

コージェネレーションシステムの試算例：

排熱投入型吸収冷温水機の特性を考慮した最適設計に関する ケーススタディ

2022年9月

コージェネレーション検討WG

はじめに

排熱投入型吸収冷温水機の排熱利用量は、排熱系統の温度や流量によって変化する特性を持っている。BEST では排熱系統の温度や流量が状態値として得られるので、コージェネレーションシステム（CGS）の評価を適切に行うことができる。

排熱投入型吸収冷温水機は、図 1 に示すように冷房負荷率によって排熱回収量が変化する特性¹⁾を持っており、一般的には中間能力で最大となる。この時の負荷率を排熱単独運転負荷率という。

つまり、定格排熱利用量と排熱回収量の最大値が異なるため、発電機の定格排熱回収量を排熱投入型吸収冷温水機との排熱利用量と整合させるべきか、適切な設計法が確立していない。

また、複数台の排熱投入型吸収冷温水機を接続する場合、運転台数の増段方法には①熱源を定格冷房能力で増段する方法と、②排熱単独運転で増段する方法の2通りがある。増段方法によって、排熱投入型吸収冷温水機の排熱利用量が大きく変化すると考えられるが、その効果は定量的に評価されていない。

そこで、20,000m²の事務所ビルを対象として、コージェネレーションシステムにおいて排熱利用を最適化する設計・運用方法を検証するため、BEST を用いたケーススタディを行った。

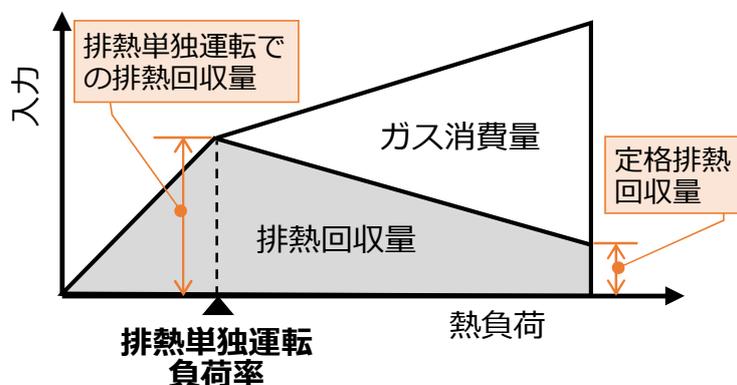


図 1 排熱投入型吸収冷温水機の排熱利用特性

ケーススタディ条件

対象ビルの建物概要

対象とした事務所ビルの建物概要を表 1 に示す。

表 1 対象とした事務所ビルの建物概要

所在地	東京（事務所）
延床面積	20,580.88m ²
階数	地上 14 階 / 地下 1 階
設備容量	冷房: 2,342kW / 暖房: 2,160 kW

各ケースの条件

BEST 専門版を使って、排熱投入型吸収冷温水機的能力・構成を変化させることで、排熱およびエネルギーを適切に利用する熱源構成を検証する。各ケースのケーススタディ条件を表 2 に示す。

表 2 ケーススタディ条件

ID	目的	内容
Case1	最適な排熱投入型吸収冷温水機の選定方法の検証	建物冷房需要の設備容量に合わせて排熱投入型吸収冷温水機を選定
Case2		排熱投入型吸収冷温水機の定格排熱回収量がガスエンジンの定格排熱回収量と一致するように選定
Case3		排熱投入型吸収冷温水機の排熱単独運転時の排熱回収量がガスエンジンの定格排熱回収量と一致するように選定
Case4	排熱優先の熱源台数制御の効果の検証	ケース 2 と同じ容量の排熱投入型吸収冷温水機を 2 台設置、定格冷房能力で増段する通常の熱源台数制御
Case5		ケース 2 と同じ容量の排熱投入型吸収冷温水機を 2 台設置、排熱単独運転優先の熱源台数制御

ケース 1～3：排熱投入型吸収冷温水機の選定方法の検証

ケース 1～3 では最適な排熱投入型吸収冷温水機の選定方法を検証する。ケース 2、3 では排熱投入型吸収冷温水機の冷房能力がケース 1 よりも小さくなり、冷房能力が不足するため、追加熱源として直焚吸収冷温水機を設置する。

ケース 4、5：排熱優先熱源台数制御の効果検証

ケース 4 および 5 では、ケース 2 と同じ容量の排熱投入型吸収冷温水機を 2 台直列に設置し、排熱優先の熱源台数制御の効果を検証する。なお、熱源台数制御の設定は、BEST 専門版の熱源台数制御モジュール²⁾の排熱単独優先機能を用いる。

- ケース 4：定格冷房能力で熱源を増段する通常の熱源台数制御
排熱投入型吸収冷温水機 1 台目の排熱運転からガス追焚運転に移行した後に、排熱投入型吸収冷温水機 2 台目を運転する。
- ケース 5：排熱単独運転優先の熱源台数制御
排熱投入型吸収冷温水機 1 台目の排熱運転→排熱投入型吸収冷温水機 2 台目の排熱運転→排熱投入型吸収冷温水機 1 台目のガス追焚運転→排熱投入型吸収冷温水機 2 台目のガス追焚運転の順で運転する。

熱源構成

今回対象としたコージェネレーションシステムは、ガスエンジン発電機1台から排出される排温水を冷房用熱源（排熱投入型吸収冷温水機）および暖房用熱源（暖房用熱交換器）で使用するシステムである。各ケースにおける熱源構成図を図2に示す。

ケース1では排熱投入型吸収冷温水機1台のみとする。ケース2、3では排熱投入型吸収冷温水機1台に加えて直焚吸収冷温水機1台を設置する。ケース4、5では、他熱源との組み合わせも考えられるが、今回のケーススタディでは各ケースの電力需要を同一とするため、すべてガス熱源とし、排熱投入型吸収冷温水機を2台設置する。

