

特 集 論 文

高効率ターボ冷凍機と氷蓄熱システムを組み合わせた海外地域冷房プラント

District Cooling Plant with High Efficiency Chiller and Ice Storage System



飛田 善徳^{*1}
Yoshinori Hida

澁谷 誠司^{*2}
Seiji Shibutani

天野 松幸^{*3}
Matsuyuki Amano

前原 則保^{*4}
Noriyasu Maehara

当社は Singapore District Cooling Pte, Ltd より、冷水出力 59 MW (16 800RT) の地域冷房プラントを受注した。本プロジェクトは、設計・製作・調達・建設・試運転調整を含む EPC (Engineering, Procurement and Construction) 契約であり、年間冷房需要の高い東南アジア地区において今後のモデルとなる高効率地域冷房プラントの実現を目指して遂行された。営業運転後 1 年を経過した現在、本プラントは当初の想定を超える高効率で運用されている。本報では、高効率化のために導入したターボ冷凍機、氷蓄熱システムなどの性能向上技術について紹介する。

1. はじめに

シンガポール政府は、マリーナサウス地区を地域冷房施設及び高度通信インフラストラクチャーをもった先進的エリアとして開発し、このエリアはシンガポールのビジネスセンターとしての機能を持った街並としてその姿を現しつつある。

当社は、この街の最初の地域冷房プラントを Singapore District Cooling Pte, Ltd (SDC)^(注) より受注し、高効率技術を導入した地域冷房プラントとして 2007 年に納入引き渡した。

本プロジェクトは、国際競争入札における他社との激しい競争において、プラントのコストと性能に関する当社の優位性を評価されたことが受注につながった。マリーナサウス地区では、5つの地域冷房プラントの建設が計画されており、当社はそのうちの No.1 プラント (プラント総容量 151 MW (42 943 RT) における第 1 期工事分 57 MW (16 210RT) を納入した。

第 1 期工事ではプラント近傍のオフィスビル 2 棟と商業施設 1 棟に冷水を供給する。

注：客先 SDC は、Singapore Power 社 とフランス Dalkia 社によるジョイントベンチャー企業

2. プラント設備の概要

No.1 プラントの熱源機器構成を表 1 に示す。第 1 期工事では、3 MW ターボ冷凍機×1 台、7 MW ターボ冷凍機×2 台、20 MW 氷蓄熱システム×2 基を納入する。プラントの設計に当たっては、3D CAD を用いてプラント内に設置する機器・配管・空調ダクト・

電気計装設備・建築付帯設備などの全情報を入力し、プラント空間における配置を最適化することにより、現地工事のスムーズな進捗に努めた。また、各機器・配管類の操作性、メンテナンス性についても事前に検討することにより、客先引渡し後のメンテナンスなどのトラブル防止に努めた。また、3D CAD システムを用いて、プラント配管加工用のアイソメ図を自動作成図することで、詳細設計費用の削減を図った。

表 1 No.1 プラント熱源機器構成

冷凍機	1 期	完成時
シングル型冷水ターボ冷凍機 (3MW/台)	1 台	1 台
パラレル型冷水ターボ冷凍機 (7MW/台)	2 台	4 台
氷蓄熱システム コンパウンド型製氷ターボ冷凍機+氷蓄熱槽 (20MW/基)	2 基	6 基
プラント冷水供給熱量	57 MW (16 210RT)	151 MW (42 943 RT)

3. ターボ冷凍機

3. 1 高効率ターボ冷凍機

ターボ冷凍機の圧縮機は高効率機 NART シリーズに採用している信頼性のあるものを採用している。本圧縮機は高効率空力プロファイルの採用、機械損失の最小化により非常に高い圧縮機効率を達成している。また、熱交換器はチューブの形状及び配列に最適化技術を適用し、伝熱性能を向上させている⁽¹⁾。

