

業務用コージェネレーションシステムの 性能評価プログラムと設計手法の構築に関する研究

伊藤 竜一

1. はじめに

日本では 2017 年 4 月の省エネルギー基準の改正により、2000 m²以上の建築物は省エネルギー基準に適合しているか確認することが義務づけられている。その中で電力と熱を同時に供給するコージェネレーション設備(以下、CGU)は総合効率が高く、建築物の省エネルギー化の重要な技術の 1 つとなっている。現在、CGU の排熱利用システムを含むコージェネレーション設備(以下、CGS)は建築物の電力や熱の需要に合わせて様々な組み合わせで導入されているため、この様々な組み合わせがある CGS の導入効果を設計段階において適切に評価し、最適な導入方法を検討することが必要不可欠である。これまで既往研究¹⁾において、CGS の省エネルギー効果を算定する簡易的なシミュレーションプログラムを作成したが、実稼働状況における性能(以下、実働性能)や運転実態等について不明な点も多かった。

そこで本研究では、CGS の導入建物へのアンケート調査及び実測調査等を行うことで、実態を捉える計算方法を検討し、設計者の工夫も評価できるプログラムを構築する。さらに構築したプログラムを活用し、CGS を簡易に設計する手法を明らかにすることを目的とする。

2. CGS の実態調査

2.1 制御手法及び管理実態等に関するアンケート調査

CGS の評価対象となる範囲や制御手法等を体系的にまとめ、次節に示すヒアリング調査先の選定のためにアンケート調査を実施した。

CGS を導入している物件にアンケート調査票を送付し、回答数は 85 件であった。建物用途及び発電出力制御の集計結果を表 1 に示す。構成比は各件数を総件数 127 で除した値である。なお建物が複合施設の場合、複数回答可能となっており、ここでは複合施設の用途は個別に集計している。最も多い用途は単独の病院で構成比が 18.1%であり、次いで複合施設の事務所が多く、構成比が 11.0%であった。続いて発電出力制御に関しては、常時定格運転させている建物が最も多く 82 件だった。建物の電力負荷に対して小さい容量の機器を導入するケースが多いためであると考えられる。常

時定格運転に加えて、電力負荷追従運転の 27 件も含めると、全体の 90%程度の建物で常時定格運転もしくは電力負荷追従運転を行っていた。一方で熱負荷追従運転させている建物は全体の 4%程度であった。このことより、発電出力制御は常時定格運転及び電力負荷追従運転を評価できればほぼすべての建物を評価できる。

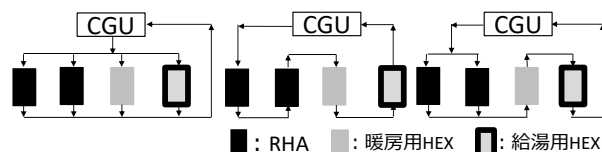
2.2 運用状況等に関するヒアリング調査

管理者に直接聞き取り調査を行い、実際のシステムを視察することで、アンケート調査にて得られなかったシステム構成等を把握し、実測データ収集への協力を依頼することを目的にヒアリング調査を実施した。

アンケート調査の回収物件 85 件の中から 14 件選定してヒアリング調査を行った。その結果、CGU の主要な排熱利用用途は冷房、暖房、給湯であり、冷房に排熱を利用する場合は排熱投入型吸収式冷温水機(以下、RHA)が導入されていることが分かった。また CGU の排熱利用機器の接続方法は物件毎に若干異なっていた。RHA が複数台導入される場合、接続方法は全て並列、全て直列、直列(RHA のみ並列)の 3 種類に分類することができる。そのシステム概略図を図 1 に示す。

表 1 建物用途及び発電出力制御の集計結果

建物用途	用途		発電出力制御				
	件数[件]	構成比	常時定格運転	電力負荷追従運転	熱負荷追従運転	その他	
単独	事務所	10	7.9%	3	3	3	1
	病院	23	18.1%	12	9	0	2
	学校	9	7.1%	7	2	0	0
	ホテル	4	3.1%	3	0	1	0
	飲食店	1	0.8%	1	0	0	0
	福祉施設	4	3.1%	3	0	0	1
	その他	14	11.0%	8	5	0	1
	合計	127	100%	82	27	4	14
複合	事務所	14	11.0%	10	2	0	2
	病院	2	1.6%	1	1	0	0
	学校	3	2.4%	3	0	0	0
	ホテル	3	2.4%	2	0	0	1
	物販店舗	10	7.9%	8	1	0	1
	飲食店	11	8.7%	9	1	0	1
	温浴施設	1	0.8%	1	0	0	0
	会議場・ホール	8	6.3%	6	1	0	1
	集合住宅	1	0.8%	0	0	0	1
	その他	9	7.1%	5	2	0	2
合計	127	100%	82	27	4	14	



