

(技術資料)

二段半密閉アンモニア冷凍機

Two-stage Semi-hermetic Ammonia Refrigerator



大倉正詞*¹
Masashi OKURA



鈴木勝之*¹
Katsuyuki SUZUKI

Kobe Steel has developed a new inverter driven semi-hermetic ammonia screw refrigerator. By adopting a new control method for linking the compressor speed to the compressor suction pressure, a 40% greater cooling capacity can be generated at an evaporating temperature of -40°C , and 35% energy saving can be achieved at a 50% partial load compared to that of our conventional refrigerator. In addition, the semi-hermetic structure prevents ammonia from leaking from the mechanical seal of the compressor. This machine can be used for a wide range of evaporating temperatures from -30°C to -60°C and for applications such as freezing food, process cooling, etc.

まえがき = インバータを搭載した省エネ・能力増強型高速二段スクリュ冷凍機*iZ*^(注)シリーズは上市以来、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用途で多く使用され、ユーザから非常に高い評価を得ている。省エネと能力増強という二つの機能を同時に達成した本機は全く新しい発想の冷凍機であり、多くの新技術を取入れ、他社の追随を許さないオンリーワン・ナンバーワン商品である。

一方、オゾン層破壊係数および地球温暖化係数がゼロであるアンモニア冷媒が産業用冷凍機の冷媒として再注目されている。そこで本稿では、*iZ*シリーズのインバータ制御技術による省エネ・能力増強機能とアンモニア冷媒への対応 (*iZN*) について紹介する。

1. 開発背景

昨今の地球温暖化の加速により、地球環境意識 (CO_2 排出量削減、エネルギー使用量削減) が高まるなかで、省エネ性能の向上が強く望まれている。*iZ*シリーズは以下の特長を有した冷凍機である。

- 1) 優れた省エネ性能
- 2) 冷凍能力増強
- 3) 静音

冷凍機は年間の約 $3/4$ が部分負荷運転であり、年間を通しての省エネを考えた場合、部分負荷運転時にいかに効率を高めるかが省エネ性能向上につながる。

図1は圧縮機の回転数、動力、冷凍能力と蒸発温度、圧縮機吸込圧力との関係を*iZN*冷凍機と従来機との比較で示したものである。通常冷凍機は、アプリケーションによって使用温度が異なる。例えば二段圧縮冷凍機で

は、蒸発温度 $-30 \sim -60^{\circ}\text{C}$ の広い温度領域に対応する必要がある。この時の圧縮機の吸込圧力は $119 \sim 22\text{kPa}$ の広い範囲で変化する。従来の定速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 (図2)。

冷凍機の主要機器であるモータ、油回収器、コンデンサなどの設計点は二段圧縮冷凍機の場合 -30°C であり、蒸発温度が下がるに従って冷媒循環量が減少することにより、主要機器に余力が生じている。すなわち、蒸発温度が下がるに従って圧縮機の最高回転数を増加させることにより、モータの余力や油分離器の性能、熱交換器での交換熱量を最大限に発揮させ、冷凍能力を増強させることができる。

