

日立スクリー冷却機の開発

Development of Hitachi Oil Injected Refrigeration Screw Compressors

相沢道彦* Michihiko Aizawa

The refrigeration screw compressor is essentially an application of the oil injected air screw compressor. Because of such advantages as surging free operation and valve-less structure, the screw type machines have come to be used widely in the refrigeration and air-conditioning field in place of centrifugal and reciprocating machines. Hitachi has recently developed RS type refrigeration screw compressor series based on its long specialization in screw air compressors. The structure and the design checking points of the compressor as well as the lubricating system and the test results concerning various factors affecting compressor performance are described. The noise level and the vibration test data of the compressor are also given in the article.

1 緒言

スクリー冷却機が油噴射式空気圧縮機の応用として、開発されたのは比較的最近であり歴史も浅いが、現在では化学プラントをはじめとする低温産業や、大量の食料品の冷凍、冷蔵に用いられる大形冷蔵倉庫用として、従来用いられてきた往復動式圧縮機に代わって広く使用されるようになってき

ている。

また近年、都市における大気汚染が大きな社会問題として取り上げられるに至り、冬季の暖房が従来の重油による方式から、全電気式または都市ガスによる方式へと切り替えられる傾向にあり、空気熱源式ヒートポンプ冷暖房装置は、外気を熱源とするために燃焼による排ガスが全く出ない完全無公害方式であるため、これに使用する圧縮機として、1段で高圧縮比が得られ、かつ運転条件の変化に強いスクリー冷却機が使用されるようになってきており、空調の分野においても、スクリー冷却機が増加している。

表1 各種圧縮機特性比較 スクリュー式を用いるとサージングがなく、また弁などの損耗部分がないため運転、保守が極めて容易となる。

Table 1 Merits and Demerits of the Various Type of Refrigeration Compressors

項目	区分	スクリー式	遠心式	往復動式
圧縮方式		容積形・回転式	遠心形・回転式	容積形・往復式
冷凍容量		中	大	小
段当り圧縮比		大	小	中
容量制御		無段階(すべり弁)	無段階(案内羽根)	段階(アンローダ)
サージング		なし	あり	なし
保守、取扱い		容易	容易	弁の摩耗、リキッドバックが問題
使用冷媒		フロン22, 12, NH ₃ など何でも可	圧縮機が決まると数種類に限られる	フロン22, 12, NH ₃ など何でも可
騒音		一般には、やや大	やや大	小
振動		小	小	大

日立製作所は、昭和41年にスウェーデン・SRM社と技術提携を行ない、無給油式及び油噴射式空気圧縮機の分野で8年間にわたる多数の実績をあげており、この技術を冷却機に応用した日立スクリー冷却機RSシリーズを開発したのでその概要について報告する。

2 特長

スクリー冷却機を他の遠心式冷却機及び往復動式冷却機と比較すると表1に示すようになるが、サージングがなく、かつバルブなどの摩耗部分がないことが運転及び取扱いを容易にしている最大の長所であって、今後の省力化時代の要求に適合した機器であると言える。

表2 日立スクリー冷却機RSシリーズ能力表(フロン22の場合) フロン12, NH₃など、その他の冷媒も使用できる。

フロン12, NH₃など、その他の冷媒も使用できる。

Table 2 Standard Specification of RS Series Refrigeration Screw Compressors

項目	単位	RS-16L	RS-21S	RS-23S	RS-25S	RS-27S	RS-30S	RS-27L	RS-30L	RS-32L
能力	RT	84	119	164	212	269	350	427	554	681
		103	146	202	255	323	420	506	656	806
軸動力	kW	92	125	169	215	270	351	426	553	680
		113	154	208	256	324	422	505	655	805

注：蒸発温度-15°C，凝縮温度30°C，スーパーヒート5°C，スーパークール5°Cの場合
上段50Hz，下段60Hz，回転数はいずれも50Hz 2,950rpm，60Hz 3,540rpm

*日立製作所川崎工場

日立スクリーフ冷凍機は、このような時代の要求を背景に徹底した省力化を追求したものであるが、その主な特長を以下に列記する。

- (1) 油分離器の上に圧縮機と電動機を配置し、架台を使わず給油系統機器を一体にまとめているので、搬入、据付及び配管が容易で、かつ据付面積が小さくて済む。
- (2) 付属部品の信頼性確認のための試験を全数にわたって十分に行なっているため、製品の信頼性が極めて高い。
- (3) シリーズ全般にわたって最新の非対称歯形を採用しており性能が良好である。
- (4) 圧縮機内及び油分離器内に独特の低騒音設計を行なっているため、運転音が極めて静粛である。
- (5) 圧縮機ケーシングは、内圧及び熱によるひずみが最も小さい円形断面となっているため、運転時の精度が十分に維持でき振動も小さい。

表2は日立スクリーフ冷凍機RSシリーズの性能を、また図1は同冷凍機の外観を示すものである。

3 構造

3.1 圧縮機

圧縮機内の構造は図2に示すとおりである。圧縮機内には4枚の凸形の歯をもつおすロータと6枚の凹形の歯をもつめすロータが図3のようにかみ合っており、おすロータは2極の電動機によって直結駆動される。めすロータはおすロータによって駆動され、油膜を介して摺動しながら回転しているのであるが、図3に示すようにめすロータ歯みぞ内の圧力バランスにより、動力の大半はおすロータが受け持ちめすロータに伝達されるトルクは極めて小さいので、摺動によるロータの摩耗はないと考えてよい。

両ロータの歯みぞ間に閉じ込められたガスは、ロータの回転に伴って徐々に体積を減じ加圧される。圧縮の中間過程で両ロータのかみ合い部に油噴射を行なっているが、これは圧縮ガスの冷却、ロータの潤滑、ロータ間及びロータとケーシ

ングとのすきまからのガス漏れ防止に役立っている。

ロータは、当初SRM社で開発された対称歯形と、その後これを改良した漏れが少ない高効率の非対称歯形とがあるが、RSシリーズでは全部非対称歯形を使用している。

圧縮機のケーシングには、ロータへのガスの吸込口（吸込ポート）とガスの吐出し口（以下、吐出しポートと言う）とが設けられているが、この吐出しポートの大きさや形は圧縮機の性能を左右するうえで大きな要素になっている。同じ吸込ポートに対して吐出しポートが大きいと、ガスは十分に圧縮されないうちに低圧で吐き出され、また吐出しポートが小さくなるほど、ガスは十分に圧縮されて高圧で吐き出されていく。したがって、圧縮機から吐き出されるガスの圧力は、もっぱら吸込圧力と吐出しポートの大きさによって決定される。

