大学研究施設に導入したリン酸型燃料電池コージェネレーションシステムの性能評価

STUDY ON THE CGS PERFORMANCE AND EVALUATION OF PHOSPHORIC ACID FUEL CELL IN THE RESEARCH FACILITIES OF THE UNIVERSITY

佐藤久明 — * 1 浅野良晴 — * 2
岩井一博 — * 3

Hisaaki SATO — * 1 Yoshiharu ASANO — * 2
Kazuhiro IWAI — * 3

キーワード：
研究機関, リン酸型燃料電池 CGS, 太陽光発電, 地下水熱利用, システム COP

Keywords:
Research facilities, Phosphoric acid fuel cell CGS, Solar photovoltaic generation, Ground water heat utilization system, System COP

It is important to effectively utilize the waste heat from the electric generator in order to achieve high overall energy efficiency of cogeneration system (CGS). To examine the energy conservation efficiency of CGS on the actual situation, we have researched the operative situation of the PAFC-CGS that has been installed in the new building in the university. As a result, the primary energy consumption of the building was found to be 52.8% less compared to the benchmarks of DECC. And the annual average of the thermal efficiency of the PAFC-CGS was found to be 0.54.

1. はじめに

地球温暖化を背景に、民生部門の低炭素化・省エネルギー化が必要不可欠であり、有効な対策が求められる。現在建物の省エネルギー化に寄与する各種技術が存在し、それらを導入することで一定の性能を確保する事が可能である。しかし、様々な条件が時々刻々と変化する実際の運用においては、設計時に想定された性能を発揮できない事が少なくない。よって、導入された省エネルギー技術の性能を定量的に把握・評価することが極めて重要な課題となる。

省エネルギー及び商用系統電力の負荷平準化を実現する上で、排熱の有効利用が可能なコージェネレーションシステム（以下、CGS）が注目されている。CGS はオンサイトで発電すると同時に排熱を建物の冷暖房等に利用することで、高いエネルギー利用効率を実現することが可能である¹⁾。CGS の効果を最大限発揮するには、設計時のみならず導入後の時刻別電力負荷及び熱負荷変動の実態を把握し、最適な運用方法を検討していくことが重要である。

大学施設における CGS 及びエネルギー消費量に関する既往研究として、三瀬ら²⁾、³⁾は慶應義塾大学キャンパスの CGS を対象に、排熱の建物間協調により中間期における排熱利用効率の改善可能性を論じている。さらに時刻別の電力・冷暖房需要を推定している。張ら⁴⁾、⁵⁾は理工系キャンパスを対象に CGS の運用実態を調査し、冷暖房需要の推定に基づき、CGS の適切な台数制御による効率改善の可能性を論じている。その上月別・時刻別の電力負荷パターンを明らかにしている。大橋ら⁶⁾は大阪大学において時刻別電力負荷を解析し、理科系研究施設のエネルギー消費密度が高いこと、またその要因としてサーバー関連の電力消費量が非常に大きいことを指摘している。

本研究は、高い発電効率を有するリン酸型燃料電池 CGS（以下、PAFC-CGS）、太陽光発電システム、地下水熱利用等の環境配慮技術を導入した大学研究施設を対象とする。本稿では施設開所の 2015

年 6 月から 1 年間の時刻別の BEMS データに基づき、建物エネルギー消費性能、発電設備の稼働実態、PAFC-CGS を中心とした熱源システムの性能評価を行う。さらに、PAFC-CGS の運用に資する建物の時刻別電力負荷及び熱負荷を明らかにする。

2. 調査対象建物の概要

2.1 建物概要

写真 1 に建物外観を、表 1 に建物概要を示す。4F～7F の主要実験室北・南面の窓は、空調負荷削減を目的として Low-E 複層ガラスを用いたダブルスキンプァサードを採用している。建物内にはエネルギー消費密度を高める要因となる年間冷房が必要なスーパーコンピューターや複数の大型実験機器、ドライルームを有している^{注 1)}。

表 1 建物概要

項目	概要
所在地	長野県長野市
竣工	2015年4月
建物規模	地下1階、地上7階 建築面積 1,429.15㎡ 延床面積 10,246.52㎡
主要室面積	事務室 791㎡／談話室 496㎡／展示室 666㎡ 実験室 4,342㎡ スパコン室 119㎡／ドライルーム 144㎡
建物用途	大学(理工系実験施設)
構造	S造(一部SRC)

