

## 虎ノ門ヒルズのLOBAS 熱源・空調システム

Low-Carbon HVAC System Using Medium-Temperature Chilled Water in TORANOMON HILLS

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)、インバーターターボ冷凍機(INV 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

本プロジェクトは、都市を象徴する大規模複合用途ビルであり、エネルギー密度が高く、環境面における社会ニーズへの先導的な取り組みは不可欠である。また、国際新都心のビジネス拠点として経済基盤を支える場であり、高品質な室内環境と環境負荷低減の両立が必要である。本計画では、大規模テナントオフィスビルにおいて、従来の高度な室内環境与件を維持しながら、ビル側供給の熱源・空調エネルギーの削減を追求するため、中温冷水による熱源機器の効率向上と熱源機器排熱から得られる低温温水を利用した熱源・空調システムの構築に取り組んだ。

情報化社会において財産となる運用実績データを踏まえ、オフィスの空調を一から見直してみると、必ずしも従来の熱源温度でなく、冷水は少し高く、温水は少し低くても十分に対応できることが確認できた。新技術に頼り過ぎないこの取り組みであれば、社会に対する普及、波及効果が期待でき、採用にいたっている。本計画では、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エリアへの普及、波及の思いを込め LOBAS (Low-carbon Building and Area Sustainability) 熱源・空調システムと名づけた。



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㎡、延床面積244,360㎡
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. 超高層複合用途ビルにおける多用途機能に適応する高効率熱源システムの構築

### 1.1 LOBAS 熱源システム

インバーターターボ冷凍機は、インバータ特性を活かし、部分負荷運転時と冷却水低温時には、高効率な運転が実現可能となっており、その機器に対し、冷水温度の中温化を図ることは、更なる向上を

意味するものである。これまで大規模なテナントオフィスビルに中温冷水を活用する潜頭分離の概念を具現化したものは無く、対象面積、熱源機器容量ともに、非常に大きなスケールでの取り組みには、様々な配慮が必要となった。中温冷水、低温温水はオフィス系統が対象であり、複合用途で構成された大規模ビルであるため、それぞれ用途特性への配慮は必要であり、ホテル、住宅や低層店舗、その他共用部は、FCU 対応を考慮し、汎用的な冷水 6°C、温水 45°C の供給温度としている。オフィスにおいても、電算用などテナント設置機器への増強冷水供給が必要であり、6°C 冷水を供給。そのため、オフィス系統は、6°C、13°C、37°C の 3 種の熱源水を供給している。

インバータターボをメインとした熱源システム全体の更なる効率運用を図るため、蓄熱槽をクッションタンクとして活用し、熱源機器の最適部分負荷率で一定運転を行う熱源最適運転計画を実現し、電力ピークカット、デマンドレスポンスなどにも対応可能である。

温熱源システムもヒートポンプでの排熱利用による総合熱効率向上を図り、従来のダブルバンドル型熱回収ターボ冷凍機にて 45°C 温水を製造。それに加え、冷凍機の冷却水温度を 40°C と出口温度制御することで、冷却水を低温温水として活用するシステムを採用している。熱源全体システムを図 1 に、蓄熱槽のクッションタンク利用概念を図 2 に、冷却水利用の熱回収システム概要を図 3 に示す。

