ガスエンジンシステムに対する発電機と貯湯槽の容量設計法

家庭用コージェネレーションシステムの計画・設計手法に関する研究 その1

DESIGN METHOD OF GENERATOR CAPACITY AND D.H.W TANK VOLUME
FOR RESIDENTIAL GAS-ENGINE CO-GENERATION SYSTEM

Planning and design method of co-generation system for residence Part 1

田中英紀*1, 石橋良太郎*2, 足立拓哉*3, 奥宮正哉*4

Hideki TANAKA, Ryotaro ISHIBASHI, Takuya ADACHI
and Masaya OKUMIYA

This study aims to propose a planning and design method for a residential co-generation system. This paper discusses about a gas-engine generator system. The system simulation program is developed to analyze the system behavior and the performance, and the program is verified in comparison between simulation results and experimental data. It is represented that rated power generation with appropriate schedule is effective operation method for a gas-engine generator system and the system energy performance correlates closely with the ratio of heat load to electric power load. And then, the design method for the capacity of generator and D.H.W tank are proposed using by R_{ge} that is the ratio of rated generator output to hourly peak demand in intermediate season and R_{st} that is the ratio of the tank capacity to daily heat load in winter.

Keywords : Co-generation system, Residential system, Micro co-generation, Gas-engine generator

コージェネレーションシステム, 家庭用システム, マイクロコージェネレーション, ガスエンジン発電機

1. はじめに

現在、家庭用コージェネレーションシステム(以下、家庭用 CGS と記す)の開発が本格化しており、既にガス供給事業者や機器メーカー等により 1kW 程度の家庭用ガスエンジン(GE)発電機や固体高分子形燃料電池(PEFC)等が開発されている。このうち GE システムは既に実用化されており、PEFC についても数々の実証試験等¹⁾を経て、まもなく本格的な市場導入を開始しつつある。しかしながら、この分野における既往の研究は、実証的研究¹⁾²⁾や要素技術開発³⁾、特定システムの性能試算⁴⁾⁵⁾⁶⁾等にとどまっており、システム計画・設計手法は未だ明らかにされていないため、その確立が望まれている。

そこで、本研究では家庭用 CGS に対する解析プログラムを開発し、この解析結果をもとに家庭用 CGS の計画・設計手法を提案することを目的とする。本論では、既に市場導入が開始されている GE 発電機による家庭用 CGS を対象に取り上げ、まず実試験データをもとに解析プログラムの妥当性を評価した。次に発電機の運転形態として定格運転と電力負荷追従運転を想定し、エネルギー性能解析の結果比較から有効な運転手法を示した。さらに、家族構成や住まい方などを変化させた種々の住宅負荷を想定した解析結果をもとに、GE システムに対する導入効果の予測手法と、システムの主構成要素である発電機および貯湯槽に対する容量選定方法の提案を行った。

図1 家庭用コージェネレーションシステム

2. 対象システムの構成と基本運転パターン

図1に検討対象システムの概要を示す。システムは、GE 発電機とインバータ、給湯用貯湯槽と補助ガスバーナ(効率 0.8 と仮定)、水循環ポンプ(P1:39W, P2: 60W, P3: 100W)から構成される。

システムでは、建物の電力負荷を発電機による発電電力で賄い、全電力負荷を発電電力のみで処理できない場合には、不足分を商用

*1 名古屋大学大学院工学研究科 助手・博士(工学)

*2 ㈱竹中工務店 修士(環境学)

*3 鹿島建設㈱ 修士(環境学)

*4 名古屋大学大学院環境学研究科 教授・工博

Assistant Prof., Graduate School of Engineering, Nagoya Univ., Dr. Eng.
Takenaka Corporation, M. Env.

Kajima Corporation, M. Env.

Prof., Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng.

系統から買電する。また、発電機を定格運転した場合など、住宅の電力負荷より発電量が上回る時間帯については、余剰電力を電熱ヒータにて熱変換し、回収するものとした²⁾。

発電機からの回収排熱は給湯および床暖房負荷の加熱源として用い、不足熱量は補助ガスバーナにより補われ、回収排熱量に余剰が生じた場合には、その余剰排熱を貯湯槽に貯える。給湯負荷に対する処理熱源の優先順位は、発電機排熱の直接利用、貯湯槽から出湯（各期の出湯温に至るまで）、補助ガスバーナの順としている。

発電機は、設定した運転スケジュール内において起動信号が継続して出され、これに従い運転されるが、設定スケジュール内であっても貯湯槽が満蓄状態（槽下部温度＝排熱回収温度）に達した時点で停止する（運転再開の条件は、槽下部温度＝排熱回収温度－5℃）。

排熱回収ポンプ（図 1：P2）は、貯湯槽側の排熱回収温度をもとに変流量（回転数）制御され、GE 冷却水ポンプ（図 1：P1）は定流量制御をとる。また、排熱回収熱交換器の GE 側出口温度が 65℃以上となる場合は、発電機内に備えたラジエータにて 65℃まで放熱される。

3. シミュレーションプログラム

3.1 プログラム概要

開発した家庭用 CGS の解析プログラムは、静的エネルギーシミュレーションプログラムである。プログラムでは、与えられた住宅負荷条件および制御条件をもとに、計算時刻毎の発電機出力、熱交換器の交換熱量、各系統の流量や貯湯槽内の温度分布などを計算し、その結果として得られる発電機、補助ガスバーナ、循環ポンプのエネルギー消費量ならびに買電量からシステム性能の算定を行う。