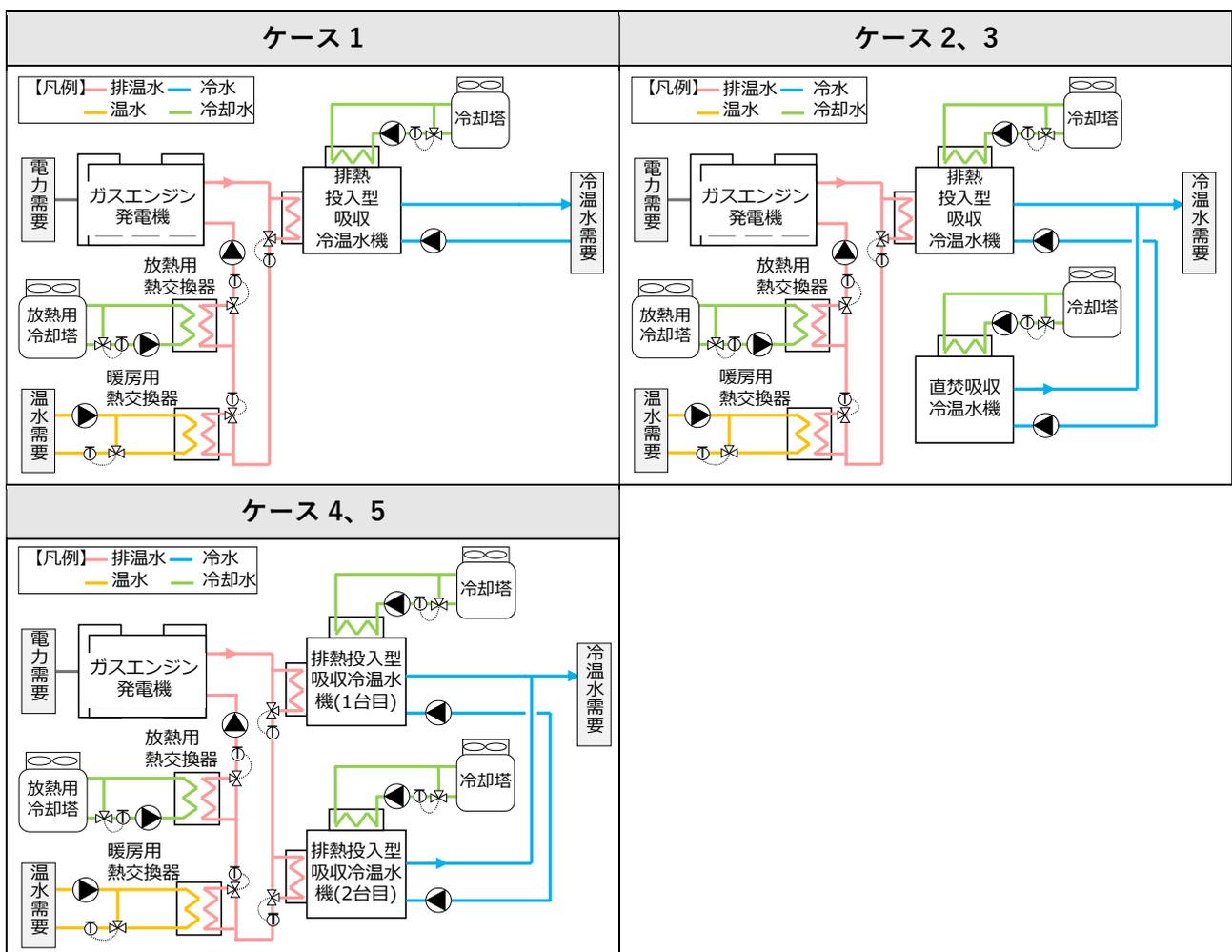


図2 各ケースの熱源構成図

主要機器の仕様

ガスエンジン発電機の仕様（各ケース共通）を表 3、ケース 1、2、3 の冷熱源機器の仕様を表 4 に示す。

表 3 ガスエンジン発電機の仕様（各ケース共通）

機器名称	項目名	仕様
ガスエンジン発電機	定格発電出力[kW]	370
	定格発電効率 (LHV) [%]	41
	定格排熱温水回収効率(LHV) [%]	34
	定格排熱回収量[kW]	307
	定格排熱温水流量[L/min]	440
	排温水出口温度上限値[°C]	90

表 4 ケース 1、2、3 の冷熱源機器の仕様

機器名称	項目名	仕様		
		Case1	Case2	Case3
排熱投入型吸収冷温水機	定格冷却能力[kW]	2110	949	422
	定格冷房ガス消費量(排熱無) [kW]	1,564	704	313
	定格排熱入口温度[°C]	90	90	90
	排熱出口下限温度[°C]	80	80	80
	定格排熱温水流量[L/min]	960	432	192
	定格排熱回収量[kW]	650	292	130
	排熱単独運転負荷率[%]	46	46	46
	排熱単独運転時の排熱回収量[kW]	1,387	624	277
	定格冷温水流量[L/min]	6,049	2,720	1,210
直焚吸収冷温水機	定格冷却能力[kW]	—	1,055	1,582
	定格冷温水流量[L/min]	—	3,023	4,537
	定格冷房ガス消費量[kW]	—	798	1,196

ケース 4、5 における排熱投入型吸収冷温水機の熱源仕様は 2 台ともケース 2 と同じであるが、2 台の排熱利用量を同程度にするため、表 5 に示すように排温水出入口温度が各 5°C 差となるように設定した。

表 5 ケース 4、5 の排温水出入口温度の設定

機器名称	項目名	仕様	
		1 台目	2 台目
排熱投入型吸収冷温水機	定格排熱入口温度[°C]	90	85
	排熱出口下限温度[°C]	85	80

ケーススタディ結果

各ケースの冷房期間（4～11月）における熱源一次エネルギー消費量の比較を図 3、排熱利用量の比較を図 4、処理熱量の比較を図 5 に示す。

熱源の一次エネルギー消費量

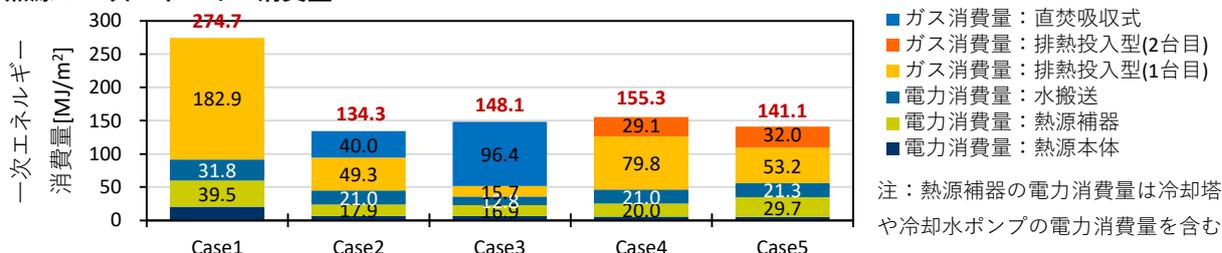


図 3 冷房期間における熱源一次エネルギー消費量の比較

排熱利用量

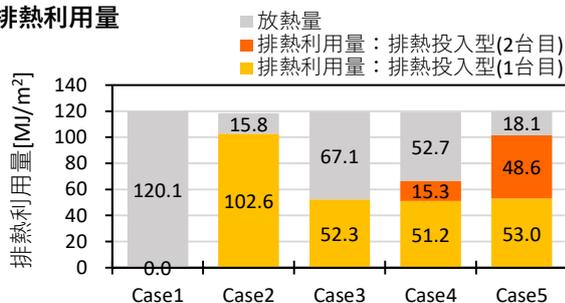


図 4 冷房期間における排熱利用量の比較

処理熱量（冷熱）

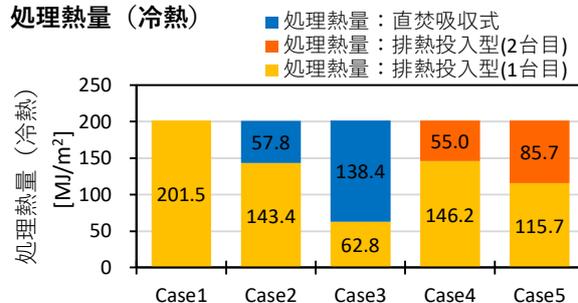


図 5 冷房期間における処理熱量（冷熱）の比較

ケース 1～3：排熱投入型吸収冷温水機の選定方法の検証

ケース 1～3 の排熱投入型吸収冷温水機の選定方法の比較では、ガスエンジンの定格排熱量に合わせて排熱投入型吸収冷温水機を選定したケース 2 が最も一次エネルギー消費量が少なく、排熱も無駄なく利用される結果となった。

ケース 1 では、冷房需要に合わせて排熱投入型吸収冷温水機を選定したが、排熱利用が全く行われず、一次エネルギー消費量が最も多い結果となった。またケース 3 では、排熱回収量が最大となるように排熱投入型吸収冷温水機を選定したが、ケース 2 よりも放熱が多い結果となった。

BEST における排熱投入型吸収冷温水機の排温水特性の適用範囲を表 6 に示す。また、ケース 1～3 の夏期代表日における排熱回収量および処理熱量の比較結果を図 6 に示す。ケース 1、2 とともに、排熱投入型吸収冷温水機の排温水流量と、ガスエンジンの排温水流量のバランスが一致しないため、排熱を有効に利用することができなかった。

表 6 BEST における排熱投入型吸収冷温水機の排温水特性の適用範囲（冷房運転時）

名称	定格値	上限		下限	
		上限値	範囲外の処理	下限値	範囲外の処理
排温水 入口温度	90℃	95℃	運転継続 (上限値固定)	入力値	排熱投入停止
排温水 流量比	100%	100%	運転継続 (上限値固定)	50%	排熱投入停止

