U.D.C. 621.574 :: 621.514.5] : 621.565.4

低温工業用日立スクリュー冷凍機

Hitachi Oil Injected Refrigeration Screw Compressors for Industry

竹見英男* *Takemi Hideo*

スクリュー冷凍機は，冷凍容量において往復動式と比べて1台で大容量までカバーすることができる。しかも，容量制御が無段階であること及び弁板の交換が不要であるため保守が容易であることなど，優れた特長をもっている。また，遠心式と比べて段当たり圧縮比が大きくとれ，広範な圧縮比の範囲で効率よく運転できる特長もある。これらの特長からスクリュー冷凍機は，低温用，ヒートポンプ用などの比較的圧縮比が大きい用途に適している。本稿は，低温工業用向けにシリーズ化した日立スクリュー冷凍機の特長を紹介し，新しい冷凍設備計画の参考に供するものである。

1 緒　　言

スクリュー冷凍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。しかし，現在ではスクリュー冷凍機は，化学プラントをはじめとする工業用及び大量の食料品の冷凍，冷蔵に用いられる大形冷蔵倉庫用などに，従来用いられてきた往復動式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認識されるようになるとともに，燃焼ガス中の種々の成分が問題となるボイラなどに代わって空気熱源式ヒートポンプ冷暖房装置が脚光を浴びてきている。この分野においても1段で高圧縮比が得られ，且つ圧縮比などの運転条件の広範な変化に対して安定した運転ができるスクリュー冷凍機が広く使用されるようになっている。日立製作所は，既にスクリュー冷凍機用圧縮機のユニットを，いろいろな冷凍設備用として納入してきたが，今回，特に低温工業用向けに適合するブライン クーラ(ブライン冷却用エバポレータ)を開発し，これと組み合わせたスクリュー冷凍機の新シリーズを完成した。本機は油分離器の上に圧縮機，電動機を配置し，オイルクーラなどの給油装置をも含めて一体にまとめ，またブラインクーラには，大容量の熱交換器として熱伝達の点でもブライン側チューブ表面のスケール除去などの保守面でも有利とされている満液式クーラを採用している。ちなみに従来，スクリュー冷凍機では，冷媒に混入して循環する潤滑油を，圧縮機の油系統に戻すために，保守面で不利とされるドライ エクスパンション式クーラをやむなく採用する傾向にあった。本稿では，低温工業用日立スクリュー冷凍機の構造及び特長を，ブライン冷却器を中心に説明する。

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。

区分 / 項目	スクリュー式	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

2 主な特長

スクリュー冷凍機の一般的な特長を**表1**に示す。低温工業用日立スクリュー冷凍機は，これら一般的特長に加えて，更に，(1)二重ケーシング採用による低騒音化，(2)ユニット化による現地据付工数の低減，(3)満液式ブラインクーラの採用による保守の簡便化などの新機軸を折り込んでいる。

2.1 低騒音設計

最近，騒音が公害問題として大きく取り上げられており，騒音の低下は重要なポイントである。このため，圧縮機内で発生する音の外部への伝搬を，できるだけしゃ断する構造が望ましい。本シリーズでは本体ケーシングを二重構造化(ロータを囲むケーシングと，外部ケーシング)したこと，ケーシング肉厚を必要とするしゃ音量に対して十分とったこと，油分離器との配管を極力短縮したこと及び油分離器の圧縮機吐出しガス流入部には，消音器を内蔵させたことなど，種々の騒音低減策が折り込まれている。

2.2 装置のユニット化

この種の冷凍機において，現地据付工程短縮，工費節減を期すには，冷凍機本体と補機類とをユニット化することが有効である。しかし，冷凍設備面からの要求仕様が多様なため，スクリュー冷凍機に限らず往復動，あるいはターボの場合においても，圧縮機ユニット以外の部分がその都度設計製作されることになり，従って，工場出荷時には本体及び補機類が幾つかの部分に分割され，現地で再組立されることが多いのが実状である。今回の新シリーズ開発では，スクリュー冷凍機全体をユニット完成品として標準化を図るとともに，小容量機では工場完成ユニットの状態で一体搬入とし，大容量機では輸送上の寸法制限から分割を要する場合でも2分割にとどめるようにした。

