしも十分に公開されていない。

最近の傾向として、自然エネルギーの積極的活用の視点から上記 CGS に PV を導入したものや、さらには BT を組込んだシステムが提案(林, 2013a)され、スマートハウスという概念の下に、運用方策に各種学習機能等を導入する試み(塩, 2013)までなされ始めている。ただし、PV や BT を組込んだシステムに関しては、十分な分析・評価がなされていない段階にある。

## 1・2・2 エネルギー需要特徴

上述の通り、CGS の潜在能力の評価には、数理モデルの係数、例えばエネルギー需要量が重要であることは論を待たない。これまでは、標準的な家庭を想定して制定された給湯モードに対して検討を加えるもの(橋本, 2001)や、実測のエネルギー需要量に対して総当りで検討を加えるもの(辻, 2001; 山岸, 2008)があった。しかし、前者は人間の生活の多様性を考慮しておらず、後者はエネルギー需要量の構成要素の内、導出された解に影響のある要因を分析することが困難という問題があった。一方で、時系列のデータ構造を分類・判別しその特徴を把握することを目的として、様々なクラスタリング手法が提案されている(Liao, 2005)。しかしながら、エネルギー機器の特徴との整合性を意識した需要特徴の分析は十分に行われていない。また、需要時系列予測に関しては、重回帰モデル、ニューラルネットワークモデル等の報告(Abdel-all and Al-gami, 1997; Amarawickrama and Hunt, 2008; Azadeh et. al., 2007; Kumar and Jain, 2010)があるものの、これら手法は学習データが少ないあるいは学習データと乖離した実現値への予測精度が悪いという課題がある。したがって、

## 第1章 序論

予測問題に活用しうる、エネルギー機器との整合性の観点での需要特性分類手法が必要である。

### 1・2・3 不確実性下における意思決定問題

上記エネルギーシステムの省エネルギー性評価においては、エネルギー需要量・外気条件等は過去に実現したもの、あるいは代表的な時系列パターンを設定して、外生的に入力として評価・分析している。しかし、実際にはそれらは将来事象であり不確実性を伴っている。このような不確実性を取り扱う数理計画問題に対しては、確率計画法（SP）という方法論が提案されている（Dantzig, 1955）。エネルギーシステムへSPを適用した報告もあり（Domenica et al., 2007; Wallace et al., 2003）、具体的には、不確実な需要を考慮した水力発電システムの短期運用計画問題（Fleten et al., 2008; Philpott et al., 2000）、中期間における設備容量計画問題（Krukanont and Tezuka, 2007）、電力需要増大の不確実性下における長期間に亘る発電所新設問題（Heinrich, 2007）等の報告がある。国内においても電力事業への応用（椎名, 2010）、およびスマートハウスのスケジューリング問題（尾添, 2011）が報告されている。

数理計画法においては制約条件を満たす実行可能解のうちから目的関数を最大あるいは最小化する値を求める。このとき、例えばエネルギー需要量等の、外生的に入力した係数は確定的に与えられる。SPは、係数として与えたエネルギー需要量等に確率特性を持たせることで不確実性を表現する。換言すれば、SPにおいて不確実な事象を取り扱うにあたっては、確率空間において分析することで、定量的評価するのが一般的である。例えば、複数の確率的な振る舞いを確率密度付きのシナリオとして表現した場合、ツリー構造で表現したものはシナリオツリーあるいはイベントツリーとして知られ、作成方法についても幾つか報告がある（Gassmann et al, 1995; Kaut et al., 2003）。



予測情報に基づく HEMS 運用計画手法の開発にあたっては、確率計画法を適用することが可能と考えられるものの、予測の外れ値に対するロバスト性等を考慮した HEMS 運用方策は十分に検討されていない。

### 1・3 目的

家庭用エネルギーシステムに HEMS を導入する効果を明確にすべく、不確実性下における HEMS を用いた家庭用エネルギー供給・変換機器の協調した運用・制御の基本的な特性を明らかにする必要がある。特に、家庭内で全体最適となる運用・制御ならびに DR 信号への応答というエネルギーの合理的利用を推進する HEMS 開発の技術課題を解決する必要がある。本論文では特に、次の 2 点を目的とする。

- (1) 不確実性下におけるエネルギーシステムの運用計画手法の開発
- (2) 提案する HEMS 運用計画手法を用いてシステム全体最適となる運用を実施した際の潜在能力の定量的評価

ここで、HEMS 管理下には次世代エネルギー機器として FC-CGS, PV および BT を構成要素に持つシステムを検討対象とする。上記 2 点の目的を達成するために、次の 5 点の課題に取り組む。

- (1) FC-CGS は静特性だけではなく起動・停止コストも含めた機器特性データが公表されていないこと
- (2) 家庭用エネルギー機器の新たな要素である PV・BT を組み込んだシステムに対しての評価・分析
- (3) エネルギー需要特徴の予測問題に適用可能な分類手法の理論的検討
- (4) 将来事象であるエネルギー需要の不確実性下における家庭用エネルギーシ

## 第1章 序論

### テムの運用計画手法の理論的検討

#### (5) 事前の意思決定に基づき運用を実施した際の、運用成績の事後評価

本論文では、家庭の電力および給湯需要の供給源として、前述の通り FC を主機とする CGS を対象とする。一般論として、システム評価には経済性や省エネルギー性、環境性ならびに信頼性等の各種項目からなる総合的視点からの分析が必要である。言及するまでも無く経済性の評価は重要評価項目ではあるが、開発途上の要素が多い次世代のエネルギー機器類の製造コストは将来の変動幅が大きいため、ここでは FC-CGS を含むエネルギーシステムの重要評価項目である省エネルギー性に関する分析を主体に行うことにする。FC-CGS に PV や BT を組込んだシステムの省エネルギー性の分析・評価に当たっては、年間時々刻々複雑に変化する対象家庭内の各種エネルギー需要量に対して、システム運用をどのように行なっていくのが重要課題となる。特に、多入力・多出力の多自由度系である CGS に加えて、PV および BT を組込んだシステムの運用方策に関してはより複雑で多様な代替案が存在し、その相異が省エネルギー性に大きな影響を及ぼすことになる。本論文では、システムの有する省エネルギー性の最大ポテンシャルおよびその際の運用方策を分析・評価するという視点から、運用計画決定問題に論理性に富む最適化手法を導入することにする。これらの分析評価を通し、翌日の予測情報に基づく HEMS 運用計画手法を構築し、その有用性を定量評価することが本論文の目的である。その目的を達成する際の前述の課題に対する、本論文の具体的解決策を次に列挙する。

(1) 省エネルギー性分析に先立ち、PEFC-CGS のシステム特性を実測により明らかにする。起動・停止状況も含めた、運用期間全体におけるエネルギー収支、変換効率の観点で巨視的に正味発電・排熱回収効率等に係わる入出力特性を表現するモデル化方針を明らかにする。

(2) 上記の実測に基づき実機特性を反映した FC-CGS に対して PV および BT

を組込んだシステムを対象として、最適運用計画問題を構築し、最適運用方策および省エネルギー性を分析・評価する。

(3) 一般化 Kullback-Leibler (KL) 情報量による実測のエネルギー需要特徴の分類手法を開発し、省エネルギー性の観点で、PEFC-CGS の特性と分類された需要特徴との関係を整理する。ここでは、PV の影響を切り分け、PEFC-CGS のシステム特性にのみ焦点を当てる。

(4) エネルギー需要の不確実性下における PEFC-CGS の最適運用計画問題へ確率計画法を適用し、HEMS 運用方策の指針を得る。

(5) 翌日のエネルギー需要・PV 出力を複数本の時系列パターンとして予測し、その予測を入力とした運用方策を導出する。導出された運用方策に基づく実運用を模擬する枠組みを構築し、その際のシステムの運用成績を分析・評価する。

## 1・4 本論文の構成

本論文の残りの構成は、第2章はPEFC-CGSのシステム特性評価試験、第3章はPV-BT組込み型FC-CGSの省エネルギー性評価、第4章はエネルギー需要特徴の分類と省エネルギー性分析、第5章は不確実性下における運用計画問題、第6章は予測に基づくHEMS運用手法について述べる。最後に、7章において本論文の結論を述べる。



## 第2章 PEFC-CGS の特性評価試験

### 2・1 概要

本章では, 2013 年 4 月の段階で実在する家庭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 (PEFC-CGS) のカタログ仕様において, 95%と最も総合効率の高いパナソニック製造・東京ガスブランドの PEFC-CGS (GASTER, 2013a; GASTER 2013b; 東京ガス, 2013) を実験対象として取り上げる. 本章の目的は, 本論文の 3~6 章にて取り上げる FC-CGS の最適運用計画問題の数理モデル構築するために, 様々な条件下での PEFC-CGS の実運用下における発電・熱効率等のシステム特性を計測, 同定することである. 最適運用計画問題とは, サンプルング時間毎のエネルギー供給に関して複数の代替案から最適経路を選択し, また, 評価期間全体に亘り蓄エネルギー量および機器稼働状況の最適推移を解く問題である. 蓄熱要素を持ち起動・停止に時間を要する家庭用 FC-CGS の運用計画モデルにおいて, 表現すべき現象を把握し, カタログに記載されていない特性値を実験により同定することが重要である. 本実験では, 機器のエネルギー変換および貯蔵特性, 定常時および起動・停止も含む非定常特性, ならびにそれらの特性値を取得する.

### 2・2 システム構成

対象とする PEFC-CGS は, 図 2.1 に示すように, 燃料電池ユニット, 貯湯槽および補助ボイラの 3 つの部分から構成される. 実験系を図 2.2, 実験系の主要諸元を表 2.1, 実験系全体に亘る諸元を表 2.2 に示す. プロセス流体の温度・流量計測に関しては, 計器の取り付け位置に十分留意した.

第 2 章 PEFC-CGS の特性評価試験

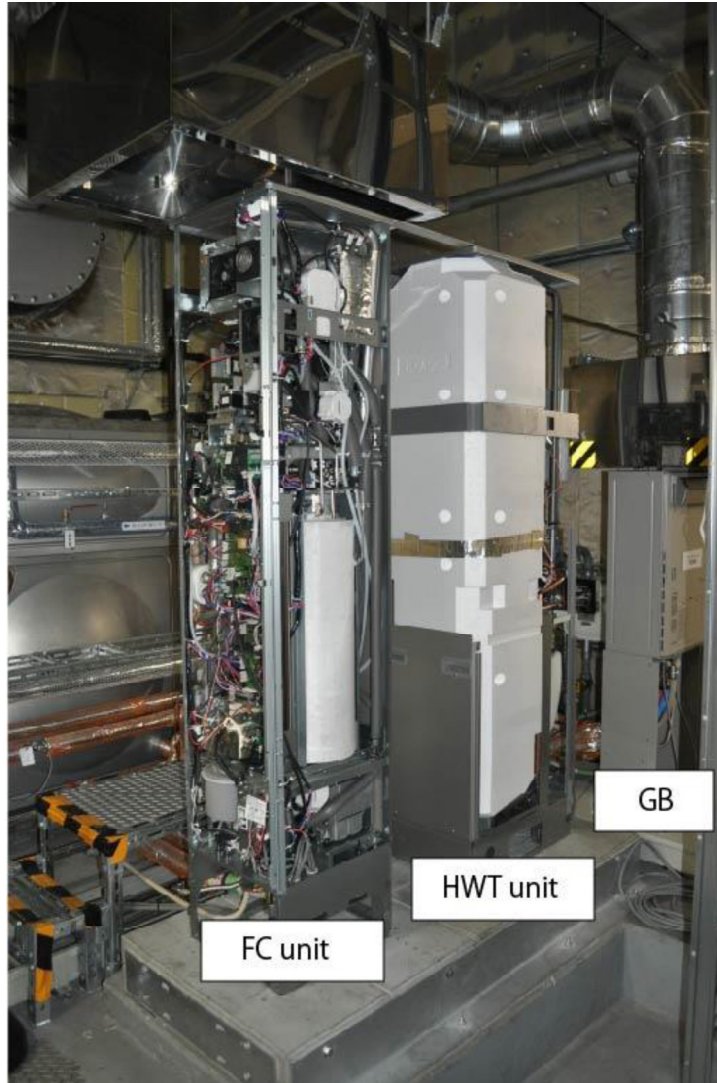


Fig. 2.1 Picture of FC unit, HWT unit and GB

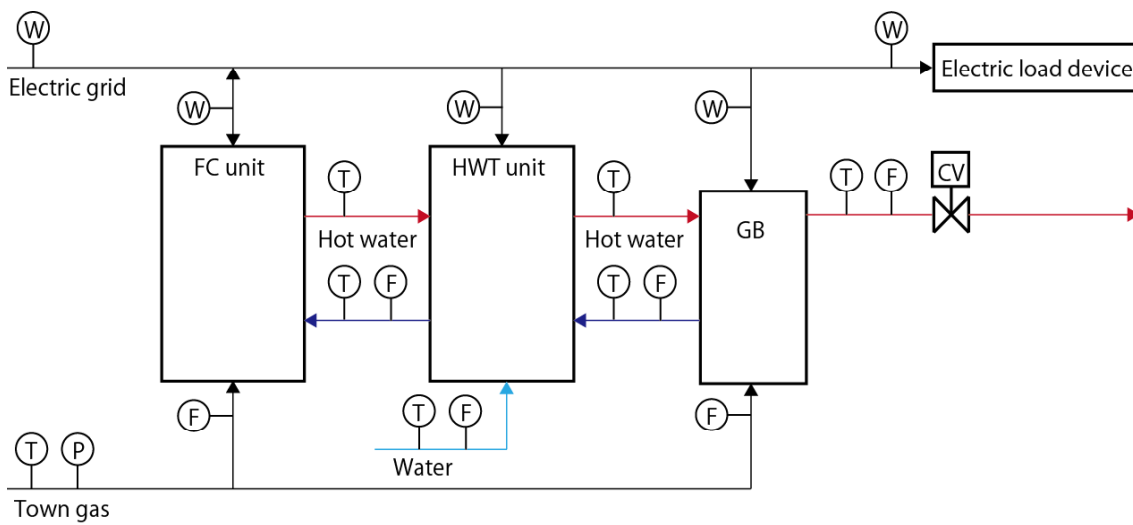


Fig. 2.2 Schematic diagram of PEFC-CGS experimental setup

Table 2.1 Summary of instrumentation used in PEFC-CGS experimental setup

	Location	Fluid	Model/Type	Manufacturer	Range	Uncertainty*
Temperature measurement	FC unit and GB inlet	Town gas	Class-2, T-type	Tokyo netsugaku	-100~200°C	±1.2°C
	HWT unit inlet	Water	Class-2, T-type	Tokyo netsugaku	-100~200°C	±1.2°C
	FC unit inlet	Hot water	Class-2, T-type	Tokyo netsugaku	-100~200°C	±1.2°C
	FC unit outlet	Hot water	Class-2, T-type	Tokyo netsugaku	-100~200°C	±1.2°C
	HWT unit inlet	Hot water	Class-2, T-type	Tokyo netsugaku	-100~200°C	±1.2°C
	HWT unit outlet	Hot water	Class-2, T-type	Tokyo netsugaku	-100~200°C	±1.2°C
	GB outlet	Hot water	Class-2, T-type	Tokyo netsugaku	-100~200°C	±1.2°C
	Testing site	Air	Class-2, T-type	Tokyo netsugaku	-100~200°C	±1.2°C
Power measurement	Electric grid outlet	n/a	KM20-B40-FLK	Omron	0~2 kW	±0.070 kW
	FC unit in/outlet	n/a	KM20-B40-FLK	Omron	0~2 kW	±0.070 kW
	HWT unit inlet	n/a	KM20-B40-FLK	Omron	0~2 kW	±0.070 kW
	GB inlet	n/a	KM20-B40-FLK	Omron	0~2 kW	±0.070 kW
	Electric load device inlet	n/a	KM20-B40-FLK	Omron	0~2 kW	±0.070 kW
Flow rate measurement	FC unit inlet	Town gas	DSDa-1.6A	Shinagawa	0.16~26.6 L/min	±0.098 L/min
	GB inlet	Town gas	DSDa-10A	Shinagawa	1.16~166 L/min	±0.78 L/min
	HWT unit inlet	Water	Vision2000 F16.5	Yamamoto electric corp.	2.0~35.0 L/min	±1.3 L/min
	FC unit inlet	Hot water	VN05	Aichi tokei denki	0.05~1.0 L/min	±1.2 L/min
	HWT unit inlet	Hot water	Vision2000 4F22	Yamamoto electric corp.	1.0~25.0 L/min	±0.90 L/min
	GB outlet	Hot water	Vision2000 4F22	Yamamoto electric corp.	1.0~25.0 L/min	±0.90 L/min
Pressure measurement	FC unit and GB inlet	Town gas	JTD920A	Azbil	0.75~100kPa	±0.12 kPa
	Testing site	Air	MU101	Yokogawa	0~130kPa	±0.016 kPa

\* Type-B evaluation based on instruction manual with the assumption of the confidence level of 95%, the coverage factor of  $k=2$

第2章 PEFC-CGS の特性評価試験

Table 2.2 Specification of PEFC-CGS experimental setup (1/4)

使用機器名	諸元	製造元
燃料電池ユニット	形名：NA-0813ARS-K 型番：FC-75CR13 ガスの種類：都市ガス用 13A 電源：1φ3WAC100/200V50/60Hz 電気出力範囲：200~750W 熱出力範囲：210~1080W 排熱回収温度：60~80℃	東京ガス
貯湯ユニット	形名：NAC1513A 容量：147L 放熱率：1.5%/h 以下 電源：1φ3WAC100/200V50/60Hz	ガスター
バックアップ熱源機	形名：NMA-824RFW-RA 型番：RUF-K2402SAW 電源：1φ3WAC100/200V50/60Hz	ガスター
コントローラ統合型シャーシシステム	形名：CompactRIO 型番：NI cRIO-9074 スロット数：8 使用温度範囲：-20~55℃ 湿度：RH10~90%RH(結露なきこと) 通信方式/プロトコル：Ethernet/TCP/IP	National Instruments
熱電対入力モジュール	型番：NI9213 使用モード：高分解モード 動作温度：-40~70℃ 動作湿度：10~90%RH (結露なきこと)	National Instruments
シース熱電対	形式：T型 許容差：JIS クラス 2 測定温度：-100~200℃ 保護管全長：150mm 保護管材質：SUS316 補償導線長さ：3m	東京熱学
シート型熱電対	形式：T型 許容差：JIS クラス 2 測定温度：-100~200℃ 接続導線：φ0.32mmK, T熱電対素線 補償導線長さ：3m	東京熱学



Table 2.2 Specification of PEFC-CGS experimental setup (2/4)

使用機器名	諸元	製造元
ガス圧力計	形式：DSTJ3000Ace 差圧発信機 型番：JTD920A 圧力レンジ：0.75~100kPa 正常動作範囲：-15~85 精度：±0.1% むだ時間：約 250ms	アズビル
アナログ入力モジュール	型番：NI9205 使用モード：差動 (DIFF) レンジ：±200mV~±10V 動作温度：-40~70°C 動作湿度：10~90%RH (結露なきこと)	National Instruments
圧力計(大気圧)	形式：MU101 高精度圧力センサモジュール 電源：DC6~24V 出力方式：EIA RS-232-C レンジ：0~130kPa 圧力タイプ：絶対圧 最大加圧：520kPa 分解能：2Pa 精度：FS の±0.01%	横河電機
RS232 シリアルモジュール	型番：NI9870 通信方式：RS232 動作温度：-40~70°C 動作湿度：10~90%RH (結露なきこと)	National Instruments
乾式ガスメータ	型番：DSDa-1.6A 測定範囲：0.16~26.6L/min 計測室容量：0.6L 指針 1 回転：10L 最小メモリ：0.2 圧力損失：220Pa パルス単位：0.1L/P	シナガワ
乾式ガスメータ	型番：DSDa-10A 測定範囲：1.16~166L/min 計測室容量：4L 最小メモリ/指針 1 回転：： 2 /100L 圧力損失：300Pa パルス単位：1L/P	シナガワ

第2章 PEFC-CGS の特性評価試験

Table 2.2 Specification of PEFC-CGS experimental setup (3/4)

使用機器名	諸元	製造元
電磁流量センサ	型番：VN05 精度保証流量範囲：0.05~1L/min 最大動作流量：3L/min ローカットオフ：0.025L/min パルス単位：0.001L/P	愛知時計電機
羽車式流量センサ	型番：Vison2000 F16.5 精度保証流量範囲：2.0~35.0L/min 最大動作流量：100L/min 使用温度範囲：-20~60°C 湿度：35~85%RH(結露なきこと)	山本電機工業
羽車式流量センサ	型番：Vison2000 4F22 精度保証流量範囲：1.0~25.0L/min 最大動作流量：100L/min 使用温度範囲：-20~60°C 湿度：35~85%RH(結露なきこと)	山本電機工業
シンクデジタル入力モジュール	型番：NI9421 動作温度：-40~70°C 動作湿度：10~90%RH (結露なきこと)	National Instruments
小型電力量センサ	型番：KM20-B40-FLK 使用温度範囲：-10~55°C 湿度：25~85%RH(結露なきこと) 電圧・電流精度：±1%FS±1digit 電力精度：±2.5%FS±1digit 周波数精度：±0.3Hz±1digit 力率精度：±5%FS±1digit	オムロン
RS485/RS422 シリアルモジュール	型番：NI9871 通信方式：RS485 動作温度：-40~70°C 動作湿度：10~90%RH (結露なきこと)	National Instruments
電動2方弁比例制御	型番：RDP224 全開~全閉：15秒以下 入力信号：DC4~20mA 使用温度範囲：-10~50°C 湿度：30~85%RH(屋内)	キット

Table 2.2 Specification of PEFC-CGS experimental setup (4/4)

使用機器名	諸元	製造元
交流電子負荷装置	型番：PCZ1000A 使用温度範囲：0~40°C 湿度：20~80%RH 定電力モード設定範囲：50~1000W 精度：±5% of set 以内 分解能：1W	菊水
PC	OS：Windows 7 enterprise(64bit) プロセッサ： Inter(R)core(TM)i3-2120CPU@3.30GHz 実装メモリ：4.00GB	デル株式会社

### 2・3 実験条件およびデータ解析

本実験の試験条件およびデータの解析方法は JIS C 8823（日本規格協会，2013）に基づく．1 秒間隔で計測し，1 分平均にすることで測定値のばらつきおよび計測データの欠損を考慮している．次に主たる計算式を示す．

$$\tilde{g} = g \frac{273.2+15.0}{273.2+\theta^g} \frac{P^g+P^{\text{air}}}{101.3} \quad (2.1)$$

ここで， $g$  および  $\tilde{g}$  はそれぞれ計測された都市ガス流量および温度・圧力補償後のガス流量， $\theta^g$  はガスの温度， $P^{\text{air}}$  および  $P^g$  はそれぞれ大気およびガスの圧力である．温度補正された都市ガス流量  $\tilde{g}$  およびその低位発熱量  $H$  より，式 (2.2) に示す通りガスの熱流量  $q^g$  を算出する．

$$q^g = \tilde{g}H \quad (2.2)$$

図 2.2 で示したように，FC ユニットのコントロールボリュームにおけるエネルギー収支式を次に示す．

$$\frac{dU^{\text{FC}}}{dt} = q^{\text{FC},g}(t) - q^{\text{FC},\text{out}}(t) - e^{\text{FC},\text{out}}(t) \quad (2.3)$$

第2章 PEFC-CGS の特性評価試験

$$e^{\text{FC,out}}(t) = \eta^{\text{FC,e}} q^{\text{FC,g}}(t) \quad (2.4)$$

$$q^{\text{FC,out}}(t) = (1 - \eta^{\text{FC,e}}) q^{\text{FC,g}}(t) k^{\text{FC,loss}} \quad (2.5)$$

ここで、 $U^{\text{FC}}$ 、 $q^{\text{FC,g}}$ 、 $q^{\text{FC,out}}$ 、 $e^{\text{FC,out}}$ 、 $\eta^{\text{FC,e}}$ 、 $k^{\text{FC,loss}}$ は、それぞれ PEFC の内部エネルギー、PEFC への入力熱量、PEFC からの熱出力、計測された FC 発電電力、PEFC 発電効率、および PEFC 損失係数である。定常状態においては、次のエネルギー収支を満たすものとする。

$$\frac{dU^{\text{FC}}}{dt} = 0 \quad (2.6)$$

$$q^{\text{FC,out}} = q^{\text{FC,g}}(t) - e^{\text{FC,out}}(t) \quad (2.7)$$

発電出力上昇時のエネルギー収支は、電力追従速度 $k^{\text{up}}$ を用いて次の通り表す。

$$\frac{dU^{\text{FC}}}{dt} \approx 0 \quad (2.8)$$

$$e^{\text{FC,out}}(t) \leq k^{\text{up}} t \quad (2.9)$$

$$q^{\text{FC,out}}(t) = q^{\text{FC,g}}(t) - e^{\text{FC,out}} \quad (2.10)$$

発電出力下降時も上記と同様に、電力追従速度 $k^{\text{down}}$ を用いて次の通りエネルギー収支を表す。

$$\frac{dU^{\text{FC}}}{dt} \approx 0 \quad (2.11)$$

$$e^{\text{FC,out}}(t) \leq -k^{\text{down}} t \quad (2.12)$$

$$q^{\text{FC,out}}(t) = q^{\text{FC,g}}(t) - e^{\text{FC,out}} \quad (2.13)$$

また、PEFC 起動時のエネルギー収支式は、起動時消費熱量変化率 $k^{\text{start}}$ を用いて次の通り表す。

$$\frac{dU^{FC}}{dt} = k^{start}t \quad (2.14)$$

$$e^{FC,out}(t) = 0 \quad (2.15)$$

$$q^{FC,out}(t) = 0 \quad (2.16)$$

PEFC 停止時も上記と同様に、停止時放出熱量変化率 $k^{stop}$ を用いて次の通り表す。

$$\frac{dU^{FC}}{dt} = -k^{stop}t \quad (2.17)$$

$$e^{FC,out}(t) = 0 \quad (2.18)$$

$$q^{FC,out}(t) = q^{FC,g}(t) + \frac{dU^{FC}}{dt} \quad (2.19)$$

HWT ユニットのコントロールボリュームにおけるエネルギー収支を次に示す。

$$\frac{dU^{HWT}}{dt} = q^{HWT,in}(t) - q^{HWT,out}(t) - k^{HWT,loss}U^{HWT} \quad (2.20)$$

$$q^{FC,out}(t) = q^{HWT,in}(t) \quad (2.21)$$

ここで、 $U^{HWT}$ 、 $q^{HWT,in}$ 、 $q^{HWT,out}$ 、および $k^{HWT,loss}$ は、それぞれ HWT 内部エネルギー、HWT への流入熱流量、HWT からの入出熱流量および HWT の損失係数である。

最後に、GB のコントロールボリュームにおけるエネルギー収支を次に示す。

$$\frac{dU^{GB}}{dt} = q^{GB,g}(t) - [q^{GB,out}(t) - q^{HWT,out}(t)] - q^{GB,loss}(t) \quad (2.22)$$

$$q^{GB,out}(t) - q^{HWT,out}(t) = \eta^{GB}q^{GB,g}(t) \quad (2.23)$$

$$q^{GB,loss}(t) = (1 - \eta^{GB})q^{GB,g}(t) \quad (2.24)$$

ここで、 $U^{GB}$ 、 $q^{g,GB}$ 、 $q^{GB,out}$ 、 $q^{GB,loss}$ および $\eta^{GB}$ は、それぞれ GB 内部エネルギー、GB への入力熱量、GB からの熱出力、GB の熱損失および GB の熱効率である。

## 第2章 PEFC-CGS の特性評価試験

本実験においては、 $\eta^{FC,e}$ ,  $k^{FC,loss}$ ,  $k^{up}$ ,  $k^{down}$ ,  $k^{start}$ ,  $k^{stop}$ ,  $k^{HWT,loss}$  および  $\eta^{GB}$  を同定する。

### 2・4 結果

#### 2・4・1 PEFC 負荷追従・起動・停止特性

一日の正味の電力・熱収支を計測するために、0.75 kW 定格発電出力試験を実施した。模擬負荷装置の電力を 0.75kW と設定し、PEFC ユニットの出力を定格出力である 0.75kW に保つ実験を行い、発電開始ボタンを押してから発電停止ボタンを押すまでに 8 時間 26 分間あけた。結果として、図 2.4 に示すように、0 min にて発電開始ボタンを押し、517 min にて発電停止ボタンを押した際の 1 分平均のエネルギー流量を得た。

図 2.3 に示す通り、発電開始ボタンを押した時刻 0 min から定格発電出力となるわけではない。一方で、発電停止ボタンを押した瞬間から緑色で示される発電出力は零となるものの、排熱回収およびガス消費はその後暫くは継続している。図 2.4 は GB, FC および HWT ユニットの消費した電力であり、起動から発電開始までおよび発電停止から冷温停止までに電力を消費している。このような PEFC-CGS の起動・停止に関わる特性に注目すると、PEFC ユニットの起動には約 0.8 h, 0.24 kWh の電力および 0.35kWh のガス、一方で、停止には約 1.5h, 0.04 kWh の電力および 0.25 kWh のガスを消費していることが判明した。また、電力負荷変動に対しては、図 2.3 に示す通り、負荷追従速度によるモデル化が可能であることが示唆され、具体的には、負荷上昇時に 1.16 W/s, 負荷下降時に 76.4 W/s の追従性があった。

図 2.5 は HWT を中心に見たときの温度履歴であり、FC から回収された約 77°C の温水を HWT へ貯湯している。図 2.6 は GB を通る温水の温度履歴であり、給湯時には 40 °C で出湯されている。図 2.7 は実験室・ガス・水道水の温度履歴であり、図 2.8 は HWT 内の 5 箇所の温度分布を示す。HWT は上部から温度が上昇し 75 °C 付近に達し、数十

分の遅れを伴いより下部の温度を上昇させていることから、FC からの温水は上部から流入していることがわかる。図 2.9 は PEFC の排熱回収流量を示し、発電出力が 0.75 kW で定常状態であった 100～500 min においても流量が変動していることが確認できる。図 2.10 は給湯負荷流量を示し、3 回コントロールバルブを全開にして、給湯負荷を人為的に発生させた際には、いずれも 15 L/min である。図 2.11 および 2.12 はそれぞれ HWT から GB への流量および HWT への給水流量を示し、図 2.10 と同じ時刻に同量の流量が発生している。

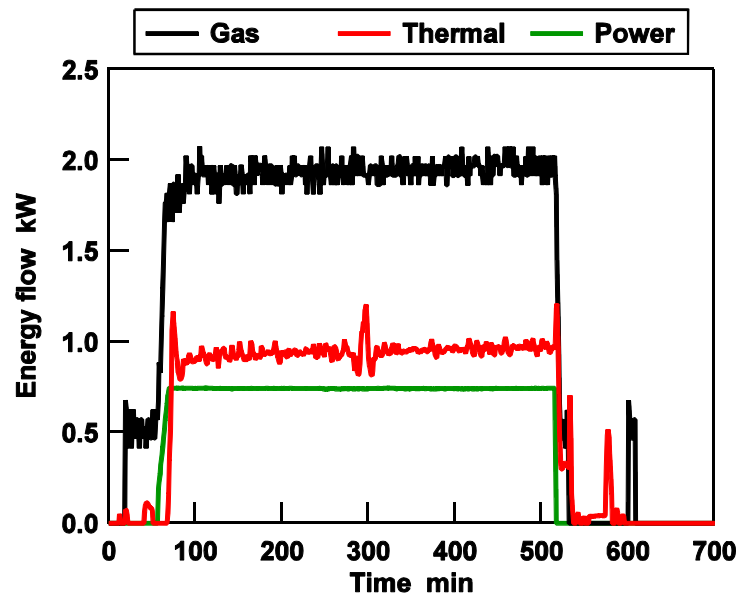


Fig. 2.3 Energy flow of gas, thermal and power for identifying FC parameter

第 2 章 PEFC-CGS の特性評価試験

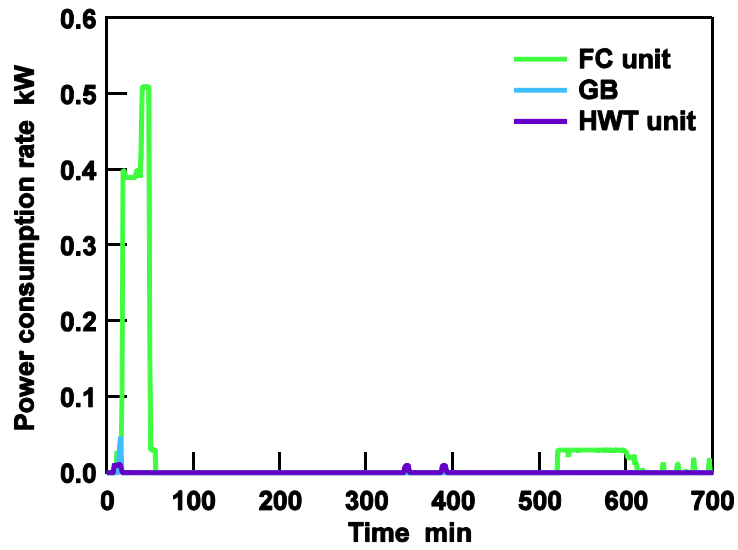


Fig. 2.4 Power consumption of GB, FC and HWT unit for identifying FC parameter

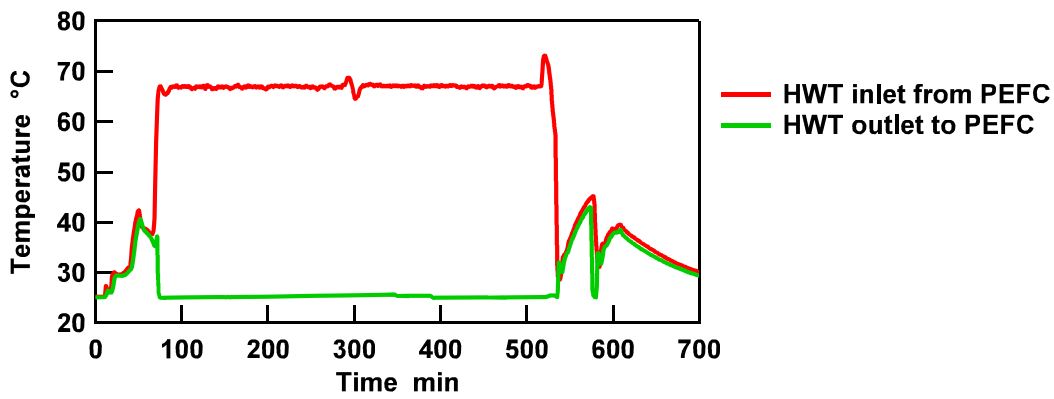


Fig. 2.5 Temperature profile of passing through PEFC for identifying FC parameter

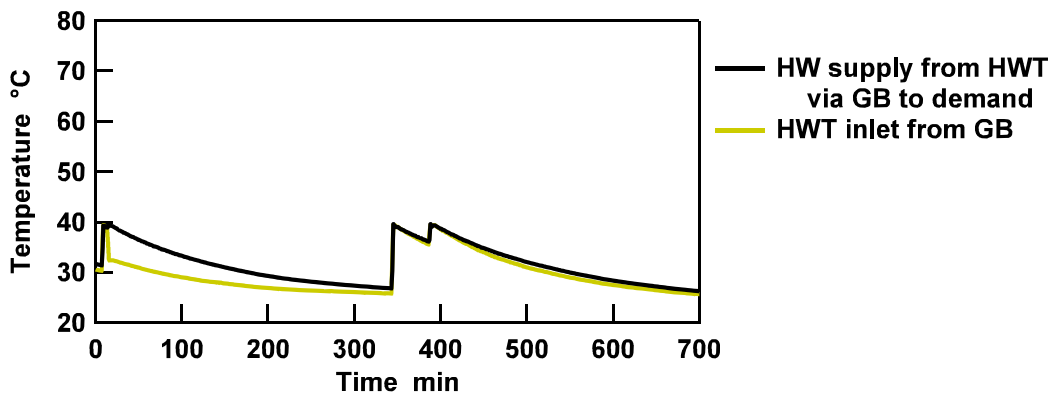


Fig. 2.6 Temperature profile of passing through GB for identifying FC parameter



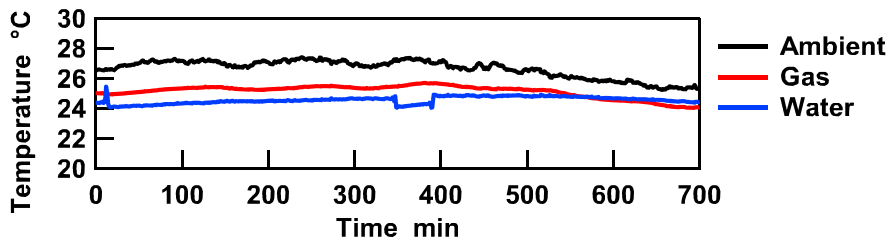


Fig. 2.7 Temperature profile of ambience for identifying FC parameter

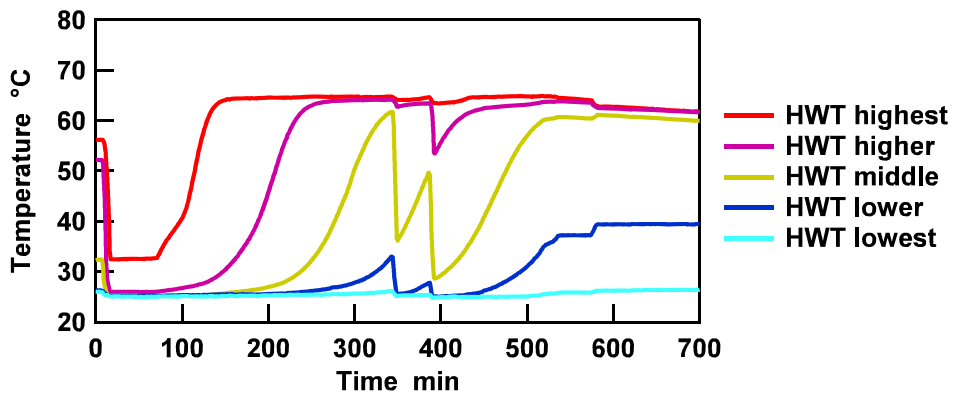


Fig. 2.8 Temperature profile in HWT for identifying FC parameter

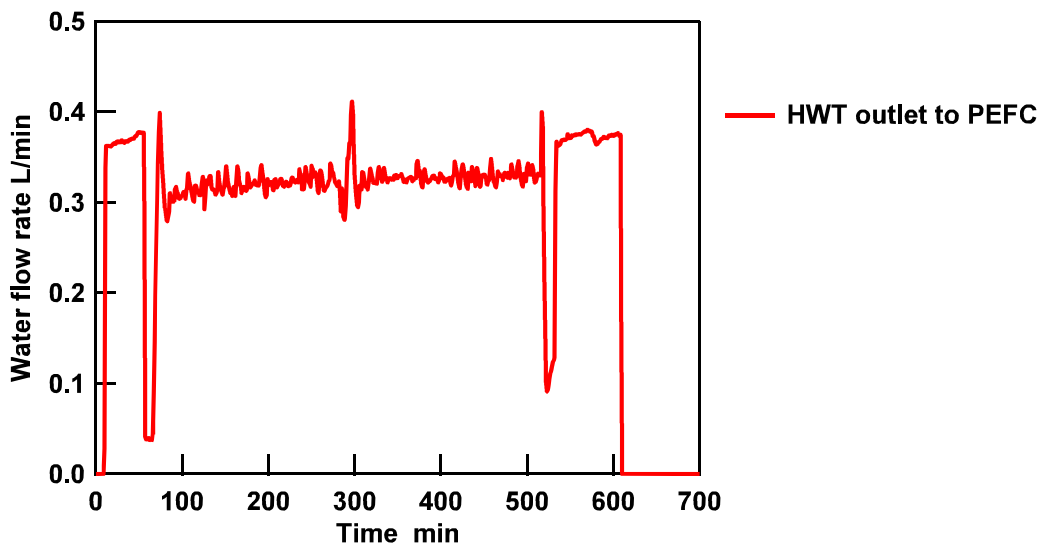


Fig. 2.9 Water-flow-rate profile between HWT and FC for identifying FC parameter

第2章 PEFC-CGS の特性評価試験

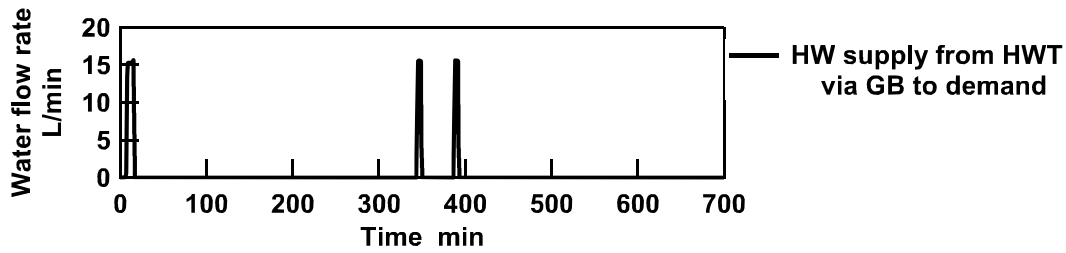


Fig. 2.10 Water-flow-rate profile from HWT via GB to demand for identifying FC parameter

