

寒冷地の病院における空調用複合熱源システムの最適運用を目指した運用実態把握

EVALUATION OF AIR CONDITIONING BASED ON A HYBRID HEAT SOURCE SYSTEM FOR OPTIMAL ENERGY USE IN A HOSPITAL IN ALPINE CLIMATE

高村研究室 17T5052H 布野稜芽
TakamuraLab. 17T5052H Ryoga FUNO

キーワード：
寒冷地、病院、BEMS、空調用熱源、複合熱源システム

Keywords:
Climate, Hospital, BEMS, Heat source for AC, Combined heat source system

1. はじめに

病院は24時間365日エネルギーを必要としており、エネルギー消費原単位は事務所ビルに比べて大きくなる傾向にある¹⁾。省エネルギーについて考える必要があるが、同時に医療機能や環境の維持も考慮する必要がある。そのため、エネルギー消費の実態把握を行った上で省エネルギー化への検討が重要とされる。また、エネルギーを多く消費する施設では複数の熱源機器を設置する機会が多い。エネルギー源の異なる複数の熱源機器を有する施設では稼働順序や制御方法の改善によって、運用全体のエネルギーやCO₂排出量の削減が可能である。現在、病院においてもBEMS (Building Energy Management System) が導入されており、エネルギー利用の効率化や合理化が図られているが、詳細な分析は行われていないのが現状である。

複合熱源機器を有する病院の運用実態の研究として、細川ら²⁾は、都市部の病院を対象として、BEMSによる実測結果からエネルギー消費実態の把握を行い、LCEMツールによるシミュレーションを用いた省エネルギー対策の提案と予測を行っている。また、塚見ら³⁾は寒冷地の病院のエネルギー消費実態を空調中央監視盤及び電力監視盤の日報データから分析を行っている。しかし、病院の複合熱源システムの運用実態の把握は都市部の事例が多く、寒冷地などの地方都市では詳細な分析が行われた事例が少ない。

そこで本研究では、長野県小諸市の病院施設の複合熱源システムの最適運用を目指した運用実態をBEMSデータを用いて分析を行った。本論文では負荷、熱源機器の熱量及びエネルギー消費量の運用実態から熱源機器の制御方法の問題点や今後の課題を明らかにした。

2. 対象施設の概要

2.1 施設概要

対象建物の概要を表1に、システム概要図を図1にBEMSのデータ計測項目を表2^{註1)}に示す。対象施設は長野県小諸市に立地する総合病院である。PAL*値は442MJ/(m²・年)で法定基準値(556MJ/(m²・年))に対して約22%小さい⁴⁾。機器概要を表3に熱源機器の稼働順序を表4に示す。なお、水冷チャラーの冷温熱の合算値の定格COPは3.4である。対象施設は中央熱源方式で空調用熱源機器として熱回収型水冷ヒートポンプチャラー(RR-1)2台、空冷ヒートポンプチャラー(RR-2)5台、吸収式冷温水発生機(RH-1)1台、蒸気ボイラー(B-1、B-2)2台を設置している。機器の稼働順序は全期間において水冷チャ

寒冷地に位置する病院のエネルギー消費削減方法を提案するため、本研究ではBEMSデータを用いた運用実態の把握を行った。まず病院のエネルギーの使用状況について分析を行った。次に空調用熱源機器の製造熱量、一次エネルギー消費量及びCOPの分析を行った。これらの分析結果から熱源機器の制御方法について、現状の問題点や今後の課題について明らかにした。

表1 建物概要

主要用途	病院	PAL*値	442MJ/(m ² ・年)
病床数	246床	空調用熱源設備	熱回収型水冷チャラー
所在地	長野県小諸市		空冷ヒートポンプチャラー
延床面積	21,102m ²		ガス焼き冷温水発生機
構造	RC造一部S造		蒸気ボイラー

