

# 紀尾井ホールの氷蓄熱システム

## Ice Thermal Storage System for Kioi Hall

五十嵐 正之<sup>(1)</sup>  
Masayuki  
IGARASHI

福島 岳夫<sup>(1)</sup>  
Takeo  
FUKUSHIMA

山田 周治<sup>(2)</sup>  
Syuji YAMADA

### 抄 録

夜間電力を利用して冷水又は氷を製造、貯蔵し、昼間にその冷熱を冷房負荷に利用する夜間蓄熱がある。なかでも、氷蓄熱方式は従来の冷水方式と比較して蓄熱密度が高く、蓄熱槽容量縮小が可能であることから、特に注目を集めている。新日本製鐵では、連続的に水を過冷却状態まで冷却し、蓄熱槽に放出することにより、氷と0℃の水に変換させる過冷却製氷システムの開発を進めており、これまで前例のなかったプレート型熱交換器を用いた過冷却製氷に成功した。本報では、その実用例として、新日鐵紀尾井ホールに設置された氷蓄熱設備について紹介する。

### Abstract

As one of measures to meet leveling of the daytime and nighttime electric power demands which presently becomes even an object of public concern, there is a method of thermal storage during nighttime in which cold water or ice is made and stored by utilizing the nighttime electric power and the cryogenic energy thus stored is utilized to air conditioning loads during daytime. Especially, the ice thermal storage method attracts people's attention because that the thermal storage density is higher comparing with the conventional cold-water thermal storage method and the capacity of heat storage tank can be reduced. Nippon Steel has been engaged in developing a supercooled ice making system in which water is continuously cooled down to a supercooled state and converted to ice and water at 0°C by discharging it to the heat storage tank, and succeeded in making supercooled ice using an unprecedented plate-type heat exchanger. In this paper, the ice thermal storage system is introduced which was installed in Kioi Hall of Nippon Steel as an example put to practical use.

## 1. はじめに

電力需要量は増加の一途をたどっており、特に夏期においては冷房負荷による電力需要の昼夜間格差の拡大は社会問題となっている。この対策の一つとして夜間電力を利用して冷水又は氷を製造、貯蔵し、昼間にその冷熱を冷房負荷に利用することにより電力需要の昼夜平均化をはかる夜間蓄熱が行われてきた。なかでも、氷蓄熱方式は、氷の潜熱を利用することにより、従来の冷水方式と比較して蓄熱密度が高いため、蓄熱槽容量を1/5～1/7程度に縮小することが可能であり、地価の高い都市部で特に注目を集めている。

氷蓄熱システムの製氷方法としては、熱交換器の表面に氷を固着させるスタティック方式が広く普及している。しかしながらスタティック方式では、氷の成長に伴う伝熱抵抗の増加による製氷効率の低下等が問題点として指摘されている。この問題の解決策として、連続的または間欠的に伝熱面から氷を離脱するダイナミック方式が多数、考案・実用化されている。

新日本製鐵では、連続的に水を過冷却状態(大気圧下で、氷が0℃以下の温度で液相を保持する状態)まで冷却し、その過冷却水を蓄熱槽に放出することにより、氷と0℃の水に変換させる過冷却製氷システムの開発を進めており、これまで前例のなかったプレート型熱交換器を用いた過冷却製氷に成功した。

本報では、“プレート型熱交換器を用いた過冷却製氷システム”の実用例として、新日鐵紀尾井ホールに設置された氷蓄熱設備について紹介する。

## 2. 紀尾井ホール氷蓄熱設備

### 2.1 建築概要

新日鐵紀尾井ビルディングは、東京都千代田区紀尾井町に位置し、新日本製鐵20周年記念行事として企業メセナを推進する目的で計画された。建物用途は、中ホール(800席クラシック音楽専用)・小ホール(250席邦楽専用)及び社員クラブを立体的に構成した複合文化施設である。図1に建屋断面図を示す。