また、プログラムには、種々の発電機容量と貯湯槽容量さらには発電機運転スケジュールを与えて総当たり計算を行い、検討範囲の中から年間エネルギー性能が最も高くなる組み合わせを選択できる容量適正化機能を持たせている³⁾。

主要なサブシステムモデルは、発電機、排熱回収用熱交換器、貯湯槽、ポンプなどである。適用した計算モデルを以下に概説する。

3.2 サブシステムモデル

(1) ガスエンジン発電機

GE 発電機の発電出力および排熱出力は、図 2 の特性曲線⁴⁾をもとに計算を行い、発電機容量を変更した場合もこの特性に準ずるとした。発電機からの排熱出口水温は 75℃とし、貯湯槽側の排熱回収温度は、冬期（12～3 月）：70℃、中間期（4～6 月、10～11 月）：65℃、夏期（7～9 月）：60℃と季節毎に設定を変更する。

(2) 貯湯槽

温度成層を形成する貯湯槽内の温度分布は、縦方向 5 層に仮想分割して計算を行っている。槽内は完全な押し出し流れを形成するとし、貯湯時の下部取り出し・上部入力、出湯時の上部取り出し・下部入力など、時々刻々のシステム挙動に応じて移流が与えられる。

貯湯槽の断熱性能は 0.87W/(m²・K)であり、仮想分割槽毎の槽内水温とタンク廻りの年平均温 16℃の温度差に表面積を乗じて熱損失量を算出している。

(3) 熱交換器

排熱回収または床暖房用の熱交換器には、対向流型の水-水熱交換器を採用するとし、有効交換係数 (Effective-Ntu) モデル⁷⁾により、二流体の熱交換器出口温度が計算される。

図 2 GE 発電機の部分負荷特性

表 1 実験装置の仕様と実験条件

発電機出力: 0.8 kW, 排熱出力: 2.6 kW, 発電効率: 20%, 排熱回収効率: 65% (LHV)
貯湯槽容量: 150 ℓ, 槽の熱損失係数: 1.17 kJ/(m ² ・h・℃), 電熱ヒータ効率: 0.9, 補助ガスバーナ: 効率 0.8, 一般ガス給湯器: 効率 0.8
GE 排熱温度: 75℃, 排熱回収温度: 60℃, 給水温度: 14.8℃, 給湯温度: 42℃, 貯湯槽最下層 55℃以上で満蓄判定
電力負荷: 12.7 kWh/day (ピーク: 2.7 kW), 給湯負荷: 46.5 MJ/day (ピーク: 1.9 MJ/min), 追炊負荷: 5.7 MJ/day (ピーク: 0.4 MJ/min), 負荷想定季節: 中間期
GE 運転スケジュール設定: 16:37~18:19, 20:38~23:50

(4) 循環ポンプ

排熱回収ポンプ（図 1：P2）は回転数制御特性⁸⁾による変流量制御、発電機ジャケット水用および床暖房用の循環ポンプ（図 1：P1 および P3）は定流量制御されるとして、ポンプ動力が算定される。

3.3 システムの評価指標

全体システムの評価は、基準システムに対する一次エネルギー削減率⁵⁾で評価した。なお、本論では電力需要は全て買電、給湯需要はガス給湯器、床暖房を備える場合はガス式床暖房を用いて賄うものを基準システムとして設定している。発電機まわりエネルギー評価指標は SHASE-M⁹⁾に準じるが、排熱利用率 R_{wh} 、CGS 依存率 σ および CGS 総合効率 CGS_{eff} は、式(1)～(4)のように定義した。

$$R_{wh} = (Q_{wh} + Q_{eh} - Q_{rd} - Q_{loss}) / (Q_{wh} + Q_{eh}) \quad (1)$$

$$\sigma_e = (E_{ld} - E_{ut}) / E_{ld} \quad (2)$$

$$\sigma_h = (Q_{ld-d} + Q_{ld-f} - Q_{bu}) / (Q_{ld-d} + Q_{ld-f}) \quad (3)$$

$$CGS_{eff} = \{ 3.6 \cdot (E_{ge} - E_{pex} - E_{eh}) + Q_{wh} + Q_{eh} - Q_{loss} - Q_{rd} \} / 46.05 \cdot G_{ge} \quad (4)$$

3.4 プログラムの妥当性

開発プログラムの解析結果を実験データ⁶⁾と比較して、その妥当性を評価した。実験装置の構成と基本的な制御方法は 2. で述べた内容と同じであるが、実験は日中（10～16 時の間）に貯湯槽が出湯できる状態であっても出湯しない設定で行われている。解析は、計算時間間隔を 1 分とし、表 1 と図 3 に示した実験装置の仕様と模擬負荷条件の下で、システム条件を可能な限り摺り合わせて行った。