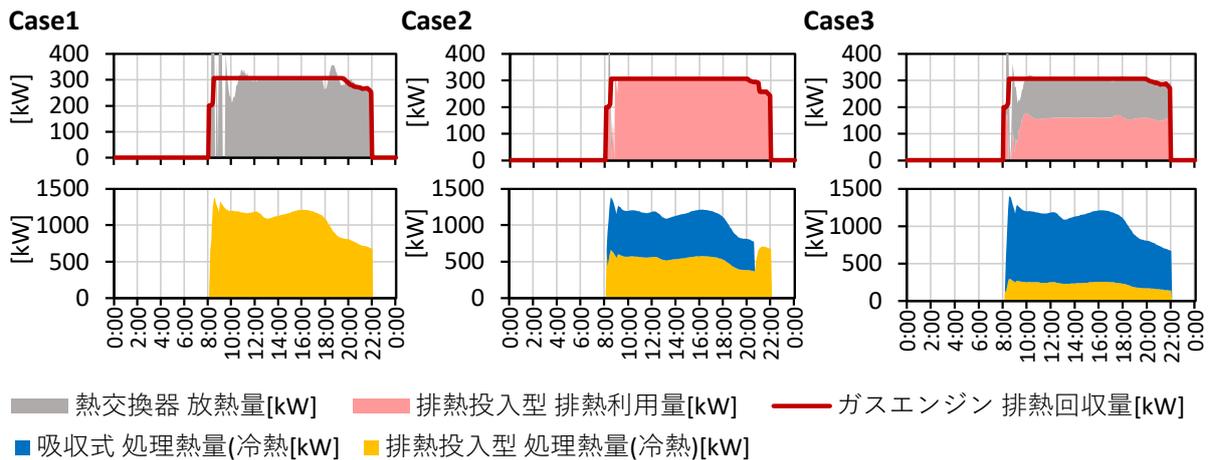


図 6 夏期代表日における排熱回収量および処理熱量の比較結果

ケース 1 では、排温水仕様について配慮しなかったため、ガスエンジンの排温水流量（440 L/min）が排熱投入型吸収冷温水機の定格排温水流量（960 L/min）に対して 46%と小さく、排温水の下限流量比 50%に満たないため、排熱投入が行われずすべて放熱されている。

一方、ケース 3 では、排熱回収量が最大となるように排熱投入型吸収冷温水機を選定したが、ガスエンジンの排温水流量（440 L/min）が排熱投入型吸収冷温水機の定格排温水流量（192 L/min）の約 2.3 倍となり、排温水の上限流量比を超えるため、定格排温水流量以上の排温水が利用されず、ケース 2 よりも放熱が多い。

ケース 1 でも排熱投入型吸収冷温水機の排温水仕様をガスエンジンに合わせた設計とすれば、ケース 2 と同等の結果になると思われるが、実際の運用では熱源のメンテナンス時を考慮してケース 2 のように熱源を複数台設置すべきである。

ケース 3 では排熱回収量が最大となるように排熱投入型吸収冷温水機を選定したため、排熱投入型吸収冷温水機の容量削減も可能となり、排熱利用率・省エネルギー性能ともに最適になると思われたが、排温水流量比の制約により、想定した結果にならなかった。現在の BEST では表現しきれていない部分がある可能性もあり、計算ロジックの見直しも含めてさらに検証が必要である。

ケース 4、5：排熱優先熱源台数制御の効果検証

ケース 4 よりもケース 5 の方が、排熱を有効に利用でき、一次エネルギー消費量も少ない結果となった。ケース 4、5 の中間期代表日における排熱投入型吸収冷温水機の挙動の比較結果を図 7 に示す。

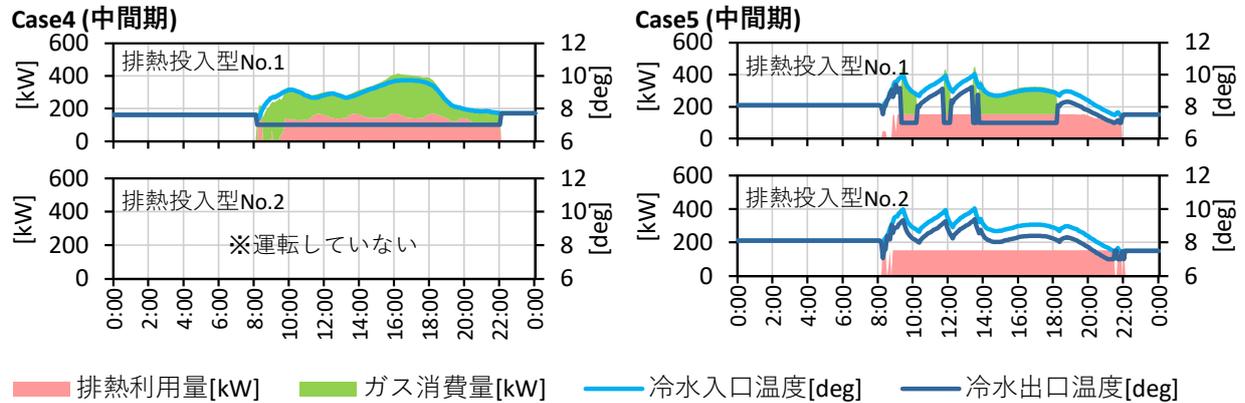


図 7 ケース 4、5 の中間期代表日における排熱投入型吸収冷温水機の挙動の比較結果

冷房需要の少ない中間期では、通常の台数制御を行うケース 4 では排熱投入型吸収冷温水機 1 台目のみが運転し、排熱投入型吸収冷温水機 2 台目は運転していない。排熱単独運転優先の台数制御を行うケース 5 では、同じ冷房需要でも排熱投入型吸収冷温水機が 2 台とも排熱単独運転となり、冷熱量が不足する時間帯は排熱投入型吸収冷温水機 1 台目のみガス追焚運転を行っている。そのため、図 4 に示したようにケース 5 の方がケース 4 よりも排熱を有効に利用できる結果となった。

ただし、ケース 5 では排熱投入型吸収冷温水機が 2 台とも運転する時間帯が増えるため、冷却水ポンプおよび冷却塔の稼働時間が増え、熱源補機（冷却水関連機器を含む）の電力消費量がケース 4 よりも増加した。

まとめ

CGS が導入された事務所ビルを対象に、省エネルギー性能や排熱利用量が最適となる設計・運用方法を、BEST 専門版を用いたケーススタディにより検証した。ガスエンジン発電機の定格排熱量に合わせて排熱投入型吸収冷温水機を選定したケースや、排熱単独運転優先の台数制御としたケースにおいて、省エネルギー性能や排熱利用量が優れる結果となった。

ただし、異なる熱需要の建物や他熱源との組み合わせでは、省エネルギー性能も大きく異なり、さらに設計の重要性が増すと考えられるので、それらの検証は今後の課題とする。

参考文献

- 1) 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 141）蒸気利用 CGS の周辺機器と排熱投入型吸収冷温水機の実験検証、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp.45-48、2014.9
- 2) 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 180）空調熱源グループの制御機能の拡張、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp.45-48、2016.9

