

(技術資料)

省エネ・能力増強型高速スクリュ ブラインクーラ

Energy Saving High-speed Screw Brine Cooler



神吉英次*
Eiji KANKI



鈴木勝之*
Katsuyuki SUZUKI



壺井 昇*
Noboru TSUBOI



田中啓介*
Keisuke TANAKA



大倉正詞*
Masashi OKURA

Energy saving high-speed screw brine coolers driven by inverter control have been developed. By adopting a new control method of linking the compressor speed to the compressor suction pressure, 40% more cooling capacity can be generated at -35 brine temperature. Furthermore, 35% energy saving can be achieved at 50% part load compared to our conventional brine cooler. This machine can be used for a wide range of brine temperatures from +5 to -55 and for applications of freezing food, freeze-drying, environmental test rooms, process cooling, and more.

まえがき = 2段圧縮冷凍機は、食品冷凍や真空凍結乾燥、環境試験室、プロセス冷却などの低温用途において使用されている。当社は、省エネと能力増強を同時に実現したインバータ駆動高速2段スクリュ冷凍機iZシリーズを開発し、商品化した。また、これらの技術を生かし、新たに中温用途の単段スクリュ冷凍機iZSシリーズを開発した。

さらに、上記2段および単段冷凍機を活用し、容量制御にカスケード制御を採用することで負荷追従性を向上させたブラインクーラユニットをシリーズ化した。本ユニットは不凍液（以下、ブラインという）を冷却する蒸発器（クーラ）を組み込み、冷媒回路を完結して納入現地での冷媒配管工事を不要としたものである（図1）。

本稿では、本機に採用した世界初の技術を紹介する。

1. 開発背景

地球環境保全に対応した商品として、省エネ冷凍機のニーズがますます強くなっている。従来のスクリュ冷凍機は圧縮機の回転数が一定であるため、蒸発温度が低下するに従って冷凍能力も大幅に低下していた。また50%部分負荷時に消費電力は85%までしか下がらないため、ユーザから部分負荷特性の性能改善による省エネの要求が強かった。

図2は蒸発温度や圧縮機吸込圧力が変化した場合の圧縮機の回転数、動力、冷凍能力の変化の様子を示したものである。2段圧縮冷凍機では、蒸発温度-30~-60の広い温度領域に対応することが要求される。この時の圧縮機の吸込圧力はR404A冷媒の場合、-30の蒸発圧力202kPaから-60の蒸発圧力48kPaの広い範囲で



図1 iZブラインクーラユニット
Fig. 1 Brine cooler unit

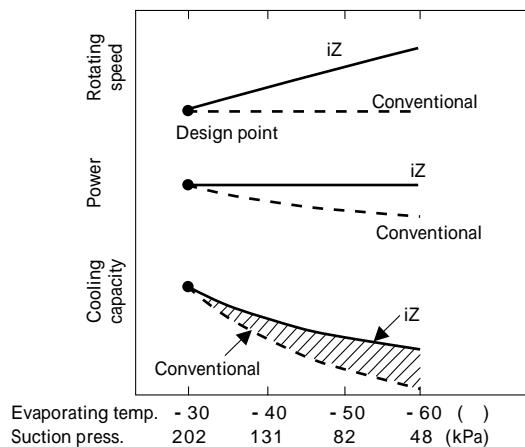


図2 iZ冷凍機と従来機との比較
Fig. 2 Comparison between iZ and conventional machine

変化する。従来機は蒸発温度が低下するに従って冷凍能力は大幅に低下していた。これは、蒸発温度が低下すると圧縮機の吸込圧力が低下し、それに伴って冷媒の比容積が大きくなり、冷媒循環量 (kg/h) が減少するためである。

ここで当社は、モータや油回収器、コンデンサなどの主要機器に設計点 (蒸発温度 - 30) 以下で余力が生じていることに着目した。そこで、冷凍能力を増強するため、蒸発温度の低下に従って圧縮機の最高回転数を増加させることによって機器能力を最大限に発揮させるシステムを開発した¹⁾。

