

外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発（その 105）

排熱投入型吸収冷温水機の計算モデル検討と CGS による最大電力の低減効果の検討

Development of an Integrated Energy Simulation Tool for Buildings and MEP Systems, the BEST
 Part 105 Study on the simulation model of exhaust heat recovery absorption chiller-heater and the effect of reducing the maximum power demand by cogeneration system

正 会 員 ○ 辻丸のりえ (佐藤エネルギーリサーチ)	正 会 員 佐藤 誠 (佐藤エネルギーリサーチ)
特別会員 村上周三 (建築環境・省エネルギー機構)	技術フェロー 秋元孝之 (芝浦工業大学)
技術フェロー 石野久彌 (首都大学東京名誉教授)	正 会 員 笹嶋賢一 (日本設計)
技術フェロー 野原文男 (日建設計)	正 会 員 二宮博史 (日建設計)
正 会 員 田端康宏 (日建設計)	正 会 員 工月良太 (東京ガス)
正 会 員 藤居達郎 (日立製作所)	

Norie TSUJIMARU^{*1} Makoto SATOH^{*1} Shuzo MURAKAMI^{*2} Takashi AKIMOTO^{*3}
 Hisaya ISHINO^{*4} Kenichi SASAJIMA^{*5} Fumio NOHARA^{*6} Hiroshi NINOMIYA^{*6}
 Yasuhiro TABATA^{*6} Ryota KUZUKI^{*7} Tatsuo FUJII^{*8}

^{*1} Satoh Energy Research Co., Ltd. ^{*2} Institute for Building Environment and Energy Conservation
^{*3} Shibaura Institute of Technology ^{*4} Tokyo Metropolitan University ^{*5} Nihon Sekkei Co., Ltd.
^{*6} Nikken Sekkei Co., Ltd. ^{*7} Tokyo Gas Co., Ltd. ^{*8} Hitachi, Ltd.

This paper describes the modified simulation model of an exhaust heat recovery absorption type chiller-heater to express its sophisticated characteristic which varies depending on exhaust hot water temperature and flow rate. Using the BEST program, it was verified that energy would be sufficiently saved by variable cooling water volume control of an exhaust heat recovery absorption type chiller-heater, and also the maximum power demand would be reduced by cogeneration system.

はじめに

BEST コージェネレーション検討サブワーキンググループ (SWG) では、コージェネレーションシステム (以下、CGS と表記) の複雑な制御を BEST で再現するため、関連モジュールの開発やシミュレーションモデルの作成などを行ってきた¹⁾。既報^{2),3),4)}では、排熱利用先としてのデシカント空調機や太陽熱との複合システムの例、CGS の制御方式として追加した「熱主電従運転制御」による試算例、さらに発電機、排熱投入型吸収冷温水機の市販機種仕様が入力された実在機テンプレートの紹介を行った。

本報では、排熱投入型吸収冷温水機の熱源特性の精緻化のため、排熱温度や流量によって排熱利用量が変化する計算モデルの検討を行ったので報告する。また、BEST を用いて排熱投入型吸収冷温水機の冷却水変流量制御の省エネルギー効果検証、および CGS による夏季最大電力の低減効果の検証を行ったので報告する。

1. 排熱投入型吸収冷温水機の計算モデル検討

1.1 概要

排熱投入型吸収冷温水機は直焚吸収冷温水機の一つであり、排熱を投入することで冷水製造のための燃料消費量が削減できる機種である。排熱投入型吸収冷温水機の計算モデルを図 1 に示す。図 2 に示すように、負荷率が小さいときは排熱単独運転が可能だが、負荷率がある値を超える

と排熱とガスの併用運転となり、投入可能な排熱量が負荷率に応じて減っていく。この排熱単独運転が可能となる境界の負荷率を「排熱単独運転負荷率」と呼称する。排熱単独運転負荷率 q_{eh} は排温水の温度・流量によって変動し、その結果排熱投入率 qh も変化するので、これを再現するため排熱単独運転負荷率の計算モデルについて検討を行った。

