

還水を利用した清掃工場排熱のカスケード利用の提案

Proposal for cascade use of waste heat from incineration plants using returning water

浜田 真祐未*、任 嘉**、湯浅 和博***
Mayumi Hamada, Jia Ren, Kazuhiro Yuasa

keywords: Waste Heat from Incineration Plants, Heat Utilization, Cascading Use
清掃工場排熱 熱利用 カスケード利用

1. はじめに

清掃工場排熱は未利用エネルギーの中で比較的都市部に偏在する大規模なエネルギー源であり、都市における更なる有効活用が期待されている。清掃工場排熱を用いた発電は、エネルギーの運搬面では優れたものの変換効率が低く、一方、熱供給は熱媒を送るためのインフラ整備が既存市街地では難しい。現在多くの清掃工場が排熱利用を行っているが、排熱を利用した多くの場合熱供給事業において、熱利用後の還水は、低温の用途での利用可能性があるにもかかわらず、事例はほとんど見られない。本研究では、清掃工場排熱の更なる活用に向けて、既存の熱供給事業周辺における排熱のカスケード利用の可能性を明

表1 調査概要

調査対象	調査1	東京都内の清掃工場排熱利用施設(22件)
	調査2	調査1の対象施設周辺の公共施設(21件)
調査対象抽出条件	調査1	①地域熱供給を行っていない ②清掃工場からの熱供給温度は80℃以上
	調査2	①清掃工場排熱利用施設から直線距離500m以内の最も近い3施設 ②延床面積1000㎡以上③公園、倉庫、都市基盤施設など熱需要が不明な施設は対象外とする
調査方法	アンケート調査(回答 調査1:8件、調査2:3件)	
調査項目	両調査共通	施設概要、施設設備、熱利用用途、再生可能・未利用エネルギー利用状況
	調査1のみ	清掃工場排熱利用状況、清掃工場排熱利用実績

表2 東京都における清掃工場排熱利用施設と周辺の公共施設の概要

	清掃工場排熱を利用している施設(施設A)								清掃工場排熱利用施設周辺の公共施設(施設B)			
	施設A1	施設A2	施設A3	施設A4	施設A5	施設A6	施設A7	施設A8	施設B1	施設B2	施設B3	
施設概要	延床面積 [㎡] ブル棟 8344 温浴棟 10243	3403	2431	7698	16805	8694	2967	体育館棟 6268 ブル棟 6163	2010	5,008.21	2126.08	
竣工年	1989	1986	2000	1999	1999	2001	1993	1995	1973	2004	2003	
施設用途	スポーツ・温浴	福祉・スポーツ	温浴	スポーツ	事務所・福祉・スポーツ	事務所・スポーツ・温浴	植物園	事務所・スポーツ	事務所	事務所	事務所	
施設内熱利用用途※1	冷暖房、給湯(abc)	冷暖房、給湯(abce)、他(g)	給湯(b)	給湯(abode)	冷暖房、給湯(abc)	冷暖房、給湯(abce)	冷暖房	冷暖房、給湯(ac)	冷暖房、給湯(c)	冷暖房、給湯	冷暖房、給湯(bf)	
空調方式	パッケージ、単一ダクト、FCU	パッケージ、FCU	パッケージ	パッケージ、FCU、他	パッケージ、単一ダクト、FCU	パッケージ、FCU	パッケージ、FCU、他	パッケージ、FCU、他	パッケージ	パッケージ	パッケージ	
熱源機器の容量と台数※2	吸収式冷凍機・吸収式温水機・HP	吸収式冷凍機 475/-/1	吸収式温水機 211/-/1	なし	吸収式冷凍機 758/-/1	吸収式温水機 622/698/3	吸収式冷凍機 404/-/2	吸収式温水機 422/506/1	吸収式冷凍機 985/-/2	HP 73/83/3.23/1 78/90/3.09/1 85/95/2.99/1 100/112/2.72/1	HP 不明	HP 22/25/4.27/8
	熱交換器	あり 容量・台数不明	不明	224/1	1479/2	2372/2	1049/2 1980/2	あり 容量・台数不明	1369/2 10467/2	なし	なし	なし
	ボイラー	なし			96/3	なし	不明/2	なし	なし	なし	なし	なし
熱源機器更新	更新時期	2020年			2024年		2023年	2020年		1999、2016年	2023年度	
	更新内容	旧不明機→吸収式冷凍機	設備更新を行ったことがなく、今後も未定	設備更新を行ったことがなく、今後も未定	詳細未定	設備更新を行ったことがなく、今後も未定	ボイラー2台→温水ヒーター2台	吸収式温水機の更新	設備更新を行ったことがなく、今後も未定	温水式→HP方式[1999]、HP容量変更[2016]	全台入れ替え予定	設備更新を行ったことがなく、今後も未定
	更新目的	劣化した機器の更新			劣化した機器の更新、機器の高効率化		大規模改修	劣化した機器の更新		劣化した機器の更新[1999]、大規模改修[2016]		
導入済再生可能・未利用エネルギー	なし	なし	太陽光発電、CGS	なし	なし	なし	なし	なし	なし	太陽光発電、CGS	なし	
清掃工場排熱	熱媒	蒸気	蒸気	蒸気	高温水	高温水	蒸気					
	温度 [℃]	120	170	120	130	100	180					
	圧力 [MPa]		0.7	0.196			0.5					
	還水温度 [℃]	80	60~70		80	80						