<sup>(1)</sup> 鉄構海洋事業部 エネルギーエンジニアリング部 掛長

<sup>(2)</sup> 鉄構海洋事業部 エネルギーエンジニアリング部 部長代理

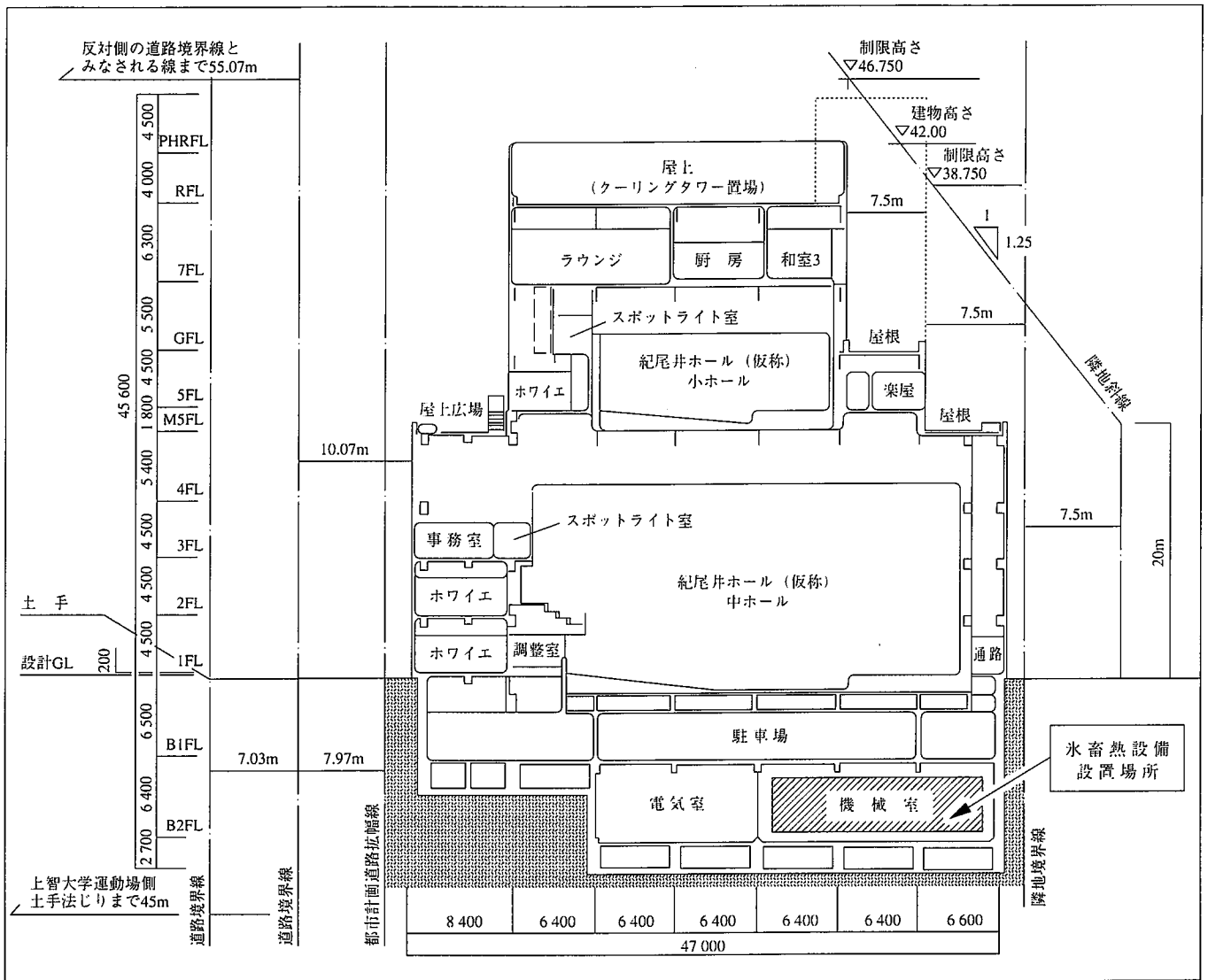


図 1 東西断面図

名称：新日鐵紀尾井ビルディング  
 所在地：東京都千代田区紀尾井町  
 用途：劇場・社員クラブ  
 敷地面積：3 120. 21 m<sup>2</sup>  
 延床面積：12 625. 73 m<sup>2</sup>  
 階数：地下2階，地上7階，塔屋1階  
 工期：1992年12月～1995年1月

2.2 熱源設備概要

熱源設備は，環境汚染，ランニングコスト，安定供給等を総合的に判断し電力・ガス併用方式としており，年間を通して冷水及び温水を供給できる四管方式クロズド配管と，蒸気を用いた加湿により，きめ細かい空調を可能としている。

