

特 集 論 文

熱源システムの大幅な省エネを可能にする熱媒過流量制御システム

"Variable Over Water Volume System" Reduces The Energy Consumption of a Heat Source System



上 田 憲 治*¹ 田 井 東 一 馬*² 佐 藤 達 哉*³
 Kenji Ueda Kazuma Taito Tatsuya Sato
 福 島 亮*⁴ 田 中 良 彦*⁵ 古 田 島 雄 太*⁶
 Ryo Fukushima Yoshihiko Tanaka Yuta Kotajima

ターボ冷凍機の機器の高性能化・COP 向上に努めてきたが、機器の高性能特性が熱源システムのエネルギー効率向上に生かせていないという課題があった。そこで実際の熱源システムの実績データを洗い出し、従来システムの問題点“冷水還り温度が設計値と異なり低い温度となっている”実態を確認した。そこで“過流量制御”という新しい概念により、冷凍機及び熱源システムを計画・制御し、大幅な省エネルギーが可能であることを実プラントで確認した。本技術は第 43 回空気調和・衛生工学会技術賞を受賞した。

1. はじめに

熱源システムの高効率化・省エネルギーを図るために、大容量熱源機器であるターボ冷凍機の高効率化を進めてきた。最新機種“AART シリーズ”では COP 6.4 を達成し、多くのお客様の熱源システムに幅広く採用されている。適用熱源システム別では、工場用途約 2/3、空調用途約 1/3 である (図 1)。

最近高性能特性から、空調用熱源としてのターボ冷凍機が見直され小容量ニーズが増加してきた。そこで 50 RT クラスのセントラル空調熱源としてほぼ最小単位である“マイクロターボ”シリーズや高性能機“AART シリーズ”を 200 RT クラスまで拡大して市場ニーズに対応してきた。

製品コストに直結する工場では、ユーザによる工場の稼動状況、負荷予測にあわせ熱源システムの運転管理が適切に行われ、熱源機の高性能化にあわせて効果的な省エネルギー・ランニングコスト低減が実現され

ている。しかし、一般空調用途では熱源システムの実体効率は計画された値よりも低く、ターボ冷凍機の高効率特性を生かせていないとの指摘があった。そこで熱源システムの省エネルギー運転が可能な熱源機を含めた提案をする必要がある。

2. 空調用熱源システムの抱える問題・課題

最近の空調用熱源システムのリコミッションングでは、熱源システムのエネルギー損失を助長する特徴的な事例が多くみられることが明らかとなった。

冷水返り温度が設計値に保持されないことに加え、冷熱量需要以上の冷水流量を要求される事例である。夜間・中間期・冬期などの冷熱負荷が小さい場合に顕著で、冷水の行き・還り温度差が縮小し、設計温度差に対して 1/2 ~ 1/3 となる事例もある (図 2)。

多くの場合、冷水供給量を負荷の変動にあわせて設

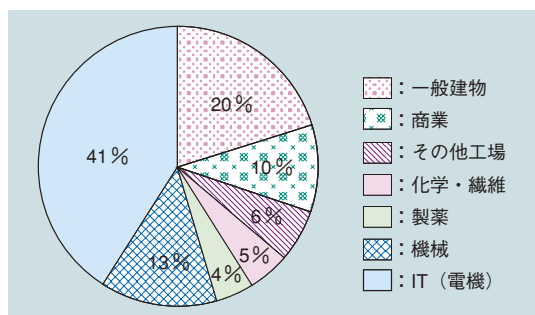


図 1 ターボ冷凍機の適用 (2005 年, 当社調べ)

