

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 184）

蒸気利用熱源システムの計算事例

Development of an Integrated Energy Simulation Tool for Buildings and MEP Systems, the BEST Part 184 Simulation Examples of Steam Use Heat Source System

正 会 員 ○ 辻丸のりえ（佐藤エネルギーリサーチ）
正 会 員 二宮博史（日建設計）
正 会 員 工月良太（東京ガス）
技術フェロー 野原文男（日建設計）
技術フェロー 石野久彌（首都大学東京名誉教授）

正 会 員 藤居達郎（日立製作所）
正 会 員 笹嶋賢一（日本設計）
正 会 員 佐藤 誠（佐藤エネルギーリサーチ）
技術フェロー 秋元孝之（芝浦工業大学）
特別会員 村上周三（建築環境・省エネルギー機構）

Norie TSUJIMARU^{*1} Tatsuo FUJII^{*2} Hiroshi NINOMIYA^{*3} Kenichi SASAJIMA^{*4} Ryota KUZUKI^{*5}
Makoto SATOH^{*1} Fumio NOHARA^{*3} Takashi AKIMOTO^{*6} Hisaya ISHINO^{*7} Shuzo MURAKAMI^{*8}
^{*1} Satoh Energy Research Co., Ltd. ^{*2} Hitachi, Ltd. ^{*3} Nikken Sekkei Co., Ltd. ^{*4} Nihon Sekkei Co., Ltd.
^{*5} Tokyo Gas Co., Ltd. ^{*6} Shibaura Institute of Technology ^{*7} Tokyo Metropolitan University
^{*8} Institute for Building Environment and Energy Conservation

In the BEST program, the simulation model of co-generation system had been used hot water as recovery waste heat medium since that is easy to handling. In order to simulate steam supply co-generation system (CGS) which has high energy-saving performance, the BEST co-generation study sub working group have defined calculation method of steam and developed various steam supply or steam driven equipment simulation models. In this report, we formed simple simulation model of steam use heat system by assembling each steam equipment modules and attempted simulation of steam supply CGS.

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)の構成要素機器や制御機器の計算モデルの作成と関連モジュールの開発を行ってきた。発電機や排熱利用機器(排熱投入型吸収冷温水機、デシカント空調機、熱交換器、予熱槽など)、コントローラ(発電機コントローラ、デマンドレスポンス対応コントローラ)が主な開発内容である。これら開発項目を活用すると民生用建物で利用されている CGS の多くをシミュレーションできる。既報¹⁾では太陽熱との併用システム、ピーク電力削減効果や冷却水変流量制御による省エネ効果の検証、CGS を活用したゼロエネルギー建築(ZEB)の検討、さらにはデマンドレスポンス制御のシミュレーションなど、先進的なケーススタディを実施してきた。

これまで BEST では CGS の排熱媒体として扱いが容易な温水を用いていたが、大規模病院や地域冷暖房などでは搬送動力が小さくポテンシャルの高い蒸気媒体も利用されている。蒸気利用 CGS のシミュレーションを BEST で実現するため、2011 年から BEST における蒸気の計算方法を整理し、蒸気を発生または利用する各種設備の計算モデルの開発を行ってきた。本報では、新たに開発された蒸気利用機器やコントローラなど関連機器モジュールを組み合わせ、蒸気利用 CGS のシミュレーションを行ったので報告する。

1. BEST における蒸気利用 CGS の計算モデル概要と前提条件

BEST における蒸気利用 CGS の計算モデルについては

既報³⁾に詳しいが、ここでは簡単な計算の流れと前提条件を以下に示す。なお蒸気は熱源側のみで消費されるものとし、暖房や加湿、滅菌などのために二次側(空調機等)に直接蒸気を供給する方式は対象としない。