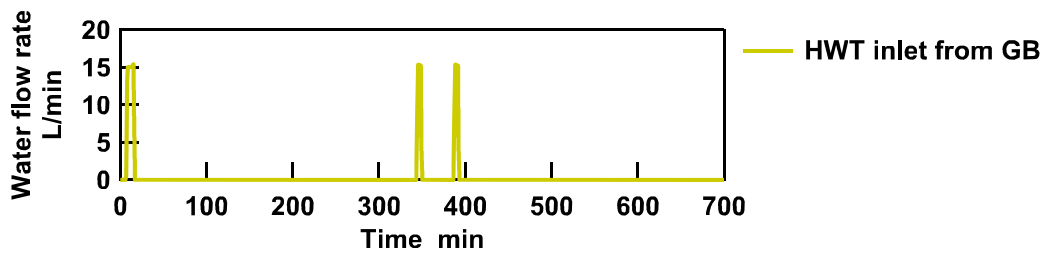


Fig. 2.11 Water-flow-rate profile from GB to HWT for identifying FC parameter

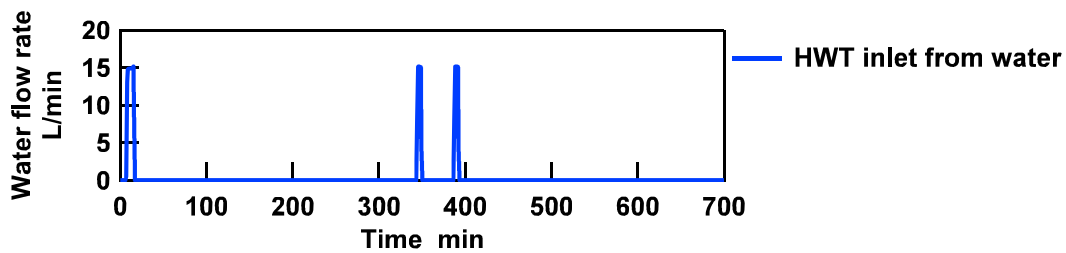


Fig. 2.12 Water-flow-rate profile from water to HWT for identifying FC parameter

図 2.13 は HWT へ入力される FC から回収された排熱の温度を示し、多くの時間において流量は 2.9~3.5 L/min である。回収された排熱温度が低い場合は、図 2.13 右下の赤色の点群に示されるように、3.7 L/min で FC と HWT を往復し、温度を上昇させていると推測される。

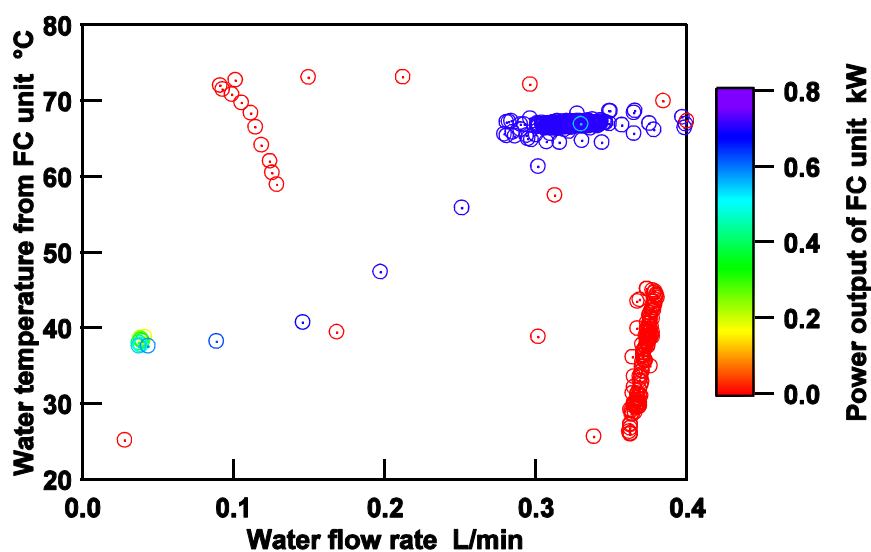


Fig. 2.13 Water-flow-rate of PEFC unit at a day

正味の電力・熱収支を表 2.3 に示し、PEFC-CGS から見た入・出力されたエネルギーは、それぞれ 12.9 および 15.9kWh であり、PEFC-CGS を中心に見たときの家庭内におけるシステムの総合効率は $\frac{12.9}{15.9} \times 100 \approx 81.2\%$ である。一方で、表 2.4 および図 2.14 に示す通り、一次エネルギー換算のシステムの総合効率は $\frac{26.22+23.05}{62.33+2.78} \times 100 \approx 71.4\%$ となる。

Table 2.3 Total amount of energy consumption and output of PEFC-CGS

	Input kWh		Output kWh	
	Electricity	Gas	Electricity	Heat
FC unit	0.28	15.32	5.63	7.28
HWT unit	0.003	—	—	—
GB	0.002	0.30	—	0.003

第2章 PEFC-CGS の特性評価試験

Table 2.4 Energy balance of primary energy consumption and energy supply

	Primary energy for input MJ		Energy supply MJ	
	Fuel for electricity	Gas(HHV)	Electricity	Heat
FC unit	2.73	61.13	20.27	26.2
HWT unit	0.029	—	—	—
GB	0.020	1.20	—	0.012
Sum	2.78	62.33	20.27	26.22

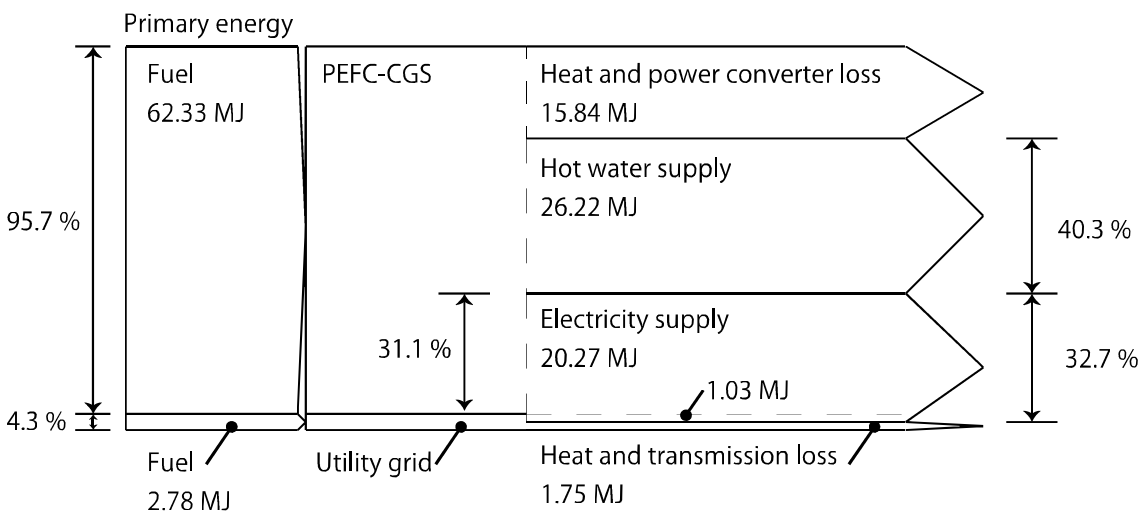


Fig. 2.14 Energy balance in terms of primary energy consumption

2・4・2 HWT 放熱特性

図 2.15～2.24 に示すのは、HWT 放熱特性の同定試験結果である。700～940 min までの 4 時間分の HWT 放熱量を次式より算出し、HWT 放熱特性を 1.47 %/h と同定した。

$$q_i^{\text{HWT}}(t) = [\theta_i^{\text{HWT}}(t) - \theta^{\text{W}}(t)]c \frac{V}{5} \quad (2.25)$$

$$q^{\text{HWT}}(t) = \sum_{i=1}^5 q_i^{\text{HWT}}(t) \quad (2.26)$$

$$k^{\text{HWT,loss}}(t) = \frac{q^{\text{HWT}}(t)}{q^{\text{HWT}}(t-1)} \quad (2.27)$$

ここで、 $q_i^{\text{HWT}}$ 、 $q^{\text{HWT}}$ 、 $\theta_i^{\text{HWT}}$ 、 $\theta^{\text{W}}$ 、 $c$ および $V$ は、それぞれ HWT を上から 5 等分した際の各層の熱量、HWT 熱量、HWT 各層の温度、HWT への給水温度、水の比熱および HWT

体積である。

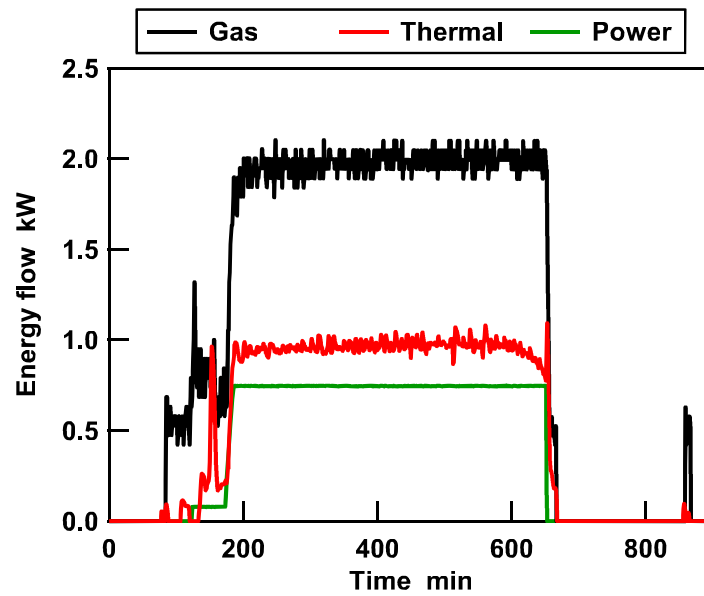


Fig. 2.15 Energy flow of gas, thermal and power for identifying HWT parameter

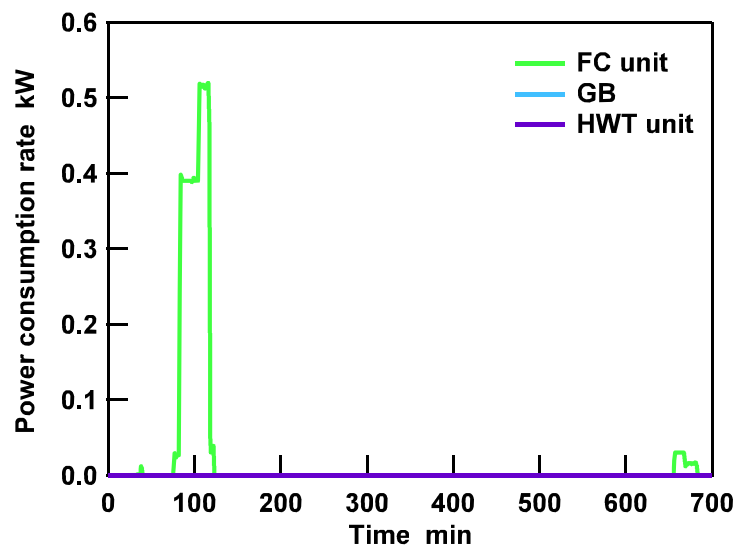


Fig. 2.16 Power consumption of GB, FC and HWT unit for identifying HWT parameter

第2章 PEFC-CGS の特性評価試験

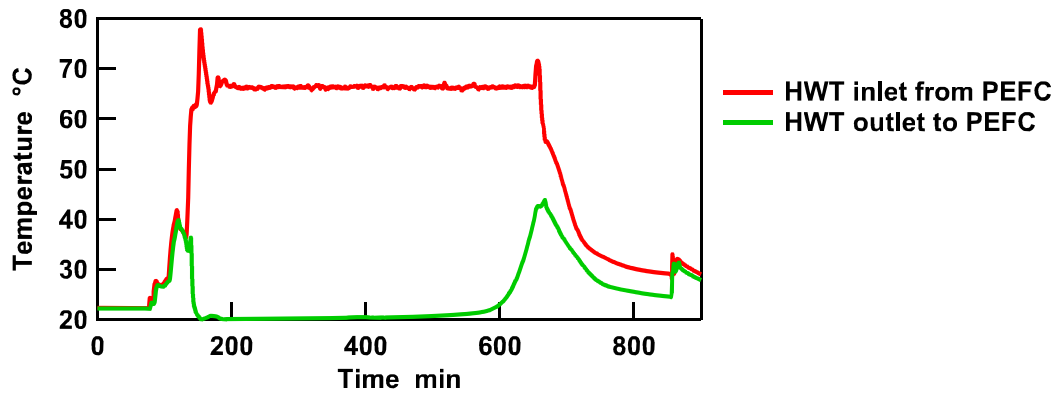


Fig. 2.17 Temperature profile of passing through PEFC for identifying HWT parameter

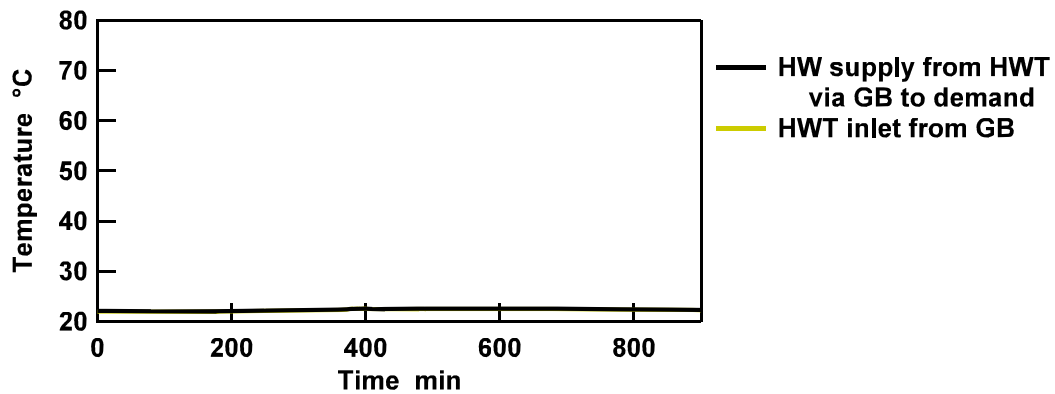


Fig. 2.18 Temperature profile of passing through GB for identifying HWT parameter

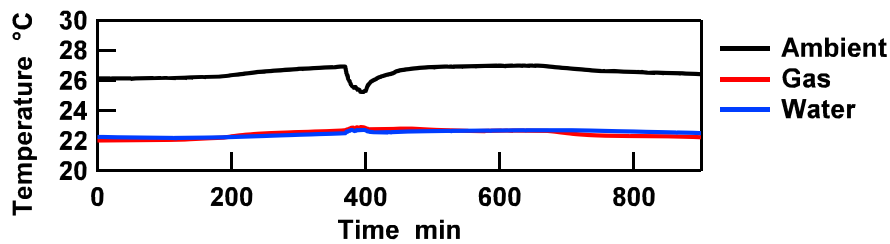


Fig. 2.19 Temperature profile of ambience for identifying HWT parameter

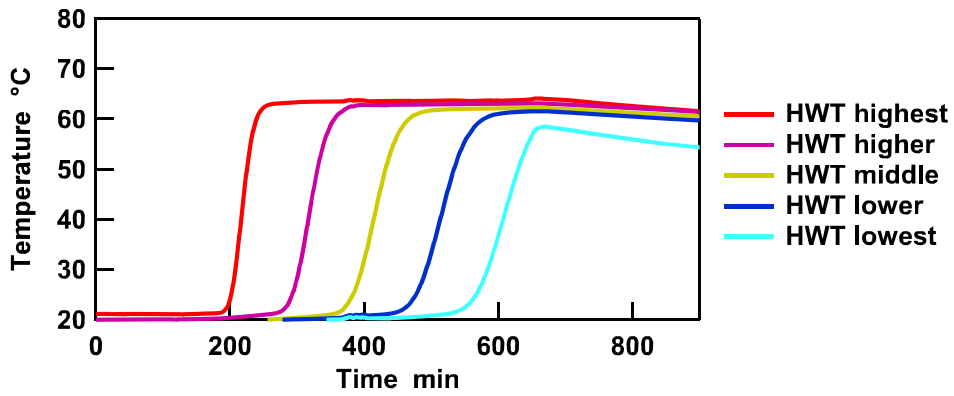


Fig. 2.20 Temperature profile in HWT for identifying HWT parameter

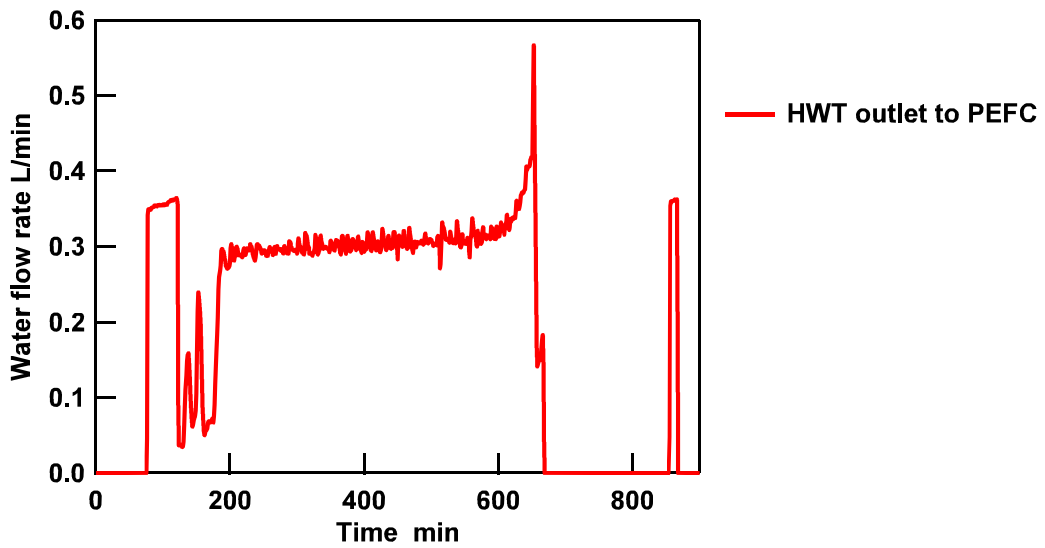


Fig. 2.21 Water-flow-rate profile between HWT and FC for identifying HWT parameter

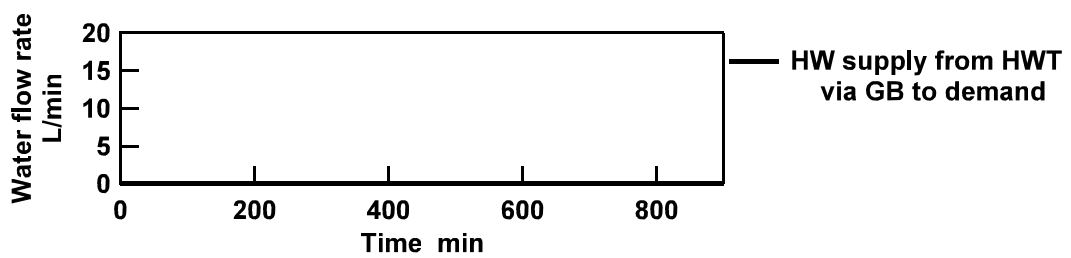


Fig. 2.22 Water-flow-rate profile from HWT via GB to demand for identifying HWT parameter

## 第2章 PEFC-CGS の特性評価試験

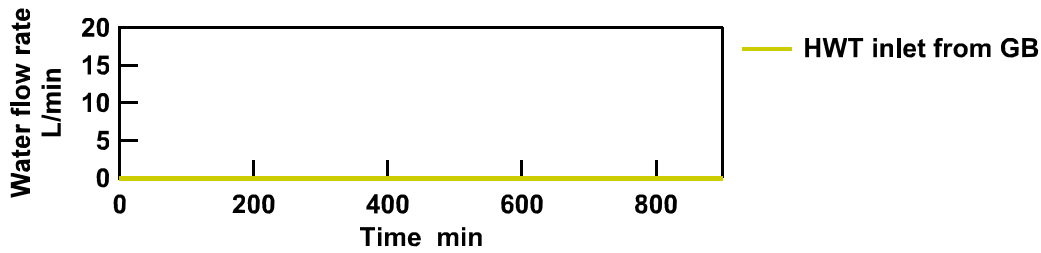


Fig. 2.23 Water-flow-rate profile from GB to HWT for identifying HWT parameter

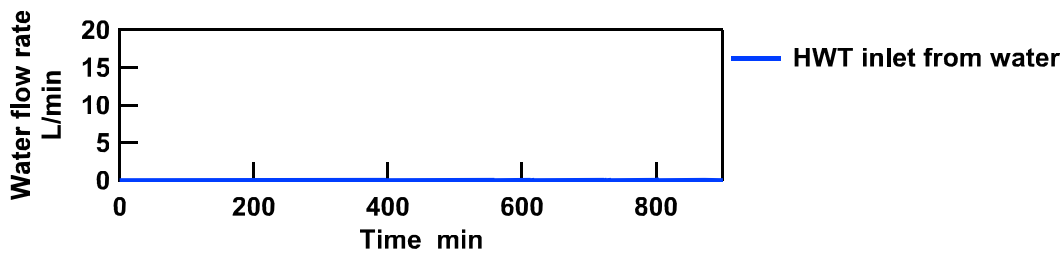


Fig. 2.24 Water-flow-rate profile from water to HWT for identifying HWT parameter

### 2・4・3 PEFC・GB 入出力特性

本項では、定常状態における燃料電池ユニットおよび補助ボイラの入出力特性を計測する。

PEFC の定常状態は交流電子負荷装置を用いて、燃料電池ユニットの発電出力を一定に保つことで作る。入出力関係の非線形性を検出する観点から、発電出力に関して複数の水準を設定し測定を実施する。ここで、燃料電池ユニットの発電出力は、0.05kW 刻みで定格かつ最大出力の 0.75kW～最低出力の 0.20kW まで変更させることとする。定常状態におけるシステム特性を把握するという目的から、以後に使用する計測データは、JIS C 8823（日本規格協会，2013）に基づき発電出力が安定してさらに 30 分後から、発電が停止する 10 分前までを分析に用いる。

図 2.25 より、ガスの熱量と電気・熱出力とは、よく直線相関し、線形近似が可能であることがわかる。図 2.26 は電気出力と熱出力の関係を示し、定格出力 0.75 kW と比較して小さい 0.2～0.3 kW 出力の場合を除き、よく相関している。図中のモデル



における係数は、式 (2.3) ~ (2.5) より、PEFC 発電効率は 0.395, PEFC 損失係数は 0.740 と同定された。

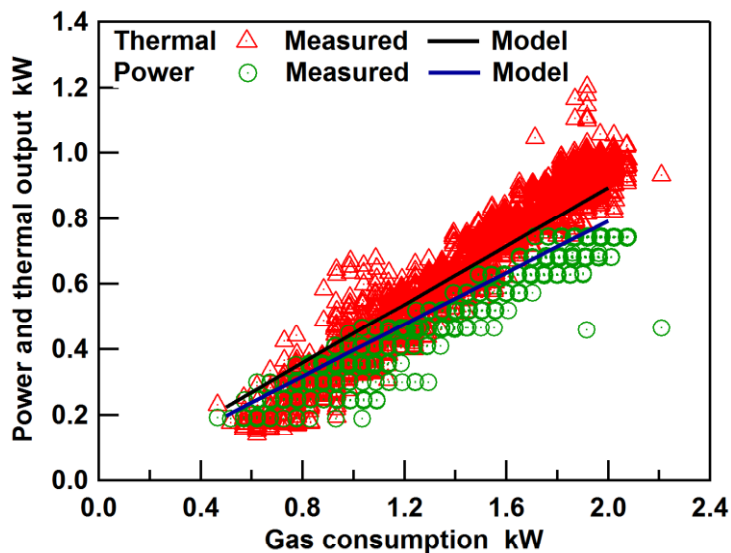


Fig. 2.25 Gas consumption and PEFC output

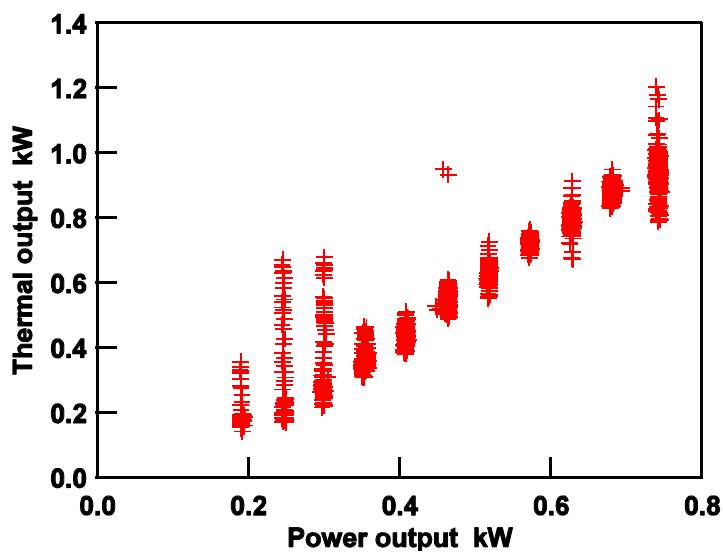


Fig. 2.26 Power and thermal output of PEFC unit

発電および熱効率をそれぞれ図 2.27 および 2.28 に示す。発電出力と発電/熱効率という 2 種の変数の相関の検定を、ピアソンの積率相関係数を指標に実施すると、それぞれ 0.459 および 0.705 であり、発電出力と発電・熱効率との直線近似は妥当でな

## 第2章 PEFC-CGS の特性評価試験

いと判断した。部分負荷時における発電効率は約 35%近傍で一定値をとり，一方，熱効率は発電出力が増大するほど効率も向上していることが確認された。定格 750W 発電出力において，カタログ仕様（東京ガス，2011；ガスター，2014）によると，LHV 基準の電力・排熱回収効率はそれぞれ 39 および 56%であり，本実験結果と整合した。図 2.29 は排熱回収流量，排熱回収温度および発電出力の関係を示し，排熱回収流量は多くとも 0.4 L/min であり，発電出力の状態に対応して排熱回収流量を変化させていることがわかる。

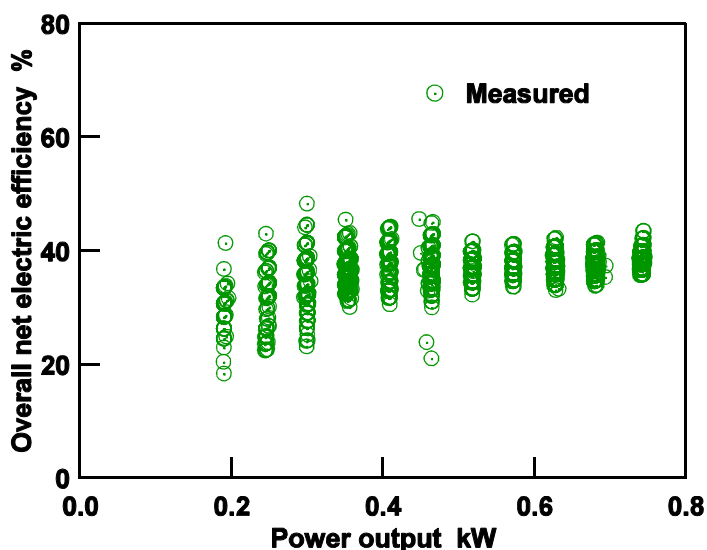


Fig. 2.27 Overall net electric efficiency of PEFC unit

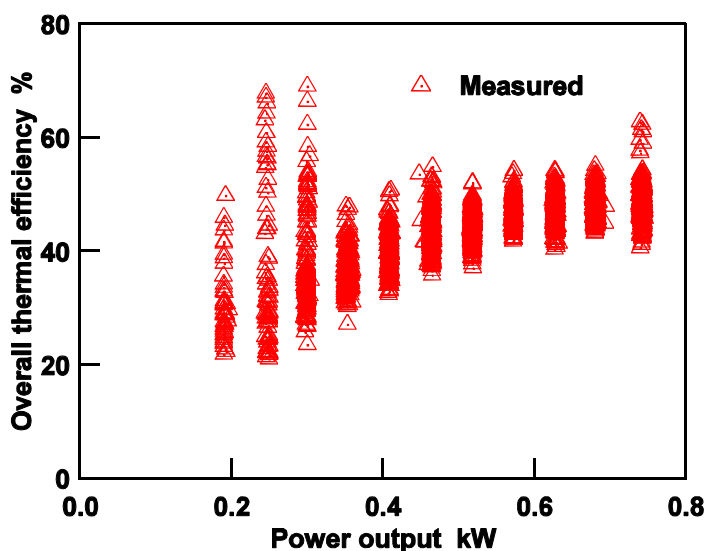


Fig. 2.28 Overall thermal efficiency of PEFC unit

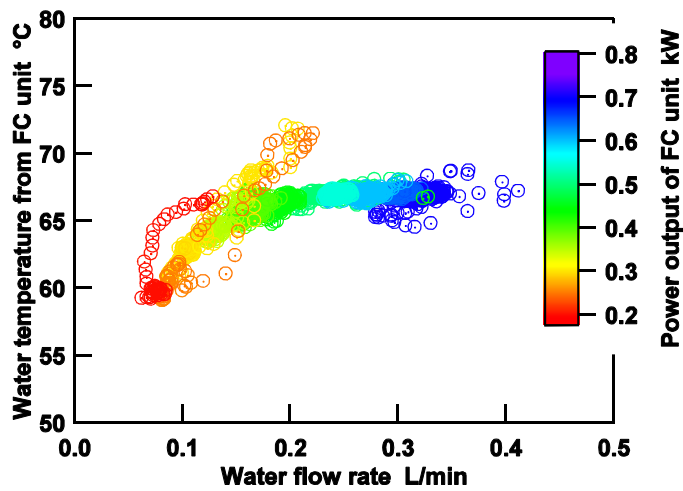


Fig. 2.29 Water flow rate of PEFC unit at steady state

図 2.30 に示すのは GB の入出力特性である。GB の定常状態は、出湯温度および出湯流量を操作することで作る。ガス消費量および熱出力の相関係数は 0.996 であり、GB は入出力特性を線形近似可能であることが示され、ボイラ熱効率は 0.986 と同定された。

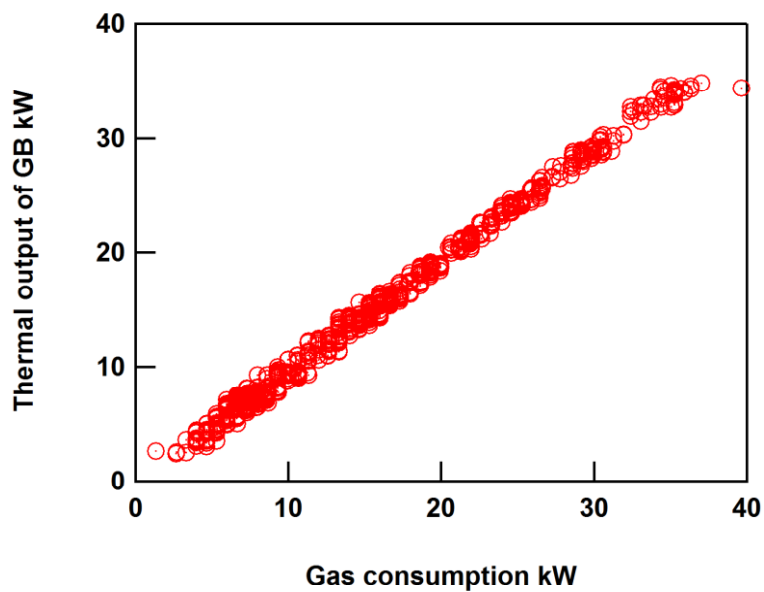


Fig. 2.30 Gas consumption and thermal output of GB unit

## 第2章 PEFC-CGS の特性評価試験

本項におけるデータの, 包含係数2における拡張不確かさの平均値を表2.5に示す. この値以上の変動を測定した場合, 計測の不確かさがその原因ではなく, 測定対象の変動に起因する値の変化であるとする. 今回構築した計測系においては, 電力計の精度が最も不確かさが大きい.

Table 2.5 Extended uncertainty based on measured values

	Averaged value of extended uncertainty ( $k=2$ )	Averaged value of ratio expanded uncertainty of measured value ( $k=2$ )
Gas consumption	$\pm 0.01$ kW	$\pm 0.65$ %
Power output	$\pm 0.07$ kW	$\pm 13.89$ %
Thermal output	$\pm 0.03$ kW	$\pm 5.00$ %
Overall net electric efficiency	$\pm 4.84$ %	$\pm 13.91$ %
Overall thermal efficiency	$\pm 2.04$ %	$\pm 4.77$ %

### 2・5 本章のまとめ

本章では, PEFC-CGS の実験系を構築し, 実運用下における発電・熱回収効率等に関わるシステムの入出力特性を同定した. 実験系は, 電力・温水負荷を制御し, 燃料電池ユニット, 貯湯槽および補助ボイラの3つの部分それぞれに対してエネルギーおよび物質の入出力を測定するものとした. 結果として, PEFC-CGS の基本的な特性を明らかにし, システムの最適運用モデルの構築にあたっては, 各部分のエネルギーおよび物質の入出力関係で表現しうることを, 電力負荷変動に対しては, 負荷追従速度によるモデル化が適当であること, ならびに起動・停止のエネルギー量を考慮する必要があることが判明した. 具体的な定式化は, 以降の章にて詳述する.

以上より, 以下の章における FC-CGS の数理モデルにおいては, 対象機器ごとに上記のモデル化方針に従って適切に設定した特性値を用いることとする.

## 第3章 PV-BT 組込み型 FC-CGS の省エネルギー性評価

### 3・1 概要

本章の主要目的は、実在家庭における年間に亘る電力・暖房・給湯・追焚きエネルギー需要量と太陽光発電システム(PVS)の発電電力量に基づいて、次世代家庭用エネルギーシステムである SOFC および PEFC-CGS にそれぞれ PVS および BT を組込んだシステムの省エネルギー性を、運用方策決定問題に最適化手法を導入して定式化し、それを求解することで分析・評価することである。なお、冷房需要量は電動式空調機で供給されるものとして、電力需要量に含めて取り扱うものとする。省エネルギー性の比較基準としては、GB と系統電力から構成される従来システム(CS)を採用する。

なお、システムの運用方策に関連して、PVS の発電電力は家庭内電力需要に優先的に供給するケースと、系統電力に逆潮流するケースの比較分析を行う。また、BT に関してはその導入機器容量の影響についても分析を加えることにする。

### 3・2 対象システム

#### 3・2・1 太陽電池・蓄電池組込み型 PEFC システム

図 3.1 は、本章で考察の対象とする PEFC-CGS に PVS および BT を組込んだシステムの構成図を示したもので、電力・給湯・暖房および追焚き需要にエネルギーを供給する。ここで、電力需要は PEFC・PVS・BT および系統電力、給湯および暖房需要は PEFC および GB、さらに追焚き需要は GB のみから供給される。図 3.1 において、PEFC-CGS は PEFC ユニットおよび貯湯ユニット、PEFC ユニットは PEFC および余剰電力回収ヒータ、また貯湯ユニットは HWT・放熱ファン・暖房用熱交換器および GB から構成される。本システムでは、PVS からの電力は系統へ逆潮流可能とし、また BT へは PVS および PEFC からの電力のみが充電可能とする。余剰電力回収ヒータは、システム運用上余った PEFC 発電電力を温水に変換し、さらに放熱ファンは余剰熱を放出する。

3・2・2 太陽電池・蓄電池組み込み型 SOFC システム

図 3.2 は, SOFC-CGS に PVS および BT を組み込んだシステムの構成図を示したもので, SOFC から回収された温水は, PEFC と比較し温度が高いため, 給湯用途のみに用いられ, 暖房用途へは利用されない.