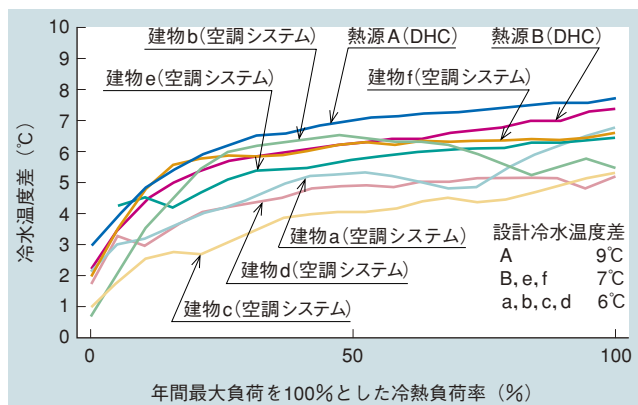


図 2 設計冷水温度差と実態温度差

*¹ 冷熱事業本部大型冷凍機部設計課
 *² 冷熱事業本部大型冷凍機部設計課主席
 *³ 冷熱事業本部大型冷凍機部サービス課主席

*⁴ 技術本部高砂研究所ターボ機械研究室主席
 *⁵ (株)三菱地所設計都市エネルギー計画部部長 工博
 *⁶ (株)三菱地所設計都市エネルギー計画部参与

計温度差が確保できるように制御することが極めて困難であるため、熱量需要からは過剰な台数の冷凍機を起動する必要が生じ、冷水ポンプ、冷却水ポンプなどの補機についても、冷凍機と同様に設計時に想定した以上の台数が運転され、大きなエネルギー損失となる。さらに、流量需要にあわせて冷凍機を運転する場合は1台当たりの負荷率が低下し、冷凍機のCOPも低下する。

この問題を改善するには、熱源システムを適切に設計し運転制御する手法を開発する必要がある。

3. “熱媒過流量制御システム” という課題解決

これまで省エネルギーの観点から冷水ポンプの減流量により補機動力低減を図る工夫がされてきた。しかし前述の課題を抱える熱源システムでの適用は困難である。そこで、以下に示す冷水流量を過剰に流す（熱媒過流量）ことにより課題解決を図ることとした。

単純には冷水ポンプ動力を増大する手段により、熱源システム全体として高効率化・最適化を図るため、設計概念の転換といえる。そこで、検証評価が重要である。

(1) 熱媒過流量制御の定義

変流量（Variable Water Volume Flow）制御を前提とする温度差一定の空調システム設計で計画された熱媒流量に対して、温度差の減少に応じて、熱源機器の熱媒ポンプ流量を定格値（100%）に対して、それ以上を許容して過大な熱媒流量を流すことで（例えば200%、300%など）最適に制御し、過剰な熱源台数の起動を抑制し、省エネルギーを図ることを“熱媒過流量制御”と言う。

(2) 熱源システムへの適用

例えば、冷水の行き還り温度差が設計値の2/3まで低下する熱源システムに熱媒過流量を適用するためには、図3に示すように、冷水ポンプの設計容量をその変動する温度差に“反比例”させて、つまり冷凍機の定格値（100%）に対して150%の流

量を送水できる冷水ポンプを制御可能なようにインバータ駆動としたものを設置する。冷凍機も冷水ポンプに合わせて100%以上の冷水流量（この場合150%）に対応できる構造とし、冷凍機の“出力可能な冷凍能力の範囲内で冷水を変流量制御”する。

(3) 冷凍機の適用

冷凍機へ冷水を定格値より過剰に通水された場合、流量の2乗に比例し圧力損失が増大する。

圧力損失の増大に比例し冷水ポンプ動力が増大するため、冷凍機の圧力損失は130kPa以上では適切でないとされている。つまり単純に過流量とした場合、かえってエネルギー損失を招きかねない。そこで冷凍機の圧力損失を低減する配慮が必要となる。ターボ冷凍機の場合、冷水はシェル&チューブ構造をとる蒸発器に通水されるため、チューブ（伝熱管）の本数を増やし、水の折り返しパス数を減じることにより圧力損失の低減が可能である。一方、熱交換器の伝熱特性は、冷水流量の増加（レイノルズ数の増加）により改善が見込まれる。