- (1) 蒸気の供給圧力は 784.5kPa.G (8kgf/m²) の飽和蒸気で固定とし、配管抵抗に伴う圧力損失は考慮しない。
- (2) 排温水システムを先に計算して排温水利用機器(排熱投入型吸収冷温水機など)の運転状態を決定し、その結果を前提として蒸気消費機器の計算を行い、蒸気需要量を求める。
- (3) 発電機器の運転状況から蒸気発生量を求める。このとき余剰蒸気が発生しないよう蒸気発生量を制御する。
- (4) 蒸気発生量が蒸気需要量に対して不足する場合は、能力無限大の小型貫流ボイラにより不足分を補い蒸気の供給圧力の低下はないものとする。蒸気ヘッドと小型貫流ボイラは組み合わせることを必須として、モジュールを一体化する。
- (5) 蒸気消費機器から排出される還水温度は機器ごとに固定とし、還水流量は蒸気消費量に等しいとする。

2. 蒸気関連機器モジュールの開発状況

蒸気利用 CGS を構成する蒸気関連機器モジュールの開発状況を表 1 に示す。一部開発中及び開発未着手の機器もあるが、蒸気利用 CGS を構成する基本的な機器の開発が完了し、ようやく蒸気利用 CGS のシミュレーションが行える段階に至った。なお、各モジュールの計算モデルの詳細については既報^{2)~5)}を参照されたい。

表 1 蒸気関連機器モジュールの開発状況

【凡例】○:開発済み、△:開発中、×:開発未着手

分類	名称	開発状況
蒸気発生機器	蒸気・温水発生型ガスエンジン	○
	ガスタービン	×
	蒸気ボイラ&蒸気ヘッダ	○
蒸気消費機器	蒸気-温水熱交換器	○
	蒸気焚吸収ヒートポンプ	△
	蒸気焚吸収冷凍機 ²⁾	○
	排熱投入型蒸気吸収冷凍機	○
補助機器	還水槽	○
	補給水ポンプ	○
コントローラ	発電機コントローラ	○
	蒸気発生コントローラ(蒸気バランス調整用)	△
	熱源機台数制御コントローラ	○

3. 蒸気利用 CGS のシミュレーション

蒸気は水の蒸発潜熱を使用するため単位質量あたりの保有熱量が非常に大きく、また高圧の気体であるので動力を用いなくて搬送できるという長所がある。地域内の複数建物に電力や熱などのエネルギーを供給するエネルギー面的利用の取り組みでも蒸気が活用されており、BESTを用いて蒸気利用 CGS のシミュレーションを行い、蒸気を含めたエネルギー面的利用の評価を行うことが期待されている。そこで、蒸気利用プラントを想定したシミュレーションモデルを構築し、BESTを活用した蒸気利用 CGS のシミュレーションの試行を行った。

3.1 想定対象とする蒸気利用プラントの選定

想定対象とした蒸気利用プラント(以下、想定対象プラントと呼称)のシステムフロー図を図1に示す。BESTで開発済みの蒸気関連機器モジュールではほぼ再現できる機器構成の蒸気利用プラントを想定した。主な構成機器の仕様を表2に示す。①発電機の排熱を温水と蒸気で回収、②電力および冷温水、蒸気を物件A(複合用途)と物件B(病院)の2棟の建物に供給、③太陽熱、下水熱などの未利用エネルギーの利用がこのプラントの特徴として挙げられる。なお電力は物件Aのみに供給している。

3.2 負荷条件の設定

今回の試行では熱源側のシミュレーションのみを行うため、二次側となる建物のシミュレーションモデルは作成せず、負荷データ(冷水、温水、電力)を境界条件として与えた。各負荷の夏期、冬期、中間期における時刻別負荷パターンを図2に示す。なお蒸気負荷は温水負荷に足し合わせて評価した。各季節において平日、休日の負荷パターンの差がほとんどない設定とした。また当該建物の熱源はほぼプラントより供給することから電力負荷の季節差は小さい。

3.3 想定対象プラントの簡略化

想定対象プラントは複数の熱源から構成される複雑なシステムであるが、まずは蒸気利用 CGS の動作確認を行うため、想定対象プラントのシステムを簡略化した簡易シミュレーションモデルを構築し、蒸気利用 CGS のシミュレーションの試行を行った。動作確認が目的であるため、今回のシミュ