一方、冷凍サイクルにおいては、凝縮器圧力は上記の圧縮機の状態とは関係なく、冷却水温度によって独立に決定されるので、吐出しポートを出たガスは出る直前の状態に関係なく凝縮器圧力になるまで膨張または再圧縮されここで損失が

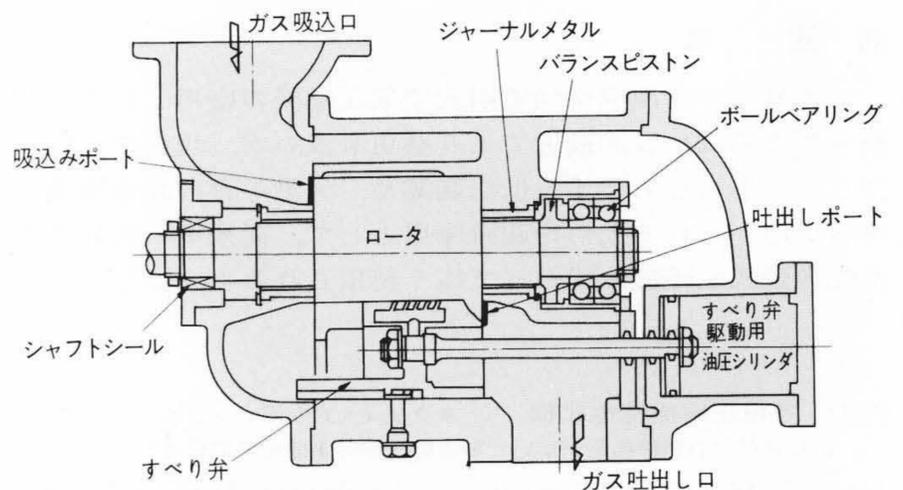


図2 圧縮機内構造図 遠心式や往復動式の圧縮機に比較して部品点数が少ない。

Fig. 2 Compressor Assembly

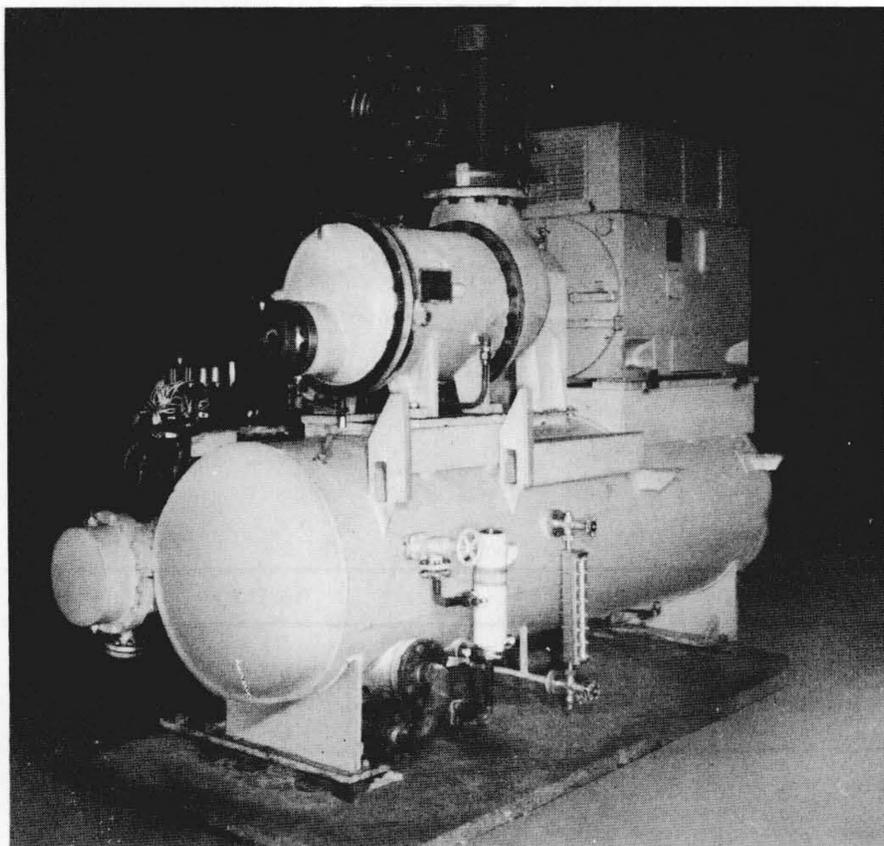


図1 スクリュー冷凍機 圧縮機と電動機を油分離器上に載せたコンパクトな配置となっている。

Fig. 1 Refrigeration Screw Compressor

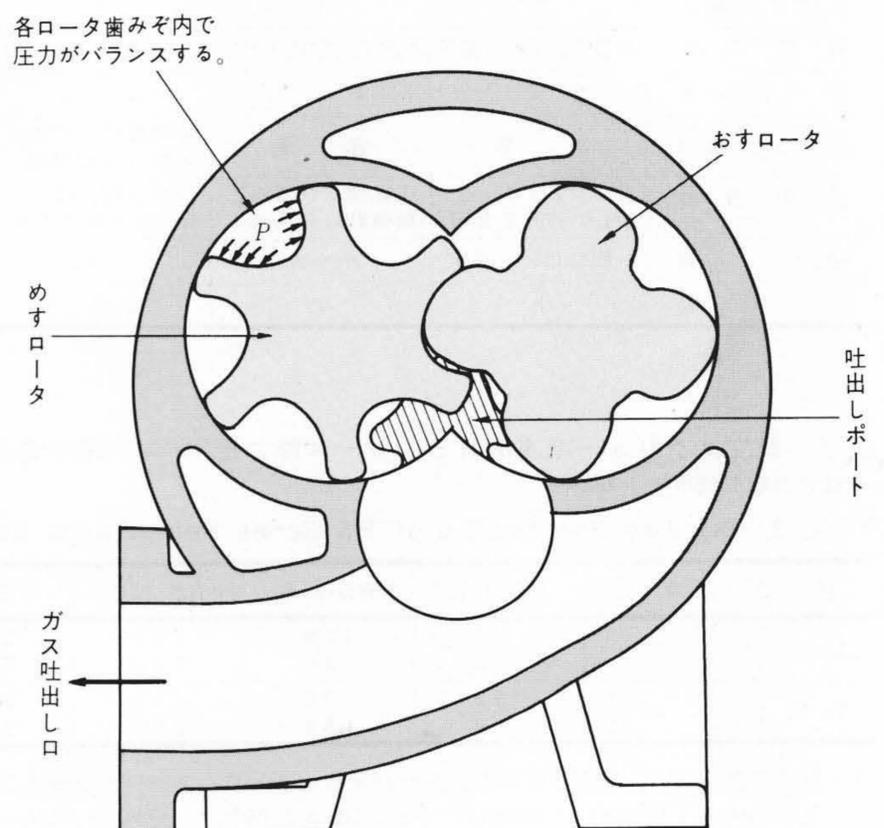


図3 ロータのかみ合い おすロータは2極の電動機で直結駆動され、めすロータはおすロータにより駆動される。

Fig. 3 Rotor Combination

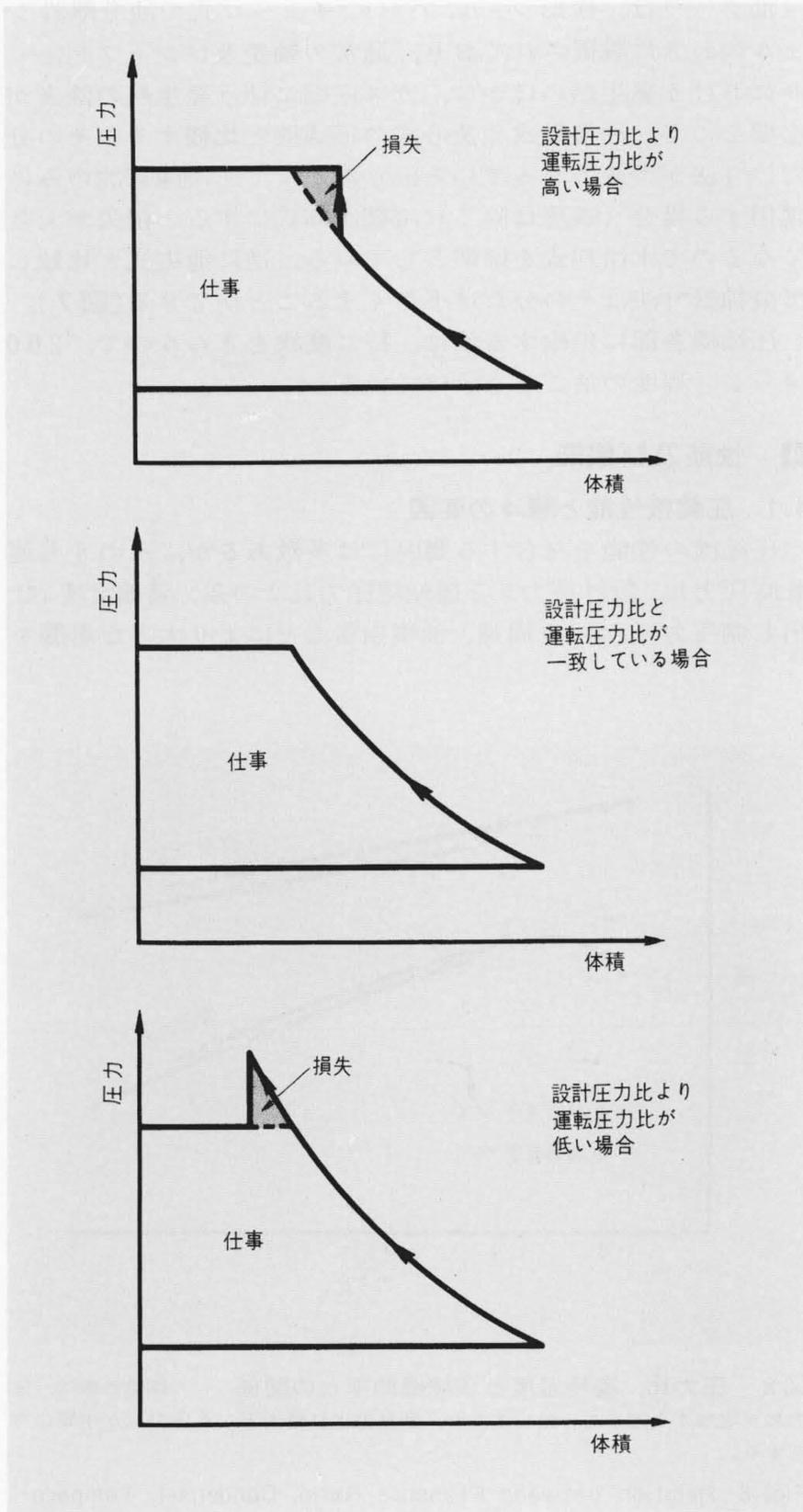


図4 設計圧力比と運転圧力比が一致しない場合の損失 設計圧力比が運転圧力比と一致するように吐出しポートを設計する必要がある。