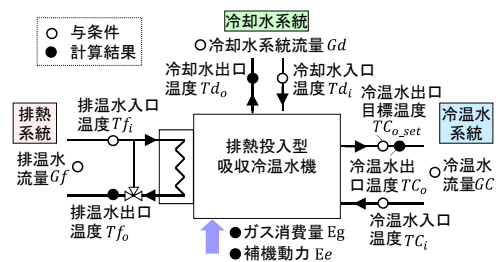


図 1 排熱投入型吸収冷温水機の計算モデル

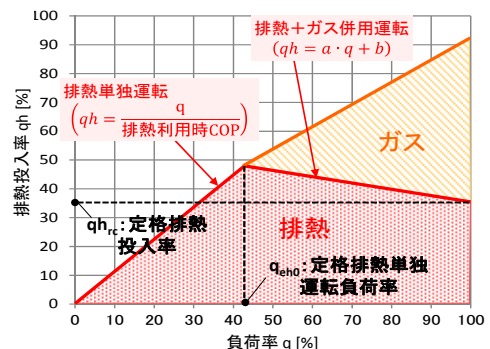


図 2 排熱単独運転負荷率の定義

1.2 排熱投入量の変動要因

1.2.1 排温水温度による影響

排熱単独運転負荷率と排温水入口温度の関係を図 3 に示す。排熱単独運転負荷率は排温水入口温度が下がると低くなり、逆に温度が上がると高くなっており、両者は比例関係にある。排温水温度が定格 $T_{f_{i0}}$ から T_{f_i} に変化したときの排熱単独運転負荷率 q_{eh1} は次式による。

$$q_{eh1} = q_{eh0} + \frac{C}{100} \times (T_{f_i}' - T_{f_{i0}})$$

q_{eh0} : 定格排熱単独運転負荷率(入力値)

$T_{f_{i0}}$: 定格排温水入口温度(入力値)

C: 排熱入口温度による排熱単独運転負荷率への影響係数(直焚の場合 C=1)

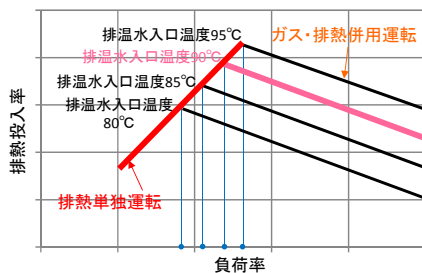


図 3 排熱単独運転負荷率と排温水入口温度の関係

1.2.2 排温水流量による影響

定格排温水流量 G_f が G_f' に変化したときの排熱単独運転負荷率は、排熱流量比 $RG_f (=G_f'/G_f)$ に比例する。よって、排温水入口温度、排温水流量が変化した時の排熱単独運転負荷率 q_{eh} は次式による。

$$q_{eh} = q_{eh1} \times RG_f$$

1.2.3 適用範囲

排熱投入の可否や運転の可否を判断できるように、排温水入口温度、排温水流量および冷暖房負荷率の適用範囲を表 1 に示すように設定した。

表 1 排熱投入型吸収冷温水機 機器特性の適用範囲

項目	上限	範囲外の処理	下限	範囲外の処理
排温水入口温度	90°C	上限値で固定	入力値 ^{※1}	排熱投入なし
排温水流量比	120%	上限値で固定	50%	排熱投入なし
負荷率	100%	上限値で固定	20%	運転停止

※1 排熱出口下限温度(入力値)と同じ値とする

1.3 機器特性の検証

BEST の計算結果を用いて排熱投入型吸収冷温水機の機器特性の検証を行った。検証結果として排熱投入率を図 4 に示す。検証に用いた排熱投入型吸収冷温水機の定格排熱単独運転負荷率は 43%、定格排温水入口温度は 90°C、排温水出口下限温度は 80°C とした。