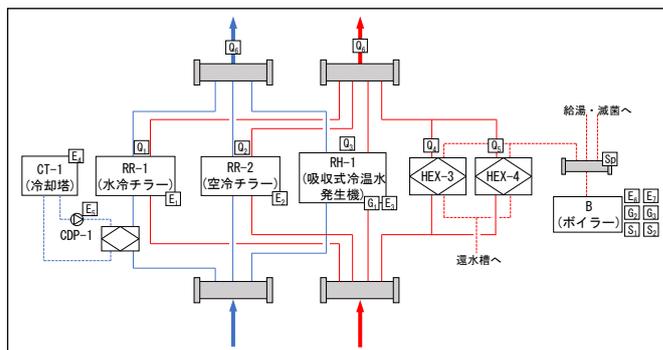


図1 システム概要図

表2 BEMS データ計測項目

No.	名称	単位	No.	名称	単位
Q ₁	RR-1 熱量	MJ	E ₄	CT-1 電力量	kWh
E ₁	RR-1 電力量	kWh	E ₅	CDP-1 電力量	kWh
Q ₂	RR-2 熱量	MJ	E ₆	B-1 電力量	kWh
E ₂	RR-2 電力量	kWh	G ₂	B-1 ガス量	m ³
Q ₃	RH-1 熱量	MJ	S ₁	B-1 蒸気量	m ³
E ₃	RH-1 電力量	kWh	E ₇	B-2 電力量	kWh
G ₁	RH-1 ガス量	m ³	G ₃	B-2 ガス量	m ³
Q ₄	HEX-3 熱量	MJ	S ₂	B-2 蒸気量	m ³
Q ₅	HEX-4 熱量	MJ	Sp	SH-1 圧力	Mpa
Q ₆	2次側負荷 熱量	MJ	T	外気温度	°C

表3 機器概要

	RR-1	RR-2	RH-1	B-1	B-2
定格冷却能力 (kW)	608	150	633	-	-
定格加熱能力 (kW)	756	125	760	1254	940
電力消費量 (kW)	148	39.6	34.1	11.75	6.25
定格 COP (冷却)	1.52	1.40	1.11	-	-
定格 COP (加熱)	1.88	1.16	0.81	0.86	0.87
台数	2	5	1	1	1

表4 熱源機器の稼働順序

		第1優先	第2優先	第3優先	第4優先
夏期 ^{註2)}	冷熱	RR-1	RR-2	RH-1	-
	温熱	RR-1	B-1, B-2	-	-
中間期	冷熱	RR-1	RR-2	RH-1	-
	温熱	RR-1	B-1, B-2	-	-
冬期 ^{註2)}	冷熱	RR-1	-	-	-
	温熱	RR-1 ^{註3)}	RR-2	B-1, B-2	RH-1

一を第1優先で稼働している。病院は暖房期においても冷熱負荷があるため、冷熱を製造する際に発生する排熱の回収が可能な水冷チラーを優先的に稼働させている。暖房期の冷熱の主な用途として手術室の空調や放射機器等の冷却が挙げられる。また、水冷チラーは冷水基調で稼働している。デマンド抑制は冷房期においては吸収式冷温水発生機、暖房期においては吸収式冷温水発生機及びボイラーで負荷を負担している。

2.2 計測概要

分析は2019年1月1日から2019年12月31日までのBEMSデータを用いた。データは中央監視室で1時間ごとに記録されており、温度及び圧力は平均値、熱量、電力量、ガス量及び蒸気量は積算値である。分析対象として点数は28点で主に熱源機器の分析を行った。

3. エネルギー消費量と負荷

3.1 対象施設のエネルギー消費実態

当該施設の2019年の一次エネルギー消費原単位^{注4)}とDECC⁵⁾の統計値との比較を行った。地域区分が3、面積区分が10,000m²以上30,000m²未満の病院148件の統計値の平均値は、2,399MJ/m²・年である。当該施設は2,310MJ/m²・年であり、統計値と比較して4%小さかった。年積算一次エネルギー消費量と空調用熱源機器の内訳を図2に示す。なお、空調用熱源機器は水冷チラー、空冷チラー、吸収式冷温水発生機、及びボイラー（給湯負荷及び滅菌を除く）^{注5)}の一次エネルギー消費量の合算値である。空調熱源機器の一次エネルギー消費量が建物全体に占める割合は29%であった。