本設備は，水蓄熱設備を備えていることを特徴としており，夏期最大冷房負荷520USRTのうち，ガス焚冷温水発生機により360USRT，水蓄熱槽により160USRTを供給する。また，水蓄熱用チラーはバックアップとして，100USRTの負荷追従運転を行うことができる。

地下2階に熱源機器及び水蓄熱槽を設置した機械室，電気室，自

家発電機室及び受水槽室を配置し，屋上に冷却塔を設置している。

図2に系統図，図3に機器配置図を示す。

最大冷房負荷：520 USRT

最大暖房負荷：840 Mcal/h

熱源機器構成：・水蓄熱用水冷スクリーチャー

40 USRT×2台

・水蓄熱槽

300 USRTH×2台

・ガス焚冷温水発生機

180 USRT×2台

・加湿用蒸気貫流ボイラー

500 kg/h×2台

2.3 水蓄熱設備機器主仕様

(1) ブライン冷凍機

型式：水冷スクリー型

能力：40USRT(夜間製氷運転)

49USRT(昼間冷水運転)

圧縮機：75kW

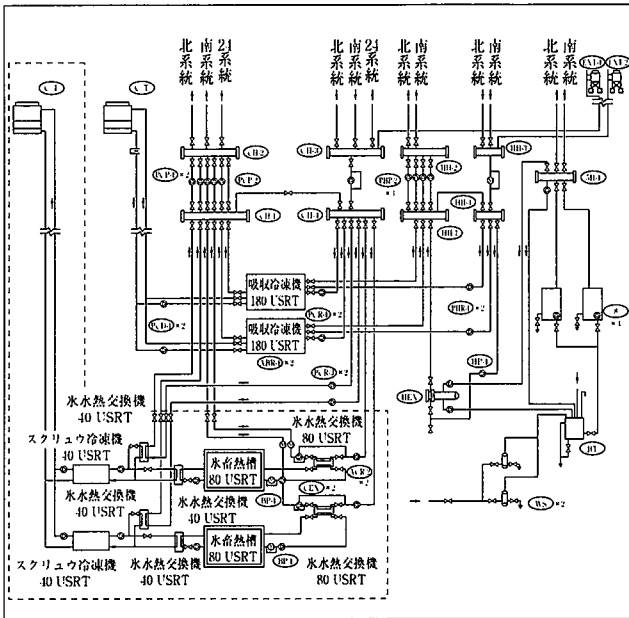


図 2 システム図

冷媒：R134A

(2) 水蓄熱槽

型式：FRP保温パネル水槽  
能力：300USRTH×2台(蓄熱)

(3) 製水熱交換器

型式：プレート式熱交換器  
能力：40USRT  
温度：製水冷水 0.2 → -1.7°C  
          ブライン -2.7 → -0.8°C

(4) 解水熱交換器(水蓄熱)

型式：プレート式熱交換器  
能力：49USRT  
温度：一次冷水 4.0 → 9.0°C  
          二次冷水 12.0 → 7.0°C

(5) 冷水熱交換器(冷凍機負荷追従運転)

型式：プレート式熱交換器  
能力：49USRT  
温度：ブライン 0.0 → 5.0°C  
          二次冷水 12.0 → 7.0°C

3. 製水システム

3.1 製水のメカニズム

水は冷却されて氷に相変化する際、過渡的に過冷却状態(大気圧下で0℃以下の温度となっても液相を保持する状態)になることが広く知られている。これはギブスの自由エネルギーの考え方より以下のように説明されている。

水の中では氷核生成の自由エネルギーは、氷核生成促進因子となる水の自由エネルギーの減少(過冷却度 $\Delta T$ と氷粒径の関数)と氷核生成抑制因子である表面エネルギー増大(表面張力と氷粒径の関数)の関係より導かれるもので、前者が後者の増大を上まわることにより氷粒の形成となる。氷結晶成長の熱力学的駆動力となる過冷却水の自由エネルギーの減少は、水相と氷相の化学ポテンシャルの差 $\Delta$

