

中温冷水利用の潜熱分離空調が導入された虎ノ門ヒルズにおけるコロナ禍の影響

Low-Carbon HVAC System Using Medium-Temperature Chilled Water in TORANOMON HILLS under the influence of COVID-19

株式会社日本設計
Nihonsekkei, INC.
佐々木真人
Masato SASAKI

キーワード: 中温冷水 (Medium Temperature Chilled Water)、熱回収熱源 (Heat Recovery Centrifugal Chiller)、蓄熱槽 (Heat Storage Tank)、熱源最適運転計画 (Optimal Control Support System)、コミッショニング (Commissioning)

はじめに

虎ノ門ヒルズは、地上 52 階、最高高さ 255m、延床面積 244,360 m²と都市を象徴する大規模複合用途ビルであり、2014 年に竣工した。敷地面積に対するエネルギー密度が非常に高く、環境面における社会ニーズへの先導的な取り組みが求められる超高層ビル計画において、普及水準にある省エネルギー技術はもとより、最新技術も取り入れ、当時から「国内最高水準のカーボンマイナス性能」の実現を目指したプロジェクトである。

大規模プロジェクトとして先導的な役割を担った本計画の特徴は、事務室の空調に潜熱分離空調をベースにした超高効率熱源システムを採用したことである。中温冷水、低温温水を創り出す熱源システム、その熱媒水にて二次側に対応する空調システムを構築し、LOBAS (Low-carbon Building and Area Sustainability) 熱源・空調システムと名づけられた。空調設備の熱源から空調システムまで様々な工夫、配慮を施し、完成されたが、運用後も事業者、設計者、施工者、管理者が一体となり、「国内最高水準のカーボンマイナス性能」を維持、向上するために、継続的に検証している。

ここでは、その取り組みの一環でコロナ禍を迎え、人員密度や外気導入量の変化は、潜熱顕熱空調の熱処理特性、熱源負荷特性にも影響を及ぼしており、虎ノ門ヒルズの運用実績から、これからのグリーンリカバリーへのヒントを共有したい。



写真 1 外観

表 1 建物概要

建物名称	虎ノ門ヒルズ
所在地	東京都港区虎ノ門1丁目23-1~4
規模	地下5階、地上52階、最高高さ255.5m
面積	敷地面積17,068 m ² 、延床面積244,360 m ²
用途	事務所、住宅、ホテル、カンファレンス、店舗、駐車場、ほか
建築主	事業施行者 東京都 特定建築者 森ビル(株)
設計・監理	(株)日本設計
施工	[建築] (株)大林組 [空調] 新菱・九電工空調設備工事共同企業体 [衛生] 三建設備工業 [電気] きんでん・関電工・トーエネック共同企業体
工期	2011年4月~2014年5月

1.2 LOBAS 熱源運用実績

(1) 竣工から 2020 年までの年間実績

2015 年から 2020 年までの年間供給熱量を図 4 に示す。2018 年までは、総熱量は比較的变化も少なく、若干、6℃冷水が減少し、13℃冷水が上昇し、13℃システムの供給比率を高める取り組みを行ってきた。2018 年から 2019 年の負荷変化としては、冷熱系負荷で 14%の減少がみられ、温熱系負荷では 44℃系負荷の変化はなく、37℃系負荷が大幅に減少した。この変化は運用方法の違いであり、特に 37℃系負荷が大幅に減少したのは、外気処理空調機の吹出温度設定を下げることでエネルギー消費を抑制した結果である。

37℃システムは、冬期冷熱の熱回収で賄っているため、温熱の二次側負荷が低下したことで、冬期冷熱負荷と温熱負荷のバランスがよくなり、熱回収寄与率が高く、システム COP が向上している。2019 年までは、13℃冷水へのシフトをはかる運用チューニングにより、冷熱のシステム COP は年々上昇しており、2019 年時点では、1.97 と運用当初よりもさらに高効率な運用を実現させてきた。