排温水入口温度が 80°C 以下のときや負荷率が 20% 以下のときは排熱投入なし(排熱投入率 0)となる。排温水入口温

度が 85°C、90°C のとき排熱投入率が一定値となるが、これは排温水出口温度が下限値以下とならないように排熱投入率を制限しているためである。排温水流量比が 50% のときは排温水流量比 100% のときと比較して排熱投入率が小さくなる。このように、計算モデルの見直しにより、排熱投入率をより詳細にシミュレーションできることが確認できた。

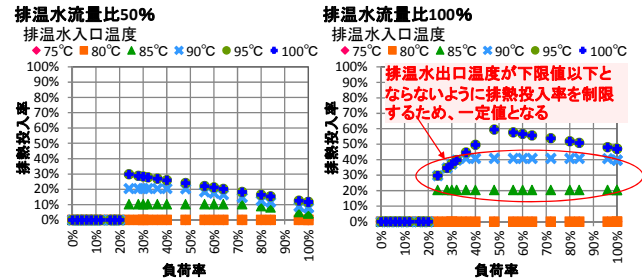


図 4 機器特性検証結果(①排熱投入率)

2. 冷却水変流量制御による省エネルギー効果検証

2.1 概要

CGS のシステム効率を上げて更なる省エネを進めるため、BEST を用いて排熱投入型吸収冷温水機の冷却水変流量制御による省エネルギー効果の検証を行った。冷却水変流量制御のシミュレーションモデル構成図を図 5 に、冷却水ポンプモジュールの入力画面を図 6 に示す。冷却水ポンプモジュールは流量や制御方式に応じた消費電力を計算するモジュールであり、流量自体を制御することができない。そこで、冷却水システムの中に冷却水流量を変化させるための仮想の三方弁を設置した。この三方弁は、冷却水出口温度が設定温度となるように冷却水流量を流量比の設定範囲内で調整する。なお、冷却塔は定風量モデルとしたが、現在変風量モデルも開発中である。

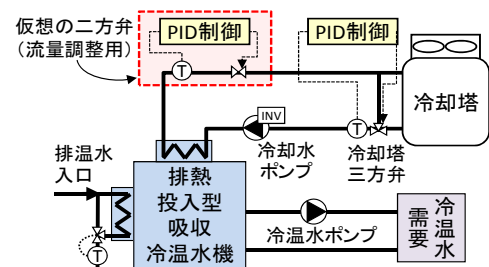


図 5 冷却水変流量制御 シミュレーションモデル構成図

ポンプタイプ	0:渦巻ポンプ	[-]
定格流量	3500	[L/min(w)]
定格全揚程	200000	[Pa]
<input checked="" type="checkbox"/> 搬送システム		
変流量システムとして計算する	<input checked="" type="checkbox"/> 変流量システムとして計算する	[-]
<input checked="" type="checkbox"/> 変流量制御		
制御方式	1:INV制御	[-]
上限周波数	50	[Hz]
下限周波数	15	[Hz]
<input checked="" type="checkbox"/> 電動機		
電動機タイプ	0:標準	[-]
相数	3	[-]
電圧	200	[V]
周波数	50	[Hz]
力率	0.8	[-]

図 6 冷却水ポンプモジュール入力画面

2.2 例題の計算条件

シミュレーションに用いた建物概要・機器仕様を表 2 に示す。ポンプ制御方式と流量制御方式を表 3 に示すように変化させ、制御方式の違いによる省エネルギー効果を確認した。さらに、末端圧力一定制御のとき冷却塔三方弁の設定値を 32℃から 20℃に変化させ、冷却水入口温度を低くしたときの省エネルギー効果も合わせて確認した。