図4では標準の3パスから2パスに減じた例をプロットしており、過流量の最大適用ポイントでは標

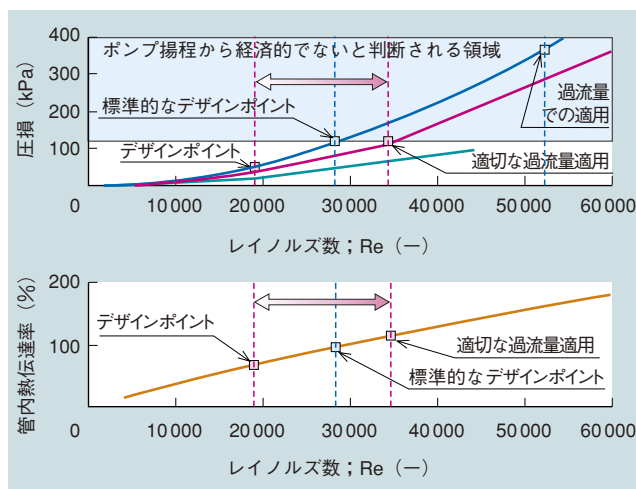


図4 冷水過流量による圧力損失増大と伝熱改善

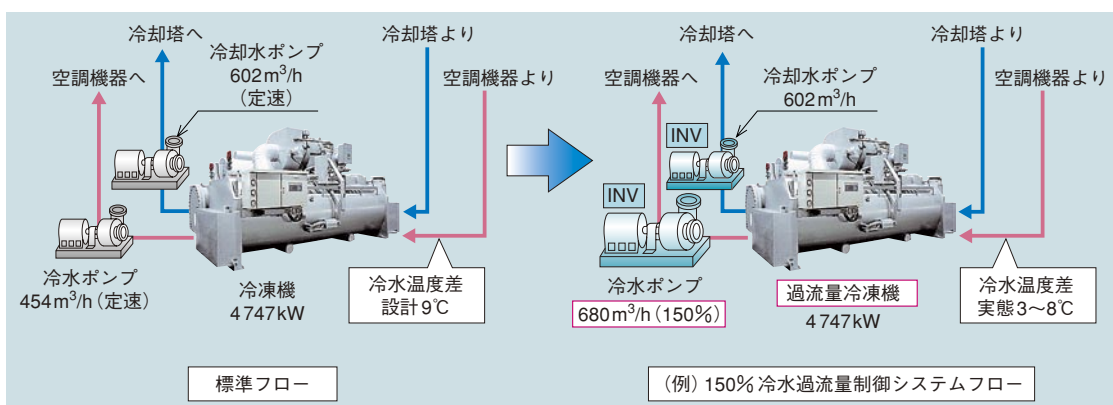


図3 過流量システムの適用

準デザインポイントと比較しても、圧損の増大を抑制しかつ伝熱特性を改善した適用となることが判る。

4. 制御システムロジックの開発

定流量及び減流量の従来システムでは、設計冷水還り温度以上を積極的に制御する対象としており、それ以下では冷凍機は部分負荷運転となる。しかし熱媒過流量制御では、図5に示すように、設計温度以下の冷水還り温度に対しても最大負荷を与えることが可能となる。冷凍機の入口温度に従い図5の右の曲線上(100%負荷点)となる流量上限以下で連続的に適切な流量指示を与える。実際の運用では図6に示す冷水流量は往還ヘッダーの差圧が一定となるように差圧制御されるため、冷水は負荷側からの還り温度以下で冷凍機に入る。