 Fig. 4 Power Loss Occurs when the Built-in Pressure Ratio Does Not Correspond to the Operating One

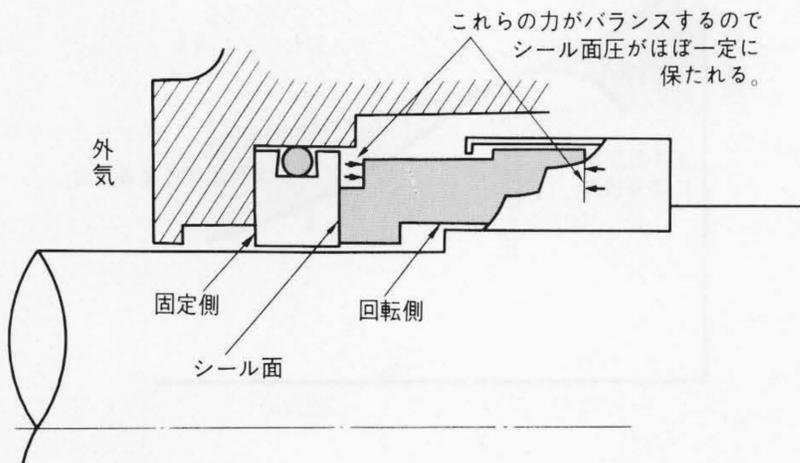


図5 シャフトシール構造図 シャフトシールは、内圧の変動に対する面圧の変動が極めて小さいバランス形構造となっている。
 Fig. 5 Shaft-seal Assembly

発生する(図4)。

したがって、圧縮機の吐出しポートは、吸い込んだガスがちょうど凝縮器圧力まで圧縮されたところでポートから排出されるような大きさに決めてやることにより損失を最小にし最高効率を得ることができるので、用途に応じて高圧力比用、中圧力比用及び低圧力比用の3種類を用意しており、最も仕様圧力比に近いポートを持つ圧縮機を選定できるようにしている。

スクリーフ冷凍機の容量制御は、両ロータのかみ合い位置下部に設けられたすべり弁を、油圧機構により軸方向に摺動することによって行なう。全負荷運転時には、すべり弁はロータを囲むケーシングの一部をなし、これが軸方向に動くことによって生ずる角形の穴を通して、圧縮されはじめたガスが吸入口へバイパスしてもどる。このようにして連続的に容量10%ぐらいまで効率よく制御することができる。

