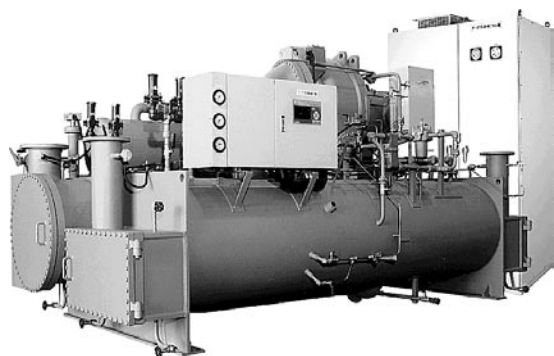


特 集 論 文

高機能ターボ冷凍機の最新技術
— 瞬時電圧低下や超低負荷領域への
対応力を UP —Latest Techniques of Centrifugal Chiller
Equipped High-Quality Multiple Functions上 田 憲 治^{*1}
Kenji Ueda和 島 一 喜^{*2}
Kazuki Wajima柳 田 真 孝^{*2}
Masataka Yanagida田 井 東 一 馬^{*1}
Kazuma Taito三 浦 貴 晶^{*3}
Takaaki Miura

最新のターボ冷凍機 AART, AART-I シリーズは高い成績係数 COP と良好な負荷依存特性, 冷却水依存特性が特徴である。その省エネルギー特性は機器基本性能だけでなく, 高い演算性能を有する専用マイコン制御盤により可能となっている。6つの可変要素を数値演算制御によりどのような条件であっても最適制御を実現するその高い制御性はこれまで実現できなかったユーザーニーズを実現し始めた。ほぼ0%の超低負荷領域を制御可能範囲とすることに成功し, 継続した超低負荷域での冷水温度調節や超低負荷域からの負荷の立ち上がりに対応することが可能である。また, 瞬時電圧低下を 1/2 サイクルで検知し, 運転信号を自立保持しながら自動復帰を可能とする。更に液晶パネルの高い視認性や拡張されたデータ通信機能を最大限生かし日常保守やメンテナンス, 設置後性能維持などユーザーサポートを実現している。

1. は じ め に

当社は 2000 年以降ターボ冷凍機の高性能化を前面にかかげ開発を進めてきた。従来, ターボ冷凍機の高性能化は仕様点の成績係数 (以下 COP) を向上することを追求してきたが, この 2~3 年は実際に使われる領域で消費エネルギーをいかに低減できるか, 期間効率をいかに向上できるかを課題としてきた。

ターボ冷凍機の用途に目を向けると, 日本国内では 60~70% が半導体工場などの産業用途向け, その他がビル空調などの民生業務用向けである。さらに分類をすると, 最も大規模な半導体製造工場や薄型ディスプレイ工場のクリーンルーム熱源システム, 地域冷暖房用熱源から中規模となる大型ショッピングセンター, 自動車塗装工場, 薬品関連, 大規模ビル空調, 化学プラント用プロセス冷却用途に至るまで多種多様にわたる。これらの多様なユーザーのニーズにこたえることのできる製品とすることが非常に重要である。

最近では CO₂ 排出量削減ニーズ, 省エネ, ランニングコスト低減, 広い安定運転特性など共通したニーズが強くなり, 製品として持つべき特性が明らかとなってきたと考えている。

本論文ではユーザーニーズを実現する技術として, 実際の運転状況に合わせたきめ細やかな制御, 高機能化について報告する。

2. ターボ冷凍機の基本制御

ターボ冷凍機の圧縮機では消費エネルギーの約 90% を冷媒ガスを圧縮する動力が占める。その他 10% を電動機の電磁気損失や機械損失, ガスを攪拌する風損などが占める。

ターボ冷凍機は仕様点で最適設計されているため, 仕様点で冷凍サイクルの損失は最小化されている。

しかし, 冷水温度条件や冷却水温度条件, 冷凍能力が仕様点から離れてくるに従い, 適切に制御されていなければ損失が拡大し性能は低下するため制御は非常に重要である。