(左:全て直列、中央:全て並列、右:直列(RHAのみ並列))

2.3 実働性能解析に向けた実測調査

プログラム開発の基礎データを収集するために実測値の分析を行った。ヒアリング調査を行った14件のうち9件の実測値を得た。

(1) CGU 効率

病院 J の CGU の夏期、冬期の発電効率と排熱回収効率の比較を図 2 に示す。図 2 より、発電効率の実測値はカタログ値と概ね一致していることがわかる。一方で、排熱回収効率の実測値は夏期で 1.5%、冬期で 5.1%程カタログ値よりも低い。冬期の方が実測値とカタログ値の乖離が発生していることから配管からの熱損失の影響が大きいと考えられる。

(2) 起動特性

病院 J の CGU の起動時の発電出力、排熱出力、ガス消費量の定格値に対する出力(以下、定格比)を図 3 に示す。起動時は各出力が緩やかに上昇するため、定格比が 100%に達するまでに 10 分以上費やしている。なお停止時の定格比は 100%を下回ることがほとんどなかったため、停止特性の影響は小さいと考えられる。

(3) 補機動力特性

商業施設 T の各補機消費電力量と発電量の推移を図 4 に示す。本体補機は CGU が運転していない待機段階にも消費電力が発生している。このように補機毎に特性が異なっていると想定されるため、ポンプやファン等を切り分けて補機毎に精緻に計算する必要がある。

(4) RHA 特性

病院 J の負荷率と投入排熱量の排熱温水入口温度別の相関を図 5 に示す。カタログ特性のように RHA の投入排熱量は RHA の負荷率によって変化すると知られているが、排熱温水入口温度が低下するほどカタログ特性と実測値に乖離が生じている。同様の傾向が冷却水入口温度によっても見られた。

3. CGS の性能評価プログラムの開発

既往研究のプログラムを参考に、CGS の性能評価を行うシミュレーションプログラム(以下、CGSSP)を開発した。CGSSP は前章の実態調査に基づいて実態に即した計算手法を構築しており、設計者の工夫も評価できるプログラムである。本プログラムは排熱回路の温度や補機動力等の細部まで計算することで実運用に近い評価を目指している。前章の実態調査結果を基に構築した計算法の概要を表 2 に示す。