* 日立製作所土浦工場

2.3　満液式ブラインクーラの採用

ブラインクーラとしては，伝熱管内部で冷媒が蒸発し，管の外部にブラインが流れるドライ エクスパンション式と，管内にブラインが流れ，管の外部で冷媒が蒸発する満液式とがある。ドライ エクスパンション式には，ブラインの流れる側(伝熱管外側)の構造物に耐食処理をする必要があり，且つ保守面で伝熱管のスケール除去が困難な欠点がある。従って，保守面の容易な構造としては，満液式が圧倒的に優れている。しかし，油噴射式スクリュー冷凍機では，冷媒に油が混入するため冷媒蒸発過程で冷媒液側に油の蓄積されることを避ける構造のブラインクーラを必要とする。従来，油の蓄積を避ける面では，ドライ エクスパンション式が蒸発冷媒の流速を大きく採用できるため有利な方法とされてきた。本シリーズでは，満液式を採用し，且つ油分を自動的に圧縮機へ戻すことを重要なポイントとした。

表2に低温工業用日立スクリュー冷凍機シリーズの能力表を，**図1**に同冷凍機の現地据付写真を示す。

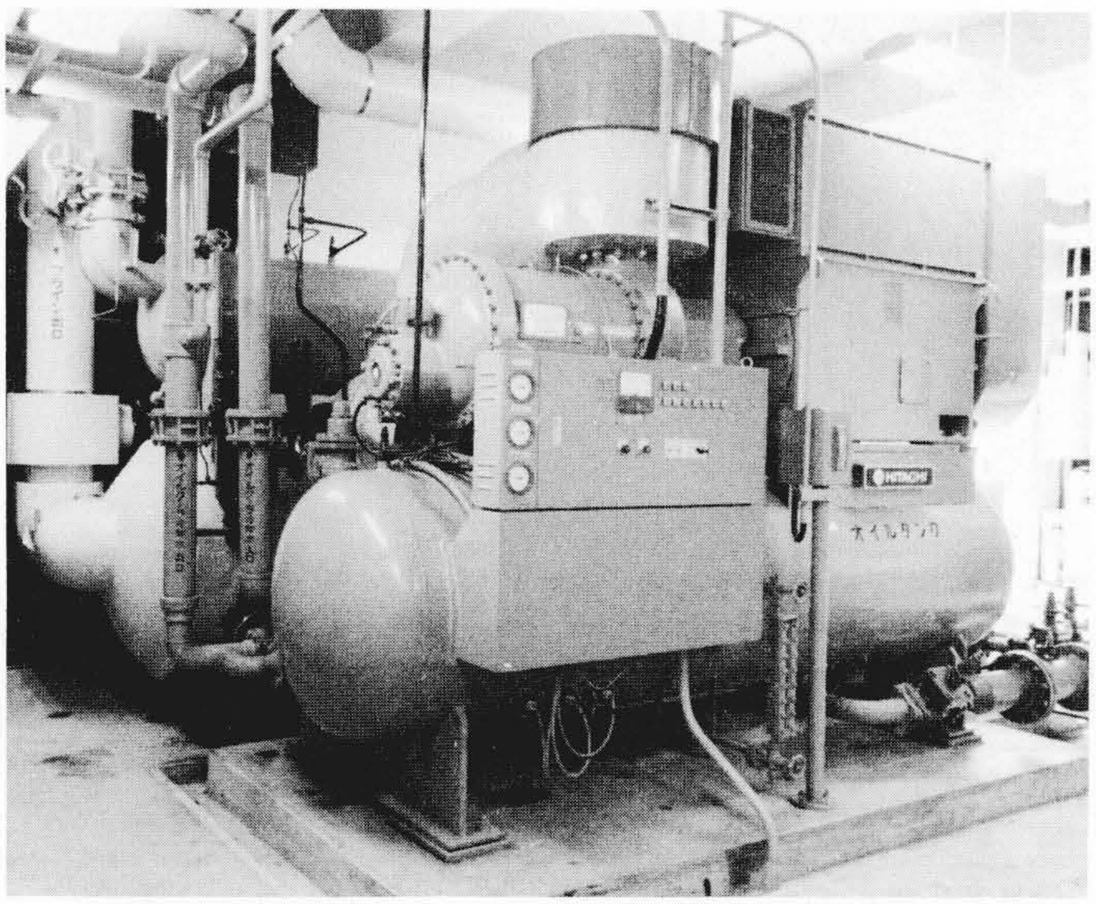


図1　スクリュー冷凍機正面外観　圧縮機と電動機を油分離器上に積載したコンパクトな配置となっている。

3　構　造

3.1　圧縮機

冷凍機の心臓部ともいえる圧縮機の構造は，**図2**に示すとおりである。ケーシングの内部には，互いに大きくねじれた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を水平に並べてかみ合わせている。駆動は，おすロータ側から行なわれる。ロータは軸受によってケーシングに接触しないよう支えられているので，歯とケーシング部の摺動による摩耗を生じない。ロータとケーシングのすきま及びロータ背隙は，ガスを圧縮する場合のガス漏れの原因となるので，二つのロータのかみ合い点に油を噴射して油膜ですきまを密閉させる。それによって高い圧縮比でも体積効率の低下を防ぐとともに，圧縮により発生する高温ガスを冷却して吐出し温度を下げることができ，常に効率の良い運転が行なえる。ガスの圧縮によってロータ軸方向に発生するスラスト