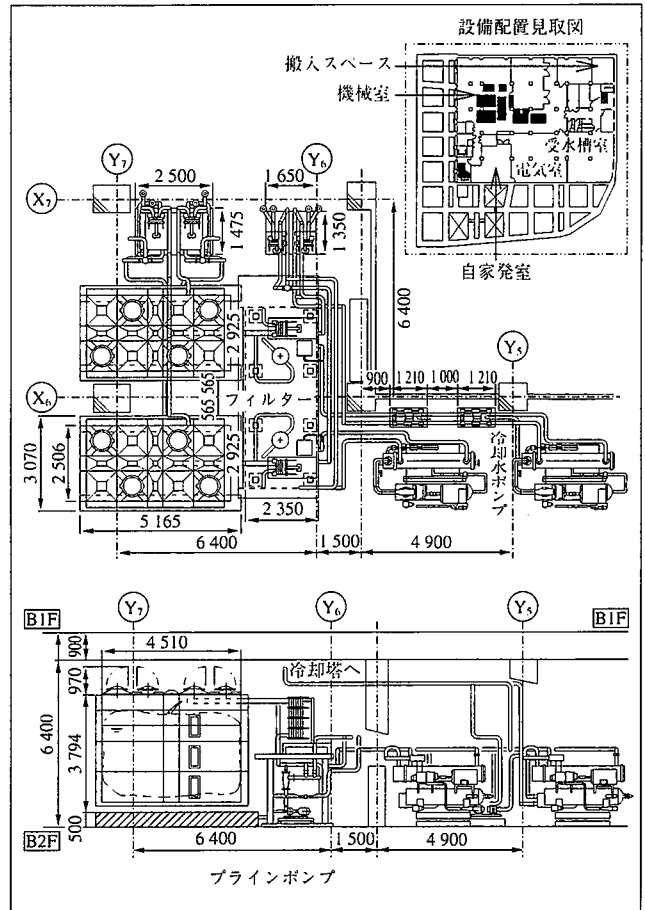


図 3 機器配置

$\mu$  に比例するので、過冷却度  $\Delta T (= T_m - T)$  を用いると次のように表せる。

$$\Delta\mu = \mu_i - \mu_l = \frac{L\Delta T}{T_m} \dots\dots (1)$$

$L$ ：潜熱量， $T_m$ ：凍結温度，

$\mu_l, \mu_i$ ：過冷却水及び氷の化学ポテンシャル

純水の場合、他の粒子や壁の助けを借りずに起こる自発核生成確率は、式(1)の化学ポテンシャルの差  $\Delta\mu$  が大きい程、すなわち過冷却度が大きい程大きくなる。また過冷却度が極度に大きくなると水の粘度が増大し、水分子の移動が抑制され安定な氷粒子になる確率が急激に減少することになる<sup>1)</sup>。

方親水性の異物質を含む一般の水では、異物質が凝固核となり、比較的小さな過冷却状態にて急激な氷核生成確率の増大が容易に起こり、氷粒子の成長が見られることになる。一般の水道水の過冷却温度は-5~-7℃位、そして湖・河川水で-3~-5℃位との報告例がある<sup>1)</sup>。

また、伝熱面に純水の水滴を置いて、一定速度で冷却し、伝熱面上に氷を発生させる実験を多数行い、氷発生時の過冷却度と氷核形成確率を検討した報告例がある。図4はその結果を示したものであり、過冷却温度は-6~-11℃となっている<sup>2)</sup>。

新日本製鐵の製水システムでは、上記の過冷却現象を利用し、製水熱交換器内の流動条件及び熱交換条件を制御することにより、人工的に安定的な過冷却状態を維持することを可能としている。