開発した CGSSP の計算結果と実測値の比較を行うことで精度を確認する。比較対象は実測値が比較的揃っている病院 J を用いた。精度検証の結果を表 3 に

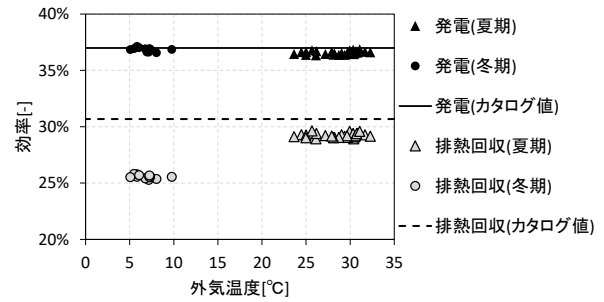


図 2 夏期、冬期の実測値とカタログ値の比較

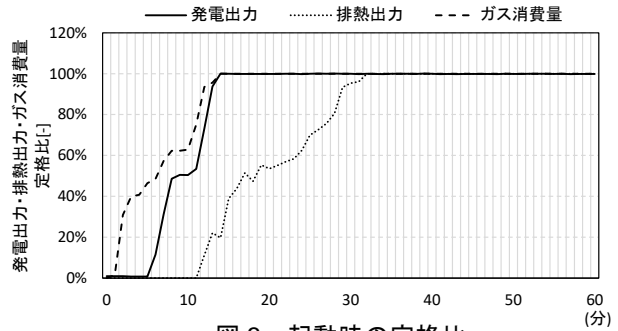


図 3 起動時の定格比

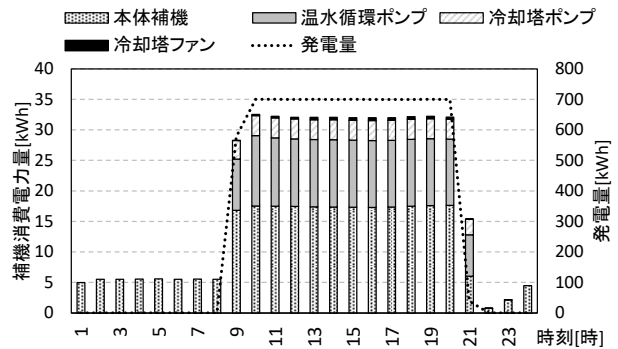


図 4 各補機消費電力量と発電量の推移

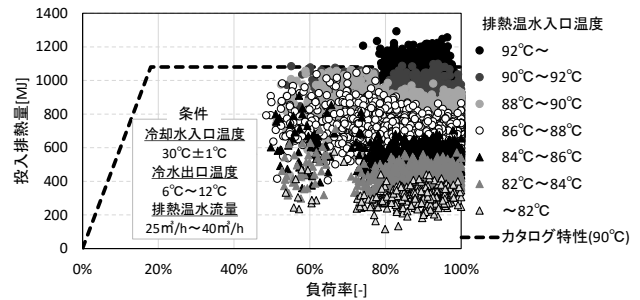


図 5 排熱温水入口温度と投入排熱量

表 2 構築した計算法の概要

項目	詳細
配管熱損失	外気温度と配管内温度の差に応じて熱損失を計算
起動特性	実機から取り出した起動特性(ガス消費量・発電量・排熱回収量の低下)を考慮
補機動力特性	実測値分析結果やカタログ値から補機動力を計算
RHA特性	排熱入口温度、冷却水入口温度、排温水流量に応じた排熱利用特性を考慮
温度制御	排熱の戻り温度を一定に保つように排熱利用量を制限
接続方法	排熱利用先の優先順位や機器の接続方法に応じて、排熱温度及び排熱利用量を計算

示す。実測値に対する計算値の誤差は年間発電量が-0.5%、年間ガス消費量が 4.6%と高い精度を示している。

4. CGS の設計手法の構築

開発した CGSSP を活用することで、CGS の設計手法を構築する。そこで以下に示す項目で検討を行った。なお、計算対象は前章と同様に病院 J としている。

(1) CGU 容量

CGU の導入台数を固定して容量のみを変化させた場合、省エネルギー効果がどの程度変化するのか検討する。計算結果の年間省エネルギー量及び年間余剰排熱率を図 6 に示す。ケース名である横軸の倍率を 370kW に乗じた容量の CGU を導入している。例えばケース 5 は 370kW を 5 倍した 1850kW の CGU を 1 台導入することを表す。また余剰排熱率とは排熱回収量に対する余剰排熱量の割合である。図 6 より最も省エネルギー量が大きかったのはケース 1 だった。ケース 1 の余剰排熱率は 14% であり、最も省エネルギー効果が大きかったケースは余剰排熱量が全くなく排熱を使い切っている時ではないことがわかった。このように、省エネルギー効果と余剰排熱率には密接な関係があると考えられる。

以上の容量を変化させる検討において、事務所負荷等の様々な負荷を入力して計算したところ、図 7 の年間余剰排熱率と年間省エネ率の相関が得られた。なお省エネ率とは CGS 導入前のエネルギー消費量に対する CGS 導入後の省エネルギー量の割合である。図 7 より省エネ率が大きい余剰排熱率は 0% の時ではなく、4%~10% の時であることがわかった。そこで排熱と熱負荷の比率と年間余剰排熱率の相関を図 8 に示す。排熱と熱負荷の比率とは年間日平均熱負荷を年間日平均排熱回収量で除した値である。図 8 に示すように、排熱と熱負荷の比率が小さいほど余剰排熱率が増加している。これは熱負荷に対して CGU の排熱回収量が余分に発生しており、排熱を使い切れずに放熱するからである。逆に排熱と熱負荷の比率が大きいほど余剰排熱率が小さくなって 0% に近づいている。これは CGU の排熱回収量に対して熱負荷が潤沢であり、排熱を安定的に使い切っているためである。なお、余剰排熱率が 0% のケースは、熱負荷に対して過度に CGU 容量が大きく、年間を通して CGU が稼働判定にならずに停止している結果を含むために除外している。図 8 から得られた指数関数の式 1 を活用することで CGU 容量選定の指標を作成することを目指す。

$$y = 0.5195e^{-0.862x} \quad (式 1)$$

y : 余剰排熱率 [-]、e : ネイピア数 [-]

x : 排熱と熱負荷の比率 [-]

