

高効率ターボ冷凍機 (NARTシリーズ)

High-Efficient Turbo Chiller

冷熱事業本部 関 亘*¹ 上田 憲治*²
技術本部 枅 谷 穂*³ 入谷 陽一郎*⁴

ターボ冷凍機は地域冷暖房、蓄熱用途、工場プロセス冷却用途など特に大規模空調設備において広範にわたり熱源機として採用されている。HFC134a 高効率ターボ冷凍機 NART シリーズは従来機種より 20 % 以上の高性能化を図り、HFC134a を使用するターボ冷凍機として世界最高効率を達成した。本報では高効率化の手段として本機に採用した冷凍サイクル、圧縮機空力性能の向上、熱交換器性能の向上及び制御システムについて報告する。

Turbo chillers are widely used for district heating and cooling, heat storage (regeneration) and plant process cooling, in large-capacity air conditioning facilities. The NART series of HFC134a high efficiency turbo chiller targets the world's highest efficiency with performance 20% or more higher than that of conventional units. Development was extended to aerodynamic performance improvement of the key compressor component, heat exchanger performance, system design, and control to upgrade performance.

1. はじめに

本ターボ冷凍機に使用している冷媒 HFC 134 a は、オゾン層の破壊問題より CFC 12, HCFC 22, HCFC 123 の代替冷媒として 1994 年頃から各種冷凍機器で使用されてきた。現在ではカーエアコンへの採用の結果、HFC では最も多く使用される冷媒となっている。また近年の地球温暖化問題から電力消費の大きい熱源機器の高効率化は、とくに 20 年以上の製品ライフサイクルを持つ工場プロセス冷却用途等において最も重要で優先される課題となっている。さらに 2001 年に入りフロン類の排出を抑制するために、回収・破壊が法律により明確にされた。結果として、冷凍機には、安定供給が保証された冷媒を使用し、信頼性が高くかつ年間を通して省エネルギー性の高い性能が要求されるようになった。そこで開

発機は世界最高レベルの効率 COP 6.1 を目標とした。

2. 最適な冷凍サイクル

冷凍サイクルでは多段圧縮多段膨張であればあるほど理想のサイクルに近づくが、HFC 134 a の特性、翼の最適設計、機器のコンパクト化、低コスト化の観点から 2 段圧縮を採用した。図 1 に示す代表 4 種の冷凍サイクルについて成績係数を比較し、2 段圧縮時に 1 段循環流量を小さくできる 2 段膨張と、2 段循環流量を最小限に抑えることのできるサブクールを採用した。2 段圧縮 2 段膨張サブクールサイクルは単段サイクルより約 10 % 理論上優位である。