3. 2 本プロジェクトでの適用技術

(1) 熱交換器の構成変更

7 MW の冷水ターボ冷凍機は、2 台の圧縮機を

^{*1} 冷熱事業本部大型冷凍機部熱源ソリューショングループ

^{*2} 冷熱事業本部大型冷凍機部熱源ソリューショングループ主席

^{*3} 冷熱事業本部資材部購買課

^{*4} (株)関電エネルギーソリューションソリューション事業部
エンジニアリンググループ

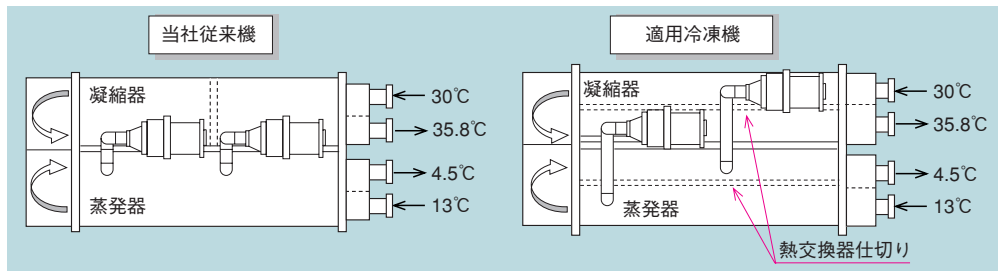


図1 パラレル型冷凍機における熱交換器の比較
縦割りの熱交換器を採用することにより、2台の独立した冷凍機がシリーズにつながる構造とした。

持つパラレルタイプの冷凍機である。本プロジェクトでは、蒸発器及び凝縮器を2分割の縦割り型とし、2台の独立した冷凍機がシリーズにつながる構造にすることにより冷凍機性能の向上を計った。図1及び表2に当社従来機との比較、図2に7MWパラレル型冷水ターボ冷凍機の外観を示す。

(2) 運転モードに応じた圧縮機運転台数の切替え

当社は圧縮機を3台搭載した水蓄熱用製氷ターボ冷凍機を本プロジェクトで初めて採用したが、運転モード（製氷・冷水追掛）により圧縮機運転台数を切り替えることで、性能を当社従来機に比べ向上させた。製氷ターボ冷凍機は、運転モード（製氷・冷水追掛）によりブライン出口温度が異なるため、冷媒の圧縮比が異なる。通常、製氷ターボ冷凍機の圧

縮機は、必要圧縮比の大きい製氷モードに合わせて選定し回転数設定を行うため、圧縮比の小さい冷水追掛運転時の性能は犠牲にされる傾向にある。当社従来機のフローを図3に示す。

これに対して、冷凍機の圧縮機を3台構成とし、圧縮比の大きい製氷運転時は低段圧縮機2台+高段圧縮機1台運転、圧縮比の小さい冷水追掛運転時は低段圧縮機2台運転とすることにより、製氷及び冷水追掛運転の両モードに対して効率の良い運転を可能とした。

【製氷モード】

製氷モードの冷凍機運転フローを図4に示す。

No.1 及び No.2 の低段圧縮機により冷水追掛

表2 7MWパラレル型冷水ターボ冷凍機性能向上値比較

項目	当社従来機	適用冷凍機 (熱交換器縦割型)
冷水出力	7MW (2000RT)	7MW (2000RT)
冷水条件	入口 13℃ / 出口 4.5℃	入口 13℃ / 出口 4.5℃
冷却水条件	入口 30℃ / 出口 35.8℃	入口 30℃ / 出口 35.8℃
消費電力 COP	1240kW 5.67	1074kW 6.55