写真 1 実験施設外観

2.2 設備概要

表 2 に設備概要を、図 1 に熱源システム系統図を示す。PAFC-CGS の高温排熱により夏期は排熱利用吸収式冷凍機 (RT-1)、冬期は熱交換器 (HE-3) の運転をベースとし、負荷増大時に空冷ヒートポンプモジュールチラー (AHP-1) による熱供給を行う。PAFC-CGS 低温排熱による熱交換器 (HE-4) は通年運転とし、夏期はデシカント外気調和機 2 台のデシカントローターの再熱除湿に用いられる。

¹⁾ 信州大学大学院理工学系研究科建築学専攻 大学院生
(〒380-0928 長野県長野市若里 4-17-1)

²⁾ 信州大学学術研究院工学系, 信州大学山岳科学研究所 教授・工博

³⁾ 信州大学学術研究院工学系, 信州大学山岳科学研究所 准教授・工博

¹⁾ Graduate Student, Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Shinshu Univ.

²⁾ Prof., Institute of Engineering and Mountain Science, Shinshu Univ., Dr. Eng.

³⁾ Assoc. Prof., Institute of Engineering and Mountain Science, Shinshu Univ., Dr. Eng.

表 2 設備概要

項目		仕様
空調設備	建築 外皮	窓仕様 ダブルスキン FL(6mm)+Low-E複層ガラス(6+6+6mm)
	中央熱源	電気利用空冷ヒートポンプモジュール150kW×5モジュール
	COP	冷房4.8/暖房3.4
	コジェネ	排熱利用吸気冷凍機32.5kW×1台
	COP	冷専0.72
効率化設備	個別分散	地下水利用水冷HPパッケージ×28台
	COP	冷房4.55~5.48/暖房5.12~5.95
	空気輸送	主要空調機 デシカント外調機×2台、コンパクト型空調機×1台、コンパクト型外調機×2台
	リン酸型燃料電池	出力 発電出力105kW、高温排熱出力50kW(90℃)、低温排熱出力72kW(55℃)
	CGS	熱効率(LHV基準) 発電熱効率0.42、高温水回収熱効率0.20、低温水回収熱効率0.30、総合熱効率0.92
太陽光発電設備	アレシシステム容量	発電容量300kW(屋上面100kW、南壁面100kW、西壁面50kW、東壁面50kW)
	パネル方位角(南0°反時計回り)	屋上面10°、南壁面10°、西壁面100°、東壁面280°
	パネル傾斜角(水平0°垂直90°)	屋上面10°、南壁面90°、西壁面90°、東壁面90°

図1 熱源システム系統図

3. 運用実績と分析

3.1 年間一次エネルギー消費量原単位

図2に年間一次エネルギー消費量原単位^{注2)}とDECC^{注3)}における研究機関の統計値を並べて示す。施設開所後1年間の系統購入量^{注4)}は1,476MJ/m²・年であり、統計値と比較して52.8%少ない。また、消費先別の電力・ガスの全エネルギー消費量は2,297MJ/m²・年であり、統計値と比較して26.6%少ない良好な実績となった。エネルギーの消費先では、空調用途が43%、ドライルーム（実験・空調設備）が3%、スパコン室（スパコン・空調設備）が7%、大型実験機器（3相200V）が14%を占めた。発電設備の系統電力量削減率は合計50%（PAFC発電量36%、太陽光発電量14%）である。

図2 年間一次エネルギー消費量原単位[MJ/m²・年]

3.2 発電設備（PAFC-CGS、太陽光発電）の発電量

図3に発電設備の運用実績を示す。発電設備の電力負荷に対する発電寄与率は8月で最大64%、電力負荷が増加した1月で最小34%であった。太陽光発電量は日射量の低下する冬期に発電量が低下するが、13~24MWh/月と概ね安定した発電量を確保している。PAFC-CGS発電量は受電電力量削減に大きく寄与しているが、発電出力を変更

図3 発電設備運用実績

表3 PAFC-CGS 発電出力設定値

年	2015年						2016年				
	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月
発電出力[kW]	60	90	90	90	90	80	80	80	80	80	50

図4 8月平日・休日平均時刻別の電力量（供給源別）

図5 8月平日・休日平均時刻別の電力量（消費先別）

図6 時刻別の電力量降順図

し運転した為（表3）、25~63MWh/月とばらつく。本施設のPAFC-CGSは発電出力を30~105kWの間で曜日別・時刻別に手動による設定が可能であるが、1年目の運用であることから大まかな電力及び熱負荷の予想に基づいて運用された。したがって、発電出力設定値に関して改善余地があるとみられる。