ロータには、ガスの圧力によってラジアル荷重と、スラスト荷重が発生する。ラジアル荷重は、ロータの両側にあるジャーナル軸受により、またスラスト荷重は吐出し側に設けられたボールベアリングとバランスピストンによって受け持たれる。バランスピストンは油圧によって、ガス差圧で発生するスラストを打ち消し、ボールベアリングの寿命を大幅に長くするのに役立っている。

シャフトシールは、圧縮機の運転条件の変化によって給油圧などが大幅に変わってもシール面圧がほぼ一定に保たれるバランス形メカニカルシールを使用している(図5)。これによれば、シール面が段付きになっているため、図5に示すようにシールボックス内の圧力の影響を受けることなく長寿命が保証される。

スクリーフ冷凍機用冷媒として最も広く使用されているのはフロン22であるが、アンモニアやフロン12なども時々使用される。このような冷媒の変化に対して、各部の材質には十分な注意を払っており、特にOリングなどのゴム材質については、膨潤が問題となるケースが多いので、徹底した試験を実施している。

圧縮機のケーシングは、図3に示すような円形断面の二重構造となっているが、これは運転中の熱による変形及び圧縮ガスによる変形を最小限度に抑え、ロータとケーシングの間の極めて小さいギャップを常に適正な値に保持するうえで有効であり、かつ二重ケーシングによる防音効果もあって日立RSシリーズの一つの特長となっている。

また圧縮機吐出し口を水平方向に向けることによって、油分離器に入るガス管の接続を容易にするとともに、ヒートポンプなどの種々の用途に対して幅広い配置の組合せを可能としている。

3.2 給油系統機器その他

図6は冷媒及び油の流れを示すものである。冷媒は圧縮機吸込口に設けられたサクシオンガスフィルタによりガス中の小さな塵埃を除かれた後、圧縮機に吸い込まれ、噴射された油とともに吐出しポートから油分離器に排出される。油分離器で油をほぼ完全に除かれた冷媒ガスは、吐出し側チェック弁を経て凝縮器側へ導かれる。

一方、油分離器で分離された油は、油ポンプ→油クーラ→油ごしの順を経て給油ヘッドに至り、約50°Cの状態での圧縮機内への噴射、軸受及びシャフトシールへの給油、すべり弁駆動用にそれぞれ分配される。軸受、シャフトシール、すべり弁駆動用に供給された油も、最終的には圧縮されたガスとともに排出され油システムのサイクルを成す。

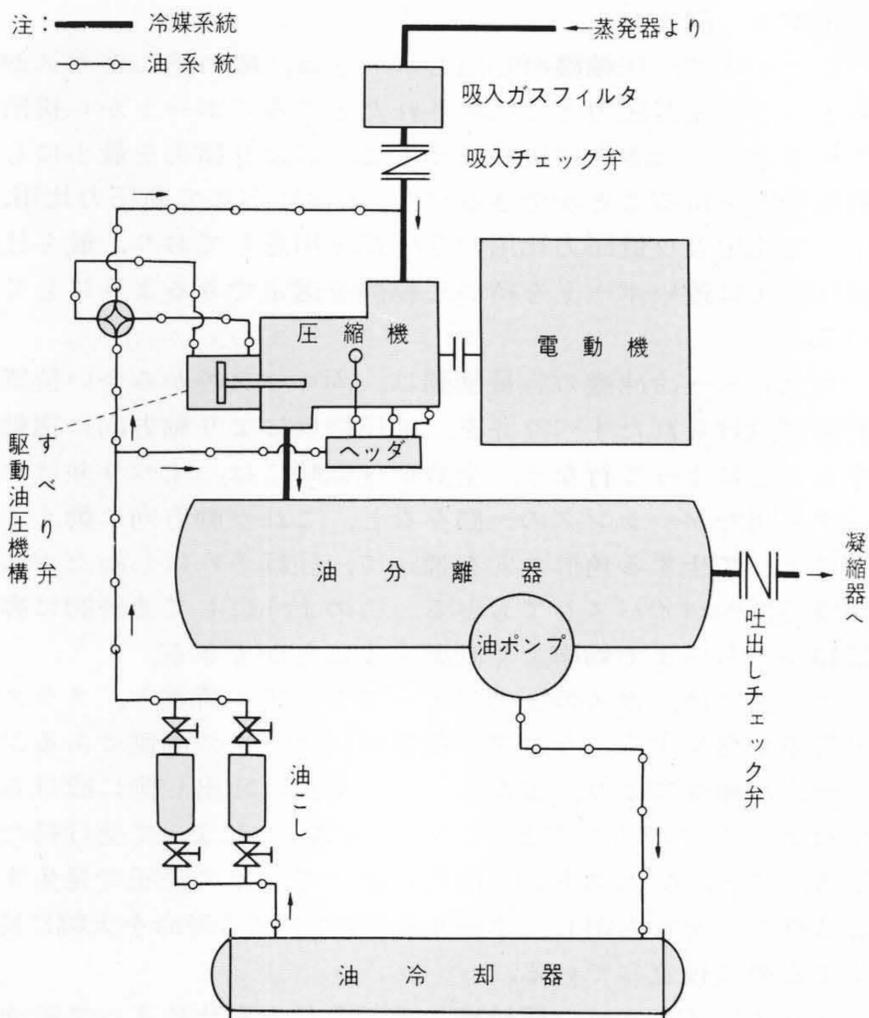


図6 冷媒及び油系統図 油は軸受潤滑用、噴射用、シャフトシール潤滑用、すべり弁駆動用に分けて供給されるが最終的には冷媒ガスとともに分離器にもどる。

Fig. 6 Flow Diagram of Refrigerant and Oil

油分離器は横形円筒シェル式であって、油タンクを兼ねている。油分離は初段に重力を利用した分離器を置き、ここで大半の油を回収し残った微細な油粒子を第2段で十分に取り去るといふ2段分離方式を採用しており、ほぼ完全な油分離ができる。

油ポンプは、タンク内蔵形の特殊歯車ポンプを使用しており、吸込側圧力損失が少ないため、冷媒が油中に多量に溶け込んだ状態でもキャビテーションが発生せず、運転音も静粛で漏れの心配も全くない。