特徴的なのは固定流量では冷凍機の入口温度基準で

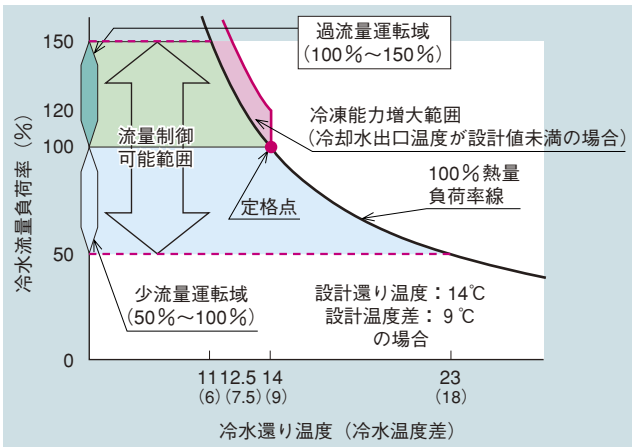


図5 冷水流量範囲と冷水還り温度

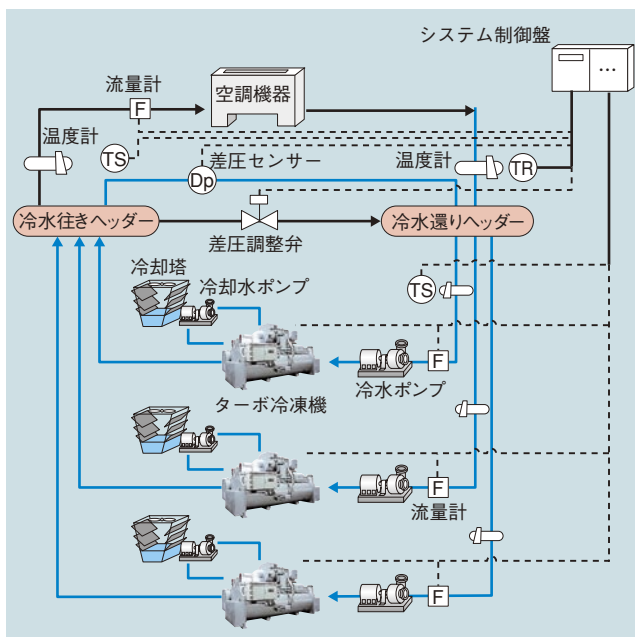


図6 過流量制御適用熱源システム概念図

起動・停止が制御されるのに対して、過流量により適正值制御される流量と還り温度、つまり冷凍機にかかる冷熱負荷により適切に起動・停止制御されることである。

5. 二次的な効果

固定冷水流量の場合、冷水出口を制御する冷凍機は、下式のとおり冷水入口温度が設計値を上回らない限り定格能力以上は出ない。

$$Q = \gamma \cdot \lambda \cdot F \cdot (T_{in} - T_{out}) \quad (1)$$

ここで、

Q : 冷凍能力 (kW), F : 冷水流量 (m^3/s)

γ : 比重 (kg/m^3), T_{in} : 冷水入口温度 ($^{\circ}C$)

λ : 比熱 (kJ/kg), T_{out} : 冷水出口温度 ($^{\circ}C$)

しかし、過流量制御の場合、ターボ冷凍機の圧縮機を駆動する電動機の容量を超えない条件を満たせば図5の100%負荷線を超えて定格能力以上を出力することが可能となる。

電動機容量を超えない条件の成立は、ターボ冷凍機の場合、圧縮機の性能特性により決まる。圧縮機の所要動力を電動機から見た場合以下のとおりに表される。

$$M = \left(\frac{Gr \cdot H}{\eta c} + M_{loss} \right) / \eta m \quad (2)$$

ここで、

M : 電動機出力 (kW), M_{loss} : 機械損失 (kW)

ηc : 圧縮機断熱効率 (-), ηm : 電動機効率 (-)

Gr : 冷媒流量 (kg/s), H : 所要ヘッド (kJ/kg)

過流量制御が必要とされる状況は冬期・中間期・夜間等の負荷が小さい状況であり、冷却水温度が低い条件と重なる。同一の冷凍能力を出力する場合であっても冷却水温度が低くなると式(2)所要ヘッド H が小さくなり、 Gr がわずかに小さくなる。 ηc , ηm がほとんど変わらない定格 Gr 付近では電動機出力 M は小さくなる。そこで、同一電動機出力で循環可能な冷媒流量 Gr は大きくなり、定格以上の冷凍能力の出力が可能となる。増加量はターボ圧縮機の特性に依存するが(図7)、実績で約20%増が確認された。

6. 省エネルギー効果

熱源システムのエネルギー効率の向上は、冷凍機の負荷率向上、COP向上による直接効果と、冷凍機の起動台数が抑制されることによる補機起動台数抑制による間接効果の相乗効果が期待できる。従来システムを4747kW(1350RT)×4台とするところに、150%過流量が可能な4747kW熱源機を2台導入した熱源システムでその省エネルギー実績評価を実施した。

図8では従来システムで最大4台運転対応が必要で

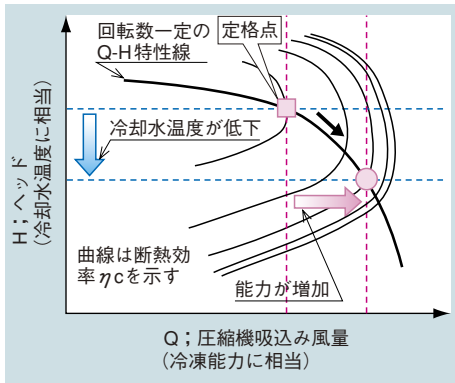


図7 圧縮機特性 (冷却水低下依存)

