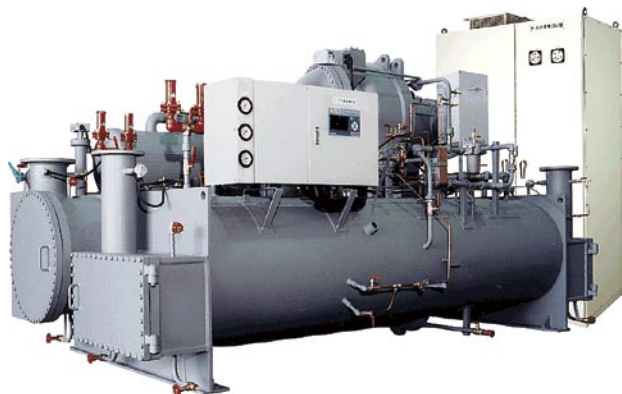


特 集 論 文

通年運転動力低減に寄与する新型ターボ冷凍機 AART シリーズ

New Model Turbo Chiller AART Series, Contributes for Reduce of Energy Consumption Throughout of the Year



関 亘^{*1} 上 田 憲 治^{*2} 白 方 芳 典^{*2}
 Wataru Seki Kenji Ueda Yoshinori Shirakata
 福 島 亮^{*3} 森 一 石^{*4} 古 賀 淳^{*5}
 Ryo Fukushima Kazushi Mori Jun Koga

代替冷媒 HFC134a を用いたターボ冷凍機としては世界最高の効率を有する AART シリーズをベースに、2 段入口ベーン制御機構、ベーンレスディフューザを採用することで特に部分負荷運転時の性能向上を図った AART 新シリーズの技術内容について発表する。本機は高速高性能マイコン制御盤、さらに動力源としてインバータ駆動電動機を搭載し、圧縮機の空力特性に沿った可変速制御とを組み合わせた。年間での外気温度変動・負荷変動に対して最適制御を図ることによって、従来の可変速機 NART-I シリーズに対して通年運転動力のさらなる削減が可能となる見通しを得た。

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。近年はオゾン層保護の観点から、これまで冷媒として使用されてきた CFC が全廃され、HCFC も将来全廃の動きがあるため当社は 2000 年よりオゾン層破壊係数 (ODP) がゼロの冷媒 HFC-134a に特化し、地球環境の保護にも注力すると共に社会的ニーズである省エネルギーのために、機器性能の向上に取り組んできた。

図 1 に代表的なターボ冷凍機の性能の変遷を示す。縦軸は冷凍機性能を表す COP、横軸は年度を示す。

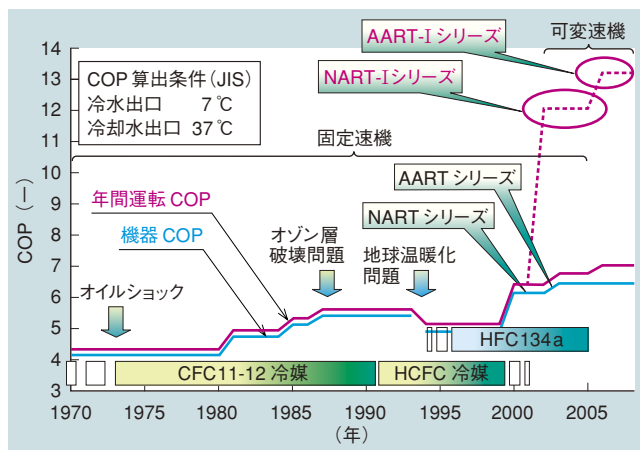


図 1 ターボ冷凍機性能と冷媒の変遷

オイルショック以降省エネ推進の社会的気運から高性能化が進み、1980 年からの約 20 年間で約 1.5 倍以上の性能向上を達成している。現在最も性能の良い機種では機器単体の COP が 6.4 に達し、単体性能ではほぼ限界に近付きつつある。