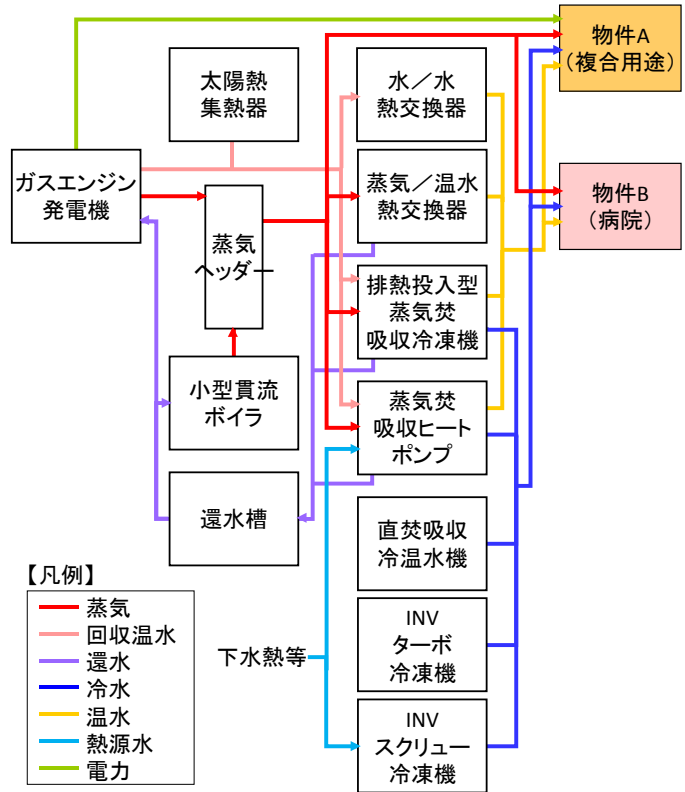
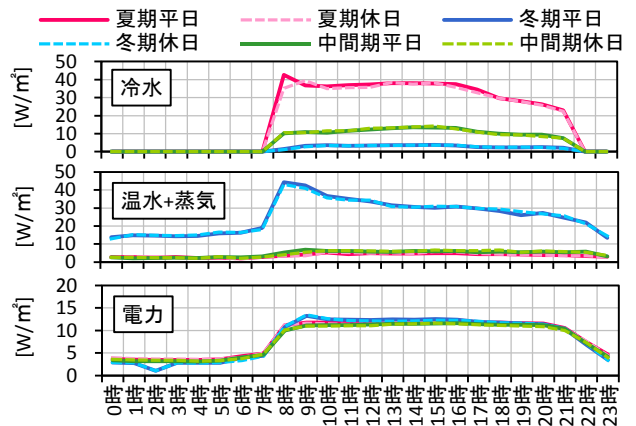


図 1 想定対象プラントのシステムフロー図

表 2 想定対象プラントの主な構成機器の仕様

分類	名称	容量		台数
		冷水	温水	
発電機	ガスエンジン	370kW		2
	蒸気利用熱源	蒸気/温水熱交換器	—	1600kW
蒸気関連機器	排熱投入型蒸気焚吸収冷凍機	500RT	—	1
	蒸気焚吸収ヒートポンプ	250RT	680kW	1
その他熱源	小型貫流ボイラ	3.0 t/h		3
	還水槽	4m ³		1
その他熱源	水/水熱交換器	—	550kW	1
	直焚吸収冷温水機	500RT	1200kW	2
	インバータターボ冷凍機	500RT	—	1
	インバータスクリュー冷凍機	150RT	—	1



※夏期は8月、冬期は2月の値、中間期は5,10月の平均値
 ※電力は電力供給先となる物件Aの消費電力

図 2 境界条件とする時刻別の負荷パターン

レーション結果は想定対象プラントのシステム性能とは無関係である。シミュレーションモデルは極力簡略化するが、境界条件とする負荷データは改変せずに用いることとし、熱源

の合計容量が想定対象プラントと同じになるように仕様を調整した。簡易シミュレーションモデルのシステム図を図3、主要機器の仕様を表3に示す。シミュレーションモデルの構築にあたり、簡略化した項目を以下に示す。