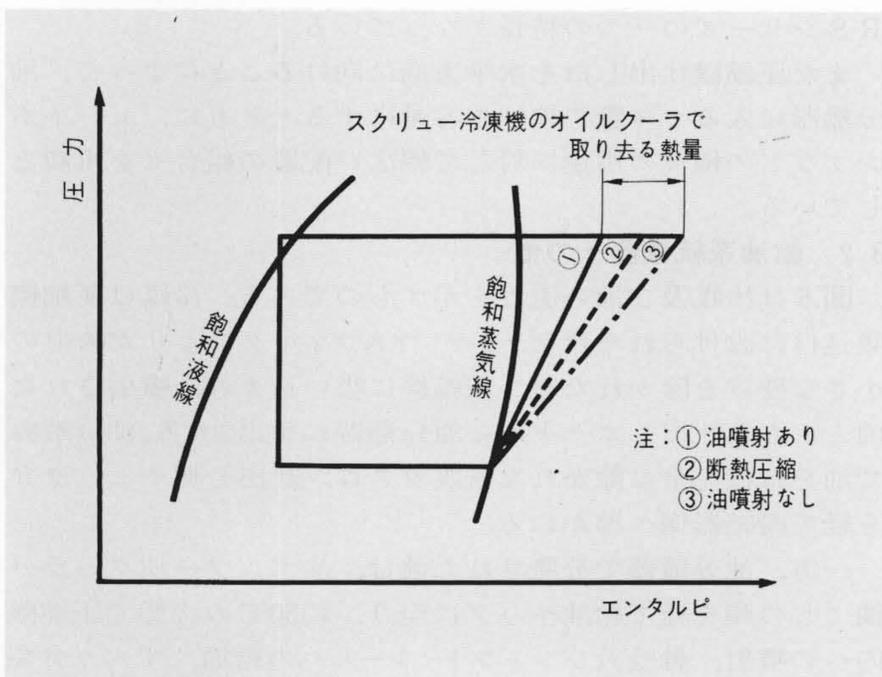


図7 油噴射の有無と圧縮過程 油噴射を行なうと油クーラでその熱を除去してやる必要があるが、その分だけ凝縮器は小さくなる。

Fig. 7 Compression Process with and without Oil Injection

油クーラは、横形シェルアンドチューブ式で油分離器シェルのわきに設置されており、通常の軸受及びシャフトシールにおける発生熱のほか、ガス圧縮に伴う発生熱の除去が必要なので、往復動式や遠心式の冷凍機と比較するとその分だけ寸法が大きくなっている。したがって、冷凍目的のみに使用する場合（暖房は除く）冷媒冷却式にすると損失が大きくなるので水冷却式を標準としている。逆に他方式と比較して凝縮器寸法はその分だけ小さくすることができる(図7)。

圧縮機各部に供給する油は、特に塵埃をきらうので、200メッシュ程度の油こしを設けている。

4 性能及び機能

4.1 圧縮機性能と種々の要因

圧縮機の性能を左右する要因には多数あるが、そのうち運転時圧力比、設計圧力比と運転時圧力比との差、凝縮温度(吐出し側圧力)、ロータ周速、油噴射量などにより大きな影響を

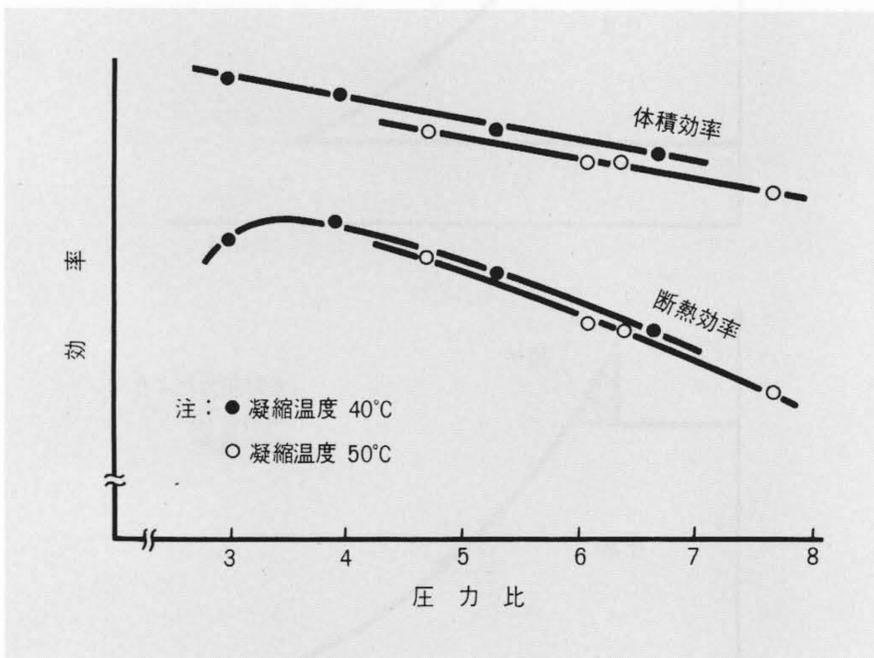


図8 圧力比、凝縮温度と圧縮機効率との関係 体積効率は、圧力比が増加するとともに減少するが、断熱効率は最大となる圧力比が中間に存在する。

Fig. 8 Relation between Pressure Ratio, Condenser Temperature and Compressor Efficiency