3. 圧縮機空力性能の向上

2 段圧縮を採用した場合、羽根車の流入マッハ数は亜音速

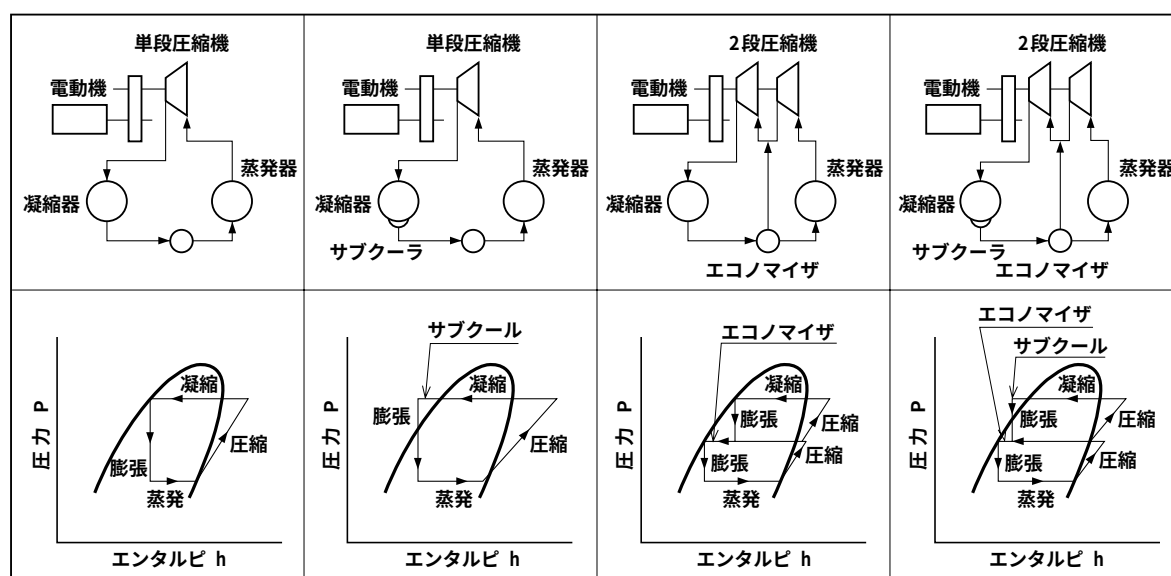


図1 冷凍サイクル比較 代表的な4サイクル系統図モデルとモリエ線図上でのサイクルを示す。
Comparison of heat cycle

*¹ 大型冷凍機部設計課長

*³ 高砂研究所ターボ機械研究推進室主席

*² 大型冷凍機部設計課

*⁴ 高砂研究所燃焼・伝熱研究室主席

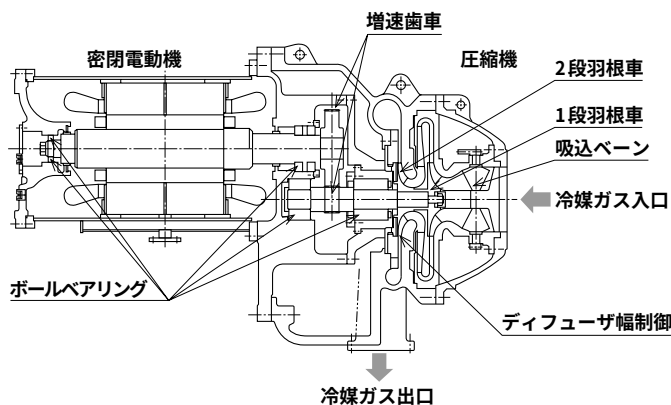


図2 圧縮機断面 圧縮機の断面と主要構成部品を示す。
Cross section drawing of compressor

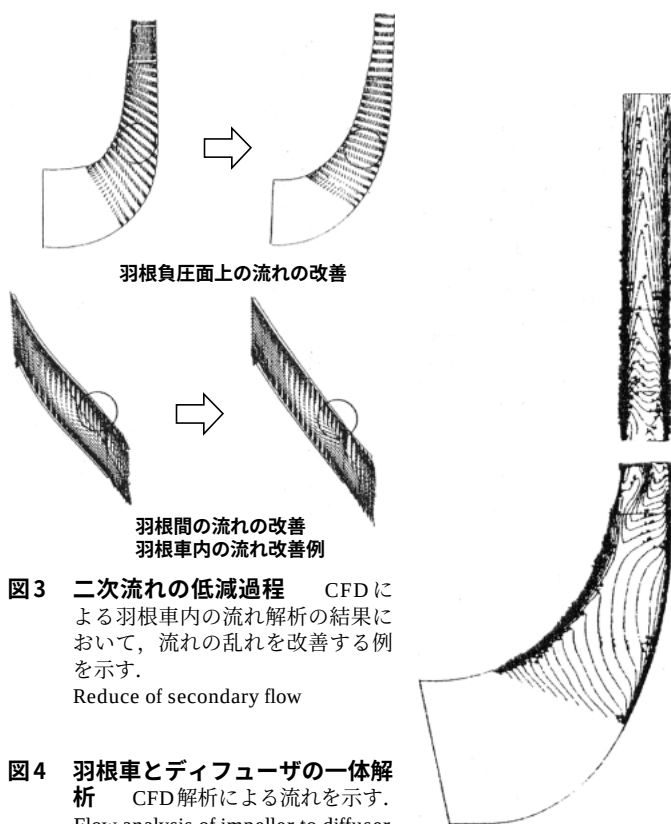


図3 二次流れの低減過程 CFDによる羽根車内の流れ解析の結果において、流れの乱れを改善する例を示す。
Reduce of secondary flow

図4 羽根車とディフューザの一体解析 CFD解析による流れを示す。
Flow analysis of impeller to diffuser

となる。そこで羽根車内部及び出口下流の流れを改善し、効率を向上するために以下の空力設計を行った^①。図2に開発機の圧縮機断面構造を示す。

(1) 垂直速羽根車の高効率設計

- 従来の2段型に対し流量係数を大きくとり、第1段、第2段とも大比速度化した。
- 羽根車内での二次流れを最小化するため、羽根角分布や羽根のたおれ角を最新のCFDを援用して決定した。図3に検討途中の1例を示す。羽根負圧面上の二次流れや境界層厚さが低減して行く様子を示す。
- 羽根車内の流れを改善することにより、羽根車出口～下流のディフューザでの流れの歪みも改良できた。図4に羽根車とディフューザの一体解析による、流動歪みの計算結果例を示す。
- 羽根車内の二次流れを低減できたので、ぬれ面積を減ら