※1 空調以外の熱利用用途: a. 温水プール b. 浴室 c. シャワールーム(浴槽なし) d. ジャグジー昇温 e. 厨房 f. 給湯室 g. 乾燥機
※2 吸収式冷凍機・吸収式温水機(冷却能力[kW]/加熱能力[kW]/台数)、ヒートポンプ(冷却能力[kW]/加熱能力[kW]/COP/台数)、熱交換器(熱交換量[kW]/台数)、ボイラー(効率[%]、台数)

* 東京工業大学・環境・社会理工学院 博士後期課程

Ph.D. Candidate, Graduate School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology, M.Eng.

** 日本タタ・コンサルタンシー・サービスズ 修士(工学)

Tata Consultancy Services Japan, M.Eng.

*** 東京工業大学・環境・社会理工学院 准教授・工博

Assoc. Prof., Graduate School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng.

らかにすることを目的とした。

2. 清掃工場排熱のカスケード利用に関する実態調査

2.1 調査概要

表1に調査概要を示す。2021年度東京都内の清掃工場排熱利用施設(以下、施設A)22件、その周辺の公共施設(以下、施設B)21件を対象としてアンケート調査1、2を実施し、それぞれ8件、3件の回答を得た。調査1、2共通の調査項目は施設概要、空調方式・熱源設備等の設備概要、熱利用用途、再生可能・未利用エネルギー利用状況であり、調査1ではこれに清掃工場排熱利用状況と熱媒・還水の温度等の清掃工場排熱利用実績を加えた。

2.2 清掃工場排熱利用施設と周辺公共施設の概要

表2に施設A、Bの概要を示す。延床面積は、施設Aが2431~18587m²、施設Bが2010~5008m²であった。施設Aの用途はスポーツが最も多く6件であり、施設Bの用途は3件全て事務所であった。空調方式については、施設Aではパッケージ方式と他の空調方式の併用が最も多く5件であり、その全てでFCUが導入されていた。一方、施設Bでは3件全てパッケージ方式のみであった。最も導入されている熱源機器は、施設Aは熱交換機で7件であり、そのうち4件では吸収式冷凍機を、2件では吸収式冷温水機を併用していた。施設Bは全てHPのみであった。清掃工場排熱以外の未利用・再生可能エネルギー利用については、太陽光発電とCGSの導入が施設A、Bで1件ずつあるのみで、他のエネルギーは利用されていなかった。

設備更新については、施設A4件、施設B2件で行われた、もしくは予定されており、更新の目的は、劣化した機器の更新が施設A、B合わせて4件で最も多く、次いで大規模改修2件であった。竣工から初回の設備更新までの期間は、施設A、B合わせて施設A1が最長で31年であり、施設B2が最短で19年である。