参考資料

2019 年度空気調和・衛生工学会大会（札幌）

発表スライド

the BEST Program

Building Energy Simulation Tool

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233

排熱投入型吸収冷温水機の特徴を考慮した コージェネレーションシステムの 最適設計に関するケーススタディ

○佐藤誠（佐藤エネルギーリサーチ）、辻丸のりえ、二宮博史、藤居達郎、
笹本太郎、西田裕道、笹嶋賢一、野原文男、秋元孝之、石野久彌、村上周三

2019年度空気調和・衛生工学会大会（札幌）

the BEST Program
Building Energy Simulation Tool

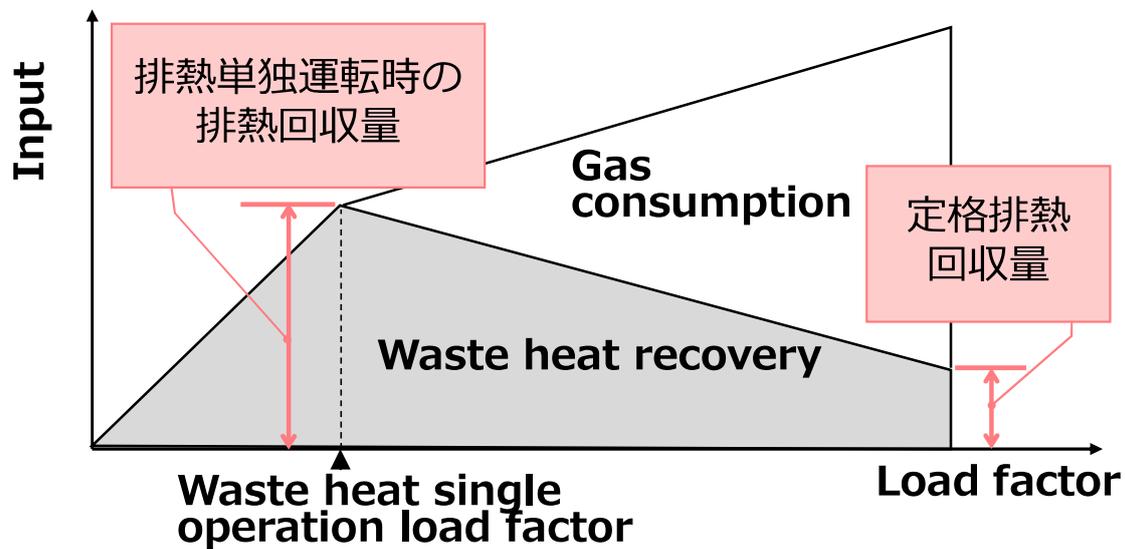
コージェネ検討SWGの主な活動

年	主な活動内容
2009年	建築・空調・電気・衛生との連成シミュレーション
2011年	太陽熱・CGS統合システムのシミュレーション
2012年	CGS導入時のピーク電力削減効果検証 冷却水変流量制御の省エネ効果検証
2013年	事務所のケーススタディ
2014年	ホテルのケーススタディ
2015年	CGSを用いたデマンドレスポンスのケーススタディ CGSを導入したZEBのケーススタディ
2016年	蒸気利用システムのシミュレーション（簡易モデル）
2017年	蒸気利用システムのシミュレーション（詳細モデル）
2018年	排熱投入型吸収冷温水機の熱源コントローラ拡張