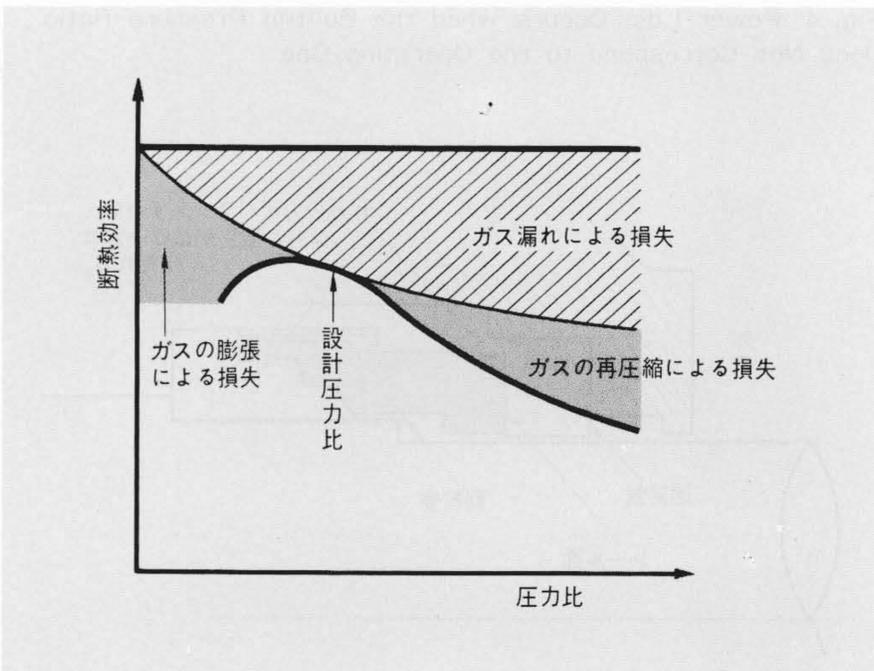


図9 断熱効率の構成 ガス漏れによる損失と、ガスの膨張または再圧縮による損失の組み合わせによって断熱効率最大の点が中間に存在する。

Fig. 9 Analysis of Total Adiabatic Efficiency

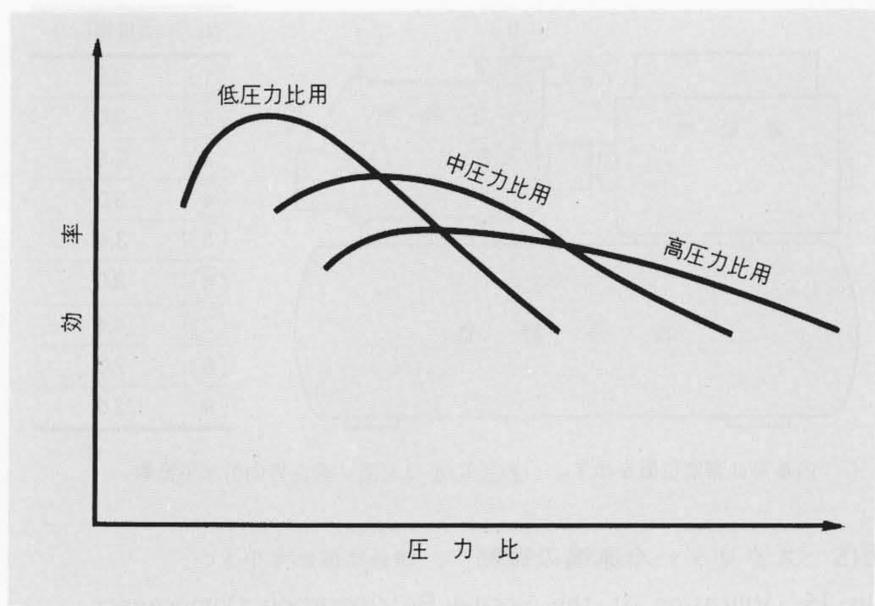


図10 吐出しポートの設計と圧力比—効率曲線 仕様圧力比に応じた吐出しポートを設計することにより効率のよい範囲を使用することができる。
Fig. 10 Application of the Optimum Discharge Port Design

示している。

図8は圧力比及び凝縮温度を変えた場合の性能変化を示すものである。同図によれば圧力比が大きくなるほど体積効率及び断熱効率は低下するが、断熱効率については最高効率を示す圧力比が中間に存在し、圧力比が低すぎるとかえって効率が低下するという傾向がはっきり現われている。これは図4に示した吐出しポートと密接な関係があり、図9に示すとおり圧力比が大きくなることによる漏れの影響と、ガスの再圧縮または膨張による損失とが重なって生ずるものである。

また、凝縮温度が高いほど効率が低下するのは、同じ圧力比でも圧力差が大きくなって漏れによる損失が増加するためである。

図10は、高圧力比用、中圧力比用及び低圧力比用の3種のケーシングについて、これらの関係をまとめたもので、仕様圧力比に見合った吐出しポートの選定が極めて重要であることが分かる。

図11は、同一圧力比についてロータ径を変えた場合の効率の変化を示したものであって、ロータ径が大きくなるに従っ

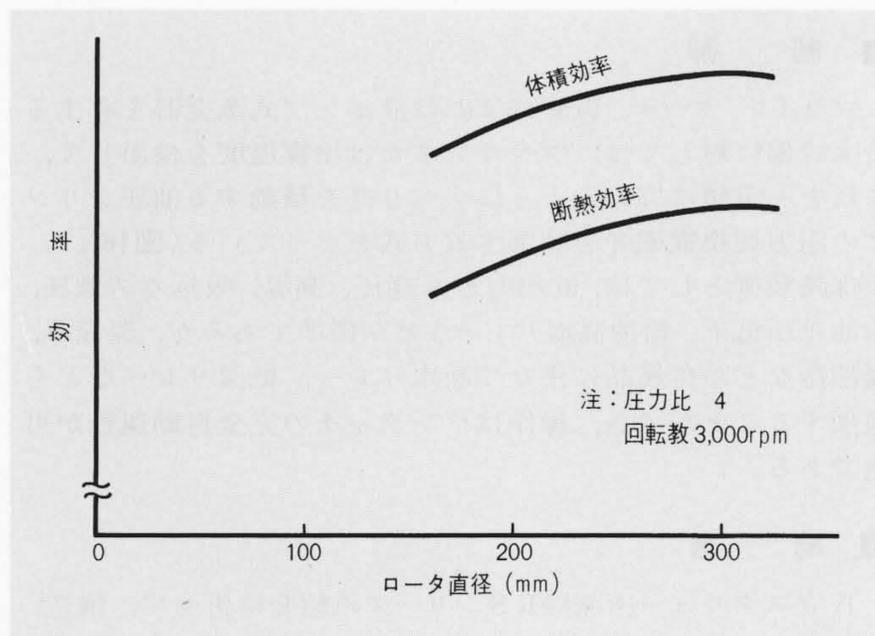


図11 ロータ直径と効率の関係 ロータ直径が大きくなると、周速が上がり、ガス漏れに対するシール効果がよくなって効率が上がる。
Fig. 11 Relation between Rotor Diameter and Compressor Efficiency

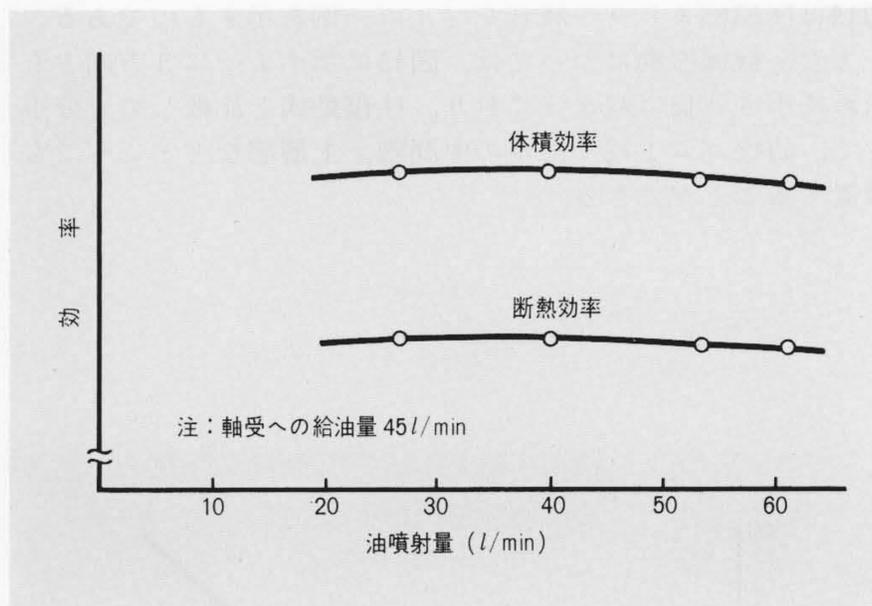


図12 油噴射量と圧縮機効率 油噴射量は極端に多いか、極端に少ない場合以外、圧縮機効率に大きな影響を及ぼさない。
Fig. 12 Relation between Oil Injection Quantity and Compressor Efficiency