解析結果と実験データの比較結果を表 2 および図 4～図 8 に示す。図より、発電機の稼働時間と熱回収のタイミングおよび回収熱量、循環水温度や貯湯槽温度分布などの解析結果は、実システムの挙動状況に対して良い一致を示している。また、表 2 より解析では配管系熱損失を考慮していないために熱損失をやや少なく見積もる傾向はあるが、実験と解析でシステム各要素の入出熱量等に大きな差は見られず、模擬住宅負荷における日積算一次エネルギー消費量の誤差についても約 3%と僅かとなった。これらの結果から、解析プログラムによる計算結果は、実システムに対して妥当であると判断した。

表2 各システム要素の入出熱量等の比較

日積算または日平均値	実測	解析
GE 延べ稼働時間 (分)	294	294
GE ガス消費量 (m ³)	1.69	1.67
GE 発電量 (kWh)	3.9	3.85
GE 排熱量 (MJ)	45.9	45.1
余剰発電電力量 (kWh)	1.0	0.68
HEX1 交換熱量 (MJ)	43.0	45.1
補助ヘータガス消費 (m ³)	0.3	0.24
配管・槽熱損失 (MJ)	4.1	1.7
1次エネルギー消費量 (MJ)	188.0	181.6

図4 (a) 各種熱出力 (実測値)

図5 (a) 貯湯槽温度 (実測値)

図3 住宅負荷の条件

図4 (b) 各種熱出力 (計算値)

図5 (b) 貯湯槽温度 (計算値)

図6 (a) 循環流量 (実測値)

図7 (a) 熱交換器出入口温度: GE側 (実測値)

図8 (a) 熱交換器出入口温度: 回収側 (実測値)

図6 (b) 循環流量 (計算値)

図7 (b) 熱交換器出入口温度: GE側 (計算値)

図8 (b) 熱交換器出入口温度: 回収側 (計算値)

図9 (a) 核家族住宅 (住宅4) の平日負荷パターン

図9 (b) 老夫婦住宅の平日負荷パターン

(a) 省エネ率, 総合効率と発電機部分負荷率

(b) CGS 電力依存率と発電電力利用率

(c) 発電効率と排熱利用率

図10 定格運転と電力負荷追従運転のシステム性能比較

表3 給湯使用量の設定条件

住宅種別 行為	核家族			老夫婦
	少消費型	標準型	多消費型	
洗面・洗髪	水で洗面	湯で洗面	湯で洗面・洗髪	湯で洗面
湯はり ¹⁰⁾	120ℓ	150ℓ	180ℓ	150ℓ
入浴時	標準型の1/2倍	Default	標準型の2倍	Default
炊事	Default			

※ Default : プログラム SCHEDULE のデフォルト設定

図11 運転方法による年間エネルギー性能比較

4. モデル住宅と住宅負荷

4.1 モデル住宅と対象家族

本論では、東京に建ち次世代省エネ基準を満たす延床面積約130m²の木造二階建てモデル住宅¹⁰⁾を前提に検討を行う。想定した家族構成は、核家族（夫婦と小・中学生）、老夫婦、二世帯（核家族と老夫婦）の3条件とし、これらに対して床暖房を使用する場合（床暖房は居間のみに適用し、エアコン暖房との併用は考えない）と使用しない場合を設定した。核家族で床暖房を使用しない条件については、電力使用量と給湯使用量の各々について、①標準型、②少消費型、③多消費型を想定し、計12の住宅負荷条件を設定した。

住宅の仕様は、家族構成にかかわらず同一のモデル住宅を用いるとし、老夫婦が住む場合には子供部屋の使用がないものとした。

4.2 住宅負荷の算定方法

一般電力負荷は、プログラム SCHEDULE¹¹⁾による解析結果に、一般的に普及していると考えられる家電機器（電話機類やパソコン、AV機器など）や門灯などの外構照明を追加して作成した。核家族に対しては、上記の手順にて作成した電力負荷を標準型とおき、これを基準に建物内外の照明器具や家電機器を現実的なレベルで増減させることによって少消費型、多消費型の負荷を作成した。

空調熱負荷については、一般電力負荷算定時の結果をもとに各季平・休日の室内発熱スケジュールを作成し、熱負荷計算プログラム SMASH¹²⁾を用いて在室空調時（夏期 26℃、冬期 20℃）の空調熱負荷を求めた後、月平均日の負荷を作成した。核家族では、標準型を在室空調、少消費型を朝晩のみ在室空調、多消費型を在室空調＋就寝時ベース空調（就寝時：冷房 28℃、暖房 18℃）として熱負荷算定を行った。また、電気エアコン冷暖房を用いる場合は、最低消費電力、外気温による能力補正や部分負荷特性を加味して消費電力を求め、これと0.5回/hの計画換気（換気扇方式）に対する消費電力を一般電力負荷に加えて、各月の代表日に対する全電力負荷とした。床暖房負荷については、対流暖房より2℃低い設定室温18℃の在室空調を前提に SMASH による熱負荷計算を行って作成した。

給湯負荷は、SCHEDULE を用いて給湯使用量のパターンを作成し、東京の給水温度¹³⁾と使用温度をもとに算定した。給湯用途は、炊事、洗顔・洗髪、湯はり、入浴であり、表3の条件をもとに給湯使用量のパターンを与えた。なお、二世帯住宅の住宅負荷は、核家族と老夫婦の負荷を合成して作成を行った。図9には、核家族住宅（住宅4：後述）と老夫婦住宅の平日の負荷パターンを示す。