3.2 負荷熱量

日平均外気温度と日積算負荷熱量の変動を図3に示す。なお、温熱負荷を正の値で、冷熱負荷を負の値で示している。年積算負荷熱量は冷熱負荷が5,745GJ/年、温熱負荷が9,298GJ/年と温熱負荷が冷熱負荷を上回った。また、冷房期に除湿の際の再熱（温熱負荷）があることを想定して水冷チラーを優先的に稼働させたが、再熱負荷は無かった。これは病棟からの除湿等の要請が無かったためである。なお、現在は除湿の要請があり2020年冷房期の再熱負荷は2.6GJ/年程度であった。

日平均外気温度と日積算負荷熱量の相関関係を図4に示す。なお、冷熱負荷は暖房切替前後の外気温度で場合分けを行った。温熱負荷と外気温度は強い負の相関が見られ、相関係数は-0.94であった。外気温度が15℃以上の場合の冷熱負荷と外気温度は強い相関が見られ、相関係数は0.92であった。外気温度が15℃未満の場合の冷熱負荷と外気温度はやや相関が見られ、相関係数は0.52であった。この要因としては冷熱が外気温度の影響を受ける空調だけでなく放射線機器の冷却等に使用されたため、相関係数が小さくなったと考えられる。月積算負荷熱量と病床利用率の相関関係を図5に示す。温熱負荷と病床利用率はやや相関が見られ、相関係数は0.55であった。冷熱負荷と病床利用率はやや相関が見られ、相関係数は0.69であった。以上の結果から、負荷熱量は外気温度による影響が大きいと考えられる。