CGSと太陽光発電による受電電力量削減は、PAFC-CGSの発電量をベースとして太陽光発電によるピークカットを行う。図4に代表月の時刻別平均を示す。11時~13時に発電設備の発電量は最大となり、約170kWh（PAFC-CGS 90kWh、太陽光 80kWh）程度の発電量となる。また、昼間のピーク形成は空調用電力に因るところが大きいことが分かる（図5）。図6に電力量降順図を示すが、最大電力負荷は422kWh、最大受電量は333kWhである。最大太陽光発電量は144kWhであり、受電量が0の時間は117h（1.3%）と少ない。

3.3 時刻別電力負荷と PAFC-CGS 発電出力

建物電力負荷の実績を基に、受電電力量の最小化を主眼に PAFC-CGS 発電出力の検討を行った。図 7 より電力負荷は平日の夜間から日中にかけて各月 100kWh 程度増加し、夏期で 14 時～15 時、冬期で 10～11 時に電力ピークが発生する傾向が確認できる。電力負荷の最も少ない中間期夜間の電力負荷が平均 150kWh 程度であること、また電力負荷が 100kWh 以下の時間は年間 45 時間（図 6）と極めて少ないことより、夜間の PAFC-CGS 発電出力は最大出力（105kW）での運用が概ね可能と推察できる。

最大出力での運用に関して、日中の太陽光発電量を考慮して考察すると、太陽光発電量が 100kWh 以上の時間は年間 770 時間と、太陽光発電時間の 18%程度（図 6）であり、平日では概ね最大出力での運用が可能と見られる。しかし、中間期の休日では余剰電力の発生可能性があることから、発電出力を低下させ運用することが適当と思われる。尚、発電量が電力負荷を上回った場合キャンパス内で消費されることとなる。

図 7 平日・休日平均時刻別の電力負荷

3.4 PAFC-CGS 排熱供給と熱源システム COP

CGS を含む熱源システムを一次エネルギー基準で評価する場合、CGS 排熱製造のためのエネルギー量を算出する必要がある。評価方法は複数存在するが、燃料電池の発電効率が商用電力の受電端効率より高い特性を反映できる方法を検討した。ここでは既往研究⁷⁾を参照し、一次エネルギー換算した電力と CGS 排熱を同等のエネルギーとみなし、CGS への投入エネルギー量を両者のエネルギー量の比率で案分して、各エネルギーの製造に要したエネルギー量を算出する方法（式（1））を用いた。

$$\text{排熱製造の為にエネルギー量} = E_{in} \times \{H_{out} / (E_{out} + H_{out})\} \quad \cdots (1)$$

ここで、 E_{in} ：投入エネルギー、 E_{out} ：発電量、 H_{out} ：排熱回収量

図 8 に月別製造熱量と熱源システム COP^{注 5)}を示す。年間システム COP は 0.77 であり、既往の研究⁷⁾における中央熱源方式の平均的なシステム COP が 0.5～0.6 程度と報告されていることから、その値を上回る結果となった。建物消費熱量は 8 月に最大で 62MJ/m²であり、システム COP は 7 月に最高で 1.33 である。冷房運転期の中央熱源では、吸収式冷凍機により大部分の冷熱需要が賄われた。PAFC-CGS 排熱と地下水熱の処理熱量は 70%～91%と高く（表 4）、システム COP を高めた要因となる。一方、暖房運転期には暖房需要が夏期と同程度の月にあってもシステム COP が低い。これは地下水熱の割合が大幅に低下したことによる。原因は室空調負荷が想定より低いことにより、井水熱②（HP パッケージ系統）の熱源ユニット往還温度差が確保出来ず、井水からの採熱が不能になったことが要因であった。