(1) 最適制御

最新の AART シリーズ, AART-I シリーズは, 次に示す 6 つの制御可変要素により仕様点から離れた場合であっても最適化が可能である (図 1)。

- ① 1 段入口ベーン機構: 容量制御機能としての羽根車の直前に配される空力可変翼である。
- ② 2 段入口ベーン機構: 1 段入口ベーンを補完し, 制御性の向上が可能。
- ③ 可変回転数制御: 圧縮機の回転数を可変制御し圧力制御と風量制御が可能。電動機への周波数を制御することにより実現する (AART-I シリーズのみ)。
- ④ 高圧膨張弁: 冷凍サイクル上必要な冷媒を無駄なく循環させる。凝縮器から凝縮した冷媒液だけを

*1 冷熱事業本部大型冷凍機部設計課主席

*2 冷熱事業本部大型冷凍機部設計課

*3 技術本部名古屋屋砂研究所パワーエレクトロニクス・制御研究室

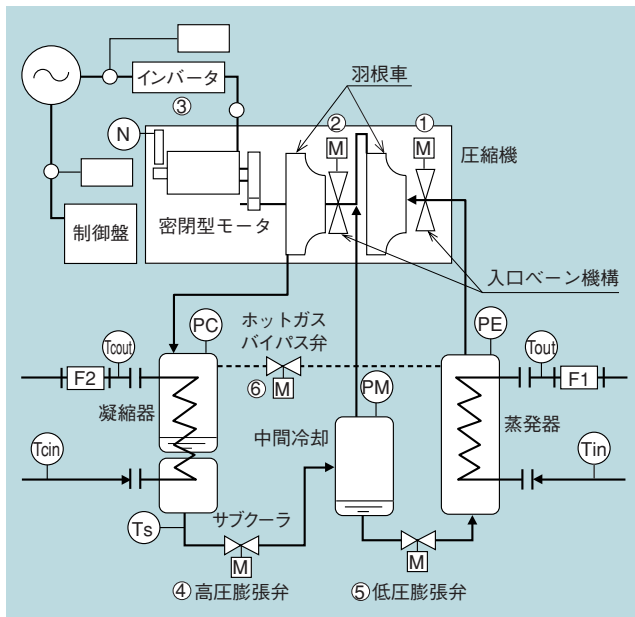


図1 ターボ冷凍機の系統図
冷媒系統、水系統、主要基幹要素、各制御要素を示している。

下流に流し、凝縮していない冷媒ガスを流さない。

⑤低圧膨張弁：中間冷却器で膨張した冷媒の液だけを下流の蒸発器へ流し、ガスは圧縮機へ流し蒸発器へ流さない。

⑥ホットガスバイパス弁；凝縮器と蒸発器を直接配管で接続し、その間のガス流れを最小化制御する。

これらすべての制御要素は専用高機能マイコン制御盤を用いて数値演算制御している。数値演算制御は、冷凍能力、各部圧力、消費エネルギー、冷凍機内部の冷媒循環重量流量、冷媒循環体積流量、各部位の冷媒熱物性、音速などを演算している。さらに各膨張弁の流量係数、圧縮機の圧力係数、流量係数などを要素の特性として有し運転状態と照合している。

冷凍サイクルの最適化は各制御要素を最適化することにより得られる結果であり、状態や仕様が異なってもこの最適化により常に設計目標に近い状態が得られる。

(2) 過渡制御

数値演算では一見現時点の最適な制御を実現することが重要であると考えられがちであるが、実際の演算では要求される運転点への遷移過程を対象とすることが多い。そこで、目標とするポイントと現在のポイントを数値演算で把握しておき、適切なインターバルで目標運転点へ機器状態と演算値を遷移させていく。この機能により適切に遷移する過程も数値演算制御内に入れることが可能となっている。

