

半密閉スクリュヒートポンプ「HEAT STATION シリーズ」

神崎奈津夫*・田下友和*・松井 皓**・住元弘明***

*機械事業部・回転機技術部 **神鋼テクノ株 ***機械事業部・回転機営業部

Semi-hermetic Screw Heat Pumps「HEAT STATION Series」

Natsuo Kanzaki・Tomokazu Tashimo・Akira Matsui・Hiroaki Sumimoto

This report presents an overview of the development of a high-efficiency air-heat-source heat pump HEAT STATION series which uses HFC134a refrigerant. These units have a 352~3 516 kW thermal output. High energy saving is achieved via a high-efficiency semi-hermetic screw compressor with a single-stage economizer system. No refrigerant leakage was observed in these semi-hermetic screw compressors. These units demonstrated a remarkable improvement in noise level, installation area, and maintenance requirements compared with our conventional heat pump series .

まえがき = ビル，工場などの冷房・暖房・除湿にもちいられる大型空調機器には，空気を熱源とするスクリュヒートポンプ，水を熱源とするガス吸収式冷凍機，ターボチラーなどが使用されている。

空気熱源スクリュヒートポンプは，ユーティリティとして冷却水を必要とせず温水時でも運転可能であること，災害時に復旧の早い電気をエネルギーとしているため各種のユーティリティ変化に対して強い機械である。また，スクリュヒートポンプは，早い立ち上がり特性や負荷変動への追従性などに優れているため高い評価を受けている。

当社は，オゾン層破壊問題に関連して，1994年にスクリュヒートポンプ用冷媒として，HCFC22 からオゾン層破壊係数がゼロである代替冷媒 HFC134a への転換をいち早く実施した。しかし，代替冷媒の地球温暖化係数がゼロではないという問題から，冷媒の漏洩を最小化することにより地球環境への影響度を少なくすることが重要となってきた。

この対応機として新たに「HEAT STATION」と呼称する新シリーズ機の開発に着手し，圧縮機とモータをケーシング内で一体化したシャフトシール機構のない半密閉スクリュ圧縮機本体を開発するとともに，併行して高性能，低騒音，低振動，コンパクト，長寿命を達成した次世代ヒートポンプユニットを商品化した。本稿では，この概要を報告する。

1. 「HEAT STATION シリーズ」の開発コンセプト

本シリーズを開発するにあたってのコンセプトは次のとおりであった。

圧縮機の半密閉化（圧縮機とモータをケーシング内で一体化した構造）による冷媒漏洩防止（当社従来機：開放型圧縮機）

長寿命設計（40 000 時間）によるオーバーホールインターバル 8 年（当社従来機：4 年）

圧縮機の高効率化と単段エコノマイザシステム（高圧液過冷却システム）によるシステム性能の改善（当社比：10% の改善）

設置面積の低減（当社比：50%）

低い騒音レベル（当社比：約 10dB(A) の低減）

以下に，これらのコンセプトを達成するためにおこなった開発内容について述べる。

2. 高性能半密閉スクリュ圧縮機の開発

従来の開放型圧縮機では，シャフトシール機構（メカニカルシール）があるため，シール部からの油・冷媒の漏れをゼロにすることは構造上不可能である。この問題を解消することを目的として，圧縮機とモータをケーシング内で一体化し，第 1 図に示すようにシール機構を必要としない半密閉型スクリュ圧縮機を開発した。これによりシール部からの油・冷媒の漏れ防止が可能となった。

2.1 圧縮機の高効率化，長寿命化

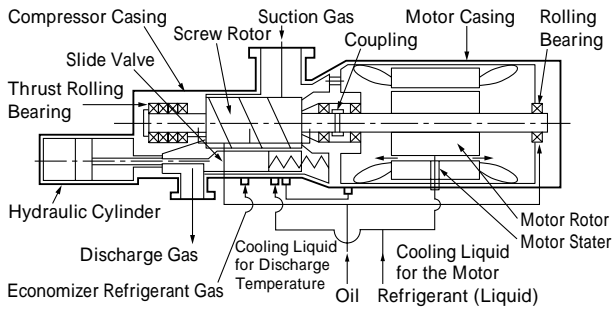
2.1.1 高効率化

スクリュロータは，当社が独自に開発した雄 5 枚・雌 6 枚の歯数を持つ高効率ロータを採用した。写真 1 にスクリュロータの外観写真を示す。また，熱変形，製作公差などを踏まえ，ロータ歯形間隙間・吐出端面隙間を低減することにより，幅広い運転範囲において効率の向上を図っている。