CGS：コージェネレーションシステム

- **排熱投入型吸収冷温水機（RHA）の特性**

冷房負荷率によって排熱回収量が変化する



排熱回収量の定格値と最大値が異なる

- **RHAの適切な設計方法？**

- CGUの定格排熱回収量と整合する適切な設計法は確立していない。

CGU：コージェネレーションユニット（発電機側）

- **RHAの適切な熱源台数制御方法？**

- 台数制御の方法によりRHAの排熱利用量が大きく変化するが、その効果は不明

- （1）熱源を定格冷房能力で増段する方法
- （2）排熱単独運転で増段する方法

➡ BEST専門版を用いたケーススタディを実施

- ケーススタディの目的

システム全体の省エネルギー性能を最適化するCGUとRHAとの組み合わせ、および熱源台数制御方法を検証する。

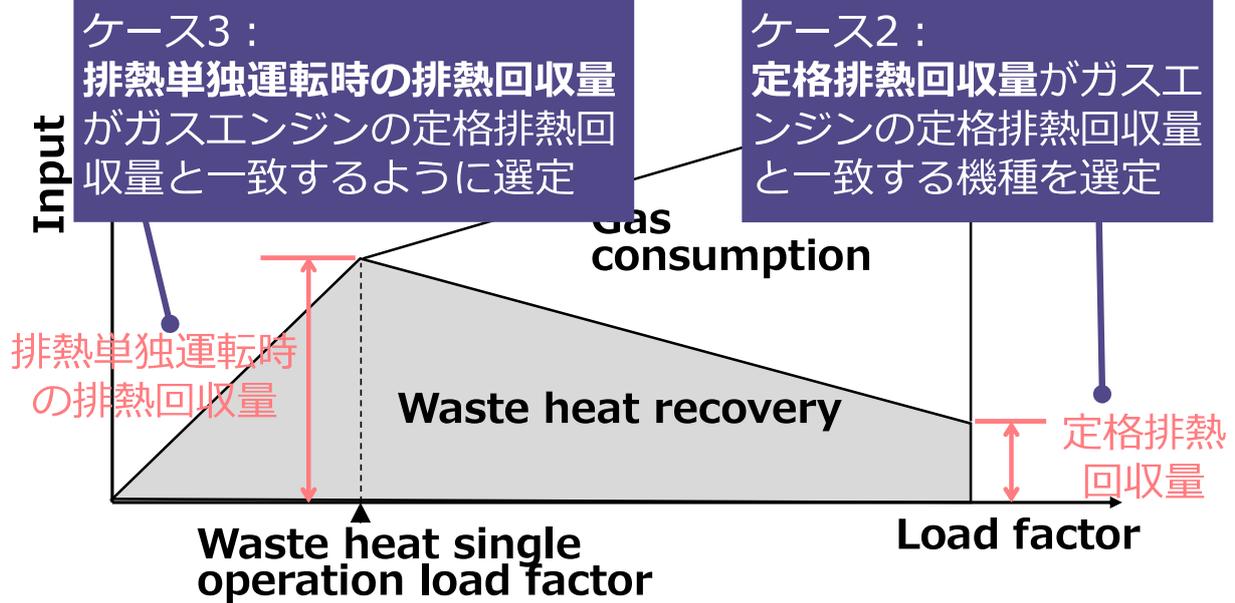
- ケーススタディ対象物件

所在地	東京（事務所）
延床面積	20,580.88m ²
階数	地上14階 / 地下1階
設備容量	冷房: 2,342kW / 暖房: 2,160 kW

RHA容量の適切な設計方法

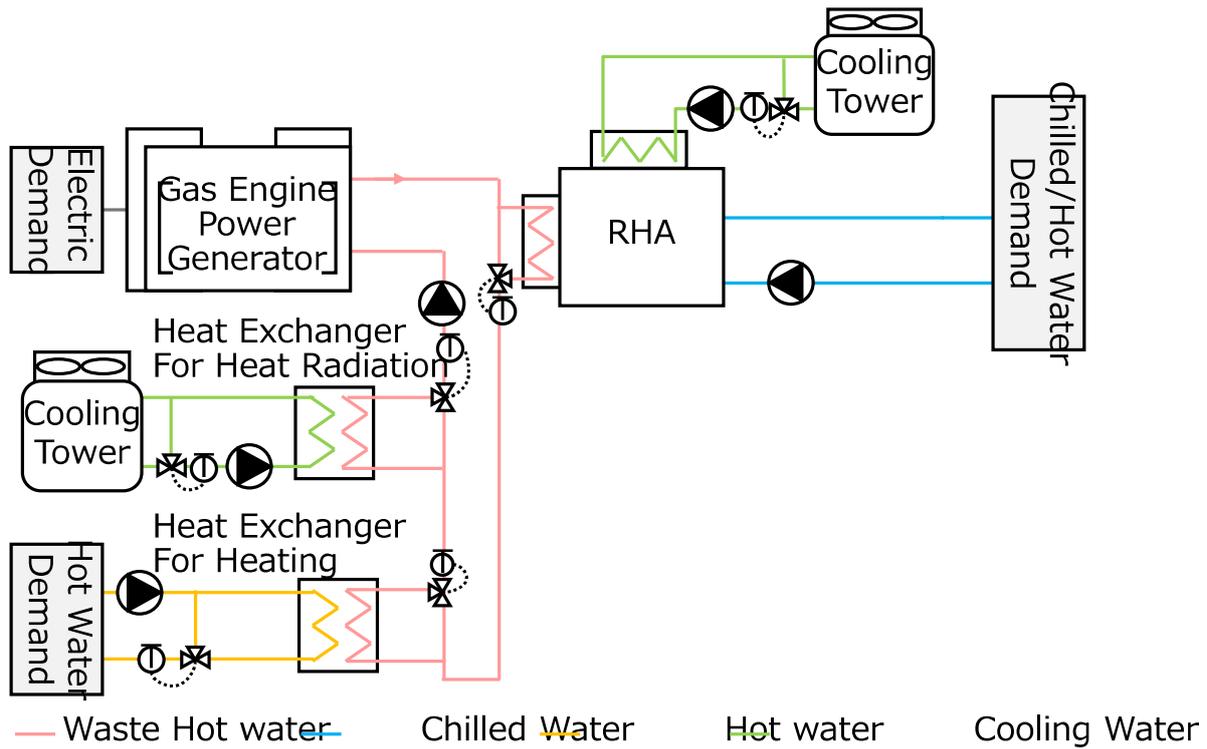
● RHAの選定方法（ケース1、2、3）

ケース1：
建物冷房需要の設備容量に合わせてRHAを選定

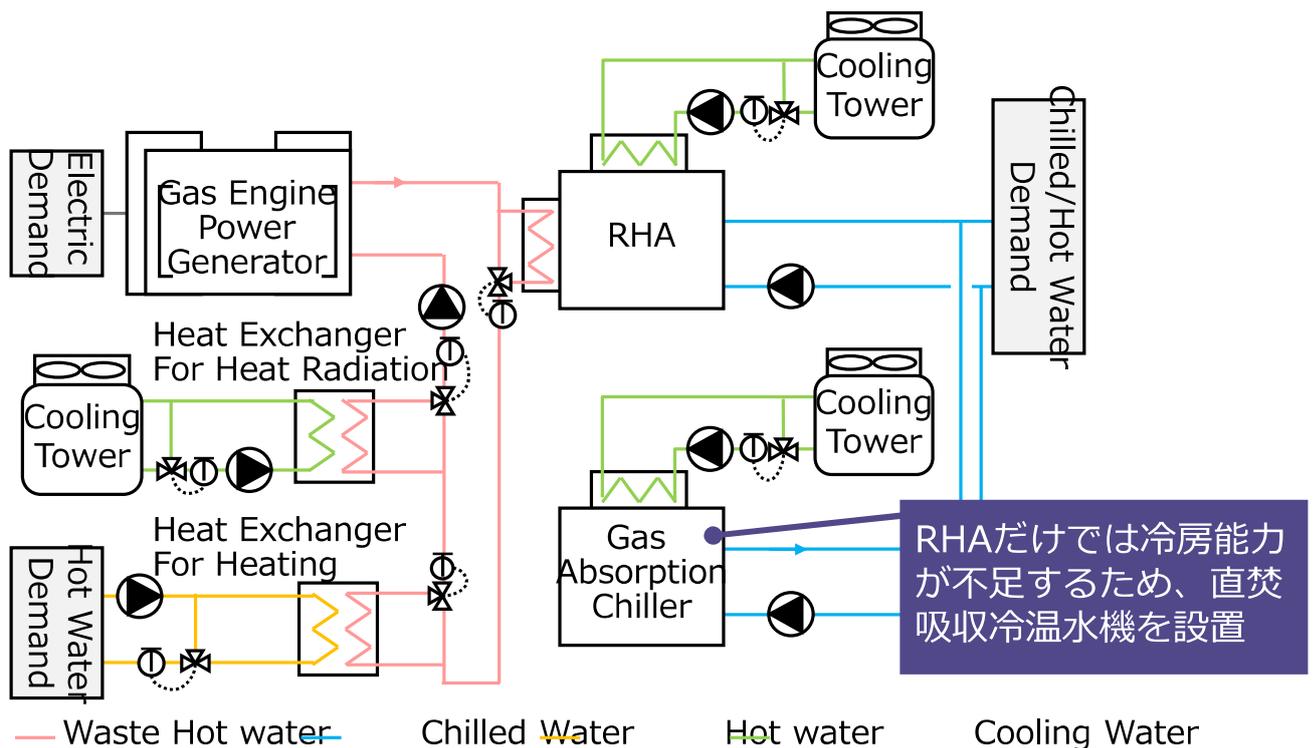


主要機器仕様と熱源構成図

● 熱源構成図（ケース 1 の場合）



● 熱源構成図（ケース 2、3 の場合）



ケーススタディ結果

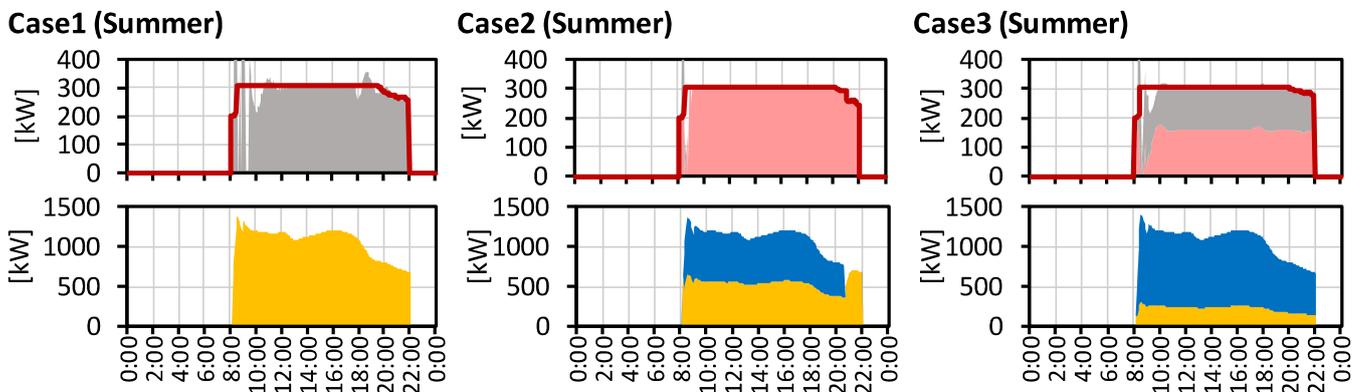
RHA選定方法の検証結果

● 夏期代表日の排熱回収量・処理熱量（ケース1～3）

Hex Heat lost[kW]
 RHA Heat recovery[kW]
 GE Heat recovery[kW]

RA Cold heat output[kW]
 RHA Cold heat output[kW]

GE:ガスエンジン発電機、Hex:放熱用熱交換器、RHA:排熱投入型吸収冷温水機、RA:直焚吸収冷温水機



- **ケース1**：排熱が全く利用されていない（すべて放熱）
- **ケース2**：無駄なく排熱利用が行われている
- **ケース3**：排熱が半分程度しか利用されていない

● 排熱利用量が異なる原因

○ BESTにおけるRHAの排温水特性の適用範囲

名称	定格値	上限		下限	
		上限値	範囲外の処理	下限値	範囲外の処理
排温水 入口温度	90℃	95℃	運転継続 (上限値固定)	入力値	排熱投入停止
排温水 流量比	100%	120%	運転継続 (上限値固定)	50%	排熱投入停止

120%を超える温水はバイパス

● 排熱利用量が異なる原因

○ 各ケースの排温水流量比

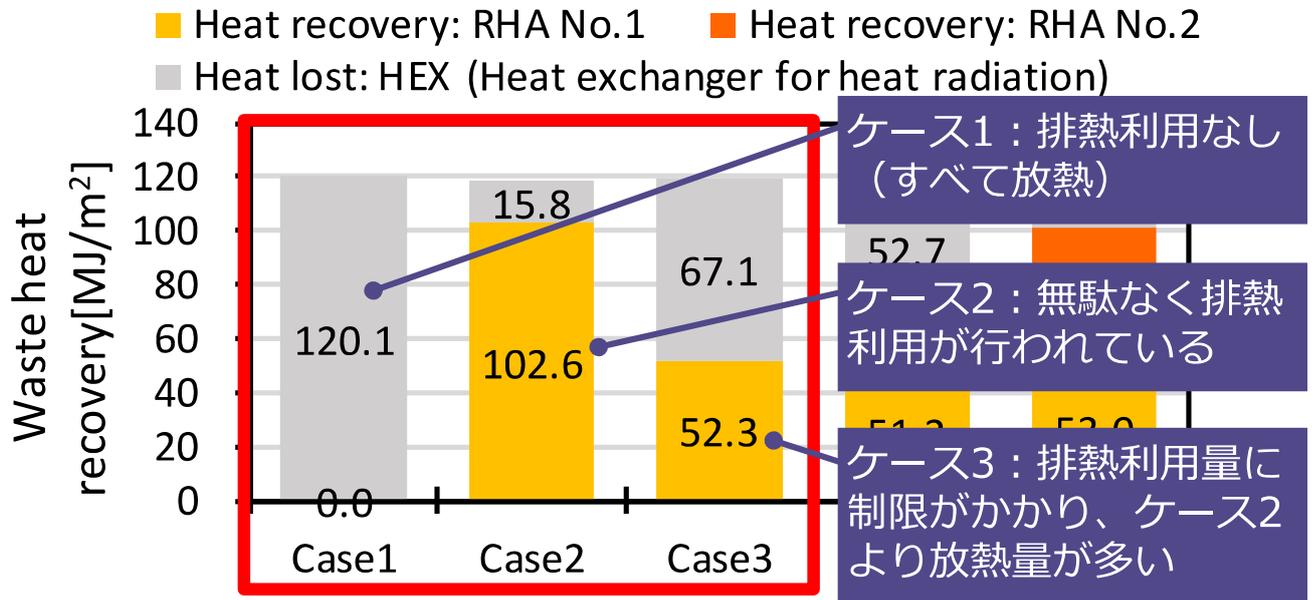
ケース名	ガスエンジンの 排温水流量	RHAの定格 排温水流量	排温水 流量比
ケース1	440 L/min	960 L/min	46%
ケース2		432 L/min	102%
ケース3		192 L/min	229%