4. 各熱源機器の分析

4.1 機器別の製造熱量

日積算製造熱量の変動を図6に示す。なお、製造熱量の温熱を正

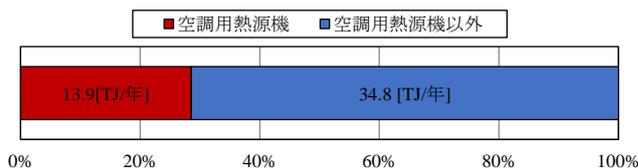


図2 年積算一次エネルギー消費量及び空調用熱源機器の内訳

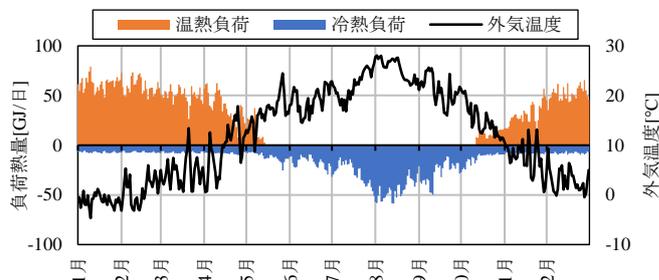


図3 日平均外気温度と日積算負荷熱量の変動

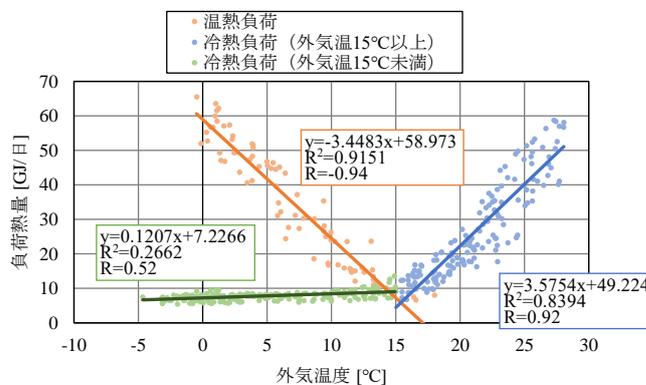


図4 日平均外気温度と日積算負荷熱量の相関関係

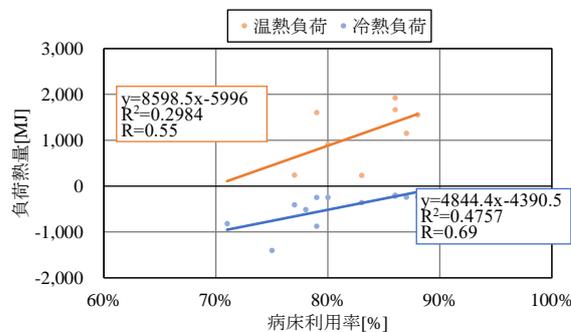


図5 月積算負荷熱量と病床利用率の相関関係

の値で、冷熱を負の値で示している。暖房期の製造冷熱量は水冷チラーのみで負担した。また、製造温熱量は水冷チラーの排熱回収量の不足分を空冷チラー、ボイラーで負担しており、デマンド抑制時に吸収式冷温水発生機が稼働した。1月1日から2月11日の期間においてボイラーが空冷チラーの製造温熱量を上回った。これは、管理者側が対象施設の必要蒸気量が不明であったためボイラーを2台並列運転していたことが要因である。2台並列運転はボイラーが発停を繰り返したため現在は運用改善を行い1台の交互運転をしている。冷房期の製造冷熱量は主に水冷チラーが負担した。製造冷熱量は水冷チラーの不足分を空冷チラー及び吸収式冷温水発生機で負担した。冷房期に確認できる製造温熱量は水冷チラーが冷熱を製造する際に発

生ずる温熱を回収した熱量である。

4.2 デマンド抑制時の製造冷熱量

冷房期における時刻別製造冷熱量の降順グラフを図 7 に示す。デマンド抑制時以外の製造冷熱量は水冷チャラー及び空冷チャラーで負担しており、最大で 3.0GJ/h であった。デマンド抑制時の製造冷熱量は 3.0GJ/h を下回る時間が稼働時間全体の 68%を占めた。デマンド抑制時は効率の低い吸収式冷温水発生機が稼働するため、可能な範囲内で水冷チャラーと空冷チャラーで負担させることが重要である。また、吸収式冷温水発生機の運転切替は現地の職員によって手動で行っているとのことだった。

4.3 冷却塔の稼働状況

冷房期における水冷チャラーの日積算排熱量と冷却塔の日積算電力消費量の相関関係を図 8 に示す。水冷チャラーの日積算電力消費量と冷却塔の日積算電力消費量は強い相関が見られ、相関係数は 0.97 であった。この結果から、冷房期における水冷チャラーで発生した温熱は冷却塔で排熱されたと考えられる。水冷チャラーで発生した温熱は除湿等の再熱で利用されることが想定されたが、排熱量が利用量を上回り年間で 3,652GJ/年が冷却塔により排熱された。これは水冷チャラーで発生した製造温熱量全体の 64%を占めた。

4.4 一次エネルギー消費量

各熱源機器の月積算一次エネルギー消費量の変動を図 9 に、暖房期の日平均外気温と日積算一次エネルギー消費量の相関関係を図 10 に、冷房期を図 11 に示す。1月から2月においてはボイラーの占める割合が大きく、ガスの占める割合は67%と電力よりも大きい値となった。運用改善後の3月以降は空冷チャラーの占める割合が増加し、一次エネルギー消費量は減少した。7月から9月においては一次エネルギー消費量が増加したが、デマンド抑制による吸収式冷温水発生機の稼働が要因であった。暖房期において外気温と水冷チャラーはやや強い相関が見られた。負の相関が見られない要因としては水冷チャラーが冷水基調で稼働していることが挙げられる。一方で、冷房期の外気温と水冷チャラーはかなり強い相関が見られた。空冷チャラーは水冷チャラーのみでは熱量が不足する場合に稼働しデマンド時に稼働が抑制されるため相関係数が小さい値となった。