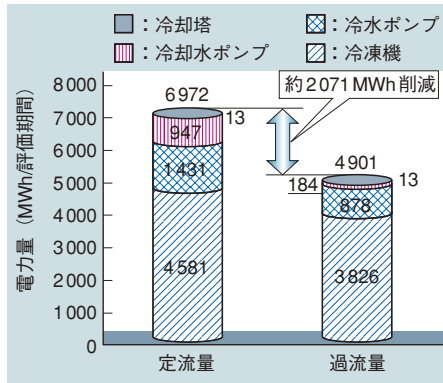


図9 期間電力量評価



図10 過流量対応ターボ凍機設置状況

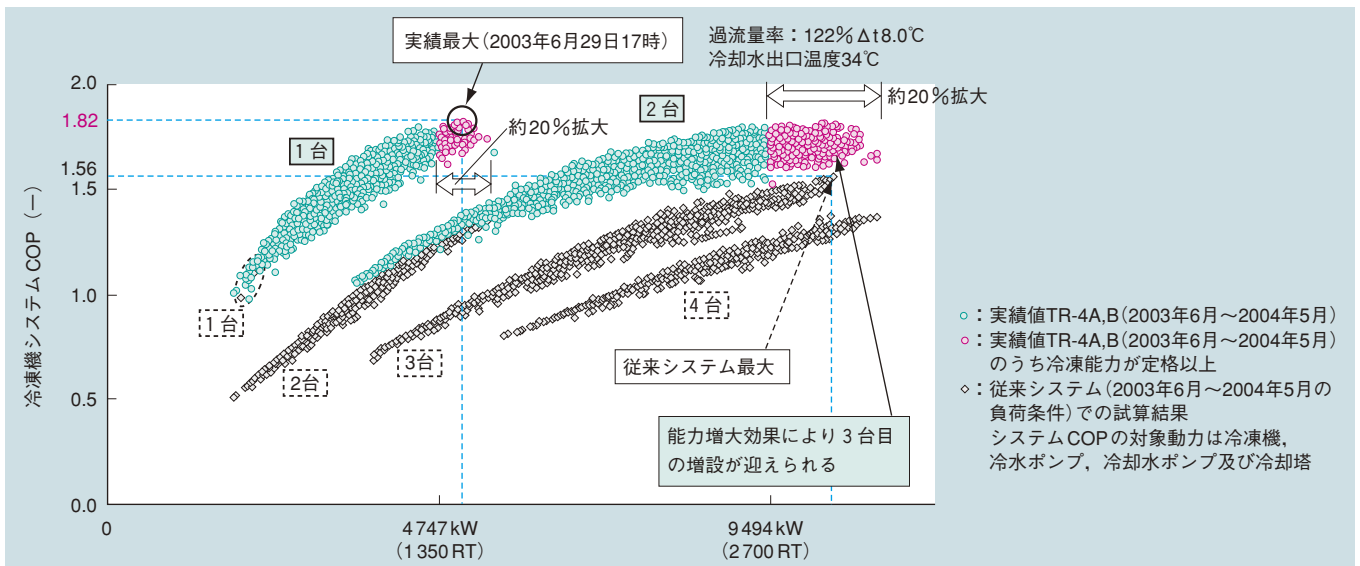


図8 冷凍システム COP の改善効果 (実績)

あった負荷状況日に対して、過流量対応冷凍機2台以下の運転で対応ができた。その結果冷凍機システムCOP (冷熱出力に対して冷凍機、冷水ポンプ、冷却水ポンプ、冷却塔の動力を割ったもの)は従来1.56相当であったものが1.82の約1.2倍に改善した。この時過流量は~122%であった。

さらに、最も過流量効果が期待できる中間期・冬期180日間積算消費電力量では従来定流量システムでの試算より約30%削減された (図9, 図10)。

7. まとめ

本システムは“熱媒過流量”のあたらしい基本原理を(株)三菱地所設計がコミッションングによるデータベースから立案し、熱源機器の設計、システム機器の最適制御をまで含めて三菱重工業(株)と共同開発したものである。本技術は計画・開発・設計・検証と多くの関係者の成果として第43回空気調和・衛生工学会賞技術賞を受賞した。

参考文献

- (1) 田中良彦ほか, 熱媒過流量制御システムの開発, 空気調和・衛生工学 Vol.79 No.10 (2005) p.63
- (2) 関亙ほか, 世界最高効率インバーター turbo 冷凍機 NART-I シリーズ, 三菱重工技報 Vol.41 No.1 (2004) p.44
- (3) 関亙ほか, 超省エネ・高効率インバーター turbo 冷凍機, 三菱重工技報 Vol.42 No.2 (2004) p.50



上田憲治



田井東一馬



佐藤達哉



福島亮



田中良彦



古田島雄太