

吸収冷凍機の制御性向上

Improvement Study on Dynamic Characteristics of Absorption Chiller

技術本部 藤原 誠^{*1} 小野 仁意^{*2}
 松 尾 実^{*2}
 高砂製作所 福島 亮^{*3} 田井 東一馬^{*4}

地域冷暖房、ビル空調等に用いられる大容量冷凍機分野では、近年、フロンを使わない吸収冷凍機の需要が増加している。しかし、吸収冷凍機の課題として、熱エネルギーで駆動する熱交換器システムであるため熱容量が大きく、起動、停止、負荷変動時の追従に時間を要することが従来から指摘されている。本研究では、このような吸収冷凍機の特性を把握し、改善を図るため、二重効用吸収冷凍機の動特性シミュレータを開発し、PID制御の適正化による負荷追従性の改善を行った。また、制御用ソフトウェアの改善、保護機能の高度化により、制御性の向上、信頼性向上を行った。

Recently, absorption chillers have attracted much attention because it does not use FRON as the refrigerant. An absorption chiller consists of many heat exchangers and contains a lot of solution and refrigerant. Therefore, it takes a long time to start, stop and change the cooling load. This paper describes the improvement of the dynamic characteristics of the absorption chiller. A dynamic simulation program for a double effect absorption chiller was developed, and the PID control parameters were selected by using this program. The control characteristics and reliability were improved by using high performance software and a safety control system.

1. はじめに

吸収冷凍機は、2成分系の媒体を用いて濃度差による飽和蒸気圧力差を駆動源とする熱駆動型の冷凍機であり、作動媒体にフロンを使用しないこと、また低質熱源で駆動可能なことから毎年需要が増大している。

吸収冷凍機の唯一の課題は熱駆動型に起因するものであるが、熱容量が大きいため、起動、停止、負荷変動への追従等に時間を要する点である。従来、吸収冷凍機の運転特性の改善は、吸収冷凍機が7～8種類の相変化を含む熱交換器で構成され、かつ作動媒体が2成分系である等の複雑な体系であることから、詳細なモデル化による解析よりも実機での経験等に重点が置かれてきたのが実情である。本報では、吸収冷凍機の各構成熱交換器を詳細にモデル化し、動的挙動が正確に表現できるシミュレータを開発し、本シミュレータを用いて当社最新シリーズ機 MGS/MDS シリーズ (図1参照) の制御性改善を実施した事例について紹介する。

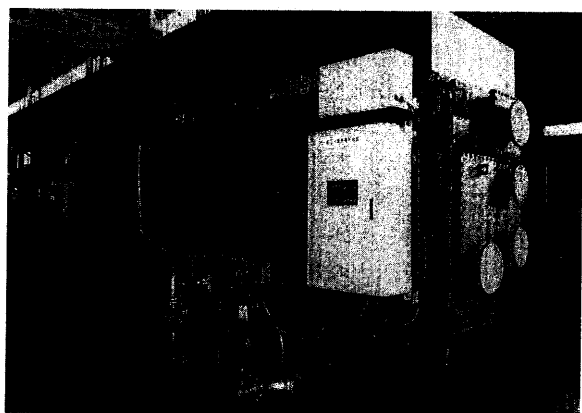


図1 当社最新シリーズ機 MGS/MDS シリーズ外観 MGS
 シリーズ機 MGS-31 B (310 RT) の外観を示す
 External view of latest model, MGS/MDS series

2. 吸収冷凍機の動特性シミュレータの開発

2.1 目的

吸収冷凍機の動特性の改善を図るため、系統構成並びに制御系の事前検討が可能となる動特性シミュレータを開発した。モデルは直だき二重効用型吸収冷凍機を対象とし、起動、停止、負荷変動時における各構成機器内の状態変数 (圧力、温度、濃度、液位) の過渡的な挙動が算出できる。以下にシミュレータの概要並びにモデルの妥当性を評価するための検証結果を示す。

2.2 解析モデル及び基礎式

解析モデルは、図2に示すように臭化リチウム水溶液を吸収器から高压再生器と低压再生器それぞれへ並列に送液する、パラレルフロー型の直だき二重効用型吸収冷凍機を対象とする。