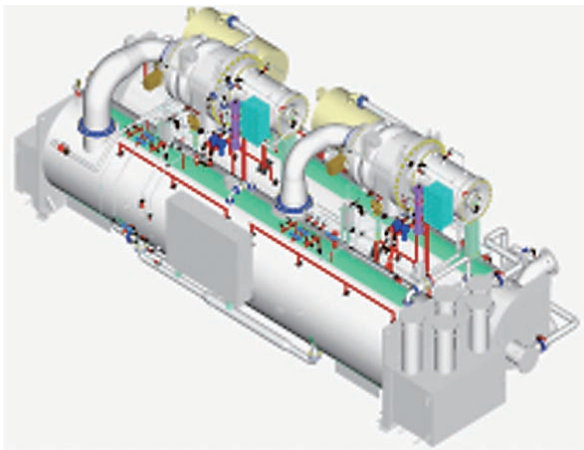


図2 7MWパラレル型冷水ターボ冷凍機
7MWパラレル型冷水ターボ冷凍機の3Dモデルを示す。

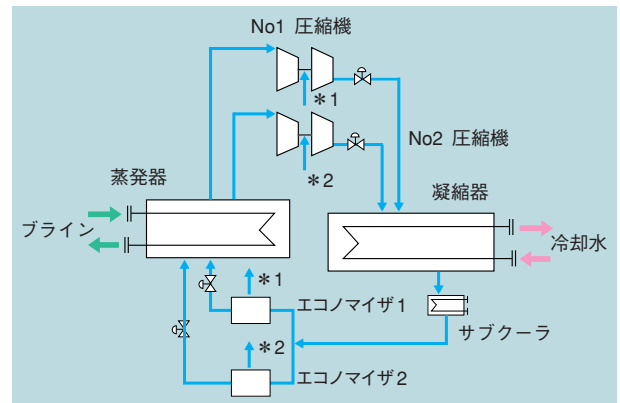


図3 製氷ターボ冷凍機(当社従来機)のフロー

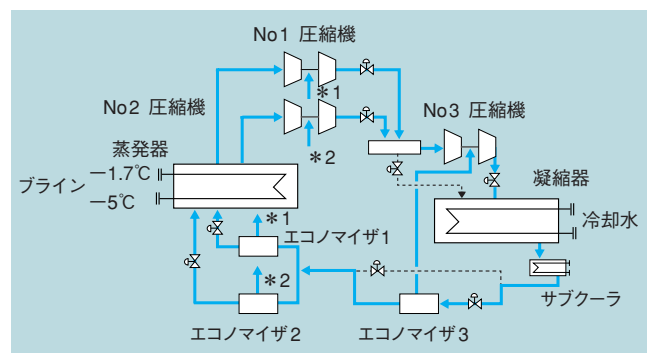


図4 コンパウンド型製氷ターボ冷凍機フロー（製氷運転）
圧縮比の高い製氷運転時は、No.1, No.2 低段圧縮機により中間圧まで圧縮後、No.3 高段圧縮機により昇圧する。

モード相当の中間圧まで圧縮したのち No.3 高段圧縮機にて必要圧力まで昇圧する。

【冷水追掛モード】

冷水追掛モードの冷凍機運転フローを図5に示す。冷水追掛モードは、製氷モードに対して圧縮比が小さいため、No.1 及び No.2 の低段圧縮機のみによる運転となる。表3に当社従来機との比較を、図6に10 MW コンパウンド型製氷ターボ冷凍機の外観を示す。

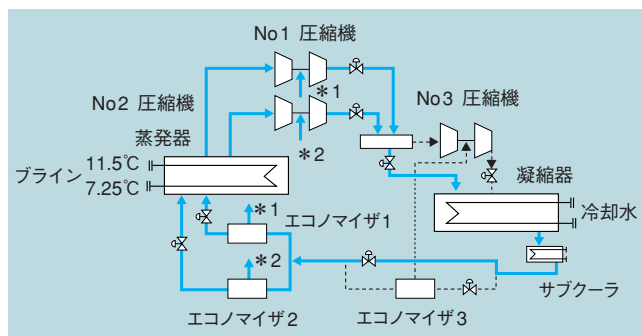


図5 コンパウンド型製氷ターボ冷凍機フロー（冷水追掛運転）
圧縮比の低い冷水追掛運転時は、No.1、No.2 低段圧縮機のみによる運転となる。

表3 10 MW 製氷ターボ冷凍機 性能向上値比較

項目	当社従来機	適用冷凍機 (圧縮機コンパウンド型)
1. 冷水追掛モード 冷水出力 ブライン温度 消費電力 COP	2800 RT 入口11.5℃ / 出口3.0℃ 2014 kW 4.89	2800 RT 入口11.5℃ / 出口7.25℃ 1563 kW 6.29
2. 製氷モード 冷水出力 ブライン温度 消費電力 COP	2150 RT 入口-1.7℃ / 出口-5.0℃ 2020 kW 3.74	2150 RT 入口-1.7℃ / 出口-5.0℃ 1801 kW 4.20



図6 10 MW コンパウンド型製氷ターボ冷凍機
10 MW コンパウンド型製氷ターボ冷凍機の外観（工場組立状況）を示す。

4. 氷蓄熱システム

氷蓄熱システムは、ターボ冷凍機とともに地域冷房プラントの性能及び経済性を左右する重要なシステムである。氷蓄熱システムは、様々な方式が開発適用されているが、アイスボール方式とアイスオンコイル方式が多く採用されている。本プラントでは、両者を比較検討した結果、下記理由によりアイスオンコイル方式を採用した。尚、コイルは当社で開発を行った製品を使用した。

【アイスオンコイル選定理由】

- ①アイスオンコイル方式の蓄熱温度は平均 -3°C 程度であり、アイスボール方式より蓄熱温度を高く設定できるため、冷凍機の運転動力を低減できる。
- ②アイスオンコイル方式は、アイスボール方式に対して、製氷用の熱媒体として使用するエチレングリコールの量が少なく、初期投資費用の面で有利となる。