2. 技術課題

本機を開発するにあたり、省エネ性能の向上、冷凍能力増強、地球環境対応、および静音化の4つの商品コンセプトを決定した。これらのコンセプトを実現するための技術課題を以下に示す。

- 1) 省エネ性能の向上
 - ・吸込圧力にリンクしたインバータ回転数制御技術
 - ・インバータ起動トルクの軽減技術
 - ・所定温度に制御する部分負荷運転
- 2) 冷凍能力増強
 - ・高速 7,000rpm までのモータ軸共振回避技術
 - ・効果的なモータ冷却技術
- 3) 地球環境対応
 - ・オゾン破壊係数ゼロの新冷媒 R404A 対応
- 4) 静音化 (作業環境改善)
 - ・吐出脈動音の低減

3. 技術的特徴

3.1 省エネ性能の向上

図3に本機の冷凍サイクルを示す。ここで、 P_s は圧縮機の吸込圧力、 P_m は中間圧力、 P_d は吐出圧力を示す。

部分負荷運転時、従来機ではスライド弁によって1段階側のみ容量制御していた。そのため中間圧力が吸込圧力近くまで低下し、エコマイザの効果が増少していた。本機ではインバータによる回転数制御を行うため、部分負荷運転中でも最適な中間圧力をキープすることによってエコマイザの効果を発揮させることができる。すなわち、 $i_1 \sim i_5$ を冷凍サイクル上での状態 (1: 圧縮機吸

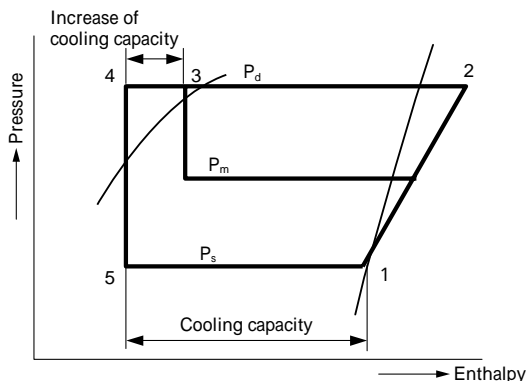


図3 エコマイザ効果の活用
Fig. 3 Effect of economizer

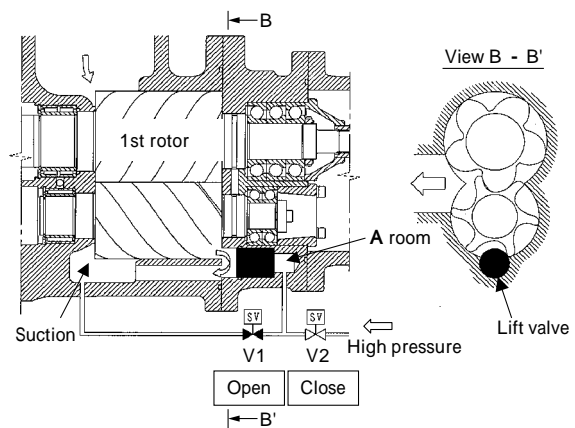


図4 起動負荷軽減方法
Fig. 4 Method for reducing starting torque

込, 2: 圧縮機吐出, 3: コンデンサ出口, 4: エコマイザ出口, 5: 蒸発器入口) のエンタルピとすると、 $(i_3 - i_4)$ がエコマイザによる冷凍能力の増加分となる。従来機の冷凍能力が $(i_1 - i_3)$ に対し、本機では冷凍能力が $(i_1 - i_5)$ となる。

本機はインバータ駆動による回転数制御を行うため、従来機の容量制御用スライド弁を省略することができる。しかしながら一方で、圧縮機起動時にスクロータ内部圧の上昇による起動負荷を軽減させる必要が生じた。