施設Aの清掃工場排熱利用においては、熱媒は蒸気が最も多く4件、熱媒の温度は120~180℃である。還水の温度は60~80℃であり、80℃が最も多く3件であった。

2.3 清掃工場排熱利用施設の熱利用状況

図1に清掃工場排熱利用施設における熱利用用途別熱源を示す。用途は暖房、冷房が最も多く各7件であり、次いで温水プール、浴室、シャワールームが各6件である。用途別の熱源は、ジャグジー、乾燥機を除く全ての用途で清掃工場排熱のみが最も多く、暖房、温水プール、シャワールーム、ジャグジーでは全ての施設で清掃工場排熱が利用されていた。全用途に清掃工場排熱を利用しない理由として、排熱量の不足を挙げる施設があった。

図2に施設A6の2021年度月別清掃工場排熱利用量を示す。12月(利用量0)を除くと、清掃工場排熱利用量は11月が最も小さく67MJ/月であった。夏期・冬期のピーク値はそれぞれ638MJ/月、210MJ/月であり、夏期は冬期の3倍以上となる。施設A6の主な施設用途は温浴であるため、室温が高くなりやすく、一般的な施設よりも冷房負荷が大きく、暖房負荷が小さい可能性がある。

図3に清掃工場排熱利用に関わる問題の発生頻度と重大さ、表3に各問題に対する対策を示す。全ての問題で「頻繁に起こる」との回答はなかった。「起こることがある」、「現在は起きないが起きたことがある」の合計が最も多い問題は、「①熱供給配管の腐食・損傷」、「④清掃工場側の問題による予定外の供給停止」であり、各6件、「②熱源機器の故障」がこれに次ぎ、4件

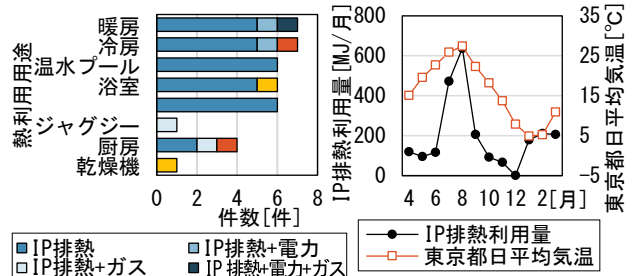


図1 清掃工場排熱利用施設における熱利用用途別熱源

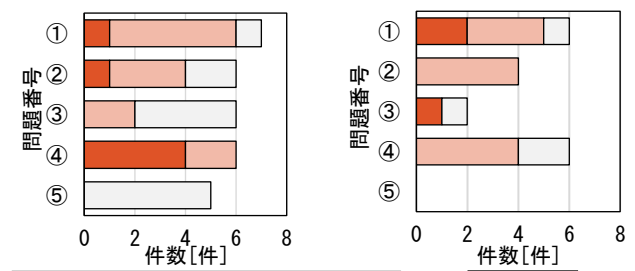


図2 月別清掃工場排熱利用量 (2021年度施設A6実績)

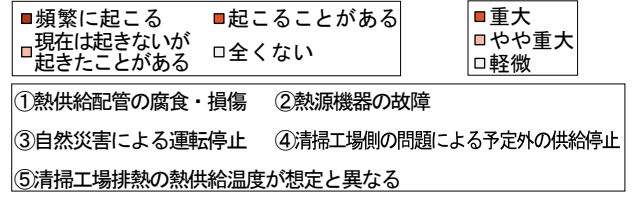


図3 清掃工場排熱利用に関わる問題の発生頻度と重大さ

表3 清掃工場排熱利用に関わる問題に対する対策

問題	対策
①	配管の修繕・交換(3件)、ボイラーの継ぎ手の交換(1件)、事前整備(1件)、一部営業停止・空調使用停止(1件)
②	通常2台交換運転とし、故障時は正常なポンプのみで運転(1件)、熱源ポンプの更新(1件)
③	地震発生時に停止し、機器の故障確認後に再度運転(1件)、避雷設備を改修予定(1件)
④	ボイラーで対応(3件)
⑤	回答なし