4. 1 本プロジェクトに適用するアイスオンコイル

アイスオンコイルは当社で開発を行った製品を使用した。その特徴を下記に示す。

(1) 氷蓄熱システム設置スペースの最小化

蓄熱密度の指標である氷充填率（IPF）が90%と高く、設置スペースが小さくできる

図7に製氷時のイメージと実際の製氷状態を示す。

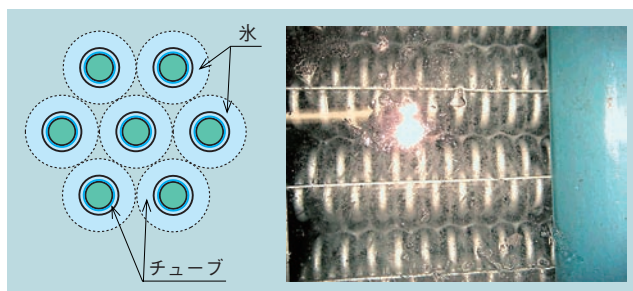


図7 氷蓄熱コイルの製氷状態
製氷完了時における氷蓄熱コイル周囲の氷付着状況を示す。

(2) 縦型チューブ配列の採用

解氷時にはエアバブリングを行うことにより氷からチューブへの伝熱を促進させるが、縦型のチューブ配列とすることにより、チューブと氷の間に生成した水の中を気泡が上昇しながら攪拌する効果が得られ、伝熱性能を向上させた。図8に解氷時のイメージを示す。