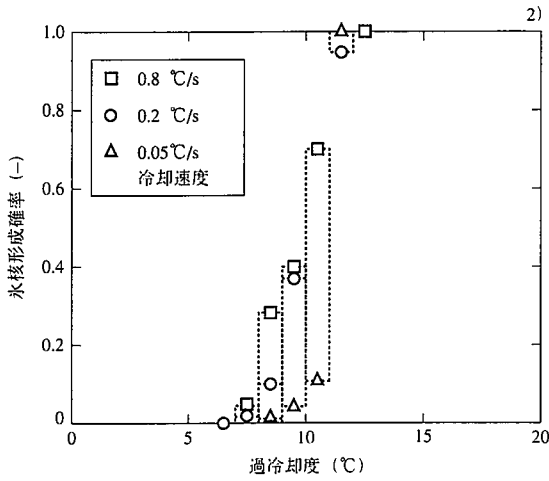


図4 水核形成確率

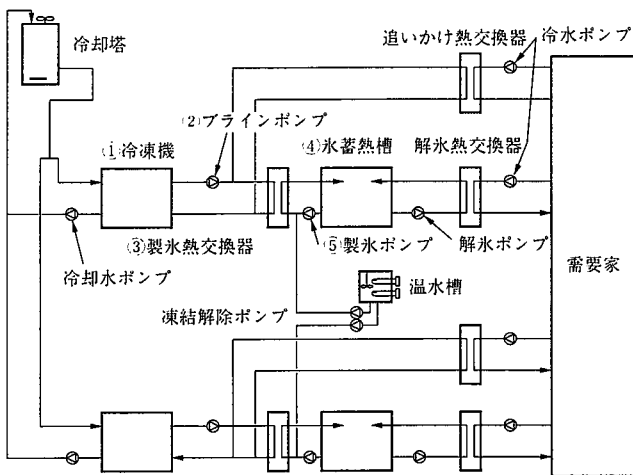


図5 製氷システム

3.2 製氷システムの機器構成

図5に示すように、①冷凍機により冷却されたブラインは、②ブラインポンプにより連続的に、③製氷熱交換器に供給される。一方、④水蓄熱槽に蓄えられた水は、⑤製氷ポンプにより連続的に、③製氷熱交換器に供給され、過冷却状態まで冷却される。

過冷却状態まで冷却された水は連続的に、④水蓄熱槽に放出される。過冷却水は、④水蓄熱槽中で、氷と0℃の水に変換する。この連続運転を続けることにより、④水蓄熱槽中の氷充填量を所定の値とすることができる。

3.3 製氷システムの特徴

本製氷システムは、過冷却製氷方式であること及び、プレート型熱交換器を用いていることより以下の利点を有する。

- (I) 過冷却製氷方式であることによる特徴
  - (i) 熱交換器の伝熱面に氷を固着させないため、氷の固着による伝熱効率の低下を起こさない。
  - (ii) 過冷却水を製造することによる製氷方式であるため、個体(氷)をハンドリングする設備が不要である。
  - (iii) シャーベット状の水が作られるため、氷の粒が大きい製氷方式比較して熱応答性(解氷性能)に優れる。
  - (iv) 蓄熱媒に安価で入手の容易な水道水を用いる。

- (2) プレート型熱交換器を用いることによる特徴
  - (v) 伝熱効率が他の熱交換器と比較して優れている。
  - (vi) 保守点検が容易である。
  - (vii) スケールアップが容易である。

3.4 プレート型熱交換器の適用と効果

以上の特徴の中の、(v)伝熱効率について明らかにする。

本製氷プロセスでは、過冷却製氷設備としては前例のないプレート型熱交換器を用いて過冷却水を製造することにより製氷を行う。プレート型熱交換器は通常、最も伝熱効率の高い熱交換器といわれており、本製氷プロセスの製氷熱交換器においても、3000(kcal/m<sup>2</sup>・h・°C)以上の総括伝熱係数を有する。

以下にプレート型熱交換器能力の概略計算方法を図6に示し、その適用効果を明らかにする。

熱交換器の熱交換量(Q)は、図6に示すように、伝熱面積(A)、対数平均温度差(ΔT<sub>m</sub>)、及び総括伝熱係数(U)の積により求められる。伝熱面積(A)は熱交換器の大きさを代表し、対数平均温度差は高温側流体と低温側流体の平均温度差を表す。

総括伝熱係数(U)は熱交換器の伝熱効率を表す係数であり、熱交換器固有の係数である。このため、その値は熱交換器のタイプ及び、運転条件により異なる。

プレート型熱交換器は、液-液熱交換の場合でも総括伝熱係数は、2300~5800W/m<sup>2</sup>・K(1978~4987kcal/m<sup>2</sup>・h・°C)程度とされており<sup>3)</sup>、一般的な熱交換器の総括伝熱係数と比較すると、最も熱交換効率が高いといえる。