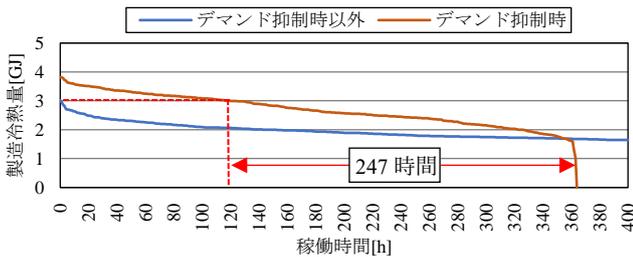


図 7 時刻別製造冷熱量の降順グラフ (冷房期)

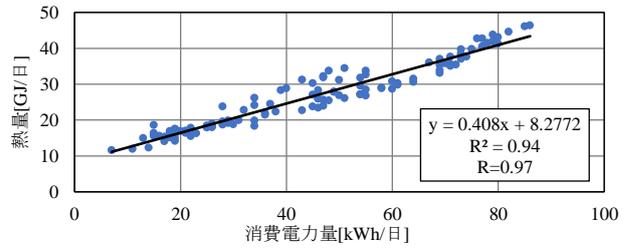


図 8 水冷チャラーの日積算排熱量と冷却塔の日積算電力消費量の相関関係 (冷房期)

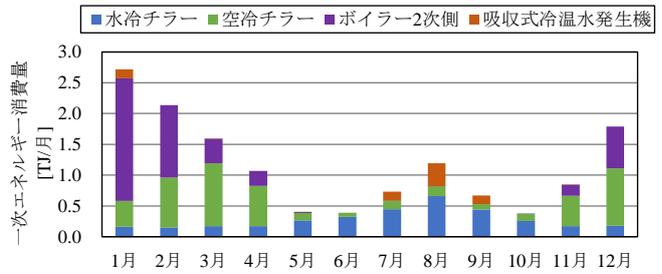


図 9 熱源機器の月積算一次エネルギー消費量

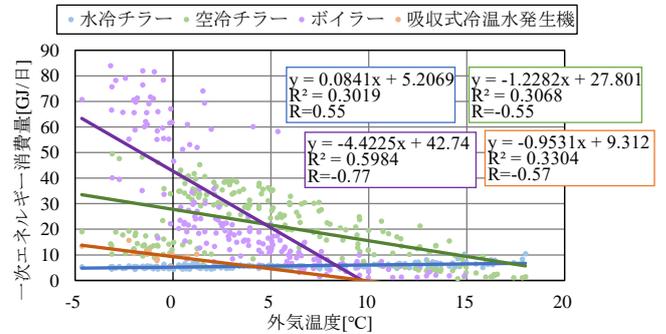


図 10 日平均外気温と熱源機器の日積算一次エネルギー消費量の相関関係 (暖房期)

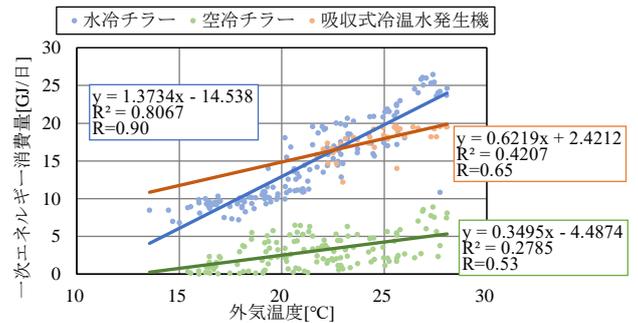


図 11 日平均外気温と熱源機器の日積算一次エネルギー消費量の相関関係 (冷房期)