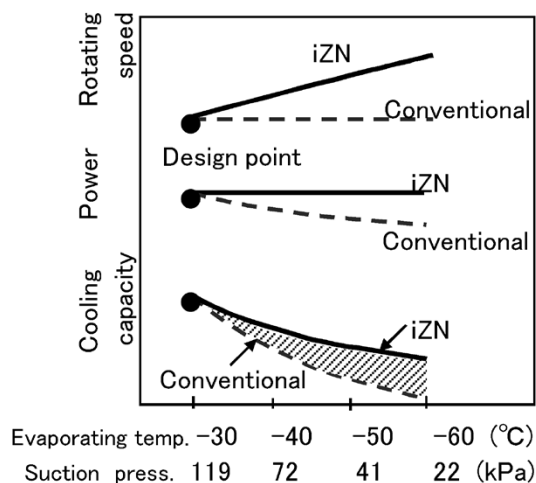


図1 *iZN*シリーズと従来機との比較
Fig. 1 Comparison between *iZN* and conventional machine

脚注) *iZ*は当社の登録商標である。

*¹ 機械事業部門 圧縮機事業部 冷熱・エネルギー部

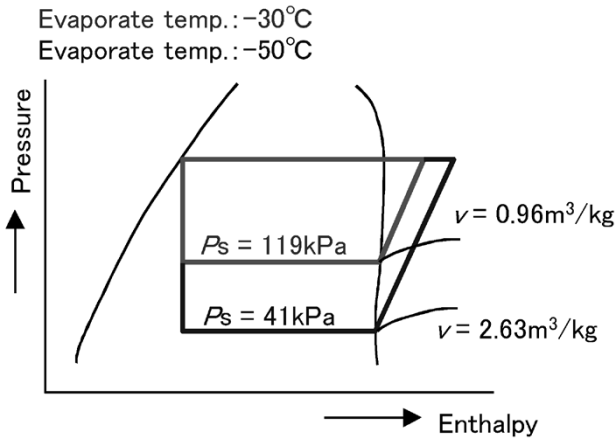


図2 P-h線図
Fig. 2 P-h diagram of ammonia refrigerator

また地球温暖化防止と環境保全の推進を背景に、地球温暖化係数およびオゾン破壊係数がゼロであるアンモニアが再注目されている。自然冷媒であるアンモニアは環境負荷が小さい反面、毒性や可燃性の面における安全性の確保が重要となる。そこで当社では、半密閉構造（メカニカルシールレス）にすることでこの点に対応した。

2. 技術課題とその対応

アンモニア冷媒への対応、省エネ性能の向上、能力増強、および静音化を実現するための課題を次に示す。

- 1) アンモニア冷凍機の半密閉化
 - ・耐アンモニア性を有するモータの開発
- 2) 省エネ制御技術、コントローラの開発
 - ・吸込圧力にリンクした回転数制御技術
 - ・所定温度に制御する部分負荷運転
 - ・運転状態を監視するコントローラの開発
- 3) 静音化
 - ・吐出脈動音の低減
 - ・高速時の振動防止

本章では、これらの課題に対する当社の対応を概説する。

2.1 アンモニア冷凍機の半密閉化

従来機のアンモニア冷凍機では、圧縮機とモータの間にメカニカルシールが配置されており、アンモニア冷媒の漏れが問題となっていた。アンモニア冷凍機を半密閉化するには、モータをアンモニア雰囲気中に配置する必要がある。モータが銅線巻きの場合、アンモニア雰囲気で銅線が腐食するだけでなく、絶縁材や端子棒などの構成部品も腐食する。

そこで、モータの巻線には、アルミニウム線に耐アンモニア性を有する絶縁コーティングを施したものを採用した。モータを構成する絶縁材も同様に、耐アンモニア性を有するものを使用した。一方、巻線に使用しているアルミニウムの導電率は銅の60%程度である。そこで、モータのサイズを大きくすることにより、銅線モータと同等のモータ効率を確保した。

2.2 省エネ制御技術

省エネと能力増強の考え方を図3に示す。蒸発温度

-30°Cで標準回転数を設定し、図のように蒸発温度が低下するに従って圧縮機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最高回転数ラインを通過して所定の温度まで最速で到達させる。所定の温度に達した後は、負荷に応じてインバータ回転数制御を行って目標温度に制御し、冷やし過ぎなどのロスを防止する。二段圧縮冷凍機は、蒸発温度-30~-60°Cという広い温度範囲に対応して圧縮機回転数を変化させるという考え方で開発しており、この点で冷却温度領域が狭い空調などに見られるインバータ機と大きく異なる。

図4にその仕組みを示す。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し、オーバロードさせることなく動力一定に制御される。これによって冷凍能力の大幅なアップを実現した。また、TICからの冷凍機容量指令が100%未満の場合、回転数を増減させて目標温度が一定になるよう回転数を制御する。本システムの技術は特許登録されている¹⁾。

図5に本機の冷凍サイクルを示す。部分負荷運転時、従来機ではスライド弁によって一段側のみ容量制御していた。そのため、中間圧力（二段側吸込圧力）が吸込圧力近くまで低下し、エコノマイザの効果が減少していた。本機ではインバータによる回転数制御を行うため、