(3) コイル寸法・配置

本プロジェクトに納入したコイルの外形及び氷蓄熱槽内の配置を図9、図10、氷蓄熱システムの諸データを表4に示す。氷蓄熱槽はコンクリート製で

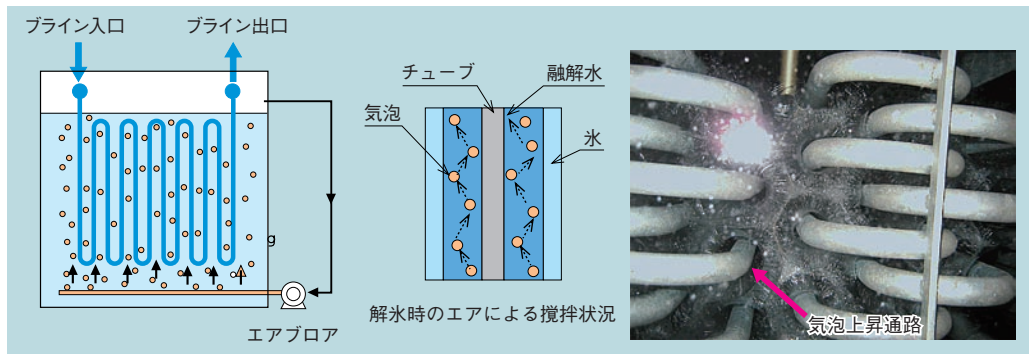


図8 氷蓄熱コイルの解氷状態
解氷時はエアバブリングを行い、コイル周囲の融解水中を気泡が上昇しながら攪拌するため、伝熱性能が向上する。

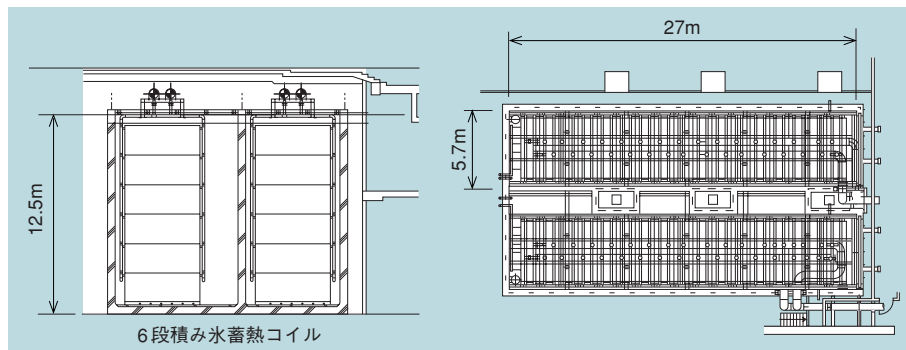


図10 氷蓄熱タンク(断面/平面)
氷蓄熱タンクはコンクリート製であり、内部に6段積みのコイルを合計204個(102個×2槽)設置する。

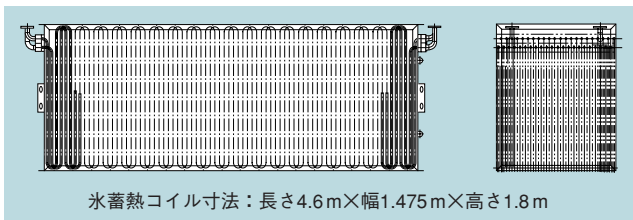


図9 氷蓄熱コイル外形
氷蓄熱コイルの外形を示す。コイルはエアバブリング時の解氷特性の良い縦型チューブ配列を採用した。

表4 氷蓄熱システムデータ

項目	仕様
蓄熱槽	角型コンクリートタンク コンクリート厚さ 475 mm 幅5.7m×長さ27m×深さ12.5m×2槽
コイル个数	102個/槽×2槽
蓄熱容量	74MWh/槽×2槽
氷蓄熱コイル重量	314t/槽×2槽=628t
蓄熱コイルチューブ総延長	289.6km/槽×2槽=579.2km

あり、1槽当たり102個のコイルを縦に6段積みとした。氷蓄熱槽としては世界最大規模であり、コイルチューブの総延長は579.2 km、チューブ溶接箇所は10万箇所に及ぶ長大なものである。コイル単体寸法は、現地での施工性向上・工事費低減の観点から極力大きくすることが望ましいが、コイルの防錆処理を行う溶融亜鉛メッキ槽の大きさに制約があるため、シンガポール近隣のアジア地区に存在するメッキ槽の最大寸法により決定した。

4.2 氷蓄熱システムの運用

(1) 製氷運転

氷蓄熱システムの製氷完了時には蓄熱槽内部に約700トンの氷が形成され、水から氷に変化する際の体積膨張により、氷蓄熱槽の水位は約450 mm上昇

する。この水位変化を計測することにより、氷蓄熱システムの蓄熱量を算出し、システムの制御に利用している。

(2) 解氷運転

解氷運転時は、製氷ターボ冷凍機と氷蓄熱槽をシリーズにつなぎ、製氷ターボ冷凍機の冷水追掛運転モードでブラインを11℃から7.25℃まで冷却した後、氷蓄熱槽の解氷運転により、氷の融解潜熱である0℃の低温エネルギーを利用し、ブラインを7.25℃から3℃まで冷却する。これにより、上流側の製氷ターボ冷凍機は高いブライン出口温度での高効率な運転が可能となり、蓄熱システム全体としての効率向上を図った。本システムの採用により、製

水ターボ冷凍機単独の冷水追掛運転に対して、約120 kWの電力消費量削減が可能となり省エネルギー運転を実現した。図11にこのシステムフローを示す。

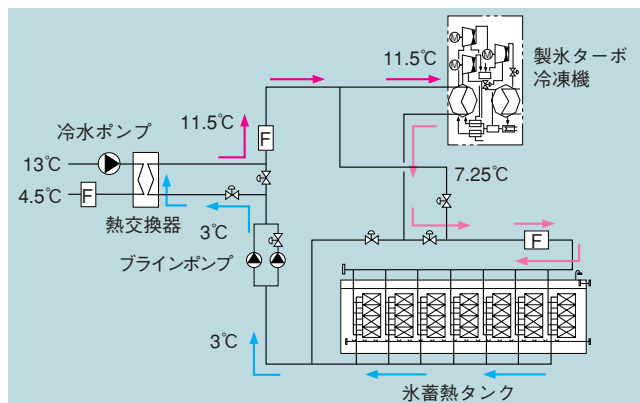


図11 氷蓄熱システム運転フロー（追掛+解氷）
製氷ターボ冷凍機の追掛運転と氷蓄熱槽の解氷運転をシリーズにつなげることで、氷蓄熱システム全体のCOP向上を図った。

4.3 氷蓄熱システムの性能

図12に製氷運転時の性能計測データを示す。

製氷ターボ冷凍機のCOPは、製氷完了時においても設計仕様値4.2以上を維持しており、高効率な運転となっている。また、冷凍機のライン出口平均温度は-4.3℃であり、製氷時の仕様値-5℃より高い温度で運転されていることから、製氷ターボ冷凍機の電力消費量削減に寄与している。