て徐々に効率が上昇していることが分かる。これは、周速の上昇とともに漏れの影響が小さくなることによるものであるが、更に周速を上げると軸受部の損失が急激に増加し、断熱効率はかえって低下する傾向にある。このようなことから、実用的な冷凍機用スクリーロータの周速は25m/sから60m/s程度であると言える。

油の噴射量と圧縮機効率の関係は、図12に示すとおりである。油の噴射量は極端に少ないか、極端に多い場合に効率の低下を招くが、そうでなければ相当広範囲の油噴射量の変化に対して、ほとんど変化はない。これは、油による漏れシール効果と油が大量に入ることによるダイナミックロスとが相殺するためであると考えられる。また、噴射される油の温度が圧縮機の出口ガス温度より低い場合には、油量を増やすほど出口ガス温度を下げることができるので、噴射油量は出口ガス温度を許容値（実用的には約90℃と考えてよい。）以内に収め、かつ性能の低下が起きない範囲で少なくしている。

4.2 容量制御特性

図13は容量制御時の風量と動力との関係を示すものである。同図で明らかのように、制御時の動力特性は吸込圧力及び吐出し圧力によって大幅に変化し、圧力比が低いほど制御時動力特性は良くなってくる。

4.3 騒音と振動

スクリー冷却機の騒音は、ロータのかみ合いによっておすロータ1回転ごとに歯数4枚分だけ4回にわたって間欠的にガスが吐き出されることによって発生する音が基本となっている。したがって、2極モータ直結で駆動する場合50Hzにおいては200サイクル、60Hzでは240サイクルが基本周波数であって、これらの倍音、3倍音なども発生する。このほか、ロータが機械的に接触しつつ回転しているのであるから、ギヤの発生音と同様な回転接触音も発生する。

前者の音は、容積形圧縮機としては本質的なものであり、運転圧力条件などによっても変化するが、後者についてはロータの歯形及び加工精度が大きく影響することが分かっている。

日立RSシリーズでは、油分離器内に独特の消音器を設置して流体発生音を低減するとともに、機械音については、永年にわたる非対称歯形ロータについての多数の経験と実績を十分に生かして低騒音スクリー冷却機の開発に成功した。

図14は圧縮機まわりの騒音レベルの一例を示すものである。
 また、機械振動については、図15に示すように3方向とも極めて小さい値に収まっており、往復動式と比較して十分小さく、防振ゴム1枚でビルの中層階、上層部などどこへでも設置することができる。

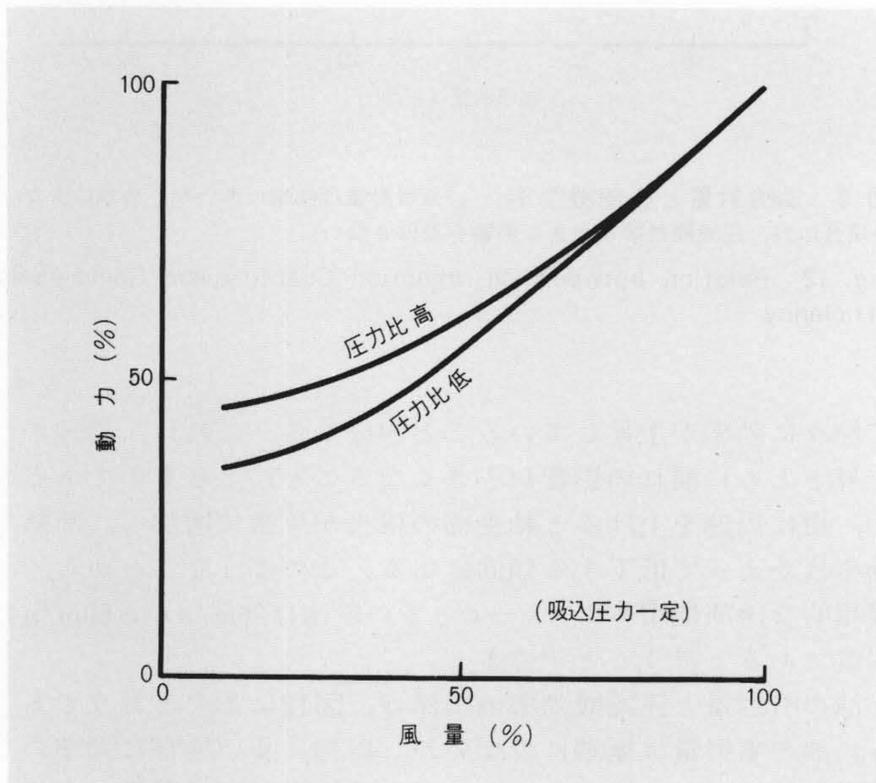


図13 容量制御時の風量-動力特性 圧力比が高いときは高压側からのガス漏れ損失が増加し、容量制御特性が悪化する。
 Fig. 13 Characteristic Curve of Capacity Control