5. 発電機の運転方法に関する検討

5.1 発電機の運転条件

CGS 発電機の運転手法としては、定格運転や電主熱従運転、熱主電従運転などがある。2. で述べたように、システムはスケジュール運転とともに貯湯槽の満蓄状態判定をもとに発電機の ON-OFF を行うため、基本的には熱主電従運転である。本章ではこれを前提に、電力負荷追従運転および定格運転を適用する場合のエネルギー性能を解析し、この比較から有効な運転手段を判定する。

電力負荷追従運転では、発電機のエネルギー性能の低下を防ぐために最低部分負荷率を設定する必要がある。この値は予備検討を行って50%と定め⁷⁾、電力負荷が発電機の定格出力の50%を下回る時間帯には、最低部分負荷率50%を維持して発電するとした。

5.2 解析結果と運転方法の選択

まずは、標準的な核家族（住宅4：表4の住宅条件表を参照）住宅に対し、現在市場投入されている発電容量1kW（出力端、発電効率：20%（LHV）、排熱回収効率65%（LHV）、排熱回収熱量11.7MJ/h）、貯湯槽容量150ℓの標準容量を導入する場合を想定して、発電機の運転方法の違いによるエネルギー性能を評価した。検討では、発電電力に対する電力負荷への供給電力の割合を発電電力利用率として定義し、これも評価指標として用いた。

図10に月別および年間システム性能の結果を示す。年間一次エネルギー削減率は、図10(a)に示すように発電機の運転方法に依らず6%程度となった。月別の削減率では、熱負荷の大きい冬期に最も向上して約8%となるが、熱負荷の減少に伴って削減率も低下し、夏期に最低の3%余りとなる。エアコン冷暖房により電力消費量が多くなる冬期および夏期には、電力負荷追従運転を採用しても期間平均の発電機部分負荷率がほぼ100%となり、定格運転と同等の運転状態となる。しかし、中間期には電力負荷追従運転を行う時間数が増加するため、発電機部分負荷率は低下する。この条件では、中間期の平均発電機部分負荷率は、約83%となっている。

一方、定格運転では中間期に余剰電力が生じ、図10(b)に示すように発電電力利用率が低下する。余剰電力を熱変換する際にはエネルギー損失を伴い、加えて貯湯槽への回収排熱量が負荷追従運転を行う場合に比べて増加するため、中間期には貯湯槽の水温が高く維持されて、この期間の槽熱損失が定格運転で0.40MJ、電力負荷追従運転で0.37MJとなり、定格運転で8%増加する。この結果として、定格運転における中間期の排熱利用率は、電力負荷追従運転に比べて約3%低下することとなった（図10(c)）。

このように、発電機の運転方法として電力負荷追従運転を行うと、定格運転に比べ中間期のエネルギー性能に若干の改善が見られるが、年間性能で評価する場合にはその差は極めて僅かである。よって、発電機の運転スケジュールが適正に設定されていれば⁸⁾、二つの運転手法のエネルギー性能は、ほぼ同程度になると考えられる。

上記結果の検証のため、4. で示した計12の住宅負荷条件に対し、電力負荷追従運転および定格運転を適用した場合の解析も行った。本検討では、各住宅負荷に対して3.1 で述べた容量適正化を行い、機器容量を与えている。図11に示すように、各住宅における年間エネルギー性能には、やはり両運転方法間で大きな差は見られない。

これらの結果を踏まえ、かつ現実性を考えると、単純な ON-OFF 制御となる定格運転の方が採用メリットは高いと結論付けられる。

表4 住宅負荷・年間熱電比とシステム装置容量

床暖房の有無	家族種別	凡例名	電力消費	給湯消費	年間電力負荷 (MWh)			年間熱負荷 (GJ)		熱電比* (年間)	発電機容量 (kW)	貯湯槽容量 (L)
					全電力	一般・照明	エアコン	給湯	床暖房			
なし	核家族	住宅1	少	少	3.7	2.6	1.0	9.4	—	0.71	0.5	80
		住宅2	少	標準	3.7	2.6	1.0	13.7	—	1.03	0.6	110
		住宅3	標準	少	5.2	3.9	1.3	9.4	—	0.5	0.6	80
		住宅4	標準	標準	5.2	3.9	1.3	13.7	—	0.73	0.7	110
		住宅5	標準	多	5.2	3.9	1.3	18.8	—	1.01	0.8	150
		住宅6	多	標準	8.0	6.5	1.4	13.7	—	0.48	1.0	110
		住宅7	多	多	8.0	6.5	1.4	18.8	—	0.66	1.2	180
	老夫婦	老夫婦	—	—	3.8	3.0	0.8	10.4	—	0.74	0.2	130
あり	二世帯	二世帯	—	—	9.0	6.9	2.1	24.1	—	0.75	1.4	120
	核家族	住宅4 (床)	標準	標準	5.0	3.9	1.0	13.7	3.7	0.97	0.4	160
	老夫婦	老夫婦 (床)	—	—	3.6	3.0	0.6	10.4	4.5	1.15	0.4	120
	二世帯	二世帯 (床)	—	—	8.6	6.9	1.6	24.1	8.2	1.05	0.8	220