吸収冷凍機は、冷却水流量、冷却水入口温度の変動、冷水流量、冷水入口温度の変動といった外乱に対し、制御量である冷水出口温度を設定値に維持するために高压再生器への燃料流量を操作する。モデルの解析精度を高めるためには、圧力、温度、濃度の分布を考慮した分布定数モデルを適用することが望ましい。しかし、制御系設計のためのモデルとしては、演算時間が短く見通しが良い次数の低いモデルの方が望ましく、本開発では各構成要素を液だめ部と気相部に2分化し、それぞれについて集中定数化したモデルを採用した。

図3に示す高压再生器を例に採ると、数式モデルは次式のようにになる。

エネルギー収支式

$$\begin{aligned} d(m_b h_b)/dt &= G_{in} h_{in} - G_{out} h_{out} - G_{bu} h_{bu} + Q \\ d(m_u h_u)/dt &= G_{bu} h_{bu} - G_s h_s \end{aligned} \quad (1)$$

質量収支式

$$\begin{aligned} dm_b/dt &= G_{in} - G_{out} - G_{bu} \\ dm_u/dt &= G_{bu} - G_s \end{aligned} \quad (2)$$

物質収支式

$$d(m_b x_b)/dt = G_{in} x_{in} - G_{out} x_{out} \quad (3)$$

*1 高砂研究所燃焼・伝熱研究室主査

*2 高砂研究所制御システム研究室

*3 機械技術部冷熱機器設計課

*4 機械技術部電気・機器設計課

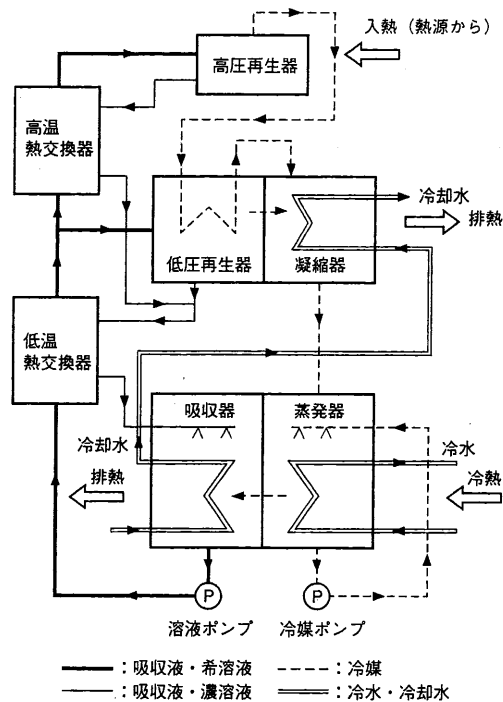


図2 パラレルフロー型二重効用吸収冷凍機のフロー
パラレルフロー型二重効用吸収冷凍機の構成及びフローを示す。
Parallel flow type of double-effect absorption chiller

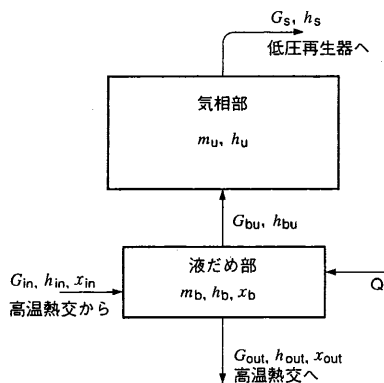


図3 高圧再生器のモデル化
Modeling of high temperature generator

液位の算出式

$$l = \frac{m_b}{A\gamma} = \frac{m_b}{A \cdot \frac{1}{v_{bsat} + y(v_{usat} - v_{bsat})}} \quad (4)$$

$$y = \frac{h_b - h_{bsat}}{h_{usat} - h_{bsat}} \quad (0 \leq y \leq 1)$$

ここで、

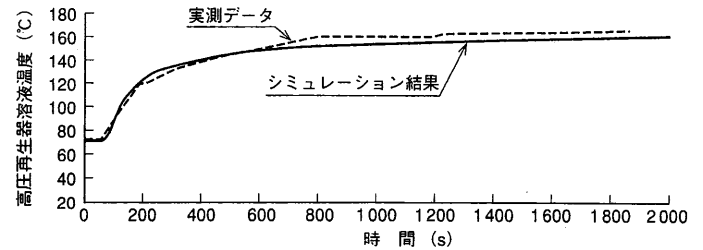
G : 重量流量 (kg/s) h : エンタルピー (kcal/kg)
 m : 保有重量 (kg) x : 濃度 (%)
 Q : 発熱量 (kcal/s) l : 液位 (m)
 A : 液面積 (m²) γ : 平均比重 (kg/m³)
 v : 比容積 (m³/kg) y : 乾き度 (-)