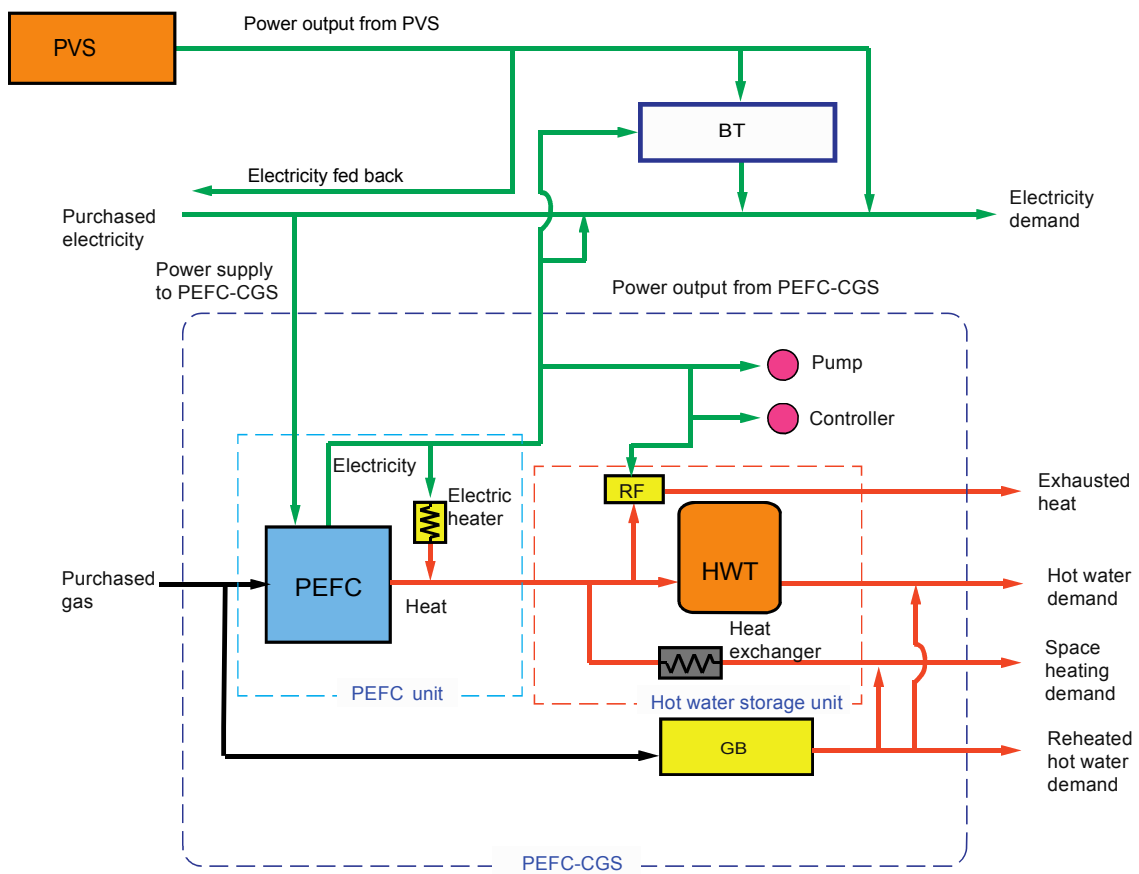


Fig. 3.1 PEFC system with PVS and BT

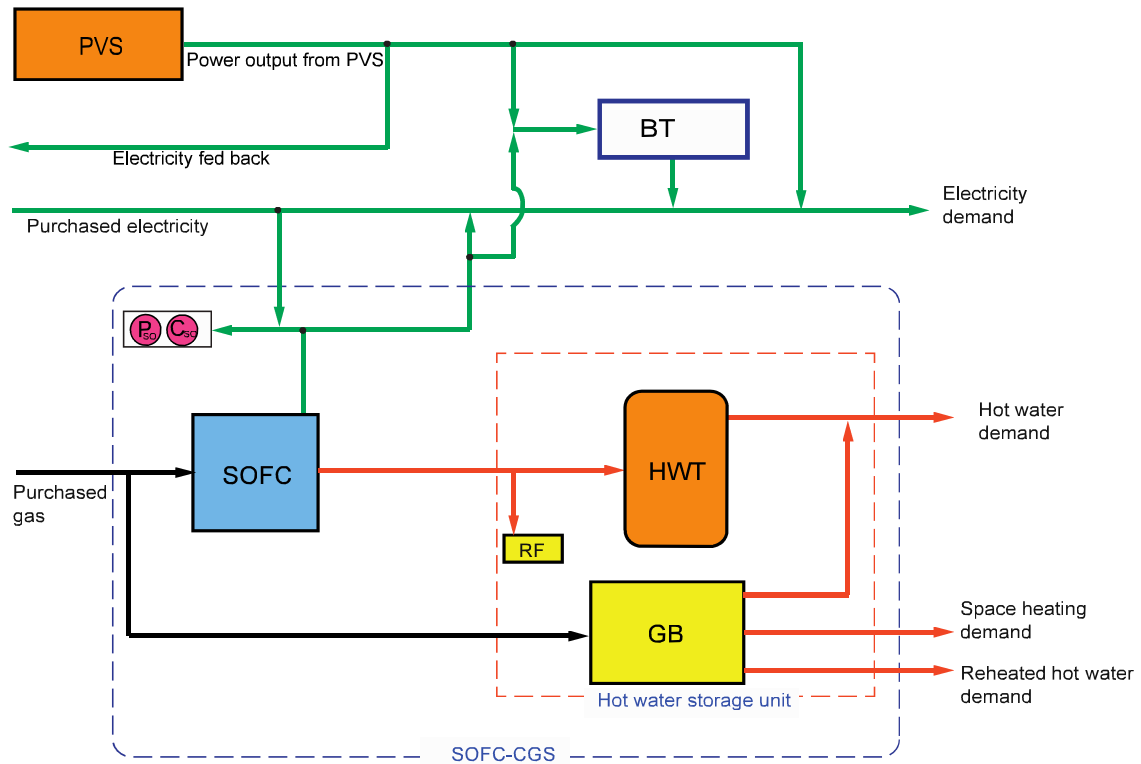


Fig. 3.2 SOFC system with PVS and BT

### 3・2・3 比較基準システム

ここでは比較基準システムとして、GBおよび系統電力から構成されるCSを採用する。なお、CSに対してもPVSおよびBTを組み込んだものを検討し、図3.3のPVSおよびBT組み込み型CSでは、電力需要はPVS・BTおよび系統電力、また給湯・暖房および追焚き需要はGBから供給される。なお、PVSおよびBT組み込み型CSにおけるPVSからの発電電力は、系統への逆潮、BTへの充電および電力需要への供給に使用されるものとする。

第3章 PV-BT 組み込み型 FC-CGS の省エネルギー性評価

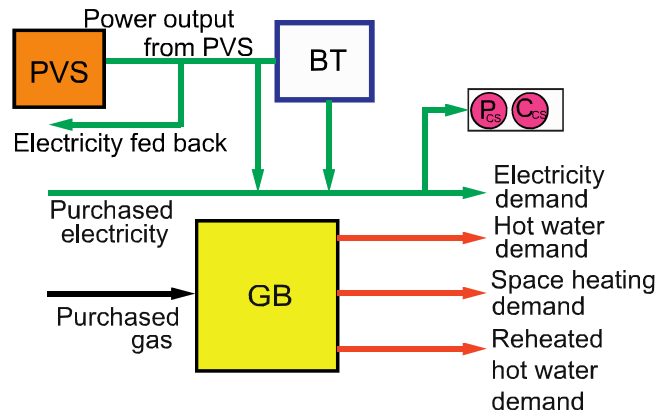


Fig. 3.3 Conventional system with PVS and BT

3・3 最適運用計画問題

本節では、エネルギー供給システムの最適運用計画問題について述べる。一般的に、生活パターンには1日単位での周期性が存在するものと仮定し、BT および HWT 等の蓄エネルギー装置の容量も1日のエネルギー需要量を満たすよう設計されている。したがって、ここでは1日を評価期間とし、1日を $T$ 個のサンプリング時間間隔に分割する。各サンプリング時刻のエネルギー需要量およびPVS発電電力量を与条件とし、次式の $d$ 日における一次エネルギー消費量という目的関数を最小化するシステム運用方策を決定する。

$$J(d) = \sum_{t=1}^T \{ C^e [e_{\text{buy}}(t) - (1 - N)e_{\text{PVS}}^r(t)] + C^g g_{\text{buy}}(t) \} \quad (3.1)$$

ここで、 $J$ 、 $t$ 、 $C$ 、 $e$ 、 $N$  および  $g$  は、それぞれ一次エネルギー消費量、時刻、一次エネルギー消費量換算係数、電力量、ペナルティ係数およびガス流量を示す。また、添字の  $e$ 、 $\text{buy}$ 、 $\text{PVS}$ 、 $r$  および  $g$  は、それぞれ電力、購入、太陽電池、逆潮流およびガスを示す。図 3.1 および 3.2 に示すシステムにおいて、PVS からの発電電力は直接電力需要に供給する、または系統に逆潮して再度その電力を電力需要に入力することが可能である。この際、両者の割合が変化しても、システムの省エネルギー性の値は変わらない。最適運用計画問題の構成においては、上述の電力の流れの代替性が最適解の唯一性を損なう原因となるので、本論文では直接電力需要に供給する流れを優先させ



### 3・4 各種システムの省エネルギー性評価

る運用方策を採用することとし、式(3.1)のように後者の流れに $C^e Ne_{PVS}^r(t)$ というペナルティを課し、解の唯一性を保障することにする。

また、機器特性およびエネルギーバランス式を制約条件とし、機器の起動停止状況等を表す0-1整数変数およびエネルギー流量を表す連続変数を未知変数とする。ここで、時々刻々と変化するエネルギー需要量という条件下で最適解であるところの運用方策を与えるよう、SOFC・PEFCの起動停止状態、BTおよびHWTの蓄エネルギー量は初期条件をパラメータとして設定せずに、1日の始まりと終わりで一致するという制約条件のみを設ける。

本問題は、混合整数線形計画(MILP)問題(Papadimitriou and Steiglitz, 1998)であり、代数モデリング言語AMPL(Fourer, et al., 2003)により記述され、混合整数計画問題のソルバであるCPLEX version 12.3により解かれる。CPLEXは、単体法、分枝限定法および切除平面法等の手法に基づき最適解を導出するデフォルトのアルゴリズム設定とした(IBM, 2012)。

## 3・4 各種システムの省エネルギー性評価

### 3・4・1 前提条件

まず、システム導入対象となる家庭(4人家族世帯、関東都市部の戸建て住居)におけるエネルギー需要量に関しては、一年間に亘る実測データを採用するものとし、各月における日平均値を図3.4に示す。計測対象家庭は、年間に亘りエネルギー需要量が実測可能であった複数軒の家庭より、文献(住環境計画研究所, 2009)を参考にしながら最も標準的と考えられるものを選定したものである。

次に、対象システムの主機となるPEFCの性能特性は、図3.5および表3.1に示すものを採用し、その発電出力は250~700 Wの範囲で可変であるものとする。なお、

### 第3章 PV-BT 組込み型 FC-CGS の省エネルギー性評価

本章における数値解析は、実在システムの運用方策に関する考察を加える目的で、実売されている FC-CGS のカタログ仕様をシステム特性値として採用する。SOFC の性能特性は、図 3.6 および表 3.2 に示し、その発電出力は 150~700W の範囲で可変であるものとする。また、システムの補機類の各種特性値を図 3.7 に示す。なお HWT への給水温度は外気温の影響を考慮するものとし、HWT からの放熱損失に関しては、放熱係数を設定して貯湯温度と外気温の差に依存するものとした。SOFC および PEFC-CGS のポンプ動力に関しては、各時刻における各種需要量の有無によって異なり、表 3.3 に示す電力を消費するものとする。さらに、BT 容量は家庭に据え置き型の標準的容量として 6 kWh およびより大容量の 20 kWh を対象とし、充放電電流は最大で 1/3C、充放電効率はいずれも 92%、蓄電量の自然放電損失は 0.02%/h、最低蓄電率は 10%とする。ここで、BT における 1C とは、最大充電量すなわち全 BT 容量を 1 時間で放電完了する電流値を表す(小久見他, 2008)。PVS 設備容量は、一般家庭の屋根に取り付けられる平均的な容量である 4 kW とした。図 3.8 は年間に亘る PVS 発電量の 1 日毎の実測積算値を示したものである。また、表 3.4 には電力およびガス購入量の一次エネルギー消費量への換算係数を示す(東京ガス, 2013; 経済産業省, 2013)。なお、CS の機器特性は図 3.7 の対応する値とする。

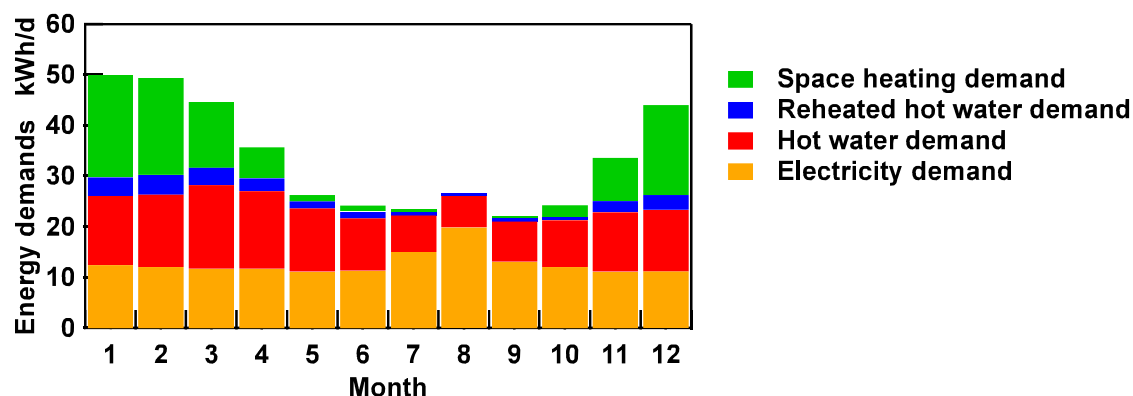


Fig. 3.4 Daily average values of energy demands in each month

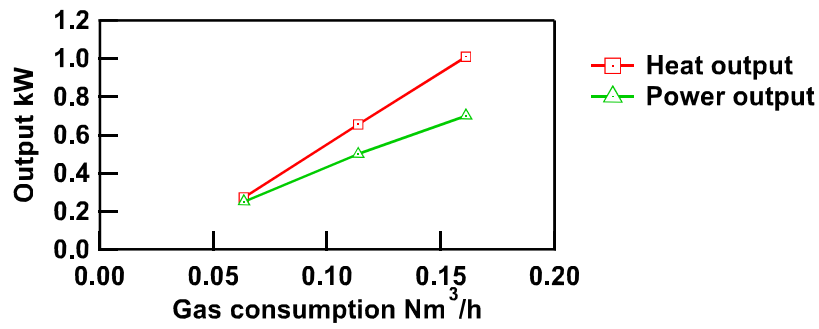


Fig. 3.5 Performance characteristics of PEFC

Table 3.1 Efficiency of PEFC

Power output	W	250	500	700
Power efficiency (LHV)	%	35	39	38.5
Thermal efficiency of heat output (LHV)	%	38	51	55.5

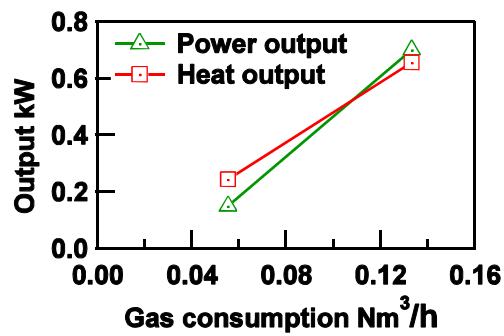


Fig. 3.6 Performance characteristics of SOFC

Table 3.2 Efficiency of SOFC

Power output	W	150	700
Power efficiency (LHV)	%	24.0	46.5
Thermal efficiency of heat output (LHV)	%	39.0	43.5

### 第3章 PV-BT 組み込み型 FC-CGS の省エネルギー性評価

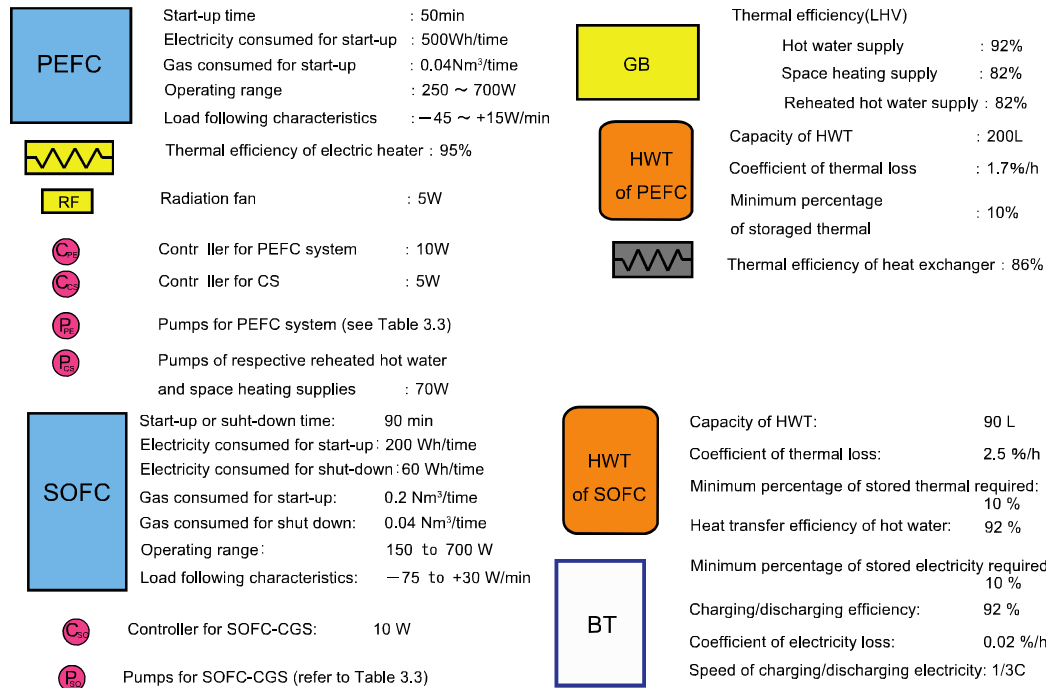


Fig. 3.7 Characteristic values of several pieces of equipment

Table 3.3 Electricity consumed by pumps

Auxiliary boiler	Operational status of pumps			Electricity consumed by pumps W
	Hot water supply	Space heating supply	Reheated hot water supply	
Off	Off	Off	Off	0
	On	Off	Off	30
	Off	On	Off	80
	On	On	Off	110
On	On	Off	Off	40
	Off	On	Off	90
	Off	Off	On	80
	On	On	Off	110
	Off	On	On	160
	On	Off	On	110
	On	On	On	170

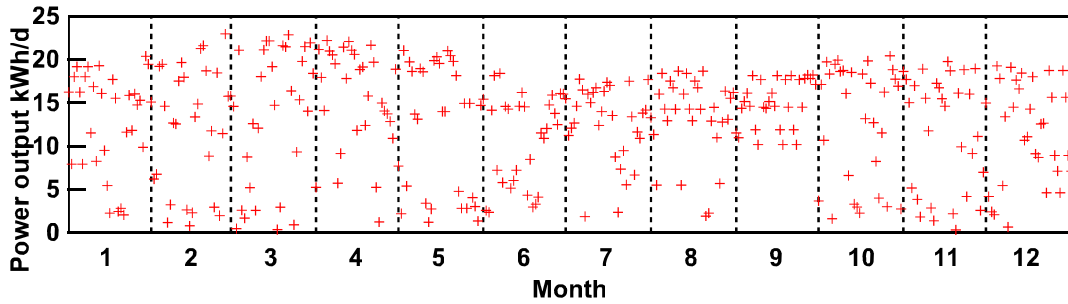


Fig. 3.8 Power output from PVS

Table 3.4 Conversion factor of primary energy

Conversion factor	Value
Primary energy of purchased gas (HHV) MJ/Nm <sup>3</sup>	45.0
Primary energy of purchased electricity MJ/kWh	9.76

### 3・4・2 比較検討システム

本章では、以下表 3.5 に示すように、運用や BT 容量の相違も折り込み、Nos. 1～6 の PEFC-CGS（表中では PE と略記する）を主体とするシステムと、Nos. 7～10 の SOFC-CGS（表中では SO と略記する）を主体とするシステムと、Nos. 11～16 の CS を主体とするシステムを検討する。同表に示すように、PE、および CS に PVS を組込んだシステムがそれぞれ Nos. 2・3、8 および 12・13 である。表 3.5 において、BT の容量に関しては、前節で述べたように 6 および 20 kWh のケースを考察することとし、それぞれ BT(6) および BT(20) のように略記する。さらに同表で  $\alpha$  および  $\beta$  の記号は、前節で述べた式(3.1)のペナルティ係数  $N$  の値の相違によるケース設定である。すなわち、 $\alpha$  は  $N$  の値を微小値 0.001 と設定して、システムの運用方策の解の唯一性を保障し、PVS 逆潮電力は系統電力からの買電と同等の価値であるとしたケース設定である。一方、 $\beta$  は  $N = 1.0$  と設定したケースで、この場合式(3.1)は

$$J(d) = \sum_{t=1}^T [C^e e_{\text{buy}}(t) + C^g g_{\text{buy}}(t)] \quad (3.2)$$

となる。このケースでは、PVS からの系統への逆潮電力量はシステムの一次エネルギー消費量に寄与しないものとみなされている。このケース  $\beta$  は、文献に示す「エネルギー

### 第3章 PV-BT 組込み型 FC-CGS の省エネルギー性評価

ギーの使用の合理化に関する法律（「省エネルギー法」と略記）における一次エネルギー消費量に関する基準」（建築研究所，2013）の定義に基づいて考察を加える目的で設定する。

以下の1日におけるシステムの最適運用計画問題に関する数値計算においては，前節で述べたサンプリング時間間隔を10 min と設定し，一日を $T = 144$ のサンプリング時間間隔に分割する．ここで，一般にサンプリング時間数が多い程未知変数が増大し，また未知変数の中で0-1 整数変数の数が多い程最適解の求解に長時間要することが知られている．一例として，表 3.5 の Nos. 4~6 の PE+ PVS +BT のシステムでは，0-1 整数変数の数が 2 016，連続変数の数が 5 043 および制約式の数は 7 780 で構成される大規模な MILP 問題である．ここでは，一年 $D = 365$ 日に亘る計算を実行することにより，各システムの省エネルギー性の比較検討をする．

#### 3・4・3 計算結果および考察

##### (a) 年間省エネルギー性

図 3.9(a)および(b)は，表 3.5 の各種システムの最適解に対する年間省エネルギー性を示したものである．ただし，(a)および(b)は，それらの相対的な比較関係をより明確化するために，それぞれケース $\alpha$ および $\beta$ で分割して示しているが，No. 1 および 11 の PE と CS のシステムに関しては比較の基準上両図に示している．また，図 3.9(a)のケース $\alpha$ に関しては，解の唯一性を保障するために導入したペナルティ係数 $N$ の項目を除去して年間一次エネルギー消費量を修正し， $J^*$ として，次式に示す CS を基準とする各種システムの省エネルギー率 $\varphi$ を算出した．

$$\varphi = (J_{CS}^* - J_X^*)/J_{CS}^* \times 100 \quad (3.3)$$

Table 3.5 Several systems compared by numerical analysis

No.	Calculation systems	Value of $N$	Capacity of BT kWh
1	PE	—	—
2	PE+ PVS - $\alpha$	0.001	—
3	PE+ PVS - $\beta$	1.0	—
4	PE+ PVS +BT(6)- $\alpha$	0.001	6.0
5	PE+ PVS +BT(6)- $\beta$	1.0	6.0
6	PE+ PVS +BT(20)- $\beta$	1.0	20
7	SO	—	—
8	SO+ PVS - $\beta$	1.0	—
9	SO+ PVS +BT(6)- $\beta$	1.0	6.0
10	SO+ PVS +BT(20)- $\beta$	1.0	20
11	CS	—	—
12	CS+ PVS - $\alpha$	0.001	—
13	CS+ PVS - $\beta$	1.0	—
14	CS+ PVS +BT(6)- $\alpha$	0.001	6.0
15	CS+ PVS +BT(6)- $\beta$	1.0	6.0
16	CS+ PVS +BT(20)- $\beta$	1.0	20

ここで、下付き添字のCSおよびXは、それぞれ比較基準システムおよび各種の代替システムを示す。

まず、検討ケース $\alpha$ ，すなわち、PVS 逆潮電力は系統電力からの買電と同等の価値であるとした設定の場合における省エネルギー率に注目する。図 3.9(a)の左より順に、PE は 13%，PE+ PVS -  $\alpha$  は 69%，PE+ PVS +BT(6)-  $\alpha$  は 71%，CS は 0%，CS+ PVS -  $\alpha$  と CS+ PVS +BT(6)-  $\alpha$  は共にほぼ等しい 56%の省エネルギー率である。また、PVS の導入による省エネルギー率の向上は PE 主体のシステムにおいて 69-13=56%，CS 主体のシステムでもほぼ等しい 56%である。さらに、BT の導入による省エネルギー率の向上は CS 主体のシステムではほとんど認められず、PEFC 主体のシステムではわずか 71-69=2%であり、BT の導入効果が僅かであることが確認された。

### 第3章 PV-BT 組込み型 FC-CGS の省エネルギー性評価

次に、PVS からの系統への逆潮電力量はシステムの一次エネルギー消費量削減に寄与しないものとみなす、検討ケース  $\beta$  に注目する。図 3.7(b) の左より順に、PE は 13% (検討ケース  $\alpha$  と同値)、PE+ PVS -  $\beta$  は 24%、PE+ PVS +BT(6) -  $\beta$  は 40%、PE+ PVS +BT(20) -  $\beta$  は 46%、CS は 0% (検討ケース  $\alpha$  と同値)、CS+ PVS -  $\beta$  は 14%、CS+ PVS +BT(6) -  $\beta$  は 32%、CS+ PVS +BT(20) -  $\beta$  は 42%の省エネルギー率である。また、PVS による省エネルギー性は PE 主体のシステムで  $24-13=11\%$ 、CS 主体のシステムで 14%であり、BT による省エネルギー性は前者で  $40-24=16\%$ 、後者で  $32-14=18\%$ であり、PVS および BT の有無をそれぞれ比較すると、PE 主体より CS 主体のシステムの方が、PVS および BT 導入による省エネルギー率の向上幅が大きいことが分かった。さらに、BT 容量の大容量化による省エネルギー性は前者で  $46-40=6\%$ 、後者で  $42-32=10\%$ であり、ケース  $\alpha$  よりケース  $\beta$  の方が、省エネルギー率の向上幅が大きいことが判明した。図 3.10 は CS に対する SO 主体システムの年間省エネルギー性であり、図 3.9(b) と同様の傾向を示している。

以上より、PVS 逆潮電力は系統電力からの買電と同等の価値であるとした設定のケース  $\alpha$  においては BT の導入効果は僅かであるが、その一方で PVS の導入効果は高くなっている。PVS からの系統への逆潮電力量はシステムの一次エネルギー消費量削減に寄与しないものとみなすケース  $\beta$  においては BT の導入効果は高く、20 kWh まで大容量化することの利得も見込まれる。ただし、PEFC-CGS と PVS は電力供給源としての役割が重複する特性を持つため、PE+ PVS の導入効果はケース  $\alpha$  と比較して相対的に低いものとなっている。



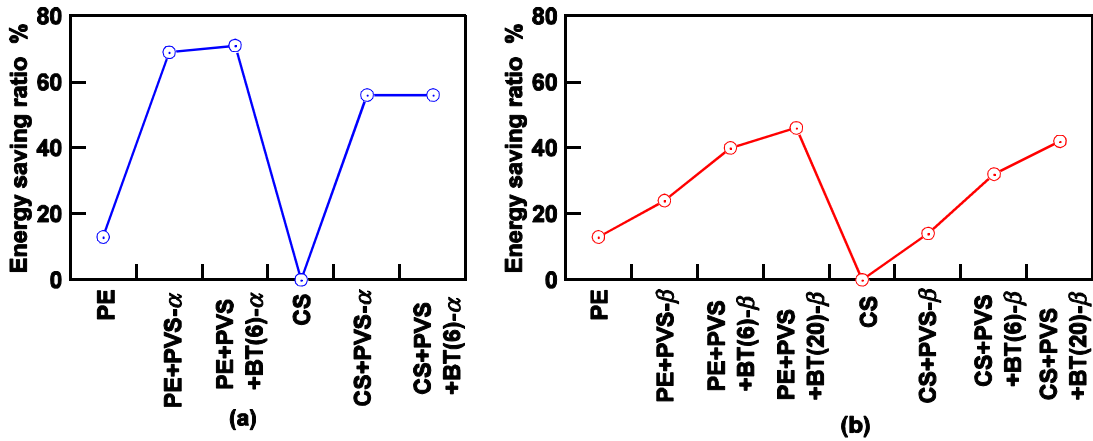


Fig. 3.9 Annual energy saving ratio of PEFC and CS, (a) Case- $\alpha$ , (b) Case- $\beta$

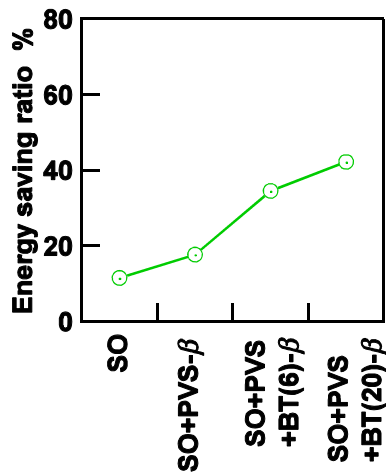


Fig. 3.10 Annual energy saving ratio of SOFC

(b) 年間機器稼働状況および最適システム運用方策

表 3.6 に、比較検討システムの年間に亘る最適運用結果を示す。まず、検討ケース  $\alpha$  の PEFC の運用に注目すると、年間に亘る PEFC 稼働時間は、PE で 7 533 h/year, PE+ PVS -  $\alpha$  で 7 499 h/year とほとんど差はないが、PE+ PVS +BT(6)- $\alpha$  で 7 876 h/year と増加している。PVS 逆潮電力量は、PE+ PVS -  $\alpha$  で 4 368 kWh/year, PE+ PVS +BT(6)- $\alpha$  で 4 496 kWh/year であり、BT を導入したにも関わらず PVS 電力は充電されず、PEFC の発電時間増加に伴い PVS 電力量の家庭内消費量は減少した。また、PE+ PVS +BT(6)- $\alpha$  では PE+ PVS -  $\alpha$  と比較して、PEFC 稼働時平均負荷率、稼働時間および発電出力量

### 第3章 PV-BT 組込み型 FC-CGS の省エネルギー性評価

が、それぞれ 3%, 377 h/year および 338 kWh/year 向上しており、BT 導入により PEFC が高負荷および長時間の運転となり、供給電力量が増加していることが確認された。ここで、PEFC 稼働時平均負荷率とは、PEFC の定格発電出力に対するサンプリング時刻毎の発電出力の割合を、PEFC 発電時において平均したものである。

Table 3.6 Annual values of optimal operational results of several systems compared

Systems		PE	PE+ PVS		PE+ PVS +BT		
		—	$\alpha$	$\beta$	BT(6kWh) $\alpha$	BT(6kWh) $\beta$	BT(20kWh) $\beta$
Purchased electricity	kWh/year	1 764.7	1 397.2	1 409.3	997.2	388.8	275.6
Gas consumption of auxiliary boiler	Nm <sup>3</sup> /year	375.7	375.6	425.1	374.0	523.7	627.7
Gas consumption of PEFC	Nm <sup>3</sup> /year	828.4	826.8	638.2	902.0	475.0	289.1
Power output from PEFC	kWh/year	3 548.3	3 542.1	2 748.9	3 880.0	2 058.3	1 251.7
Operational hours of PEFC	h/year	7 533.2	7 498.8	5 146.2	7 875.9	3 458.5	2 127.5
Average load factor of PEFC*	%	67.3	67.5	76.3	70.4	85.1	84.0
Adverse electricity to grid	kWh/year	—	4367.7	3 366.9	4 495.5	1 578.2	708.7
Power supply from BT	kWh/year	—	—	—	480.1	1 848.6	2 560.9

\*This value is calculated under the condition when PEFC is generating power.

次に、検討ケース  $\beta$  の PEFC の運用に注目すると、PE+ PVS -  $\beta$  では、PEFC 稼働時間は 5 146 h/year、PE+ PVS +BT(6) -  $\beta$  で 3 459 h/year と BT 導入により PEFC 稼働時間は減少傾向にあり、検討ケース  $\alpha$  と異なる傾向を示した。また、PEFC 稼働時平均負荷率は、PE+ PVS -  $\beta$  で 76%、PE+ PVS +BT(6) -  $\beta$  で 85%となり、BT 導入により PEFC が高負荷および短時間の運転となり供給電力量は減少していることが確認された。このとき、PEFC に代わり、GB および BT からのエネルギー供給が増えている。さらに、PE+ PVS +BT(20) -  $\beta$  では PE+ PVS +BT(6) -  $\beta$  と比較して、PVS 逆潮電力量が 870 kWh/year 減少しており、BT の大容量化により家庭内消費が増加したことが確認された。

図 3.8 に、年間に亘る家庭内消費電力量に対する各供給源から直接供給された電力

量の割合である次式で定義された電力供給率 $\gamma^{ele}$ を示す.

$$\gamma^{ele} = \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T \{e_Y(d, t) / [e_{dem}(d, t) + e_{AUX}(d, t)]\} \quad (3.4)$$

ここで、下付き添字のdem, AUXおよびYは、それぞれ需要、補機および各電力供給源を示す. 図 3.11 より、左から右のシステムへ行くにつれて、PEFC および系統電力からの供給率は減少し、一方で BT からの供給の割合が増加しており、また、PVS からの直接供給による割合はどのシステムにおいても 25%程度に留まっていることがわかる. 図 3.12 には、S0 主体システムにおける電力供給率を示し、右のシステムへ行くにつれて SOFC の供給率は減少していることが確認出来る. さらに、図 3.13 に、年間に亘る BT 入力電力量に対する各供給源からの BT への電力供給の割合を示す. 図 3.13 より、BT への入力電力量は、PVS 発電電力量が 90%以上であり、PVS 発電電力は家庭内で最大限使用することが省エネルギーとなることが確認できた. また、BT は PEFC 発電電力を蓄電することも、僅かながら省エネルギー率に寄与することがわかる.

図 3.14 に、ケース $\alpha$ および $\beta$ の 11 月 9 日における電力系の運用をそれぞれ示す. 電力量の正の領域は家庭内消費を、負の領域は系統へ逆潮されたことを示す. ケース $\alpha$ においては、PEFC を常時稼働することで PVS 逆潮電力量を最大化し、系統から夜間に買電する運用である. 一方で、ケース $\beta$ においては PEFC の稼働は昼間以外、系統からの買電は深夜、逆潮は昼間の電力需要が少ない時間帯、BT からの電力供給は夕方以降および朝方であり複雑な運用となっている. 図 3.15 は図 3.14 と同日における BT の運用を示し、緑の実線は PE+ PVS +BT(6)- $\beta$ 、緑の破線は PE+ PVS +BT(20)- $\beta$ を示す. 図 3.15 の実線より、14 時頃に BT はすでに満充電であり、一方で BT 容量 20 kWh のシステムにおいては、蓄電可能容量に余裕があることがわかる. BT 運用は、その容量によらず PVS 電力を日中に貯めるという傾向を示した.