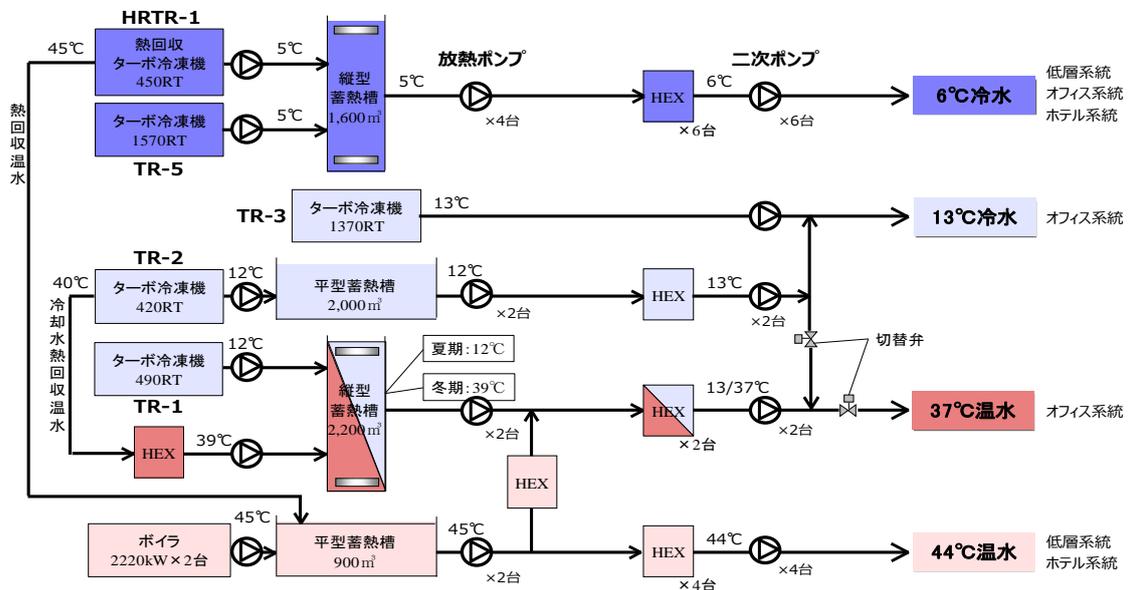


図 1 LOBAS 熱源システム

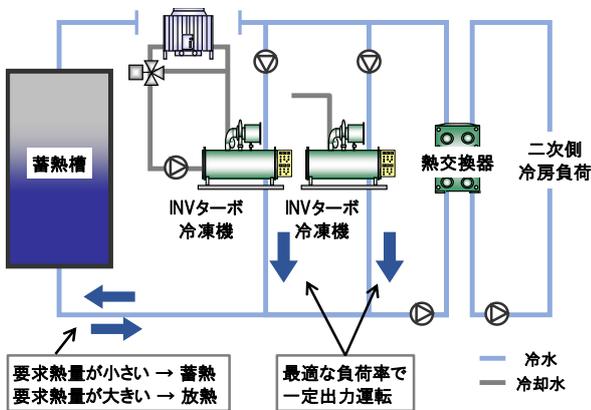


図 2 蓄熱槽クッションタンク活用概念

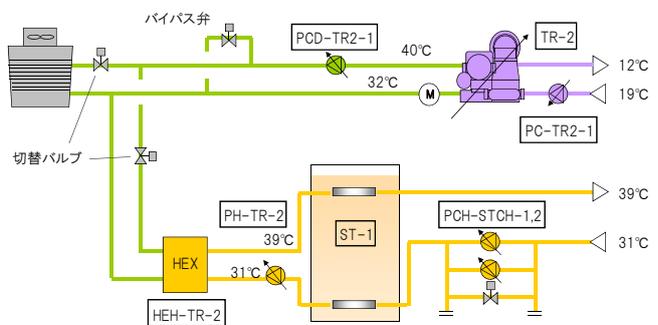


図 3 冷却水熱回収温水システム

## 1.2 LOBAS 熱源運用実績

図 4 に用途別熱負荷を示す。LOBAS 熱源・空調システムの対象となっているオフィスの冷水負荷比率は、面積比率に反し、48%程度と少なめであり、大規模複合用途ビル全体では 13℃冷水比率は 32%程度であった。ただ、オフィス用途での 13℃冷水需要率は 67%と非常に高く、中温冷水のテナントオフィス適用の可能性が示された。