本図の機器 COP は定格点での仕様であるが、年間運転での COP も併記した。ターボ冷凍機は定格点で運転する割合が少なく、全運転時間の 9 割以上が部分負荷での運転である。お客さまにとっては通年運転での COP がランニングコストに直結するためターボ冷凍機の運用でその部分負荷性能が非常に重要となる。従来のターボ冷凍機では年間運転 COP は機器 COP と大きな相違はなかったが、可変速が可能なインバータ機では年間運転 COP が非常に高く、機器 COP だけで冷凍機の性能を評価することはできなくなってきている。

前述の通り、インバータ機は通年での COP が良く、当社受注機の約 1/3 を占めるまでになったが、インシャルコストの高さがまだまだ普及のネックとなっている。そこで固定速機の部分負荷性能を向上させることで一般ユーザの省エネを推進する必要がある、これに対応した。同時にインバータ機も更なる高性能化が可能となった。

2. 通年運転における動力低減のための技術施策

通年運転における性能向上のためにはターボ冷凍機性能に大きく影響する圧縮機の性能向上と使用可能領域の拡大が不可欠である。今回実施した圧縮機改良の

^{*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室主席

^{*4} 技術本部高砂研究所振動・騒音研究室

^{*5} (株)菱友システム技術研究システム 2 部専門主務

内容を以下に示す。

2. 1 部分負荷運転での空力性能向上

2. 1. 1 従来機の技術課題

圧縮機構造説明図を図2に示す。現行のAARTシリーズでは、圧縮機効率向上のため第2段羽根車の吐出側流路に小弦節比ディフューザベーンを設置している。このディフューザベーンは冷媒が定格流量付近では圧縮機効率向上に寄与するが、低負荷で流量が少ない時にはディフューザベーンへの流入角が代わるため流れの剥離が生じて運転できなくなる。このため、ディフューザ幅制御により安定運転を図っていたが効率はいまなかった。低負荷での流れ場改善のため可動ディフューザベーンの場合もあったが構造が複雑であり、圧力隔壁を貫通して可動させる必要があるためシール性に問題があつて採用しなかった。また、ディフューザベーンの共振回避のために可変変化が不可能であった。

以上より低負荷でのディフューザ幅制御が安定運転範囲の拡大には不適であったのでこれを改善するために第2段ディフューザベーンと可動ディフューザを廃止し、代わりに第2段の流量制御のため2段入口ベーン（IGV：Inlet Guide Vane）の設置を検討した。