この技術課題に対して、簡単な構造で効果的に起動負荷を軽減できる方法を開発した²⁾。図4にその構造を示す。1段階スクロータの吐出端面にリフト弁を設置した。A室と圧縮機吸込部とを導通するラインに電磁弁V1を、A室と圧縮機吐出部とを導通するラインに電磁弁V2を配置し、起動時はV1を開、V2を閉としA室の圧力を圧縮機吸込圧とする。この時、圧縮機内部圧が上昇するとリフト弁は自動的に右側に移動して開いた状態となって内部圧が吸込側に流れ回り、内部圧の上昇を防止する。通常運転時はV1を閉、V2を開としてA室に圧縮機吐出圧を導入し、リフト弁を吐出端面まで移動させて閉の状態にする。本機構は自前の圧縮機吸込圧および吐出圧を活用するため、非常に簡単な構造で起動負荷を軽減できる。

3.2 冷凍能力増強

図5に省エネと能力増強の考え方を示す。蒸発温度 - 30 で標準回転数を設定し、図のように蒸発温度の低下に従って圧縮機最高回転数が増加するようにコントローラで設定する。実際の運転においては図5中の最高回転数ラインを通して所定の温度まで最速で到達する。その後、負荷に応じてインバータ回転数制御を行って目標温度を保持し、冷やしすぎなどのロスを防止する。蒸発温度 - 30 ~ - 60 という広い温度範囲に応じ、運転可能な最高回転数を変化させることが技術的ポイントであり、冷却温度領域が狭い家庭用エアコンなどに見られるインバータ機と大きく異なる。

図6に本機の仕組みを示す。TIC (温度調節計) は温度センサより蒸発器内温度を取込み、目標温度と比較して冷凍機容量をコントローラに出力する。一方、コントロ

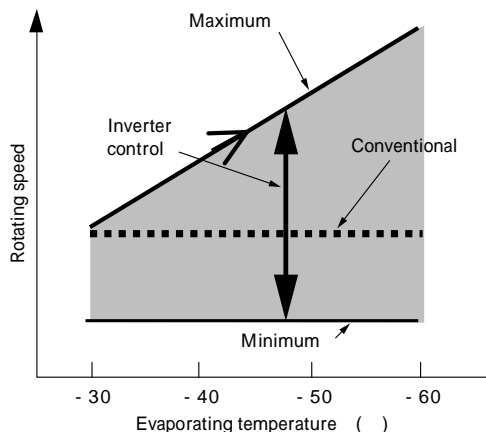


図5 省エネ・能力増強冷凍機技術

Fig. 5 New concept of energy-saving to maximize cooling capacity

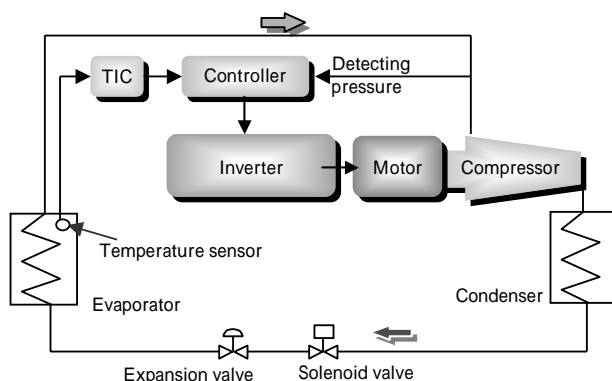


図6 省エネ・能力増強冷凍機の仕組み

Fig. 6 Mechanism of energy-saving compressor

ーラは圧縮機吸込圧力を検出し、吸込圧力の低下に伴って運転可能な最高回転数を増加させる。TICからの冷凍機容量指令が100%の場合、吸込圧力の低下に伴って圧縮機の回転数が増加する。このように、圧縮機は動力を一定に制御され、オーバーロードさせることなく冷凍能力の大幅アップが実現した。