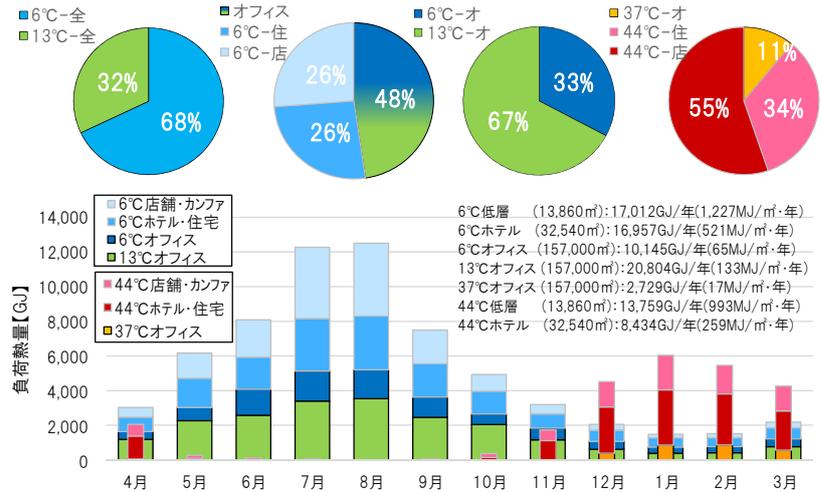


図 4 月別用途別冷温熱負荷 2015 年度

LOBAS 熱源システムの年間システム COP (2015 年度) を図 5 に示す。一般的に、冬期は低い冷却水温度の効果により、冷熱システム COP (以降、SCOP) は高くなる傾向にあるが、LOBAS 熱源システムでは、熱回収運転を行っている機器があり、冷却水温度は高くなっている。その影響を受けて冬期の冷熱 COP は抑えめであるが、熱回収による温熱システムの効率向上に寄与している。中間期から夏期にかけての冷熱 SCOP も、6℃システムシステムが SCOP=1.92 に比べ、13℃冷水システムは、SCOP=2.38 であり、24%高い効率で運転できている。6℃システムと 13℃システムをまとめた年間全冷水 SCOP は 2.05、冷熱と温熱の総合 SCOP でも 1.72 であり、LOBAS 熱源システムが目指した効果が得られている。