第3章 PV-BT 組み込み型 FC-CGS の省エネルギー性評価

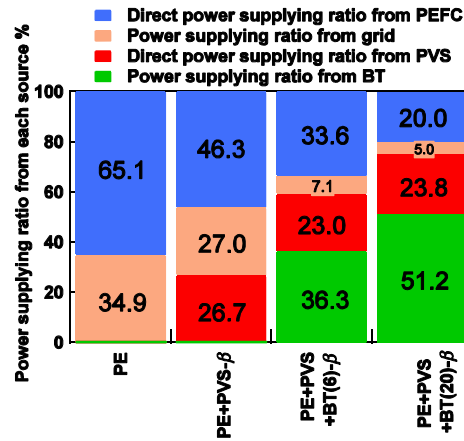


Fig. 3.11 Power supplying ratio from each source of PEFC

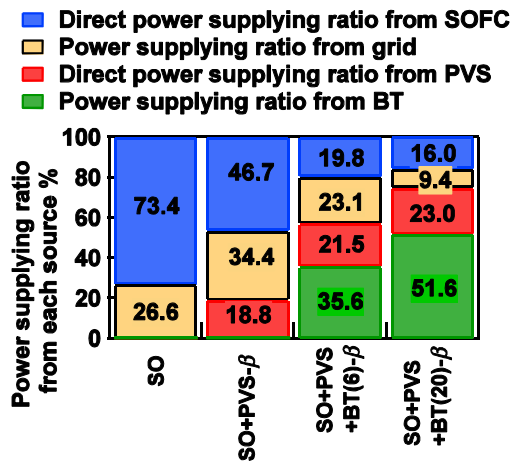


Fig. 3.12 Power supplying ratio from each source of SOFC

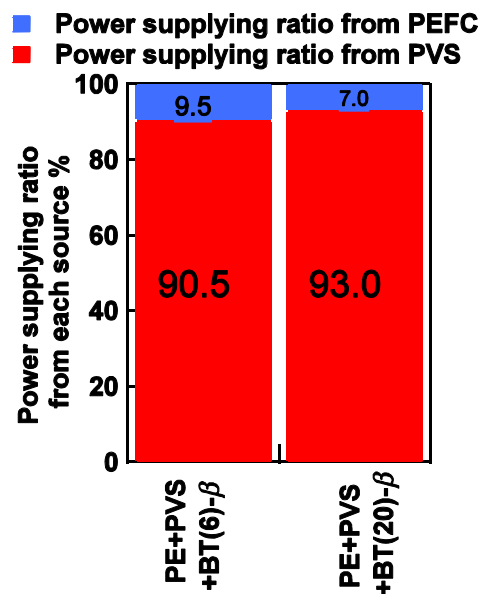


Fig. 3.13 Power supplying ratio from each source to electricity demand to BT

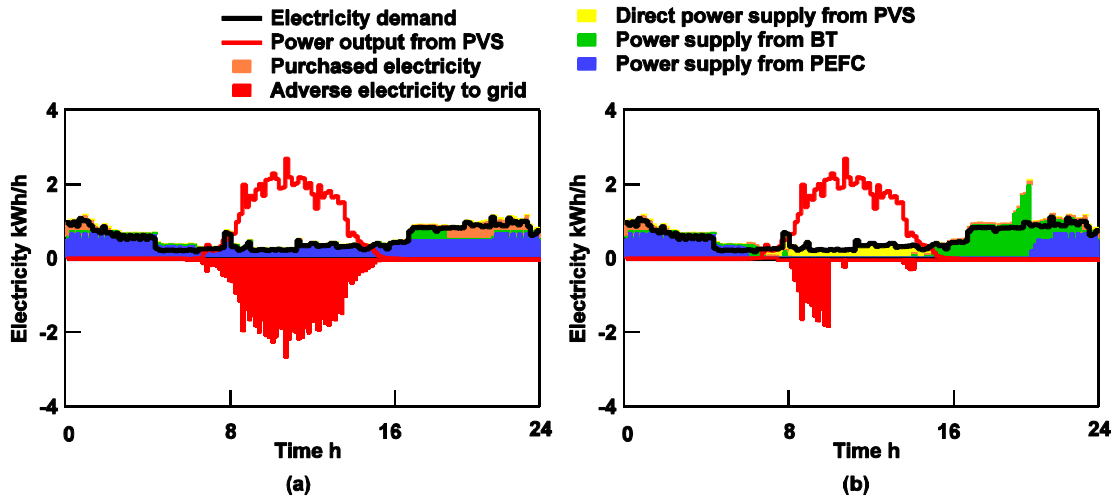


Fig. 3.14 Daily optimal operation of PE+PVS+BT(6) on November 9th, (a) Case- $\alpha$ , (b) Case- $\beta$

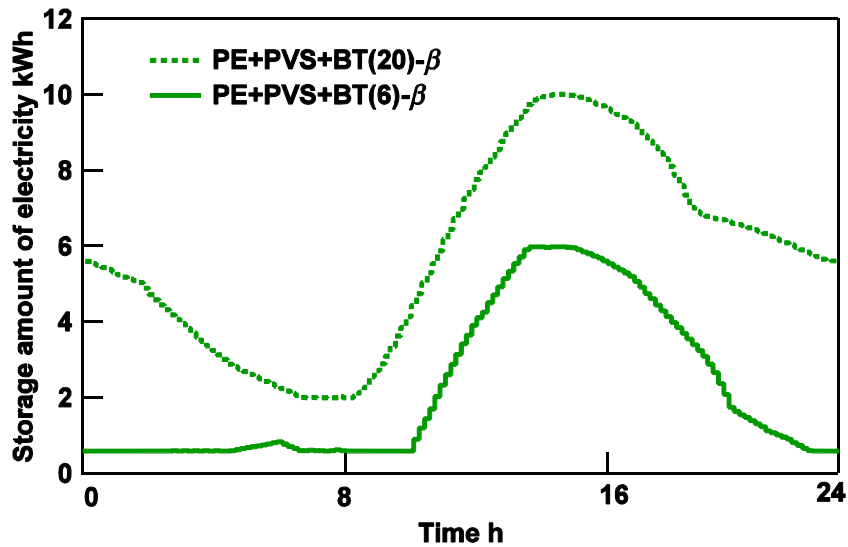


Fig. 3.15 Daily optimal operation of BT on November 9th

### 3・5 本章のまとめ

本章では、実在家庭における年間に亘るエネルギー需要量と PVS 発電電力量を与条件とし、最適運用計画問題をもとにして、家庭用各種エネルギー供給システムの省エネルギー性を分析・評価した。最適運用計画問題は、MILP 手法により定式化され、CPLEX により最適解を導出した。SOFC、PEFC-CGS および CS へ、それぞれ PVS および BT を組込んだシステムを対象とし、運用や BT 容量の相異も折り込んだ 16 のシステムの最適

### 第3章 PV-BT 組込み型 FC-CGS の省エネルギー性評価

運用方策をそれぞれ比較検討した。その結果、以下の主要な結果を得た。

(1) PVS 逆潮電力は系統電力からの買電と同等の価値であるとしたケース設定では、BT 導入による省エネルギー性への効果は僅かである。

(2) 「省エネルギー法における一次エネルギー消費量に関する基準」の定義に基づいて、PVS からの系統への逆潮電力量はシステムの一次エネルギー消費量に寄与しないとしたケース設定では、BT は PVS 発電量の融通に用いられるために、BT の導入により省エネルギー率は 16%程度向上した。このとき、PEFC の稼働時間は 3500 時間を下回り、家庭内消費電力量の 50%以上は、直接的に PVS から、または BT を介して PVS 電力を供給していることが分かった。さらに、PVS および BT の有無をそれぞれ比較すると、PE 主体より CS 主体のシステムの方が、PVS および BT の導入による省エネルギー率の向上幅が大きいことが判明した。

本章においては、多量の実測需要データに対する数値検討を加えることでシステムの省エネルギー性を考察したものの、システムの省エネルギー性に寄与する需要特性については必ずしも明らかではない。そこで、次章において需要特性の分析手法を提示する。

## 第4章 エネルギー需要特徴の分類と省エネルギー性評価

### 4.1 概要

本章では需要特徴の分析手法の構築と、その具体的応用例として需要特徴がエネルギーシステムへ与える影響分析手法の構築を目指す。主機の熱電比の拘束が強い CGS においては、主機の熱電比とエネルギー需要量の熱電比が合致した際に省エネルギー・省コストとなることが知られているものの、家庭部門のエネルギー消費パターンの日毎・時刻毎の変動は、民生部門の中の業務部門および産業部門と比較して大きい。そのため、CGS の潜在能力を發揮した運用を行えるかどうかは、設計段階ではなく日々の需要予測の精度に依存するところが大きい。しかし、時々刻々変動する家庭のエネルギー需要予測は非常に困難である。そこで、翌日のエネルギー需要時系列パターンは、前日までに実現した需要時系列パターンに似て発生するという仮定のもと、過去に実測した需要データと翌日に実現するであろう需要特性との類似度を判定することを考える。需要特性の類似度を判定する上で、どのように分類するかが重要となる。本章では、エネルギー需要量の実測データの特徴を把握するために、データ自身を省察することを目指す。具体的には、図 4.1 に示す通り、エネルギー需要のデータ構造を把握することを目的として、一般化 KL 情報量を用いて 1 日単位の需要時系列同士の距離を定義し、その距離に基づき一種の教師なし学習であるところの階層的クラスタリングを実施する。特に、CGS の運用方策の評価には電力・給湯需要量の双方が影響を持つことから、電力消費量のみでの分類を行った Shen らの手法 (Shen, 2012) を拡張し、電力・給湯需要量を一体として分類する。その後、データ構造とそれに対する CGS の省エネルギー性の関係を分析・評価する。

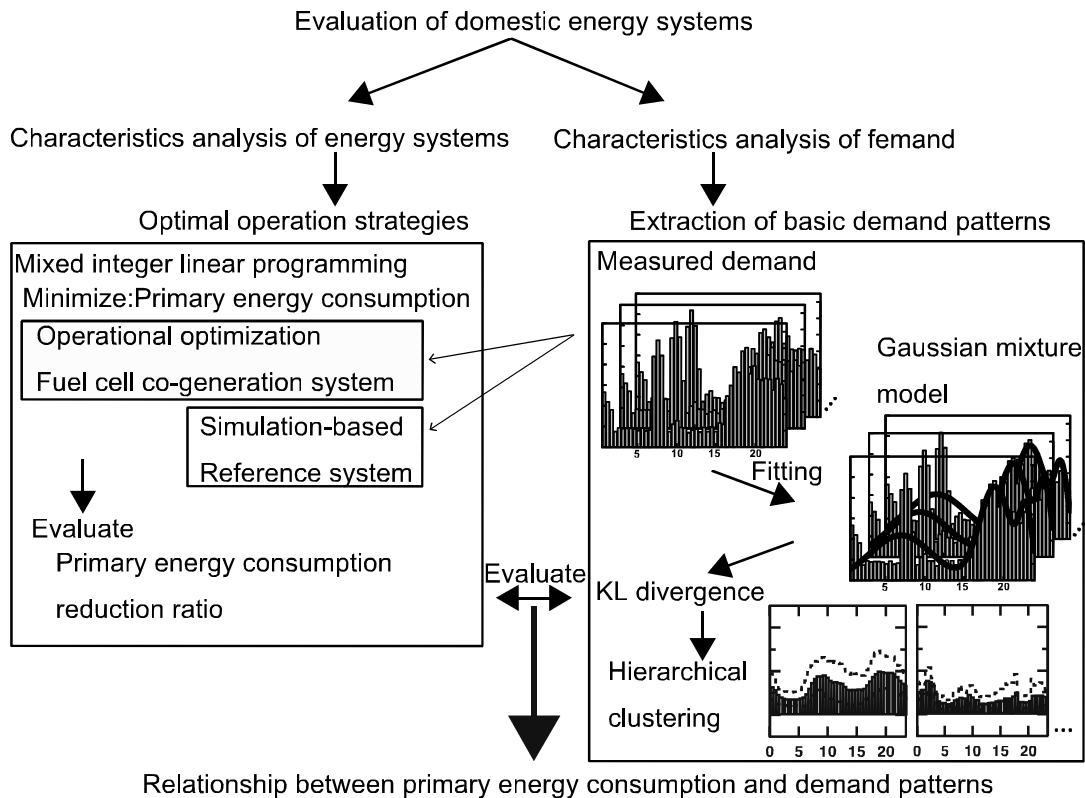


Fig. 4.1 Analysis framework of relationship between primary energy consumption and demand profiles

#### 4・2 電力・給湯需要データ

図 4.2 は戸建て住宅 40 世帯，集合住宅 32 世帯に亘る関西地域の実測のエネルギー消費量から換算した需要量を示す（辻他，2001）．家庭の構成員数は 3～6 人，72 世帯を平均した年間電力・給湯需要量は，それぞれ 15.49 GJ/year（約 11.79 kWh/day）および 13.05 GJ/year（約 9.93 kWh/day）である．図 4.2 (b) に示すデータ点数，則ち日数，は，72 世帯 365 日分の合計 26307 日存在し，電力・給湯需要量の最頻値は，それぞれ 8 および 4 kWh/day 近傍である．給湯需要量は日毎に広く分布し，最高値は最頻値の 15 倍である 60 kWh/day にまで達している．実売されている PEFC-CGS の HWT 容量は約 10kWh であり，放熱損失などを加味すると HWT による PEFC 熱出力の平準化は 1～2 日間の効果を持つ．また，実機に実装されている学習機能と呼ばれる PEFC-CGS の運用計画手法は 1 日単位の運用方策を決定しているとされる．そこで，本章でも 1



日単位のエネルギー需要時系列, PEFC の省エネルギー性, およびそれらの関係性について論を進める.

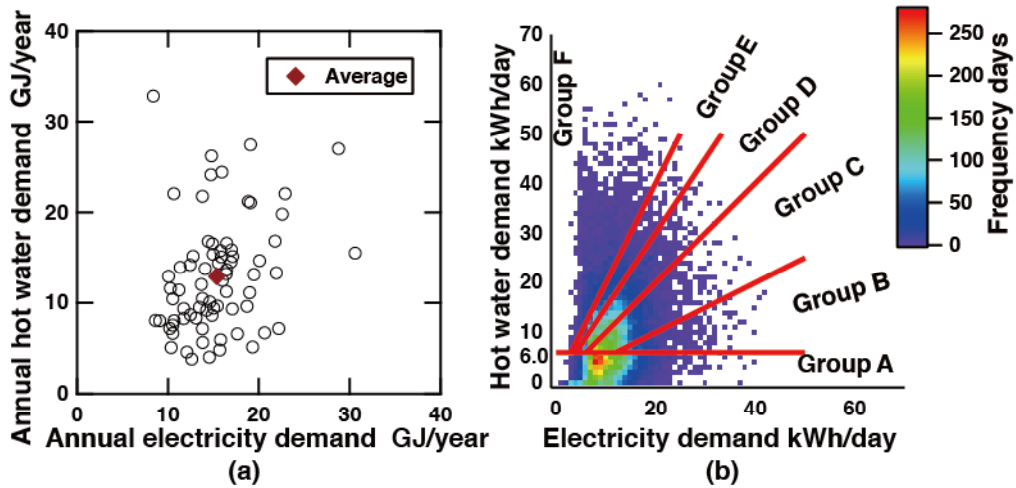


Fig. 4.2 Measured demand, (a) annual, (b) daily

### 4・3 検討対象システム

#### 4・3・1 PEFC-CGS

図 4.3 は対象とする PEFC-CGS の系統図, 表 4.1 および 4.2 はそれぞれ PEFC の発電・排熱回収効率および機器特性値を示し (東芝, 2012), PEFC の総合効率は定格出力において最大値の 85%, HWT 容量は 200L, GB 熱効率は 83%である.

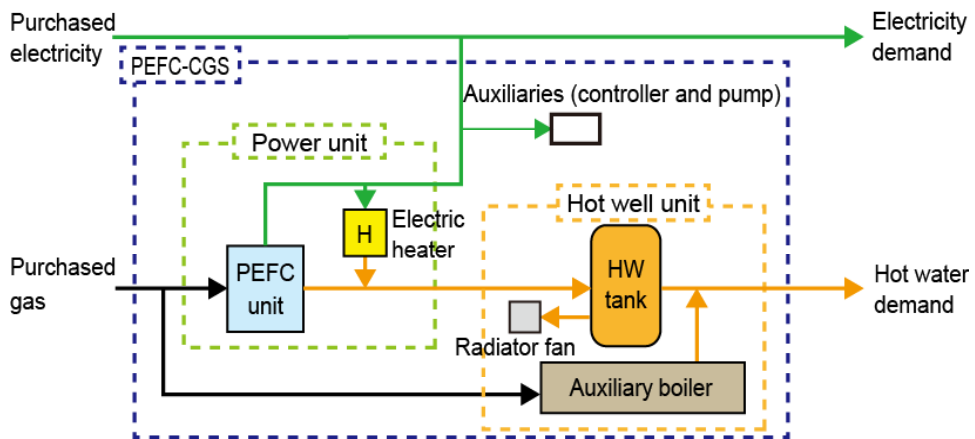


Fig. 4.3 Schematic diagram of PEFC-CGS

第4章 エネルギー需要特徴の分類と省エネルギー性評価

Table 4.1 Efficiency of PEFC

Load factor %	35.7	71.4	100
Electricity power output kW	0.25	0.50	0.70
Electricity power efficiency (LHV) %	30.0	34.0	35.0
Thermal efficiency (LHV) %	30.0	45.0	50.0

Table 4.2 System specifications

Specification		Value
Auxiliary boiler efficiency %	$\eta^B$	83.0
Controller electricity consumption W	$E^C$	10.0
Coefficient of thermal loss %/h	$\eta^{HWT}$	1.3
Electric heater efficiency %	$\eta^H$	95.0
Electricity consumption of pump for cyclic water W	$E^{P1}$	10.0
Electricity consumption of pump for heat circulation W	$E^{P2}$	50.0
Electricity consumption of pump for hot water W	$E^{P3}$	70.0
Electricity consumption of radiator fan W	$E^R$	15.0
Electricity consumption of start-up in first term Wh/30min	$E_{up,1}^{FC}$	300.0
Electricity consumption of start-up in second term Wh/30min	$E_{up,2}^{FC}$	200.0
Gas consumption of start-up in first term Nm <sup>3</sup> /30min	$G_{up,1}^{FC}$	0.016
Gas consumption of start-up in second term Nm <sup>3</sup> /30min	$G_{up,2}^{FC}$	0.024
Hot water outlet temperature from the PEFC unit °C	$\theta^{FC}$	60.0
Minimum ratio of thermal storage tank %		10.0
Thermal storage tank capacity L	$V^{HWT}$	200.0

4・3・2 比較基準システム

図 4.4 は系統電力および GB より構成される CS を示す。

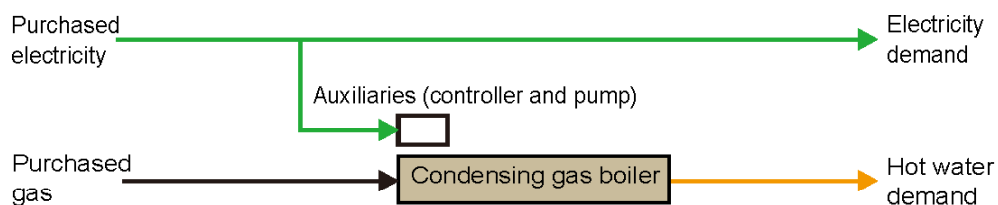


Fig. 4.4 Schematic diagram of CS

#### 4・4 最適運用計画問題

本節では、最適運用計画問題の定式化について述べる。以下の問題の記述においては、一次エネルギー消費量 $J$  MJ/day および係数を表すギリシャ文字を除き、決定変数をアルファベットの小文字で表し、具体的には、電力 $e$  kWh/h, ガス流量 $g$  Nm<sup>3</sup>/h, 熱流量 $q$  kWh/h, 機器の状態を示す2値変数 $z$ である。

##### 4・4・1 目的関数

本運用計画問題の目的関数には式(4.1)に示す通り、3種類の決定変数である昼間の買電量 $e_{\text{day}}^{\text{buy}}$ , 夜間の買電量 $e_{\text{night}}^{\text{buy}}$ および都市ガス購入量 $g^{\text{buy}}$ より構成される。

$$J = \sum_{t=1}^T \left( C_{\text{day}}^e e_{\text{day}}^{\text{buy}}(t) + C_{\text{night}}^e e_{\text{night}}^{\text{buy}}(t) + C^g g^{\text{buy}}(t) \right) \quad (4.1)$$

ここで、 $C$  は一次エネルギー換算係数であり、 $C^g$ は都市ガス、 $C$

。一日は $T$ 個のサンプリング数に分割され、サンプリング時間間隔 $\delta t$ は0.5 h である。

##### 4・4・2 制約条件

本項では、主たる制約条件を示す。式(4.2)～(4.7)に示す通り、PEFCのガス消費量および発電出力を2区分直線近似する。

$$\underline{G}_{\text{rate1}}^{\text{FC}} z_{\text{rate1}}^{\text{FC}}(t) \leq g_{\text{rate1}}^{\text{FC}}(t) \leq \overline{G}_{\text{rate1}}^{\text{FC}} z_{\text{rate1}}^{\text{FC}}(t) \quad (4.2)$$

$$\underline{G}_{\text{rate2}}^{\text{FC}} z_{\text{rate2}}^{\text{FC}}(t) \leq g_{\text{rate2}}^{\text{FC}}(t) \leq \overline{G}_{\text{rate2}}^{\text{FC}} z_{\text{rate2}}^{\text{FC}}(t) \quad (4.3)$$

$$g^{\text{FC}}(t) = g_{\text{rate1}}^{\text{FC}}(t) + g_{\text{rate2}}^{\text{FC}}(t) \quad (4.4)$$

$$z^{\text{FC}}(t) = z_{\text{rate1}}^{\text{FC}}(t) + z_{\text{rate2}}^{\text{FC}}(t) \quad (4.5)$$

第4章 エネルギー需要特徴の分類と省エネルギー性評価

$$Z_{\text{rate1}}^{\text{FC}}(t) = \begin{cases} 1: \text{electricity output of the PEFC unit is between 0.25 and 0.50 kW in } t \text{ term} \\ 0: \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.6)$$

$$Z_{\text{rate2}}^{\text{FC}}(t) = \begin{cases} 1: \text{electricity output of the PEFC unit is between 0.50 and 0.70 kW in } t \text{ term} \\ 0: \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.7)$$

ここで、2値 $z^{\text{FC}}$ はPEFCの発電可能状態、 $\underline{G}$ および $\overline{G}$ はそれぞれPEFCガス消費量の下限および上限である。PEFCの発電出力 $e^{\text{FC}}$ および熱出力 $q^{\text{FC}}$ をそれぞれ式(4.8)および(4.9)に示す。

$$e^{\text{FC}}(t) = \alpha_{\text{rate1}}^e g_{\text{rate1}}^{\text{FC}}(t) + \beta \quad (t) + \alpha_{\text{rate2}}^e g_{\text{rate2}}^{\text{FC}}(t) + \beta_{\text{rate2}}^e z_{\text{rate2}}^{\text{FC}}(t) \quad (4.8)$$

$$q^{\text{FC}}(t) = \alpha_{\text{rate1}}^q g_{\text{rate1}}^{\text{FC}}(t) + \beta_{\text{rate1}}^q z_{\text{rate1}}^{\text{FC}}(t) + \alpha_{\text{rate2}}^q g_{\text{rate2}}^{\text{FC}}(t) + \beta \quad (t) \quad (4.9)$$

ここで、 $\alpha$ および $\beta$ はPEFCの出力特性を表す係数である。PEFCの起動には、式(4.10)および(4.11)に示す通り、ガス流量 $g_{\text{up}}^{\text{FC}}$ および電力量 $e_{\text{up}}^{\text{FC}}$ を消費する。

$$g_{\text{up}}^{\text{FC}}(t) = G_{\text{up},i}^{\text{FC}} z_{\text{up},i}^{\text{FC}}(t) \quad (4.10)$$

$$e_{\text{up}}^{\text{FC}}(t) = E_{\text{up},i}^{\text{FC}} z_{\text{up},i}^{\text{FC}}(t) \quad (4.11)$$

ここで、発電までに暖機等をするため1h起動時間があり、 $\delta t = 0.5$ であるため $i \in \{1,2\}$ となり、発電までの2サンプリング時刻を、式(4.12)および(4.13)に示すとおり、2値変数 $z_{\text{up},i}^{\text{FC}}$ により表す。

$$z^{\text{FC}}(t) - z^{\text{FC}}(t-1) \leq z_{\text{up},2}^{\text{FC}}(t-1) \quad (4.12)$$

$$z_{\text{up},1}^{\text{FC}}(t-1) = z_{\text{up},2}^{\text{FC}}(t) \quad (4.13)$$

PEFC からの余剰電力 $e^{\text{H}}$ を回収する電気ヒータの熱出力 $q^{\text{H}}$ を式 (4.14) に示す.

$$q^{\text{H}}(t) = \eta^{\text{H}} e^{\text{H}}(t) \quad (4.14)$$

ここで、 $\eta^{\text{H}}$ は電気ヒータの効率である.

式 (4.15) に HWT の熱収支を示し、蓄熱量に関しては式 (4.16) に示す通り初期・終端条件を一致させる制約を設ける.

$$\frac{q^{\text{HWT}}(t) - q^{\text{HWT}}(t-1)}{\delta t} = q_{\text{in}}^{\text{HWT}}(t) - q_{\text{out}}^{\text{HWT}}(t) - \eta^{\text{HWT}} q^{\text{HWT}}(t-1) \quad (4.15)$$

$$q^{\text{HWT}}(0) = q^{\text{HWT}}(T) \quad (4.16)$$

ここで、 $q_{\text{in}}^{\text{HWT}}$ 、 $q_{\text{out}}^{\text{HWT}}$ および $\eta^{\text{HWT}}$ はそれぞれ HWT へ流入する熱流量、HWT から流出する熱流量および放熱率である. 蓄熱量 $q^{\text{HWT}}$ は式 (4.17) で示す通り給水温度を考慮し上限を設定する.

$$q^{\text{HWT}}(t) \leq \rho V^{\text{HWT}} c \{ \theta^{\text{FC}} - \theta^{\text{W}}(t) \} \quad (4.17)$$

式 (4.18) および (4.19) にそれぞれ $q_{\text{in}}^{\text{HWT}}$ および $q_{\text{out}}^{\text{HWT}}$ に関する熱収支を示す.

$$q^{\text{FC}}(t) + q^{\text{H}}(t) = q_{\text{in}}^{\text{HWT}}(t) + q^{\text{R}}(t) \quad (4.18)$$

$$Q^{\text{dem}}(t) = q_{\text{out}}^{\text{HWT}}(t) + q^{\text{B}}(t) \quad (4.19)$$

ここで、 $q^{\text{R}}$ 、 $Q^{\text{dem}}$ および $q^{\text{B}}$ はそれぞれ放熱ファンによる放熱流量、給湯需要量、GB からの熱流量であり、 $q^{\text{B}}$ は GB 消費ガス流量 $g^{\text{B}}$ 、熱効率 $\eta^{\text{B}}$ および都市ガス低位発熱量

#### 第4章 エネルギー需要特徴の分類と省エネルギー性評価

$H$ より次の通り算出される.

$$q^B(t) = \eta^B H g^B(t) \quad (4.20)$$

買電量 $e^{\text{buy}}$ および都市ガス購入流量 $g^{\text{buy}}$ に関する収支はそれぞれ式(4.21)および(4.22)の通り示される.

$$e^{\text{buy}}(t) + (e^{\text{FC}}(t) - e^{\text{H}}(t)) = E^{\text{dem}}(t) + e_{\text{up}}^{\text{FC}}(t) + e^{\text{AUXS}}(t) \quad (4.21)$$

$$g^{\text{buy}}(t) = g^{\text{FC}}(t) + g^B(t) + g_{\text{up}}^{\text{FC}}(t) \quad (4.22)$$

ここで、 $E^{\text{dem}}$ および $e^{\text{AUXS}}$ はそれぞれ電力需要量および補機消費電力であり、 $e^{\text{AUXS}}$ は次の通り算出される.

$$e^{\text{AUXS}}(t) = (E^{\text{C}} + E^{\text{P1}}z^{\text{FC}}(t) + E^{\text{P2}}z^{\text{B}}(t) + E^{\text{P3}}z^{\text{HW}}(t) + E^{\text{R}}z^{\text{R}}(t)) \delta t \quad (4.23)$$

ここで、 $E^{\text{C}}$ 、 $E^{\text{P1}}$ 、 $E^{\text{P2}}$ 、 $E^{\text{P3}}$ および $E^{\text{R}}$ は、それぞれ補機、PEFC、GB、給湯需要および放熱ファンに関わる補機消費電力である. 給湯需要の有無に応じて変化する $z^{\text{HW}} \in \{0,1\}$ の2値係数であり、放熱に関する2値変数 $z^{\text{R}}$ は次の通り定義される.

$$\frac{q^B(t)}{M} \leq z^B(t) \quad (4.24)$$

ここで、 $M$ は本問題で扱う決定変数の桁数に比べて十分に大きな数である.

#### 4・5 エネルギー需要特性分類手法

需要時系列データを、統計的擬似距離を用いた階層的クラスタリング (Kosmelj,

1990) , 一種の”教師なし学習” (Bishop, 2006) , を用いて分類する. 統計的擬似距離は, 需要量時系列データに近似させた混合ガウス分布を用いた一般化 KL 情報量から算出される. 具体的には, 一日の電力, 給湯需要量時系列の幾つかのピークに, それぞれガウス分布を推定し, 1つの混合ガウス分布を平均, 分散, 混合係数の3つの係数で表す. この処理で48次元(30分積算値が一日分で48サンプリング数)のある一日のある種の需要量時系列データが, 最大12次元のデータへと変換される. 最大12次元のデータで表された1日の情報を用い, それぞれの日の距離を算出し, 階層的クラスタリングを行う. 階層的クラスタリングは個体間の距離の近さで分類される. KL 情報量 (Hershey, 2007) は2つの確率密度の非類似度を表す, クラスタ分析に多用されている統計的擬似距離である. 本論文では, 一日の需要量時系列データのヒストグラムの非類似度を, Bregman 情報量 (Banerjee, 2005) により拡張された一般化 KL 情報量で表す.

#### 4・5・1 混合ガウス分布による時系列の近似

$T$ 次元ベクトルの連続変数  $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_T)^T$  に対して定義されるガウス分布を次に示す.

$$\mathcal{N}(\mathbf{x}|\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma}) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{T}{2}} |\boldsymbol{\Sigma}|^{\frac{1}{2}}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})^T \boldsymbol{\Sigma}^{-1}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})\right\} \quad (4.25)$$

ガウス分布は  $d$ 次元の平均ベクトル  $\boldsymbol{\mu}$  および  $T \times T$  共分散行列  $\boldsymbol{\Sigma}$  の2つを係数に持つ.  $K$ 個のガウス分布の重ね合わせは混合ガウス分布であり次式で示される.

$$p(\mathbf{x}|\boldsymbol{\lambda}) = \sum_{k=1}^K \pi_k \mathcal{N}(\mathbf{x}|\boldsymbol{\mu}_k, \boldsymbol{\Sigma}_k) \quad (4.26)$$

ここで, パラメータ  $\pi_k$  は混合係数であり, 上式を両辺  $\mathbf{x}$  について積分すると次式で示す通りとなる.

$$\sum_{k=1}^K \pi_k = 1 \tag{4.27}$$

混合ガウス分布の形状は、3つの係数  $\boldsymbol{\pi} \equiv \{\pi_1, \dots, \pi_K\}$ ,  $\boldsymbol{\mu} \equiv \{\mu_1, \dots, \mu_K\}$ ,  $\boldsymbol{\Sigma} \equiv \{\Sigma_1, \dots, \Sigma_K\}$  によって決まり、係数ベクトル  $\boldsymbol{\lambda}$  を次のように定義する.

$$\boldsymbol{\lambda} = \{\pi_k, \boldsymbol{\mu}_k, \boldsymbol{\Sigma}_k\}_{k=1}^K \tag{4.28}$$

この未知係数ベクトル  $\boldsymbol{\lambda}$  の最尤推定解を求めるために EM アルゴリズム (Dempster, 1977) を用いる. EM アルゴリズムによる混合ガウス分布のパラメータ推定には R 言語の `mclust` パッケージを用いた (Fraley, 2006). また混合要素数は Bayesian Information Criterion (BIC) (Schwarz, 1978) を用い 1~4 個の間で選択できるものとした. 換言すれば, エネルギー需要量時系列が 1 日において, 朝, 昼, 夕あるいは晩の 4 回ピークを持つと仮定し, 混合ガウス分布による近似を行った. この処理で, 平均, 分散, 混合係数の 3 係数で一つのガウス分布を表し, 48 次元の一日の需要時系列が, 最大で  $3 \times 4 = 12$  次元の混合ガウス分布で表されることとなる. 下図に混合ガウス分布の近似例を示す.

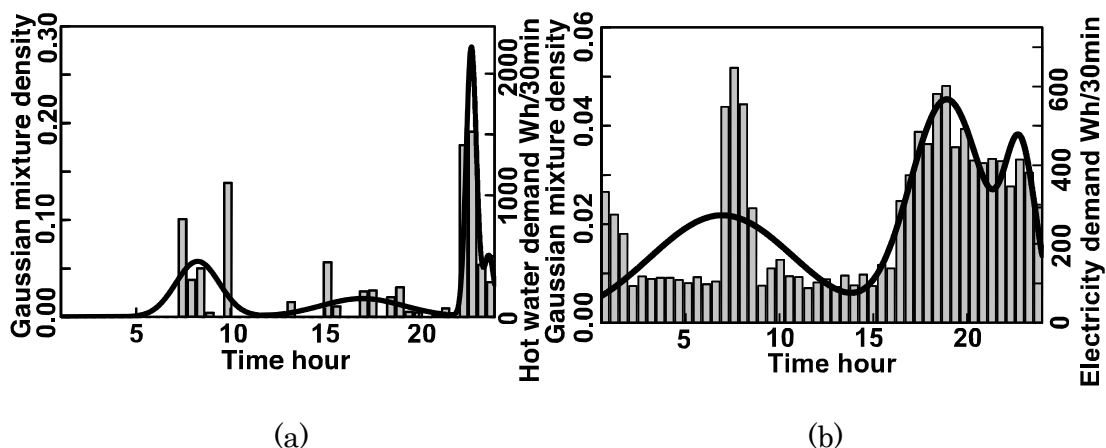


Fig. 4.5 Sample of fitting Gaussian Mixture Model, (a) Hot water demand, (b) Electricity demand



#### 4・5・2 KL 情報量による需要時系列同士の距離行列の生成

次式で示される, ある連続な分布 $f(x)$ と $f'(x)$ の非類似度を表す KL 情報量 $\mathcal{D}_{\text{KL}}$ をクラスタリングの距離として採用する.

$$\mathcal{D}_{\text{KL}}(f, f') = \int f(x) \ln \frac{f(x)}{f'(x)} dx \quad (4.29)$$

$T$ 次元の2つのガウス分布 $\tilde{f}(x)$ と $\tilde{f}'(x)$ の KL 情報量 $\mathcal{D}_{\text{g}}$ を次式に示す.

$$\mathcal{D}_{\text{g}}(\tilde{f}, \tilde{f}') = \frac{1}{2} \left[ \log \frac{|\Sigma_{\tilde{f}'}|}{|\Sigma_{\tilde{f}}|} + \text{Tr} \left[ \Sigma_{\tilde{f}'}^{-1} \Sigma_{\tilde{f}} \right] - T + (\mu_{\tilde{f}} - \mu_{\tilde{f}'} )^{\text{T}} \Sigma_{\tilde{f}'}^{-1} (\mu_{\tilde{f}} - \mu_{\tilde{f}'} ) \right] \quad (4.30)$$

2つの混合ガウス分布 $p(\mathbf{x}|\boldsymbol{\lambda})$ と $p'(\mathbf{x}|\tilde{\boldsymbol{\lambda}})$ の KL 情報量 $\mathcal{D}_{\text{gm}}$ は次式で近似される.

$$\mathcal{D}_{\text{gm}}(p, p') = \sum_{a=1}^{K_a} \pi_a \log \frac{\sum_{\tilde{a}=1}^{K_{\tilde{a}}} \pi_{\tilde{a}} \exp(-\mathcal{D}_{\text{g}}(p_a, p_{\tilde{a}}))}{\sum_{b=1}^{K_b} \pi_b \exp(-\mathcal{D}_{\text{g}}(p_a, p'_b))} \quad (4.31)$$

ここで, ガウス分布 $p_a(\mathbf{x})$ は混合ガウス分布 $p(\mathbf{x}|\boldsymbol{\lambda})$ の $a^{\text{th}}$ 番目の構成要素である. この混合ガウス分布のこの文脈における具体的な意味は,  $\mathbf{x}$ は実測のある日のある需要データを表し,  $p(\mathbf{x}|\boldsymbol{\lambda})$ はある日のある需要量時系列をヒストグラムの波形と見做したものを表し,  $p_a(\mathbf{x})$ はガウス分布を近似させたピークのうちの一つの特徴を表す.  $p(\mathbf{x})$ はある同じ需要の異なる日の混合ガウス分布を表す.

ここまでは, 一日の需要時系列データのヒストグラムの形の違いの観点で KL 情報量を捉えてきた. この需要解析において, CGS は電力と熱需要のバランスで運用の性能が変わってくるため, 一日の需要量の合計と需要量時系列パターンの両方を考慮することが重要である. そこである日の総電力需要量 $E_p$  (文脈によっては総給湯需要量 $Q_p^{\text{dem}}$ ) でバイアスを掛けた混合ガウス分布 $\tilde{p}(\mathbf{x})$ を考える. 以下の文脈では, 電力需要量の KL 情報量について述べる.