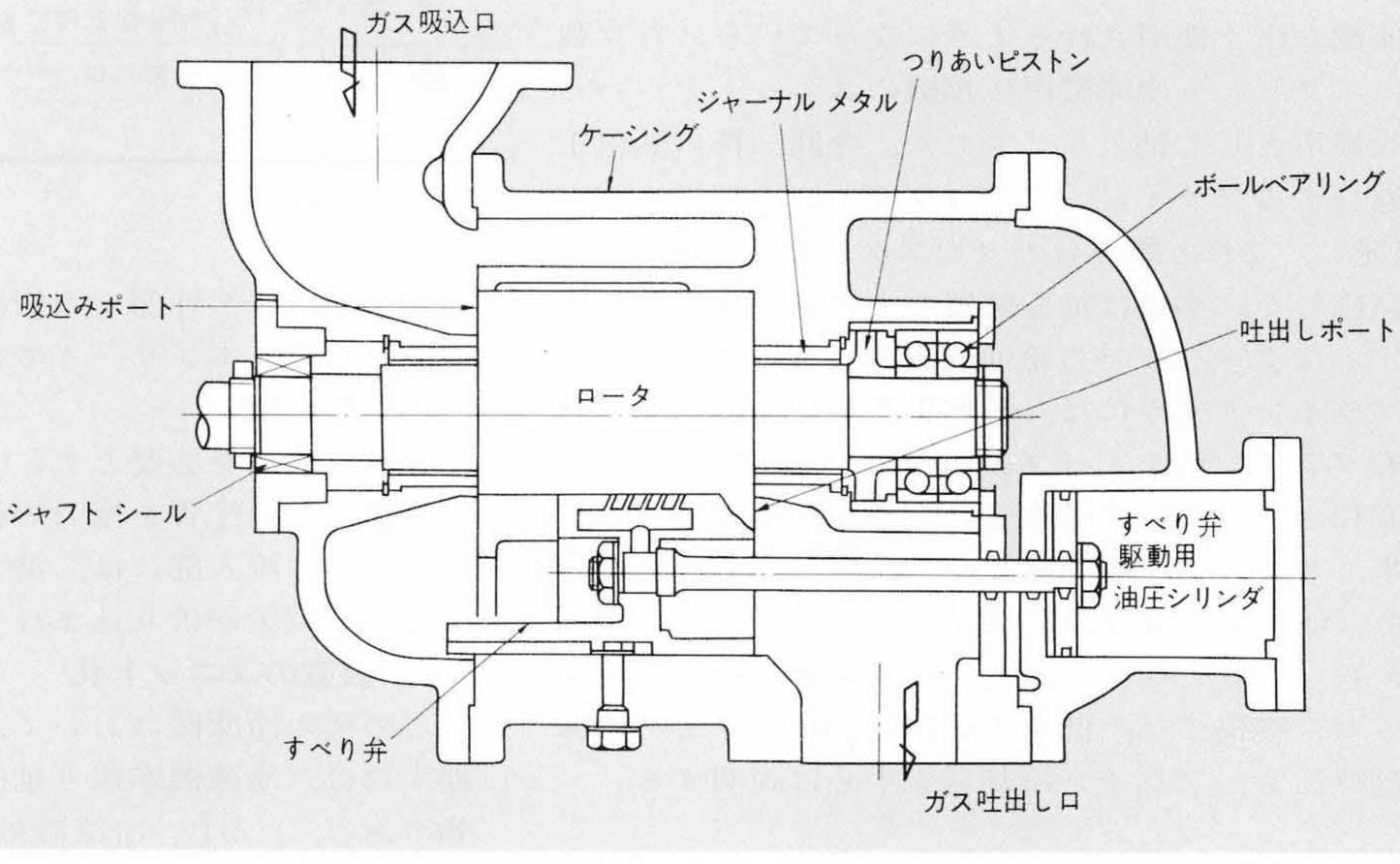


図2　圧縮機断面構造図　点検個所の少ない単純な機構を採用している。

表2　低温工業用日立スクリュー冷凍機シリーズ能力表(フロン22の場合)　フロン12，NH_3など，その他の冷媒も使用できる。

項　目	単　位	RS-16L-B	RS-21S-B	RS-23S-B	RS-25S-B	RS-27S-B	RS-30S-B	RS-27-B	RS-30L-B	RS-32L-B
能　力	RT	80 100	116 143	160 197	207 249	263 316	342 410	418 496	542 641	666 789
軸動力	kW	118 145	162 199	219 269	278 333	349 418	453 544	550 653	714 845	878 1,040

注：ブライン入口温度0℃・ブライン出口温度－5℃，冷却水入口温度32℃・冷却水出口温度37℃上段50Hz，下段60Hz，回転数はいずれも50Hz 2,950rpm及び60Hz 3,540rpm，使用ブライン　塩化カルシウム水溶液

荷重は，ロータ端部に設けられたつりあいピストンでほとんど打ち消され，微小のスラスト荷重は，ロータ軸端のボールベアリングで支持される。

圧縮機ケーシングは，**図3**に示すような円形断面の二重構造を採用している。このため運転中の熱による変形及び圧縮ガスの圧力による変形が最小限度に抑えられ，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ことができる。またこの構造は，二重ケーシングによるしゃ音効果が大きく日立スクリュー冷凍機シリーズの一つの特長となっている。