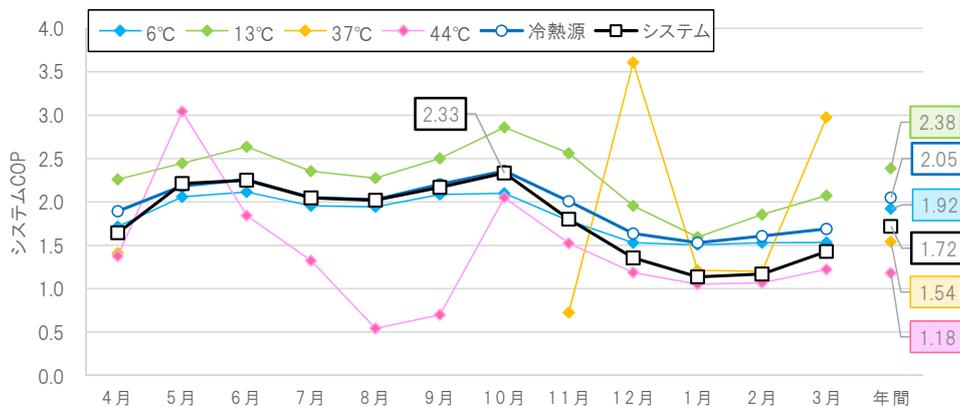


図 5 LOBAS 熱源システム COP

## 2. 都心型超高層ビルでの大規模蓄熱槽の計画

本計画では、“中温冷水による機器効率向上”と“インバータターボ冷凍機の高効率運転”による従来を越える高効率熱源システムを目指したものであるが、その機能を発揮するには、蓄熱槽が担う役割は大きい。しかし、昨今、都心の超高層ビルの地下ピットは、経済性からより浅く、構造要件から梁幅は太くなり、ピット容量は少なくなっている。更に本計画では、立体道路制度を活用し、環状二号線を建物に取り込んでいることもあり、蓄熱槽の容量確保には苦難した。可能な限りのスペースを活用するために、高層建築の特徴として、地下駐車場への 2 箇所の円形スロープ中央部にある余剰スペースを、深さ 20m を越える大深度シリンダー型蓄熱槽 (ST-1:2, 200m<sup>3</sup>、ST-3:1, 600m<sup>3</sup>) として計画した。その他、温度の異なる 4 つの熱媒 (冷水、温水) 毎に蓄熱槽を有するために、平面計画上の制約がある中で地下ピットを利用し、30 槽を超える連結多槽型平型蓄熱槽 (ST-2:2, 000m<sup>3</sup>、ST-4:900m<sup>3</sup>) を計画した。それぞれ蓄熱槽形態に適した設計を行い、シリンダー型ではディストリビュータを工夫し、蓄熱槽効率は 95% を超え、連結多槽型ではもぐり堰方式とし、蓄熱槽効率は 85% を実現している。



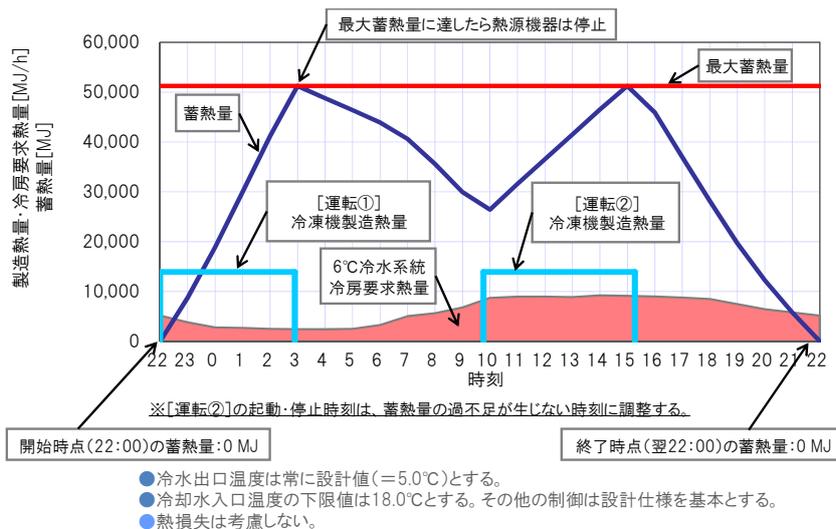
図6 蓄熱槽概要(左:平面配置図、右:ST-1断面概要)

### 3. LOBAS 熱源最適運転支援システム

#### 3.1 最適運転支援システム概要

LOBAS 熱源では、蓄熱槽をクッションタンクとして利用し、二次側の要求熱量が小さい場合には、冷凍機の製造熱量の余剰分を蓄熱槽に貯め、二次側の要求熱量が大きい場合には、冷凍機の製造熱量だけで不足する分を蓄熱槽より供給して対応する。それにより、熱源機器の最適負荷率にて一定出力運転が可能であり、最適負荷率の予測が必要となった。本計画では蓄熱槽活用が特徴であり、予測する熱負荷（要求熱量）は日単位でとらえ、24時間積算のエネルギー消費量が最小となる運転パターンを最適な運転パターンと定義し、運転計画支援を行なうツールを開発した。

ここでの負荷条件は、「24時間の積算要求熱量の予測値」と「外気湿球温度の予報数値」に絞り、事前に LCEM をベースにしたシミュレーションによって最適運転パターンを導出し、熱源機器毎の運転スケジュールを選択する仕組みとした。熱源運転スケジュールの入力は、突発的な負荷出現や、デマンドレスポンス、ピーク調整運用など様々なビル運用条件に対応できるようにビル設備運転員による手入力を前提としている。



【図7 熱源最適運転計画例】

#### 3.2 最適運転支援システムの効果検証

6℃システム冷房運転を対象とし、本システムのガイダンスを参考とせず、冷凍機の負荷率を100%固定とした運用（以下、定格運転とよぶ）とガイダンスを参考とした運用（以下、最適運転とよぶ）の比較を行った（期間は2015年9月～2016年8月）。図8に運用実績の比較を示す。単位製造熱量(1GJ)あたりの機器別エネルギー消費量では、外気湿球温度実績平均値が18.0℃以上の日においては、最