ターボ冷凍機にはいくつかのシリーズや対応容量

があるが、機器の構成情報を定数で数点入力することによりすべて同一レベルの最適化が実現可能となっている。

3. 超低負荷対応

最新の高度な数値演算制御は10%以下の非常に熱量の小さな“超低負荷”領域の制御を可能とした。

ターボ冷凍機の標準的な能力制御の範囲は100～20%である。20%未満の負荷では1台運転の場合ON-OFF制御となる。仕様によって10%を最小とする場合もある。しかし、実際の使用状況を詳細に見ていくと10%以下で0%付近の能力制御が以下のような場合、熱源システムの省エネに非常に有効である状況があることが確認された。

①新規工場建設や新規熱源システムの導入に合わせた初期試運転時

②あらかじめ負荷が立ち上がることがスケジュールで分かっている場合の待機運転

3.1 冷水温度のキャリブレーション

冷凍能力0%付近では、冷水の入口温度と出口温度は非常に近接した値となる。つまり0%近い負荷を計測するためには、冷水温度の計測精度に注意を払う必要がある。そこで直管部の長さを確保し十分攪拌された温度計測ポイントを設定し、計測のばらつきを事前に確認することにより計測精度を確保している(図2)。

冷凍機停止時冷媒充填状態での実測値を表1に示す。各4点のうち最も平均値に近い値を示すセンサを選択し、入口出口温度を同一となるようキャリブレーションした上で値を採用する。

3.2 初期試運転時の無負荷制御

設備の新設や増設は年度内に完成させる場合が多く、熱源機の導入や設置は年末年始に集中する。つま

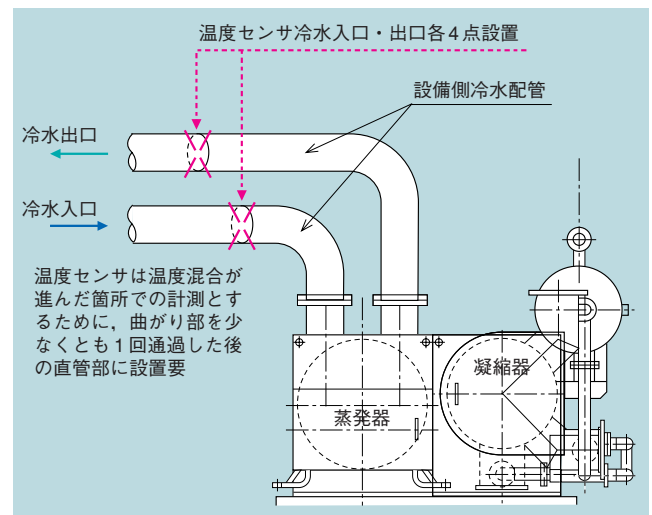


図2 冷水温度の計測手法

表1 冷水入口温度，出口温度のばらつき

項目	範囲	平均	1	2	3	4
冷水入口	0.11	14.783	14.85	14.77	14.74	14.77
冷水出口	0.03	14.775	14.76	14.76	14.79	14.79
冷却水入口	0.08	14.295	14.26	14.34	14.32	14.32
冷却水出口	0.15	14.348	14.24	14.39	14.39	14.37

り冬期であって熱負荷となる製造設備が設置される前である場合が多く，初期試運転時は冷熱負荷が全くない状態であることが少なくない．これまでは冷凍機を継続運転させるため仮設ボイラや既存蒸気を引き込むために仮設配管などを設置し，多くの費用をかけて熱源システムの試運転を行ってきた．

ほぼ0%の負荷が要求された実際の試運転時において，超低負荷運転による追従性能状況を図3に示す．

冷却水15℃前後で負荷はほぼ0%の状況が継続していることが確認できる．11時頃一度停止させ起動したことにより一時的に負荷が発生しているが，すぐに負荷は0%となっている．冷凍機は終始停止することなく冷水温調を継続している．この超低負荷対応機能により試運転で仮設蒸気が不要となった．

3.3 待機運転時の無負荷制御

前節と同様無負荷運転が要求されるが，超低負荷対応機能が解除されると同時に負荷が立ち上がることに大きな違いがある．解除により超低負荷運転から通常運転への制御が遷移することを意味する．

図4に冷却水温度18℃付近条件における追従状況を示す．負荷3～4%の超低負荷状態から60%を超える負荷の立ち上がりに対応している．冷水の振れも小さく温調出来ていることが確認される．