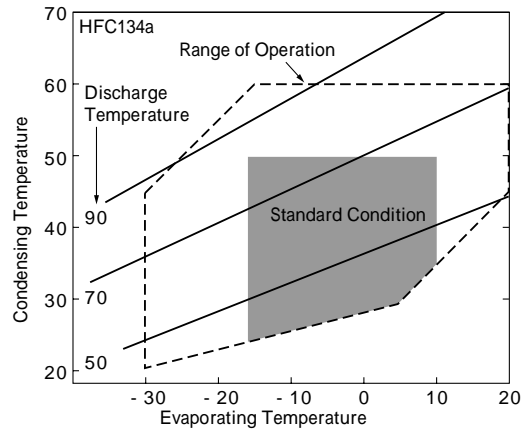
第 2 図に圧縮比（吐出圧力 / 吸入圧力）を変化させ



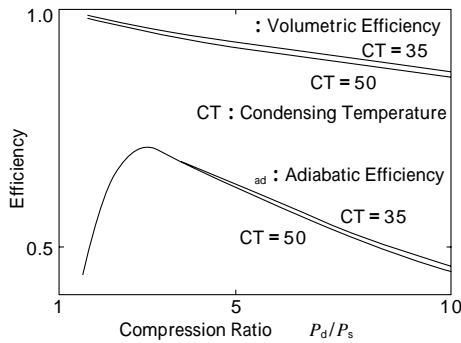
写真 1 スクリュロータの外観
Photo 1 Outside view of screw rotor



第1図 半密閉圧縮機の断面構造図
Fig. 1 Sectional view of semi-hermetic screw compressor



第3図 吐出温度範囲
Fig. 3 Range of discharge temperature



第2図 圧縮機性能線図
Fig. 2 The compressor performance diagram

た場合の容積効率（実吸込容量 / 理論吸込容量）と全断熱効率（理論断熱動力 / 電動機入力）のテストデータを示す。圧縮比 1.0 にて容積効率が 100% に収束する良好な効率カーブになっている。これは、ロータ歯形のシールラインから吸込側への漏れが少ないことを示している。また、全断熱効率は、高圧縮比・高圧力差（吐出圧力 - 吸込圧力）においても変化の少ない良好な効率がえられた。これは、ロータ歯溝間の内部漏れが少ないことを示している。

第3図に蒸発温度および凝縮温度を変化させた各種の運転条件と吐出温度の関係を示す。運転可能範囲における最高吐出温度は、90 以下であることがわかる。通常空調運転条件での吐出温度は、80 以下であり、吐出温度制御をしなくても安定して運転できることを確認した。

2.1.2 長寿命化

一般に、空調用途では冷凍用途にくらべて吸込圧力・吐出圧力が高いこと、負荷変動・起動停止回数が多いなど過酷な運転条件であることから、従来は 10 000 時間ごと（あるいは 4 年ごと）の分解総点検を必要としてきた。

今回開発した半密閉スクリュウ圧縮機は、負荷容量の大きなスラスト転がり軸受を 3 列配置とし、さらにバランスピストンによるロータスラスト力低減機構を備えたことにより、40 000 時間ごと（あるいは 8 年ごと）の長寿命化を図った。

2.2 油・冷媒の漏れ防止・潤滑システムの改善

従来のメカニカルシールを有する圧縮機では、油・冷

媒の漏れを防止するため、起動前の予備給油のための油ポンプによる強制給油や、運転中のメカニカルシール摺動面温度を一定温度以下にするための油クーラを必要とした。また、メカニカルシールでの油・冷媒の漏れをゼロにすることは構造的に不可能であるとともに、摺動面での摩耗があるため、漏れ量の定期点検と漏れ事故の未然防止の観点から定期的な交換が必要であった。