適運転”によって3.6%、18.0℃未満の日においては、5.7%のエネルギー消費量の削減効果が確認された。

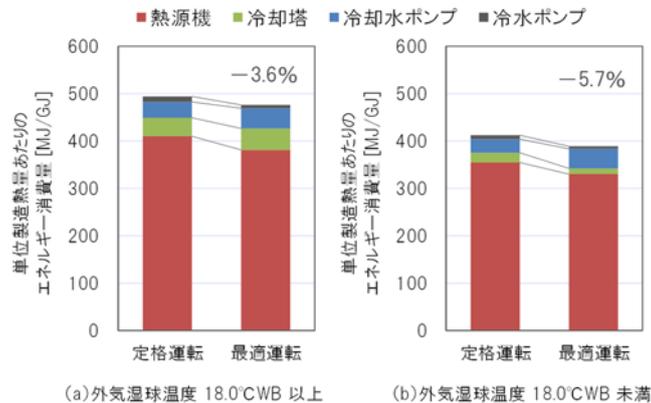


図 8 熱源最適運転運用実績

### 3.3 最適運転支援システムの精度検証

最適運転予測システムでは、負荷予測と機器特性条件の精度に大きな影響をうける。まずは、負荷予測について、6℃系統の24時間の積算要求熱量の予測と実績の比較をし、精度分析を行った（2015年9月～2016年8月）。その結果、負荷予測については、概ね、予測と実績は近く、EEP(Expected Error Percentage)は、4.90%と良好な結果であることが確認された。つづいてシミュレーション結果と実績値を比較し、ポンプ揚程の修正など機器特性モデルのチューニングを実施した。わずかな調整ではあったが、最適運転パターンが変更となり、そのエネルギー消費量の変化割合が1%以上となる条件は全体の約3割あり、最もエネルギー消費量の変化割合が大きい条件では14.9%も変化する結果となった。この結果を実運用にフィードバックし、ツールのチューニングによるエネルギー消費量は、約1.1%削減された。

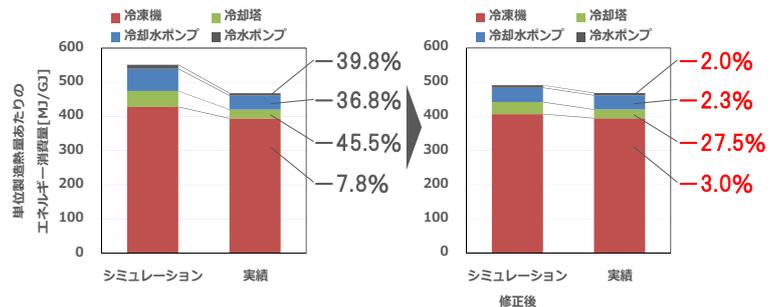


図 9 最適運転シミュレーションチューニング

## 4. 中温冷水、低温温水を最大活用するLOBAS空調システム

### 4.1 都心型超高層テナントオフィスビル空調の背景

省エネルギー性や室内環境品質向上を図る為に、機能を付加した特殊なシステムでは機器サイズが増加傾向にあり、テナントオフィスの貸床面積縮小に直結し、ビル事業性に影響してしまう。都心に建つ超高層オフィスビルではよりその傾向は強く、今回、テーマに掲げた中温冷水、低温温水の最大限活用を図る空調システムは、省スペースでの機能実現が求められた。

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計画している。テナントオフィスビルで新たな中温冷水利用に取り組んだ計画であるが、空調機械室面積は従来方式と同等であり、運用時のエネルギー削減による環境性とビル事業の経済性を両立できている。図10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。