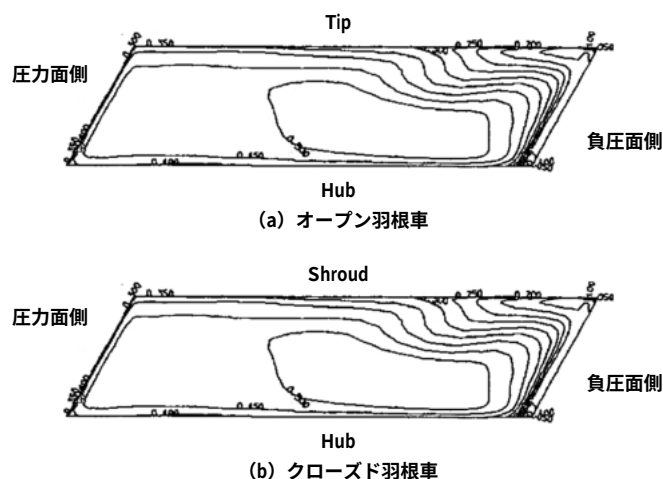


図5 オープン羽根車とクローズド羽根車の出口流動解析比較
CFD解析例では、オープン羽根車方が流れに偏りがあり境界層が大きいことを示す。
Comparison flow analysis open impeller with close impeller

し入口スロート面積を増し、羽根後縁厚みによる後流を減らすため、羽根枚数を最適化した。羽根枚数の最適値もCFDの結果から判断した。

(2) オープン羽根車の採用

開発の過程において、オープン羽根車とクローズド羽根車の比較検討を行い、流動解析、実機性能試験を経てほぼ同等の性能であることを確認した。実機では以下の理由によりオープン羽根車を採用した。

- 5軸NC加工機により精密な形状が可能
- 数ミクロンの良好な表面仕上げが可能
- 軽量化が可能で、ロータダイナミクス設計において圧縮機軸の軽量化、小型化が可能
- 加工技術の進歩により低コスト化が可能

図5にオープン羽根車とクローズド羽根車の流動解析結果の比較を示す。オープン羽根車はチップとシュラウドのクリアランスの影響を受け境界層が大きくなり、流れの偏りも大きくなる。そこで実機においては運転状態のチップ変形状に沿ったシュラウド形状とすることで最小クリアランスとし、漏れ損失低減に細心の注意を払い、クローズド羽根車との性能差をなくすことに成功した。

(3) 軸系評価

従来の2段型に比べ、羽根車比速度を大きくしたため羽根車の軸長が長くなり、軸受支持位置からのオーバーハング部が長くなった。これに対しロータダイナミクス解析により健全性の確認を実施した。さらに軸、取付けた状態での翼固有振動計測を行い、軸との連成振動、上流静止翼との共振回避を確認した。実機検証試験機においても軸振動及びケーシング振動をモニタし、サージングも含めた運転状況下で異常振動のないことを確認した。