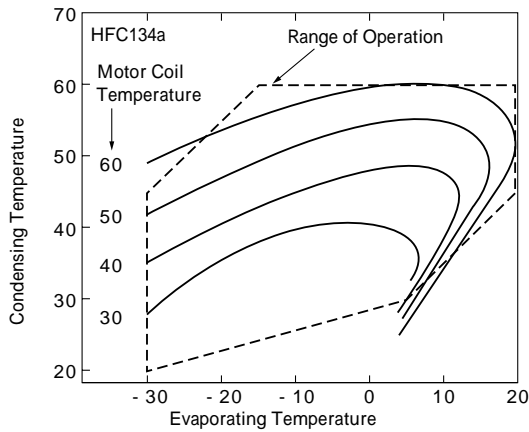
本開発機では、半密閉化によりメカニカルシールが不要となるとともに、定期点検を必要とする油ポンプ、油クーラを削除し、潤滑システムの簡素化を図った。

2.3 モータ冷却システムの最適化

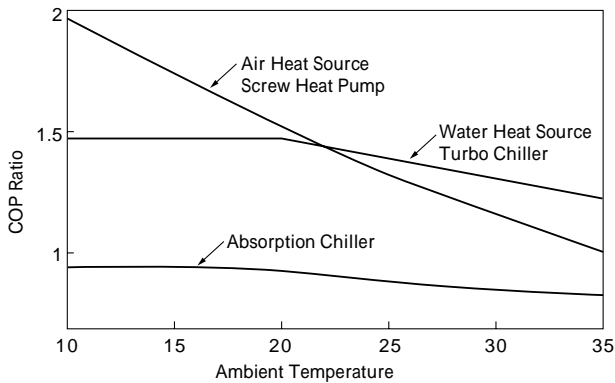
小型半密閉スクリュウ圧縮機は、圧縮機に流入する吸込ガスによってモータを冷却する構造が一般的であるが、大型機ではモータ容量の増加率に対し冷却できる表面積の増加率が小さく、吸込ガスによる顕熱冷却では十分な冷却性能がえられない。このため、モータ体格を大きくしなければならない、モータを吸込ガスが通過する際に圧力損失が生じて吸込循環量が減少し、性能が低下する、吸込圧力が低下するとモータ冷却能力が減少してモータコイル温度が上昇する、という問題があった。

本開発機では、高圧冷媒液をモータステータ外皮とモータコイルに直接噴射する方式を採用し、高圧冷媒液の蒸発潜熱により効果的に冷却する方式とした。前述の第1図に示すように、高圧冷媒液をモータの3箇所から注入し、モータロータをはじめ、過熱しやすい両コイルエンドなどを均一温度に冷却できる構造としている。これにより本開発機は、モータ入力をもっとも大きくなる条件（高温の温水を取出す運転）において、モータの体格を変えずに 60 の温水取出しが可能である。また、モータ冷却による損失を少なくするために、モータ冷却によって蒸発した冷媒ガスを圧縮機のロータ中間歯溝に戻し、中間圧力状態からの圧縮とする方式を採用した。

第4図に、蒸発温度および凝縮温度を変化させた各種の運転条件とモータコイル温度の関係を示す。運転可能条件内でのモータコイル温度は、30~60 の低いレベルで維持されており、モータの長寿命化、高信頼性が確保できた。



第4図 モータコイル温度範囲
Fig. 4 Range of motor coil temperature



第5図 COP比 - 外気温度線図
Fig. 5 COP (Coefficient of performance) ratio - ambient temperature diagram

3. ヒートポンプユニットの開発

3.1 広範囲な運転条件でのシステム性能

一般の空調条件にもちいられるヒートポンプでは、夏季の高い外気温度を設計点として設計されるが、昨今のコンピュータ負荷増大などで中間期や冬期も含めた年間冷房運転の需要が増えてきており、設計条件のみでなく広範囲な運転条件での性能特性も重要である。第5図に各種空調機器の外気温度とCOP(成績係数=熱出力/一次エネルギー換算動力)の関係を示す。

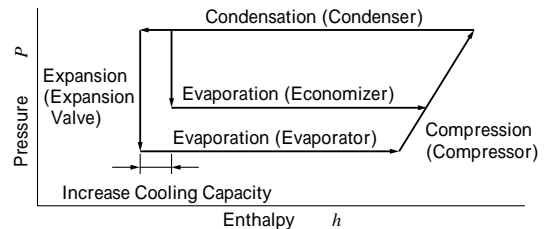
ガス吸収式冷凍機の場合、夏季の外気温度が高い条件では、ヒートポンプと同等のエネルギー効率であるが、低外気温度条件では、COPがほとんど変化しないことから、年間を通じた運転でのエネルギー効率は悪い。