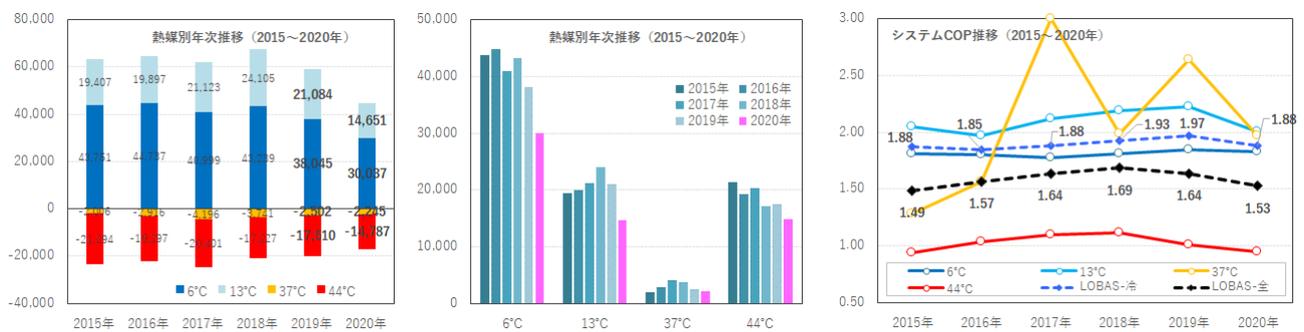


図 4 年間供給熱量を熱媒別システム COP の推移

(2) コロナ前後の熱源実績比較

図 5 に 2019 年と 2020 年の熱媒別供給熱量の比率と在館人員変動率、図 6 に冷水に関する 2019 年と 2020 年の月別供給熱量とシステム効率の比較を示す。オフィス部の利用者状況と熱負荷の関係性をみるため、ビル利用のセキュリティカード発行者数を 100%の基準値として、セキュリティカード入退記録を日在館人数として変動傾向の指標とした。第一回目の非常事態宣言が発令された 2020 年の 4, 5 月では在館人数が 10%程度と大きく減少し、宣言解除後は、在宅勤務やテレワークが実施されているため、在館人数が 30~40%の間で漸増の傾向を示しながら推移している。

2020 年における冷熱負荷の変動は、4, 5 月に 2019 年比で 6℃系、13℃系ともに供給熱量が 40%程度となっている。6 月以降では在館人数は 30~40%であるが、6℃システムの負荷率はオフィス以外の占める影響が大きく 90%程度となっている。13℃系は、主にオフィス内部発熱負荷が対象であるため在館人数減による内部負荷の減少影響を受けると思われたが、6℃システムより若干少ない低減で 80%程度であった。

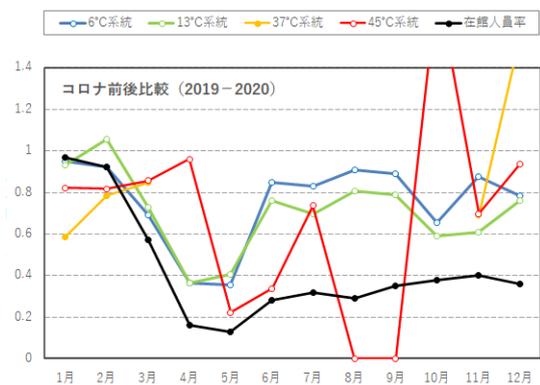


図 5 2019 年と 2020 年の月別供給熱量比率

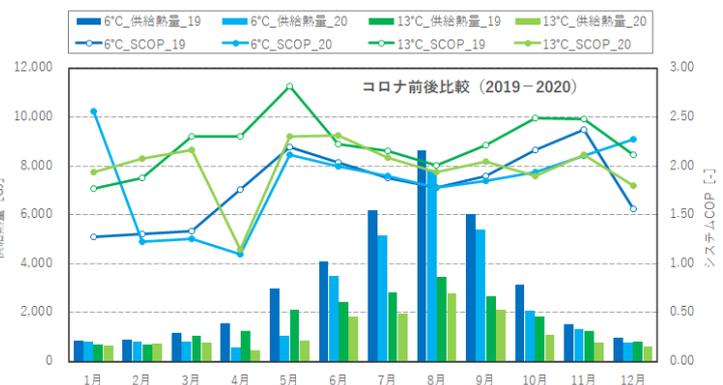


図 6 冷水の月別 COP の推移

6℃冷水系統と13℃冷水系統の月別システムCOPの推移を図6に示す。負荷が高い夏季においてはさほど大きな変化は見られないが、いずれも中間期の効率が低下しており、その影響をうけて年間システムCOPが低下している。ただし、低下した中間期においても一次エネルギー換算でのシステムCOPで1.0を優に超えており、高効率システムの性能は十分に発揮されている。