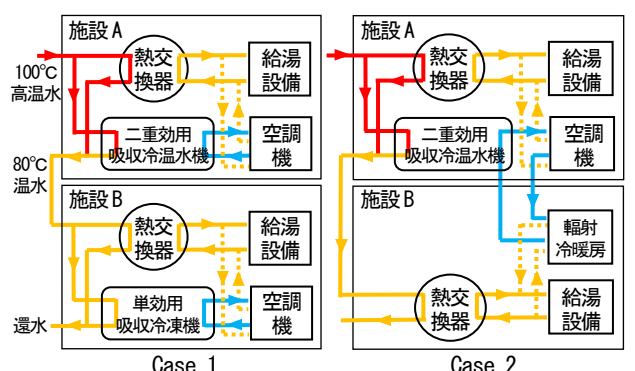


図4 清掃工場排熱カスケード利用システム

であった。「重大」、「やや重大」の合計は、問題①が5件で最も多く、問題②、④がこれに次いで各4件である。問題①の対策は修繕・交換が4件で最も多いが、事前整備による対策が行われている施設も1件あった。問題④は「起こることがある」の回答が4件で最も多いが、重大さでは「重大」

との回答はなく、対策は全て「ボイラーで対応」であった。

3. カスケード利用システムの提案

3.1 システム概要

本研究では施設 A として施設 A5、施設 B として施設 B1、B2 を設定し、これらの施設を対象として清掃工場排熱のカスケード利用の可能性の検討を行った。図 4 にカスケード利用システムのイメージ図を示す。現在、清掃工場から施設 A に供給された 100℃の高温水は施設 A で利用後、80℃の還水として戻されているが、本システムでは、この還水を低温水として供給することにより、施設 B の熱需要を賄うことを想定する。給湯・暖房負荷については熱交換により賄い、冷房負荷については、Case 1 では還水を単効用吸収式冷凍機の熱源とすることにより、Case 2 では施設 A の空調機利用後の冷水を輻射冷暖房の熱源とすることにより賄う。

3.2 熱負荷の算出

図 5 に熱負荷原単位の算出手法を示す。検討対象とした複合施設 A5 の主な施設用途は事務所、スポーツ、福祉、施設 B1、B2 の施設用途は事務所であるため、各施設用途の熱負荷原単位の算出を行った。

図 6 に各施設用途の月別一次エネルギー消費量原単位と月別冷暖房負荷を示す。月別一次エネルギー消費量原単位は年間を通してスポーツが最も大きく、180~219MJ/m²・月である。月別冷暖房負荷原単位のピーク値は夏期、冬期ともに福祉が最も大きく、それぞれ 124MJ/m²・月、71 MJ/m²・月である。

図 7 に事務所、スポーツ、福祉の月別熱負荷原単位と施設 A の月別熱負荷を示す。施設 A の合計熱負荷は 833~2056GJ/月であった。

図 8 に施設 A・B の夏期・冬期代表日における時刻別熱負荷を示す。施設 A の熱負荷のピークは夏期、冬期ともに 8 時であり、それぞれ 4.6GJ/時、5.3GJ/時である。施設 B の給湯負荷は夏期、冬期ともにわずかであり、冷房負荷のピークは 15 時の 1.9GJ/時、暖房負荷のピークは 8 時の 1.7GJ/時であった。

3.3 システムの設定条件

表 4 に清掃工場排熱カスケード利用システムの設定条件を示す。施設 A の熱源機器の構成は熱交換器、二重効用吸収式冷水機とした。施設 B には熱交換器に加えて、Case 1 では単効用吸収冷凍機の、Case 2 では熱交換器と輻射冷暖房の導入を想定し、熱源機器の容量は