ターボチラーは、外気温度が高い設計条件においてCOPは高いが、速度型圧縮機の特徴であるサージングの問題、給油差圧確保の必要性などのため凝縮圧力を一定レベル以上で運転せざるをえず、外気温度が低下してもCOPはあまり改善されない。

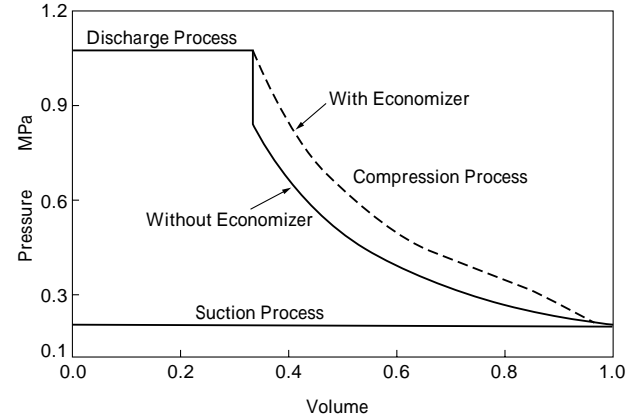
これに対し、空気熱源スクリュヒートポンプの場合は、容積型圧縮機であるため、圧力変動にも影響されずに運転でき、外気温度の低下とともにCOPは大幅に良くなる。この特性を生かし低外気温度での運転を可能とするため、圧縮機の給油設計を低差圧条件とするとともに、電子膨張弁のサイジングと制御システムを工夫した。

3.2 単段エコノマイザシステムによる高性能化

一般的に同一容量の圧縮機で冷凍能力の増大と高性能



第6図 P-h線図(モリエル線図)
Fig. 6 P-h diagram (Mollier diagram)

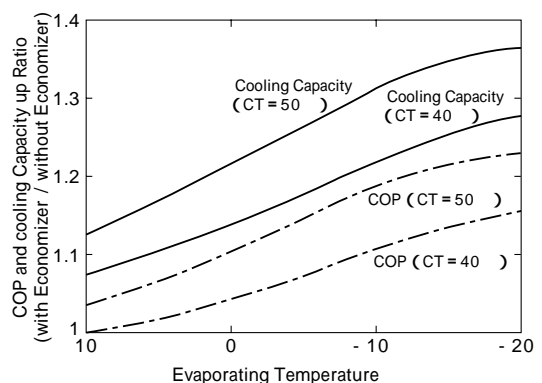


第7図 P-V線図
Fig. 7 P-V diagram

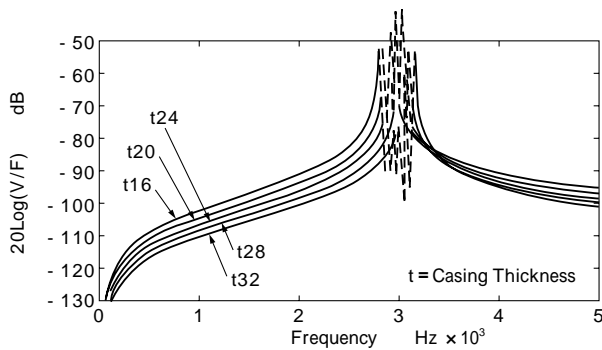
化を図るには、エコノマイザシステムがもちいられる。第6図にエコノマイザシステムのモリエル線図を示す。エコノマイザによる高圧冷媒液の過冷却効果により冷凍能力は増加することがわかる。第7図にP-V線図を示す。過冷却に要したガスは、中間歯溝に流入、圧縮されるのでP-V線図において面積が増加した分、動力が増加する。冷凍能力が増加する割合に対し、動力が増加する割合を抑えることが、高性能化を図る上で重要となる。

本開発機では、モリエル線図上の高圧冷媒液の過冷却効果による冷凍能力アップ量と、P-V線図上のエコノマイザホールへの流入ガスによる動力アップ量をエコノマイザホールの位置とサイズを変えてシミュレーションし、エコノマイザホールの仕様を決定した。

この結果、第8図に示す性能特性がえられた。エコノマイザの効果は、圧縮比が高い程大きく、通常の冷房条件(蒸発温度ET=0条件)よりも製氷条件(ET=-10条件)のほうが、その効果が増加する。したがって、深夜電力利用による電力平準化やCO₂削減に寄与する氷蓄熱システムの熱源機として使用した場合に、