表 3 精度検証の結果

項目	単位	実測値	計算値	誤差
年間運転台数	台	6069	5724	-5.7%
年間発電量	MWh	2105	2095	-0.5%
年間排熱回収量	GJ	-	6237	-
年間有効排熱回収量	GJ	5895	5359	-9.1%
年間ガス消費量	GJ	20774	21738	4.6%
年間冷房排熱利用量	GJ	1771	2043	15%
年間暖房排熱利用量	GJ	2756	2587	-6.1%
年間給湯排熱利用量	GJ	767	659	-14%

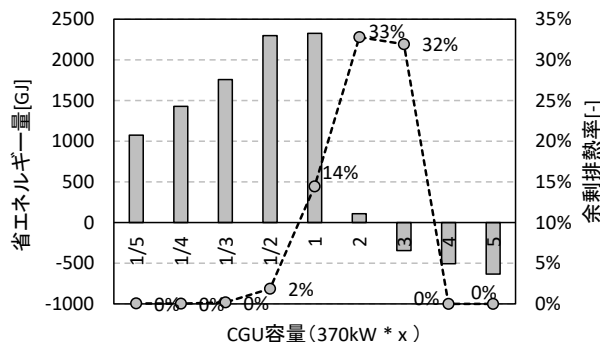


図 6 年間省エネルギー量と年間余剰排熱率

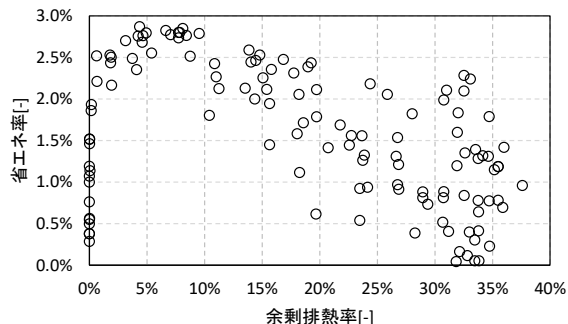


図 7 年間余剰排熱率と年間省エネ率の相関

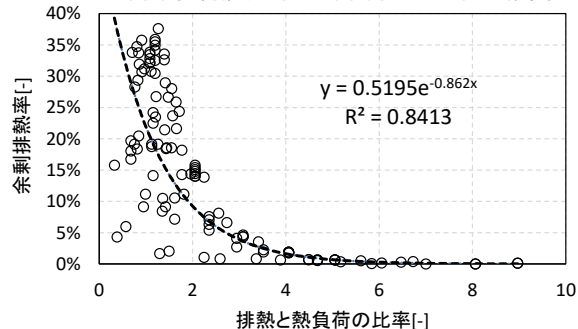


図 8 排熱と熱負荷の比率と年間余剰排熱率の相関

上述のように省エネルギー効果が大きかったケースは余剰排熱率が 4%~10% の範囲であったため、式 1 の y に 0.04 と 0.10 を代入したときの x を解いた結果を以下に示す。

y = 0.04 の場合 : x = 1.249、y = 0.10 の場合 : x = 0.771

さらに x は排熱と熱負荷の比率であるため、以下の式 2、3 を得ることができる。

$$y = 0.04 \text{ の場合 : } Q_{CGU,low} = Q_{bldg}/1.249 \quad (式 2)$$

$$y = 0.10 \text{ の場合 : } Q_{CGU,up} = Q_{bldg}/0.771 \quad (式 3)$$

$Q_{CGU,low}$: 定格排熱回収量の下限 [kW]

$Q_{CGU,up}$: 定格排熱回収量の上限 [kW]

Q_{bldg} : 年間日平均熱負荷 [kW]

以上より、年間日平均熱負荷を式 2、式 3 に入力することで、導入する CGU の容量を選定する上で、省エネルギー効果を確保できる定格排熱回収量の範囲を把握することができる。さらに電主運転において、カタログ資料²⁾より CGU を定格運転させた方が高効率運転を見込めることがわかっているため、定格排熱回収量の範囲を把握した後、年間日平均電力負荷より小さい発電容量である CGU をカタログ資料から選定することで、最適な CGU 容量を選定することができる。

(2) CGU 台数

導入する CGU 容量が決まった際、その容量を台数分割するか否かで省エネルギー効果がどの程度変化するかについて検討する。計算結果の年間省エネルギー量を図 9 に示す。ケース名である横軸は 370kW を台数分割する数である。例えばケース 10 は 37kW の容量の CGU を 10 台導入することを表す。図 9 より分割台数が 4 台までは台数の増加とともに省エネルギー効果が大きくなっている。しかし台数を 5 台以上に増やしても省エネルギー効果は変わらないことがわかった。

