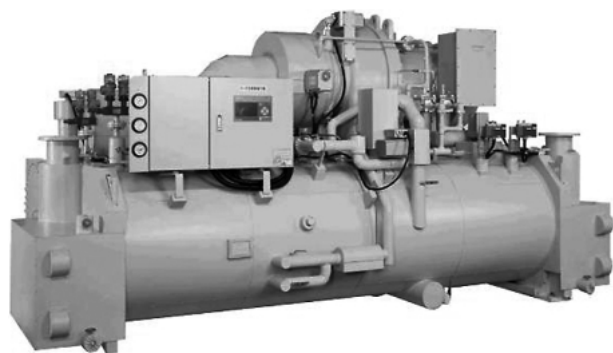


世界最高効率インバーターボ冷凍機 NART-Iシリーズ

Highest-Efficiency in the World, Variable
Speed Drive Turbo Chiller NART-I Series



関 亘^{*1} 上 田 憲 治^{*2} 田 井 東 一 馬^{*2}
Wataru Seki Kenji Ueda Kazuma Taito
白 方 芳 典^{*2} 古 賀 淳^{*3}
Yoshinori Shirakata Jun Koga

オゾン層に影響のない冷媒HFC134aを使用する高効率ターボ冷凍機をベースに、駆動源にインバータを導入し、空力性能の改良及び新設計の可変速対応の最適制御を組み込むことによって更に大幅な省エネルギー化を達成したNART-Iシリーズを開発、発売した。高性能空力特性、低機械損失、高効率熱交換器によってCOP 6.1を達成した高効率ターボ冷凍機NARTシリーズに、インバータによる可変速制御を適用し、圧縮機の空力特性に沿った最適な増減速及び負荷制御を、高度の演算制御を組み込むことで実現した。この結果、NARTシリーズに対して、部分負荷時及び冷却水温度低下時において大幅な性能向上が得られ、最高COP 17.8(冷水出口温度7℃)の世界最高レベルの効率を達成した。本機の年間の省エネルギー効果を一般工場負荷パターンで試算すると、固定速機対比45%もの大幅な消費電力低減を図ることができた。

1. は じ め に

ターボ冷凍機はビル空調、蓄熱用途、熱供給事業としての地域冷暖房、工場空調、化学プラント等のプロセス冷却など、広範にわたる用途に適用されている冷熱源機である。近年、オゾン層破壊問題により冷媒として使用されてきたCFCの全廃、HCFCの将来全廃の動きに合わせてHFC134aを用いたターボ冷凍機の高効率化は必須となった。この動きに合わせて当社ターボ冷凍機は1998年よりオゾン層破壊係数(ODP)がゼロのHFC134a冷媒に特化し、地球環境の保護に注力するとともに社会的ニーズである省エネルギーのために、機器性能の向上を目指してきた。

HFC134aターボ冷凍機は図1に示すように1994年に発売開始以降、1998年ARSシリーズ、2000年にはCOP 6.1(冷水出口温度7℃時)と世界最高レベルの効率であるNARTシリーズと開発を重ね、当社従来機対比20%以上の効率向上を達成した。2003年にはCOP 6.4のAARTシリーズを開発・製品化し、世界最高効率のターボ冷凍機シリーズを完成させた。今回報告のNART-Iシリーズは、年間を通しての高効率運転及び電力消費量の低減、すなわち通年での空調コストの削減というお客様のニーズにこたえるため、運転効率向上を目指して2002年に開発し、2003年1月市場投入した。

2. 高効率化技術の内容

一般的に冷凍機は外気温度低→冷却水温度低下→凝縮温度・圧力低下→圧縮機の圧縮比減少→動力低減となる関係から冷却水温度が低いほど消費動力が小さくなる。ターボ冷凍機は遠心式圧縮機を適用しているため、容積式圧縮機(レシプロ式・スクリー式など)とは異なり、圧縮機の回転数により圧縮比及び動力が決まる。よって負荷変動に合わせた最適な回転数制御により通年での大幅な省エネルギーが可能となる。NART-Iシリーズでは高速演算を可能とした高機能マイコン盤を新設計し、電動機電源にインバータを採用、回転数制御を実装することでその課題の解決を図った。以下にその要素別の内容を示す。