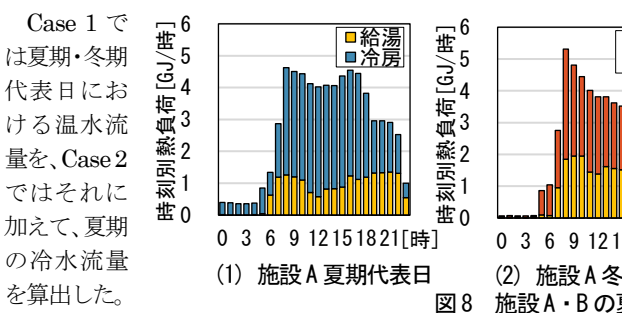
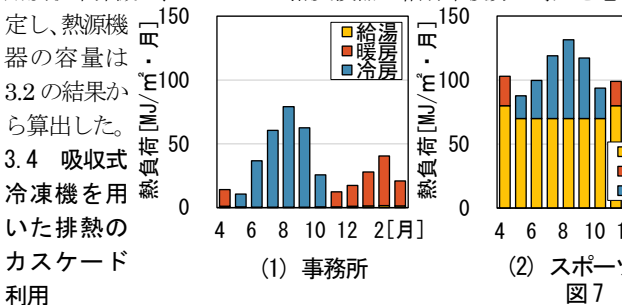
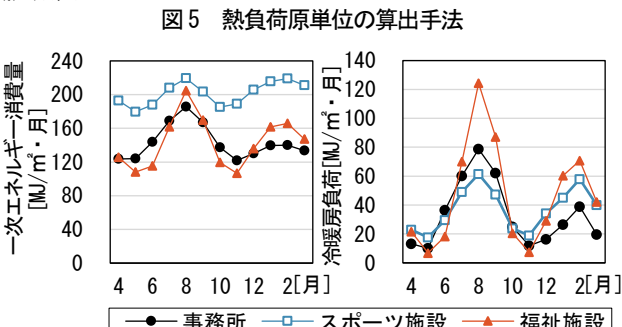
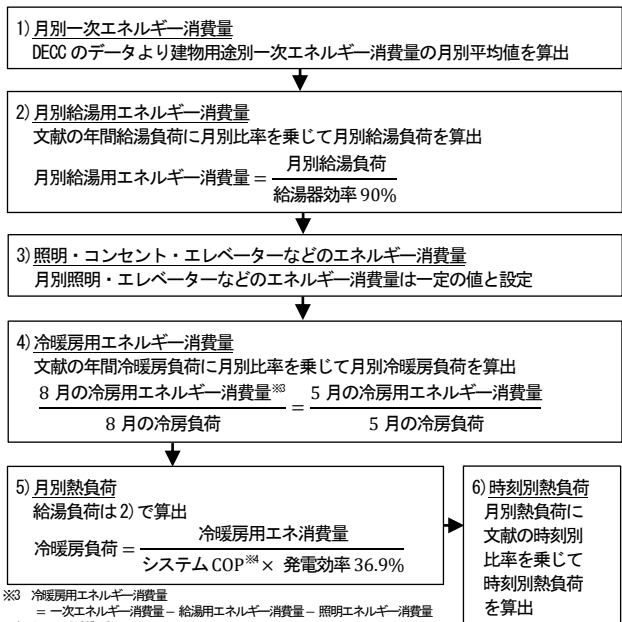
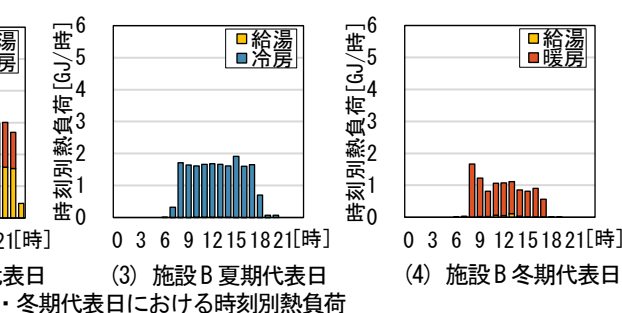
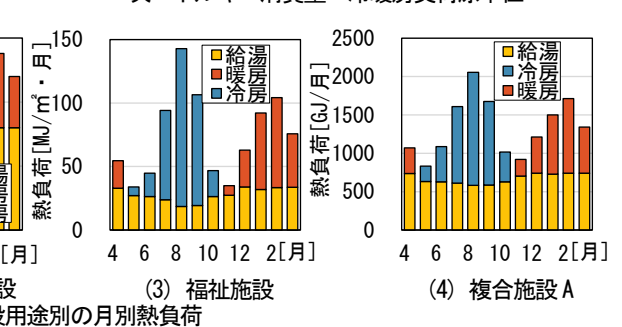