ケース1：排温水の下限流量50%に満たないため、排熱投入が行われない

ケース3：排温水の上限流量比120%を超えるため、定格排温水流量以上の排温水が利用されない

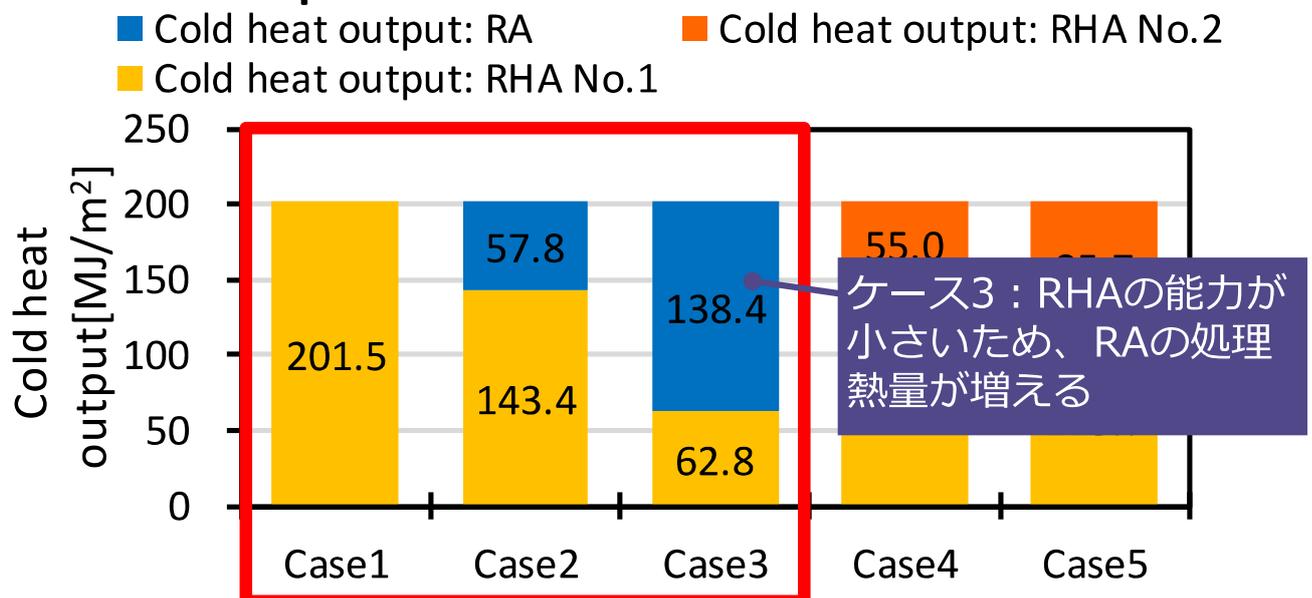
● 冷房期間（4～11月） 排熱利用量

Waste heat recovery



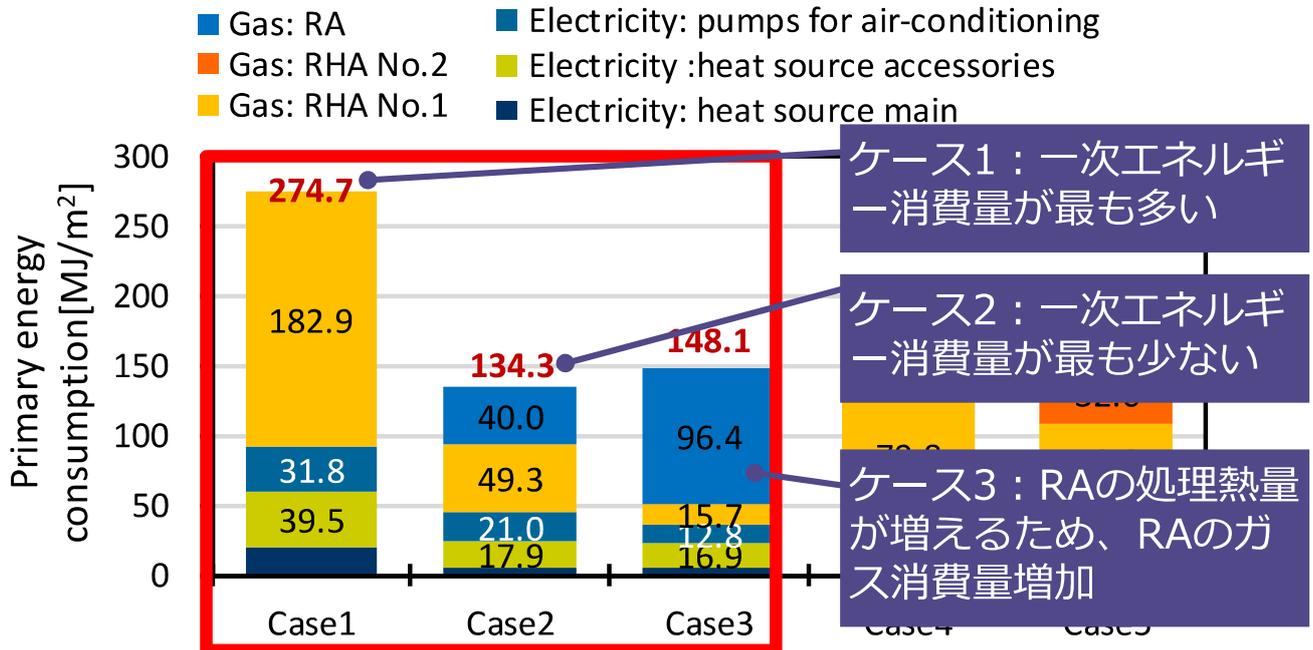
● 冷房期間（4～11月） 処理熱量

Cold heat output



● 冷房期間（4～11月）熱源一次エネルギー消費量

Heat source primary energy consumption



※RA:直燃吸収冷温水機

※冷却塔ファンおよび冷却水ポンプの消費電力量は熱源補機（heat source accessories）に含む

● RHA選定方法の検証結果（ケース1～3）

- 冷水側だけでなく、**排温水側についても配慮した設計とすることで、**排熱を有効に利用できる。
- RHA1台でも、**ガスエンジンに合わせた排温水仕様**とすれば、ケース2と同等の結果になると思われる。

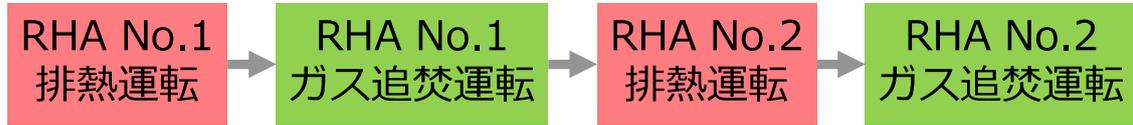
（ただし、熱源のメンテナンスを考慮すれば複数台設置とすることが望ましい）

- RHA選定方法の検証結果（ケース1～3）
 - ケース3では排熱回収量が最大となるようにRHAを選定した。
 - 排熱利用量・省エネルギー性能ともに最適化できると思われたが、想定した結果にならなかった。