### 4.2 LOBAS空調システム

LOBAS空調の設計ポイントは、以下が挙げられる。

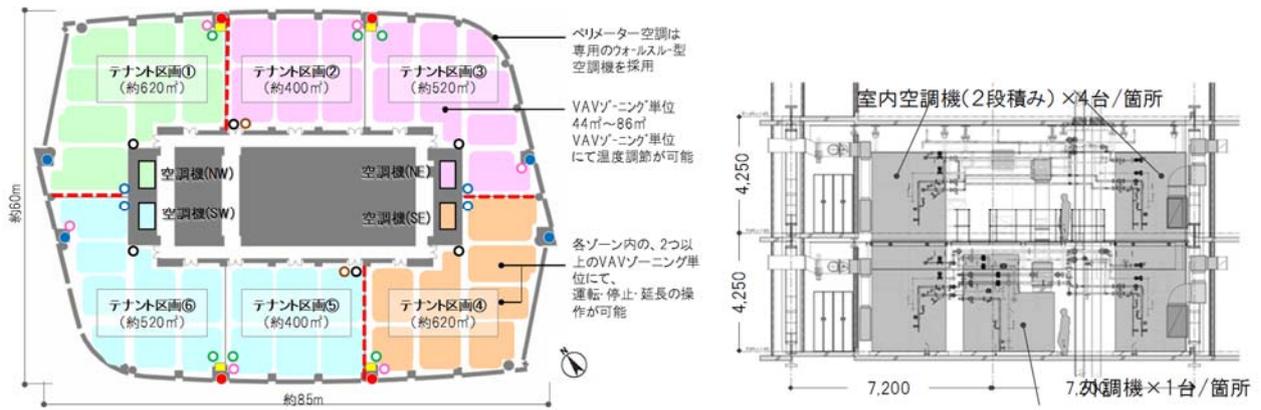


図 10 基準階空調ゾーニング、空調機械室内機器構成

- ・ 中温冷水は空調給気温度に近くコイル特性に配慮。
- ・ 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。
- ・ 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。
- ・ 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。

中温冷水、低温温水を大規模なテナントオフィスの二次側空調機に取り込む設計を行う際には、コイル設計やアプローチ空気状態によるコイル配置、熱媒水の行き還り温度などに配慮せざるをえなかった。このことが、本来、セントラル空調設計時には必ず考慮すべきであった各種設計仕様を改めて、一から考える機会となった。

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 11 に LOBAS 空調のシステム概要を示す。

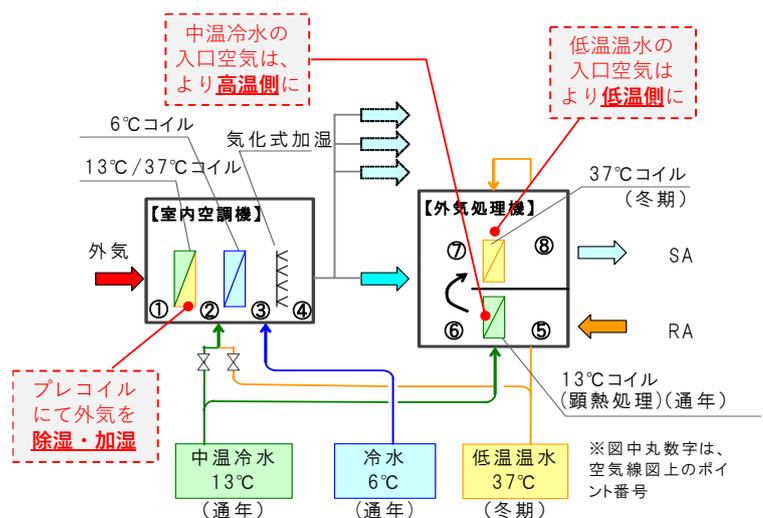


図 11 LOBAS 空調システム

コイルの温度差設計（=還り温度設計）は、コイ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。

表 2 熱媒水温度条件

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

#### 4.3 基準階二次側消費エネルギー特性

図 12 に二次側基準階オフィスの代表階として、14F、15F 空調機冷水、温水の月別消費熱量（外調機 2 台 + 室内空調機 8 台の各コイル廻り熱量を集計）を示す。