※表中の熱電比はエネルギー消費段階での算定値であり、エアコン冷暖房を用いる場合はエアコン動力を電力負荷側に合算している。

表5 発電機運転スケジュール

季節 凡例名	選択された発電機運転スケジュール (時間帯: ×時 00 分~□時 00 分まで)		
	冬期	中間期	夏期
住宅1	6~7, 17~23	18~23	18~22
住宅2	6~7, 17~23	18~23	17~23
住宅3	6~7, 17~22	18~22	18~22
住宅4	6~7, 17~23	18~23	18~22
住宅5	6~8, 17~23	6~7, 18~23	18~23
住宅6	6~7, 18~22	18~22	18~22
住宅7	6~7, 17~22	18~22	17~22
老夫婦	6~22	6~22	6~22
二世帯	6~7, 17~22	18~22	17~22
住宅4 (床)	6~11, 12~14, 16~23	6~8, 12~13, 17~23	6~8, 17~22
老夫婦 (床)	6~8, 12~13, 17~22	6~8, 12~13, 18~22	17~22
二世帯 (床)	6~14, 16~23	6~8, 17~23	6~7, 17~22

+ 住宅1 × 住宅2 — 住宅3 ■ 住宅4 ◆ 住宅5 ◆ 住宅6
× 住宅7 ▲ 老夫婦 ● 二世帯 □ 住宅4 (床) △ 老夫婦 (床) ○ 二世帯 (床)

図12 システム性能と年間熱電比の相関性

6. 種々の住宅負荷に対するシステム性状

6.1 検討概要

住宅負荷の違いが家庭用 CGS のシステム性状に与える影響を考察するため、4. で示した計 12 の住宅負荷を対象に解析を行った。導入システムでは、発電機は定格運転されるものとし、発電機容量、貯湯槽容量および運転スケジュールについては、容量適正化の処理を行って住宅毎に選定するものとした。

住宅負荷の算出結果と各住宅の年間熱電比 (熱負荷/電力負荷)、さらに解析によって得られた各住宅の発電機容量と貯湯槽容量を表 4 に、選定された各期の発電機運転スケジュールを表 5 に示す。

6.2 年間熱電比とシステム性能の相関性

図 12 に住宅負荷の年間熱電比とシステム性能の関係を示す。図より、一次エネルギー削減率、CO₂排出量削減率および年間 CGS 電力依存率は、年間熱電比との間に非常に強い線形相関を持つことが分かる。年間 CGS 熱依存率については、床暖房を用いる老夫婦住宅を除けば各住宅とも 90% 以上の高い値であるため、システム性能を決める支配要因は CGS 電力依存率となつていえる。また、核家族や老夫婦住宅など、日負荷パターンが異なる種々の住宅負荷を設定したが、結果的として図 12 のように整理できるため、GE 発電機を用いた場合の導入効果 (一次エネルギー削減率、CO₂排出抑制効果) は、基本的には住宅の年間熱電比に依存すると考えて良い。

同図より、床暖房を使用する場合には GE システムは一次エネルギー削減率が若干高くなることが分かる。これは、床暖房を使用する場合には GE 排熱を床暖房に利用できることで発電機の稼働時間が長くなり、CGS 電力依存率が約 6%~8% 高くなるためである。

6.3 機器容量とシステム挙動

図 13 に標準的な核家族 (住宅 4)、老夫婦、二世帯の各住宅に対する 1 月平日のシステム挙動状況を床暖房の有無別に示す。

図 13 および表 5 より、床暖房を用いない場合には、電気・熱需要の高い時間帯となる朝と晩を中心に発電機が稼働し、給湯需要が増大する夜間にむけては、夕方の 17 時あたりから短時間で貯湯されているのが分かる。一方、床暖房を用いる場合は、朝から夜にかけて断続的に現れる床暖房需要に合わせて発電機が稼働するため、これに伴って排熱回収による貯湯も長時間に亘って行われている。

図 13 にて補助バーナの稼働状況を見ると、床暖房を用いない場合は全く稼働しておらず、床暖房を用いる場合には床暖房の立ち上がり時間帯である朝方と、夜に貯湯槽の残湯が無くなったあとに稼働している。床暖房を用いる場合は、用いない場合よりも小さな発電機容量となるがゆえに排熱出力も小さくなり、加えて CGS 排熱が床暖房にも利用されるため、貯湯槽に残湯が無くなったあとの入浴では、補助バーナによる給湯に頼らざるを得ない状況となる。

床暖房を用いる場合は、結果として発電機稼働の長時間化による CGS 電力依存率の向上がシステム性能の向上に繋がっている。発電機の長時間稼働のためには、余剰電力の発生を極力抑制する必要がある。床暖房を用いない場合よりも発電機容量が小さくなる。また、発電機の小容量化に伴って排熱出力も小さくなるため、夜間稼働時の回収排熱による直接給湯熱量も減少する。これを補うために、貯湯能力を増加させて昼から夜にかけて断続的に回収される CGS 排熱を夜間に持ち越す必要が生じ、貯湯槽容量が大型化する。

7. 家庭用 CGS の容量設計法の提案

7.1 容量選定係数の定義

本論で提案する家庭用 CGS の装置容量選定法は、一次エネルギー消費削減を主眼に置き、以下のように設計パラメータを考えた。

(1) 発電機容量

標準的な核家族住宅(住宅4)への GE システムの導入に対し、種々の発電機容量を与えた場合の月別および年間システム性能を図14に示す。なお、貯湯槽容量と発電機の運転スケジュールについては、発電機容量ごとに容量適正化処理を行って選定されている。