5. プラント運用実績データ

5.1 概要

マリーナサウス地域冷房プラントは、プラント運用開始から1年以上経過しており、これまでのプラント運用実績について、下記にまとめる。

本プラントユーザーの冷水負荷は、ピーク時で17 MW（4834 RT）程度である。

図13に代表日（2007年10月1日）の冷水負荷及

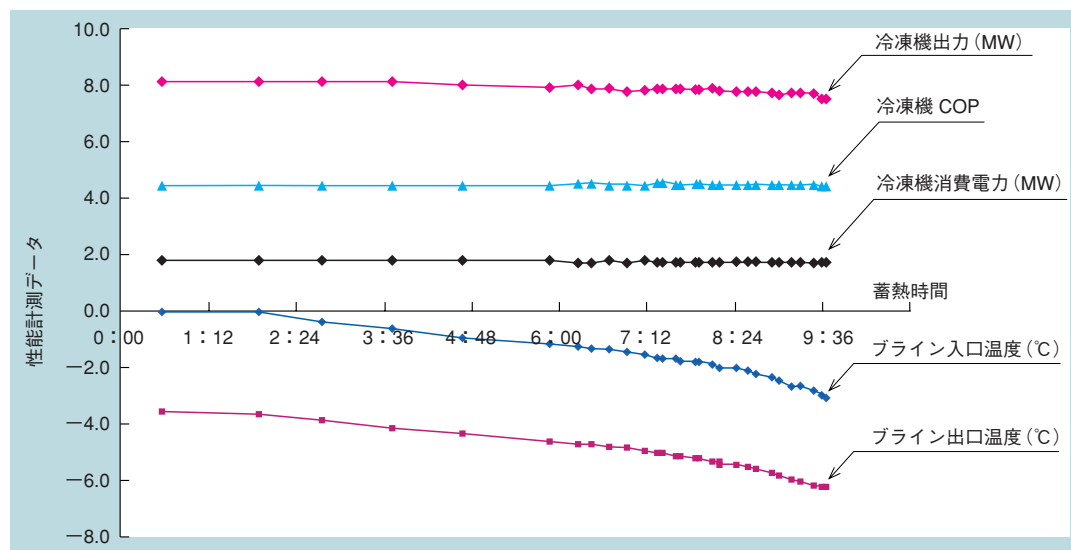


図12 10MW製氷ターボ冷凍機 製氷運転時の性能特性
製氷モード運転時の性能特性データを示す。

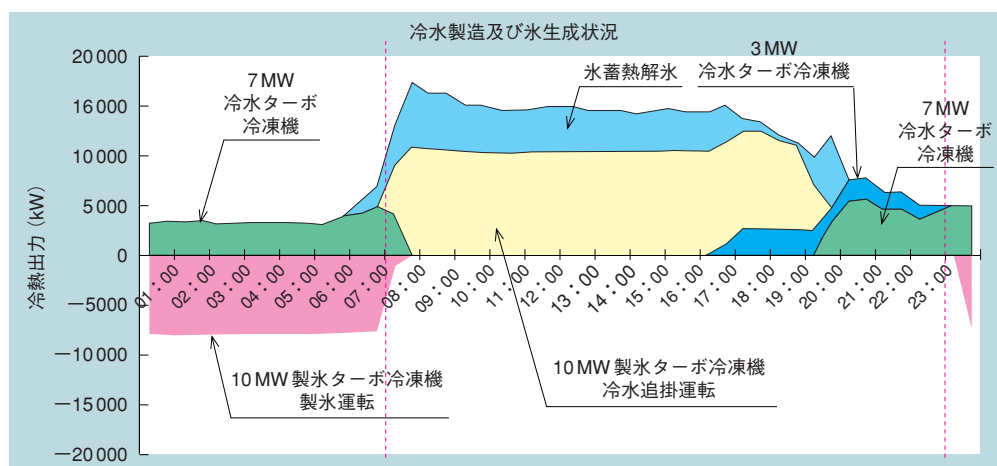


図13 代表日の熱源機運転状況
代表日（2007年10月1日）における冷熱出力及び熱源機運転状況を示す。

び熱源機の運転データを示す。熱源機の運用は下記のとおりとなっている。

夜間負荷 (20:00 ~ 8:00)

： 7 MW ターボ冷凍機による冷水供給

昼間負荷 (8:00 ~ 20:00)

： 10 MW 製氷ターボ冷凍機冷水追掛 + 解氷シリーズ運転及び 3 MW 冷水ターボ冷凍機運転

夜間製氷 (23:00 ~ 8:00)

： 10 MW 製氷ターボ冷凍機製氷運転

図 14 に代表日 (2007 年 10 月 1 日) のプラント電力消費量データを示す。夜間の製氷ターボ冷凍機運転と昼間の氷蓄熱槽解氷運転を行うことにより、電力料金単価の高い昼間から料金単価の安い夜間へ、電力消費量がシフトしていることが分かる。