6℃冷水の利用は、ほぼ 6 月から 10 月初に限られており、年間冷熱消費量の内 11%であった。13℃冷水の比率が 89%と大半を 13℃冷水で賄うことが出来ている。冷熱の外調機と室内空調機の負荷比率は、29%と 71%であり、外気量制御によって外調機負荷が抑制されている。その分、室内空調機の熱処理率が高く、室内空調機に 13℃冷水を利用している効果が出ている。

37℃温水の温熱消費量は、冷熱に比べ著しく少なく、外調機での消費量が 88%を占めていた。ペリメータは ABU、外気は外調機にて処理しており、室内空調機は内部発熱のみが対象となっており、37℃温熱負荷が少ない結果となった。

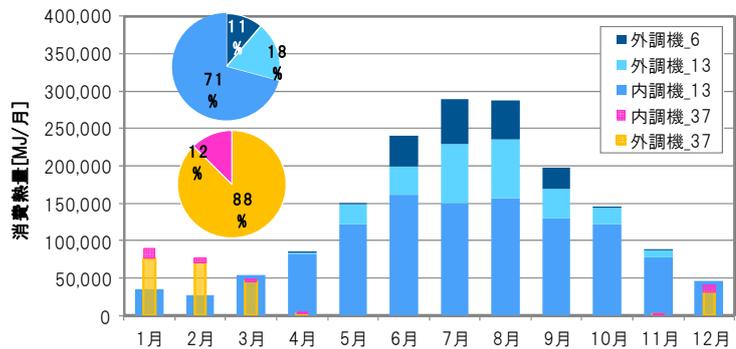


図 12 基準階空調機月別消費熱量

#### 4.4 オフィス内部負荷処理特性

中温冷水、低温温水は空調給気温度に制約があるため、実運用においてオフィスの内部発熱処理への対応可否が懸念される。その為、オフィスの内部発熱処理に着目し、室内空調機での冷水、温水による熱処理に加え、ABU と外調機給気 (SOA) による熱処理分担に関する特性を把握した。対象はペリメータ負荷に方位特性のある 14F-NW エリアと 14F-SE エリアとし、その月別熱処理分担を図 13 に示す (図中の ABU の熱処理量は、メーカーの APF 値 (=2.2) を参考に試算)。

NW、SE 共に室内発熱処理は、室内空調機 13℃冷水が 70~75%を賄っており、13℃冷水の寄与度は高い。冬期は室内空調機の冷熱量が少なくなり、暖房負荷要求が見られるが、室内暖房負荷は ABU が大半の処理を担っている。これにより、室内空調機での 37℃低温温水負荷は少なく、冷凍機の冷却水排熱回収による暖房寄与率が高く出来たことにつながっている。

テナントオフィスの負荷特性は、テナント特性によるところが多いが、本計画では、二次側空調まで含めた中温冷水、低温温水利用システムを行なうことで、テナントオフィスでも十分に活用可能であることが確認できた。