図より、各発電機容量に対する一次エネルギー削減率は、その差が冬期・夏期よりも中間期に比較的顕著に現れるため、中間期の性能が年間性能を決定づけると考えられる。年間性能は電力依存率の推移と連動しており、この電力依存率は余剰電力量に依存している。そこで、発電機容量は中間期の電力負荷を対象に、日積算値というよりも発電出力との関連に着目して定めるのが適当と考えて、発電機容量の選定係数 R_{ge} を(5)式のように定義した。 R_{ge} は、「中間期の最大時間電力負荷」に対する「発電機定格出力」の割合を意味する。

(2) 貯湯槽容量

標準的な核家族住宅(住宅4)への GE システムの導入に対し、種々の貯湯槽容量を与えた場合の月別および年間システム性能を図

15に示す。なお、発電機容量とその運転スケジュールは、設定した貯湯槽容量ごとに容量適正化処理を行って選定されている。

図より、各槽容量に対する一次エネルギー削減率は、冬期において特に大きな差がみられ、これは電力依存率もさることながら、冬期の CGS 熱依存率の低下にも関係が深いと考えられる。そこで、貯湯槽容量は冬期の日給湯負荷を対象に定めるのが適当と考え、貯湯槽容量の選定係数 R_{st} を(6)式のように定義した。この R_{st} は、「冬期の最大日給湯負荷」に対する「貯湯槽の蓄熱容量」の割合を意味する。

$$R_{ge} = P_{ge} / L_{e, md, hour} \quad (5)$$

$$R_{st} = C \rho \cdot V_{st} \cdot (T_{st, win} - T_{sp, min}) / L_{d, win, day} \quad (6)$$

7.2 容量設計法の提案

(1) 発電容量の選定

図16に、発電機容量の選定係数 R_{ge} と一次エネルギー削減率の関係を床暖房の有無別に示す。図中のプロットは、核家族と老夫婦および二世帯住宅において種々の発電機容量を与えた場合の結果であり、それぞれの発電容量に対する貯湯槽容量と発電機の運転スケジュールは、容量適正化処理を行って選定されている。

図より、床暖房なしでは R_{ge} が 0.6 前後、床暖房ありでは 0.4 前後でエネルギー削減率が極大となる。つまり、この値を用いて種々

図13 3種の住宅に対する冬期のシステム挙動(1月の平日)

の導入住宅に対する発電機容量が適正に導出できる。また、本条件下では発電機容量が床暖房採用時に3割程度小さくなる。これは年間熱電比が大きくなると Rge 値が小さくなる傾向を持つことを表す。

(2) 貯湯槽容量の選定

図17には、貯湯槽容量の選定係数 Rst と一次エネルギー削減率の関係を床暖房の有無別に示した。図中のプロットは、図16で用いた解析結果を貯湯槽容量基準で再整理したものである。図より、床暖房なしでは Rst が0.6前後(老夫婦住宅では0.7余りと若干大きめ)、床暖房ありでは0.8前後でエネルギー削減率が頭打ちとなる。よって、この値を用いることで貯湯槽容量を種々の導入住宅に対して適正に選定できると考えられる。また、床暖房採用時には貯湯槽容量が3割程度大きくなっており、これは年間熱電比が大きくなると Rst の値も大きくなる傾向があることを表している。

7.3 機器容量設計法の吟味

設計法の妥当性の検討を行うため、表4の各住宅負荷に対し、発電機1kW、貯湯槽150Lの標準容量システムを導入した場合と、床暖房あり: $Rge = Rst = 0.6$ 、床暖房なし: $Rge = 0.4$ 、 $Rst = 0.8$ で設計した場合(以下、容量適正化システムと呼ぶ)の解析を行った。

図18には、各住宅に標準容量システムを導入する条件で求めた Rge 、 Rst とその適正值との差である ΔRge 、 ΔRst (注8) と、容量適正化システムからの一次エネルギー削減率の低下率の関係を示す。なお、図中の縦軸負側が削減率低下を表す。図より、 Rge や Rst が適正值から離れるほど一次エネルギー削減率の低下割合も大きくなっている。この結果より、本論の検討範囲では Rge および Rst を設計パラメータとして用い

ること、そして本論で示した Rge 、 Rst の適正值を用いた設計が、概算設計としては妥当であったと判断できる。

また、図18(a)では、 ΔRge と一次エネルギー削減率の低下割合に比例関係が見られる。これは、貯湯槽の標準容量(150L)と適正貯湯容量の差が特に大きくなる住宅1や住宅3、二世帯(床)のケースも含んだ上での結果である。一方、図18(b)では ΔRst が同値であっても一次エネルギー削減率の低下割合には比較的大きな差が見られるケースが存在する。これらの結果は、システムの一次エネルギー性能を決める要因としては、貯湯槽容量の適正化よりも発電機容量を適正に与えることの方が影響が大きいことを指し示している。

図14 発電機容量による性能変化(住宅4)

図15 貯湯槽容量による性能変化(住宅4)

図16(a) Rge とエネルギー削減率(床暖房なし)