(3) 熱利用システム

排熱利用機器の接続方法、利用優先順位及び温度制御に関して、熱利用システムの違いを検討する。計算結果の年間省エネルギー量及び年間冷房排熱利用割合を図 10 に示す。横軸のケース名の最初の文字は接続方法を示しており、P は全て並列、S は全て直列、N は直列(RHA のみ並列)を表す。中央の文字は利用優先順位を示しており、H が暖房給湯優先、C が冷房優先を表す。最後の数字は温度制御を示しており、0 が温度制御無し、1 が温度制御有りを表している。温度制御無しのケースを比較してわかる通り、接続方法や利用優先順位によって省エネルギー効果は変化しない。しかし、顕著に省エネルギー量に差が出ているのは、ケース名に「C-1」が付いている冷房優先で温度制御有りのケースである。冷房優先とした場合でも温度制御をしない場合には、暖房・給湯の排温水利用温度レベルが低いために排温水回路全体の温度レベルが低下し、冷房に投入できる排熱量が減少する。その結果、暖房・給湯に多くの排熱が投入されることになる。したがって、冷房優先かつ温度制御を導入したケースのみ冷房排熱利用割合が増加している。この場合、暖房・給湯に投入される排熱量が減少するが、COP の高い冷房に排熱を投入するより暖房・給湯に投入した方が省エネルギー効果は高いため、冷房優先かつ温度制御有りのケースの省エネルギー量が減少する結果となっている。

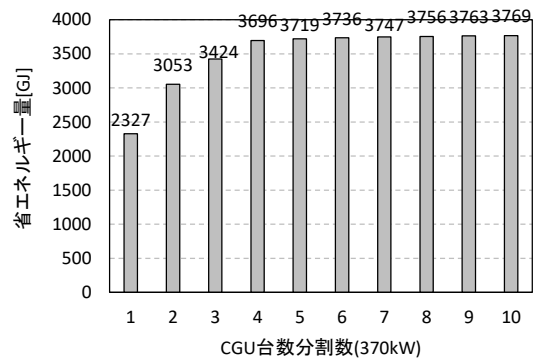


図 9 年間省エネルギー量

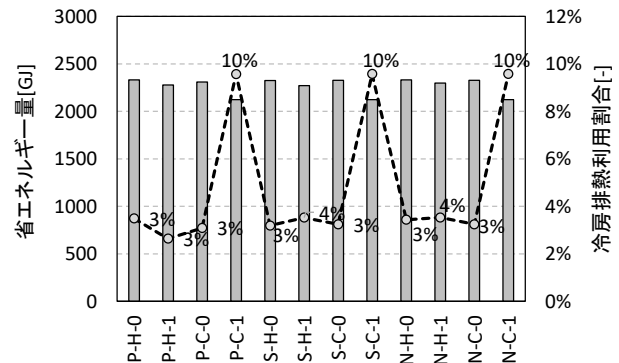


図 10 年間省エネルギー量と年間冷房排熱利用割合

以上の結果より、省エネルギー効果を確保できる簡易的な CGS の設計手法を示す。なおヒアリング調査より、CGS 導入前の設計段階において導入対象建物の年間日負荷の平均値は用意されているとわかっている。

- ① 式 2 及び式 3 に年間日熱負荷の平均値を入力することで、適切な CGU の定格排熱回収量の範囲を決定する。
- ② カタログ資料から①の範囲を満たし、年間日平均電力負荷より小さい発電容量の CGU を選択する。
- ③ CGU の設置スペース及びコストに余裕がある場合は②で決定した容量を 4 台まで台数分割する。
- ④ 排熱利用機器の接続方法は考慮しなくてよい。
- ⑤ 温度制御は導入しない方がよいが、冷房への排熱利用を重視する場合は、冷房優先にして温度制御を導入した方がよい。

5. おわりに

本研究では、CGS の実態調査を基に CGSSP の構築を行うことで、簡易的な CGS の設計手法を提案した。ホテル、商業施設、スポーツ施設等の多数の建物用途の検討に関しては、今後の検討の余地がある。

【参考文献】

- 1) 坂口他:業務用コージェネレーションシステムの性能評価手法の開発-シミュレーションプログラムの開発と感度解析- 日本建築学会研究報告 九州支部、2016年3月
- 2) クリーンエネルギー編集部編:年間「グリーンエネルギー」別冊天然ガスコージェネレーション機器データ 2014、日本工業出版、2014年4月