添字

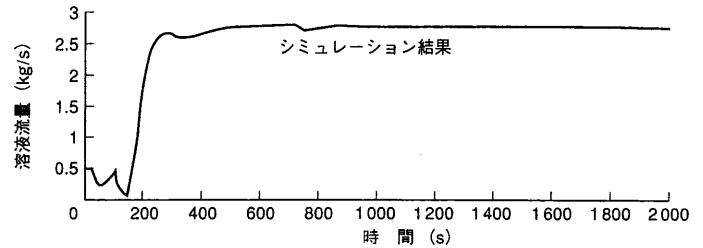
in: 高圧再生器への流入溶液

out: 高圧再生器からの流出溶液

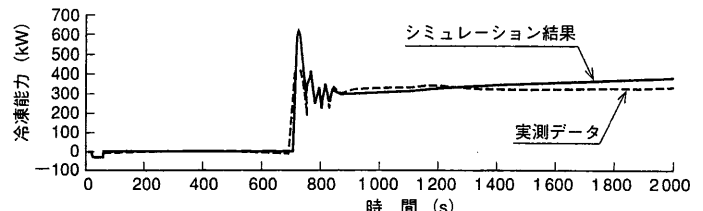
s: 高圧再生器での発生冷媒



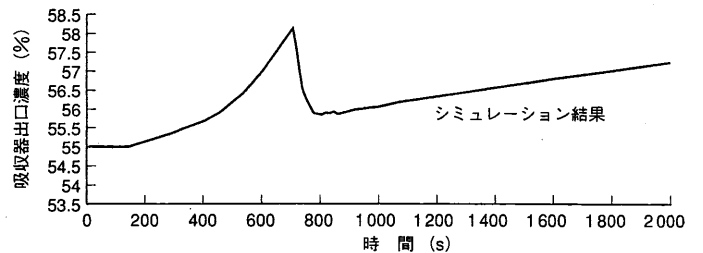
(a) 高圧再生器溶液温度変化



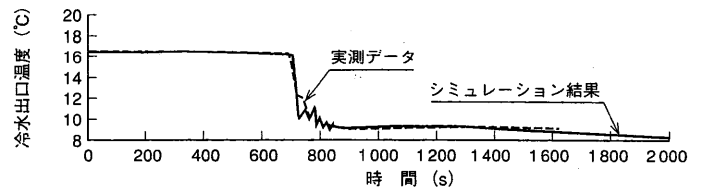
(b) 溶液流量変化



(c) 冷凍能力変化



(d) 溶液濃度変化



(e) 冷水出口温度変化

図4 起動特性 起動時の冷凍機内部の挙動を示す。起動時シミュレーション結果と実測データがほぼ一致し、シミュレーションプログラムが妥当であることを示す。

Start-up characteristics

bu: 液だめから気相へ蒸発する冷媒

u: 気相部

b: 液だめ部

sat: 飽和状態

2.3 試算及び検証結果

吸収冷凍機のシミュレーションモデルの妥当性を評価するため、試算を行い、実測データとの比較を行った。試算例として冷凍機内部の状態変化が最も大きい起動時を対象とした。

吸収冷凍機において起動は、所定の冷凍能力を発揮するために熱源を投入し、冷凍機各部の溶液温度、濃度上昇を行う動作である。

起動時における各部の状態変化を図4に示す。

(1) 高圧再生器溶液温度

図4(a)から、シミュレーション結果と実測データは良好な一致を示していることが分かる。起動とともに熱源からの入熱により、高圧再生器溶液温度は上昇して行くが、図4(b)に示す溶液循環量の上昇と冷媒の消費による冷凍機からの排熱の増加により、高圧再生器の温度上昇速度が遅くなりほぼ一定量にバランスする。

(2) 冷凍能力

冷凍能力の時間変化を図4(c)に示す。冷媒の循環は、高圧再生器温度を検出して開始するため、シミュレーション結果、実測データ共に起動後約700sの時点で冷媒の散布を開始し、冷凍能力が急激に上昇している。このとき図4(d), (e)に見られるように、溶液濃度及び冷水出口温度が急激に低下している。このため冷凍能力は一時的に低下した後、再度冷凍能力は徐々に上昇していく。