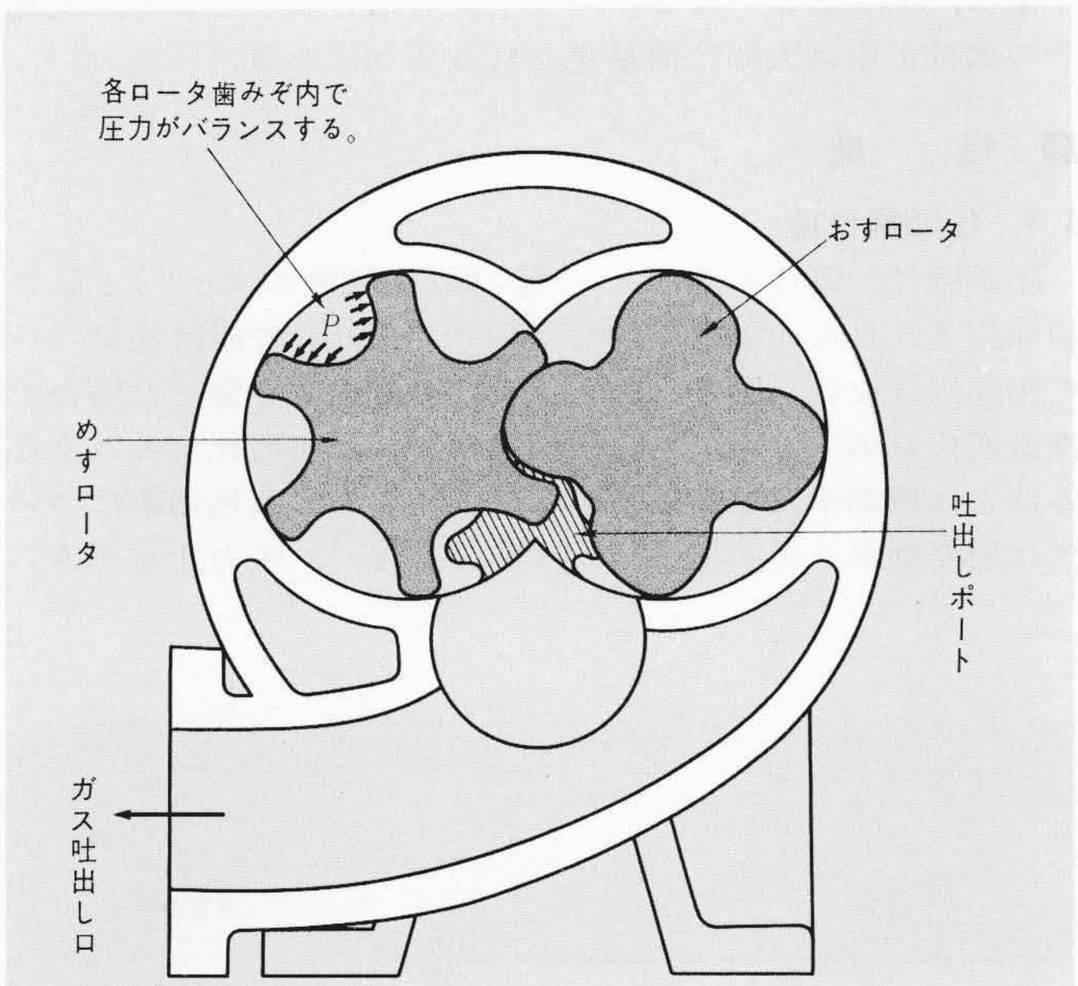


図3　ロータのかみあい　おすロータは2極の電動機で直結駆動され，めすロータはおすロータにより駆動される。

3.2　油分離器

油分離器は横形円筒シェル式で，油タンクを兼ねており，その断面構造を**図4**に示す。圧縮機より油分離器に流入したガスは，分離器内に内蔵された消音器により減音される。また油を含むガスは，油分離器内で初段に重力を利用した分離が行なわれ，ここで大半の油が回収される。