RHAの適切な 熱源台数制御方法

● 熱源台数制御

○ ケース4：通常の熱源台数制御



○ ケース5：排熱単独運転優先の熱源台数制御

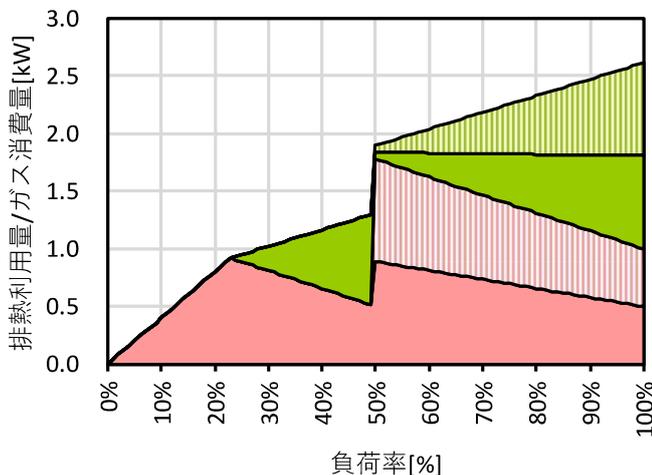


BEST専門版ではどちらの計算も可能

● 熱源台数制御のイメージ

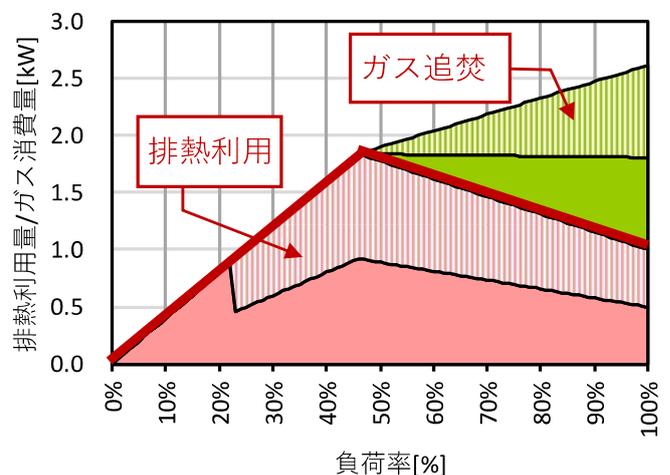
ケース4：通常の熱源台数制御

■ 1台目 排熱利用率[-] ■ 2台目 排熱利用率[-]
■ 1台目 ガス消費率[-] ■ 2台目 ガス消費率[-]

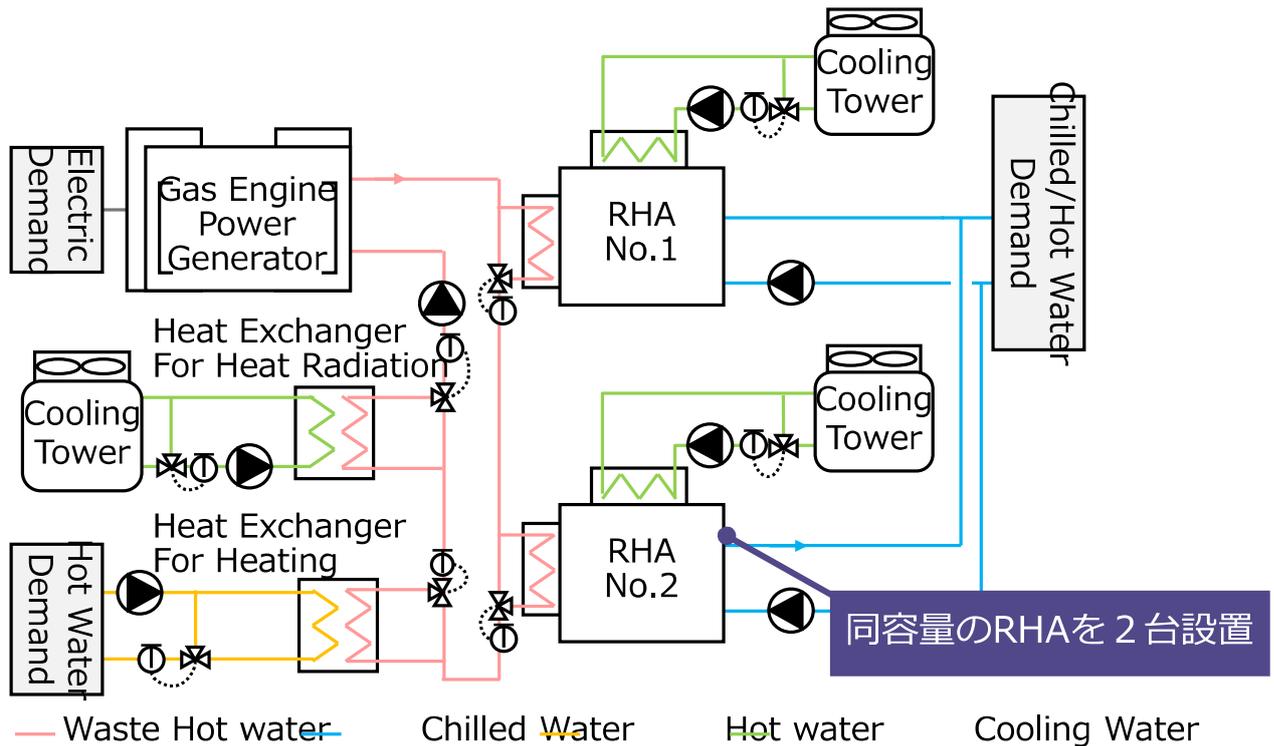


ケース5：排熱単独運転優先

■ 1台目 排熱利用率[-] ■ 2台目 排熱利用率[-]
■ 1台目 ガス消費率[-] ■ 2台目 ガス消費率[-]



● 熱源構成図 (ケース4、5の場合)

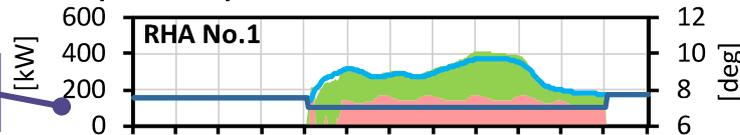


● 中間期代表日のRHAの挙動 (ケース4,5)

● ケース4

RHA1台のみが運転

Case4 (Midterm)

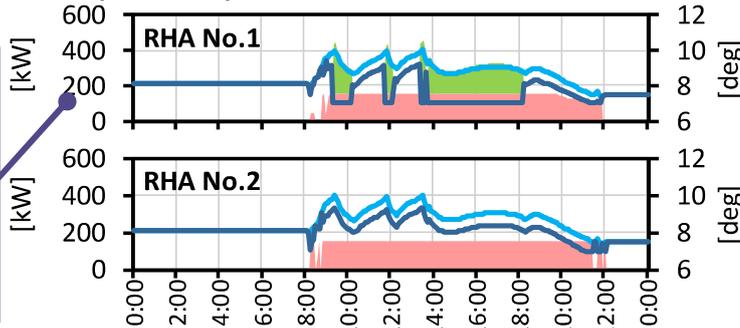


※RHA No.2は稼働していない

● ケース5

RHA2台とも排熱単
独運転
(冷熱量が不足する
時間帯はRHA 1台目
のみガス追焚運転)