以上のように、エネルギー収支、物質収支を基にガスだき二重効用吸収冷凍機の動特性シミュレータを作成し、実測データとの比較を行い、その妥当性を確認した。本シミュレータは吸収冷凍機の運転特性を評価、改善するためのツールとして活用しており、次章にその適用例を紹介する。

3. 適用例

今回開発した吸収冷凍機の動特性シミュレータを用いて実機の制御特性を改善した事例を示す。

3.1 MGS/MDS シリーズの制御性改善

当社最新型シリーズ機 MGS/MDS シリーズの制御性の改善事例を以下に示す。なお、これらの新規制御ロジックを組み込んだ制御向上機は平成9年9月から商品化済みである。

3.1.1 マイコン盤の機能

MGS/MDS シリーズ冷凍機制御盤に採用しているマイコン基板はCPU(中央演算処理装置)にインテル製の16ビットマイコンを採用し、大容量のROMとRAMを搭載している。これらの高性能CPUと大容量メモリにより、種々の高性能な冷凍機制御ロジックの組み込みを可能としている。また、温度入力関係は白金測温抵抗体(JIS A 級)を採用するとともに、10ビットA/D変換器による高精度な温度検出を実現している。

制御プログラム開発環境でのマイコン制御盤の特徴は、従来すべてを手作業で行っていた制御ロジックの作成を、専用のロジック作成支援ツールを使用することにより大幅に簡略化した点である。この専用ツールは、パソコンを用いたグラフィカルな操作環境で冷凍機の制御ロジックをロジックダイアグラムに展開するだけで、自動的にアセンブリ言語に翻訳できるものである。このため、制御プログラム開発に要した期間が大幅に短縮され、多様化する市場ニーズに速やかに対応した冷凍機制御を実現することが可能となっている。

3.1.2 負荷追従性の改善

冷凍機に要求される機能として冷水の供給温度を一定に保つ必要がある。負荷の変動(冷水入口温度)の変動が生じたときの追従性が悪い場合、冷水の供給温度が上昇すると冷房効果が低下し、供給温度の低下時には最悪の場合、冷水凍結、伝熱管の破損を招く恐れがある。

吸収冷凍機の容量制御は冷水温度を検出し、設定値との偏差によって制御信号を送り、熱源流量を変更するというものである。以下に動特性シミュレータを用いて、PID制御定数の設定値の最適化を行った例を示す。

PID制御は測定値を目標値に一致させるため、測定値と設定値の偏差又は測定値の変化に応じ、比例動作(P動作)、積分動作(I動作)、微分動作(D動作)の三つの制御動作を同時に行うものである。同様にP制御は比例動作のみ、PI制御は比例動作と積分動作による制御方法である。

制御方式の違いによる負荷低下時のシミュレーション結果の比較を図5に示す。シミュレーションでは、冷水入口温度を1℃/10sの変化速度で約2.5℃低下(負荷にして100%から50%)する場合を想定している。

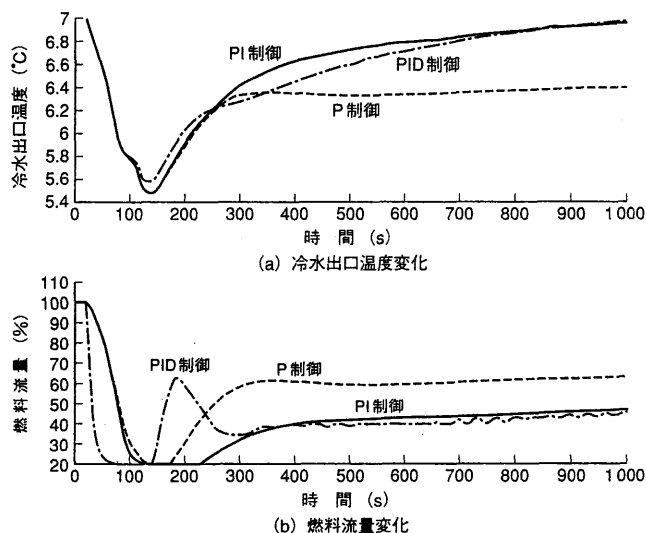


図5 負荷変化時の制御性 設定による制御性の変化を示す。PID制御の採用により冷水出口温度の変化に対する応答が速くなり、目標温度に達するまでの時間が短縮される。
Control characteristics of changing cooling load