図 9 に Case 1 の夏期・冬期代表日における時刻別流量を示す。施設 A の熱需要のピークに合わせて流量一定とした場合、夏期の 8~17 時の供給流量は、施設 B-i のみの必要流量よりは大きい、施設 B の 2 施設合計必要流量よりは小さく、この時間帯



(1) 月別一次エネルギー消費量原単位 (2) 月別冷暖房負荷原単位



の合計不足熱量は 3.51GJ となる。他の時間帯では供給流量が 2 施設合計必要流量より大きい。他の時間帯の合計余剰熱量は 24.50GJ であり、容量 41kW の蓄熱槽の導入により、2 施設合計熱負荷を賄うことができるようになる。冬期には、全時間帯で施設 B の 2 施設合計熱負荷を賄うことができ、合計余剰熱量は 47.32GJ となった。

施設 A の熱需要に合わせた流量制御が行われた場合、夏期の合計不足熱量は 4.49GJ となる。他の時間帯の合計余剰熱量は 7.63GJ であり、容量 52kW の蓄熱槽の導入により、2 施設合計熱負荷を賄うことができるようになる。この場合の冬期の余剰熱量は 22.13GJ である。

3.5 輻射冷暖房を用いた排熱のカスケード利用

図 10 に Case 2 の夏期代表日の冷・温水の時刻別流量を示す。流量一定とした場合、夏期の合計不足熱量は 8.70GJ、合計余剰熱量は 11.20GJ であり、容量 101KW の蓄熱槽の導入により、2 施設合計熱負荷を賄うことができるようになる。

流量制御が行われた場合、夏期の合計不足熱量は 9.19GJ、合計余剰熱量は 2.66GJ であり、不足熱量が余剰熱量を上回るため、蓄熱槽の導入によっても施設 B の熱量を賄うことはできない。2 施設の冷房負荷を賄うためには、供給流量の 0.037 m³/s 増加が必要となる。

給湯負荷については、流量一定、流量制御ともに全ての時間帯で施設 B の 2 施設を賄うことができ、合計余剰熱量はそれぞれ 47.32GJ、10.37GJ となった。

4. まとめ

1) 東京都内の清掃工場排熱利用施設とその周辺の公共施設を対象として実態調査を行い、熱利用状況を明らかにした。2) 既存の清掃工場排熱利用施設から周辺公共施設への排熱のカスケード利用の提案を行った。3) 施設 A5、B1、B2 を対象とした検討により、清掃工場排熱のカスケード利用の可能性を明らかにした。

謝辞

実態調査の実施においては、東京都内の清掃工場排熱利用施設、周辺公共施設の皆様にも多大な協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 社団法人空気調和・衛生工学会, 都市ガスによるコージェネレーション計画・設計と評価, 1994
- 2) 社団法人日本サステナブル建築協会: DECC 非住宅建築物の環境関連データベース, 2020
- 3) 太田ら: 建物用途別負荷原単位及び未利用エネルギーデータの整備, 空気調和・衛生工学会論文集, 2017
- 4) 川崎冷熱工業株式会社: 吸収冷温水機カタログ, 2013 年
- 5) 浜田ら: 分散型エネルギーシステムの普及促進に関する基礎的研究(その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2022. 9
- 6) 付ら: 都市基盤施設における未利用エネルギー活用に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2021. 9