本熱源システムは負荷予測に基づいた最適運転計画をもとに運転しているが、熱負荷は内部発熱変動とともに、外気変動の影響も大きい。そこで、2019年と2020年の6～9月の平日について、日平均外気温度を2℃ごとに分け、外気温度の範囲で時刻別負荷を平均して時刻別負荷パターンを作成した。13℃冷水系統では、朝方の立ち上りにピークが発生し、その後は13時ころまで負荷が減り、14、15時で負荷が増え第2のピークを迎え減少している。外気温度が低い場合、日中に第2のピークは現れず、変動の小さいパターンとなる。2020年と2019年で山の大きさの違いがあるが、同様な時刻別負荷パターンを描いている。オフィス6℃負荷の時刻別パターンについても13℃系と同様の検討を行った(図7)。

6℃冷水系統において、2020年は、空調開始後に大きな負荷変化はほとんど見られず一定傾向であった。2019年は、17時向けて徐々に負荷が増える傾向である。この違いは、在宅・テレワーク勤務によりオフィス使用状況の変化の影響と考える。また、外気温度20-22℃では、外気処理での13℃冷水有効/無効の切替えポイントにあたるため、外気20℃以上では13℃系による外気のプレ冷却が行われ、6℃系負荷が低減されることも影響している。

外気温度による時刻別負荷パターンの差は、比較的大きくないが、LOBAS熱源では負荷予測をして、機器の最適運転を行っている。その負荷予測手法は、過去(対象期間は任意で決定)の24時間の積算要求熱量実績と日平均外気温実績の相関を、日平均気温、日平均気温の2乗、最高気温、最低気温、日平均絶対湿度を説明変数とした重回帰分析により線形モデル化している。3)過去30日分を対象期間として運用し負荷予測しており、今回の負荷の変化に対応した最適運転を継続できている要因のひとつであると考えられる。

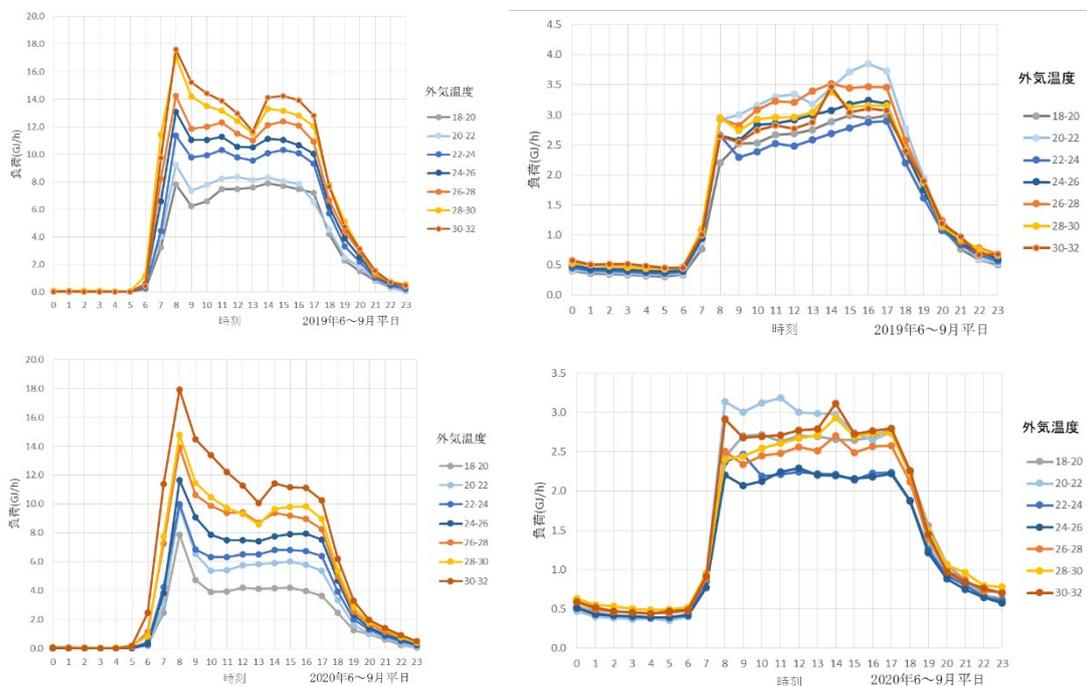


図7 外気温度別負荷パターンの2019年と2020年比較(左:13℃冷水、右:6℃冷水)