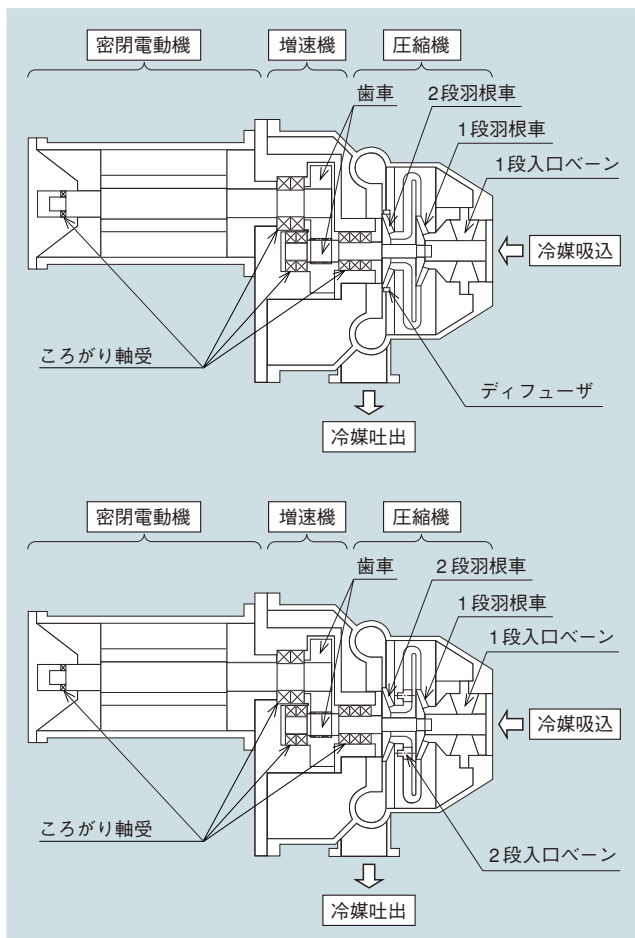


図2 第2段入口ベーン構造説明図

上段は従来機構造、下段は改良機構造を示す。

2. 1. 2 改良検討

(1) 第2段IGV

第2段IGVの形状として図3上部に示すとおり

- ① 第2段羽根車の上流にあり流入角を調整している固定翼部品、リターンベーンの後縁を可動としてIGVとする（リターンベーン一体型IGV）
- ② リターンベーン下流に単独でIGVを設置する（単独型IGV）

の2ケースについて検討した。図3にIGV開度とリターンベーンとIGVをあわせた損失を比較した図を示す。100～60%開度ではリターンベーン一体型IGVの方がわずかに損失が小さいが、30%開度では単独型IGVの方が低損失となっている。図4に30%開度でのマッハ数分布を示す。単独型IGV

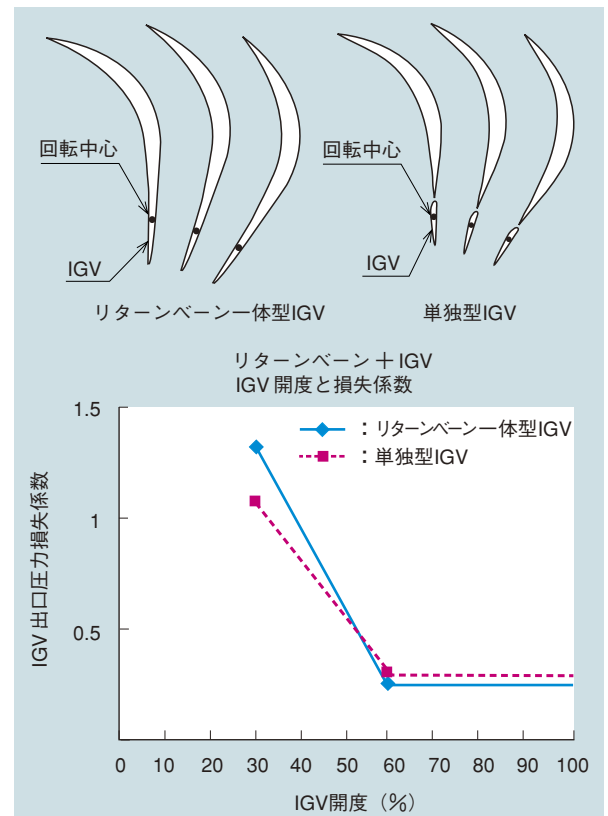


図3 2段IGV配置案と圧縮機内流動損失検討の比較

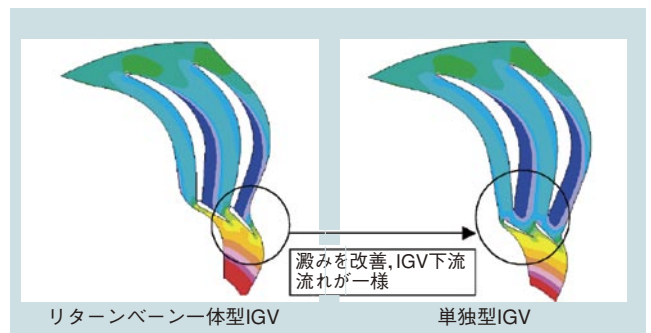


図4 2段IGV配置案と流動解析による検討
マッハ数分布を示す。

はリターンベーンと IGV の間で流れのよどみがなく損失が小さく後流も一様となっており、全圧損失が低減されている。この結果より、単独型 IGV を選択した。IGV の周方向位置は、リターンベーン後縁側圧力面と IGV 前縁側負圧面が同一線上になるような位置とした。