図17(a) Rst とエネルギー削減率(床暖房なし)

図18(a) ΔRge とエネルギー削減率の関係

図16(b) Rge とエネルギー削減率(床暖房あり)

図17(b) Rst とエネルギー削減率(床暖房あり)

図18(b) ΔRst とエネルギー削減率の関係

8. まとめ

家庭用 CGS の解析プログラムを開発し、システムの導入効果予測手法と容量設計手法(発電機容量、貯湯槽容量の選定方法)の提案を目的に種々の検討を行って、以下の結論を得た。

- (1) システム実証試験データとの比較から、解析結果は実システムの挙動状態と良い一致を示し、日積算一次エネルギー消費量の誤差も約 3%と僅かであったため、解析プログラムは妥当と判断した。
- (2) 発電機の運転方法として定格運転と電力負荷追従運転を設定し、種々の住宅負荷(核家族や老夫婦、二世帯住宅など)を対象に解析を行った。年間一次エネルギー削減率には運転方法による大きな差は見られず、制御が簡易となる定格運転が優位と結論づけた。
- (3) 種々の住宅負荷に対して貯湯槽容量と発電機容量さらには定格運転を前提に発電機の運転スケジュールを適正化してシステム性能を分析した。年間エネルギー性能と年間熱電比の間には、家族構成に依らず非常に強い線形相関が見られたため、システムの導入効果は住宅負荷の年間熱電比を以て推定できることを示した。
- (4) 核家族住宅を対象に、発電機容量を 0.2kW~1.6kW で変化させ、また貯湯槽容量と定格運転を前提に発電機の運転スケジュールの適正化を行って解析した。条件間では中間期のエネルギー性能に比較的大きな差がみられ、これは CGS 電力依存率に依存した。そこで、中間期の電力負荷と発電機出力の関係から発電機容量を定めることを考え、発電容量の選定係数として「中間期の最大時間電力負荷」に対する「発電機定格出力」の割合である R_{ge} を提案した。
- (5) 核家族住宅を対象に、貯湯槽容量を 50 ℓ~450 ℓ で変化させ、また発電機容量と定格運転を前提にその運転スケジュールの適正化を行って解析した。条件間では、冬期のエネルギー性能に比較的大きな差がみられ、これには特に CGS 熱依存率の変化が大きな影響を与えていた。そこで、貯湯槽容量を冬期の日給湯負荷を対象に定めることを考え、槽容量の選定係数として「冬期の最大日給湯負荷」に対する「貯湯槽の蓄熱容量」の割合である R_{st} を提案した。
- (6) 種々の住宅負荷を対象に、様々な発電機容量と貯湯槽容量を仮定して解析を行い、 R_{ge} および R_{st} と一次エネルギー削減率の関係性を検討した。床暖房ありでは $R_{ge} = R_{st} = 0.6$ 、床暖房なしでは $R_{ge} = 0.4$ 、 $R_{st} = 0.8$ あたりにエネルギー性能が極大または頭打ちとなることを示し、この値を概略設計に用いることを提案した。
- (7) 種々の住宅負荷に標準システム容量(発電機 1kW、貯湯槽 150ℓ)を与えて解析を行い、この場合の R_{ge} と R_{st} を算定して容量適正化システム ((6)で示した適正值を用いて設計したもの)とエネルギー性能を比較した。その結果、 R_{ge} 、 R_{st} が提案した適正值から離れるほどシステムの年間一次エネルギー削減率は低下するという傾向が確認できたため、この設計法は妥当であると判断した。

【謝辞】

本論文の作成にあたっては、東邦ガス株式会社に貴重な御意見を頂いた。また本研究の一部は、平成 15~17 年度科学研究費補助金(若手研究(B)、課題番号 15760438、代表者:田中英紀)の補助を受けて実施された。末尾ながら、ここに記して謝意を表す。

—記号—

R_{th} : 排熱利用率(-), σ_e : CGS 電力依存率(-), σ_h : CGS 熱依存率(-), CGS_{eff} : CGS 総合効率(-), Q_{wh} : GE 回収排熱量(MJ), Q_{ch} : 電気ヒータ加熱量(MJ), Q_{rd} : ラジエータ処理熱量(MJ), Q_{loss} : 貯湯槽損失熱量(MJ), Q_{bu} : ガスパナ加熱量(MJ), Q_{ld-d} : 給湯熱負荷(MJ), Q_{ld-f} : 床暖房負荷(MJ), E_{ld} : 電力負荷(kWh), E_{ui} : 買電量(kWh), E_{ge} : GE 発電量(kWh), E_{per} : 排熱回収用ポンプ(2 台分)電力消費量(kWh), E_{eh} : 電気ヒータ送電量(kWh), G_{ge} : GE ガス消費量

(m^3), P_{ge} : GE 定格出力(kWh), R_{ge} : 発電容量選定係数(-), R_{th} : 貯湯槽容量選定係数(-), L_e : 最大電力負荷(kWh), L_d : 最大給湯負荷(MJ), C_p : 水の容積比熱(kJ/m 3), V_{st} : 貯湯槽容積(m^3), T_d : 貯湯温度(K), T_p : 給水温度(K)
添字— hour: 時間積算, day: 日積算, win: 冬期, md: 中間期, min: 最低