図7に開発した高速2段スクリュウ圧縮機の断面図を示す。モータは半密封構造とし、1段雄ロータにオーバハングさせた。2段ロータは1段ロータとスプラインで結合し、1段ロータから2段ロータへの動力伝達を行った。圧縮機への冷媒の入口はモータと1段ロータとの間とし、さらにモータはステータ外被に設けたジャケットにより冷却する構造とした³⁾。これによりモータの発熱による圧縮機吸込ガスの過熱を防止し、吸込効率を向上させた。とくに蒸発温度が-30~-60という低温の場合、吸込ガスの過熱によって吸込効率が著しく低下する。

従来機のモータ回転数は3,000rpm(50Hz)であるが、冷凍能力増強に必要な7,000rpmという高速運転と静音化を同時に実現させるため、圧縮機の歯数組合せは1段5-6歯数、2段4-6歯数とした⁴⁾。1段雄ロータの歯数を従来の4から5にすることによって歯底径を大きく取ることができ、モータ片持ち部の軸径を太くすることが可能となった。これによりモータ軸の共振を回避し、7,000rpmまでの高速運転を実現した。

また、圧縮機の騒音は主に吐出ポート部での吐出脈動に起因する。そこで、吐出脈動の周波数をずらす目的から1段と2段の歯数組合せを変えたところ、本開発機では従来機より騒音レベルを3~6dB低減させることができた⁵⁾。

3.3 地球環境対応

本機はオゾン破壊係数ゼロのR404A冷媒を採用しており、省エネ性能の向上と合せて地球環境に対応した商品とした。

3.4 従来機との性能比較

部分負荷運転時における本開発機(iZ)と従来機との冷凍能力比および消費電力比を図8に示す。従来機に比べ50%負荷時で35%の省エネ、70%負荷時で17%の省エネを達成した。

先に述べたように、従来機では容量調整機構が低段側のみが付加されており、部分負荷時には中間圧力が下がり過ぎ、高段側の効率が悪くなるのに比べ、本機の容量調整はインバータによる回転数制御により行うため、部分負荷時においても中間圧力は変化しない。このため、1段側と2段側の圧縮比を最適に保つことができ、最適な冷凍サイクルを維持したまま部分負荷運転をすることが可能となった。

表1に本機と従来機との性能、環境対応の対比表を示す。蒸発温度が下がるに従ってインバータにより最高回転数を増加させた効果により、使用電源が50Hzの場合従来機よりも49%、使用電源が60Hzの場合は23%の能力増強を達成した。この能力増強により、条件によって