2.1 空力性能の向上

NARTシリーズでは三次元CFDの援用及び空力検証試験結果のデータベースを基に、動翼となるインペラの翼形状設計、静止流路側形状の最適化を図った。そこには最先端の5軸NC加工機によるインペラの三次元高精度削り出し加工が可能になったことも貢献している。固定速圧縮機の場合、回転数はデザイン点の115~85%が適用範囲であるが可変速圧縮機の場合の回転数は115~50%と大幅にオフデザイン領域が広がる。NARTシリーズでは開発段階においてCFDの援用によりデザイン点での高効率化を図るととも

*1 冷熱事業本部大型冷凍機部設計課長

*2 冷熱事業本部大型冷凍機部設計課

*3 技術本部高砂研究所ターボ機械研究推進室

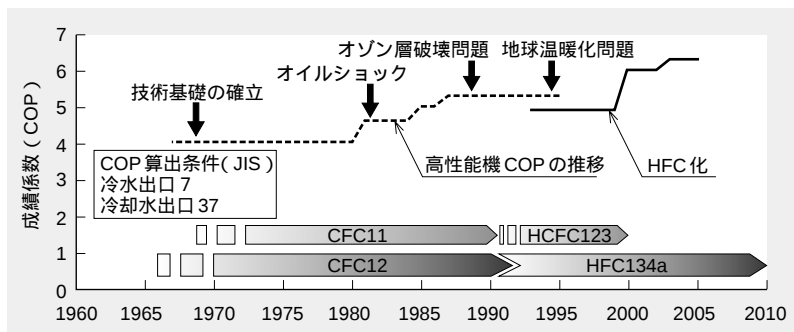


図1 ターボ冷凍性能の変遷 冷媒の変遷とターボ冷凍機の性能向上を示す。

に、固定速圧縮機の領域よりも広い回転数範囲でも性能が良いインペラを開発した。よってNART- シリーズでは広い回転数範囲において高性能を実現した。図2はCFDを用いて図中に示すインデューサと呼ばれる案内羽根の有無による性能検討を実施した結果である。インデューサ付きインペラでは可変速に適用した場合、流量低、回転数低の運転条件において、前縁からガス流れが剥離し、逆流域ができてしまう。対してインデューサなしでは前縁より下流側でわずかに逆流している程度である。このため、小流量側での効率は図2下部に示すようにインデューサなしが良い結果となったことからインデューサなしを採用した。また、デザインポイントから低速度域となるほど、サージ限界が低風量側に拡大することが知られているが、本適用では50～70%において最小風量領域まで安定領域が拡大し高効率運転領域の大幅な拡大が可能となった。以上の検討により、低マッハ数領域でも80%以上の圧縮機効率を安定して維持することができた。一方、可変速運転においては回転数範囲が増えるため軸共振設計、翼共振設計ともに十分配慮する必要があるが、解析と固有振動数の実測により、広範囲の回転数域において十分共振回避されていることを確認した。

2.2 可変速対応の最適制御

遠心式圧縮機で採用されている負荷制御は入口ベーン制御及びホットガスバイパス弁制御があるが、入口ベーン制御は開度の小さな領域で圧縮機入口での抵抗損失が増加するため、高開度での運転がロス低減につながる。また低負荷域で使用するホットガスバイパス弁制御は開方向でサイクル上のロスを生じるため、できるだけ最小開度となるような制御が必要となる。そこで工場検証試験で得られた運転データをベースに図3に示す制御MAPとし、さらに圧縮機の小風量側で発生するサージング限界条件を演算し最適回転数での運転制御を行うことで、全運転領域にわたりホットガスバイパスと入口ベーン制御による性能低下を最小限とし、広負荷範囲で高効率の運転を可能とした。