計算結果により、P制御のみの場合、冷凍機の冷水出口温度[図5(a)参照]は負荷変動後の静定時においてオフセットが残留し、設定温度である7℃より低い温度で安定している。これに対し、PI、PID制御ではオフセットが解消し、設定温度である7℃に落ち着く傾向を示している。また、PI制御とPID制御を比較すると、安定するまでの所要時間はほぼ同等であるが、図5(a)のようにPID制御の方が負荷低下時(130s前後)の冷水出口温度低下が少なくなっている。これは微分動作の効果により、冷水入口温度低下時の燃料流量減少の動作が速まったためと考えられる。

以上のようなシミュレーション結果に基づき、実機制御方式の選定及び制御定数の選定を行い、検証試験を実施した。試験結果を図6に示す。実機においても、冷水入口温度の変化(負荷変動)に対して冷水出口温度がほぼ一定に保たれており、良好な制御性の実現できている。

3.1.3 保護機能の充実

吸収冷凍機の運転制御において、容量制御のほかに重要な制御機能として保護機能がある。

MGS/MDSシリーズでは、従来、溶液結晶防止のために高圧再生器温度と高圧再生器圧力を検知し、高圧再生器の加熱量の抑制制御を行っていたが、溶液の結晶防止の観点からは直接溶液濃度を制御していないことから効果が低かった。

このため、新たに前述の高機能マイコン盤の機能を生かし、内部に溶液濃度演算機能を持たせて運転中にリアルタイムで溶液濃度を監視し、異常な濃度を検出した場合は、即時に加熱量の抑制、冷凍機の停止を行う機能を付加した。

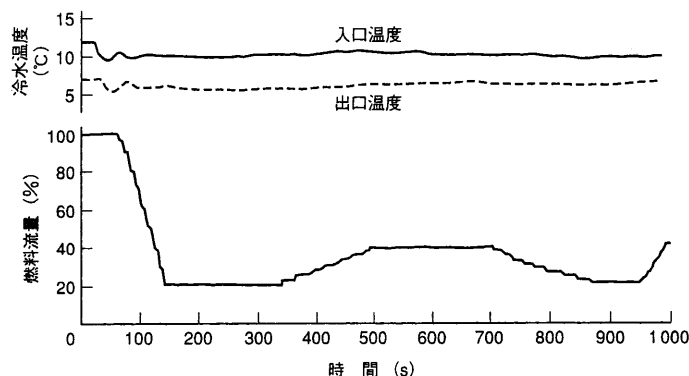
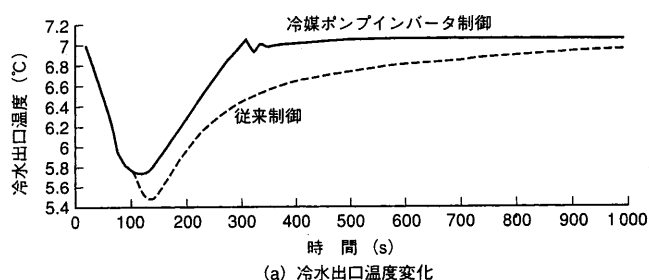
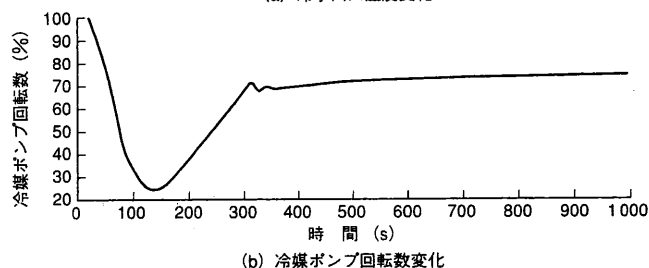


図6 実機の制御性 シミュレーションにより求めたPID制御の適正値を実機試験により検証した結果を示す。冷水出口温度変化に追従し、燃料が制御されている。

Control characteristics of machine



(a) 冷水出口温度変化



(b) 冷媒ポンプ回転数変化

図7 冷媒ポンプインバータ制御効果 冷媒ポンプのインバータ制御により、冷水出口温度の過冷却を抑制できることを示す。
Inverter control effect of refrigerant pump