図6に2段オープン羽根車の軸取り付け状態を示す。

4. 機械損失の低減設計

軸受は従来の滑り軸受から転がり軸受へ変更することにより損失を従来比50%以下とした。軸受寿命は50 000時間以

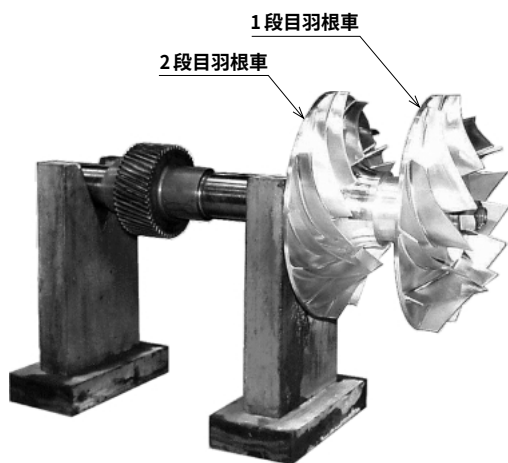


図6 羽根車軸取り付け状態 圧縮機軸に1段羽根車, 2段羽根車を取りつけた状態を示す。
Compressor shaft

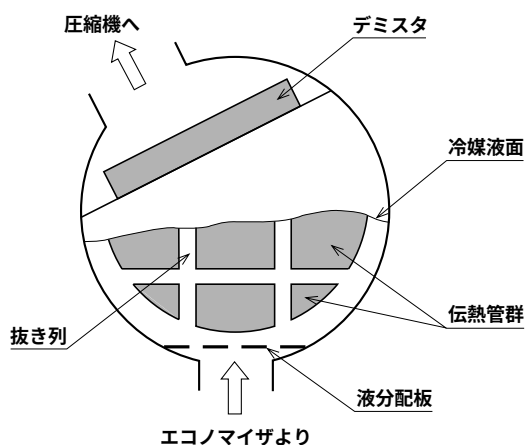


図7 蒸発器断面 蒸発器の管群, 抜き列と冷媒との関係を示す。
Outline of evaporator

上を確保した⁽²⁾。

歯車は圧力角の最適化を図ることにより動力伝達効率を99%以上とした⁽²⁾。

5. 熱交換器の高性能化

(1) 蒸発器

蒸発器の伝熱性能を向上させるためには、伝熱管の高性能化だけでは限界があり、伝熱管配列の適正化による総合的な伝熱性能の向上が不可欠である。特に、管群上部では、下部の伝熱管で発生した気泡が累積して高ボイド率となるため、伝熱管表面での核沸騰が抑制されて熱伝達性能の低下となる。これを改善するために、図7に示すように、管群内に“抜き列”を設けて、発生した気泡を抜き列に集めて除去する方式を採用した⁽³⁾。

さらに、管群の段数が多い場合には、下部管群で蒸発した気泡の上昇流速が増大し、伝熱管周りの冷媒液を吹き飛ばすため、ドライアウトが発生し沸騰熱伝達率の低下を引き起こすことが予測される。この対策として、伝熱管水平方向のピッチを拡大した⁽³⁾。