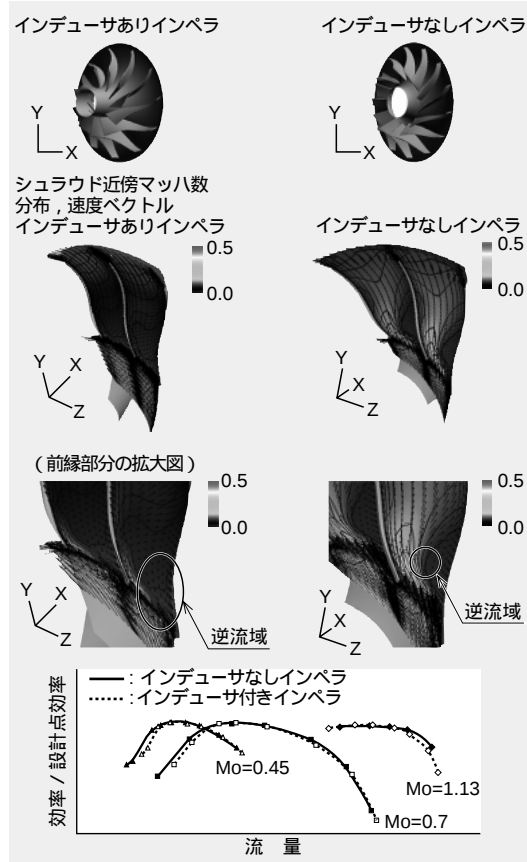


図2 流動解析 (CFD) による羽根車流れの検討例 インデューサの影響について検討した例である。図の速度ベクトル分布は効率特性図の低流量 Mo (機械マッハ数) = 0.45 の状態を示す。

2.3 マイコン制御盤と高機能通信技術

最適制御を実現するための特性式は非常に複雑で検知点数も多くなり、冷凍機の温調制御に遅れることなく演算を行うには高速演算能力が必要となる。そこで次世代制御盤の心臓部に高性能CPUを採用した。さらに視認性・操作性を向上させるため7 inch TFT液晶表示装置を標準装備とした。また、最適運転管理とサービス対応のスピードアップを目的に24時間監視機能が装備できるようになっており、

- 日常の運転データ監視
- 異常時のデータ保管とサービスマンへの自動通報
- リアルタイムデータの採取

が追設可能となっている。さらに標準的な通信機能を生かし、お客様の熱源機管理を容易にするため、各機器ごとに表1に示すデータを出力可能である。この機能は冷凍機最大6台をRS485のケーブルでつなぎ、当社のスマートコミュニケーションツールSCT(追設)に接続することにより実現可能である。

2.4 高圧インバータ盤

ターボ冷凍機用モータの入力電圧は800VUS_rtクラスを超える大容量機では高圧3 kV級、6 kV級とな

ることからこのクラスでのインバータ化が課題であったが、NART- シリーズにおいて業界として初めて 3 kV 級、6 kV 級の高压インバータ（図 4）採用による全容量インバータ駆動を実現した。

3. 性能検証結果

インバータ機の冷却水温度追従制御と部分負荷追従制御を検証するために当社工場試験設備に改良を加え、夏期であっても 11 の冷却水を製造可能な検証設備を準備し、検証試験を実施した。設備ループの系統図を図 5 に示す。

NART の標準機と、インバータ機（NART- シリーズ）の部分負荷性能を冷却水温度別に図 6 上部に示す。

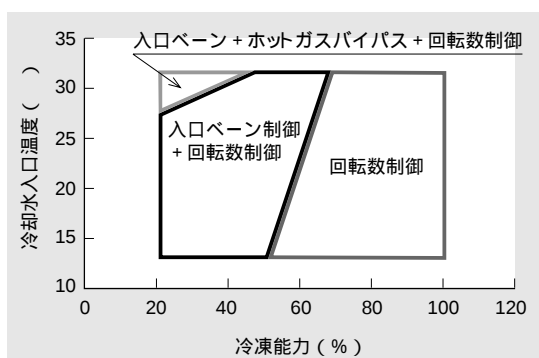


図3 制御領域マップ 冷凍能力と冷却水入口温度の各領域における最適制御方法を示す。

表1 冷凍機からの通信データ

データ種	点数、項目など
アナログデータ	32点
	温度、圧力など
デジタルデータ	128点
	状態表示、故障表示など
積算データ	48点
	運転時間、起動回数など