- 注 1) (財)新エネルギー財団: 経済産業省の固体高分子形燃料電池システム実証等研究費補助金による「定置用燃料電池実証研究」, 2002~2004 など
- 注 2) 定格出力または最低部分負荷設定を維持して発電を行う場合、発電電力が電力負荷を上回る時間帯には余剰発電電力が生じる。この余剰電力は、エネルギーやエクセルギー損失低減の観点からは逆潮流を行うのが望ましいが、契約上の制限あるいは逆潮流契約が可能になったとしても経済性の観点からは成立し得ない状況にあるため、本論では余剰発電電力を熱変換して処理するのが現実的と考えて、これを仮定した。
- 注 3) 総当たり計算では、発電容量は 0.2kW~1.6kW の範囲を 0.1kW 刻みで、貯湯槽容量は 50 ℓ~450 ℓ の範囲を 10 ℓ刻みで条件を与えている。運転スケジュールは、24 時間連続運転と 40 通り以上の間欠運転スケジュール(夕~晩型、朝・夕~晩型、朝・昼・夕~晩型を想定し、朝および昼は食事の時間帯を中心に、夕~晩は 15 時から就寝後数時間迄の時間帯で組み合わせを設定)の中から、冬期、夏期、中間期の季節別を選択される。
- 注 4) 1kW のガスエンジン発電機の試験データを参考に仮定した特性曲線。
- 注 5) 一次エネルギー換算値は、商用電力: 9.83MJ/kWh(全火力平均)、都市ガス: 46.05MJ/Nm 3 を用いた。二酸化炭素排出量は、電力: 0.657kg-CO $_2$ (全火力平均)、都市ガス: 2.15kg-CO $_2$ を用いた。
- 注 6) 東邦ガス㈱の環境試験室にて行われた試験データをもとにしている。実測データは秒単位であるが、分単位に整理して利用している。なお、追焚き負荷は専用ガスパナで処理され、排熱利用系統には接続されていない。電力量は電力計を、ガス消費量はガス流量計を用いて計測し、各種熱量は温度差と循環流量から算定している。循環ポンプ動力は計測されておらず、実測データは入手できなかった。
- 注 7) 最低部分負荷率として 20%~70%の範囲を 10%刻みで与えて予備検討を行った結果、50%の条件でエネルギー性能が最も高くなった。
- 注 8) 解析プログラムでは、発電機の運転スケジュールを予め設定した多くの組み合わせから最もエネルギー性能が高くなるものを選択するため、運転スケジュールは適正化されているとする。また、市販機器についても、人工知能(AI)等の学習機能により、発電機運転スケジュールの適正化を図っており、実機においても本節の仮定は成り立つと考えている。
- 注 9) 発電機 1kW、貯湯槽 150ℓの基準システム条件における R_{ge} と R_{st} の値から容量適正化システムの R_{ge} と R_{st} の値をそれぞれ差し引いたもの。

【参考文献】

- 1) 滝本桂嗣: 家庭用コージェネレーションシステムフィールドテスト結果、コージェネレーション, Vol.16, No.1, pp.39-43, 2001
- 2) Inaka H., et al.: The development of effective heat and power use technology for residential in a PEFC co-generation system, Journal of Power Sources, 106, pp.60-67, 2002
- 3) 鶴飼邦弘ほか 3 名: 家庭用 PEFC コージェネレーション/水素生成器開発、エネルギー・資源, Vol.23, No.1, pp.68-71, 2002
- 4) (財)産業創造研究所, 家庭設置型小規模分散型エネルギーシステムに関する調査報告書, pp.37-59, 1998.3
- 5) 日本建築学会・日本環境管理学会編: 建築の次世代エネルギー源, 井上書院, pp.26-28, 2002.12
- 6) 田村英雄監修: 固体高分子形燃料電池のすべて, 電子とイオンの機能化学シリーズ Vol.4, NTS, pp.301-325, 2003.10
- 7) ASHRAE: HVAC2 TOOLKIT: A Toolkit for Secondary HVAC System Energy Calculations, pp.4.8-4.8, 1993
- 8) 中原信生ほか 4 名: 建築学大系 27 (設備計画), 彰国社, p.285, 1982
- 9) (社)空気調和・衛生工学会, SHASE-M0001-1-1994, 都市ガスによるコージェネレーションシステム計画・設計と評価, pp.169-170, 1994.6
- 10) (社)空気調和・衛生工学会: 空気調和・衛生工学会シンポジウム「住宅における生活スケジュールとエネルギー消費」テキスト, 2000.3
- 11) (社)空気調和・衛生工学会: 空気調和・衛生工学会シンポジウム「住宅における生活スケジュールとエネルギー消費」, 配布プログラム「SCHEDULE Ver.2.0」, 2000.3
- 12) (財)建築環境・省エネルギー機構: 住宅用熱負荷計算プログラム SMASH for Windows, Ver.2, 2000
- 13) 太陽エネルギー利用ハンドブック編集委員会: 太陽エネルギー利用ハンドブック, 太陽エネルギー学会, p.621
- 14) 徳島直子ほか 8 名: 住宅の浴槽からの排水熱利用に関する実態調査 その 1~その 2, 空気調和・衛生工学会論文集 II, pp.1045-1052, 1999

(2004年9月10日原稿受理, 2005年5月29日採用決定)