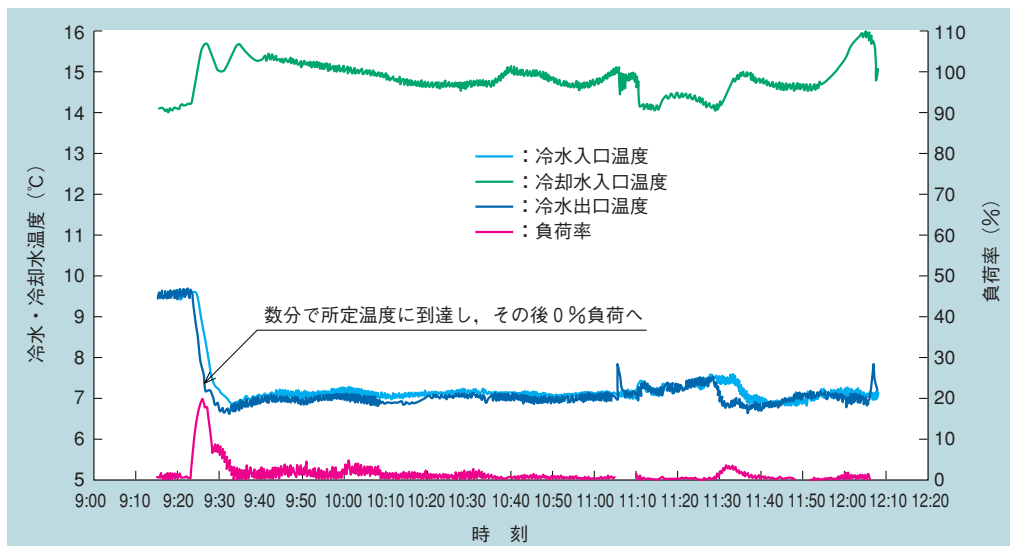


図3 0% 負荷運転状況トレンドグラフ

負荷が0%付近となって冷水温調が継続されていることが分かる．

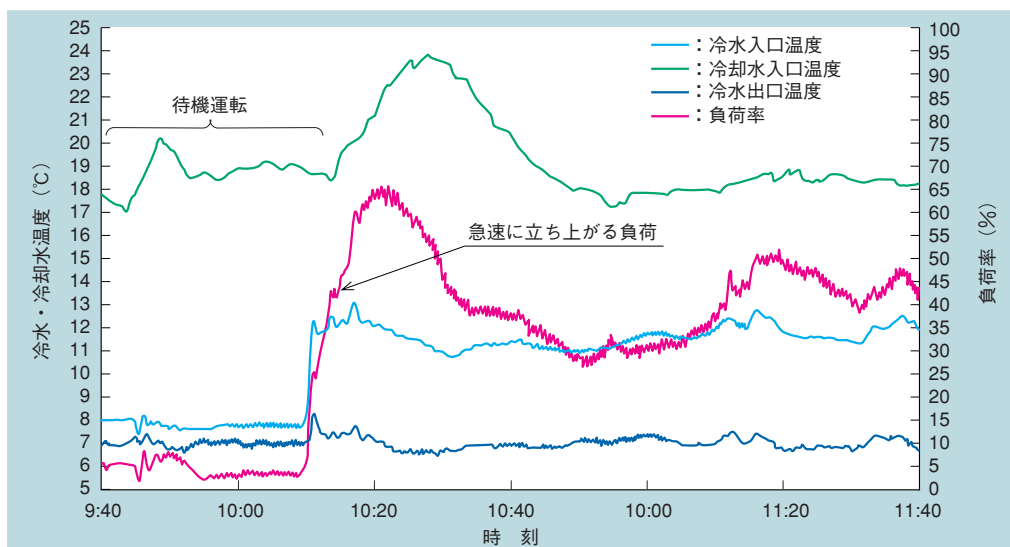


図4 待機運転からの立ち上がり特性

超低負荷領域から通常負荷領域への追従状況が分かる．

4. 停電・瞬時電圧低下からの自動復帰

半導体や電子デバイス製造工場やそのクリーンルーム熱源、化学プラント用途として使用されている場合、熱源機である冷凍機の停止は、製造製品の品質に非常に大きく影響する。そこで瞬時電圧低下や停電があった場合でも、可能な限り短い時間で冷凍機は復帰することが求められる。