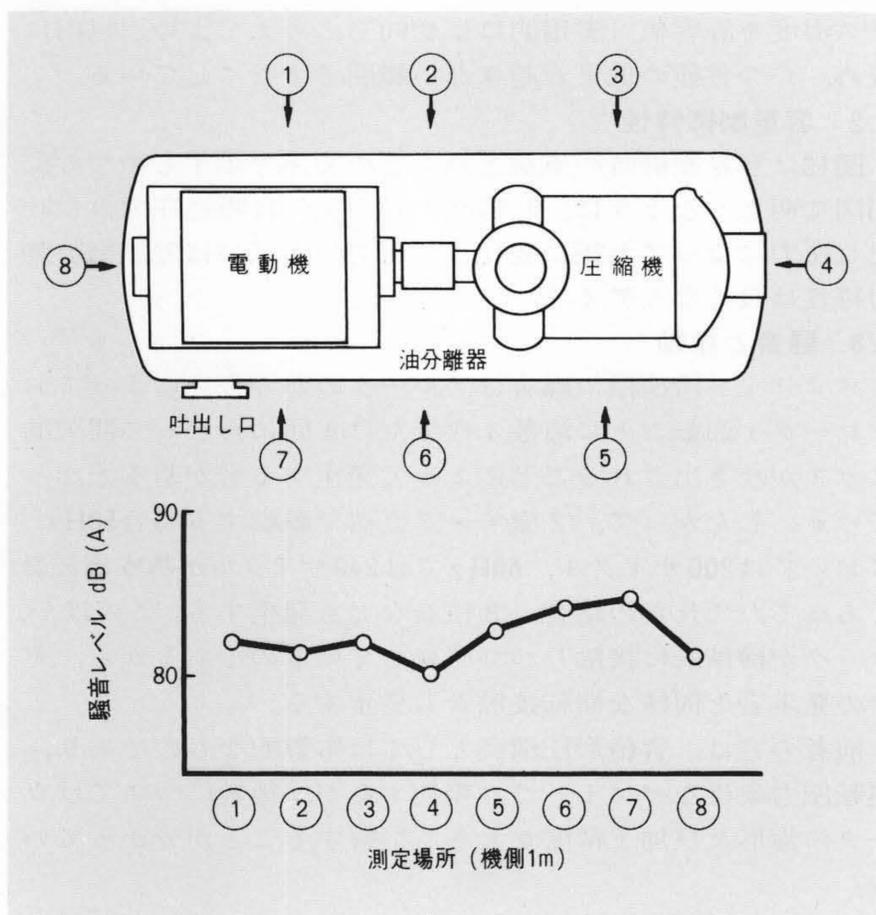
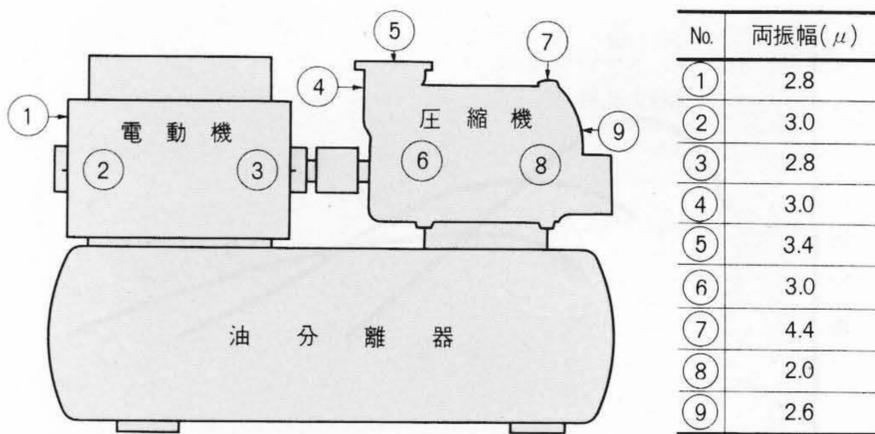


図14 スクリュー冷却機の騒音 主な騒音の発生源は、ロータのかみ合いごとに間欠的に発生するガス音である。
 Fig. 14 Noise Level of the Screw Refrigeration Compressor



注：○内番号は測定位置を示す。(②③⑥⑧)は紙面に垂直方向の水平振動

図15 スクリュー冷却機の振動 振動は極めて小さい。
 Fig. 15 Vibration of the Screw Refrigeration Compressor

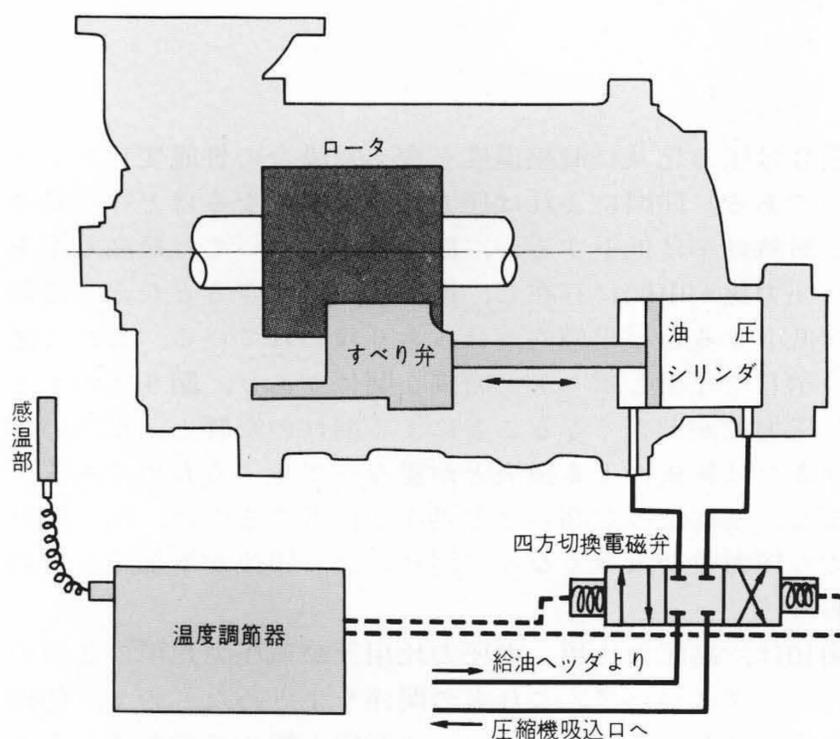


図16 四方切換弁による自動温度制御方式 温度調節器からの指示により四方切換電磁弁を操作して、自動的にすべり弁を開閉する。
 Fig. 16 Automatic Temperature Control System with Four-way Solenoid Valve

5 制御

ブラインクーラ、直膨式または液ポンプ式蒸発器を有する冷凍設備に対しては、ブラインまたは冷媒温度を検出して、これを一定値に抑えるようにすべり弁を騒動する油圧シリンダの四方切換電磁弁を制御する方式をとっている(図16)。

保護装置としては、吐出しガス高压、高温、吸込ガス低压、給油差压低下、給油高温リレーなどが標準であるが、蒸発器、凝縮器などの付属品に併せて断水リレー、低温リレーなどを追加することができ、操作はワンタッチの完全自動運転が可能である。

6 結 言

日立スクリー冷却機RSシリーズの紹介に併せて、構造、機能及び性能上の留意点について述べた。冷凍設備の大容量化、保守簡素化の傾向は今後ますます強くなっていくものと予想される。本稿が、新しい設備計画の参考に供していただければ幸いと考える次第である。