表 2 建物概要・機器仕様

分類	項目名	仕様
建物概要	延床面積	9,919 m ² (地上 12 階)
	運転時間	8:00~22:00 (月曜~金曜)
	冷暖房期間	冷房 (5~11 月)、暖房 (12~4 月)
ガスエンジン	発電出力	定格 115kW、最小 57.5kW
	定格発電効率	33.5% (LHV 基準)
	定格排熱回収効率	54% (LHV 基準)
	補機動力	定格発電出力の 5%
	制御方法	電主熱従運転
排熱投入型吸収冷温水機	定格能力	冷房:739kW、暖房:485kW
	定格ガス消費量	冷房:561kW (排熱回収なし) / 420kW (排熱回収あり)、暖房:561kW
	定格消費電力	冷房:3.55kW、暖房:3.35kW
	定格流量	冷温水 2117 L/min、冷却水 3500 L/min
排熱関係	定格排熱回収量	234kW
	定格排熱流量	337 L/min
	排熱単独運転負荷率	45%
排熱出口下限温度	80℃	
	冷却水	定格流量
ポンプ	定格全揚程	200 kPa (20.4m)
仮想の三方弁	冷却水出口温度設定	37.5℃
	流量比制御範囲	下限 50%~上限 100%

表 3 シミュレーション計算条件

ケース名	ポンプ制御方式	流量制御方式	冷却水温度設定
ケース 1	固定速	定流量	32℃
ケース 2	インバータ制御 ^{*1}	吐出圧一定制御	32℃
ケース 3		末端圧力一定制御 ^{*2}	32℃
ケース 4			20℃

^{*1} 周波数 上限 50Hz~下限 15Hz

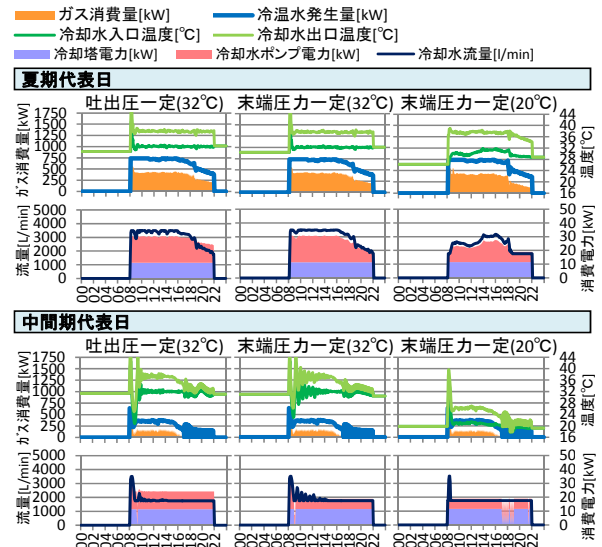
^{*2} 全揚程 上限 280 kPa~下限 100kPa

2.3 試算結果

図 7 に夏期・中間期代表日の時系列データ、図 8 に冷却水ポンプ月別電力消費量 (一次エネルギー換算値) のシミュレーション結果を示す。夏期の夜間や中間期など冷房負荷が小さい時に冷却水流量が小さくなる状況が再現できているが、吐出圧一定制御では揚程が変化しないので、冷却水ポンプ電力消費量の削減量は限定的である。末端圧力一定制御とすることで揚程も小さくできるため、ポンプ電力消費量を大幅に削減することができる。さらに、排熱投入型吸収冷温水機の冷却水入口温度設定を 32℃から 20℃まで下げると、冷却水流量が下限値 (流量比 50%) での運転が増えるため、冷房期間を通して月別冷却水ポンプ電力消

費量を約 60%削減できる。

図 9 に冷房期間 (5 月~11 月) の一次エネルギー消費量のシミュレーション結果を示す。吐出圧一定制御または末端圧力一定制御などにより冷却水変流量制御とした場合、冷却水ポンプ電力消費量を削減できるが、排熱投入型吸収冷温水機のガス消費量が微増となる。冷却水温度設定を 32℃から 20℃にすることでガス消費量の増加を抑えることができる。よって末端圧力一定制御・20℃設定とした場合は、定流量・32℃設定の場合と比較して冷房期間全体で約 18% 一次エネルギー消費量を削減できることがわかった。刑部らによる既往の研究⁵⁾でも冷房期間の一次エネルギー消費量を約 15%削減できるという実測結果が示されており、今回のシミュレーション結果は妥当といえる。今後、冷却塔の変風量モデルを組み込んで更なる省エネルギー効果の試算を行う予定である。