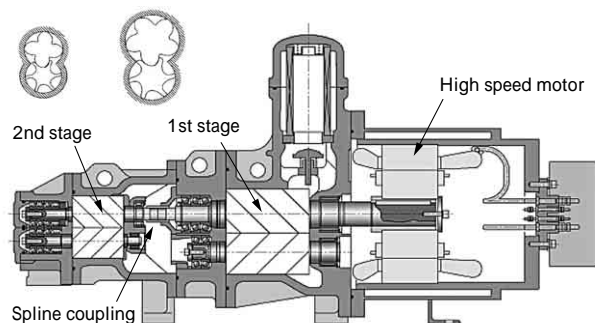


図7 半密封高速2段スクリュウ圧縮機

Fig. 7 Two-stage screw compressor integrated with high speed hermetic motor

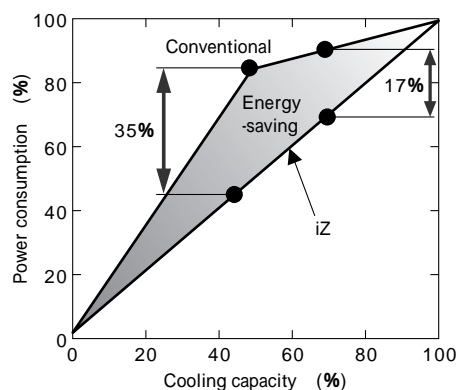


図8 省エネ性能比較

Fig. 8 Comparison of power consumptions

表 1 iZ 冷凍機と従来機との性能・環境対応比較

Table 1 Comparison of performance between iZ and conventional machine

		Conventional SH series	iZ series	Comparison	Remarks
Cooling capacity (kW)	50Hz	83.9	124.7	49% increase	Comparison of 75kW motor CT/ET = 40/ - 40
	60Hz	100.8	124.7	23% increase	
Part load power (%)	50% load	85	50	Improved by 35%	
	70% load	87	70	Improved by 17%	
Environment	Refrigerant	HCFC R22 refrigerant	HFC R404A refrigerant	Zero ozone depletion coefficient	R22 regulated from 2004
	Low noise	-	Lower by 3 to 6dB than the conventionals (top in the class)		
	Safety	-	Remote observation, communication function	Foreseeing trend of operating conditions, sensing the advance warning	

は従来機よりワンランク小さな機種を選択できることから、ユーザのイニシャルコスト削減にもつながる。また能力増強による急速冷凍により、冷却対象物の品質向上にも寄与する。

さらに、本機のコントローラでは常時運転状態をモニタリングしており、運転状態のトレンドを予知することによって異常を事前にキャッチできるように安全性にも配慮した機械となっている。また本コントローラは通信機能を有しており、遠隔監視が可能となっている。

4. ブラインクーラユニットへの展開

本冷凍機を活用し、容量制御にカスケード制御を採用することによって負荷追従性を向上させたブラインクーラユニットを開発した。従来機はブライン出口温度のみを検出して容量制御を行っており、圧縮機の吸込圧力の変化に対して温度検出部の大きい時定数や無駄時間のために制御安定性が悪かった。これに対して本ユニットは、TIC（温度調節計）の出力によって PIC（圧力調節計）の目標値を変更するカスケード制御方式を採用し、吸込圧力の変化を迅速に制御動作に反映させるようにした。

図 9 にカスケード制御の仕組みを示す。電子膨張弁によって圧縮機の吸込冷媒ガス過熱度を制御する。一方、TIC はブライン出口温度と目標温度を比較し、演算された冷凍機容量に応じて圧縮機の吸込圧力目標値を PIC に出力する。PIC はインバータ回転数によって圧縮機の吸込圧力を目標値に制御している。ブライン出口温度の低下とともに、前述の冷凍機と同じく圧縮機最高回転数を増加させ、目標温度に最速で到達可能である。

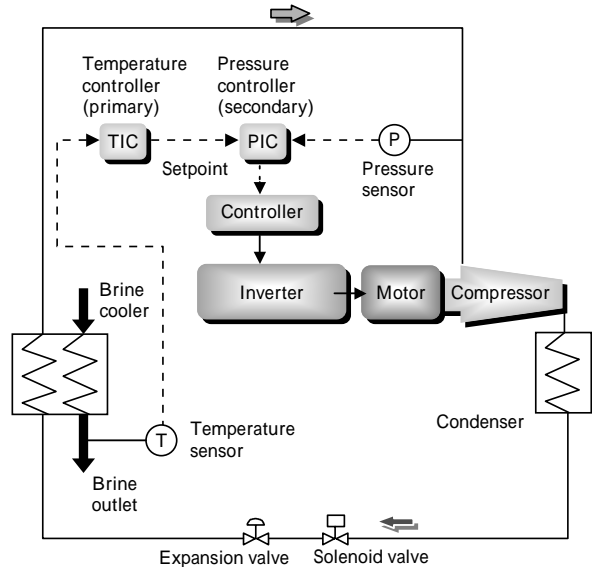


図 9 カスケード制御の仕組み
Fig. 9 Mechanism of cascade control

むすび = 本機はユーザから非常に高い評価を得ている。また公的機関から日本機械工業連合会会長賞、日本冷凍空調学会技術賞を受賞した。今後も、省エネ冷凍機の開発、地球環境保護に貢献する製品の開発に努力していく所存である。

参考文献

- 1) 特許：第 3950304 号
- 2) 特許：第 3904852 号
- 3) 特許：第 3443443 号
- 4) 特許：第 2781523 号
- 5) 特許：第 2704039 号