2. LOBAS 空調システム

2.1 LOBAS 空調システム概要

基準階空調システムは、外調機と室内空調機で構成されており、テナント毎の制御性を担う室内空調機は1フロア4台としているが、外調機は集約を図り、2層分(計室内空調機8台)を2台で受け持

ち、2層吹き抜け状の空調機械室に設置している。また、ペリメータ用には、インテリアと機能を分担し、ウォールスルーユニット（以降、ABU：Air Balance Unit）を配置し、窓際に個室が設置された場合にも冷暖自由に対応できるように計画している。図8に基準階の空調ゾーニングと空調機械室内の外調機1台+室内空調機4台の構成を示す。

LOBAS空調の設計ポイントは、以下が挙げられる。

- ① 中温冷水は空調給気温度に近くコイル特性に配慮。
- ② 排熱利用の低温排温水はコイル特性に加え、温水上限温度は熱源効率にも影響。
- ③ 低温温水による気化式水加湿方式は気化冷却を伴う空調給気温度への配慮が必要。
- ④ 中温冷水、低温温水ともに蓄熱熱源システムにおいて還り温度確保が必要。

本計画では、熱源全体の省エネルギー効果を最大に発揮できるよう13℃冷水負荷を高め、6℃冷水は最小の潜熱処理に特化させ、13℃の中温冷水にて、外気予冷、室内顕熱負荷処理などに可能な限り対応する。また、低温温水にて“加湿前加熱”、“暖房用加熱”を両立するために2段加熱方式とすることとした。その結果、外調機+室内空調機（顕熱処理専用）方式を選択している。

外調機では、13℃冷水にて外気の顕熱分をプレクールし、6℃冷水コイルにて除湿要求時の潜熱処理などアフタークールを行っている。室内空調機は、冷却、加熱、それぞれのコイル特性を踏まえ、冷水コイル（13℃）と温水コイル（37℃）の並列コイルとしている。13℃冷水での顕熱処理は、より高温空気にて効率よく熱交換させるために、室内還気のみを冷却を行えるよう、外調機の低温給気と混合する前に配置し、中温冷水での冷却特性を確保できるよう配慮した。室内空調機の37℃加熱コイルは、入口空気温度は可能な範囲で低温化させることが望ましい。そこで、加湿外気と還気が混合後（21.9℃DB）に暖房給気用に再加熱できる配列とした。外調機では加湿用加熱に特化するため、気化冷却による給気温度の低下（17.6℃DB）を許容する。このように2段加熱方式を採用することで、37℃の低温温水のみで、冬期加湿用加熱、暖房用加熱への対応を可能としている。図8にLOBAS空調のシステム概要を示す。

コイルの温度差設計（＝還り温度設計）は、コイルル出口空調温度への影響もさることながら、大規模蓄熱槽を有する熱源システムにとって温度差は熱源容量に直決するため、その影響は非常に大きく、各熱媒水毎にアプローチ空気状態と熱源システムへの影響を配慮して選定を行った。表2に各熱媒水での温度差仕様を示す。