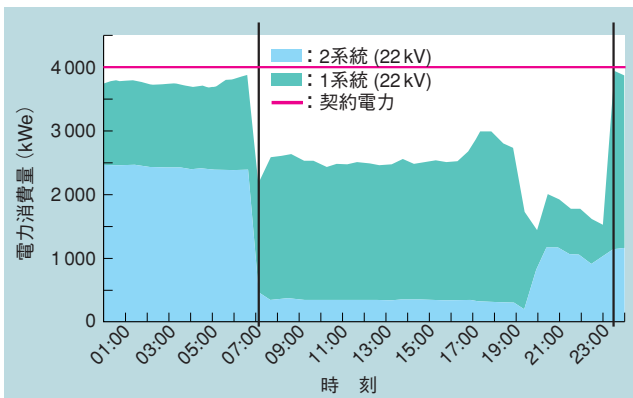


図 14 代表日のプラント電力消費量
代表日 (2007 年 10 月 1 日) におけるプラント電力消費量を示す。

5. 2 7 MW パラレル型冷水ターボ冷凍機

7 MW ターボ冷凍機は、冷水負荷による圧縮機 2 台の台数制御を行い、冷水ポンプにインバータ回転数制御を採用しているため、幅広い負荷範囲で高効率に運用されている。2007 年 1 月から 10 月における冷凍機冷水出力と COP 実測値の関係を図 15 に示す。

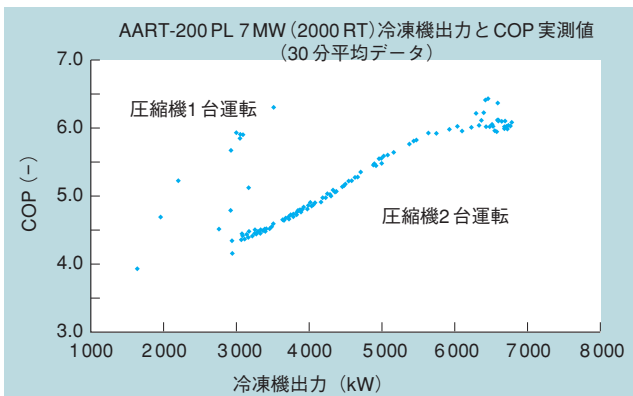


図 15 7 MW 冷水ターボ冷凍機 COP
7 MW パラレル型冷水ターボ冷凍機の COP 計測データを示す。

これによると冷凍機はほぼ所定の性能を満足していることが分かる。

5. 3 10 MW 製氷ターボ冷凍機

10 MW 製氷ターボ冷凍機は、夜間は製氷運転、昼間は冷水追掛運転となる。いずれの運転モードでも、製氷ターボ冷凍機は出力 100 % の状態で運転する。2007 年 10 月 1 日の製氷ターボ冷凍機の COP 実測値データを図 16 に示す。これによると、夜間製氷運転時の COP は約 5.1、昼間冷水追掛運転時の COP は 7.0 以上となっており、計画値以上の高効率で運転されていることが分かる。

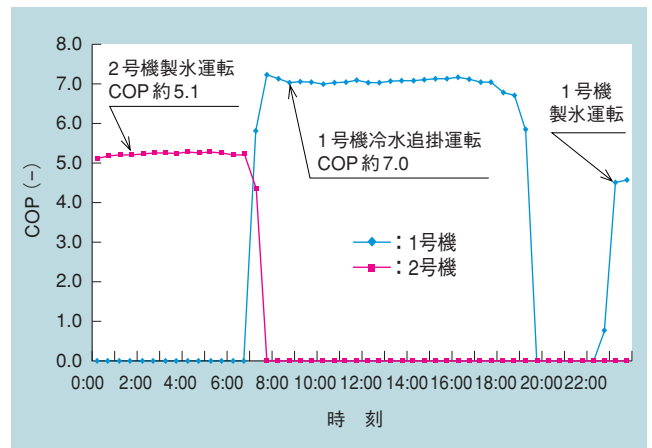


図 16 10 MW 製氷ターボ冷凍機計測データ
代表日 (2007 年 10 月 1 日) における 10 MW 製氷ターボ冷凍機の COP 計測データを示す。

5. 4 プラント総合効率

マリーナサウス地域冷房プラントでは、プラントの電力供給ラインの電力消費量を計測するとともに、ユーザへの冷水販売熱量を計測しており、日々の電力消費量と冷水販売熱量からプラントの総合 COP を算出し管理している。電力消費量には、熱源機器、補機、空調換気設備、照明など、プラントで使用したすべての電力消費量が含まれている。図 17 に 2007 年 2 月から 2007 年 10 月におけるプラント総合 COP の実測データを示す。