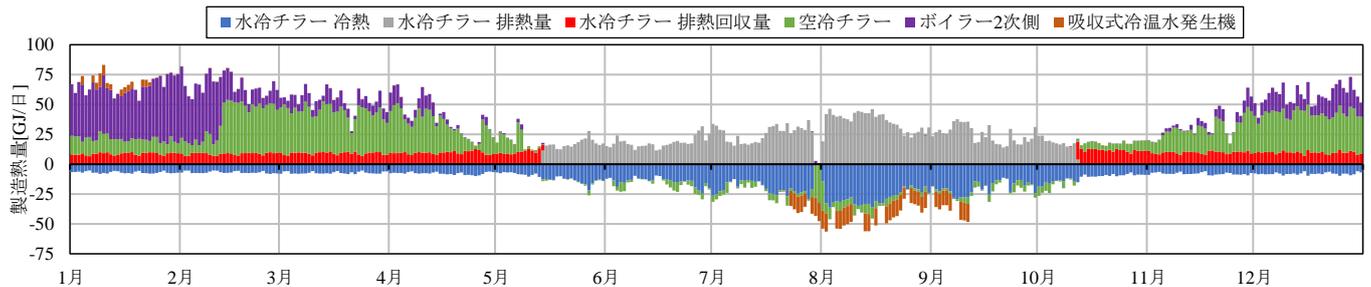


図 6 日積算製造熱量の変動 (正: 温熱 負: 冷熱)

4.5 機器別の COP

水冷チラー及び空冷チラーの月別 COP の変動を図 12 に示す。なお、ガスを使用する熱源機器と比較するため一次エネルギー換算を行った月別 COP を用いた。以下に示す (1) 式より、月別 COP を算出した。

$$COP = \frac{Q}{E} \quad \dots (1)$$

Q : 各熱源機器の製造熱量 [GJ/月]

E : 各熱源機器の一次エネルギー消費量^{注3)} [GJ/月]

水冷チラーの COP は製造熱量の冷温熱合算値の場合、3.0 程度で、冷熱のみの場合は 1.4 程度であった。空冷チラーの暖房期の COP は 1.1 程度、冷房期は 1.3 程度であった。冷房期における水冷チラーの COP は空冷チラーの COP を上回っていたが、水冷チラーで発生した温熱を冷却塔で排熱する際の電力消費量を考慮するとそれぞれの機器の稼働順序の検討が必要である。吸収式冷温水発生機及びボイラーの月別 COP の変動を図 13 に、暖房期における時刻別製造温熱量を降順に並べたグラフを図 14 に示す。ボイラーの COP は 0.7~1.0 程度で推移していた。吸収式冷温水発生機の暖房期の COP は 0.6 程度、冷房期は 0.8 程度であった。暖房期は稼働頻度が少なかったため、COP は暖房期に比べ冷房期が高かった。また、ボイラー2 次側のみの製造温熱量（デマンド抑制時を除く）の最大は 5.8GJ/h、吸収式冷温水発生機とボイラー2 次側（デマンド抑制時）の合算値の最大は 5.2GJ/h であった。ボイラーの COP 及び時刻別製造温熱量の最大値が大きいことから暖房期におけるデマンド抑制はボイラーのみの負担が可能であると考えられる。しかし、ボイラーは給湯負荷も負担しているため、今後より詳細な分析が必要である。

5. まとめ

本研究では、BEMS データを用いて複数の熱源機器を設置した病院の運用実態について明らかにした。その結果得られた知見を以下に示す。

- (1) 吸収式冷温水発生機の COP が想定していた値より小さく、ボイラーを下回った。
- (2) 冷房期において温熱負荷がなく、水冷チラーの冷熱を製造する際に発生する温熱は冷却塔で排熱されていた。水冷チラーで発生した年間製造温熱量の 64%が冷却塔により排熱されており、再熱は想定より小さかった。
- (3) 冷房期においてデマンド抑制時の製造冷熱量がデマンド抑制時以外の製造冷熱量を下回る時間が多かった。
- (4) 暖房期においてデマンド抑制時に吸収式冷温水発生機が稼働していたが、吸収式冷温水発生機よりも COP の高いボイラーで負担できる可能性があった。

本研究では熱源機器のみの評価であったため、今後はポンプを含めたシステム全体での分析を行う必要があると考える。また、冷却塔の電力消費量を考慮した場合の水冷チラーと空冷チラーの稼働順序の検討、吸収式冷温水発生機の稼働条件の決定、暖房期のデマンド抑制時におけるボイラーの給湯負荷を含めた分析の必要があると考える。