(2) リターンベーン改良

第2段羽根車入口に入口ベーンを新設することで1段羽根車から2段羽根車への流れを最適化する必要が生じる。第2段入口にかけての静止流路部であるリターンベーンにおいて冷媒ガス流れの剥離域（不安定領域）を小さくして損失を低減するため、羽根角度分布を流動解析の援用により修正した。形状は、定格点流量のみでなく部分負荷時の流量での損失も考慮し決定した。図5に示すように改良形状ではリターンベーン負圧面の剥離域が下流側へ移動し、剥離領域が減少している。

また、部分負荷時の流量での損失低減のためリターンベーン前縁の丸みを大きくする配慮をした。

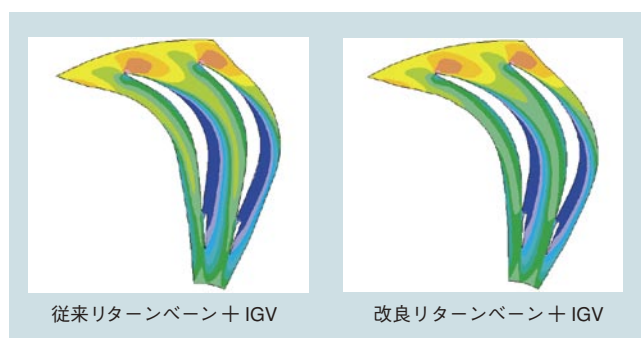


図5 リターンベーン流動解析による改良
左：従来型リターンベーン、右：改良型リターンベーンを示す。

(3) シール構造の改良

2段羽根車後部のガスシールについてはNARTシリーズ以前では、駆動軸側と静止部品側にメタルを使ったラビリンスシールを採用していた。AARTシリーズでは羽根車後流側へのガスリークを極力小さくし、漏れ損失を低減するため、昇速後の遠心力による駆動軸側部品変形を考慮し、静止部品側に樹脂製リングを採用することでシール隙間を0とする設計としたアブレードプルシール機構を採用している。これにより冷媒ガスの第2段後部への漏れ損失ほぼ0%とすることが可能となった。

2.2 圧縮機空力特性の向上

前項にて検討したIGVとリターンベーンを組み込んだ場合の効果を一般的な空力特性マップによって説明した図を図6に示す。第2段IGVの採用によって

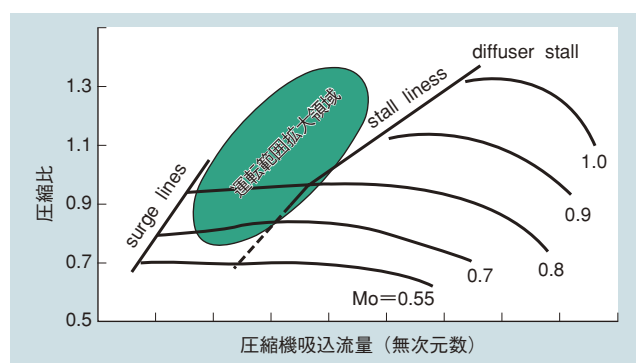


図6 空力性能マップ説明図
従来使用しなかった円部分の運転領域を使用可能に改良した。

従来使用しなかったサージングに近い作動領域まで運転範囲を広げたことにより、従来機では冷媒流量小となる領域での圧縮機効率の低下につながるディフューザ幅制御、及びシステム効率の低下につながるホットガスバイパス制御を使用しない運転領域が拡大し部分負荷時のCOP向上を図ることが可能となった。

また、従来機は可動ディフューザで流路幅を変化させることで能力制御を行っていたが、改良機ではこれを廃止したことにより部分負荷での圧縮機効率が向上した。

今回開発対象機の圧縮機羽根車は、静止系のIGVなどの構造物に起因する励振力との干渉に対して、運用回転数域での共振を回避する設計をしている。また、前述の通り、可動ディフューザ廃止に伴い図6の網掛け部に示す領域での常用運転が必要とされるため、失速セルに対しても共振回避を施すと同時に、強制加振に対しても十分な強度を確保できることを強度解析と実機圧力計測で確認した。

運転範囲拡大領域については、検証試験時に圧縮機出口の圧力変動詳細計測を行うことで、失速セル数、旋回速度を特定しており、全回転数、全作動域において羽根車振動数との共振を回避していることを確認している。