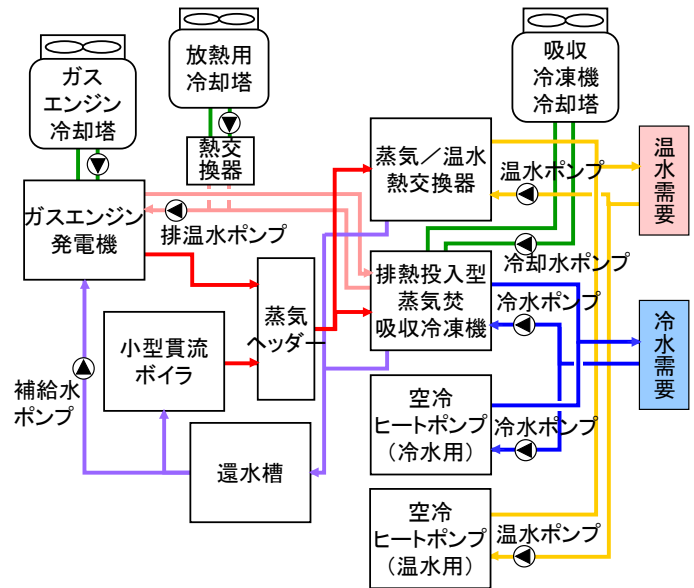
- (1) 発電機はガスエンジン 370kW×2 台を1 台にまとめる。台数制御を疑似的に再現するため、最小発電出力は1 台分の値(185kW)とする。
- (2) BESTによるシミュレーションでは排温水配管系の放熱用熱交換器が必要になるため、放熱用熱交換器を設置する。
- (3) 小型貫流ボイラ3 台は1 台にまとめる。
- (4) 蒸気需要は温水需要に置換するため、蒸気と温水のバランスを確保するよう蒸気需要ピーク分の能力を蒸気/温水熱交換器の定格能力に加算する。
- (5) 水/水熱交換器の定格能力は、蒸気/温水熱交換器の能力に加算する。
- (6) 蒸気を利用する熱源(排熱投入型蒸気焚吸収冷凍機、蒸気吸収ヒートポンプ)は合計能力を有する排熱投入型蒸気焚吸収冷凍機 1 台とする。なお蒸気吸収ヒートポンプの暖房能力は、温水熱源としての運転優先順位が低いため無視する。
- (7) 蒸気を利用しない熱源(直焚吸収式、インバーターボ冷凍機、インバータスクリュー冷凍機)は、まとめて仮の空冷ヒートポンプとする。空冷ヒートポンプは冷水用と温水用で各1 台ずつ設置する。
- (8) 排温水系統の太陽熱集熱器は無視する。

3.4 熱源運転スケジュール

簡易シミュレーションモデルにおける熱源運転スケジュールを表3に合わせて示す。ガスエンジンは8:00~22:00の時間帯に電主熱従で運転する。排熱投入型蒸気吸収冷凍機は夏期・中間期のみ運転し、冬期の冷熱製造には空冷 HP(冷水用)を運転する。温熱製造には蒸気/水熱交換器を全年 24 時間運転し、冬期には空冷 HP(温水用)をバックアップとして運転する。

3.5 シミュレーション試算結果

簡易シミュレーションモデルによる夏期(8月)および冬期(2月)の代表日のシミュレーション試算結果を図4、図5に示す。また、8月、2月における蒸気・排温水の月積算バランス比較を図6に示す。ガスエンジンは電主熱従運転としたが、常に定格発電出力で運転している。ガスエンジンから回収した蒸気を夏期は排熱投入型蒸気吸収冷凍機、冬期は蒸気/水熱交換器で消費しており、不足分を小型貫流ボイラで補っている。排温水は、夏期は排熱投入型蒸気吸収冷凍機で利用しているが、冬期は排温水利用先がないため、すべて余剰排熱として放熱している。冬期の温水需要はすべて蒸気/水熱交換器がまかなっているが、小型貫流ボイラの蒸気発生量も増大している。排温水利用のための水/水熱交換器を設置するなど、モデルの改良により効率的な運転が