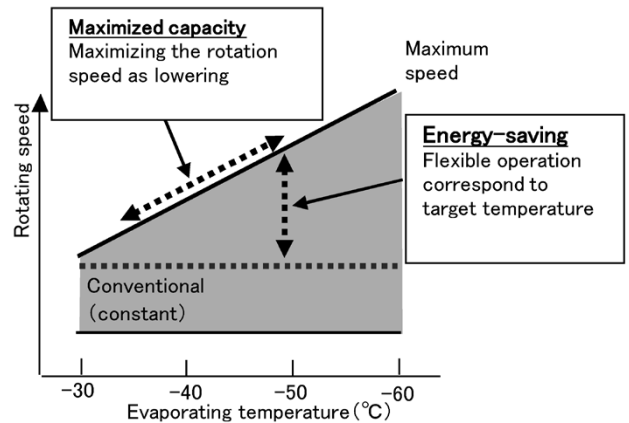


図3 iZN冷凍機の回転数制御
Fig. 3 iZN rotation speed control

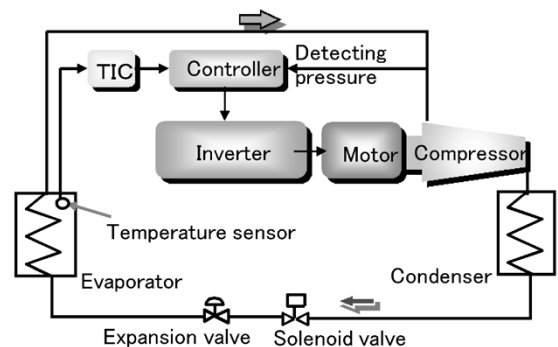


図4 iZN冷凍機の回転速度制御フロー
Fig. 4 Control flow of rotation speed

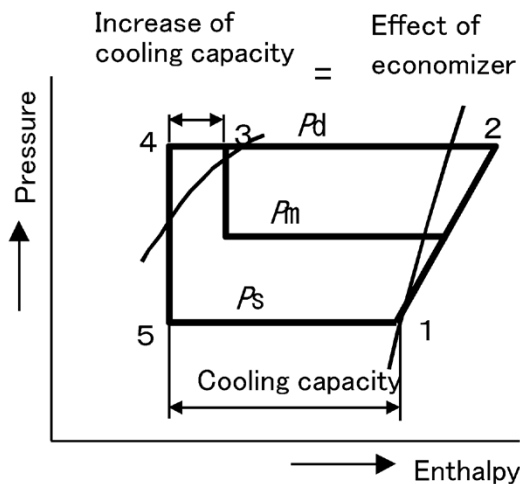


図5 エコマイザの効果
Fig. 5 Effect of economizer

部分負荷運転中でも最適な中間圧力をキープすることができ、エコマイザの効果を発揮させることができる。すなわち、エンタルピ ($h3-h4$) がエコマイザによる冷凍能力の増加となる。従来機の冷凍能力が ($h1-h3$) に対し、本機では冷凍能力が ($h1-h5$) となる。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。また数値1～5は冷凍サイクル上での下記状態を示す。

h : エンタルピ, 1 : 圧縮機吸込, 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。

図6に本機の開発において使用、あるいは開発を通して取得した特許群を示す。考案した技術の特許出願し、権利化することによって他社の追随を許さない高い商品力を持つ冷凍機とした。

2.3 二段スクリュウ圧縮機の高速度化、静音化

図7に二段スクリュウ圧縮機の断面図を示す。モータは一段側雄ロータにオーバハングさせた。二段側ロータは一段側ロータとスプラインで結合し、一段側ロータから二段側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一段側ロータとの間とし、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²⁾。これによりモータでの発熱による圧縮機吸込ガスの過熱、吸込効率の低下を防止した。とくに蒸発温度が $-30\sim-60^\circ\text{C}$ という低温の場合、吸込ガスの過熱が効率に及ぼす影響は大きい。例えば蒸発温度が -30°C の場合、吸込ガスが5K過熱すると比容積が2%程度増加して吸込冷媒量は低下する。

圧縮機の歯数組合せは一段側5-6歯数、二段側4-6歯数とした³⁾。一段側雄ロータの歯数を5とすることによって歯底径を大きくすることができ、片持ち支持となるモータ部の軸径を太くすることが可能となった。また、一段側雄吸込軸受の位置をモータ側に移動させた。これらの対策によってモータロータの共振を回避し、6,000rpm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。本開発機は、一段側と二段側の歯数組合せ