#### 第4章 エネルギー需要特徴の分類と省エネルギー性評価

$$\tilde{p}(\mathbf{x}) = E_p p(\mathbf{x}) \quad (4.32)$$

$$\tilde{p}'(\mathbf{x}) = E_{p'} p'(\mathbf{x}) \quad (4.33)$$

KL 情報量は確率密度分布同士の非類似度を表すため、上式のバイアスされた混合ガウス分布に対してそのままの形で適用することが出来ない。そこで、次式で示される、Bregman 情報量から拡張された一般化 KL 情報量  $\mathcal{D}_{\text{gen}}$  を用いる。

$$\begin{aligned} \mathcal{D}_{\text{gen}}(\tilde{p}, \tilde{p}') &= \int_{\mathbf{x}} \left( \tilde{p}(\mathbf{x}) \log \frac{\tilde{p}(\mathbf{x})}{\tilde{p}'(\mathbf{x})} - \tilde{p}(\mathbf{x}) + \tilde{p}'(\mathbf{x}) \right) d\mathbf{x} \\ &= E_p \mathcal{D}_{\text{gm}}(p, p') + E_p \log \frac{E_p}{E_{p'}} - E_p + E_{p'} \end{aligned} \quad (4.34)$$

KL 情報量および一般化 KL 情報量  $\mathcal{D}_{\text{gen}}$  は対称な量ではなく  $\mathcal{D}_{\text{gen}}(\tilde{p}, \tilde{q}) \neq \mathcal{D}_{\text{gen}}(\tilde{q}, \tilde{p})$  である。クラスタリングの距離行列として一般化 KL 情報量を使用するために、次の式で対称化された一般化 KL 情報量  $\mathcal{D}_{\text{symm}}$  を算出する：

$$\mathcal{D}_{\text{symm}}^E(\tilde{p}, \tilde{p}') = \frac{\mathcal{D}_{\text{gen}}(\tilde{p}, \tilde{p}') + \mathcal{D}_{\text{gen}}(\tilde{p}', \tilde{p})}{2} \quad (4.35)$$

#### 4・5・3 距離行列に基づく階層的クラスタリング

ここで、電力と給湯の両方の対称化した一般化 KL 情報量をクラスタ間の距離として、Ward 法 (Ward, 1963) を用いて階層的クラスタリング分析を行う。そのためまず、 $\mathcal{D}_{\text{symm}}^E$  と  $\mathcal{D}_{\text{symm}}^{\text{HW}}$  をそれぞれの中央値で除し正規化する。2 種類の対称化した一般化 KL 情報量を足しあわせた距離  $\mathcal{D}$  は次のように与えられる。

$$\mathcal{D} = \frac{\mathcal{D}_{\text{symm}}^E}{\text{Median}(\mathcal{D}_{\text{symm}}^E)} + \frac{\mathcal{D}_{\text{symm}}^{\text{HW}}}{\text{Median}(\mathcal{D}_{\text{symm}}^{\text{HW}})} \quad (4.36)$$

ここで、Median はその行列の中央値を表す。階層的クラスタリングでは母集団ごとに、16 クラスタに分類した。16 クラスタの意味は、電力需要量はあまり変動しない一方で、給湯需要量の変動が激しく距離への影響が大きいと仮定し、給湯需要量の 4 つの

ピークの有無の組み合わせで $2^4 = 16$ クラスタとした。

## 4・6 数値実験結果

### 4・6・1 年間・日間省エネルギー率

PEFC-CGS の導入効果の指標として、次式で示す通り CS との一次エネルギー消費量の比を採用する。

$$\varphi = \frac{J_{CS} - J_{FC}}{J_{CS}} \quad (4.37)$$

次図(a)は家庭毎の年間の省エネルギー率、(b)は1日の省エネルギー率、(c)は1日の省エネルギー率、給湯需要量およびPEFC 寄与率の関係、(d)は1日の省エネルギー率の頻度分布を示す。ここで、PEFC 寄与率とは次式に示す通り、給湯用途への供給熱量に対する PEFC からの供給熱量の比である。

$$\gamma = \sum_{t=1}^T \frac{q^{FC}(t)}{q^{FC}(t) + q^B(t) + q^H(t)} \quad (4.38)$$

第4章 エネルギー需要特徴の分類と省エネルギー性評価

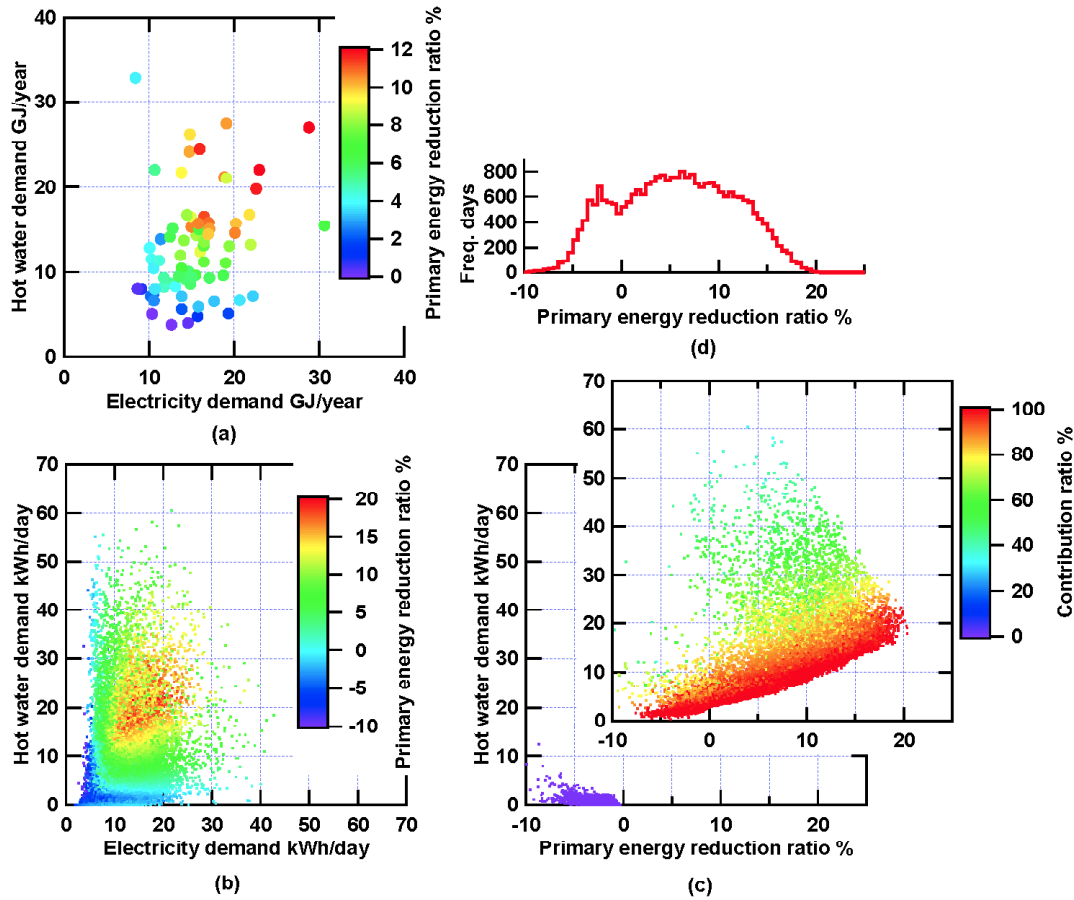


Fig. 4.6 Distribution of primary energy reduction ratio in optimal operation, (a) annual, (b) daily, (c) DHW demand vs daily primary reduction ratio with contribution ratio, (d) frequency of primary energy reduction ratio

図 4.6(a)に示す通り，省エネルギー率は $-0.33 \sim 12.08\%$ であり，エネルギー需要量が大きくなるほど省エネルギー率も向上する傾向が確認される．図 4.6 (b)に示す通り，26307 日の省エネルギー率の平均値は  $5.64\%$ ，その幅は $-11.71 \sim 20.34\%$ であり，省エネルギー率  $15\%$ 以上の点は，電力需要量  $15 \text{ kWh/day}$ ，給湯需要量  $20 \text{ kWh/day}$  近辺に分布している．一方で，省エネルギー率が負の値は，給湯需要量  $5 \text{ kWh/day}$  以下にほとんどが分布している．PEFC-CGS の一日の発電および排熱回収量は，最大効率となる定格出力を連続運転し続けた場合に，それぞれ  $0.7 \text{ kW} \times 24 \text{ hour} = 16.8 \text{ kWh/day}$  および  $1.0 \text{ kW} \times 24 \text{ hour} = 24 \text{ kWh/day}$  であるため，この近傍の需要量を持つ日は省エネルギー率が良い結果となった．図 4.6(b)は点数が 26307 点と膨大であるため，統

計的観察よりエネルギー需要量の熱電比からの示唆を得ることが出来る。則ち、PEFC 出力の熱電比である $1.0/0.7 \cong 1.43$ を中心において赤色の省エネルギー性の高い点群が存在し、1.43 から熱電比が乖離するにつれて水色の省エネルギー率 0%まで降下することが観察された。以上より、CGS の持つ最大の潜在能力である 20.34%の省エネルギー率を達成するには、少なくとも1日のエネルギー需要量の総量およびその熱電比に関して、非常に狭い範囲の制約を満たす必要があると言える。

図 4.6 (c)に示す通り、給湯需要量 20 kWh/day, PEFC 寄与率 100%近傍において省エネルギー率が最大であり、5 kWh/day 以下, PEFC 寄与率 0%の点においては省エネルギー率が負の値である。一方で、給湯需要量が増大すると、PEFC 寄与率が赤、黄、緑色と低下しており、これは、比較対象よりも効率の劣る補助ボイラを使用すること起因している。

図 4.6 (d)に示す通り、PEFC-CGS の省エネルギー性の分布におけるピークは-3%および7%にあり、システム側の最適運用方策のみでは十分な省エネルギーを達成できるとは言い難いと結論付けられる。

#### 4・6・2 家庭間のエネルギー需要特性の比較分析

家庭間のエネルギー需要特性を比較する観点で、次図・次表に示す通り、年間エネルギー需要量の近いある2家庭を検討対象に取り上げる。表 4.3 に示す通り、対象とした2家庭とも年間電力および給湯需要量は、それぞれ 19 および 21 GJ/year である一方、家庭 A および B の省エネルギー率は、それぞれ年間値において 10 および 8%、日間値の分布は-4.5~16.0 および-4.4~19.6%である。この2家庭の比較において、日間省エネルギー率は家庭 B が最大値 19.6%を示すものの、年間値においては家庭 A の方が B よりも高い値を示す。図 4.5 に示す通り、日間給湯需要量の分布は家庭 B の

#### 第4章 エネルギー需要特徴の分類と省エネルギー性評価

方がAよりも広く、特に省エネルギー率が負の値となる給湯需要量2 kWh/dayにその最頻値が存在する。

また、電力および給湯需要量がそれぞれ10~20 および15~25 kWh/dayである範囲に注目すると、図4.5(b)は(a)よりも高い省エネルギー率を示す赤色の点が多い。これは、日間需要量に加えて時系列が省エネルギー率に影響を与える要因であることを示唆している。

#### 4・6・3 エネルギー需要時系列の分類

前項において、PEFC-CGSの省エネルギー率は、日間の熱電比および電力・給湯需要量に影響されることを示した。図4.2(b)および表に示す通り、エネルギー需要量を日間熱電日および需要総量の観点で6つに分ける。グループAは、前述の通りPEFC-CGSが稼働せず省エネルギー率が負の値となる日をまとめるために分類している。

Table 4.3 Characteristics of two houses

	(a) House A	(b) House B
Annual electricity demand GJ/year	18.83	19.06
Annual DHW demand GJ/year	21.20	21.06
Residential type	Detached house	Apartment
Age of householder	40's	50's
Number of occupants	4	4
Annual primary energy reduction ratio %	10.32	7.73
Range of daily primary energy reduction ratio %	-4.50~16.03	-4.35~19.60

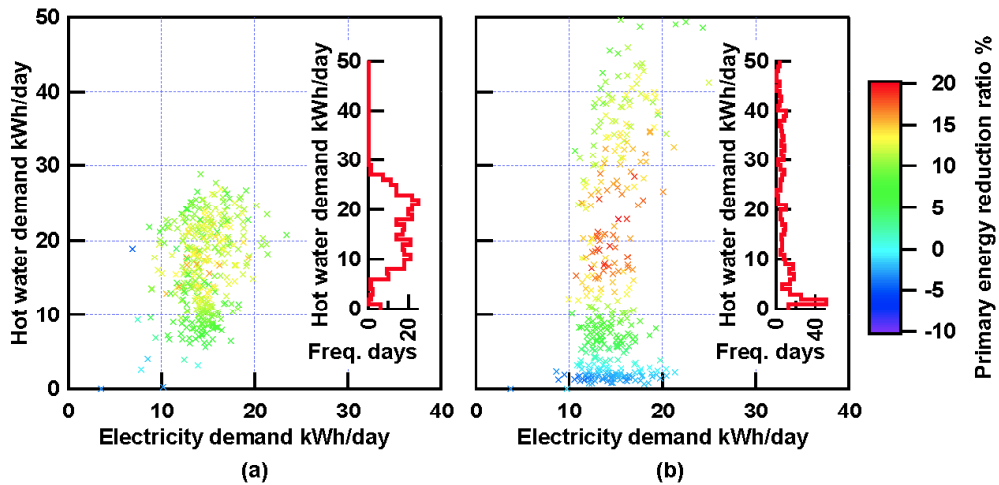


Fig. 4.7 Daily primary energy reduction ratio, (a) House A, (b) House B

Table 4.4 Demand groups

Group name	Number of elements, days	DHW demand $Q$ , kWh/day	Heat-to-power ratio $R$
A	9807	$Q < 6.0$	---
B	971	$6.0 \leq Q$	$R < 0.5$
C	6958	$6.0 \leq Q$	$0.5 \leq R < 1.0$
D	4920	$6.0 \leq Q$	$1.0 \leq R < 1.5$
E	1926	$6.0 \leq Q$	$1.5 \leq R < 2.0$
F	1725	$6.0 \leq Q$	$2.0 \leq R < \infty$

ここで、熱電比の影響を分離するためにグループ B~F の 5 つに分けたそれぞれに対して、提案手法による分類を実施する。図 4.6~4.10 にその結果を示し、(a)は各クラスタ内の省エネルギー率の分布、(b)はクラスタ内で平均化された離散時刻毎の電力・給湯需要量、(c)はクラスタ毎の階層構造を示すデンドログラムである。各図(b)の点線は平均値±標準偏差、(c)の距離は各クラスタおよび時系列がどの程度異なっているのかを表す。グループ間を比較すると、クラスタ B および F においては省エネルギー率 10%を超える点が僅かである一方、クラスタ D および E においては大半が 10%を超えており、需要の熱電比が省エネルギー率に影響を与えていることが再確認された。クラスタ間を比較すると、省エネルギー率の分布および朝・夕方のピークの有無がクラスタ毎に異なっており、提案手法により需要時系列が分類され、需要量および時系列により省エネルギー率が影響されていることがわかる。また、PEFC-CGS

#### 第4章 エネルギー需要特徴の分類と省エネルギー性評価

の省エネルギー性は、需要の1日の総量、熱電比および時系列パターンに影響されるものの、前者の2つが支配的要因であることが示された。

図4.11は、前項で対象とした2家庭の時系列が分類されたグループおよびクラスタを示し、縦軸は”グループ名ークラスタ番号”を表す。図4.11(a)においては、グループCのクラスタ5を意味する”C-5”が最頻値となり、青色の棒グラフで示される夏期需要量のほとんどがグループCに属している。一方、家庭Bにおいて、黄および緑色で示される春期のほとんどがグループAに属している。

家庭Bにおいて、省エネルギー率が最大の19.6%を示した日は”D-11”，次点の18.8%を示した日は”D-1”，次々点は”D-5”に属している。図4.8(a)に示す通り、”D-11”，”D-1”および”D-5”は省エネルギー率が高いところに分布しており、これらの需要時系列はPEFC-CGSの特性に合致しているといえる。需要の発生時刻という観点で図4.8に示すグループDの全てのクラスタを比較すると、”D-3”，”D-9”および”D-10”における省エネルギー率は負の値から15%以上まで幅広く分布しており、また、これらは朝方の給湯需要は僅かである。同様に、図4.9に示すグループEの”E-8”，”E-9”および”E-10”の省エネルギー率の分布も広く、また、朝方の給湯需要も僅かである。

以上より、対象家庭の需要特性に対しては、PEFC-CGSの出力可能である熱電比に近い需要量を持ち、かつ、夕方だけでなく朝方にも給湯需要があることが安定して省エネルギー率を高める需要特性であると言える。



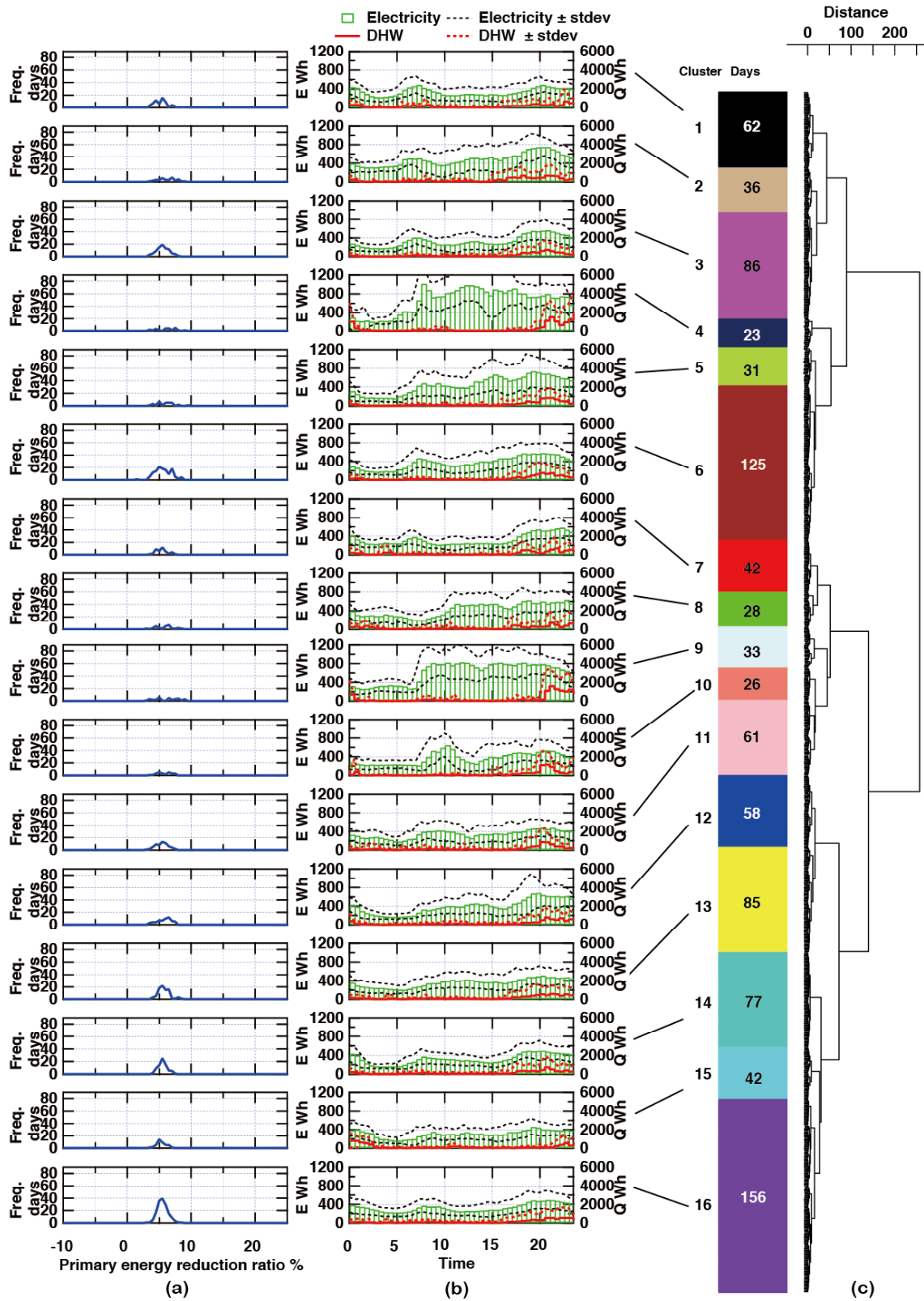


Fig. 4.8 Clusters in Group B, (a) primary energy reduction ratio, (b) averaged demand patterns, (c) dendrogram

第4章 エネルギー需要特徴の分類と省エネルギー性評価

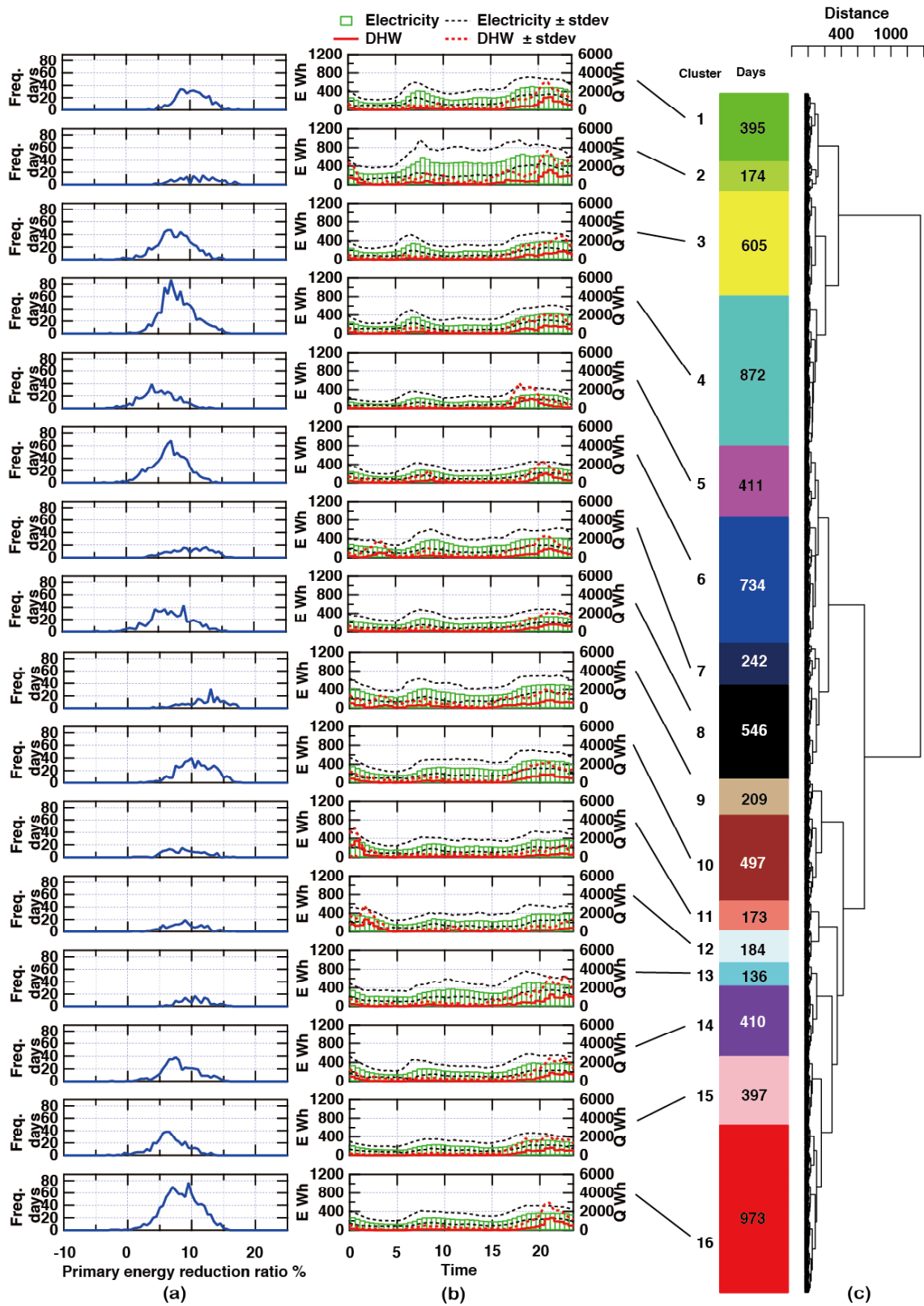


Fig. 4.9 Clusters in Group C, (a) primary energy reduction ratio, (b) averaged demand patterns, (c) dendrogram

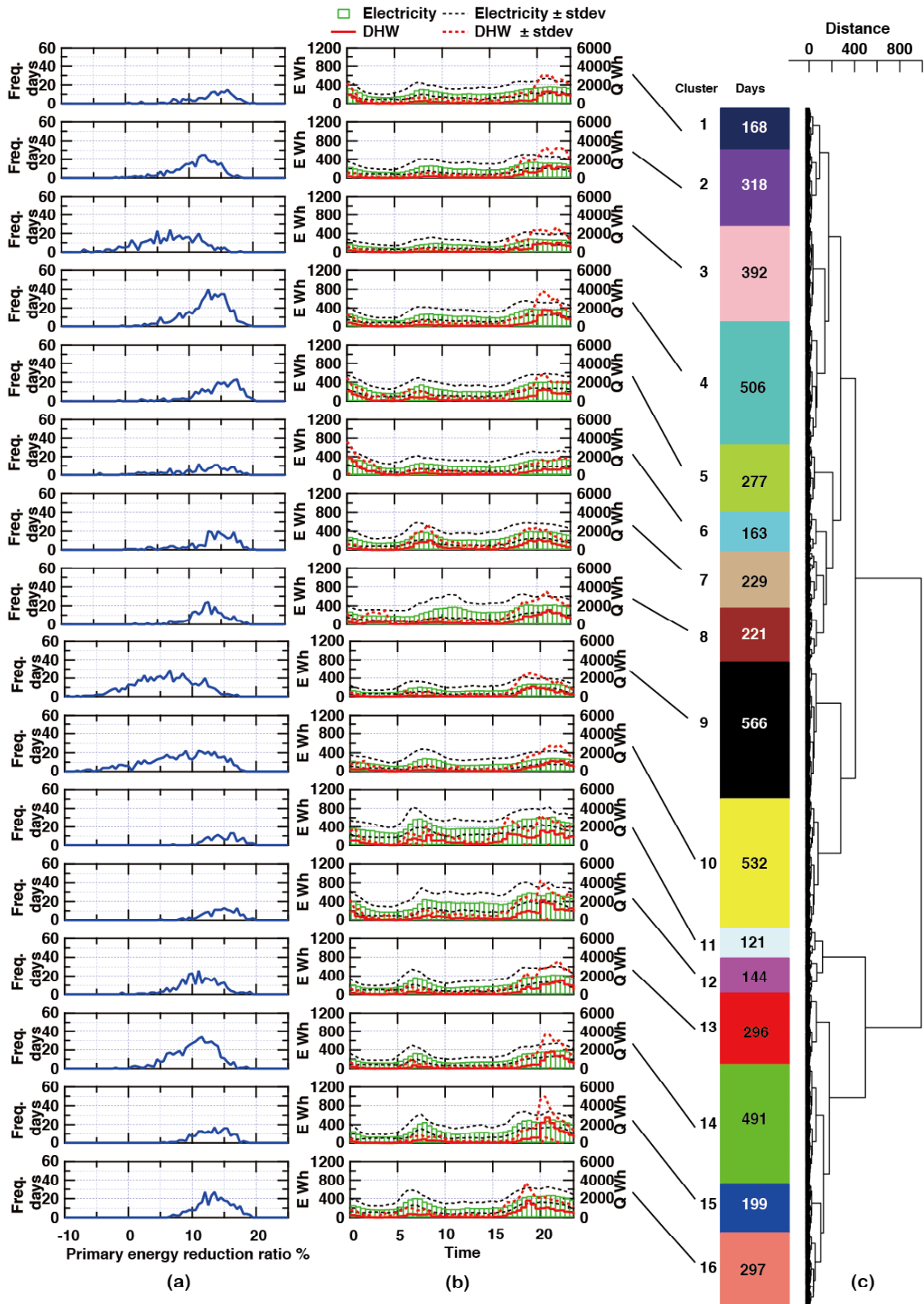


Fig. 4.10 Clusters in Group D, (a) primary energy reduction ratio, (b) averaged demand patterns, (c) dendrogram

第4章 エネルギー需要特徴の分類と省エネルギー性評価

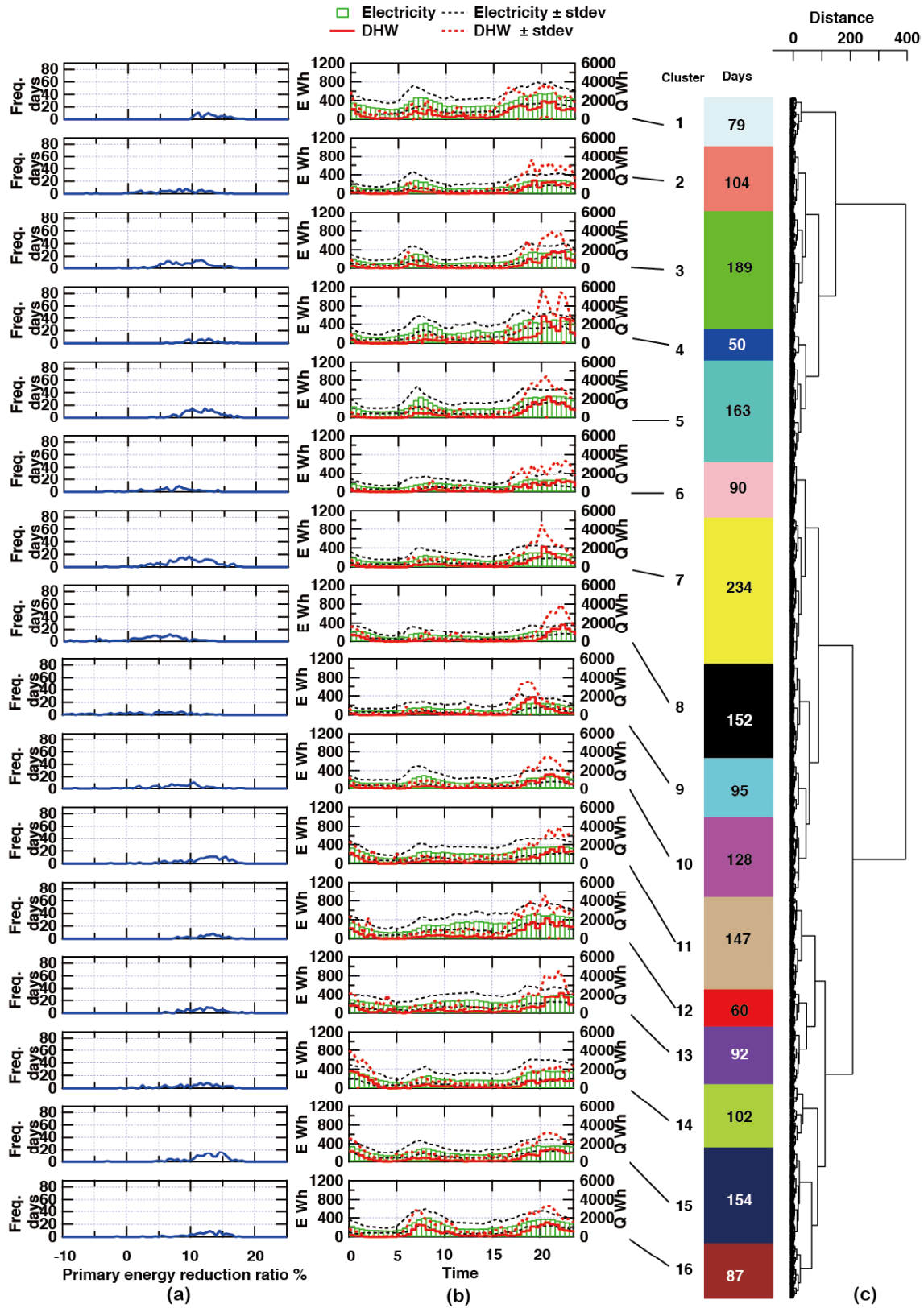


Fig. 4.11 Clusters in Group E, (a) primary energy reduction ratio, (b) averaged demand patterns, (c) dendrogram



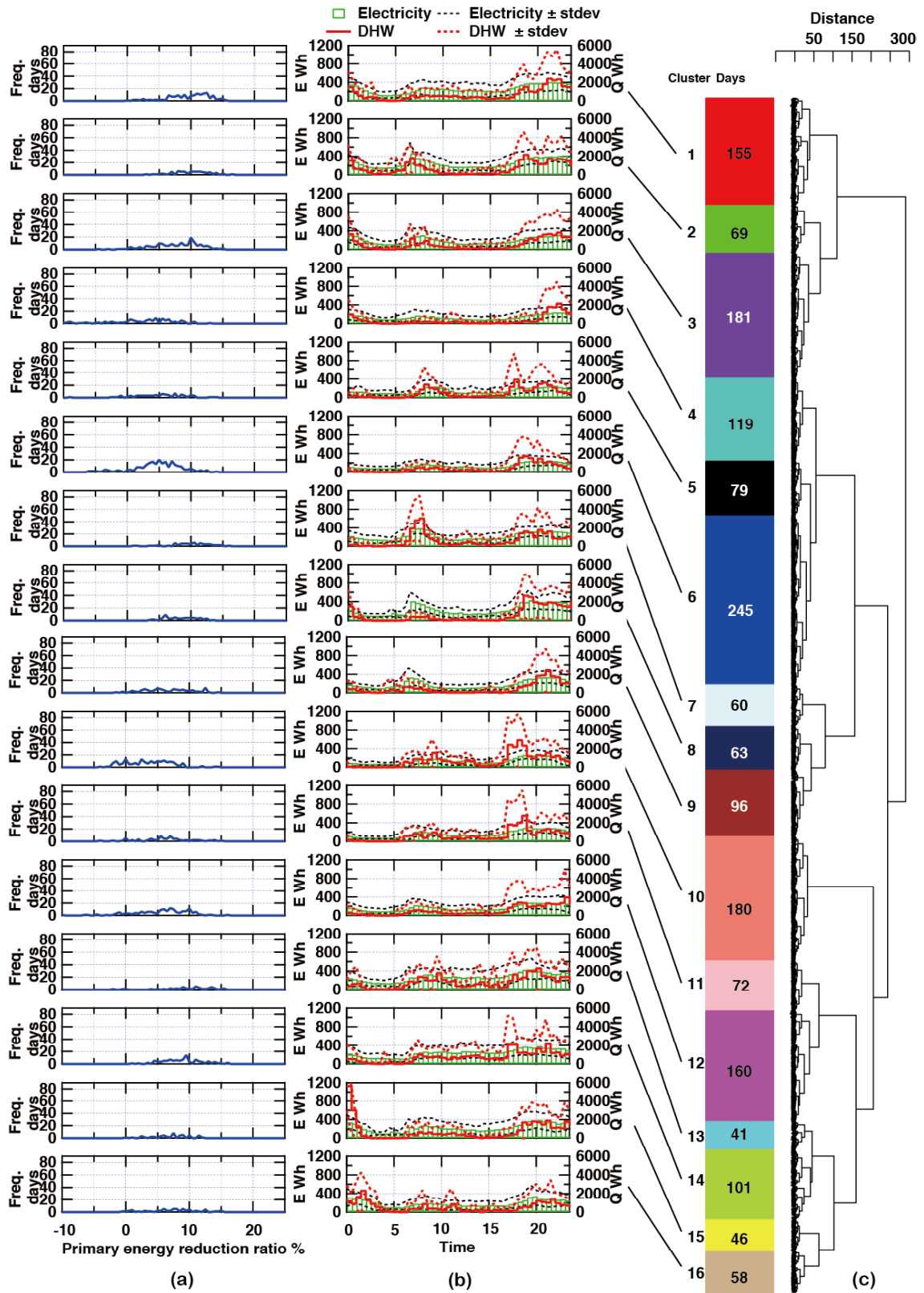


Fig. 4.12 Clusters in Group F, (a) primary energy reduction ratio, (b) averaged demand patterns, (c) dendrogram



## 4・7 本章のまとめ

本章では、一般化 KL 情報量を用いて 1 日単位の需要時系列同士の距離を定義する手法を提案した。数値検討として、72 世帯に亘る実測のエネルギー需要量を対象に、1 日単位の時系列パターン同士の距離をそれぞれ算出し、ある日とある日の時系列パターン同士がどの程度異なるかという基準で定義された距離行列を作成してそのデータベース化を実施した。この距離行列データベースに基づき階層的クラスタリングを実施することで提案した需要分析手法の具体的な応用例を示し、その結果、PEFC-CGS の省エネルギー性は、需要の 1 日の総量、熱電比および時系列パターンに影響されるものの、前者の 2 つが支配的要因であることを明らかにした。本章では、以下の主要な結果が導出された。

- (1) 72 世帯 26 307 日に亘るエネルギー需要時系列を提案手法により 16 クラスに分類し、省エネルギー率との関係を示した。
- (2) PEFC-CGS の省エネルギー率は、エネルギー需要の一日単位の熱電比、一日の需要の総量、時系列の 3 つの要因に影響されることが判明した。
- (3) 対象家庭において PEFC-CGS の導入により、年間において最大で 12% の省エネルギー率を達成する。
- (4) 夕方だけでなく朝方にも給湯需要が発生することは安定して省エネルギー率を高める。
- (5) 分類されたエネルギー需要量を俯瞰して観察したところ、需要特性は家庭毎に異なっており、給湯需要量が季節に依り変化する家庭とそうでない家庭が確認された。





## 第5章 確率計画法を用いた家庭用 PEFC システムの運用方策の検討

### 5・1 概要

本章では、不確実性下におけるエネルギーシステムの運用計画問題を構築し、その枠組みの有用性を検討する。対象とするシステムは、PEFC-CGS, PV および BT を含み、エネルギー需要量・PV 発電量の予測シナリオを考慮した運用計画問題を、確率計画法 (SP) を用いて定式化する。エネルギー需要量・PV 発電量は全くの偶発的なものではなく、人間の行動および天候に基づいており、確率的であると仮定し定量化する。

予測精度と省エネルギー性の関係は非常に興味深い論題であるが、予測精度について論じることは本論文の範囲を超える。ここでは、SP を適用し導出された運用方策に焦点を当てる。また、PEFC の定格熱出力は約 1 kW であり給湯需要のピークを賄いきれないため、HWT および GB を使用している。したがって、サンプリング時間間隔が長すぎると現実以上の省エネルギー性が導出されてしまう可能性が存在する (Hawkes, 2005)。そこでまず、数値実験においては、サンプリング時間間隔を変化させた際に、運用方策へ与える影響を考察する。さらに、予測需要の不確実性を、複数のシナリオすなわち予測需要の時系列データとして捉え、シナリオ本数と確率計画問題により導出される機器運用の傾向を、2つの方法論を通じて明らかにすることで適切な問題設定条件を明らかにする。

### 5・2 不確実性下における最適運用計画問題

本節は、不確実性下におけるエネルギーシステムの運用方策の決定方法について述べる。対象とするエネルギーシステムは図 5.1 に示す通り、AC, PV, BT および PEFC-CGS を要素に持ち、系統電力・都市ガスを入力とし冷暖房・電力・給湯需要を供給する。最適運用計画問題は、SP を用いて目的関数である 1 日の一次エネルギー消費量を最小化する運用方策を導出し、制約条件はエネルギー収支および機器特性から構成される。

第 5 章 確率計画法を用いた家庭用 PEFC システムの運用方策の検討

系統・PV および PEFC 電力は BT に蓄電可能とし、BT は充・放電が同じサンプリング周期に同時に行わない。系統への逆潮は PV・BT および PEFC から可能である。しかし、逆潮電力量はシステムの一次エネルギー消費量に寄与しないものとしたため、最適運用方策においてほぼ発生しなかった。