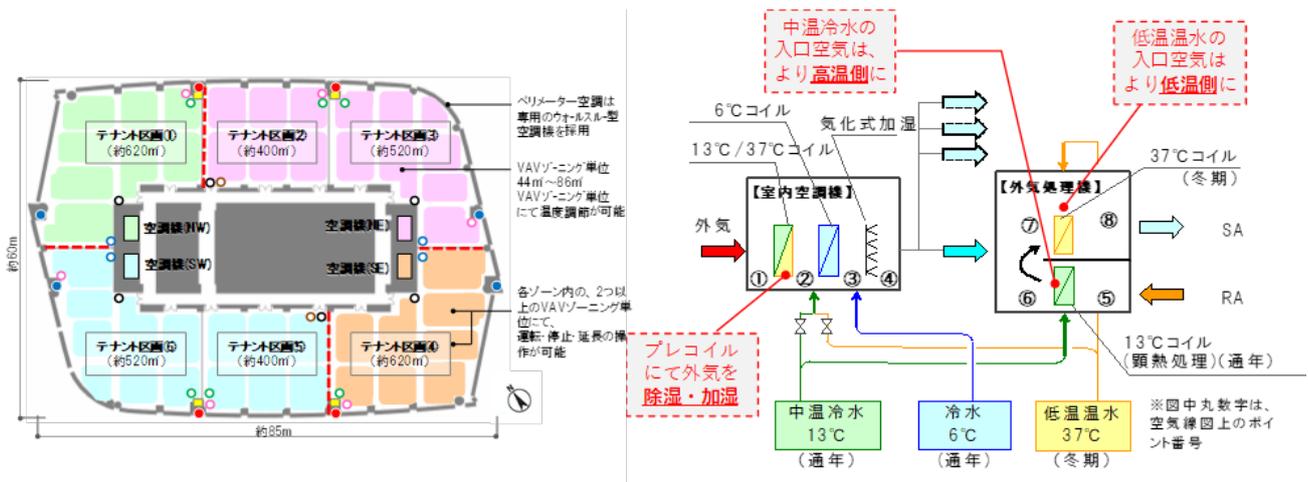


図8 基準階空調ゾーニングとLOBAS空調システム概要図

表2 熱媒水温度条件

	冷水		温水	
行き温度	6℃	13℃	37℃	44℃
還り温度	15℃	20℃	29℃	34℃
温度差	9deg	7deg	8deg	10deg

2.2 LOBAS 空調運用実績

(1) 外気 VAV 風量と CO2 濃度

図 9 に 14F と 15F の外気 VAV 風量と室内 CO2 濃度（還気にて計測）の関係を示す。2019 年では、CO2 濃度設定値が 1000ppm で運用されており、設定値以下となるように外気 VAV が制御されていることが確認できる。15F-NE と 15F-SW の外気量定格値は同じであるが、15F-NE は下限値 40%、その他は 25% にて運用されている。

2019 年の CO2 濃度の出現頻度をみると、14F、15F いずれも 900~1000ppm の出現頻度が最も高く、省エネルギー運用として適正に運用されていることが確認できる。ただ、15F-NW は、ほぼ 700ppm 以下となっているが、700ppm 以上でも外気量は増加されていないため、人員が少ないなど、室内 CO2 濃度上昇要因が少ないことが想像される。

2020 年では、Covid-19 の影響で空気質に配慮し、導入外気量を積極的に取り入れることも推奨された。そのため、CO2 濃度設定値が低下される傾向がみられ、14F-SW、14F-NW、15F-NE では、700ppm あたりから外気量が増加している。代表階では室内空調機が 8 台あるが、2019 年に比べて外気量（SOA 計測風量）が増加しているのは、15F-NE のみであり、その他の系統では、外気量が著しく増加している結果とはなっていない。しかし、CO2 濃度の出現頻度としては、600ppm 以下にシフトしており、室内の換気性能は良好に確保されていたことがわかる。