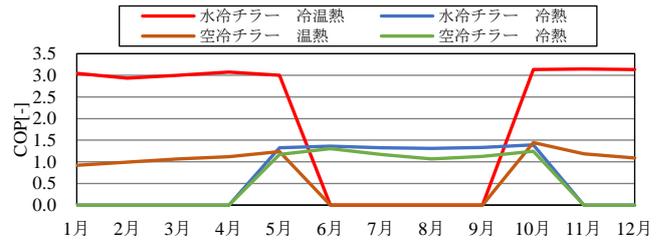


図 12 水冷チラー及び空冷チラーの月別 COP の変動

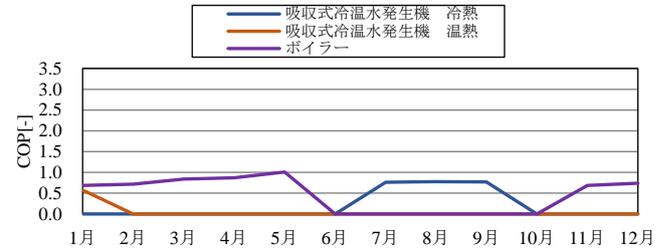


図 13 吸収式冷温水発生機及びボイラーの月別 COP の変動

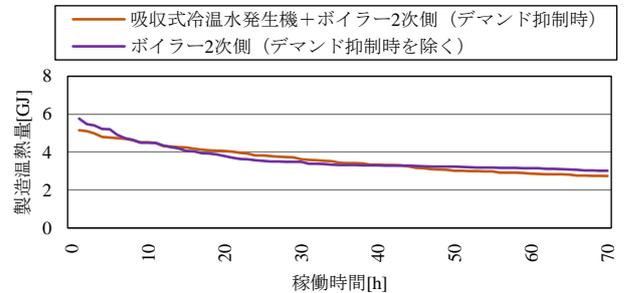


図 14 時刻別製造温熱量の降順グラフ（暖房期）

謝辞

本研究は、株式会社石本建築事務所が設計した病院施設の運用実績から得られた。データの収集・分析では株式会社シーエナジーにご協力とご助言を頂いた。また、研究を進めるにあたり浅間南麓こもろ医療センター並びに小諸市庁舎・こもろプラザのご協力を頂いた。この場をお借りして深く感謝の意を表す。

注釈

- 注1) 熱量[MJ]は、BEMS で演算された値を使用した。
- 注2) デマンド抑制時は吸収式冷温水発生機を優先的に稼働させる。
- 注3) 水冷チラーの排熱回収による。
- 注4) 一次エネルギー換算係数
電力：9.76⁶⁾ [MJ/kWh] ガス：45⁷⁾ [MJ/Nm³] (1m³=2.351Nm³)
- 注5) ボイラーの一次エネルギー消費量は製造熱量から空調、給湯及び滅菌を案分した値を用いた。

参考文献

- 1) “病院の省エネルギー”，財団法人省エネルギーセンター，2009 年
- 2) 細川敬大ほか：病院施設における熱源システムの運送改善効果に関する研究 -広島市内所在のリハビリテーションセンターを対象として-，日本建築学会環境系論文集 第 81 巻 pp.457-465，2016 年
- 3) 塚見史郎ほか：寒冷地における外断熱構法を採用した病院の建築・設備計画と病室環境実測（その 4）年間エネルギー消費量調査結果，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 pp.917-920，2006 年
- 4) 公益社団法人 空気調和・衛生工学会「第 35 回振興賞技術振興賞」審査資料：小諸市官民一体プロジェクト～低炭素まちづくり計画を契機としたエネルギーサービス事業～
- 5) DECC(Data-base for Energy Consumption of Commercial buildings) 2006～2017 年
- 6) “エネルギーの使用の合理化等に関する法律 省エネ法の概要”，経済産業省 資源エネルギー庁，2019
- 7) 長野都市ガス，<https://www.nagano-toshi-gas.co.jp/company/kankyo/gas.html> (アクセス日 2021 年 1 月 25 日)