ターボ冷凍機を駆動する電動機が電源異常で停止する停電事象については、電圧が0Vとなる停電と電圧が低下する電圧低下がある。停電と電圧低下の原因は、送電系統への落雷などの自然現象によることが多い。近年、送電系統網が整備され、高速遮断器にて故障が発生した送電系統を切り離すことが可能となったことから、遮断・切替に要する時間が短くなっている。瞬時電圧低下時間は、送電電圧で異なるが、0.07～2秒程度である。60 kV 系統では、0.1～2秒程度、6 kV 系統では、0.3～2秒程度となる。

ここで重要となるのは、冷凍機が故障となる前に、停電、瞬時電圧低下を検知することであり、自動復帰へ運転状態を遷移できれば、故障停止することなく復帰するため冷凍能力がゼロとなる時間を最小化できる。

停電及び瞬時電圧低下に伴いターボ冷凍機が検知してしまう異常と自動復帰させるための回避手段を表2に示す。主に表中の①～③の回避手段を組み合わせで自動復帰する条件を確保する。

詳細は後述するが従来のマイコン制御盤では高速動作リレーを用いて、45 ms 以下、電圧 80 % 以下検出が検出上限であったものを最新マイコン制御盤では基板上で処理することにより 10 ms 以内、70 % 以下で検出可能としている。

送電系統が原因となる瞬時電圧低下では、送電電圧である 60 kV 系統の 0.1 秒以内で検知ができれば、多くのユーザーニーズに対応が可能となり、十分安全に冷凍機を一時停止させ、自動起動を行うことができる。

表2 停電、瞬時電圧低下からの復帰手段

影響内容	回避手段
制御リレー無励磁による故障停止	① 制御リレーの電源をUPSとする。 ② 故障検知前に停電を検知し、冷凍機停止、再起動 ③ 故障信号の遅延検知対応
油ポンプの停止による故障停止	
補機設備の停止による故障停止	
電動機の瞬時再起動による突入電流により客先設備の遮断器への影響	
電動機の瞬時再起動による過トルクにより圧縮機損傷の可能性	

UPS : Uninterruptable Power System 無停電電源装置

5. 高機能専用マイコン制御盤

当社はターボ冷凍機に専用マイコン制御盤を用いてから十数年以上経過したが、最新の機能拡張は前述したように非常に高度な演算機能やセンシング機能を必要とする。本節ではマイコン制御盤の具備すべき機能、性能について示す。さらに機器の性能維持のための保守などに必要な通信についても示す。

(1) CPU の高速化及び処理の分散化

冷凍機の性能向上とともに、センシングポイントの増加や、回転数制御に代表される数値演算の複雑化など、取扱うデータ量は著しく増加しており、CPU の演算能力向上が必須となっている。2008 年に供給を開始する最新基板では動作クロックが従来比 2 倍の CPU を搭載した。

また負荷の大きい液晶表示処理を専用 CPU で処理する 2-CPU 構成とし、基本制御演算部への負担を軽減するとともに、高速な描画処理を可能としている。

(2) 複数機種への対応

最新の基板は主要構成でターボ冷凍機 AART シリーズ、AART-I シリーズに対応し、最小構成でマイクロターボシリーズに対応している。基板を共通化することにより冷凍機のシリーズによって接続する枚数や種類を選択することが可能となり、拡張性は飛躍的に向上した。特殊な構成の冷凍機であっても信頼性の高い標準基板の組み合わせにより柔軟に対応可能となっている。