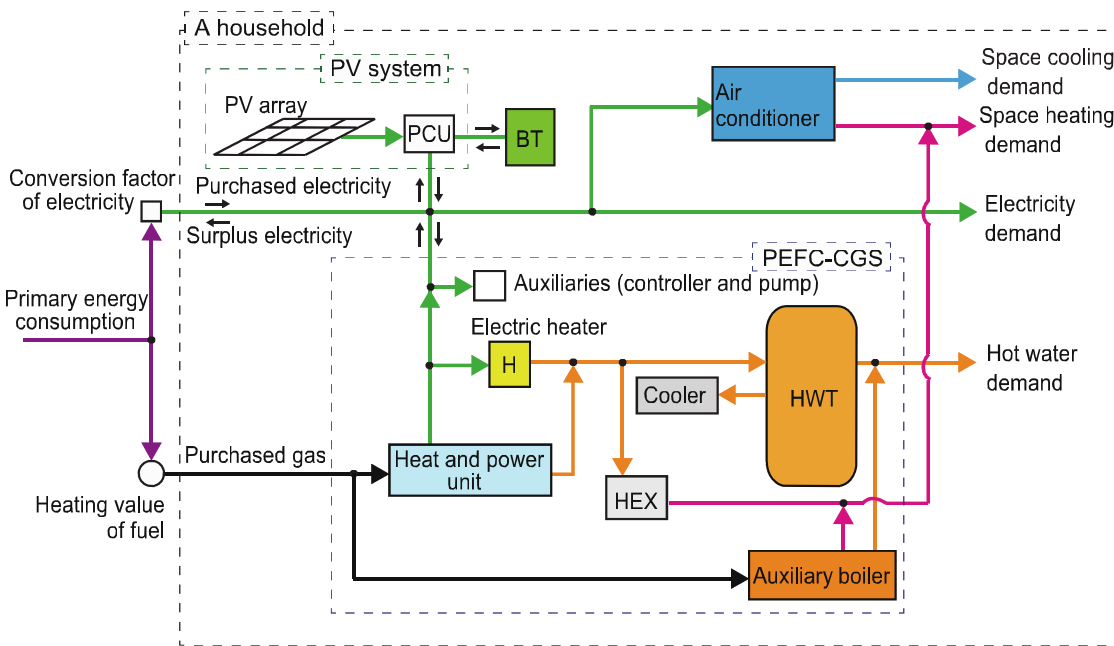


Fig. 5.1 Schematic diagram of energy system

図 5.2 に本章の枠組みを示す。将来のエネルギー需要および PV 発電電力量を表す確率変数を含む最適化問題は、そのままの形式では解けない。確率計画法の枠組みにおいて、この最適化問題を 2 種類の直接計算が可能な等価確定問題へ変換を行う。1 つ目の等価な問題は、” wait-and-see ” 問題 (WS) として知られ、将来事象の完全情報に基づき意思決定を行う。換言すれば、WS は需要・PV 発電シナリオをそれぞれ 1 つずつ入力とし、その最適解においてはシステムは潜在的な能力を最高度に発揮するものである。もう 1 つの等価な問題は、” here-and-now ” 問題として知られており、確率変数が実現する前に意思決定を行う。これは償還請求を有する問題であり、シナリオベースの確率計画法として、複数のシナリオを係数として外生的に入力し、MILP

により定式化される（久保他，2002；Nemhauser et. al., 2004；John and Francois, 2011）．ここで，償還請求は運用方策と確率変数の実現値の乖離を補償するものであり，本問題構成において，その償還請求費用は系統電力および都市ガスの一次エネルギー消費量が該当する．入力するシナリオは確率空間を離散化したものである．本質的に，将来のエネルギー需要量・PV 発電量の完全情報を得ることは出来ないため，1つのシナリオに基づく運用方策の決定は，確率変数がどのような値として実現しても安定して省エネルギーを達成するというロバスト性に劣る．そこで，シナリオベースの SP をエネルギーシステムの運用計画問題へ適用することで，複数のシナリオに基づき合理的に運用方策を決定する理論的枠組みを構築する．

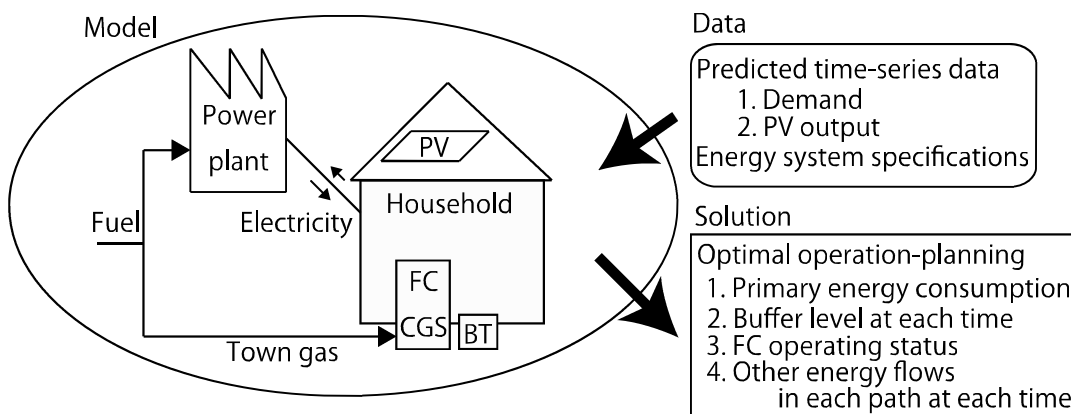


Fig. 5.2 Operational planning framework of residential energy system

### 5・2・1 決定論的最適運用計画手法

まず，簡単のために全ての決定変数が連続である線形計画法を考え，不等式標準形を次に示す．

$$\text{minimize } J = \mathbf{c}^T \mathbf{x} \quad (5.1)$$

$$\text{subject to } \mathbf{Ax} \geq \mathbf{b} \quad (5.2)$$

ここで，疎行列  $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ ，右辺ベクトル  $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^m$ ，目的値ベクトル  $\mathbf{c} \in \mathbb{R}^n$ ，および

## 第5章 確率計画法を用いた家庭用 PEFC システムの運用方策の検討

決定変数ベクトル  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$  である。エネルギーシステムの運用計画問題において、具体的・実際的には、行列  $\mathbf{A}$  およびベクトル  $\mathbf{b}$  は、各サンプリング時刻における、システム特性を表す係数およびエネルギー需要量・PV 発電量、ベクトル  $\mathbf{c}$  は一次エネルギー換算係数から構成される。決定変数ベクトル  $\mathbf{x}$  は、各サンプリング時刻における非負のエネルギー流量、蓄エネルギー量および2値の機器状態から構成される。

前述の通り、確率計画法は係数を確率変数と見做す。確率変数  $\mathbf{A}, \mathbf{b}$  および  $\mathbf{c}$  の実現値は  $\xi(\omega)$  or  $\xi_\omega = (\mathbf{A}, \mathbf{b}, \mathbf{c})_\omega$  と表される。根本事象  $\omega = \{\omega_1, \dots, \omega_S\}$  はシナリオの番号、 $S$  はシナリオ総数、標本空間  $\Omega$  は有限集合である。WS の定式化は次の通りである。

$$\text{minimize } J(\omega) = \mathbf{c}^\top(\omega)\mathbf{x} \quad (5.3)$$

$$\text{subject to } \mathbf{A}(\omega)\mathbf{x} \geq \mathbf{b}(\omega) \quad (5.4)$$

WS の目的関数を具体的に次に示す。

$$\text{minimize } J_{WS} = E[J(\omega)] = \sum_{\omega \in \Omega} J(\omega)p(\omega) \quad (5.5)$$

ここで、 $p$  は根本事象の発生確率である。次式において、式 (5.5) をより具体的に変数を追記し示す。

$$J_{WS} = \sum_{\omega=1}^S \left\{ \min \sum_{t=1}^T \left( C^{e,\text{day}} e_{t,\omega}^{\text{buy,day}} + C^{e,\text{night}} e_{t,\omega}^{\text{buy,night}} + C^g g_{t,\omega}^{\text{buy}} \right) \right\} p_\omega \quad (5.6)$$

ここで、 $t = 1, \dots, T$  は時刻、 $T$  はサンプリング数、 $e^{\text{buy,day}}$  および  $e^{\text{buy,night}}$  はそれぞれ昼間および夜間における系統からの購入電力量、 $g^{\text{buy}}$  は都市ガス購入量、 $C^g$  は都市ガスの一次エネルギー換算係数としての高位発熱量、 $C^{e,\text{day}}$  および  $C^{e,\text{night}}$  はそれぞれ昼間および夜間の一次エネルギー換算係数である。なお、本章において時刻およびシナリ

## 5・2 不確実性下における最適運用計画問題

オに関する指標は下付きにて示す．前述の通り，逆潮電力はシステムの一次エネルギー消費量に寄与しないものとする．

上式からも明らかなように，WS はそれぞれのシナリオにおいて一次エネルギー消費量  $J(\omega)$  を導出した後に，一次エネルギー消費量の期待値  $J_{WS}$  を求める．したがって，WS は全てのシナリオの最適値を求めるために最適値の分布を表しているといえる．

### 5・2・2 確率論的最適運用計画手法

“Single-stage” のシナリオツリーを持つ” here-and-now” 問題 (SS) を次に示す．

$$\text{minimize } J_{SS} = E[\mathbf{c}^T(\omega)\mathbf{x}] \quad (5.7)$$

$$\text{Subject to } \mathbf{A}(\omega)\mathbf{x} \geq \mathbf{b}(\omega) \quad (5.8)$$

慣用的に，SP の枠組みにおいて” stage” とは 2 つの異なる意味を持ち，それはシナリオツリー構造および意思決定の段階である．ここでは，前者のシナリオツリー構造の意味に用い，” Single-stage” のシナリオツリーとはシナリオが分岐しないことを表す．次に，SS の目的関数を具体的に示す．

$$J_{SS} = \min \sum_{\omega=1}^S \left\{ \sum_{t=1}^T \left( C^{e,\text{day}} e_{t,\omega}^{\text{buy,day}} + C^{e,\text{night}} e_{t,\omega}^{\text{buy,night}} + C^g g_{t,\omega}^{\text{buy}} \right) \right\} p_{\omega} \quad (5.9)$$

また，異なるシナリオ間で同時刻に同一の運用方策を決定するために，対象とするエネルギーシステムの 3 要素に対して次の通り制約を加える．

$$z_{t,\omega_1}^{\text{FC}} = z_{t,\omega_2}^{\text{FC}} = \dots = z_{t,\omega_S}^{\text{FC}} \quad (5.10)$$

$$q_{t,\omega_1}^{\text{HWT}} = q_{t,\omega_2}^{\text{HWT}} = \dots = q_{t,\omega_S}^{\text{HWT}} \quad (5.11)$$

$$e_{t,\omega_1}^{\text{BT}} = e_{t,\omega_2}^{\text{BT}} = \dots = e_{t,\omega_S}^{\text{BT}} \quad (5.12)$$

## 第5章 確率計画法を用いた家庭用 PEFC システムの運用方策の検討

ここで、 $z^{FC}$ はPEFCの発電可能状態を示す2値の決定変数，ならびに $q^{HWT}$ および $e^{BT}$ はそれぞれHWTおよびBTの蓄エネルギー量を示す連続の決定変数である．換言すれば，式(5.10)～(5.12)の制約式によって，全てのシナリオにおいて共通するPEFCの発電時間，HWTおよびBTの蓄エネルギー量という3つを決定する問題である．

### 5・3 結果および考察

#### 5・3・1 数値実験条件

##### (a) システム係数

表 5.1 にはエネルギーシステムの諸特性値を示し（東芝，2011；パナソニック，2009；パナソニック，2011），実売されている機器を想定して定格PV発電電力は3.49 kW，蓄電容量は4.65 kWhである．なおPEFCの発電・排熱回収効率は3章と同様である．

Table 5.1 System specifications

Specification	Value
Annual performance factor of air-conditioner	6.34
Auxiliary boiler efficiency for hot water demand %	92.0
Auxiliary boiler efficiency for space heating demand %	82.0
BT charging/discharging efficiency %	92.0
BT rated capacity Wh	4650.0
Electric heater efficiency %	95.0
Electricity consumption of start-up in first term Wh/15min	200.0
Electricity consumption of start-up in second term Wh/15min	130.0
Electricity consumption of start-up in third term Wh/15min	120.0
Electricity consumption of start-up in last term Wh/15min	50.0
Gas consumption of start-up in first term Nm <sup>3</sup> /15min	0.006
Gas consumption of start-up in second term Nm <sup>3</sup> /15min	0.010
Gas consumption of start-up in third term Nm <sup>3</sup> /15min	0.010
Gas consumption of start-up in last term Nm <sup>3</sup> /15min	0.014
Heat dissipation rate of HWT %/h	1.7
Higher heating value of fuel MJ/Nm <sup>3</sup>	45.0
Hot water exchanger efficiency %	86.0
Hot water outlet temperature from the heat and power unit °C	60.0
Hot water tank capacity L	200.0
Inverter efficiency %	95.0
Lower heating value of fuel MJ/Nm <sup>3</sup>	40.6
Maximum charging rate of BT W	1425.6
Maximum discharging rate of BT W	2246.4
Minimum ratio of hot water tank %	10.0
Minimum ratio of BT %	10.0
Photovoltaic array maximum power kW	3.49
Primary energy conversion factor of electricity at daytime MJ/kWh	9.97
Primary energy conversion factor of electricity at nighttime MJ/kWh	9.28
Self discharge rate of BT %/h	0.02

### (b) エネルギー需要および PV データ

図 5.3 に本章で対象とする関西地区におけるある家庭のエネルギー需要量を示す (日本建築学会, 2006) . その年間に亘る給湯・冷暖房および電力需要量は, それぞれ 3519, 1173 および 3187 kWh/year である. 本データが計測された 2004 年における

第5章 確率計画法を用いた家庭用 PEFC システムの運用方策の検討

日本の1家庭当たりのエネルギー消費量に関して、給湯・冷暖房および電力用途はそれぞれ 3726, 3534 および 4232 kWh/year であり (日本エネルギー経済研究所, 2012), 対象とするエネルギー需要量は概ね妥当であると言える。

PV 発電電力に関しては, NEDO データベース (NEDO, 2004) の日射量に対して JIS C 8907 (日本規格協会, 2011) に基づき注意深く変換を行ったものを使用する。図 5.4 に示すのは, 2004/1/31~2 の30日間に亘るエネルギー需要量およびPV発電量である。

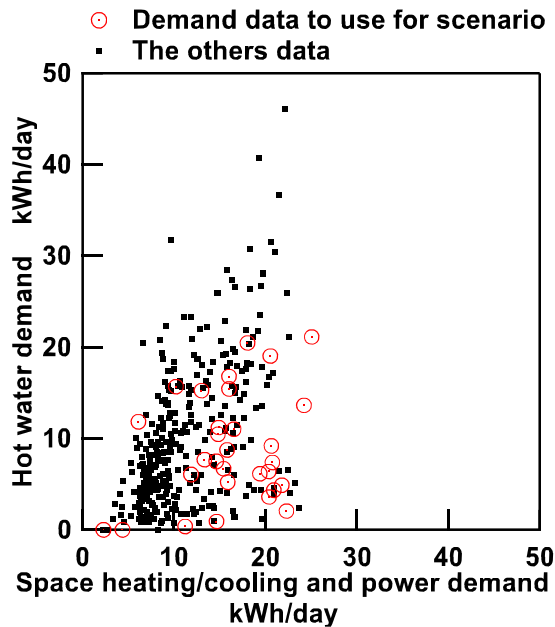


Fig. 5.3 Daily demand data at one year

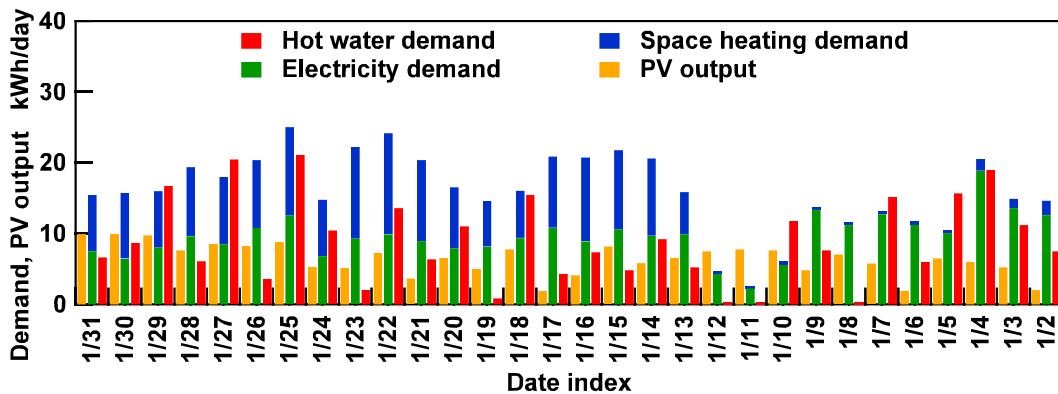


Fig. 5.4 Daily demand and PV data with date index



本章冒頭で述べた通り，サンプリング時間間隔が運用方策に与える影響を考察する目的で，15, 30, 60 分間隔をそれぞれ  $T=96, 48$  および  $24$  と設定し，それぞれ 15-min, 30-min および 60-min と記す．手元にあるエネルギー需要量が 15 分積算値であるため，これ以上細かい間隔での検討は実施しないものとする．

また，入力するシナリオ数に対して運用方策および計算時間を検討するため，入力するシナリオ数を 1~30 まで変化させる．図 5.4 に示した通り，2004/2/1 の予測シナリオとしてその前 30 日分を使用する．シナリオ 1 である  $\omega_1$  は 2004/1/31，シナリオ 30 である  $\omega_{30}$  は 2004/1/2 とし，シナリオ番号は日付の逆順である．シナリオの実現確率の影響を排除する目的で，それぞれのシナリオの発生確率は等価とする．例を挙げると， $S = 30$  においてそれぞれシナリオの発生確率は  $1/30$ ，また， $S=10$  においてそれぞれのシナリオの発生確率は  $1/10$  である．

以上より，3 通りのサンプリング時間間隔および 30 通りの入力シナリオ本数を数値実験における係数とした．

なお，本問題は合計 32 コアの 4 Intel Xeon 2.27 GHz プロセッサ，256GB メモリの計算機上において代数モデリング言語 AMPL を用いて実装し，CPLEX により解く．

### 5・3・2 ならし効果および一次エネルギー消費量

表 5.2 は  $S=30$  のときの計算結果であり，決定変数および制約数は問題の規模，CPU 時間はマルチコアにて使用された合計の時間を示す．シナリオ毎に解を導出する WS の問題規模は，シナリオを一括して解を導出する SS より小さく，同様に，15-min においては一次エネルギー消費量も WS の方が SS よりも小さい．

Table 5.2 Numerical result for 30 scenarios (S=30)

	WS model (15-min)	SS model (15-min)	SS model (30-min)	SS model (60-min)
Primary energy consumption MJ/day	88.07	109.03	109.76	111.12
Number of variables	5952× 30	178560	86400	42480
Number of constraints	5857× 30	192414	93342	45270
CPU time sec	3915	28666	505	2317

SP の枠組みにおいて定義される 1 種の統計量である完全情報の期待値 (Expected Value of Perfect Information) を次に示す。

$$EVPI = J_{SS} - J_{WS} = 109.03 - 88.07 = 20.96 \quad (5.13)$$

この EVPI の値は SS および WS の最適値の差分であり、これは、翌日の完全情報を得るのに支払って損にならない最大の経費を意味する。一例としては調査費が挙げられ、20.96 MJ/day の EVPI とは、一例として金額に概算すると  $20.96/9.97 \times 30 \approx 63$  yen/day である (関西電力, 2012; 日本冷凍空調学会, 2010)。

図 5.5 はそれぞれのサンプリング時間間隔における全てのシナリオに亘る一次エネルギー消費量の分布を示す。一次エネルギー消費量の観点で、長い時間分解能によるならし効果は、WS へほとんど影響を持たないことがわかる。一方で、図 5.6 は PEFC の発電時間を示し、 $\omega_7$  則ち 2004/1/25 および  $\omega_{26}$  則ち 2004/1/6 に関しては、60-min は 15-min に比べ 10 時間以上発電時間が長くなる結果となった。

図 5.7 は WS における主たるエネルギー流量を示す。系統からの購入電力量および系統への逆潮電力量はともに僅かである。前述の通り 15-min は 60-min と比較して

PEFC 発電時間が短い傾向があるため、PEFC からの供給電力・熱量は 15-min の方が 60-min より減少した。その減少した PEFC からの熱量を補うために、GB のガス消費量は 60-min の方が 15-min を比較して増加した。

以上より、一次エネルギー消費量を定量的評価する目的においては、時間分解能を 1 時間迄は長くすることが可能であり、一方、運用方策を検討する目的において、時間分解能はこれより短い方が良いと結論付けられた。

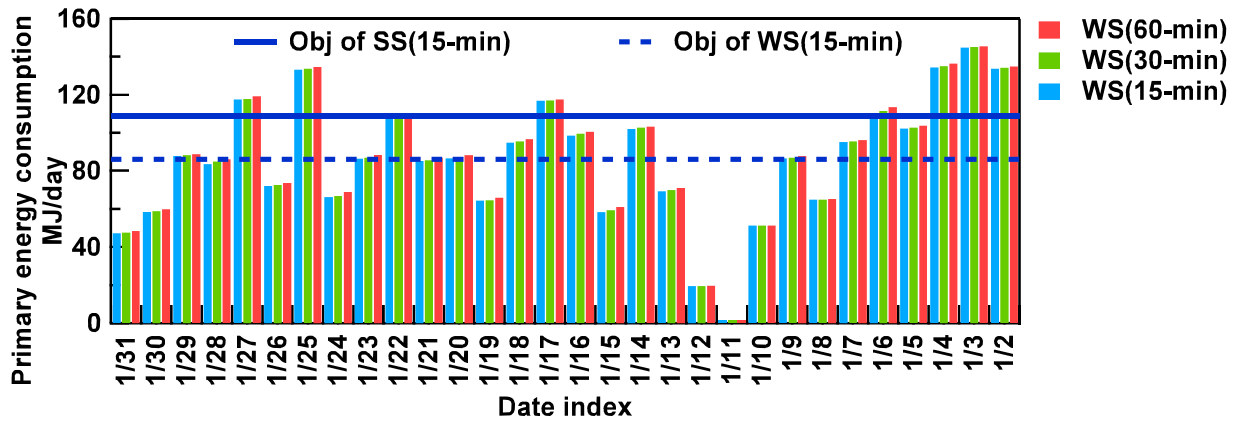


Fig. 5.5 Primary energy consumption for each scenario

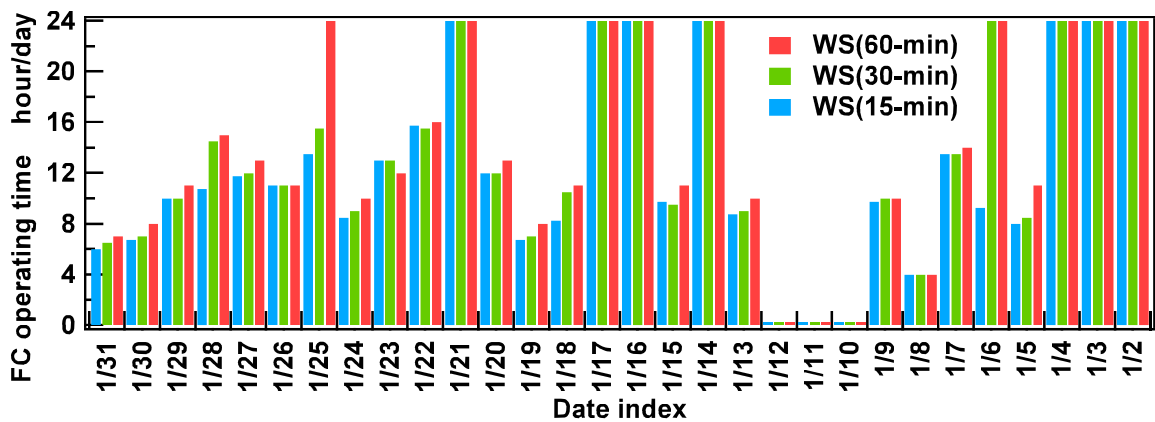


Fig. 5.6 PEFC-CGS operating time of WS model

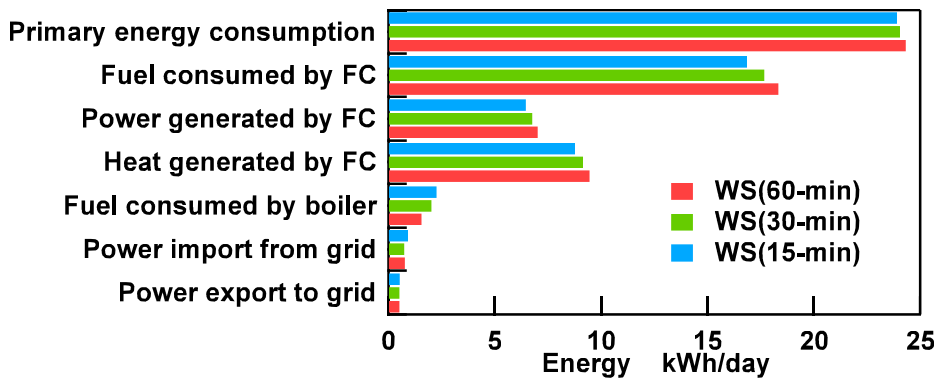


Fig. 5.7 Expected value of result for 30 scenarios

### 5・3・3 入力シナリオ数の影響

図 5.8～10 はそれぞれ入力シナリオ数 $S$ を 1～30 まで増加させたときの一次エネルギー消費量の期待値, CPU 時間および PEFC 発電時間を示す. 当然ながら,  $S$ が異なればそれらは全く異なる運用計画問題となる. ここで, SS および WS の目的値の比を, 前章までの省エネルギー率に倣い次の通り定義し, 式および図中においては” Gap”と表記する.

$$\text{Gap} = \frac{J_{SS} - J_{WS}}{J_{SS}} \times 100 \quad (5.14)$$

図 5.8 にて黒色の実線で示した通り, この値は $S$ の増加にも関わらず 21%に留まった.

図 5.9 に示す通り, 60-min かつ $S=20$  の点は計算が完了しなかったために存在しない. この点を除くと, 60-min かつ $S=19$  において CPU 時間が最大となった. 図 5.10 に示す通り, 15-min, 30-min および 60-min において, それぞれ $S=8, 11$  および 21 以上のシナリオ数では PEFC は一日中発電しておらず, 則ち, 停止していることが判明した.

図 5.9 の $S=17\sim 19$  における特異点は, 図 5.4 および図 5.10 より, 給湯需要量が少

ない日であり、PEFC を運転すべきかの判断に時間を要していることが示唆される。

図 5.11 は、15-min,  $S=7$  における WS および SS の主たるエネルギー流量の比較を示す。両者の比較において、SS は WS よりも PEFC からの供給電力・熱量が減少し、一方で運用計画が不要であり給湯需要に応じて出湯を行う GB からの供給熱量が増加していることが確認出来る。

不確実性下において、翌日の運用方策を決定するという観点から、求解に要する時間は数時間以下にする必要があり、そのため、15-min においては予測シナリオをあらかじめ  $S=10$  本前後に絞り込むことが望ましい。計算時間の観点もさることながら、シナリオ本数が増加すると大きすぎる不確実性から生じるエネルギー消費量の増加という危険性を避けるために、PEFC を動かさない保守的な運用、すなわち、GB を使用することとなり、そのような問題設定ではもとより PEFC-CGS を導入する利得を適切に評価できないと言える。

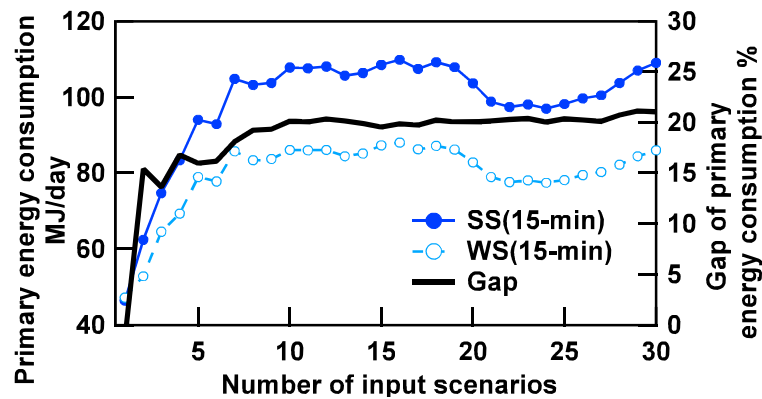


Fig. 5.8 Difference of primary energy consumptions

第5章 確率計画法を用いた家庭用PEFCシステムの運用方策の検討

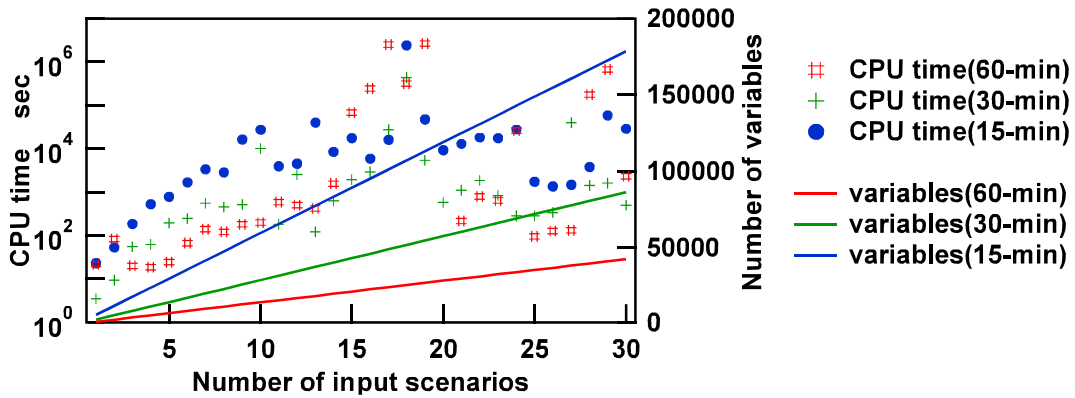


Fig. 5.9 Performance of SS model

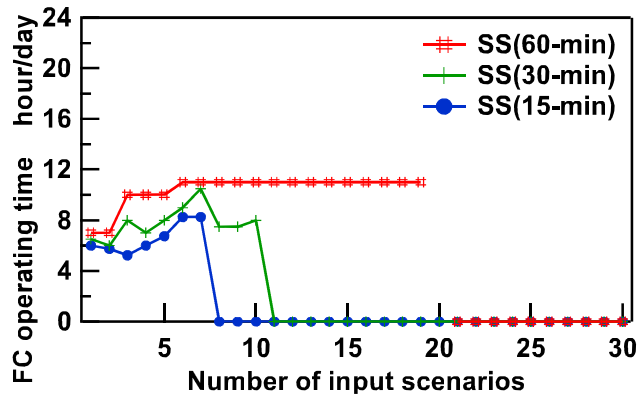


Fig. 5.10 PEFC-CGS operating time of SS model

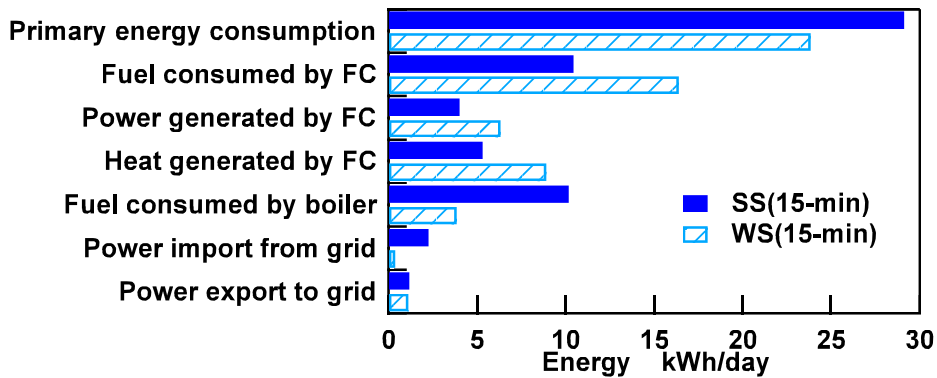


Fig. 5.11 Expected values of result of two models for seven scenarios

5・3・4 SPによる最適運用方策

図 5.12～14 は、それぞれ 15-min かつ  $S=1\sim7$  の WS における HWT, BT および PEFC 発電時間に加え、15-min かつ  $S=7$  の SS における同種の最適運用方策を重ねて示した

ものである。WS および SS のどちらにおいても運用方策は似通っており、図 5.12 および 13 に示す通り、HWT は夕方の給湯需要発生に向け蓄熱し、BT は昼間に充電し、夜間に放電している。15 時近傍においてほとんどのシナリオが BT の最大充電容量に達しており、この時に僅かな逆潮電力が PV より発生した。エネルギー量の観点で WS および SS を比較すると、HWT 内の蓄熱量は、SS の方が WS より全体的に低く抑えられており、これは、システムにとって HWT 内に残存した熱量は完全な無駄であるため、その危険性を抑制していることがわかる。一方、BT 内の蓄電量は SS の方が WS より全体的に高く維持されており、これは、BT 容量が一日の電力需要量よりも小さく全容量を使いきれぬために、システムにとって費用無しで入手出来た PV 電力を蓄電しておき、数時間後以内に生じる電力需要量へ残存させる運用方策が得策であることを示す。換言すれば、系統電力から電力を購入しエネルギー消費量が増加する危険性を軽減していると言える。また、図 5.14 に示すとおり、PEFC は 8～15 時の間においては全てのシナリオにおいて発電をしておらず、PV と発電時刻をずらす運用方策が採用されたことが判明した。

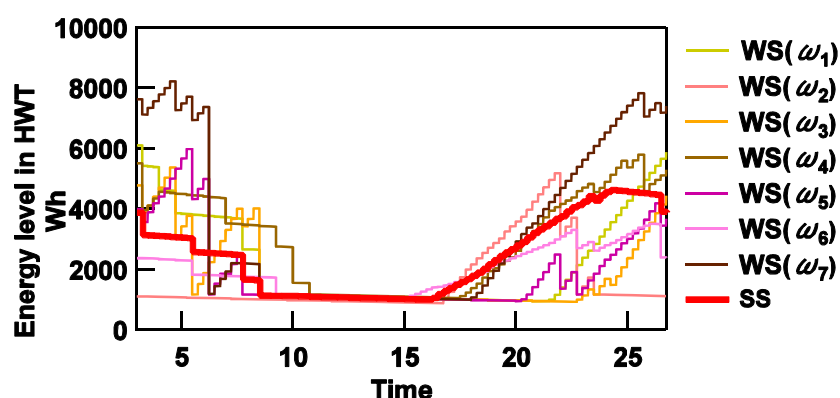


Fig. 5.12 Comparison of HWT operations

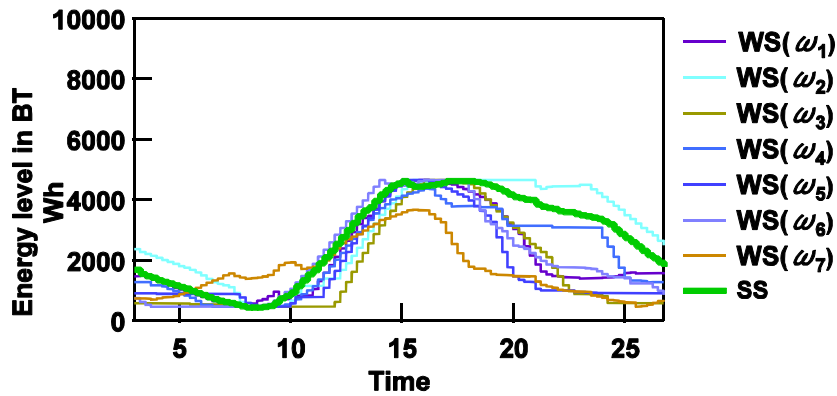


Fig. 5.13 Comparison of BT operations

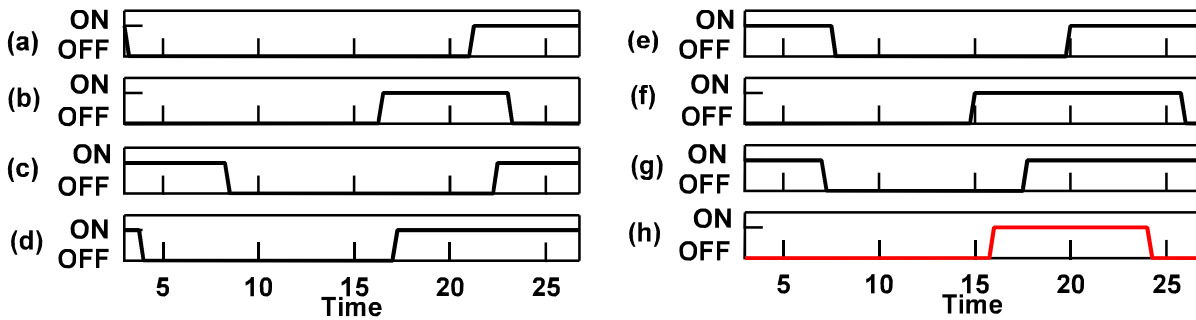


Fig. 5.14 Comparison of FC operations for seven scenarios, (a) WS at  $\omega_1$ , (b) WS at  $\omega_2$ , (c) WS at  $\omega_3$ , (d) WS at  $\omega_4$ , (e) WS at  $\omega_5$ , (f) WS at  $\omega_6$ , (g) WS at  $\omega_7$ , (h) SS

#### 5・4 本章のまとめ

本章では予測を考慮した蓄エネルギー装置を持つ家庭用エネルギーシステムの運用計画問題について論じた。従来の MILP 手法による最適運用計画問題を、翌日のエネルギー需要予測シナリオを入力とし、翌 24 時間に亘る主機の起動・停止時刻および HWT・BT の蓄エネルギー量を計画する問題へと拡張した。この問題はシナリオベースの確率計画法により定式化され、全てのシナリオに対する一次エネルギー消費量の期待値を最小化した。

結果として、サンプリング時間間隔を荒くすることによるならし効果は、WS および SS の一次エネルギー消費量へは僅かしか影響しない一方、PEFC の運転時間へは強く



影響することが判明した。また、目的値である日間一次エネルギー消費量の観点で、複数のエネルギー需要シナリオに基づく期待値は、将来の完全情報に基づき最小化された目的値よりも21%増大し、完全情報を入手するために63 yen/dayの調査費用を掛けても良いことを明らかにした。不確実性下におけるPV-BT組込み型PEFC-CGSの運用方策に関して、得られた知見は次の4つにまとめられる。

(1) 予測によって不確実性を低減する

確率的運用計画手法へ入力するシナリオ数は、15分のサンプリング時間間隔においては10本程度に予め絞り込むことが求められる。エネルギー需要量のシナリオ数が増大することは、将来に対する不確実性が増大することを意味し、将来の不確実性が増大すると前述の通り保守的な運用が採用されるためである。当然ながら、シナリオ数の増大は問題規模の増大であり、これは組み合わせの爆発を生じさせる。また、シナリオ数の増大に伴いPEFCを停止する保守的な運用が導出されるため、シナリオ数が多すぎるような問題設定はPEFC-CGSの利得を適切に導出し得ないことを明らかにした。

(2) 予めPEFCを発電停止しておくことでリスクを避ける

不確実性の大きな日においては、PEFCを停止してその代わりにGBを使用する保守的な運用方策を採用する傾向がある。これは、運用計画段階においてPEFCを停止しておく決定をすることで、PEFC-CGSの特性とエネルギー需要量が整合しない場合に一次エネルギー消費量が増加するリスクを避けていると言える。

(3) 主機であるPEFCの発電時間を短時間にすることで余剰温水が発生するリスクを抑制する

HWT内に残存した熱量は完全な無駄であり、これを抑制する必要がある。

(4) BTの蓄電量を高めに保つことで、リスクを軽減する

## 第5章 確率計画法を用いた家庭用 PEFC システムの運用方策の検討

電力需要量と比較して BT 容量は小さく電力を残存させる可能性は極めて小さい。

そのため PV 電力を逆潮しないよう BT に蓄電することが得策である。

本問題は償還請求を賄う際に、高価な罰金ではなく通常のコスト、則ち一次エネルギー換算係数、を用いている。罰金を係数として変化させることで、非期待効用理論の枠組みでの議論をすることが今後の課題であると考えられる。

## 第6章 予測に基づく HEMS 運用計画手法

### 6・1 概要

家庭用エネルギーシステムは、エネルギー需要量、外気温、ユーティリティ料金等の多様な外部条件下において需要家毎に様々に異なる省エネルギー性・経済性等の目的を達成しなければならない。蓄熱槽等の積分要素を持つシステムあるいは CGS のように運用の自由度が高いシステムの実運用に際しては、エネルギー需要量等の将来事象の不確実な係数に基づき運用方策を事前に決定する必要がある。また、電力需給調整を意図した電力需要の平準化が進展しており（経済産業省，2014a），DR 信号に対応する HEMS 開発が求められている。

エネルギーシステムにおいて、不確実な係数に基づく事前の意思決定およびその意思決定の事後の評価には、SP を用いた事例が多数報告されている（Fleten et. al, 2008; Heinrich et. al., 2007; Wallace et. al., 2003）。これらの報告では、長期的なエネルギー需要あるいは経済変動を確率変数とした発電所の新設問題、短期間の電力価格変動を確率変数とした水力発電所の運用計画問題等が検討されてきた。しかし、不確実な係数を含んだ家庭用エネルギーシステムの運用計画問題は需要時系列の予測の困難さ等から十分に検討がなされていない。

本章では、前章までに開発した要素技術である需要特徴の分類手法および確率的運用計画法を統合することで、翌日の予測情報に基づく HEMS 運用計画手法を構築し、数値検討を通じてその有用性を定量評価することを目的とする。

図 6.1 に示すのは提案する HEMS 運用計画手法と運用成績の評価の枠組みである。対象とする機器には PEFC-CGS, PV および BT を含む次世代型エネルギーシステムを取り上げる。まず、予測段階においてはスマートメータから HEMS へ入力される翌日の電力価格、ならびに HEMS 内に蓄積されている過去の実現値から予測される電力・給

## 第6章 予測に基づく HEMS 運用計画手法

湯需要量, PV 出力および快適温度幅の時系列の 5 点の情報を得る. ここで, 予測に用いる過去の実測データの類似度の定義には, 第4章で提案した需要特徴分類手法を拡張し適用する. 次に, 予測情報に基づく運用計画段階においては, 予測値を外生変数として入力し, 第5章で提案した確率的運用計画法に基づき PEFC の発電状況および BT の充放電電力量を計画する. 最後に, 実際の運用段階においては, 予測したエネルギー需要量, PV 出力等の実現値を入力として, エネルギー需給収支を時間断面毎に算出することで, 提案手法の有用性を経済性の観点で定量評価する.