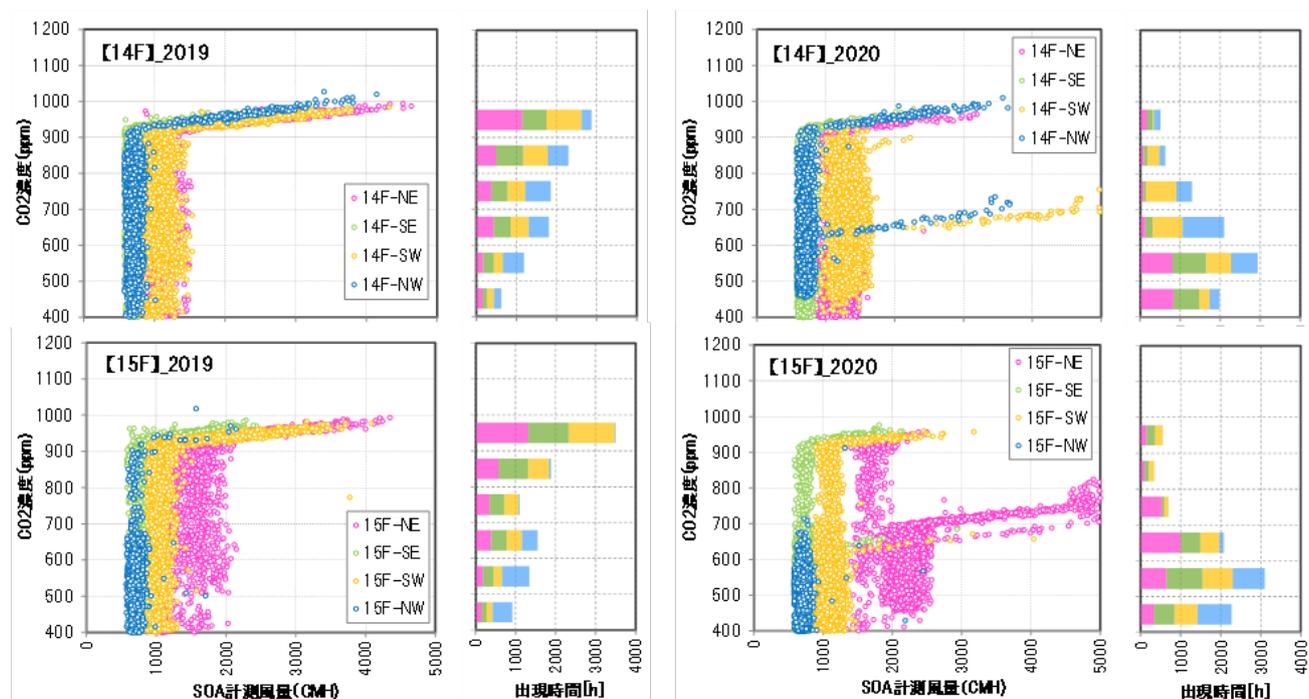


図 9 還気 CO2 濃度の出現頻度と外気供給量（左：2019 年、右：2020 年。上段：14F、下段：15F）

(2) 基準階空調機の負荷状況

図 10 に外調機、室内空調機の各コイルの月別熱負荷の比較を示す。温熱はペリカウンタ内の ABU で処理しており、外皮負荷の影響は小さく外気処理が大半であるため、2019 年と 2020 年では、さほど変化は見られない。Covid-19 影響の前後で、室内 CO2 濃度は低下していたが、外調機の外気供給風量はさほど変化が無く、室内空調機の給気風量も変化はなかった。空調機のコイル負荷では、外調機の潜熱処理主体の 6℃冷水コイル+外気予冷の 13℃冷水コイル負荷はさほど変わっていないが、室内空調機の 13℃冷水コイル負荷は 59%まで低下傾向しており、その結果、年間の冷水負荷に対し、室内空調機の 13℃冷水比率は、80%から 73%に低減したが、外調機と合わせた 13℃冷水合計では 92%と大半の冷熱負荷を 13℃中温冷水で対応されている。

図 11 に 6℃冷水と 13℃冷水の時刻別冷熱負荷を降順で並べたものを示す。6℃冷水は、ほぼ同じ特性を示しているが、13℃冷水は、上位 80 時間からピーク負荷までの特性は同様な値を示していた。冷熱負荷 1,000MJ/h(ピーク負荷の 60%弱)以下の部分負荷が全体的に低下していたことが確認できる。