表 4 システムの設定条件

		Case 1	Case 2
施設 A	熱源機器	<ul style="list-style-type: none"> ・熱交換器(交換熱量 1476[kW]) ・二重効用吸収式冷温水機(COP=1.2、定格時冷房能力 966.02[kW]) 	
	夏(温水)流量	$q_1 = \frac{Q_1/COP_1}{c \times \rho \times \Delta t_1} + \frac{Q_3/h}{c \times \rho \times \Delta t_3}$	$q_{2-1} = \frac{Q_3/h}{c \times \rho \times \Delta t_3} \div 0.95$
	夏(冷水)流量		$q_{2-2} = \frac{Q_1/COP_1}{c \times \rho \times \Delta t_5} \div 0.95$
	冬(温水)流量	$q_2 = \frac{(Q_2 + Q_3)/h}{c \times \rho \times \Delta t_3}$	
施設 B	導入する熱源機器	<ul style="list-style-type: none"> ・熱交換器(交換熱量 463.00[kW]) ・単効用吸収式冷凍機(COP=0.8、定格時冷房能力 530.05[kW]) ・空調方式 ・中央方式空調 	<ul style="list-style-type: none"> ・熱交換器(交換熱量 463.00[kW]) ・輻射冷暖房
	夏(温水)必要流量	$q_1 = \left(\frac{Q_1/COP_1}{c \times \rho \times \Delta t_2} + \frac{Q_3/h}{c \times \rho \times \Delta t_4} \right) \div 0.95$	$q_{2-1} = \frac{Q_3/h}{c \times \rho \times \Delta t_4} \div 0.95$
	夏(冷水)必要流量		$q_{2-2} = \frac{Q_1}{c \times \rho \times \Delta t_6} \div 0.95$
	冬(温水)必要流量	$q_{2-2} = \frac{(Q_2 + Q_3)/h}{c \times \rho \times \Delta t_4} \div 0.95$	

Q_1 : 冷房負荷、 Q_2 : 暖房負荷、 Q_3 : 給湯負荷、 h : 熱交換器効率 90%、 c : 比熱、 ρ : 密度、 COP_1 : 二重効用吸収冷温水機の成績係数、 COP_2 : 単効用吸収式冷凍機の成績係数、 Δt_1 : 二重効用吸収冷温水機の温水温度差 10°C、 Δt_2 : 単効用吸収式冷凍機の温水温度差 5°C、 Δt_3 : 施設 A 熱交換器の温度差 20°C、 Δt_4 : 施設 B 熱交換器の温度差 10°C、 Δt_5 : 二重効用吸収式冷温水機冷水温度差 7°C、 Δt_6 : 輻射冷暖房の温度差 2°C

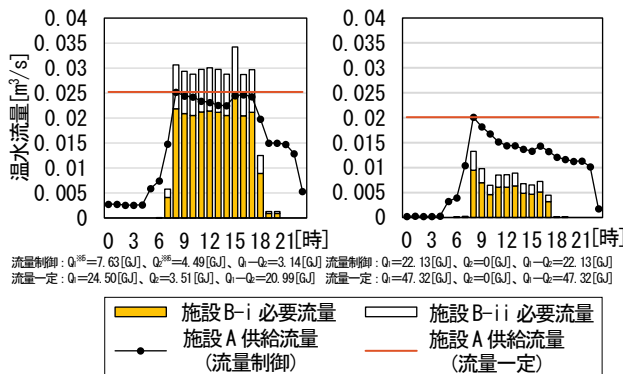


図 9 Case 1 の夏期・冬期代表日における時刻別温水流量

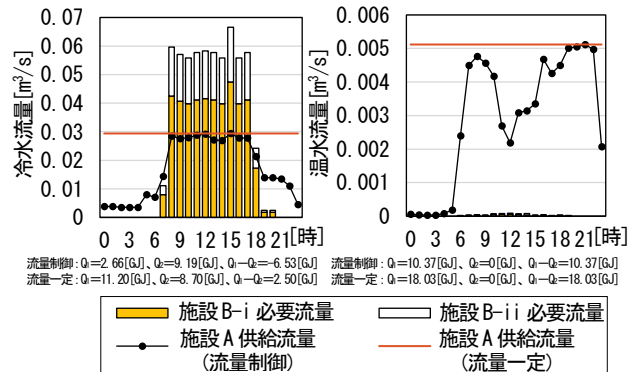


図 10 Case 2 の夏期代表日における時刻別流量