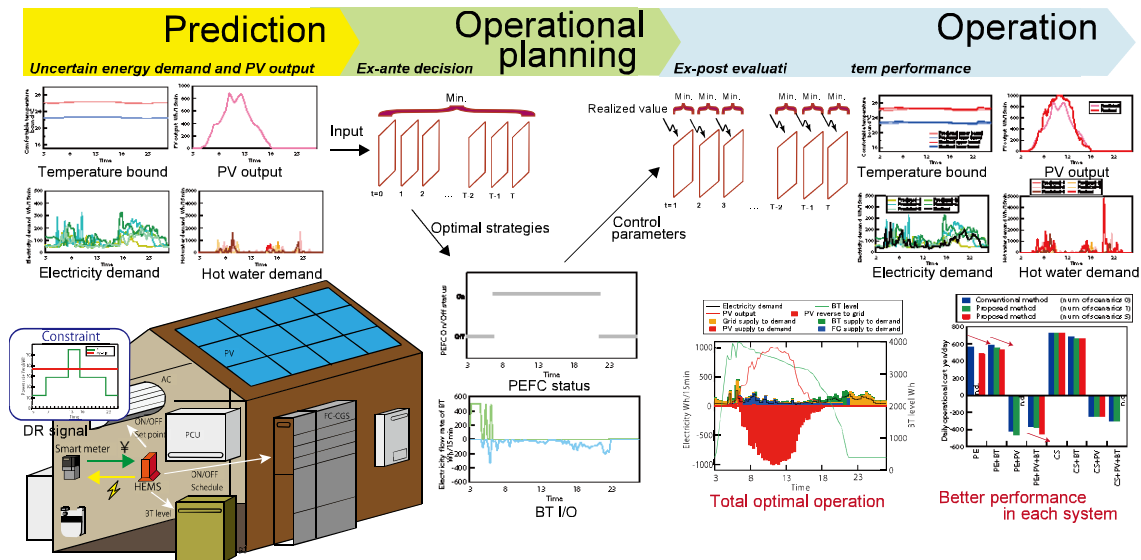


Fig. 6.1 Flow chart of HEMS operational planning method

### 6・2 対象システム

図 6.2 は本章で取り上げる PEFC-CGS の構成図を示したもので, 電力・都市ガスシステムへ入力し, 電力・給湯・冷暖房需要にエネルギーを供給する. 本システムは, AC および PEFC-CGS から構成され, PEFC-CGS は PEFC を含む発電ユニット, 147[L]の貯湯槽 (HWT), 効率 92% の GB, 余剰電力回収ヒータ (Heater:H) および放熱器 (Radiation Fan: RF) から成る. 主機は定格出力 0.75[kW] において発電および排熱回収効率は, LHV 基準でそれぞれ 39.0% および 56.0% であり, また, その他の主要諸元は図中に示す.



**(b) 運用計画手法**

運用計画問題においては、評価期間は午前 3～27 時の 24 時間とし、 $T$ 個のサンプリング時間間隔に分割すると、そのサンプリング時間間隔は $\delta t = 24/T$ で表される。エネルギー・物質収支および機器特性を制約条件とし、非負の連続変数で表されるエネルギー・物質収支、および 0/1 変数で表される機器状態を未知変数とする。以降では、一次エネルギー消費量 $J$ および係数を示すギリシャ文字を除き、決定変数をアルファベットの小文字で表す。将来事象の不確実な係数として発生確率 $P_\omega$ をそれぞれ持ったエネルギー需要予測シナリオ $\omega = 1, \dots, S$ を採用し、 $S$ 本のシナリオに対する一次エネルギー消費量 $J_\omega^{SP}$ の期待値 $\bar{J}^{SP}$ を最小化する問題を構成する。

$$J_\omega^{SP} = \sum_{t=1}^T (C_t^e e_{t,\omega}^{buy} + C_t^g g_{t,\omega}^{buy} - C^{PV} e_{t,\omega}^r) \quad (6.1)$$

$$\bar{J}^{SP} = \frac{(\sum_{\omega=1}^S P_\omega J_\omega^{SP})}{S} \quad (6.2)$$

ここで、 $t$ ,  $C$ ,  $e$ および $g$ は、それぞれ時刻、運用費換算係数、電力およびガスのエネルギー流量である。上付き添字のbuyは、購入された、則ちシステムへ入力されたことを示す。また、電力の一次エネルギー換算係数は表 6.3 にて後述するように時間帯で異なり、シナリオ毎の発生確率 $P_\omega$ は全て等しいとする。

実機へ制御係数として入力する運用方策を一意に決定するという観点から、各サンプリング時刻における PEFC ユニットの発電状況 $z_{t,\omega}^{FC}$ , BT 入力電力量 $e_{t,1}^{BT,in}$ , BT 出力電力量 $e_{t,1}^{BT,out}$ を、全てのシナリオで一致するよう制約する。

$$z_{t,1}^{FC} = z_{t,2}^{FC} = \dots = z_{t,S}^{FC} \quad (6.3)$$

$$e_{t,1}^{BT,in} = e_{t,2}^{BT,in} = \dots = e_{t,S}^{BT,in} \quad (6.4)$$

$$e_{t,1}^{\text{BT,out}} = e_{t,2}^{\text{BT,out}} = \dots = e_{t,S}^{\text{BT,out}} \quad (6.5)$$

電力の予測値  $E_{t,\omega}^{\text{dem,pred}}$ ，給湯の予測値  $Q_{t,\omega}^{\text{dem,HW,pred}}$  および冷暖房  $q_{t,\omega}^{\text{dem,SHC}}$  のエネルギー需要量への供給は次のように制約される。

$$e_{t,\omega}^{\text{buy}} + (e_{t,\omega}^{\text{BT,sup}} + e_{t,\omega}^{\text{PV,sup}})\eta^{\text{inv}} + (e_{t,\omega}^{\text{FC}} - e_{t,\omega}^{\text{H}}) = E_{t,\omega}^{\text{dem,pred}} + e_{t,\omega}^{\text{AUXS}} + e_{t,\omega}^{\text{AC}} \quad (6.6)$$

$$q_{t,\omega}^{\text{HWT,out}} + \eta^{\text{B}} g_{t,\omega}^{\text{B}} = Q_{t,\omega}^{\text{dem,HW,pred}} \quad (6.7)$$

$$\eta^{\text{AC}} e_{t,\omega}^{\text{AC}} = q_{t,\omega}^{\text{dem,SHC}} \quad (6.8)$$

$$e_{t,\omega}^{\text{PV,sup}} + e_{t,\omega}^{\text{PV,BT}} + e_{t,\omega}^{\text{r}} = E_{t,\omega}^{\text{PV,pred}} \quad (6.9)$$

ここで、 $\eta^{\text{B}}$ 、 $g_{t,\omega}^{\text{B}}$ 、 $\eta^{\text{AC}}$ 、 $e_{t,\omega}^{\text{FC}}$ 、 $e_{t,\omega}^{\text{AC}}$ 、 $e_{t,\omega}^{\text{H}}$  および  $e_{t,\omega}^{\text{AUXS}}$  は、それぞれ GB 効率、GB ガス消費量、AC 成績係数、PEFC 発電電力、AC、電気ヒータおよび補機消費電力である。また、 $e_{t,\omega}^{\text{BT,sup}}$  および  $\eta^{\text{inv}}$  はそれぞれ BT からの電力供給量およびインバータ効率である。さらに、 $e_{t,\omega}^{\text{PV,sup}}$ 、 $e_{t,\omega}^{\text{PV,BT}}$ 、 $e_{t,\omega}^{\text{r}}$  および  $E_{t,\omega}^{\text{PV,pred}}$  は、それぞれ PV からの家庭への直接的電力供給量、BT 充電量、逆潮電力量および PV 発電量の予測値である。冷暖房需要  $q_{t,\omega}^{\text{dem,SHC}}$  は次式の通り Predicted Mean Vote (ISO 7730, 1994) に基づき外気温・相対湿度・日射量の予測値から算出された室内の快適温度の上下限  $\bar{\theta}_{t,\omega}^{\text{in,pred}}$ ・ $\underline{\theta}_{t,\omega}^{\text{in,pred}}$  を制約として、AC で熱処理されるものとする。

$$\underline{\theta}_{t,\omega}^{\text{in,pred}} \leq \theta_{t,\omega}^{\text{in}} \leq \bar{\theta}_{t,\omega}^{\text{in,pred}} \quad (6.10)$$

ここで、 $\theta_{t,\omega}^{\text{in}}$  は室温を表す決定変数である。

第6章 予測に基づく HEMS 運用計画手法

(c) 運用成績評価手法

予測値を制約条件として決定された運用方策に基づき実際に運用する手法について述べる。表 6.1 に示す通り、確率的運用計画法により導出された PEFC 発電可能状態  $z_t^{\text{PEFC}^*}$  および BT 充放電電力量  $e_t^{\text{BT,in}^*} \cdot e_t^{\text{BT,out}^*}$  を制約として、次式に示す通り、サンプリング時間断面毎に目的関数を最小化する運用問題を構成する。

$$\sum_{t=1}^T \left[ \min \left( C_t^e e_t^{\text{buy}} + C_t^g g_t^{\text{buy}} - C^{\text{PV}} e_t^r \right) \right] \quad (6.11)$$

このとき、次式に示す通り、エネルギー需要量、PV 発電出力および快適温度幅は時間断面毎に実現値を制約とする。

$$e_t^{\text{buy}} + (e_t^{\text{BT,sup}} + e_t^{\text{PV,sup}}) \eta^{\text{inv}} + (e_t^{\text{FC}} - e_t^{\text{H}}) = E_t^{\text{dem,real}} + e_t^{\text{AUXS}} + e_t^{\text{AC}} \quad (6.12)$$

$$q_t^{\text{HWT,out}} + \eta^{\text{B}} g_t^{\text{B}} = Q_t^{\text{dem,HW,real}} \quad (6.13)$$

$$\eta^{\text{AC}} e_t^{\text{AC}} = q_t^{\text{dem,SHC}} \quad (6.14)$$

$$e_t^{\text{PV,sup}} + e_t^{\text{PV,BT}} + e_t^r = E_t^{\text{PV,real}} \quad (6.15)$$

$$\underline{\theta}_t^{\text{in,real}} \leq \theta_t^{\text{in}} \leq \bar{\theta}_t^{\text{in,real}} \quad (6.16)$$

ここで、上付き添字 real は実現値を表す。

Table 6.1 Added constraints for operation in real time

Equipment	Target variable	Constraint
BT	Output electricity from BT	$e_t^{\text{BT,out}} \leq e_t^{\text{BT,out}^*}$
	Input electricity into BT	$e_t^{\text{BT,in}} \geq e_t^{\text{BT,in}^*}$
PEFC	PEFC ON/OFF state	$z_t^{\text{PEFC}} \geq z_t^{\text{PEFC}^*}$



### 6・3・2 比較手法

ここでは、エネルギー需要の予測に基づかない運用方策を比較手法として設定する。予測に基づかない運用方策は、検討対象日へ一律に表 6.2 に示す通りの制約を設定し、6・3・1 (c) の通り求解する。

Table 6.2 System specifications

No	System	Assumed operational strategies
1	PE	PE: Generating electricity from 4 to 24 o'clock
2	PE+BT	FC: Generating electricity from 4 to 24 o'clock BT: Charging BT Fully until 7 o'clock
3	PE+PV	PE: Generating electricity from 4 to 24 o'clock
4	PE+PV+ BT	FC: Generating electricity from 4 to 24 o'clock BT: Charging BT Fully until 7 o'clock
5	CS	---
6	CS+BT	BT: Charging BT Fully until 7 o'clock
7	CS+PV	---
8	CS+PV+BT	BT: Charging BT Fully until 7 o'clock

### 6・4 数値実験

ここでは、ある 1 家庭の 5 月代表日を対象として取り上げ、PEFC-CGS, PV, BT および BT を構成要素とする 8 システムに対して、提案する予測を用いる確率的運用計画手法と、比較対象として予測に基づかない運用方策との経済性を比較分析し、提案手法の有用性を定量評価する。

#### 6・4・1 前提条件

表 6.3 に示すのは、系統電力, PV-FIT およびガスの利用料金である (東京電力, 2014; 経済産業省, 2014b; 東京ガス, 2014). 図 6.3 には前者 2 つを示し, 電力価格と PV-FIT がピーク時間帯である 13~16 時においては逆転しており, この時間帯においては PV 電力を需要家内で消費し, 系統電力からの買電を減少させることが経済性を向上させ

## 第6章 予測に基づく HEMS 運用計画手法

ることがわかる。

Table 6.3 Electricity and fuel prices

Type	Kind of rate	Condition	Value	Unit
Grid	Basic costs	---	1296	Yen/month
	Fuel regulatory costs	---	2.35	Yen/kWh
	Metered costs	7:00 - 13:00	28.99	Yen/kWh
		13:00 - 16:00	54.68	Yen/kWh
		16:00 - 23:00	28.99	Yen/kWh
23:00 - 7:00		12.16	Yen/kWh	
Gas	Basic costs	Without FC-CGS	1026	Yen/month
		Including FC-CGS	1458	Yen/month
	Metered costs	Without FC-CGS	156.11	Yen/Nm <sup>3</sup>
		Including FC-CGS	134.51	Yen/Nm <sup>3</sup>
PV	FIT	For surplus electricity	37.00	Yen/kWh

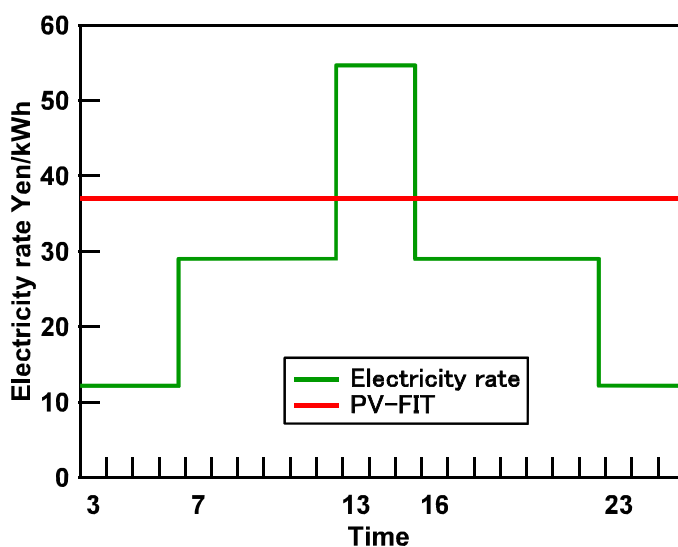


Fig. 6.3 Electricity rate and PV-FIT

### 6・4・2 予測結果

対象とする需要家は、年間に亘るエネルギー消費量を実測した世帯を取り上げ、ここでは年間で12日代表日を対象とする。JITモデリングにおいては、対象とした12日を除いた日の需要特性を学習データに用いた。PV出力もエネルギー需要予測と同様

に JIT モデリング手法により予測した. 図 6.4~6.7 に示すのは, 5 月代表日における電力・給湯需要, PV 出力ならびに PMV を基準とした快適温度幅の予測値と実現値である. PMV に関してはその温度において 90%の人が快適となる $\pm 0.5$ を設定した.

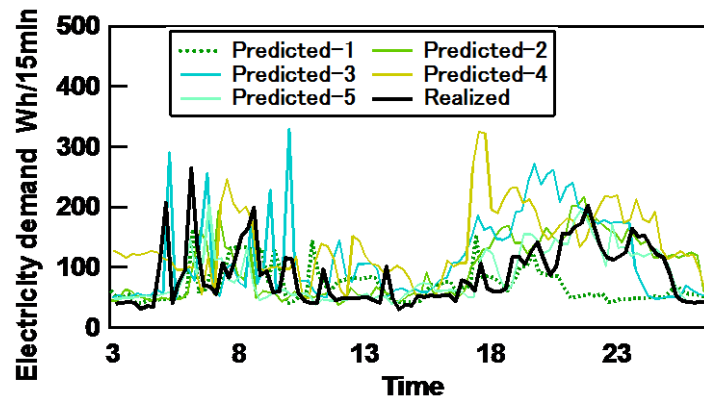


Fig. 6.4 Predicted and realized electricity demand

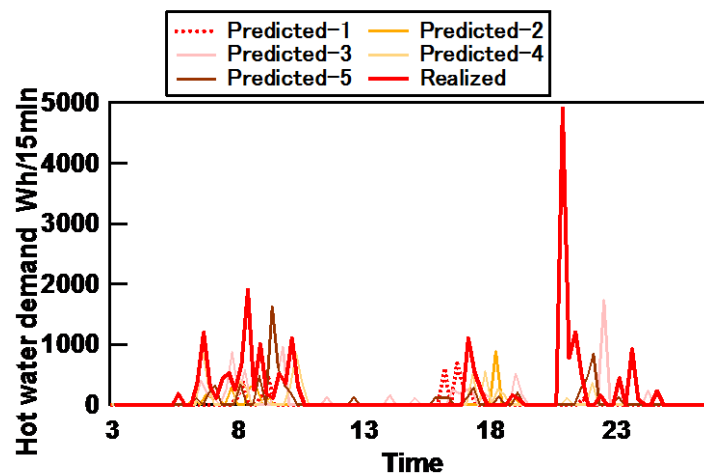


Fig. 6.5 Predicted and realized hot water demand

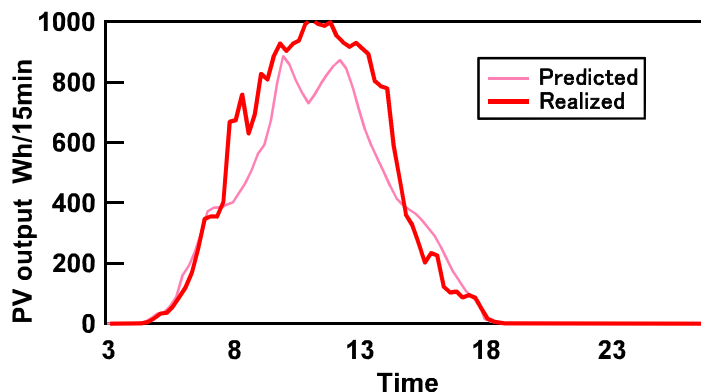


Fig. 6.6 Predicted and realized PV output

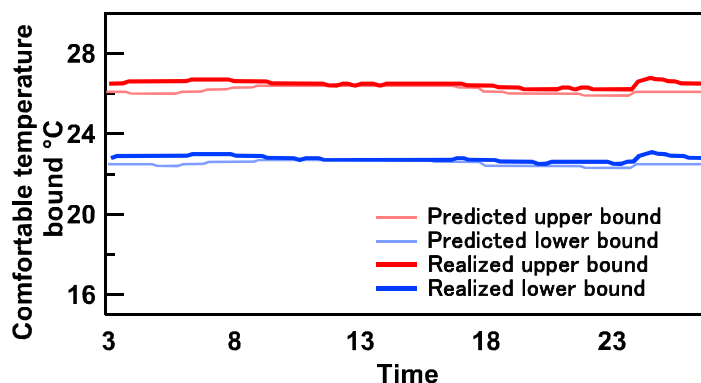


Fig. 6.7 Predicted and realized comfortable temperature bound

### 6・4・3 予測に基づく運用方策

図 6.8・6.9 に示すのは、予測値を用いて確率的最適運用計画問題より導出された PE+PV+BT の運用方策であり、それぞれ PEFC 発電状態および BT 入出力電力量である。図 6.8 より、PEFC は PV 逆潮電力量を最大化するために、日中に稼働する運用方策が採用されており、また、図 6.9 より、BT は夜間電力時間帯の 7 時までに系統電力から充電を行う運用方策が採用されていることがわかる。

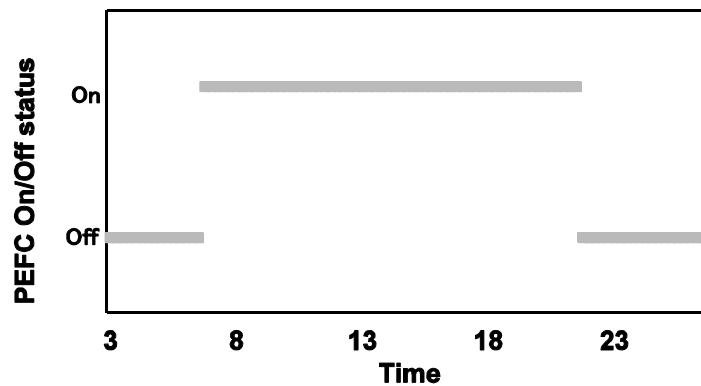


Fig. 6.8 Planned PEFC operation based on prediction

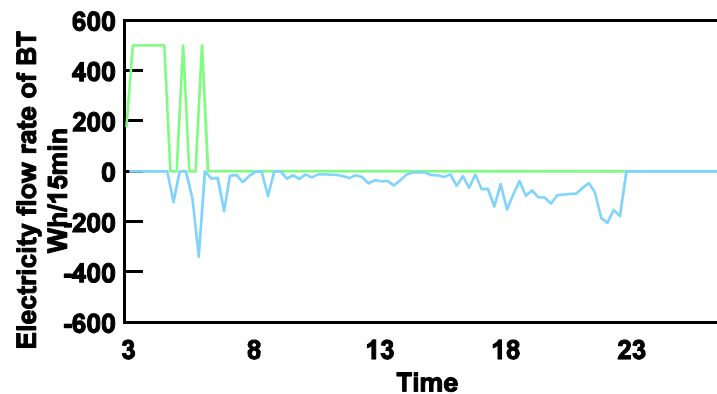


Fig. 6.9 Planned BT operation based on prediction

#### 6・4・4 各システムにおける運用費

図 6.10 に示すのは、対象とした 8 システムにおける、提案手法と比較手法の 5 月代表日の運用費の比較であり、提案手法においてもエネルギー需要予測シナリオを 1 あるいは 5 本と変化させたケースを示した。なお、図中のデータ抜けに関して、本問題は大規模離な MILP 問題であるため、規定時間内に解を導出することが困難であった点（図中 n. d. と表記）が PE, PE+PV および CS+PV+BT にそれぞれ存在する。基本的傾向として、提案手法が運用成績において優り、特に、PE, PE+BT および PE+PV+BT の 5 つの予測シナリオを用いる提案手法は、比較手法とそれぞれ 79, 56 および 82 yen/day 運用費が低減しており、提案手法の有用性が示されたと言える。

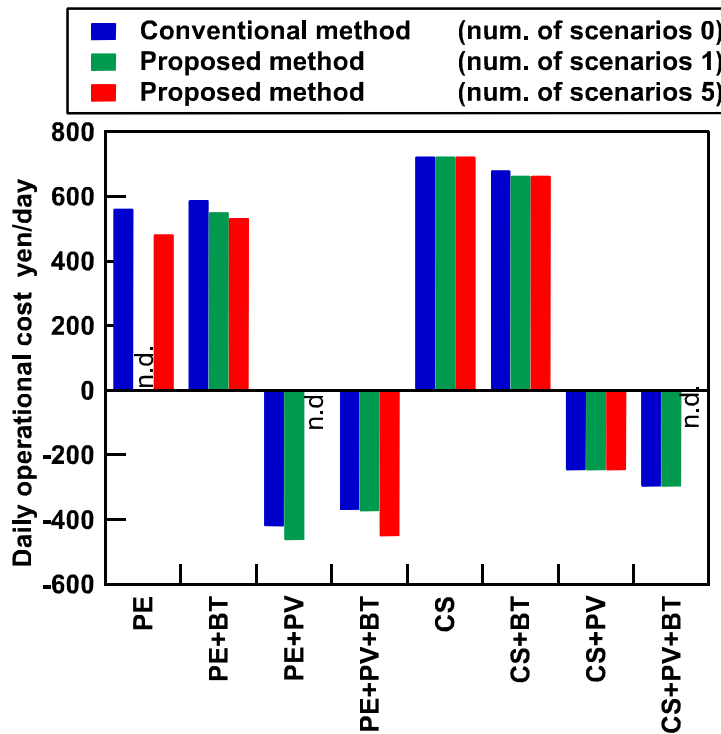


Fig. 6.10 Daily operational cost of each system compared

#### 6・4・5 実現値に対する運用結果

図 6.11～6.15 に示すのは、5月の代表日における CS+BT および PE+PV+BT の比較手法および提案手法を用いた際の実現値に対する運用結果である。図 6.11・6.12 より、DR 信号である電力価格に対する最適運用方策を実施する提案手法においては、電力価格の高いピーク時間帯において系統電力からの買電を低減させるため、BT 蓄電量を高いレベルに保つという運用を採用していることがわかる。図 6.13～6.15 より、比較手法においては PEFC-CGS および BT の運用方策がそれぞれ独自に計画されていることから、BT 蓄電量が 27 時において残存しており、一方で、提案手法において、BT は最低蓄電量まで電力を消費しており、システム全体最適を達成出来ていると言える。また、利用する予測シナリオが 1 本の場合は、予測において実現値よりも給湯需要が少なく見積もられていたために PEFC 稼働時間も短縮され、PEFC の省エネルギー性が十分発揮出来ていないことがわかる。

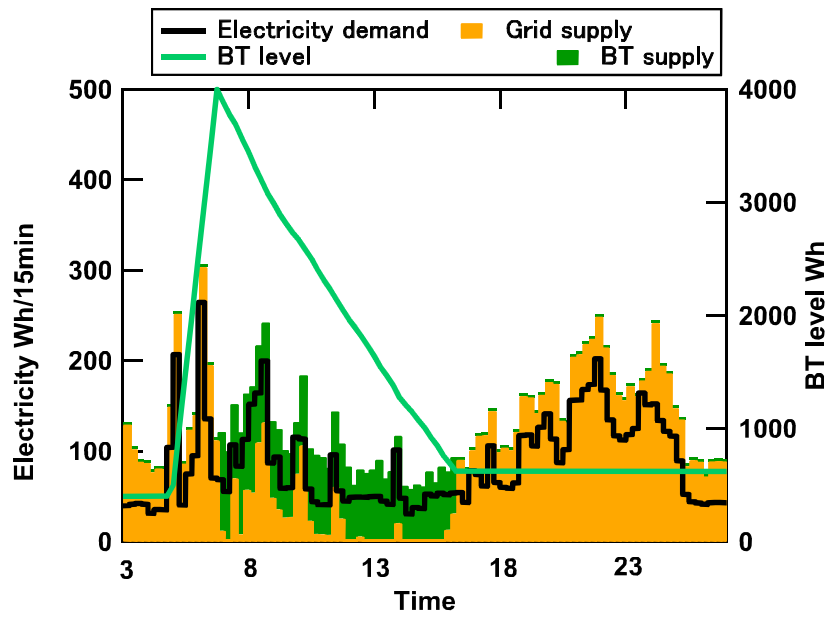


Fig. 6.11 Operation of CS+BT against realized values using proposed HEMS operational method with 5 scenarios

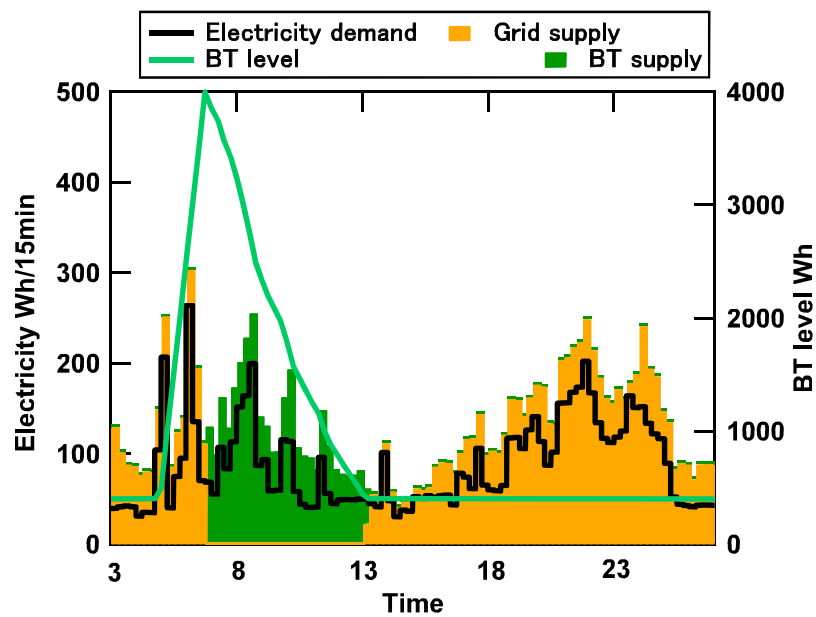


Fig. 6.12 Operation of CS+BT against realized values using conventional method

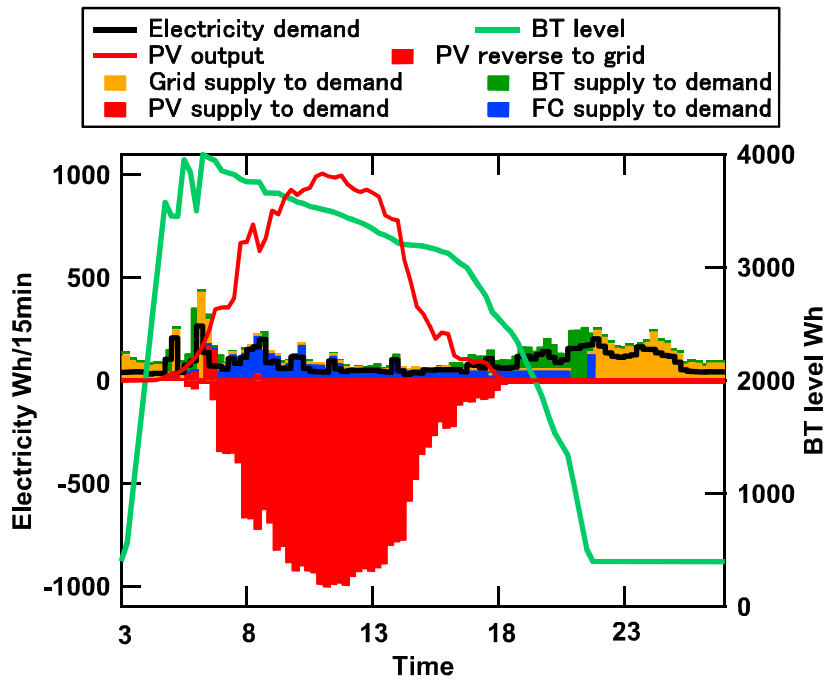


Fig. 6.13 Operation of PE+PV+BT against realized values using proposed HEMS operational method with 5 scenarios

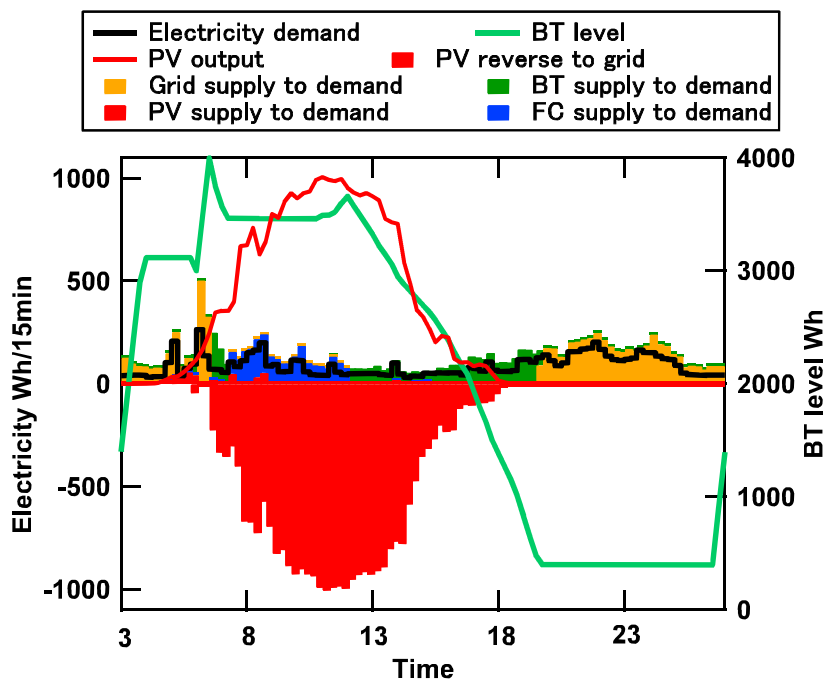


Fig. 6.14 Operation of PE+PV+BT against realized values using proposed HEMS operational method with 1 scenarios



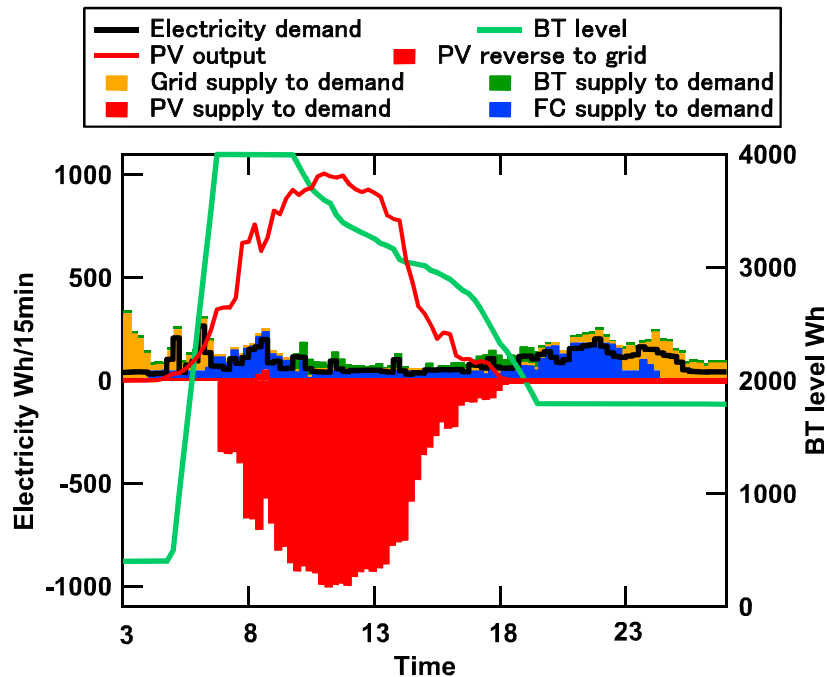


Fig. 6.15 Operation of PE+PV+BT against realized values using conventional method

## 6・5 本章のまとめ

本章では、前章までに開発した要素技術である需要特徴の分類手法および確率的運用計画法を統合することで、翌日の予測情報に基づく HEMS 運用計画手法を構築し、数値検討を通じてその有用性を定量評価した。対象とする機器には PEFC-CGS, PV および BT を含む次世代型エネルギーシステムを取り上げ、まず、予測段階においてはスマートメータから HEMS へ入力される翌日の電力価格、ならびに HEMS 内に蓄積されている過去の実現値から予測される電力・給湯需要量, PV 出力および快適温度幅の時系列の 5 点の情報を得た。ここで、予測に用いる過去の実測データの類似度の定義には、第 4 章で提案した需要特徴分類手法を拡張し適用した。次に、予測情報に基づく運用計画段階においては、予測値を外生変数として入力し、第 5 章で提案した確率的運用計画法に基づき PEFC の発電状況および BT の充放電電力量を計画した。最後に、実際の運用段階においては、予測したエネルギー需要量, PV 出力等の実現値を入力として、エネルギー需給収支を時間断面毎に算出することで、提案手法は、予測を用いない比較手法に対して PE+PV+BT で 82[yen/day]の運用費が削減しており、その有用性

第6章 予測に基づく HEMS 運用計画手法  
が示されたと言える。

以上より、予測に基づく HEMS 運用計画手法とその運用成績評価手法を構築し、提案する HEMS 運用計画手法において、翌日の予測に基づき立案した運用方策に従うことで、経済性の観点で運用成績が向上することを示した。

## 第7章 結論

FC-CGS, PV, BT 等の家庭用エネルギー機器を取りまとめ DR 信号に対応しつつ, 需要の不確実性下においてシステム全体が最適となる運用を行うことが HEMS に期待されている. ここで, HEMS 開発において予測情報に基づく HEMS 運用技術が課題となっており, また, どのように家庭用エネルギーシステムを運用するのかという指針も十分に明らかではない. そこで, 本論文は HEMS 開発指針を明らかにするために, 翌日の予測情報に基づく HEMS 運用計画手法を構築することを目的とした. その際に, HEMS 管理下には次世代エネルギー機器として FC-CGS, PV および BT を構成要素に持つシステムを検討対象とした. また, HEMS がシステム全体最適運用を達成した際の潜在能力の分析を実施することで, 提案する予測に基づく HEMS 運用計画手法の有用性を定量的に評価した.