この溶液濃度監視制御により、溶液の結晶防止対策が万全なものとなり、より安全に冷凍機の運転ができるようになった。

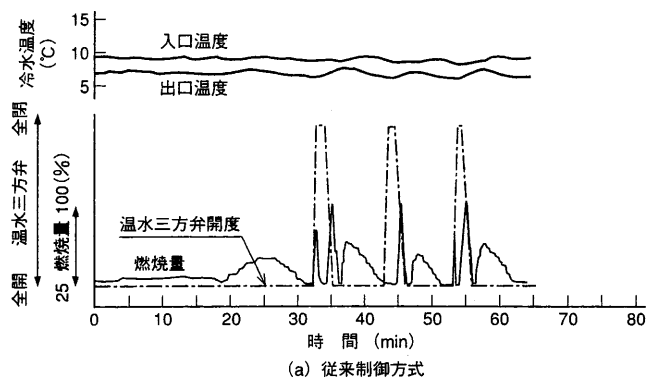
3.1.4 低負荷時制御性の改善

負荷の急激な低下の場合、冷水凍結、伝熱管破損といった重大事故につながる危険があることは前述した。この事象に対して、従来は冷水低温トリップ機能で回避しているが、運転上はトリップ事象なしで回避することが望ましい。このため、このような急激な負荷低下の対応案として考えられる冷媒ポンプのインバータ制御の効果について検討した。

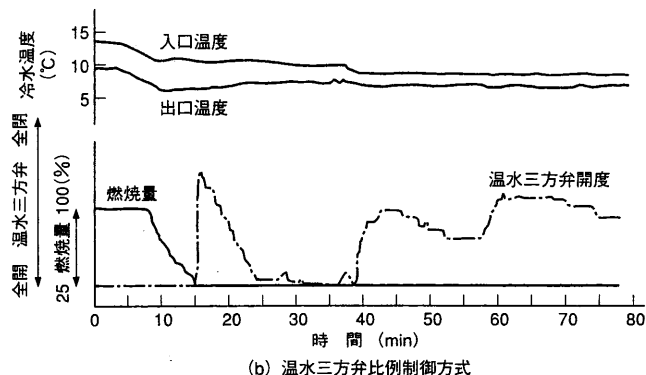
本制御は、蒸発器性能が冷媒散布量に依存することを基に、冷水出口温度低下時、冷媒循環用の冷媒ポンプ回転数を下げることによって冷媒散布量を減らし、蒸発器における熱交換を抑制し冷水温度の過冷却を防止するものである。

図7に、負荷が100%から50%に低下したときの動特性シミュレータによる計算結果を示す。

図7から冷水温度低下時に、冷媒ポンプ回転数を下げることにより、冷水出口温度の低下が抑制されることが分かる。このように冷媒ポンプによる冷媒散布量制御は、冷凍能力の応答が速く有効であり、運転特性の改善手法として実機採用を予定している。



(a) 従来制御方式



(b) 温水三方弁比例制御方式

図8 ジェネリンク低負荷時の制御性改善例 低負荷時の制御性改善例を示す。三方弁の比例制御により、冷水出口温度が安定的に制御されている。

Improvement example of control characteristics for GENELINK system

3.2 排熱投入型吸収冷凍機の低負荷特性改善

ガスエンジン等の排熱を補助熱源とし、燃料消費量が削減可能な吸収冷凍機（ジェネリンク）を東京ガス（株）と共同開発し、平成9年4月から販売を開始している。

本機は、当社の最新型シリーズ機 MGS シリーズに排温水熱交換器を付加したものであるが、低負荷時の絞り特性に特長を持たせている。従来例では、入熱源として燃料と排温水の2種あるため、最低負荷がバーナの最低燃焼量と排温水入熱の合計約40%負荷相当で制限され、これ以下の場合には燃焼をオン・オフさせることにより制御していたため、安定した運転が継続できないという欠点があった。本機では、高機能マイコン盤の特長を生かして、低負荷時の排温水流量を負荷に応じて比例制御することにより、標準機と同様に約25%の低負荷まで安定した運転が可能となった。

実測例を図8に示す。温水三方弁比例制御方式の採用により、低負荷時の冷水出口温度の変動がなくなり、安定した運転が可能となっている。

4. ま と め

吸収冷凍機の運転特性改善のために、動特性シミュレータの開発を行い、その検証例及び実機への適用例について紹介した。

吸収冷凍機は、複雑な熱システムであり、それだけに低質熱源との組合せ、システムの改良等その応用範囲はますます広がっていくものと期待される。このような吸収冷凍機システムで唯一の課題といえる制御性に関しても、今回紹介したような精妙な動特性シミュレータを用いて、内部挙動の詳細把握を行うことにより、ユーザフレンドリーな吸収冷凍機システムの構築を目指して今後も開発を進めていく予定である。