図 8 月別製造熱量（熱源別）

表 4 建物全体の冷暖房負荷に対する CGS 排熱と地下水熱依存率

年	月	CGS 排熱		合計排熱依存率	地下水熱依存率	合計
		CGS 冷熱依存率	CGS 温熱依存率			
2015 年	6 月	3%	100%	38%	31%	70%
	7 月	8%	100%	24%	65%	89%
	8 月	13%	100%	31%	60%	91%
	9 月	22%	100%	42%	47%	89%
	10 月	50%	100%	54%	20%	75%
	11 月	1%	9%	11%	11%	22%
2016 年	12 月	—	14%	14%	10%	23%
	1 月	—	17%	17%	14%	30%
	2 月	—	22%	22%	13%	35%
	3 月	—	26%	26%	13%	40%
	4 月	—	39%	39%	18%	57%
	5 月	4%	42%	46%	50%	96%

図 9 8 月平日・休日平均時刻別の熱源製造熱量

結果としてパッケージ系統へは中央熱源から熱供給がされた（図 1、熱交換器 HE-2）。これについては、実負荷に応じた熱源ユニット往還温度のチューニングを行い、井水からの採熱を改善する予定である。

建物消費熱量が最大となった 8 月の時刻別の熱供給状況を図 9 に示す。吸収式冷凍機は夜間、休日問わず定格値（33kW）に近い出力で熱供給を行い、空冷 HP チラーは日中の部分的な追掛け運転に留まる。PAFC 低温排熱においても定格値（72kW）に近い熱出力を確認できた。また、冷房運転期の中央熱源製造冷熱量の 71%がスパコン室の冷熱消費である事を確認している。排熱需要先を確保する観点で、連続冷房が必要な室と CGS の組み合わせの有効性が確認できた。

3.5 PAFC-CGS の熱効率解析

CGS の運用実態を把握するため PAFC-CGS の発電効率、高温排熱回収効率、低温排熱回収効率、排熱利用効率、総合エネルギー効率を下記に示す式（2）から式（6）で求めた。

$$\text{発電効率} \quad \eta_{FC-CGS, pwr} = (W_{FC-CGS} \cdot b) / (G_{FC} \cdot a) \quad \cdots (2)$$

$$\text{高温排熱回収効率} \quad \eta_{FC-CGS, H} = (Q_H \cdot b) / (G_{FC} \cdot a) \quad \cdots (3)$$

$$\text{低温排熱回収効率} \quad \eta_{FC-CGS, L} = (Q_L \cdot b) / (G_{FC} \cdot a) \quad \cdots (4)$$

$$\text{排熱利用効率} \quad \eta_{FC-CGS, exh} = \{(Q_{RT} + Q_{HE-3} + Q_{HE-4}) \cdot b\} / (G_{FC} \cdot a) \quad \cdots (5)$$

$$\text{総合エネルギー効率} \quad \eta_{FC-CGS} = \eta_{FC-CGS, pwr} + \eta_{FC-CGS, exh} \quad \cdots (6)$$

ここで、

W_{FC-CGS} : 燃料電池発電電力量 (kWh)、 Q_H : 高温排熱回収量 (kWh)、 Q_L : 低温排熱回収量 (kWh)、 Q_{RT} : 吸収式冷凍機製造熱量 (kWh)、 Q_{HE-3} : 高温排熱利用量 (kWh)、 Q_{HE-4} : 低温排熱利用量 (kWh)、 a : 都市ガス発熱量 (LHV) = 41.86 (MJ/N m³)、 b : 電力の二次エネルギー換算値 = 3.6 (MJ/kWh)

図10に示すように、発電効率は年間を通して0.33～0.38と高い。排熱回収効率は夏期で0.13～0.36となり、冬期では夏期と比較して0.12～0.21とやや低い実績となった。排熱利用効率は吸収式冷凍機のCOPを含むが、排熱回収効率に対して3～5%程度の低下にとどまる。総合エネルギー利用効率は最大で0.65、最低で0.44となった。年間総合エネルギー効率は0.54と比較的高い効率の運用と言える。

注11、12月の排熱に関しては、排熱回収ポンプが点検停止のため参考値として扱う。

図10 総合エネルギー効率、発電効率、排熱利用・回収効率

PAFC-CGSの稼働実態を負荷率帯と頻度、平均効率より分析を行った。図11より冷房運転期では負荷率0.9～1.0で平均総合エネルギー効率が0.73と高く、負荷率0.5～0.7で約0.5と低い。暖房運転期では夏期と比較して全体的に負荷率が低く、稼働時間の長い負荷率0.6～0.7での総合効率が0.62である。図12より中間期の空調負荷の低下により低温排熱需要が低下したことで、冷房期総合エネルギー効率が低下した事が分かる。また、図13より発電出力設定が低い為、暖房期排熱回収量が全体として低下したことが確認できる。