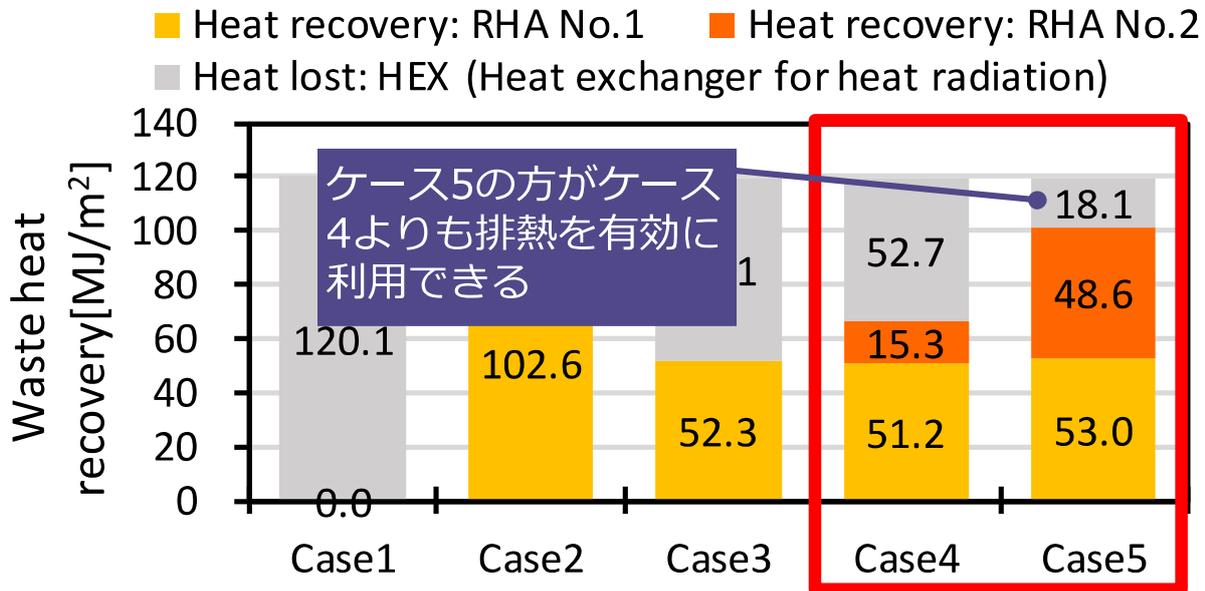
Case5 (Midterm)



- Gas consumption[kW]
- Heat recovery[kW]
- Chilled water inlet temperature[deg]
- Chilled water outlet temperature[deg]

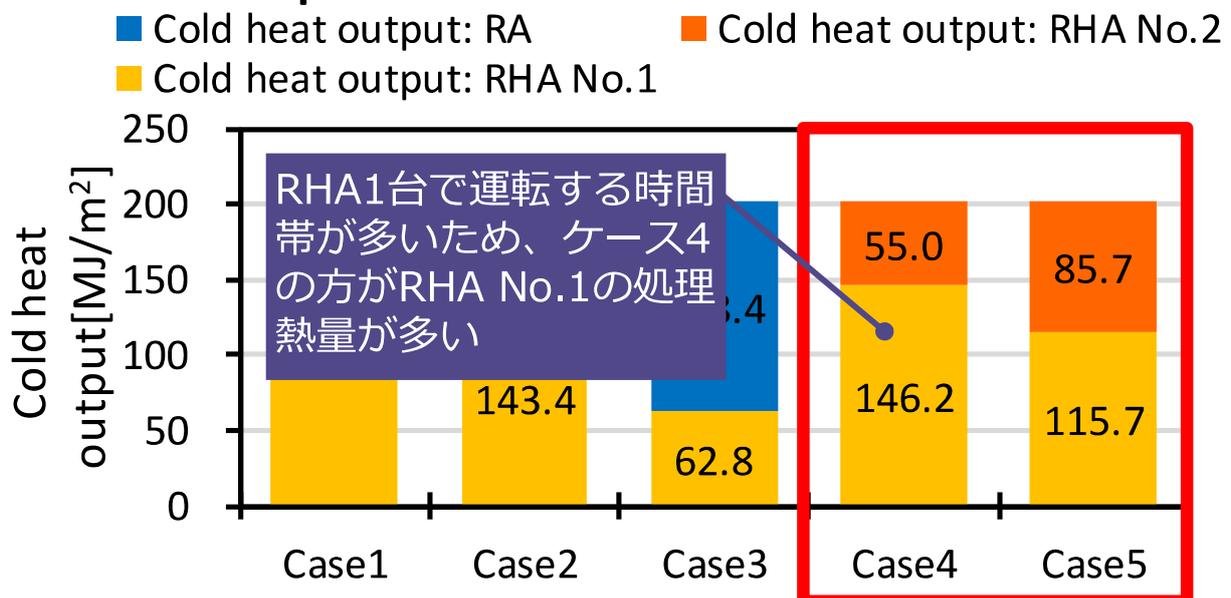
● 冷房期間（4～11月）排熱利用量

Waste heat recovery



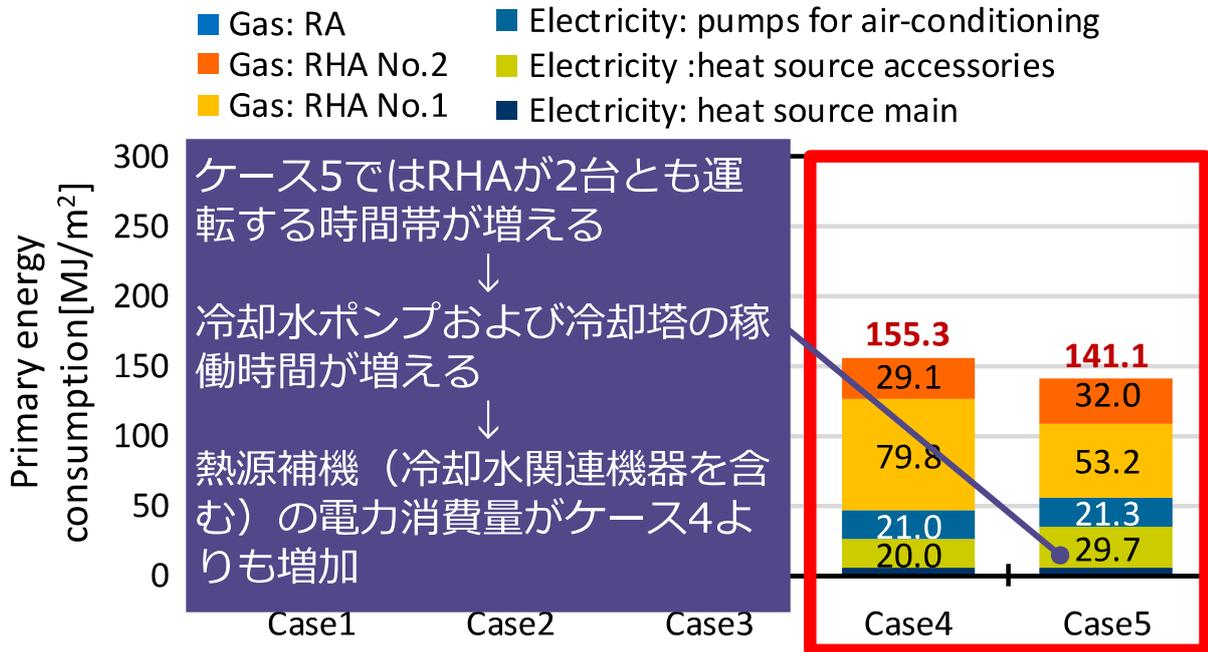
● 冷房期間（4～11月）処理熱量

Cold heat output



● 冷房期間（4～11月）熱源一次エネルギー消費量

Heat source primary energy consumption



※RA:直焚吸収冷温水機

※冷却等および冷却水ポンプの消費電力量は熱源補機（heat source accessories）に含む

● 排熱優先熱源台数制御の効果検証（ケース4、5）

- 今回は各ケースの電力需要を同一とするため、全てガス熱源で設計した。
- 排熱単独運転優先の熱源台数制御を行う場合、**電動系熱源と組み合わせた設計も多い。**
- 最適な熱源種類の組み合わせと台数制御の方法を検証するため、**豊富なパターンのBESTテンプレートの整備**が望ましい。

● まとめ

- CGSが導入された事務所ビルを対象に、**省エネルギー性能や排熱利用量が最適となる設計・運用方法**をケーススタディにより検証。
- 以下のケースにおいて、省エネルギー性能や排熱利用量が優れる結果となった。
 - ガスエンジン発電機の定格排熱量に合わせてRHAを選定したケース
 - 排熱単独運転優先の台数制御としたケース

● 今後の課題

- 異なる熱需要の建物や他熱源との組み合わせでは、省エネルギー性能も大きく異なり、**さらに設計の重要性が増す**。
- BESTを用いて容易に検証が行えるように、**テンプレート等の整備**を行うことが課題。