3. 部分負荷効率向上及び可変速対応の最適制御

AART新シリーズでは2段羽根車出口ディフューザ幅制御の代わりに第2段IGV制御となるため、空力性能の変更に伴い制御ロジックの修正を実施した。第2段IGV追加、ディフューザベーン廃止により空力特性が変わるため、実機運転にて詳細計測を行い、空力特性をデジタルデータ化してマイコン制御盤にインプットし、最適な空力性能を引き出すような演算制御を考案し搭載した。図7に運転領域と制御方式の考え方を示す。さらに可変速制御と組み合わせたAART-Iシリーズでは、前述の部分負荷領域の圧縮機効率向上により従来の可変速シリーズNART-Iシリーズに

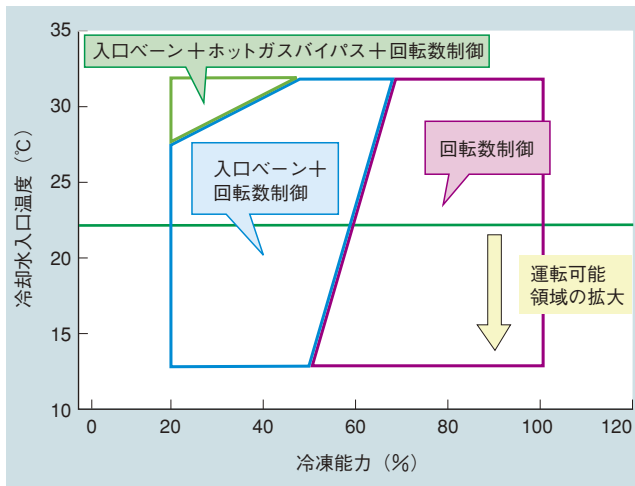


図7 運転領域と制御方式の模式図

対して、特に50％負荷以下の部分負荷性能を向上させることが可能となった。

4. マイコン制御盤と監視機能

前述の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、負荷変動に追従するように運転制御演算を行うには高速演算能力が必要となる。そこでマイコン制御盤の心臓部に高性能CPUを採用し、視認性・操作性を向上させるため7インチTFTカラー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時間監視機能を標準装備しており、

- 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

が電話回線を経由して弊社監視センターにて遠隔監視可能となっている。またビルオートメーションシステムへの接続機能、専用通信装置によるユーザでの中央監視機能、WEB監視機能と、様々な通信・監視機能

をオプション追設可能とした。

5. 性能検証結果と経済性試算

図8にAART従来シリーズと新シリーズの部分負荷運転時COP（予想値）の比較を示す。今回の開発機では特に負荷率60％以下の領域で大幅なCOPの向上が得られた。また図9に可変速機の比較を示す。冷却水入口温度が低い部分負荷運転条件においては可変速制御との組合せで大幅な性能向上が得られ最高COPは20以上となる。また負荷パターン別に年間運転動力の試算（冷却水入口温度は負荷相当のJIS規定条件）の結果を表1に示す。AART-Iシリーズを同負荷条件