次節は本論文の貢献, 次々節は本論文における理論的枠組みの適用限界および残された課題を述べる.

### 7・1 本論文の成果

#### (1) PV・BT・FC-CGS から構成されるシステムの運用計画問題の構築

家庭用エネルギー機器として, 新たに導入が進んでいる PV・BT に対して FC-CGS と組み合わせた次世代家庭用エネルギーシステムのエネルギー収支および機器稼働状況からなる数理モデルを構築, すなわち, 混合整数線形計画問題として定式化した. また, 実在家庭における年間に亘るエネルギー需要量と PV 発電電力量を与条件とし, 分枝限定法, 単体法等の解法を組み合わせることで目的関数である一次エネルギー消費量を最小化する最適運用方策を導出した. その際, FC-CGS の主機としては PEFC および SOFC の双方を取り上げ, また, BT 蓄電容量についても市販家庭用据置型と電気自動車相当

## 第7章 結論

の容量の2つのケースを検討対象とした。さらに、PV 逆潮流電力はシステムの一次エネルギー消費量に寄与しない、あるいは寄与するとした、2つのケースを設定することで、考えうる次世代家庭用エネルギーシステムの候補群を対象として数値分析を実施した。その結果、次世代エネルギーシステムの潜在能力の最大値を明らかにし、このとき、需要特性がエネルギーシステム特性によく整合している場合には、機器の持つ省エネルギー性が発揮されるが、整合しない場合には、その省エネルギー性が十分に発揮されないことを明らかにした。以上の結果より、システムの省エネルギー性に寄与する需要特性と機器特性との整合性に着目した分析が、機器の運用性能を評価する上で重要であることを明らかにした。

### (2) エネルギー需要特徴の分析手法の確立

需要特徴の分析手法を提案し、その具体的応用例として需要特徴がエネルギーシステムへ与える影響分析手法へ拡張した。主機の熱電比の拘束が強い CGS においては、主機の熱電比とエネルギー需要量の熱電比が合致した際に省エネルギー・省コストとなることが知られているものの、家庭部門のエネルギー消費パターンの日毎・時刻毎の相対変動量は、民生部門の中の業務部門および産業部門と比較して大きい。そのため、CGS の潜在能力を発揮した運用を行えるかどうかは、設計段階ではなく日々の需要予測の精度に依存するところが大きい。しかし、時々刻々変動する家庭のエネルギー需要予測は非常に困難である。そこで、翌日のエネルギー需要時系列パターンは、前日までに実現した需要時系列パターンに似て発生するという仮定のもと、過去に実測した需要データと翌日に実現するであろう需要特性との類似度を判定し、分類することを提案した。ここでは、一般化 KL 情報量を用いて1日単位の需要時系列同士の距離を定義する手法を提案した。数値検討として、72世帯に亘る実測のエネルギー需要量を対象に、1日単位の時系列パターン同士の距離をそれぞれ算出し、ある日とある日の時系列パターン同士がどの程度異なるかという基準で定義された距離行列を

作成してそのデータベース化した。この距離行列データベースに基づき階層的クラスタリングを実施することで、PEFC-CGS の省エネルギー性は、需要の1日の総量、熱電比および時系列パターンに影響されるものの、前者の2つが支配的要因であることを定量的に明らかにした。

### (3) 予測に基づく HEMS 運用計画手法の実現

HEMS の開発指針を明らかにすることを目的としてその運用手法を提案した。ここでは、本論文で開発した要素技術である需要特徴の分類手法および確率的運用計画法を統合することで、翌日の予測情報に基づく HEMS 運用計画手法を構築している。提案する HEMS 運用手法は3つのステップから構成される。1つ目のステップは、実用的な予測モデルとして用いられている Just-In-Time モデリング手法を用いてエネルギー需要時系列・PV 出力時系列パターンの予測を行った。これは、第4章で提案した過去の需要時系列同士の距離を定義する手法に基づき構築したデータベースから、関係の深い因子から決定される類似波形を抽出することで、翌日のエネルギー需要・PV 出力時系列パターンを検索するものである。2つ目のステップは、1つ目のステップで予測されたエネルギー需要量・PV 出力を、第5章で提案した確率的最適運用計画問題へ外生変数として入力し、需要家の利得を最大化する運用方策を事前に決定するステップである。3つ目のステップは、事前に計画された運用方策に基づき実際の需要実現値においてシステムを運用・制御し、1日の運用成績を評価するというステップである。換言すれば、不確実性下においてシステムの運用方策に関する事前の意思決定を行い、実時間においてその意思決定に基づき運用を履行した際の運用成績を評価する枠組みを構築した。

不確実性下における運用計画問題の構築に関しては、古典的な運用方策決定の方法論として、外生的に与えるエネルギー需要量を既知とする決定論的な最適運用計画問

## 第7章 結論

題が採用されてきた。しかし、エネルギー需要量は不確実性が高く、運用計画問題へ与えたエネルギー需要量が必ずしも実現しないという認識から、不確実な係数を有する系の運用方策決定の方法論として確率計画法を用いる提案を行った。ここでは、従来の MILP 手法による最適運用計画問題を、翌日のエネルギー需要予測シナリオを入力とし、翌 24 時間に亘る主機の起動・停止時刻および HWT・BT の蓄エネルギー量を計画する問題へと拡張した。この問題はシナリオベースの確率計画法により定式化され、全てのシナリオに対する一次エネルギー消費量の期待値を最小化した。確率的運用計画問題に基づく運用方策から、事前の運用計画を要する PEFC の運転時間を短縮し、運用計画が不要であるガスボイラおよび系統電力からのエネルギー供給が増加するという保守的な運用方策が採用される傾向にあることを示した。さらに、不確実性が増加してくると PEFC を使用しない運用方策が採用されるため、PEFC-CGS を適切に扱うためにはシナリオ本数を増やし過ぎないことが重要であり、かつ、さらなる予測精度を向上させる予測技術の必要性が示唆された。

HEMS 運用手法の数値実験の対象とする機器には PEFC-CGS, PV および BT を含む次世代型エネルギーシステムを取り上げ、まず、予測段階においてはスマートメータから HEMS へ入力される翌日の電力価格、ならびに HEMS 内に蓄積されている過去の実現値から予測される電力・給湯需要量, PV 出力および快適温度幅の時系列の 5 点の情報を得た。ここで、予測に用いる過去の実測データの類似度の定義には、第 4 章で提案した需要特徴分類手法を拡張し適用した。次に、予測情報に基づく運用計画段階においては、予測値を外生変数として入力し、第 5 章で提案した確率的運用計画法に基づき PEFC の発電状況および BT の充放電電力量を計画した。最後に、実際の運用段階においては、予測したエネルギー需要量, PV 出力等の実現値を入力として、エネルギー需給収支を時間断面毎に算出することでその運用成績を評価した。次世代家庭用エネルギーシステム 8 種類を対象として、提案する HEMS 運用計画手法において、翌日の予測情報を入力として確率的運用計画問題に基づき立案した運用方策に従うことで、運

用計画が予測に基づかない手法と比較して、経済性の観点で運用成績が向上することを示した。

#### (4) HEMS 開発のひとつの指針を明らかにした

まず、HEMS の利用者である需要家は、省エネルギー性、経済性、環境性、快適性等様々な需要家毎の目的を持っており、それら目的に応じてシステムの運用を自動化・省力化することがHEMSへ求められていた。本論文中の数値分析にて確認したように、目的関数に応じてシステムの最適運用方策は様々に異なるために、システム導入時に運用方策を予め決め打ちするのではなく、需要家が設定する目的に合致する運用方策を、日々変動する外生条件に対して導出するものが望ましいと言える。また、HEMSの機能要件は、少なくとも予測・運用計画・実運用を実施する機能が必要であることを示した。これらに加えて、システム全体最適を実現するためには、CGS, PV, BT, AC等と通信機能が必要であり、通信する情報は時刻毎の起動・停止、出力設定値、充放電電力量が必要であることが提示された。さらに、予測が確実に実現する場合とそうでない場合とで、運用成績に20%の差が発生することが見込まれ、予測精度の重要性が確認された。したがって、省力化という観点で、数値検討にて利用するデータは過去に実測しHEMSが保持していると仮定した値のみに絞ったものの、HEMSの接点として人の行動を入力する端末を用意することで、より精度の高い予測が実現出来る可能性が示唆された。

以上より、従来ではエネルギー使用状況の閲覧に留まり、また、エネルギー機器毎に部分最適な運用を行っていたHEMSに対して、本論文では、予測に基づく確率的運用計画手法を用いた、システム全体最適となるHEMS運用計画手法を提案した。また、数値実験によりその提案手法の運用費用の観点における有用性を示すことで、HEMS

## 第7章 結論

の開発指針を得た。

### 7・2 今後の展望

本論文では、HEMS 開発において運用計画の観点での技術課題を解決する HEMS 運用計画手法を提案し、HEMS 開発指針を提示した。しかし、本論文における理論的枠組は、制御方策を含む運用方策を設計することが可能である一方、運用方策をそのまま実時間における制御へ利用出来るわけではない。したがって残された課題として、運用方策を制御係数とする実時間制御が挙げられる。また、言うまでもなく、確率変数である事前の予測値とその実現値には差異が存在し、運用計画・制御においてその差異の影響を分析する必要も残されている。換言すれば、予測・運用計画・制御の概念的枠組の構築が必要であり、具体的には次の通りである。

#### 7・2・1 運用方策と実時間制御の接続

不確実性下における運用計画問題の方法論を、制御の側面から論じる。本提案手法を実機に実装するにあたり、導出された PEFC の起動・停止時刻および各時刻の蓄熱・蓄電量を制御変数とした際の過渡応答特性等を考慮した制御手法の構築が必要である。

#### 7・2・2 エネルギー需要予測

第5章において入力シナリオが運用方策に強い影響を持つことを示した。家庭のエネルギー需要の予測手法を確立し、その予測精度を向上させることが必要であり、また、運用および制御方策に利する予測とはどういうものかを考察しなければならない。特に、予測シナリオに基づいて立案した運用方策を実時間において履行している最中に、予測シナリオと著しく乖離した値が実現した場合の制御方策について検討を加え



る必要があり，これは予測手法と密接に関係している．

### 7・2・3 システム境界の拡張

通信に基づくエネルギーシステムの相互接続や，温度・人感センサ等各種センサの安価化・無線化により，家庭用エネルギーシステムへ入力しうる情報が増加している．予測・運用計画・制御の観点で，これら情報を活用した場合における，家庭用エネルギーシステムの潜在能力の向上を検討することが重要である．



## 謝辞

本論文は、筆者が早稲田大学 理工学術院 基幹理工学研究科 機械科学専攻にて 2012～2014 年までの 3 年間、天野嘉春教授の御指導の下、最適化技法に基づく家庭用燃料電池・コージェネレーションシステムの運用計画研究に取り組んだ内容を纏めたものです。本論文を纏めることが出来たことを嬉しく思います。博士後期課程への進学を受け入れて下さり、非常に刺激的な研究環境を整え本研究を進められるよう取り計らって頂き、かつ、終始御指導御鞭撻賜りました天野嘉春教授に厚く御礼申し上げます。また、研究生活について精神・内省面へのご支援、ならびに研究遂行能力の向上に強い正の影響を与えて頂きました早稲田大学 理工学術院総合研究所 伊東弘一 招聘研究員（元客員教授）に深く感謝致します。さらに、論文を纏めるにあたり適切な御指導・御助言を賜りました河合素直名誉教授および武藤寛准教授に心より感謝申し上げます。本論文の第 4 章にあたる時系列データ解析において、機械学習の観点で多くの御助言および御指導を賜りました早稲田大学先進理工学部電気・情報生命工学科 村田昇教授に深く御礼申し上げます。

そして、ともに研究を進めてきた動力・エネルギー工学研究室の皆様にも心より御礼申し上げます。内省面へご支援を頂きました池田一樹君および井上雅博君、ならびに研究面でのご支援を頂きました岡野瑛君、岡田強志君および長田勝也君に感謝します。特に、年度毎にデータ計測、データ取り纏め等多くの研究遂行上のご支援を頂きました、稲垣航平君、佐藤富一君、小方亮平君および吉川潤君が居なくては、本研究の出来が大分違ったものになっていたであろうことは想像に難くありません。加えて、多くの示唆や気付きを与えてくれた鈴木太郎学振特別研究員および北村光教学振特別研究員に深く謝意を表しますとともに、紙面制約の都合上全員のお名前を挙げることは出来ませんが、本研究に関する先駆的試行に御尽力戴いた OB・OG の皆様にも感謝致します。

## 謝辞

本研究の基礎となる家庭用エネルギー需要量の一部に関して、「大阪大学工学研究科住宅用エネルギー計測調査データ管理委員会」から大変貴重な実測データを御提供頂きました。ここに深甚の謝意を表します。

最後に、私の9年間の長きに亘る大学生活を支援してくれた家族に感謝します。

## 参考文献

### 第 1 章

- Abdel-all, R.E., Al-garni, A.Z., 1997. Forecasting monthly electric energy consumption in Eastern Saudi Arabia using univariate time-series analysis. *Energy* 22, 1059–1069.
- Amarawickrama, H., Hunt, L., 2008. Electricity demand for Sri Lanka: A time series analysis. *Energy* 33, 724–739. doi:10.1016/j.energy.2007.12.008
- Arndt, U., Beausoleil-morrison, I., Brouwer, J., Viktor, D., Ferguson, A., Griffith, B., Kelly, N., Klobut, K., Knight, I., Lie, B., Mauch, W., Peeters, L., Marianne, M., Pietra, Biagio, D., Ribberink, H., Roselli, C., Sasso, M., Sibilio, S., Swinton, M., Tzscheutschler, P., Weber, A., 2008. An Experimental and Simulation-Based Investigation of the Performance of Small-Scale Fuel Cell and Combustion-Based Cogeneration Devices Serving Residential Buildings, *Energy*.
- Azadeh, A., Ghaderi, S.F., Sohrabkhani, S., 2007. Forecasting electrical consumption by integration of Neural Network, time series and ANOVA. *Appl. Math. Comput.* 186, 1753–1761. doi:10.1016/j.amc.2006.08.094
- Campanari, S., 2009. Membrane reformer PEM cogeneration systems for residential applications—Part A: full load and partial load simulation. *Asia-Pacific J. ...* 301–310. doi:10.1002/apj
- Clarke, J., Cockroft, J., Conner, S., Hand, J., Kelly, N., Moore, R., O’ Brien, T., Strachan, P., 2002. Simulation-assisted control in building energy management systems. *Energy Build.* 34, 933–940. doi:10.1016/S0378-7788(02)00068-3
- Dantzig, G.B., 1955. Linear Programming under Uncertainty. *Manage. Sci.* 1, 197–206.
- Domenica, N. Di, Mitra, G., Valente, P., Birbilis, G., 2007. Stochastic programming and scenario generation within a simulation framework: An information systems perspective. *Decis. Support Syst.* 42, 2197–2218. doi:10.1016/j.dss.2006.06.013
- Dorer, V., Weber, A., 2009. Energy and CO<sub>2</sub> emissions performance assessment of residential micro-cogeneration systems with dynamic whole-building simulation programs. *Energy Convers. Manag.* 50, 648–657. doi:10.1016/j.enconman.2008.10.012

参考文献

- Doukas, H., Patlitzianas, K.D., Iatropoulos, K., Psarras, J., 2007. Intelligent building energy management system using rule sets. *Build. Environ.* 42, 3562–3569.  
doi:10.1016/j.buildenv.2006.10.024
- Fleten, S.-E., Kristoffersen, T.K., 2008. Short-term hydropower production planning by stochastic programming. *Comput. Oper. Res.* 35, 2656–2671.  
doi:10.1016/j.cor.2006.12.022
- Gassmann, H.I., Ireland, A.M., 1994. Scenario formulation in an algebraic modelling language, in: *Annals of Operations Research* 59. pp. 45–75. doi:10.1007/BF02031743
- Heinrich, G., Howells, M., Basson, L., Petrie, J., 2007. Electricity supply industry modelling for multiple objectives under demand growth uncertainty. *Energy* 32, 2210–2229.  
doi:10.1016/j.energy.2007.05.007
- Hwang, J.-J., 2013. Transient efficiency measurement of a combined heat and power fuel cell generator. *J. Power Sources* 223, 325–335. doi:10.1016/j.jpowsour.2012.09.086
- JX 日鉱日石エネルギー, 2012. ENEFARM 取り扱い説明書 [WWW Document]. URL [http://www.noex-jx-group.co.jp/lande/product/fuelcell/download/pdf/manualTypeS\\_cityGas.pdf](http://www.noex-jx-group.co.jp/lande/product/fuelcell/download/pdf/manualTypeS_cityGas.pdf)
- Kaut, M., Wallace, S.W., 2003. Evaluation of scenario-generation methods for stochastic programming. *Stoch. Program. E-Print Ser.* 1–16.
- Krukanont, P., Tezuka, T., 2007. Implications of capacity expansion under uncertainty and value of information: The near-term energy planning of Japan. *Energy* 32, 1809–1824.  
doi:10.1016/j.energy.2007.02.003
- Kumar, U., Jain, V.K., 2010. Time series models (Grey-Markov, Grey Model with rolling mechanism and singular spectrum analysis) to forecast energy consumption in India. *Energy* 35, 1709–1716. doi:10.1016/j.energy.2009.12.021
- Liao, W.T., 2005. Clustering of time series data—a survey. *Pattern Recognit.* 38, 1857–1874.  
doi:10.1016/j.patcog.2005.01.025
- Park, K., Kim, Y., Kim, S., Kim, K., Lee, W., Park, H., 2011. Building Energy Management System based on Smart Grid. 2011 IEEE 33rd Int. Telecommun. Energy Conf. 1–4.  
doi:10.1109/INTLEC.2011.6099782

- Philpott, A.B., Craddock, M., Waterer, H., 2000. Hydro-electric unit commitment subject to uncertain demand. *Eur. J. Oper. Res.* 125, 410-424.  
doi:10.1016/S0377-2217(99)00172-1
- Wallace, S.W., Fleten, S.-E., 2003. Stochastic Programming Models in Energy, in: Ruszczyński, A., Shapiro, A. (Eds.), *Stochastic Programming: Handbooks in Operations Research and Management Series Volume 10*. North Holland, pp. 637-677.
- Yokoyama, R., Ito, K., 1995. Optimal operational planning of cogeneration systems with thermal storage by the decomposition method. *J. energy Resour. Technol.* 117, 337-342.
- Zhao, P., Suryanarayanan, S., Simões, M.G., 2013. An Energy Management System for Building Structures Using a Multi-Agent Decision-Making Control Methodology 49, 322-330.
- アイシン精機, 2014. アイシン家庭用コージェネ | エネファーム typeS・COREMO [WWW Document]. URL <http://www.aisin.co.jp/cogene/enefarm.html>
- パナソニックアプライアンス社, 2013. パナソニック製家庭用燃料電池(エネファーム) [WWW Document]. URL [http://panasonic.co.jp/ap/FC/doc03\\_00.html](http://panasonic.co.jp/ap/FC/doc03_00.html)
- 伊東弘一, 横山良平, 1990. コージェネレーションの最適計画. 産業図書株式会社.
- 橋本克巳, 高橋徹, 吉葉史彦, 斎川路之, 浜松照秀, 2001. 家庭の次世代エネルギーシステムに関する省エネ性・環境性評価 -年間、日間の負荷構造を考慮した給湯・空調ヒートポンプとPEFC コージェネレーションの比較-
- 山岸由佳, 杉原英治, 佐伯修, 辻毅一郎, 2008. 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. *IEEJ Trans. Power Energy* 128, 528-536.
- 住環境計画研究所, 2013. 家庭用エネルギーハンドブック 2014 年版. 省エネルギーセンター.
- 中村政治, 2012. スマートグリッドにおける需要応答と OpenADR. *電気設備学会誌* 32, 557-560.
- 中島良, 小川雅弘, 宮原秀夫, 2009. 地球温暖化防止に貢献する家庭用燃料電池 エネファーム. *東芝レビュー* 64, 46-49.

## 参考文献

椎名孝之, 多ヶ谷有, 森戸晋, 2010. 分散を考慮した2段階確率計画問題. 日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文誌 53, 114-132.

辻毅一郎, 水野稔, 佐伯修, 佐野史, 上野剛, 2001. 関西文化学術研究都市における住宅用エネルギー消費の計測調査報告書.

東芝燃料電池システム, 2011. 家庭用燃料電池システム エネファーム [WWW Document]. URL <http://www.toshiba.co.jp/product/fc/products/pdf/catalog8.pdf>

飯野穰, 村井雅彦, 村山大, 本山一郎, 2011. ビル熱需要予測の物理モデルとデータベースモデルの融合によるハイブリッドモデリング手法. IEEJ Trans. Electron. Inf. Syst. 131, 1431-1438. doi:10.1541/ieejeiss.131.1431

尾添俊介, 田中洋一, 福島雅夫, 2011. リソース付き確率混合整数計画法によるスマートハウスの運用最適化. IEEJ Trans. Power Energy 131, 885-895. doi:10.1541/ieejpes.131.885

本田技研工業, 2013. エコウィル [WWW Document]. URL <http://www.honda.co.jp/cogeneration/>

林泰弘, 2013a. これからのスマートハウスのエネルギー管理 —デマンドレスポンス技術を用いた次世代 HEMS—. エネルギー・資源 34, 193-197.

林泰弘, 2013b. 東日本大震災以降のスマートグリッドのエネルギーマネジメント. IEEJ Trans. Power Energy 133, 225-228.

## 第2章

GASTAR, 2013a. バックアップ熱源機 NMA-824RFW-RA.

GASTAR, 2013b. 貯湯ユニット NAC1513A.

東京ガス, 2013. 燃料電池ユニット NA-0813RS-K.

日本規格協会 (Ed.), 2013. JIS ハンドブック 75 省・新エネルギー. 日本規格協会.



### 第3章

Fourer, R., Gay, M.D., Kernighan, W.B., 2003. AMPL: A Modeling Language for Mathematical Programming, Second Edition, 2nd ed. Brooks/Cole Publishing Company.

IBM ILOG CPLEX Optimizer [WWW Document]. URL  
<http://www-01.ibm.com/software/integration/optimization/cplex-optimizer/>

Papadimitriou, C.H., Steiglitz, K., Papadimitriou, Christos, H., 1998. Combinatorial Optimization: Algorithms and Complexity. Dover Publications.

経済産業省, 2014. エネルギーの使用の合理化等に関する法律施行規則 [WWW Document]. URL <http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S54/S54F03801000074.html>

建築研究所, 2013. 平成25年省エネルギー基準に準拠した算定・判断の方法及び解説 II 住宅. 建築環境・省エネルギー機構.

住環境計画研究所, 2009. 家庭用エネルギーハンドブック〈2009〉. 住環境計画研究所.

小久見善八, 安部武志, 稲葉稔, 内本喜晴, 2008. リチウムイオン二次電池. オーム社.

大阪ガス, 2008. <温対法>CO2 排出量の計算方法 [WWW Document]. URL  
<http://www.osakagas.co.jp/kankyo/gas/03.html>

### 第4章

Banerjee, A., Merugu, S., Dhillon, I.S., Ghosh, J., 2005. Clustering with Bregman Divergences. J. Mach. Learn. Res. 6, 1705–1749.

Christopher M., B., 2006. Pattern Recognition And Machine Learning (Information Science and Statistics). Springer-Verlag.

Dempster, A.P., Laird, N.M., Rubin, D.B., 1977. Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm. J. R. Stat. Soc. 39, 1–38.

Fraley, C., Raftery, A.E., 2010. MCLUST Version 3 for R: Normal Mixture Modeling and Model-Based Clustering, Office.

## 参考文献

- Hershey, R.J., Olsen, A.P., 2007. Approximating the Kullback Leibler Divergence Between Gaussian Mixture Models, in: Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing 2007. pp. 317–320.
- Kosmelj, K., Batagelj, V., 1990. Cross-Sectional Approach for Clustering Time Varying Data. *J. Classif.* 7, 99–109.
- Schwarz, G., 1978. Estimating the Dimension of a Model. *Annu. Stat.* 6, 461–464.
- Shen, H., Hino, H., Murata, N., Wakao, S., 2011. Extraction of Basic Patterns of Household Energy Consumption, in: Proceedings of the International Conference on Machine Learning and Applications 2011. pp. 275–280. doi:10.1109/ICMLA.2011.68
- Ward, H.J., 1963. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *J. Am. Stat. Assoc.* 58, 236–244.
- 辻毅一郎, 水野稔, 佐伯修, 佐野史, 上野剛, 2001. 関西文化学術研究都市における住宅用エネルギー消費の計測調査報告書.
- 東芝燃料電池システム, 2009. 家庭用燃料電池システム エネファーム [WWW Document]. URL <http://www.toshiba.co.jp/product/fc/products/pdf/catalog3.pdf>

## 第 5 章

- Economics, T.I. of E. (Ed.), 2012. EDMC Handbook of Energy & Economic Statistics in JAPAN. The Energy Conservation Center.
- Hawkes, A., Leach, M., 2005. Impacts of temporal precision in optimisation modelling of micro-Combined Heat and Power. *Energy* 30, 1759–1779. doi:10.1016/j.energy.2004.11.012
- John R., B., Francois, L., 2011. Introduction to Stochastic Programming (Springer Series in Operations Research and Financial Engineering). Springer-Verlag.
- Nemhauser, G.L., Todd, M.J., Kan, A.H.G.R., G.L., N., M.J., T., A.H.G. Rinnooy, K., 1995. 最適化ハンドブック. 朝倉書店.

- パナソニック, 2009. インバーター冷暖房除湿タイプ ルームエアコン CS-HX280C [WWW Document]. URL [http://ctlg.panasonic.com/jp/aircon/wall/wall-10/CS-HX280CS\\_spec.html](http://ctlg.panasonic.com/jp/aircon/wall/wall-10/CS-HX280CS_spec.html)
- パナソニック, 2012. 太陽光発電・蓄電 [WWW Document]. URL <http://sumai.panasonic.jp/catalog/solarsystem.html>
- 関西電力, 2013. 従量電灯 A [WWW Document]. URL [http://www.kepco.co.jp/home/ryoukin/menu/dento\\_a.html](http://www.kepco.co.jp/home/ryoukin/menu/dento_a.html)
- 久保幹雄, 松井知己, 田村明久, 2002. 応用数理計画ハンドブック. 朝倉書店.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 2009. NEDO:日射量データベース [WWW Document]. URL <http://www.nedo.go.jp/library/nissharyou.html>
- 東芝燃料電池システム, 2011. 家庭用燃料電池システム エネファーム [WWW Document]. URL <http://www.toshiba.co.jp/product/fc/products/pdf/catalog8.pdf>
- 日本規格協会 (Ed.), 2011. JIS ハンドブック 75 省・新エネルギー. 日本規格協会.
- 日本建築学会, 2006. 日本の住宅におけるエネルギー消費.
- 日本冷凍空調学会, 2010. 高位発熱量と低位発熱量 [WWW Document]. URL <http://www.jsrae.or.jp/annai/yougo/153.html>

## 第6章

- Fleten, S.-E., Kristoffersen, T.K., 2008. Short-term hydropower production planning by stochastic programming. *Comput. Oper. Res.* 35, 2656–2671.  
doi:10.1016/j.cor.2006.12.022
- Heinrich, G., Howells, M., Basson, L., Petrie, J., 2007. Electricity supply industry modelling for multiple objectives under demand growth uncertainty. *Energy* 32, 2210–2229.  
doi:10.1016/j.energy.2007.05.007
- Honma, H., Yamazaki, T., Yoshizawa, S., Kikusato, H., Wakao, S., 2014. PV output prediction under various conditions of time and spatial resolutions by Just-In-Time modeling, in: 29th European PV Solar Energy Conference and Exhibition.

参考文献

ISO 7730 Moderate thermal environments – Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort, 1994.

Wallace, S.W., Fleten, S.-E., 2003. Stochastic Programming Models in Energy, in: Ruszczyński, A., Shapiro, A. (Eds.), Stochastic Programming : Handbooks in Operations Research and Management Series Volume 10. North Holland, pp. 637–677.

Xing, E.P., Ng, A.Y., Jordan, M.I., Russell, S., 2003. Distance Metric Learning, with Application to Clustering with Side-Information, in: Advances in Neural Information Processing Systems 16.

Yi, J., Jin, R., Jain, A.K., Jain, S., Yang, T., 2012. Semi-Crowdsourced Clustering : Generalizing Crowd Labeling by Robust Distance Metric Learning, in: Advances in Neural Information Processing Systems 25. pp. 1–9.

経済産業省, 2014a. エネルギーの使用の合理化に関する法律の一部を改正する等の法律 [WWW Document]. URL  
[http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving\\_and\\_new/saving/summary/pdf/houritsu.pdf](http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/summary/pdf/houritsu.pdf)

経済産業省, 2014b. 再生可能エネルギー固定価格買取制度 [WWW Document]. URL  
[http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving\\_and\\_new/saiene/kaitori/kakaku.html](http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/kakaku.html)

東京ガス, 2014. ガス料金(家庭用/業務用・工業用 共通) [WWW Document]. URL  
<http://e-com.tokyo-gas.co.jp/ryokin/Default.aspx>

東京電力, 2014. ピークシフトプラン [WWW Document]. URL  
<http://www.tepco.co.jp/e-rates/individual/menu/home/home06-j.html>

本間隼人, 若尾真治, 2013. 気象庁メソ数値予報データを用いた各種日射量予測手法の精度比較検討, in: 日本風力エネルギー学会合同研究発表会. pp. 407–410.

## 研究業績

種 類 別	題名、発表・発行掲載誌名、発表・発行年月、連名者（申請者含む）
a. 論文	○Energy-saving Evaluation of SOFC Cogeneration Systems with Solar Cell and Battery, ASME Journal of Fuel Cell Science and Technology, Vol. 11, No. 6, pp. 1-7 , 2014, <u>Akira Yoshida</u> , Koichi Ito, Yoshiharu Amano
論文	○太陽電池・蓄電池組込み型 PEFC システムの省エネルギー性評価, 日本機械学会論文集, Vol. 80, No. 816, pp. 1-11, 2014, <u>吉田 彬</u> , 伊東 弘一, 天野 嘉春
論文	○A Comparison of Optimal Operation of a Residential Fuel Cell Co-Generation System Using Clustered Demand Patterns Based on Kullback-Leibler Divergence, Energies, Vol.6, No.1, pp.374-399, 2013, <u>Akira Yoshida</u> , Yoshiharu Amano, Noboru Murata, Koichi Ito, Takumi Hashizume
論文	○病院用エネルギー供給システムの更新計画における初期システムの影響分析, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.79, No.806, pp.2321-2323, 2013, <u>吉田 修</u> , <u>吉田 彬</u> , 伊東 弘一, 天野 嘉春
b. 講演	○Evaluation of Optimal Capacity of Hot Water Tank in PEM Cogeneration System for Residential Energy Demand Profiles, Proceeding of ECOS 2014, Turku, June 2014, <u>Akira Yoshida</u> , Yoshiharu Amano
講演	○Impact of Electric Battery's Degradation on Economic and Energy Saving Characteristics of Residential Photovoltaic System, Proceeding of ECOS 2014, Turku, June 2014, <u>Akira Yoshida</u> , Tomikazu Sato, Yoshiharu Amano, Koichi Ito
講演	○Optimal Operation of a Residential Photovoltaic/fuel-cell Energy System using Scenario-based Stochastic Programming, Proceeding of ECOS 2013, Guilin, July 2013, <u>Akira Yoshida</u> , Yoshiharu Amano, Koichi Ito
講演	○A Comparison of Optimal Operation of Residential Energy Systems Using Clustered Demand Patterns Based on Kullback-Leibler Divergence, Proceeding of ECOS 2012, Perugia, June 2012, <u>Akira Yoshida</u> , Yoshiharu Amano, Noboru Murata, Koichi Ito, Takumi Hashizume
講演	○Comparative Evaluation of Residential Energy Systems to Reduce CO2 emissions, World Engineer's Convention, Proceeding of WEC 2011, Geneva, Sept 2011, <u>Akira Yoshida</u> , Kouhei Ingaki, Yoshiharu Amano, Koichi Ito, Takumi Hashizume
講演	○Analysis of Energy Systems Supplying Hot Water and Electricity for Residential Use, Proceeding of IEA Heat Pump Conference 2011, Tokyo, July 2011, <u>Akira Yoshida</u> , Yoshiharu Amano, Koichi Ito, Takumi Hashizume

研究業績

種 類 別	題名、発表・発行掲載誌名、発表・発行年月、連名者（申請者含む）
b 講演	○予測・運用計画・制御手法に基づく家庭用エネルギーシステムの時間帯別料金を考慮した経済性評価, エネルギー資源学会, 第 31 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 東京, 2015, 小方 亮平, <u>吉田 彬</u> , 藤本 悠, 村田 昇, 若尾 真治, 田辺 新一, 天野 嘉春
講演	予測・運用・制御の一貫した GEMS の電圧制御と HEMS の電熱運用手法との協調 EMS 手法の評価, 電気学会 電力技術・電力系統技術合同研究会, 大阪, 2014, 芳澤 信哉, 河野 俊介, <u>吉田 彬</u> , 藤本 悠, 村田 昇, 若尾 真治, 田辺 新一, 天野 嘉春, 林 泰弘
講演	○快適性を考慮した家庭用エネルギーシステムの最適運用方策の検討, 日本機械学会 年次大会, 東京, 2014, <u>吉田 彬</u> , 藤本 悠, 村田 昇, 若尾 真治, 田辺 新一, 天野 嘉春
講演	○確率計画法を用いたエネルギー需要シナリオに対する家庭用 PEFC システムの最適運用方策の検討, 日本機械学会 第 19 回動力・エネルギー技術シンポジウム, 福井, 2014, <u>吉田 彬</u> , 小方 亮平, 村田 昇, 天野 嘉春
講演	家庭用 PEFC システムにおける給湯需要予測誤差が省エネルギー性に及ぼす影響の評価, 日本機械学会 第 19 回動力・エネルギー技術シンポジウム, 福井, 2014, 小方 亮平, <u>吉田 彬</u> , 村田 昇, 天野 嘉春
講演	スマートハウスにおける窓システムとエアコンの協調制御の評価, 空気調和・衛生工学会大会, 学術講演論文集, pp. 185-188, 2014, 江部 真里奈, 竹中 大史, 田辺 新一, 庄司 智昭, 海野 玄陽, <u>吉田 彬</u> , 林 泰弘
講演	熱的快適性・省エネルギー性を考慮した窓システムとエアコンとの協調制御 その 1: 制御システムと評価対象建物概要, 日本建築学大会, 学術講演梗概集, pp. 159-160, 2014, 竹中 大史, 江部 真里奈, 海野 玄陽, 田辺 新一, 庄司 智昭, <u>吉田 彬</u> , 林 泰弘
講演	熱的快適性・省エネルギー性を考慮した窓システムとエアコンとの協調制御 その 2: 協調制御とエアコン単体制御の電力消費量の比較, 日本建築学大会, 学術講演梗概集, pp. 161-162, 2014, 江部 真里奈, 竹中 大史, 海野 玄陽, 田辺 新一, 庄司 智昭, <u>吉田 彬</u> , 林 泰弘
講演	○地域別エネルギー需要特性に対する家庭用 PEFC システムの運用方策の検討, エネルギー資源学会 第 30 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 東京, 2014, <u>吉田 彬</u> , 天野 嘉春
講演	家庭用太陽電池システムへの蓄電池の導入効果の分析, エネルギー資源学会, 第 30 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 東京, 2014, 佐藤 富一, <u>吉田 彬</u> , 天野 嘉春, 伊東 弘一

種 類 別	題名、発表・発行掲載誌名、発表・発行年月、連名者（申請者含む）
講演	○典型的需要パターンが及ぼすエネルギー供給システムへの影響分析手法の検討, 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2013, 滋賀, 2013, <u>吉田 彬</u> , 村田 昇, 天野 嘉春
講演	蓄電池の劣化特性を考慮した家庭用 PV-BT システムの検討, 日本機械学会 第 18 回動力・エネルギー技術シンポジウム, pp.235-238, 千葉, 2013, 佐藤 富一, <u>吉田 彬</u> , 天野 嘉春, 伊東 弘一
講演	○戸建住宅における電力・給湯需要に対する各種エネルギー供給システムの比較分析, 日本機械学会 第 15 回動力・エネルギー技術シンポジウム, pp.49-52, 東京, 2010, <u>吉田 彬</u> , 小川 雅也, 天野 嘉春, 伊東 弘一, 橋詰 匠