【凡例】— 蒸気 — 回収温水 — 還水 — 冷水 — 温水 — 冷却水

図3 簡易シミュレーションモデルのシステム図

表3 簡易シミュレーションモデルにおける主要機器仕様

簡略化機器	仕様	図1における機器
ガスエンジン	定格/最小発電出力 740/185kW 定格発電効率 41% 定格排熱蒸気回収効率 17.1% 定格排熱温水回収効率 15.7% 定格排熱蒸気量 440kg/h 定格排熱温水流量 270 L/min 運転時間 8:00~22:00、電主熱従運転	ガスエンジン×2台
小型貫流ボイラ	定格能力 5,640kW 定格蒸気質量流量 9 t/h 定格ガス消費量 515.7Nm ³ /h 運転時間 0:00~24:00	小型貫流ボイラ×3台
蒸気/温水熱交換器	定格交換熱量 4,702.5kW 定格蒸気ゲージ圧力 784kPa 定格蒸気消費量 8,400kg/h 定格温水流量 9,629 L/min 運転時間 0:00~24:00	蒸気/水熱交×2台 + 水/水熱交 + 蒸気需要ピーク値
排熱投入型蒸気吸収冷凍機	定格冷却能力 2,619kW 定格蒸気消費量(排熱無) 2,015kW 定格排熱回収量 558.1kW 排熱単独運転負荷率 43% 定格冷水流量 3755 L/min 運転時間 8:00~22:00(冬期停止)	排熱投入型蒸気吸収冷凍機 + 蒸気吸収ヒートポンプ
空冷ヒートポンプ(冷水用)	定格冷却能力 5,801kW 定格冷水流量 8,320 L/min 運転時間 8:00~22:00	直焚吸収式×2台 + ターボ冷凍機 + スクリュー冷凍機
空冷ヒートポンプ(温水用)	定格加熱能力 2,280kW 定格温水流量 4,700 L/min 運転時間 0:00~24:00(夏・中間期停止)	直焚吸収式×2台

※運転時間は注釈がない場合は全年運転。
※夏期:6~9月、中間期:4,5,10,11月、冬期:12,1~3月。

できると考えられる。

4. まとめと今後の課題

新たに開発された蒸気関連機器モジュールを使って蒸気利用プラントの簡易シミュレーションモデルを作成し、蒸気利用 CGS のシミュレーションの試行を行った。今後は熱源の運転優先順位の見直しなどによりシミュレーションモデ

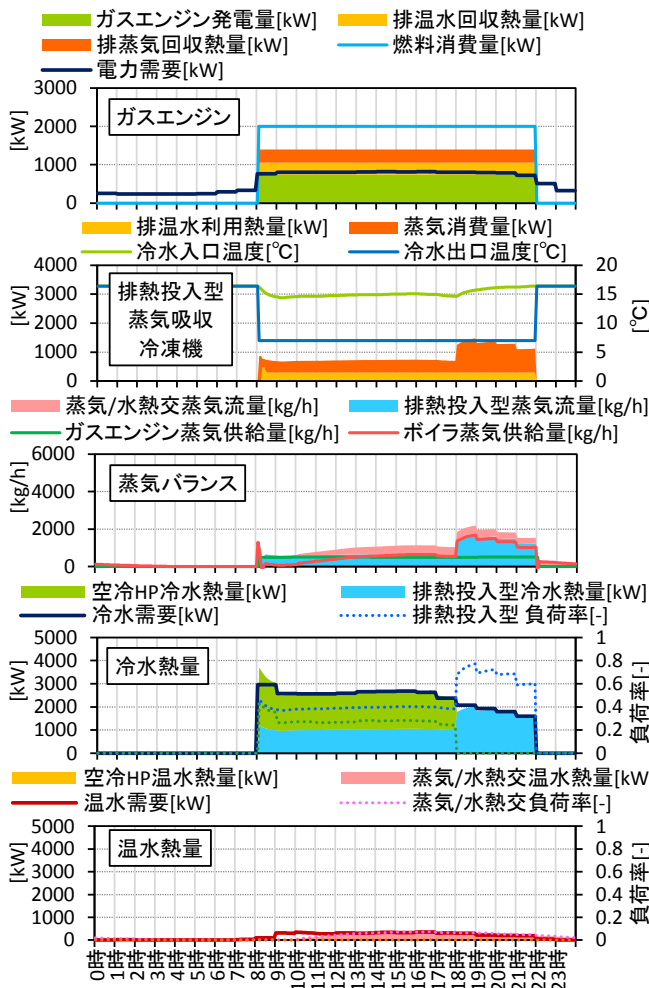


図4 代表日シミュレーション試算結果(8月、平日)