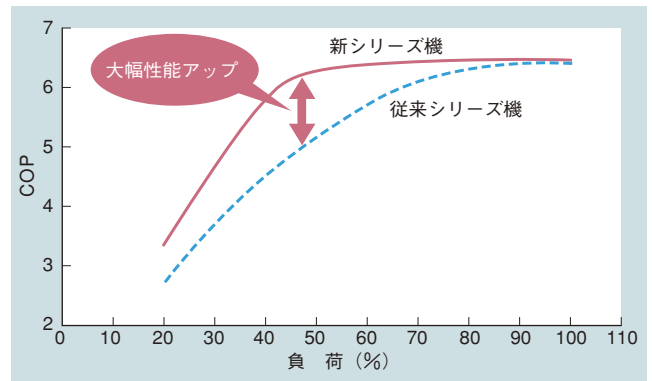
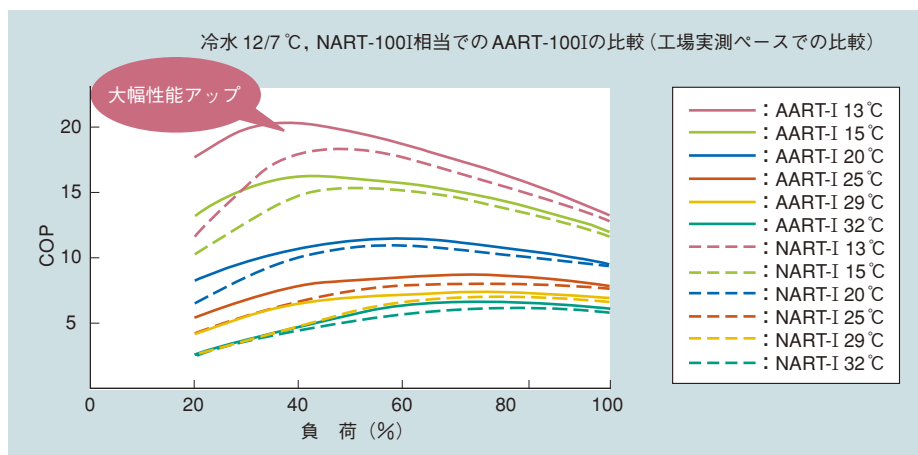
図8 AART従来シリーズ機と新シリーズ機COP予想値比較
固定速機での比較を示す。

表1 年間運転動力試算比較

	年間所要動力試算比較			
	AART (現行シリーズ機)	NART-I (現行シリーズ機)	AART (新シリーズ機)	AART-I (新シリーズ機)
負荷種別	固定速	可変速	固定速	可変速
業務施設	100％	94.4％	88.3％	86.7％
商業施設	100％	93.0％	83.4％	84.0％
文化教育	100％	94.5％	86.9％	85.7％
工場	100％	96.0％	91.6％	88.4％

備考：冷却水温度はJIS条件

図9 従来シリーズ機（NART-I）と新シリーズ機（AART-I）COP予想値比較
可変速機同志での比較を示す。

に対して使用した場合、従来固定速機に対して商業施設で16%以上の年間運転動力の低減が得られる見通しである（このとき冷却水入口温度はJIS条件相当での試算であり、最低入口温度27℃としているため実際は冬期の冷却水温度が低くさらに動力低減効果がある）。
 6. ま と め

冷媒HFC134aを使用した世界最高レベルの性能である定格条件COP6.4（冷水温度12℃/7℃ベース）のターボ冷凍機をベースに部分負荷向上を図り、さらにインバータ駆動と組み合わせて通年運転での動力低減に寄与する新シリーズを開発した。本シリーズ機は最適な回転数制御、負荷追従性能、冷却水温度追従性能により大幅な年間での高効率運転が可能である。

機械的な基本性能の改善に加え、可変速制御の適用により従来と比較して飛躍的に性能向上したターボ冷凍機を使用することで、通年で負荷変動の大きい商業施設、業務施設用途などでの大幅な省エネルギーが可能となる見通しである。今後はこれら機器を使用し、周辺機器を含めた空調システム全体の最適運用を課題としてさらなるお客様の省エネルギーや環境対応のニーズに応えていく所存である。

参 考 文 献

- (1) 関亘ほか, 高効率ターボ冷凍機 (NART シリーズ) の開発, 三菱重工技報 Vol.39 No. 2 (2001) p.88
- (2) 上田憲治, 省エネルギー, (財)省エネルギーセンター No.7 (2003)
- (3) 上田憲治, エレクトロヒート, 日本電熱協会 No.7 (2003) p.24
- (4) 白方芳典, 電力マンスリー, (社)日本電気協会関東電気協会 No.8 (2003) p.8
- (5) 川上孝, エネルギーフォーラム, (株)エネルギーフォーラム No.8 (2003) p.106
- (6) 三菱重工技報 Vol.39 No.2 (2002)
- (7) 三菱重工技報 Vol.40 No.1 (2004)
- (8) 三菱重工技報 Vol.41 No.2 (2004)



関亘



上田憲治



白方芳典



福島亮



森一石



古賀淳