要素試験で得た熱伝達率とボイド率の相関関係等の基礎

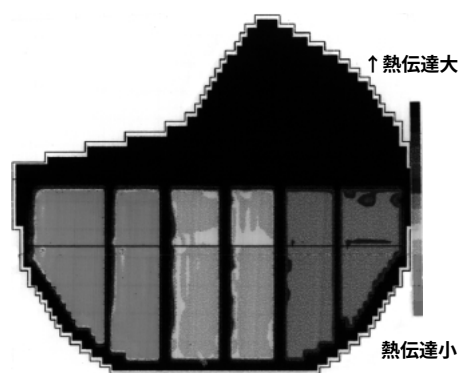


図8 解析例 管外沸騰熱伝達の蒸発器断面での分布の解析例を示す。
Fluid analysis of evaporator

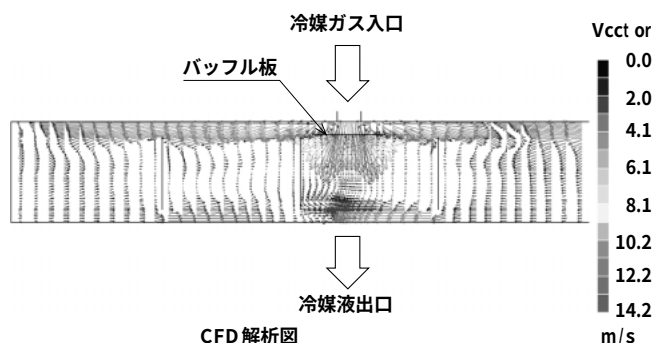


図9 凝縮器解析例 圧縮機から吐出された冷媒ガスの流れの分布を示す(凝縮器内長手断面)。
Fluid analysis of condenser

データをベースに熱流動汎用解析コードを改良し、HFC 134aでの蒸発器の熱伝達率分布を予測可能とし、実機設計に適用した。蒸発器の解析例を図8に示す⁽⁴⁾。

(2) 凝縮器

凝縮器は伝熱管表面の凝縮液膜を薄くすることと、凝縮液の流下による下部管群の凝縮性能低下を抑えることが伝熱性能向上のポイントである。また、蒸発器と同様に伝熱管の高性能化だけでは限界がある。そこで単相ガス流動解析により、凝縮器内流動を均一化することで液膜均一化を図り凝縮熱伝達の向上を図った。図9に凝縮器の解析例を示す⁽⁴⁾。

6. 制御

冷凍機制御には多機能カラー液晶マイコン盤を従来より採用しているが、NARTシリーズ開発にあわせ多くの新機能の追加と従来機能の見直しを実施した。負荷制御は入口ベーン制御、ディフューザ幅制御、ホットガスバイパス弁制御をそれぞれ独立して制御することにより細やかな負荷追従性、冷却水追従性を実現した。また、膨張機構制御は冷媒循環量を内部演算することにより最適とした。さらに、スケジュール運転、異常運転回避、BAS通信監視機能、台数制御機能などを機器制御の機能として備え、多彩なニーズに応えることが可能となった。