※()内の数値は排熱投入型吸収冷温水機の冷却水入口温度設定値

図 7 代表日時系列データ比較

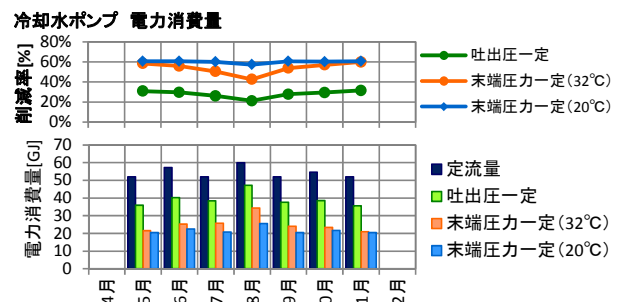


図 8 冷却水ポンプ月別電力消費量 シミュレーション結果

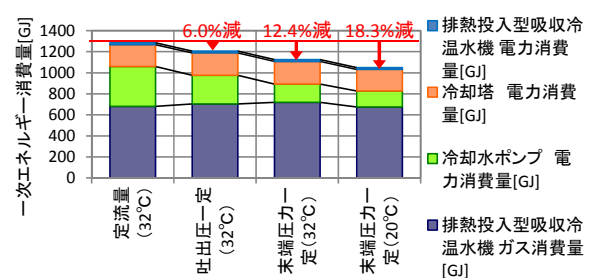


図 9 一次エネルギー消費量 シミュレーション結果 (冷房期間)

3. CGS による最大電力の低減効果検証

東日本大震災以降、電力需給の逼迫によるピーク電力不足の回避のためのあらゆる方策が議論されている。中でも電力の安定供給に寄与できるCGSへの期待は大きい。そこで、CGSによる最大電力の低減効果を確認するためBESTによるシミュレーションを実施した。熱源にCGSを採用した場合と直焚吸収冷温水機を採用した場合を比較し、最大電力の低減効果と年間一次エネルギー消費量の差異を確認した。比較対象とした直焚吸収冷温水機の仕様を表4に示す。CGSの機器仕様は表3に示した通りである。なお、CGSの排熱投入型冷温水機の冷却水流量は定流量、冷却水入口温度は32℃設定とした。

夏期電力ピーク時の受電電力の比較結果を図10に示す。立ち上がり時にハンチングにより大きく変動しているが、昼間のピーク時の受電電力は直焚吸収式+系統電力の場合375kWだが、CGSの場合は262kWとなり、最大電力を約30%抑えられることが確認できた。また、年間一次エネルギー消費量の比較結果を図11に示す。CGSの省エネルギー効果については、CGSで発電された電力に相当する一次エネルギー量が年間3,943GJとなるため、これを差し引いた正味の年間一次エネルギー消費量は、比較ケース(直焚吸収式+系統電力)に対し約21%の削減になるとの結果が得られた。

表4 直焚吸収冷温水機 仕様

項目名	仕様
定格能力	冷房:739kW、暖房:490kW
定格ガス消費量	冷房:568kW、暖房:568kW
定格消費電力	冷房:5.69kW、暖房:5.49kW
定格流量	冷温水 1327 L/min、冷却水 3500 L/min