3.6 時刻別熱負荷とPAFC-CGS排熱出力 (図14)

PAFC-CGS熱出力の定格値は冷房時92.5kW、暖房時120kWである。PAFC-CGSの発電出力を最大設定にした場合、冬期を除く各月で余剰排熱の可能性があり、中間期ではその傾向が顕著であると予想される。従って継続的に経年変化等踏まえ検討を行う必要がある。

4. まとめ

設開所後1年間の系統購入量は1,476MJ/m²・年であり、統計値と比較して52.8%少ない良好な実績を得た。発電設備の系統電力量削減率は年平均50%となった。年間熱源システムCOPは0.77と高いが、冬期井水熱系のチューニングにより改善の余地がある。PAFC-CGS年間総合エネルギー効率は0.54であり、排熱回収効率による影響が大きいことが分かった。またPAFC-CGSの運用に資する現状の時刻別電力負荷及び熱負荷を明らかにした。今後継続して負荷特徴をまとめると共に、改善効果等を検証する予定である。

謝辞

本研究にあたり信州大学環境施設部、研究推進部の方々には多大なご協力を頂きました。ここに記して深く感謝の意を表します。

注

- 注1) スーパーコンピューター理論演算性能は2.5TFLOPS、PCクラスタ理論演算性能は6.7TFLOPSである。大型実験機器はカーボン膜の形成とその評価等に用いられ、負荷最大の機器で80,000VA×2(AC3φ3W200V)である。ドライルームは4室あり、実験・空調設備の合計定格消費電力は75.25[kW/室]である。実験活動は基本的に平日・日中に行われるが、スーパーコンピューター等、24時間稼働しているものが多い。
- 注2) 本文中に示す一次エネルギー換算係数は電力：昼間9.97MJ/kWh、夜間9.28MJ/kWh、都市ガス：43.14MJ/Nm³[HHV]とする。
- 注3) 一般社団法人日本サステナブル建築協会ホームページ、非住宅建築物の環境関連データベース、研究機関、<http://www.jsbc.or.jp/index.html> (参照2016.5.10)

図11 CGSの負荷率頻度分布と平均総合エネルギー効率

図12 冷房期CGS各出力の頻度分布と平均効率

図13 暖房期CGS各出力の頻度分布と平均効率

図14 平日・休日平均時刻別の中央熱源熱負荷

注4) 系統購入量は受電電力量及び実験系・PAFC-CGSガス消費量とする。発電量は系統相当の削減量として示している。

注5) 熱源システムCOP={ (中央熱源製造熱量 (CGS含む)) + 地下水熱取得熱量 } / { (熱源機器+熱源補機+パッケージ熱源ユニット電力量) + CGS排熱製造の為のガス消費量 (式1より) }

参考文献

- 1) 柏木孝夫：天然ガスコージェネレーション計画・設計マニュアル2005，日本工業出版，pp.8-10, 2005
- 2) 三瀬農士，佐藤春樹：慶応義塾大学湘南藤沢キャンパスにおけるコージェネレーションシステムの省エネルギー性および環境性評価，日本建築学会環境系論文集，No.616，pp.51-58, 2007.6
- 3) 三瀬農士，佐藤春樹：慶応義塾大学湘南キャンパスにおける電力および冷暖房需要の推定，日本建築学会環境系論文集，No.609，pp.55-62, 2006.11
- 4) 張健，許雷：コージェネレーションシステムを用いた大学キャンパスにおけるエネルギー調査-コージェネレーションシステムの運用実態 その1-，日本建築学会環境系論文集，No.654，pp.759-765, 2010.8
- 5) 張健，許雷：コージェネレーションシステムを用いた大学キャンパスにおけるエネルギー調査-需要側の電力消費の実態 その2-，日本建築学会環境系論文集，No.673，pp.185-192, 2012.3
- 6) 大橋功，宮崎正幸，下田吉之：理系研究施設の電力消費実態と省エネルギー手法の定量評価，日本建築学会環境系論文集，Vol.78，No.688，pp.529-536, 2013.6
- 7) 名古田知志，下田吉之，水野稔：地域熱供給システムの省エネルギー評価に関する研究 全国123プラントのデータを基にした要因分析とCGS評価手法の検討，日本建築学会環境系論文集，No.613，pp.87-93, 2007.3

[2016年10月5日原稿受理 2016年12月7日採用決定]