$$Q = A \times \Delta T_m \times U \quad \dots\dots\dots (2)$$

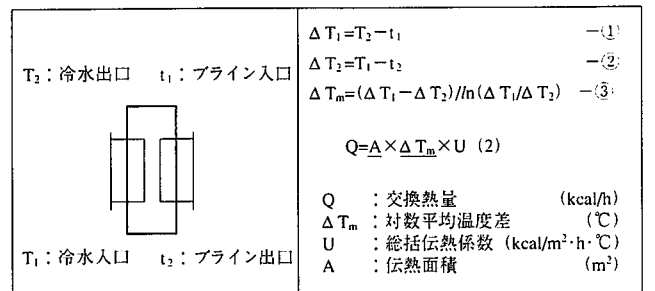


図6 熱交換器能力の概略計算方法

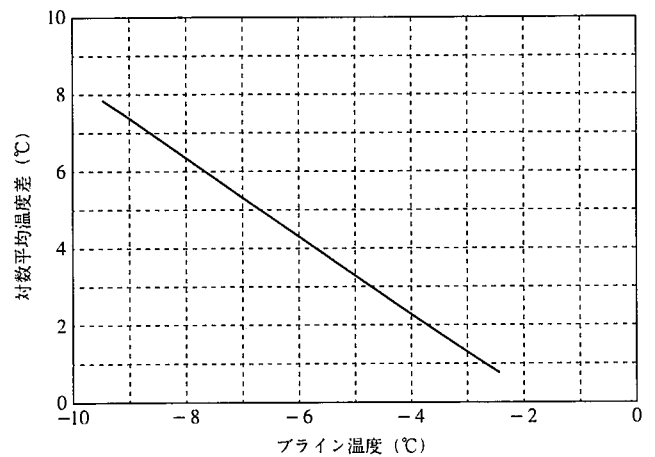
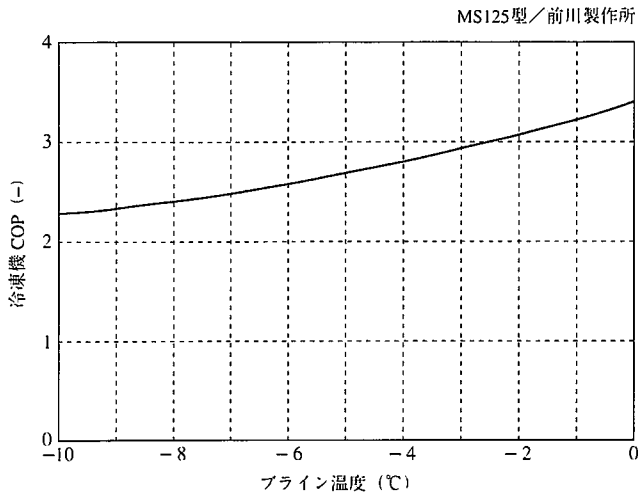


図7 対数平均温度差

図 8 熱交換器能力の概略計算方法<sup>4)</sup>

上式(2)において、交換熱量(Q)一定とした場合、総括伝熱係数を大きくとることができれば、伝熱面積(A)及び、対数平均温度差( $\Delta T_m$ )を小さく設定することが可能となる。

#### (1) 伝熱面積(A)の低減

伝熱面積(A)と総括伝熱係数(U)は反比例しており、例えば総括伝熱が10倍になれば、伝熱面積(A)は、1/10倍になる。つまり、総括伝熱係数(U)が大きいプレート型熱交換器を適用することにより、熱交換器の伝熱面積(A)の縮小、すなわち熱交換器のサイズグ

ウンが可能となり、機器設置スペース及び機器費の低減に効果がある。

#### (2) 対数平均温度差( $\Delta T_m$ )の低減

対数平均温度差( $\Delta T_m$ )と総括伝熱係数は反比例しており、総括伝熱係数を大きくとることにより、対数平均温度差( $\Delta T_m$ )を低減することができ、その結果、熱交換器に供給するブライン温度を従来より高く設定することができる。

このことにより、冷凍機のCOPを高くとる運転が可能となり、電力消費量低減に効果がある(図8参照)。

## 4. 結 言

1)電力需給のひっ迫、2)発電設備稼働率低下による発電コスト増加を解決する有効な対策として、昼間の電力需要を夜間にシフトする電力需要の昼夜平準化が挙げられている。なかでも、真夏の昼間に発生する最大電力需要量のうち40%近くを冷房等の夏期需要が占めており、その夜間シフトを図るために、電力会社では蓄熱調整契約等の優遇措置をとっている。このように氷蓄熱に対する要望が高まっている折、本システムの有用性を深くご理解いただき、地域冷暖房等において本システムが広く普及するよう努めていきたい。

### 参考文献

- 1) 稲葉英男、福迫尚一郎：機械の研究、41(6)、741(1989)
- 2) 斉藤杉夫、玉本淳：日本冷凍協会論文集、6(1)、31(1989)
- 3) 機械工学便覧、B8熱交換器・空気調和・冷凍、日本機械学会
- 4) 前川製作所：冷凍機カタログ、125MS