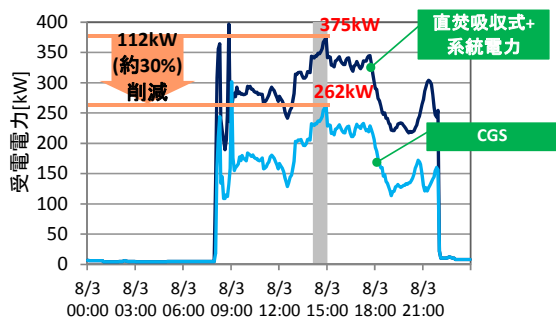


図10 夏期電力ピーク時の受電電力比較

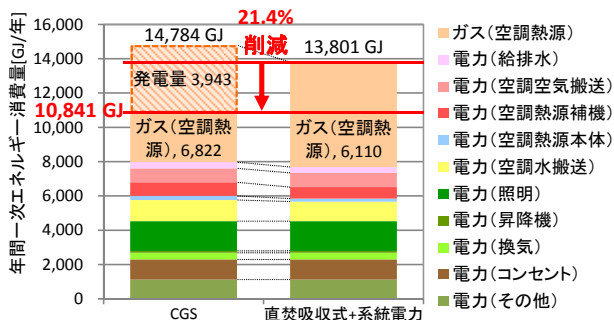


図11 年間一次エネルギー消費量比較

4. まとめと今後の課題

本報では、排温水温度、流量に応じたより精緻なシミュレーションが可能となるように排熱投入型吸収冷温水機の計算モデルの再検討を行った。また、排熱投入型吸収冷温水機の冷却水変流量制御による省エネルギー効果、CGSによる最大電力の低減効果をBESTを用いたシミュレーションにより検証した。

今後はBESTによるCGSのシミュレーションをより充実させるため、以下のような検討を進める予定である。

- ① 冷却塔を変風量タイプにした場合の省エネルギー効果検証(今回は定風量でシミュレーションを実施)
- ② BESTを活用した実際のビルにおけるCGSの最適な容量選定ならびに最適な運転方法の検討
- ③ 蒸気排熱利用 CGS のシミュレーションを可能とするための蒸気システムの計算モデル検討

謝辞

本報は、(財)建築環境・省エネルギー機構内に設置された産官学連携による環境負荷削減のための建築物の総合的なエネルギー消費量算出ツール開発に関する「BEST コンソーシアム」・「BEST 企画委員会(村上周三委員長)」および専門版開発委員会(石野久彌委員長)、行政支援ツール開発委員会(坂本雄三委員長)、クラス構想 WG(石野久彌主査)、コージェネレーション検討SWG(秋元孝之主査)の活動成果の一部であり、関係各位に謝意を表するものである。

コージェネレーション検討 SWG 名簿(順不同)主査:秋元孝之(芝浦工業大学)、副主査:笹嶋賢一(日本設計)、委員:野原文男、二宮博史、田端康宏(以上、日建設計)、昆野京一郎(ヤンマーエネルギーシステム)、藤居達郎(日立製作所)、佐藤誠、辻丸のりえ(佐藤エネルギーリサーチ)、工月良太(東京ガス)、事務局:生稲清久(建築環境・省エネルギー機構)

参考文献

- 1) 佐藤、村上、秋元、石野、笹嶋、野原、二宮、田端、工月:外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その 56)コージェネレーションシステムプログラムの特徴、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp.707-710、2009.9
- 2) 田端、村上、秋元、石野、野原、佐藤、工月、二宮、笹嶋:外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その 57)コージェネレーション排熱利用としてのデシカント空調機、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp. 711-714、2009.9
- 3) 佐藤、村上、秋元、石野、笹嶋、野原、二宮、田端、工月:外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その 76)太陽熱利用とコージェネレーションの複合システムのシミュレーション、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp.2583-2586、2010.9
- 4) 辻丸、佐藤、村上、秋元、石野、笹嶋、野原、二宮、田端、工月、藤居:外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その 91)コージェネレーションシステムの制御方式の拡充とテンプレートの整備、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp.1727-1730、2011.9
- 5) 刑部、柴田、高瀬、杉浦:コージェネレーションシステムにおける排熱投入型吸収冷温水発生機冷却水変流量システムの実測評価(第二報)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1405-1406、2004.8