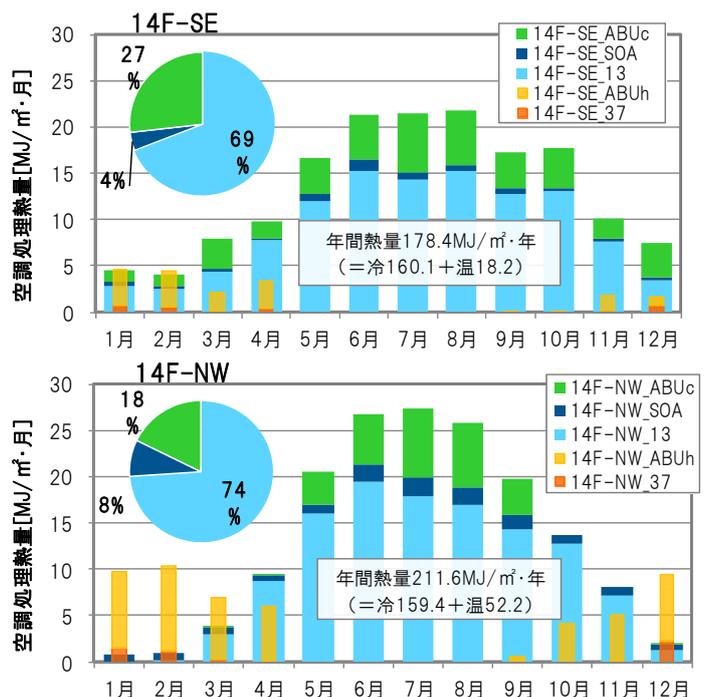


図 13 基準階内部負荷処理特性

## 5. 建物一次消費エネルギー量実績

住宅専用部を除いた建物全体の一次エネルギー消費量を図 14 に示す。年間の建物全体一次エネルギー消費量は 330,722GJ（電力：30,644MWh、都市ガス：703 千 Nm<sup>3</sup>）であり、2015 年度の単位面積あたりの一次エネルギー消費量は、1,456MJ/m<sup>2</sup>・年（住宅専用部除く）である。東京都省エネカルテ（平成 24 年度実績）と比較すると平均値から 29.6%、上位 25%から 14.6%低い結果となっている。また、このうち LOBAS 熱源・空調システムの対象であるオフィス用途に限れば、1,009MJ/m<sup>2</sup>・年であり、その内訳を図 15 に示す。本建物に導入した LOBAS 熱源・空調システムをはじめ、各種環境配慮技術の導入により、省 CO<sub>2</sub> 型建築としての運用実績となっている。

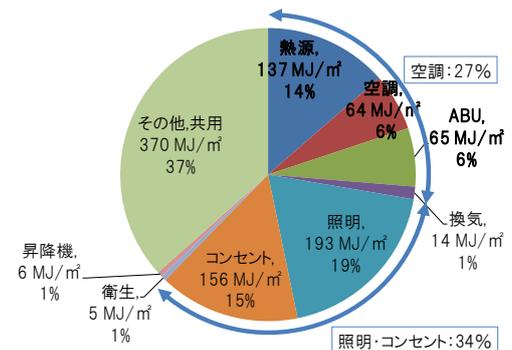
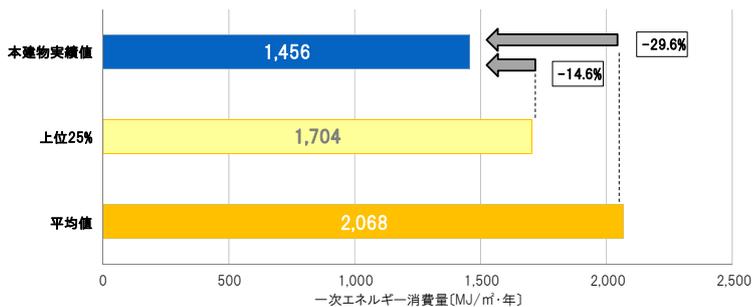


図 14 建物年間一次消費エネルギー量

15 オフィス用途別一次消費エネルギー量

## おわりに

本プロジェクトは、エネルギー密度が高い超高層複合用途建物において、エネルギー消費の多くを占める空気調和設備に対し、その骨格を成す、中央熱源システムと空調システムの分野に“中温冷水”、“排熱回収低温温水”、“大規模蓄熱槽”、“熱源最適運転支援計画”というキーワードを用いて、現代の先導的な取り組みにチャレンジしたものです。

これら代表する技術は、どれも革新的な新技術ではありません。熱媒温度を少し変えるという目的から、今一度、空調熱媒水温度、温度差、蓄熱槽の使い方など各技術の原点回帰を試み、最先端技術の有効活用し、変動する社会ニーズへの適合をはかりました。それにより、新たな価値につながる視点を見出し、技術の更なる成熟に努め、発展を試みました。まさに温故知新です。

IT化、グローバル化により、様々な優れた環境技術が普及し、汎用化されている現在において、今一度、足元を見直すことで、次ぎの何かを発見できるを経験できました。

最後になりますが、本プロジェクトの計画、設計、施工、検証の各ステージにおいて多大なご指導、ご協力をいただきました関係者皆様に誌面をお借りし御礼申し上げます。