図10に制御盤液晶画面を示す⁽⁵⁾。

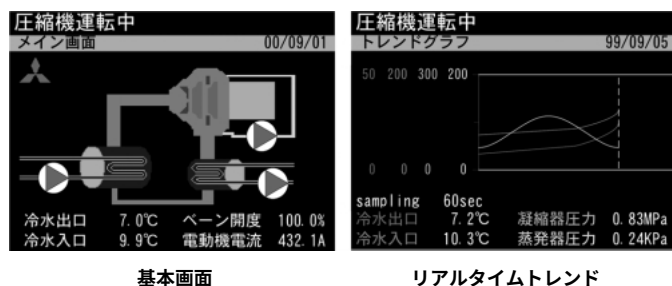


図10 制御盤液晶画面 表示項目はメニューより選択できる。
LCD monitor on control panel

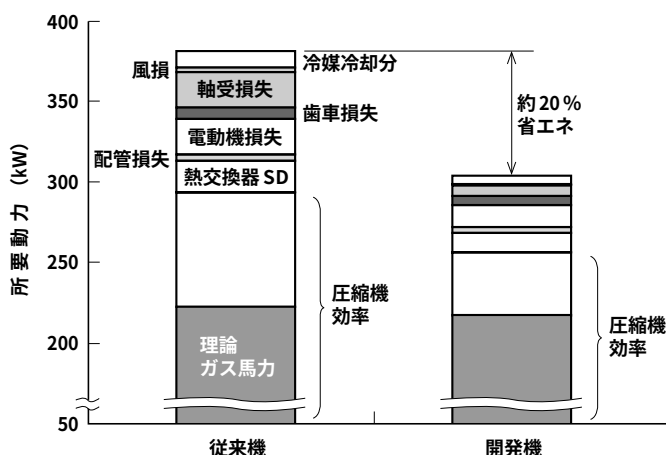


図11 性能向上詳細内訳 各内訳動力の性能改善を示す。
Breakdown the improvement of performance

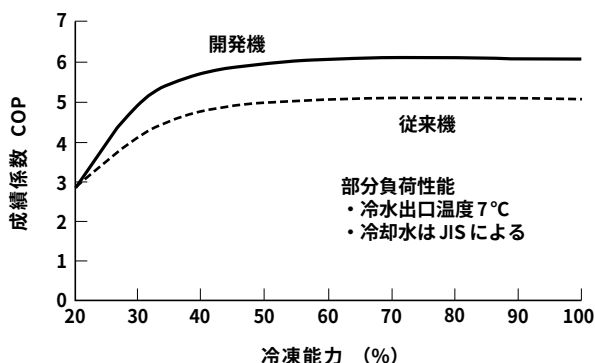


図12 部分負荷性能 冷凍能力100～20％でのCOPを示す。
Part load performance

7. 実機性能

各開発要素が目標性能を達成したことにより従来機比20％以上の性能向上を達成した。内訳を図11示す。

さらに入口ベーン制御とディフューザ幅制御の最適化により良好な部分負荷性能を得た。部分負荷性能を図12に示す⁽⁵⁾。

機器の耐久性能評価では以下の連続運転を行ったあと開放点検を実施し、機器の健全性を確認した。

- 巡回失速点での連続運転
- サージ連続運転
- 連続停電試験

またNARTシリーズとして350～1660 USRtの範囲でシリ

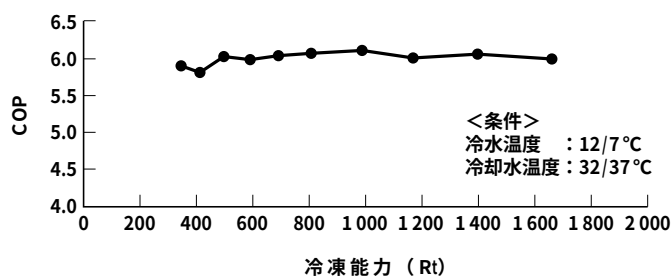


図13 各容量別性能 NARTシリーズの各型式、容量のCOPを示す。
Performance of every capacity types

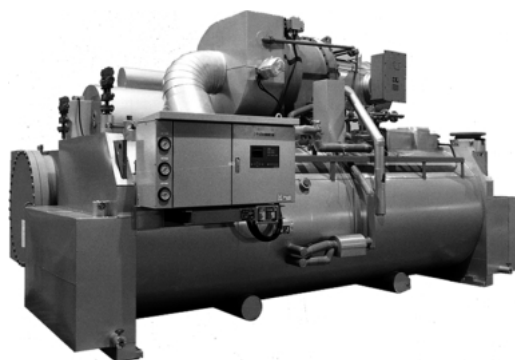


図14 1500 RT機概観 1500 RT機の正面（操作盤側）からの完成状態を示す。
View of 1500 RT model

ーズ展開を実施し、すでに全機種工場試験検証を行い、その計画性能を発揮できることを確認した。図13に各容量でのCOPを示す。

8. まとめ

- (1) 冷媒HFC 134 aを使用し世界最高レベルの性能COP 6.1（冷水温度12℃／7℃ベース）のターボ冷凍機NARTシリーズの商品化を実現した（図14）。
- (2) 良好な負荷追従性能，冷却水追従性能により年間高効率運転が可能である。
- (3) 実用運転状態で十分な耐久性能を持ち50 000時間以上圧縮機オーバーホールは不要である。
- (4) 制御盤の大幅な機能拡充と改良を図り、良好な操作性と通信機能を持つ。
- (5) 90台以上出荷し，開発目標どおりの高性能と信頼性で好評を頂いている。

参考文献

- (1) 川上孝ほか，HFC 134 aターボ冷凍機用圧縮機の開発，平成12年度日本冷凍空調学会学術講演会講演論文集，p.209～212
- (2) 吉田善一ほか，ターボ冷凍機高性能化のためのトライボロジー要素技術，三菱重工技報 Vol.38 No.6 (2001) p.300
- (3) 川田章廣ほか，HFC 134 aターボ冷凍機の高性能化，平成12年度日本冷凍空調学会学術講演会講演論文集，p.205～208
- (4) 上田憲治ほか，平成13年度日本冷凍空調学会学術講演会講演論文集，p.45～48
- (5) 関亘ほか，世界最高効率HFC 134 aターボ冷凍機NARTシリーズ，建築設備と配管工事，2001-2 p.44～48