を変えることによって吐出脈動の周波数をずらすことができ、従来機と比較して騒音レベルを5dB低減した⁴⁾。

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は不要となる。一方で、圧縮機起動時においてスクリュウロータ内部圧が上昇することによって増加する起動負荷に対しては、簡単な構造で効果的に軽減できる方法を考案した⁵⁾。一段側スクリュウロータの吐出端面に設置したリフト弁がそれである(図8)。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をそれぞれ配置する。起動時はV1を開、V2を閉としてA室の圧力を低压側の圧縮機吸込圧力とする。この時、圧縮機内部圧が上昇するとリフト弁は右側に移動し、リフト弁は開いた状態となって吸込側にバイパスし、内部圧

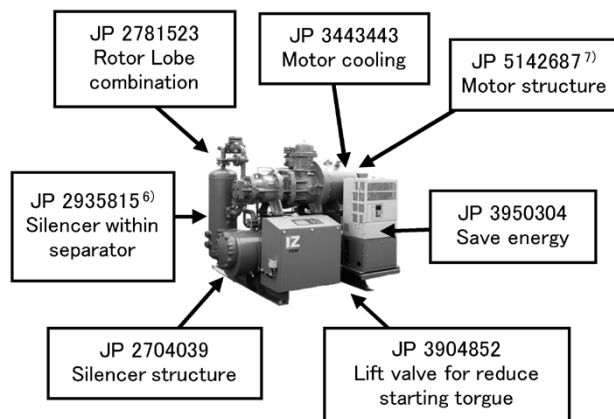


図6 iZ冷凍機特許群
Fig. 6 Patents for refrigeration unit

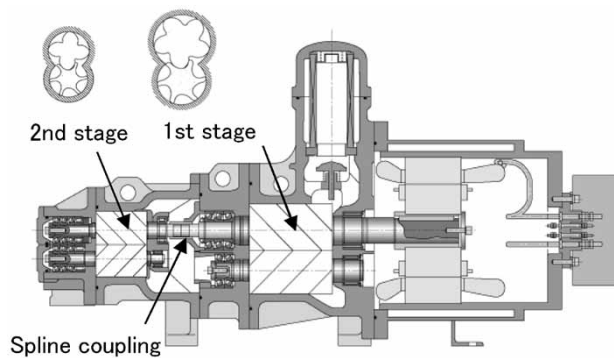


図7 二段スクリュウ圧縮機
Fig. 7 Two-stage integrated screw compressor

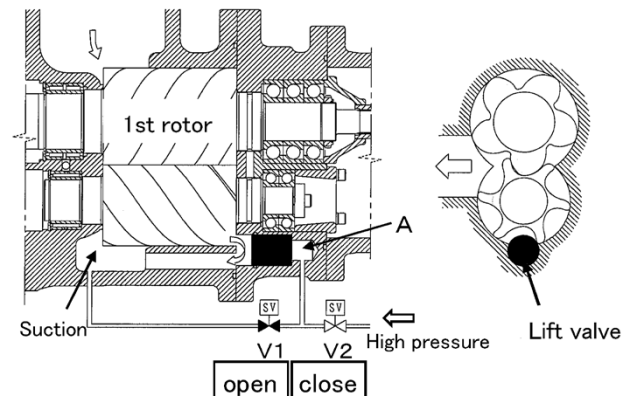


図8 起動時負荷軽減方法
Fig. 8 Method for starting torque reduction

の上昇を防止できる（アンロード運転）。通常運転時はV1を閉、V2を開としてA室に高压側の圧縮機吐出圧を導入し、リフト弁を吐出端面まで押戻した状態を保つ。これによって内部圧を吸込側にバイパスすることなくフルロード運転できる。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た。

3. 本開発機の特長と効果

図9に、部分負荷運転時における冷凍能力比と消費電力比を本開発機と従来機との比較で示す。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。これは、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に付加されており、部分負荷運転時には中間圧力が下がり過ぎて高段側の効率が悪くなる。これに比べて本機の容量調整では、インバータによる回転数制御を行うため、部分負荷時においても中間圧力は変化しない。このため、一段側と二段側の圧縮比が最適に保たれる。つまり最適な冷凍サイクルを維持したまま部分負荷運転が可能となる。この省エネ性能の向上は、顧客におけるランニングコストの削減、およびCO₂排出量の削減に寄与する。