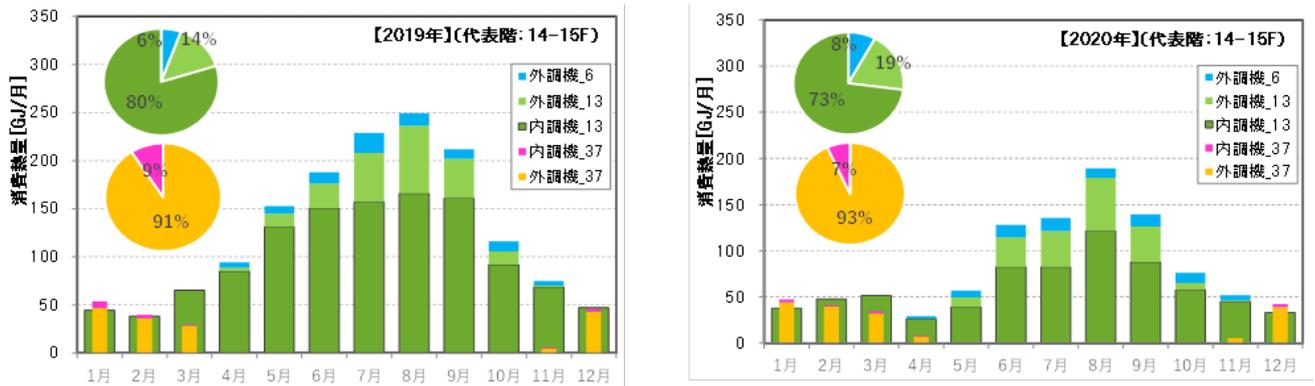


図 10 月別空調熱負荷の比較(左:2019年、右:2020年)

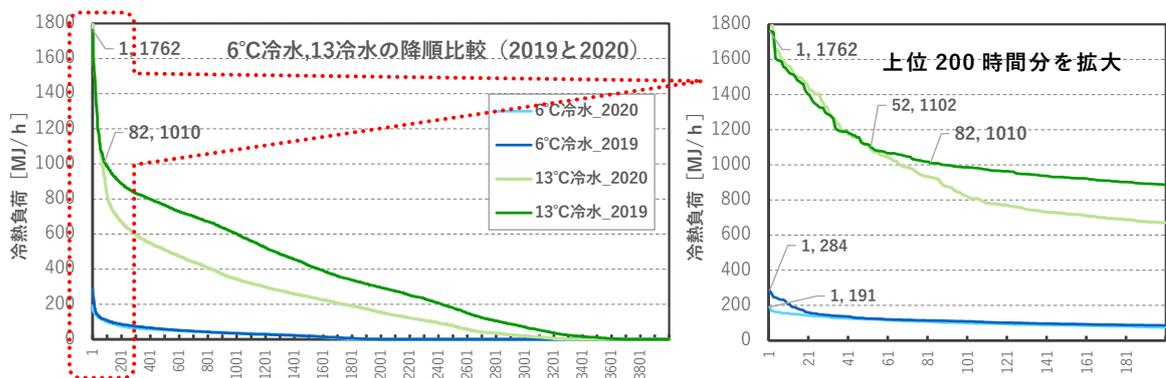


図 11 6°C冷水,13°C冷水の年間降順比較

まとめ

Covid-19 対策として空気質に配慮した運用調整や、在室人員が大幅に低減するなどオフィスの使われ方が大きな変容を受けたことによる熱源システム・空調システムの性能について検証を行った。

- 1) Covid-19 により、空気質管理への配慮から、外気導入が促進啓蒙され、外気量の増大が懸念されたが、在室人員が極端に少なくなったため、外気供給量は従来通りの最小外気量でも室内 CO2 濃度は、700ppm 以下で管理されており、過剰な外気導入を抑制することができていた。
- 2) 本計画では、中温冷水と低温温水の最大活用を目指した潜熱顕熱分離空調であり、Covid-19 の影響によって、外調機負荷は外気量を適正に管理することで 2019 年と同程度であった。一方、在室人員の極端な減少傾向をうけ、顕熱処理主体の室内空調機 13°C 冷水の熱負荷は低減した。
- 3) 本計画では、Covid-19 の影響は 13°C 冷水に与えるものが多く、冷熱において 6°C 冷水と 13°C 冷水の複数熱媒で構成された空調システムでは、Covid-19 のような大きな変動が発生した場合、熱媒毎に影響度は異なることが確認された。
- 4) 負荷予測を組み込んだ最適運転計画は、Covid-19 の影響下においても、予測制御が適正に機能し、熱源システムの高効率化に寄与した。

<参考文献>

- 1) 北原、他：大規模オフィスビルでの中温冷水を利用した高効率熱源・空調システムに関する研究（第 7 報）空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2015.9
- 2) 桐生、他：大規模オフィスビルでの中温冷水を利用した高効率熱源・空調システムに関する研究（第 19 報）空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2020.9
- 3) 佐々木、他：大規模オフィスビルでの中温冷水を利用した高効率熱源・空調システムに関する研究（第 14 報）空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2018.9
- 4) 嶋田、他：大規模オフィスビルでの中温冷水を利用した高効率熱源・空調システムに関する研究（第 20 報）空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2022.9（発表予定）