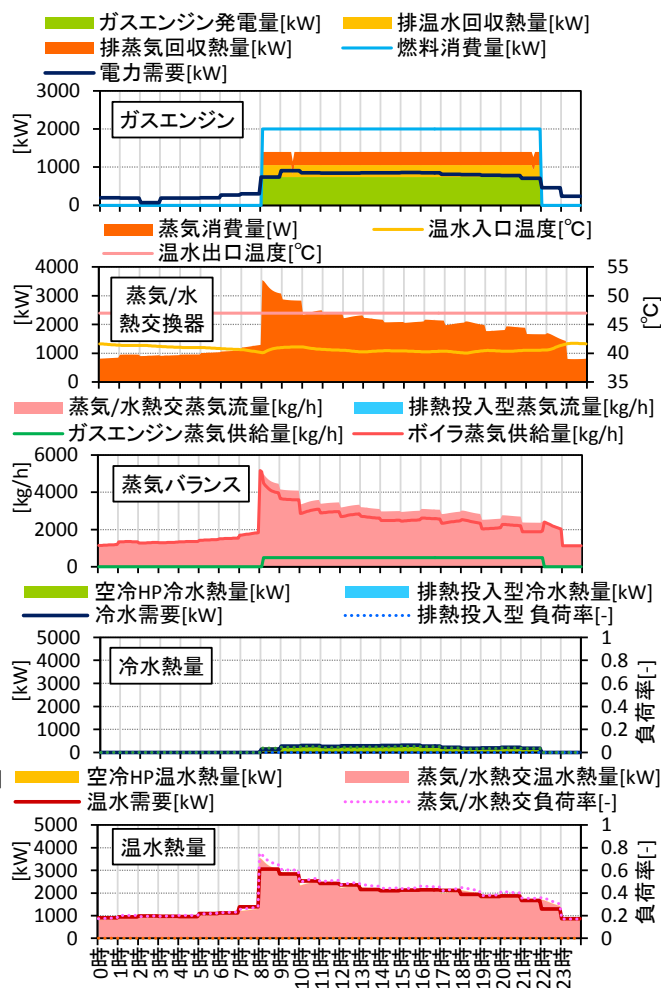


図5 代表日シミュレーション試算結果(2月、平日)

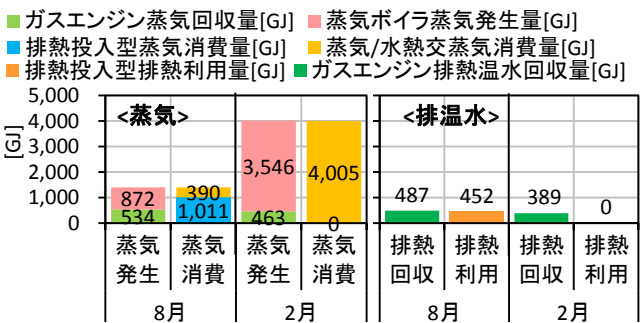


図6 蒸気・排温水バランス比較(月積算)

ルを改良するとともに、温水利用 CGS とのエネルギー消費量の比較を行いたい。さらに、想定対象プラントの全構成機器をシミュレーションモデル化し、直燃吸収式やターボ冷凍機などの熱源や、太陽熱・下水熱などの未利用エネルギーと組み合わせたときの最適な運用方法の検討を行いたい。

謝辞

本報は、(一財)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「統合化 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(以上、日建設計), 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

- 例えば 辻丸、佐藤他: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166)CGSを利用したデマンドレスポンス対応コントローラの開発、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp.53-56、2015.9
- 小川、藤居他: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111)吸収式冷凍機・ヒートポンプの新規モデルの特性、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp.1395-1398、2012.9
- 藤居、笹嶋他: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125)コージェネレーションシステムにおける蒸気利用機器の特性、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp.53-56、2013.9
- 藤居、秋元他: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141)蒸気利用CGSの周辺機器と排熱投入型吸収冷温水機の特性検討、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp.45-48、2014.9
- 藤居、二宮他: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165)蒸気・温水発生型ガスエンジンのモジュール開発における特性検討、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp.49-52、2015.9