図10に本開発機と従来機の冷凍能力を示す。蒸発温度の低下に従い、インバータによって最高回転数を増加

させた効果により、蒸発温度-40℃では従来機よりも42%（50Hz地区）、あるいは19%（60Hz地区）の能力増強を達成した。この能力増強により、条件によっては既設機よりワンランク小さな機種を選択できることから、顧客のインシャルコスト削減につながる。また能力増強による急速冷凍により、冷却対象物の品質の向上にも寄与する。

表1に本機と当社従来機との性能対比表を示す。本機は、省エネ性能の向上や冷凍能力の増強、半密閉化および静音化によって従来機に対して優位性を有している。また、これらを実現した基盤技術の特許権利化したことから、省エネアンモニア冷凍機としては他社の追随を許さないものである。

なお、本開発機のコントローラでは、運転状態を常時モニタリングしており、トレンドを予知して異常を事前に察知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。

表2に当社の半密閉アンモニア冷凍機のラインアップを示す。2009年4月に上市して以来、単段スクリュウ冷凍機と併せて蒸発温度0～-60℃、モータ出力24～125kWまでの幅広い用途に対応できるようにラインアップを拡充した。

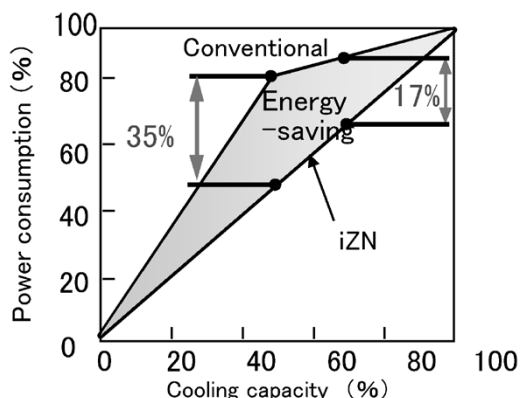


図9 iZN冷凍機の省エネ性能
Fig.9 Comparison of power consumption

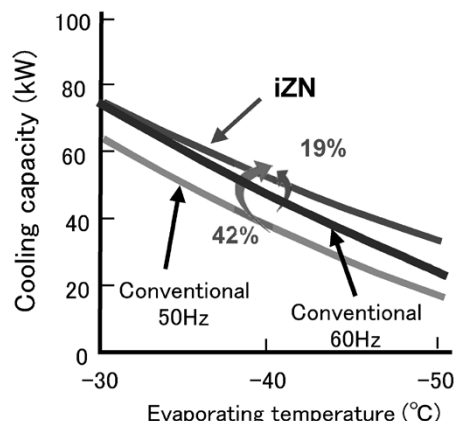


図10 冷凍能力比較
Fig.10 Comparison of cooling capacity

表1 iZNシリーズと従来機との仕様比較

Table 1 Comparison of performance between iZN and conventional machine

		Conventional SHN Series	iZN Series	Comparison	Remarks
Structure		Open type	Semi-Hermetic type	No leakage ammonia	
Cooling capacity (kW)	50Hz	39.5	56.2	42% increase	Comparison of 37kW motor CT/ET=-40/-40°C
	60Hz	47.3	56.2	19% increase	
Part load power (%)	50% Load	85	50	Improved by 35%	Comparison of 37kW motor
	70% Load	87	70	Improved by 17%	
Environment	Low noise	—	Lower by 5dB than the conventionals.		Foreseeing the trend of operating conditions, sensing the advance warning
	Safety	—	Remote observation, communication function		

表2 半密閉アンモニア冷凍機 ラインアップ

Table 2 Semi hermetic ammonia screw refrigerator lineup

Saturated temperature at suction pressure		Motor normal output (kW)						
		24	37	45	74	90	110	125
0~-30°C	Single stage		●	●	●	●	●	●
-30~-60°C	Two stage	●	●	●	●	●	●	●

むすび=2002年に上市して以来、インバータ冷凍機は顧客から非常に高い評価を得ている。また、インバータ駆動半密閉アンモニア冷凍機は、地球温暖化防止や環境保全の流れにマッチし、累計出荷台数200台を超える商品となった。当社は今後も省エネ冷凍機の開発に取組み、地球環境保全に貢献していきたい。

参 考 文 献

- 1) 特許第3950304号.
- 2) 特許第3443443号.
- 3) 特許第2781523号.
- 4) 特許第2704039号.
- 5) 特許第3904852号.
- 6) 特許第2935815号.
- 7) 特許第5142687号.