図4 高压インバータ盤外観
外形寸法は2.4 m L × 2.6 m W × 2.7 m H である。

図 6 の性能は表 2 の仕様の NART-40 I を用いて計測された性能実測値であり、性能計測時の制御は前節で示した自動制御によるものである。

図 6 に示すように、従来固定速標準機による入口ベーン制御では十分に制御できなかった 20 以下の冷却水温度領域において飛躍的に性能向上を実現し、安定した制御が可能となり、冷却水入口温度は 13 程度まで下げることが可能となった。国内の一般的な冷凍機の運転条件である冷水出口温度 7 仕様で最高 COP は 17.8 に達し、さらに冷水 9 仕様では COP20 を上回る結果を得た。

4. 通年運転での省エネルギー効果

通年でのインバータ駆動による可変速運転時の省エネルギー効果を算定した結果を図 6 下部に示す。算定条件としては図中に示す一般空調負荷パターンと東京地区の外気温度条件を使用した。通年の消費電力及び CO₂ 排出量換算では高効率標準機（固定速）対比 40 % の低減となり、これは電気料金に換算すると 22 % の低減に相当する。工場負荷パターンにおいては消費電力及び CO₂ 排出量換算で 45 % の低減、電力料金換算で 35 % の低減になる。インバータ追加によるイニシャルコストのアップ分は工場プロセス用などの年間運転機で約 1 年、夏期のみ的一般空調用でも約 3 年以内で投資回収可能でメンテナンスの点ではオーバホール間隔が 5 万時間以上に延びており、さらに回転制御により運転時の回転系への負荷を低減させることが可能となった。さらに新型マイコン制御盤の通信機能を駆使した運転管理により、より長いオーバーホー