さらに、基板間は高速通信を採用し、拡張性を担保するとともに、インバータを使用する場合の高周波・高調波などのノイズ耐力に配慮した設計としている(図5)。

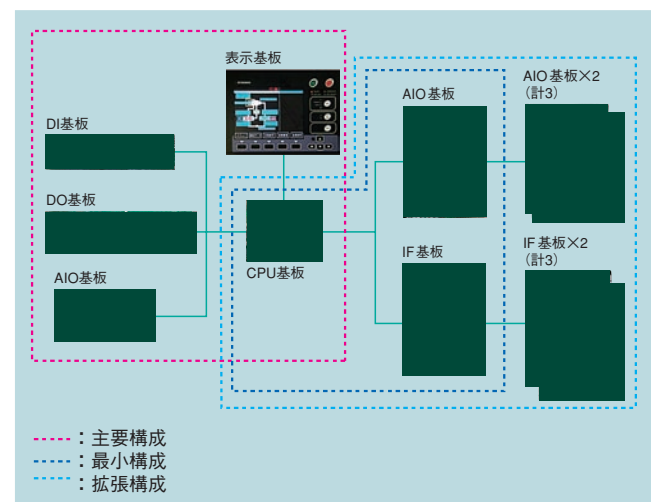


図5 マイコン制御基板構成

(3) ユーザーインターフェースの向上

表示インターフェースはデジタル表示方式の10.4インチ液晶を採用し、省電力モードによるバックライトの自動消灯に加え人感センサによる自動点灯機能を採用している。操作面に触れることなくより多くの状態量が確認出来るということは、ユーザの操作負担軽減や誤操作の可能性回避によるストレス軽減につながる。

また大きく表示される文字などが相まって機器状態の把握が容易になり迅速な判断が可能であり、人の操作・判断の不確実さの周辺にある安全性を向上させた(図6)。

(4) お客様サポート機能

設置後の冷凍機の状態を知ることは、不具合状態の予見や予防保全に非常に重要である。しかし機械室にLANや電話回線が準備できない場合も多く、運転データの記録や故障時のログの入手は課題であった。そこで冷凍機のデータ授受手段として、汎用メモ리카ードスロットを搭載し、容易に大容量のデータ取出しを可能にしている。これまで遠隔監視が接続されていない場合、パソコンを準備し専用ツールを用いて計測する必要があったが、試運転のデータ収集はカード1枚で容易になっている。

故障発生時の記録データの履歴は、最新のものから16件を記録することが可能である。故障1件に対して、発生時刻の情報と、アナログ256項目、デジタル512項目のデータを発生前50サンプリング、発生後20サンプリング保存しており、故障発生時の詳細機器状態を解析することが可能である。また、データのロギング周期(サンプリング周期)は1秒単位で変更可能であり、故障の内容に適した周期で収集することができる。

故障には至らないアラーム(軽故障)や冷凍機の運転停止の動作も、最新のものから各100件ずつ履歴を残すことが可能になり、過去の冷凍機の運転情報を収集し、異常発生の兆候や、メンテナンス時期を判断とすることができる。

(5) 電圧低下の検出強化

前述したように短時間の停電や電圧低下の検知は、熱源システムの安定運転や復帰運転に非常に重要である。

当社最新基板ではAC電圧を直接監視可能な検出手段を備えることによって、電源周波数の半サイクル以下の瞬時停電が検知可能で非常に高い検出精度を有している。



図6 表示基板
表示インターフェース。

(6) 環境への対応

最新の制御基板は、年々強化される環境規制対策としてRoHS指令に対応し、使用する半田や構成部品も全て鉛フリータイプを採用している。

6. ま と め

ターボ冷凍機の高性能特性には、機械本来の基本性能が重要であることはもちろんであるが、さまざまな状況で高性能特性を発揮するためには高度で精緻な制御が不可欠である。

そのため専用マイコン制御盤により高度な演算制御を可能とし、瞬時電圧低下からの自動復帰や超低負荷運転など新たなユーザーニーズに対応を可能とした。

今後ますます多様化、高度化するユーザーニーズへ対応できるように、更に調査・開発を進めていきたい。



上田憲治



和島一喜



柳田真孝



田井東一馬



三浦貴晶