本プラントのユーザはオフィスビルが主体であるため、プラント総合 COP には曜日の依存性があり、冷房負荷の高い平日にはプラント総合 COP は上昇し、冷房負荷の低い休日にはプラント総合 COP は低下する。2007 年 10 月時点での平日におけるプラント総合 COP は約 3.7 である。これは氷蓄熱システムを導入した地域冷房プラントの平均的なプラント総合 COP 3.0 を大きく上回っており、プラントのライフサイクルコスト低減に貢献していると考えられる。

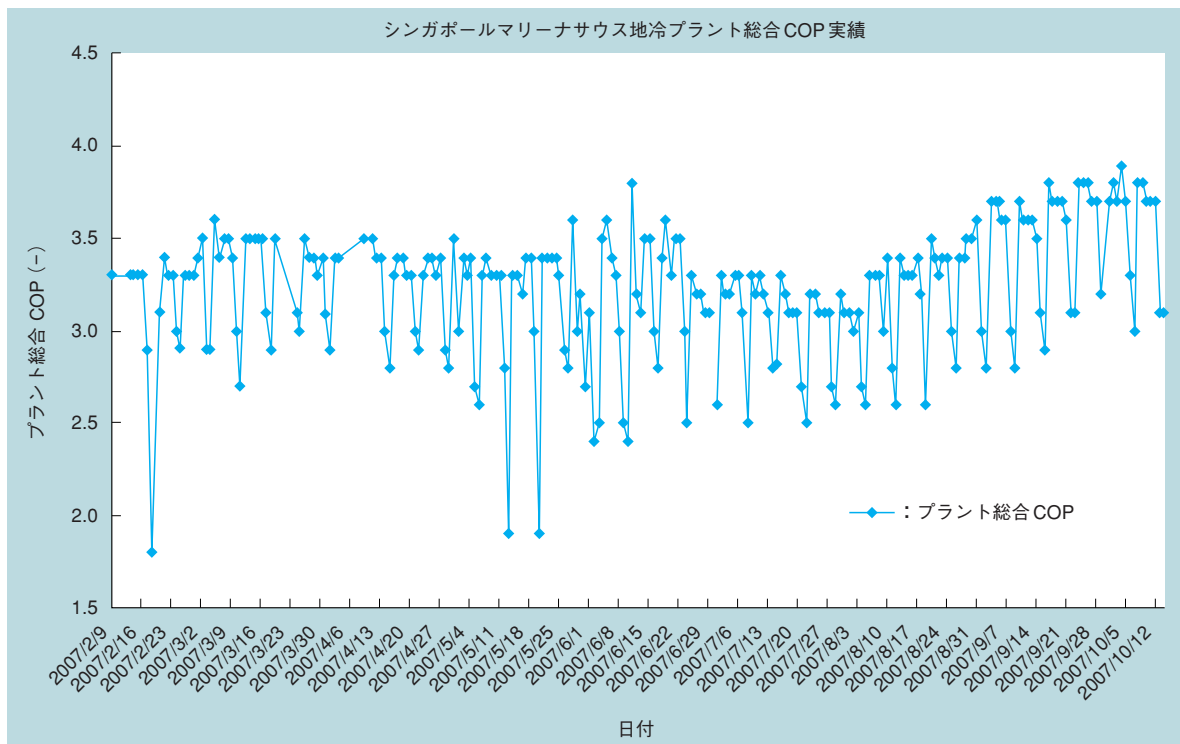


図 17 プラント総合 COP
2007 年 2 月から 10 月までのプラント総合 COP 計測データを示す。

6. ま と め

マリーナサウス地域冷房プラント第 1 期工事では、当社の有する最新の高効率ターボ冷凍機及び氷蓄熱システム技術を導入した。今後マリーナサウス地区の開発に伴い、本プラントのテナントユーザは増加していくことが予想され、当社のターボ冷凍機についても受注台数の増加が見込まれている。

シンガポールという赤道直下の立地条件において、冷凍機が COP 7.0 以上の高効率で稼動している状況は、国内及び海外の冷凍機ユーザの注目を集めている。

参 考 文 献

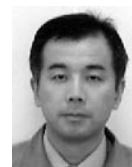
- (1) 関 亘ほか、高効率ターボ冷凍機（NART シリーズ）、三菱重工技報 Vol.39 No.2（2002）p.88



飛田善徳



前原則保



澁谷誠司



天野松幸