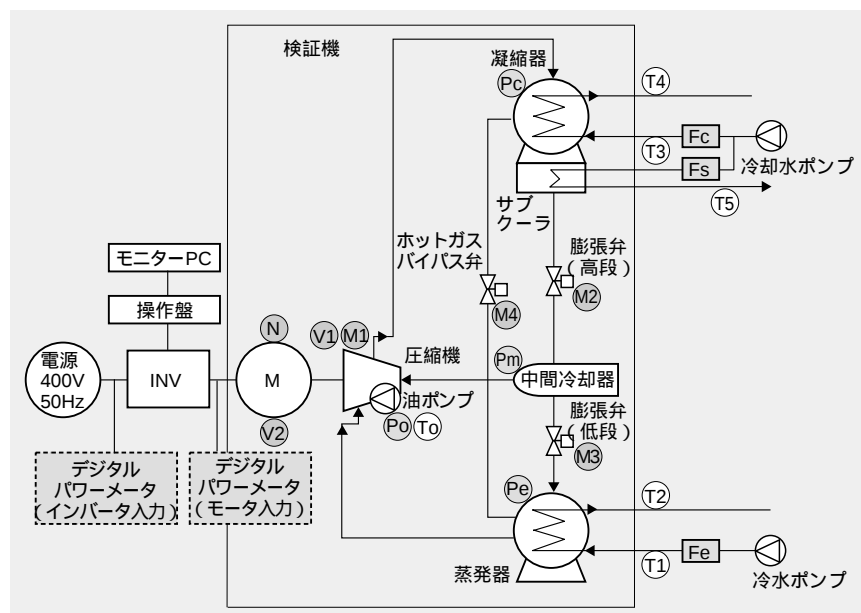


図5 工場検証設備系統図 別の熱源機と接続することにより夏期においても冷却水入口温度のきめ細かいコントロールを可能とした。

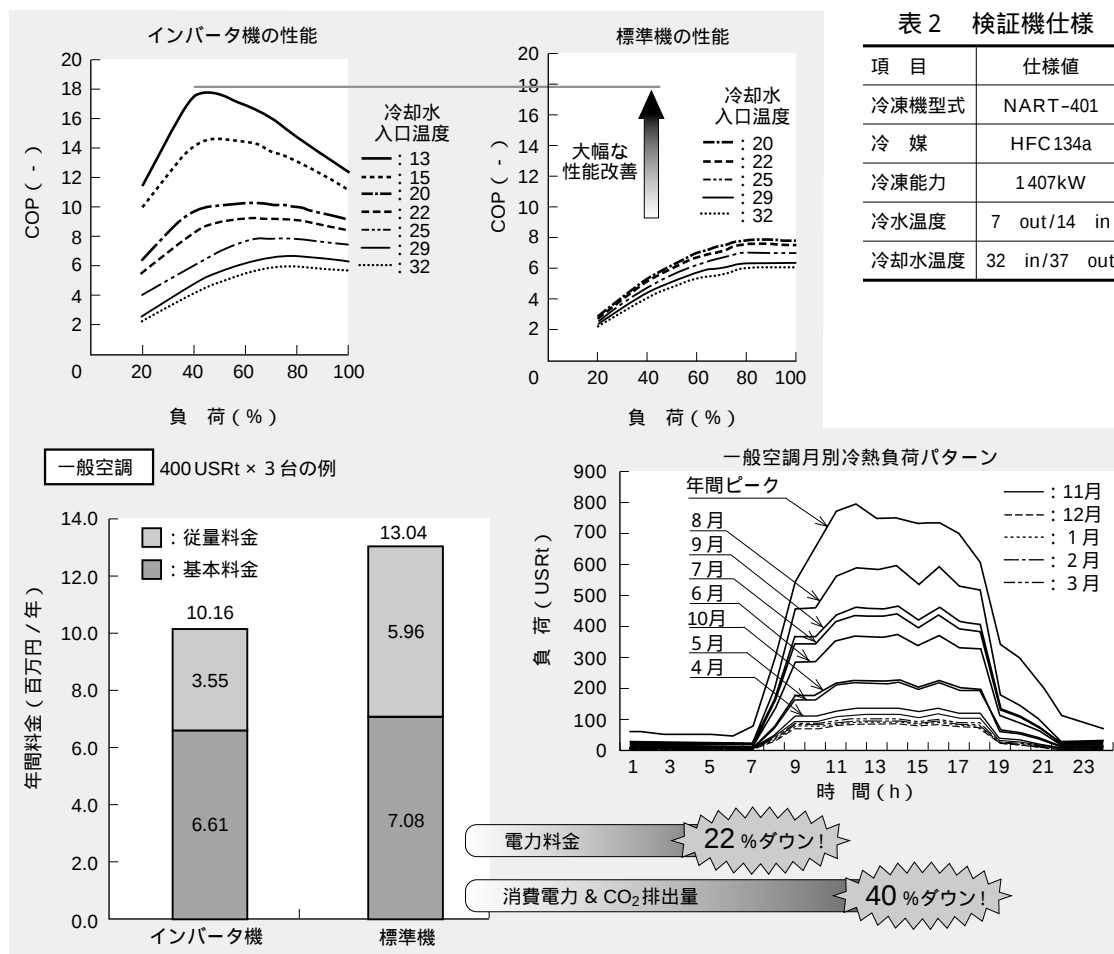


図6 可変速と固定速との性能比較及び一般空調負荷での年間省エネルギー効果 可変速機は部分負荷において大幅な性能改善を達成し、年間運転でその効果が絶大である。

表3 NRAT- シリーズ標準ラインナップ

NART- (冷凍能力)	40I (400RT)	50I (570RT)	70I (800RT)	100I (1130RT)	145I (1610RT)	200I (2000RT)
400V						
3kV級						
6kV級						

ル間隔の提供が可能となった。

NART- シリーズの電圧別のラインナップを表3に示す。NART- シリーズは2003年1月の発売以降、電力会社、工場熱源ユーザを中心に好評を頂いており、国内ではすでに十数台が稼働、さらに海外顧客向けにも出荷し始めた。

5. ま と め

冷媒 HFC134a を使用した世界最高レベルの性能である部分負荷時 COP 17.8 (冷水温度 12 / 7 ベース) のターボ冷凍機の商品化を実現した。本シリーズ機は最適な回転数制御、負荷追従性能、冷却水追従性能により大幅な年間での高効率運転が可能であり、通

年で従来標準機対比 45 % の消費電力低減 (工場負荷条件による) を達成した。また、制御盤の改良による大幅な機能拡充を図ったことにより良好な操作性と通信機能を持っている。動力源としては冷凍機として業界初、高圧インバータ盤による全ラインナップインバータ駆動を実現した。本シリーズ機は平成 15 年度第 14 回省エネ大賞経済産業大臣賞を受賞し、その高い技術力と高性能に対しご好評をいただいている。



関亘



上田憲治



田井東一馬



白方芳典



古賀淳