第8図 エコノマイザ性能線図
Fig. 8 The economizer performance diagram



第9図 圧縮機ケーシングモデルシミュレーション結果
Fig. 9 Simulation result of the compressor main casing model

とくに大きな効果がえられる。

3.3 設置面積の低減

ビルの地下機械室に設置されることを前提として、当社比50%の設置面積になるようにコンパクト化設計をした。圧縮機本体の設計においては、吸込・吐出ノズル方向を横方向とし、圧縮機配管を含めたユニット全体のコンパクト化、スペースロスの最小化を重要視した設計とした。また、前述のように圧縮機の半密封化により油クーラおよび油ポンプが不要となりコンパクト化に大きく寄与した。機器のコンパクト化は、油分離構造を工夫することによる油回収器の小型化（当社従来機の容積比で約1/6）と当社開発の高性能伝熱管を採用した熱交換器により達成した。

3.4 低騒音・低振動化

従来機における騒音の分析結果から騒音値への寄与度は、圧縮機本体からの騒音とモータおよび油回収器からの騒音が支配的である。このため、装置の低騒音・低振動化には、振動源である圧縮機本体の低騒音・低振動化とともに、周辺機器への振動伝播経路の遮断と騒音発生面積の低減が重要である。

(1) 圧縮機の低騒音・低振動化

圧縮機の低騒音・低振動化においては、ケーシング自体の剛性を高めることおよび表面積を小さくすることが必要である。FEM解析をもちいて、ケーシング肉厚を変化させた場合の振動速度応答をシミュレーションした結果の一例を第9図に示す。振動速度応答が圧縮機基本脈動周波数のピーク位置から十分離れるようにケーシング形状、肉厚を決定した。

(2) 振動伝播経路の遮断と騒音発生面積の削減

圧縮機脚部に防振パッドを設置して周辺機器への振動伝播を低減するとともに、前述のような油回収器のコンパクト化により、騒音発生面積を大幅に減らした。また、大型機においては、圧縮機脈動により、吐出配管や油回収器の騒音が大きくなるため、吐出配管に共鳴防止機構および消音器を設置した。これらにより騒音レベルを当社比で約10dB(A)低減することに成功した。

4. 「HEAT STATION シリーズ」の概要

以上の開発によってえられた成果をもとに、第1表に示す熱出力100~1000USRT (352~3516kW)の能力範囲でシリーズ化を図った。圧縮機単体の容量範囲とし

第1表 「HEAT STATION」標準シリーズ
Table 1 Standard series of HEAT STATION

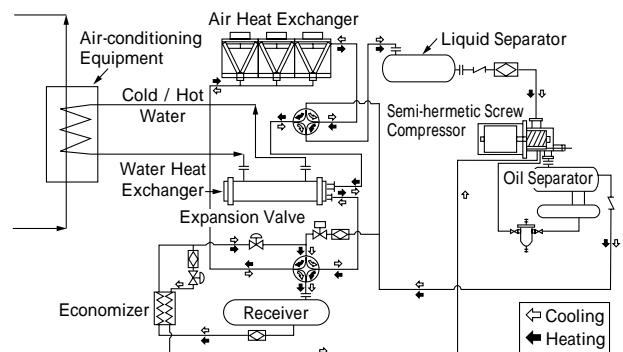
| | |
|----------|---|
| A Series | Cooling and Heating Type・Air Heat Source Series |
| R Series | Heat Recovery Type・Air Heat Source Series |
| C Series | Chiller Type・Air Heat Source Series |
| W Series | Chiller Type・Water Heat Source Series |



写真2 冷凍機ユニット外観図
Photo 2 Outside view of refrigeration unit



写真3 空気熱交換器外観図
Photo 3 Outside view of air heat exchanger unit



第10図 標準フロー図 (Aシリーズ)
Fig. 10 Standard flow (A series)

ては、100~500USRTクラス (352~1758kW)の世界最大クラスまでをシリーズ化した。写真2に冷凍機ユニットの外観写真を、写真3に空気熱交換器の外観を、第10図に標準フロー (A型)を示す。

むすび=今回の「HEAT STATION」のシリーズ化により、従来の開放形圧縮機搭載シリーズと比較して、地球環境にやさしく、シンプルで耐久性がありメンテナンスが容易なヒートポンプシリーズが完成し、市場ニーズに十分応えられる商品を提供できたと考えている。今後もさらなる省エネルギーや高性能・高機能化ニーズに対して、市場分析・技術開発に邁進する所存である。