残った微細な油粒子は，分離エレメントでのろ過作用により取り去るという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。

3.3　冷媒及び油系統

本シリーズの冷媒及び油の流れを**図5**に示す。

ブラインクーラで蒸発した冷媒ガスと，油回収器で回収された油分を含むガスが圧縮機に吸い込まれ，ロータに噴射さ

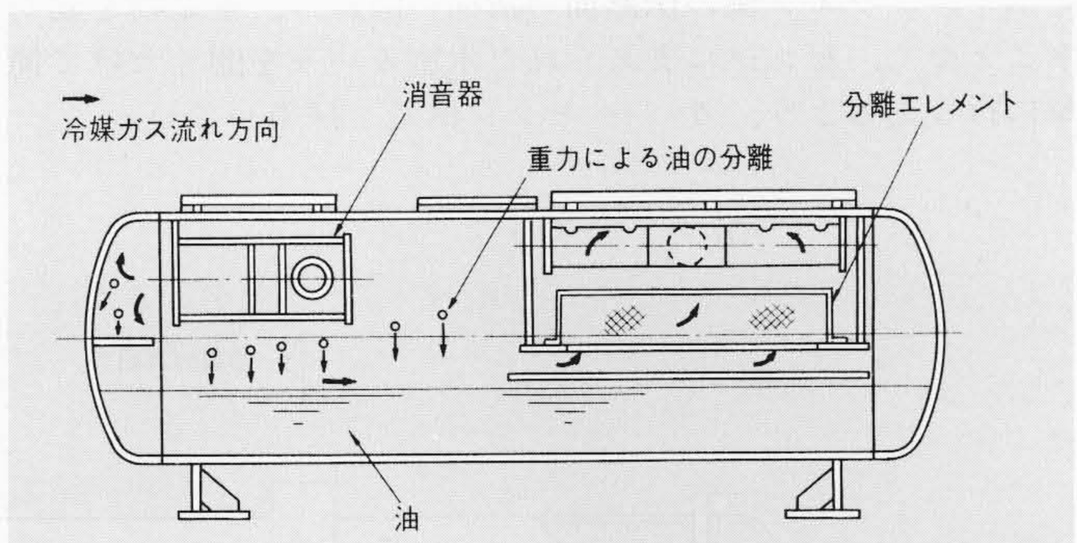


図4　油分離器の構造　消音器を内蔵し，分離部分に十分なスペースを取っている。

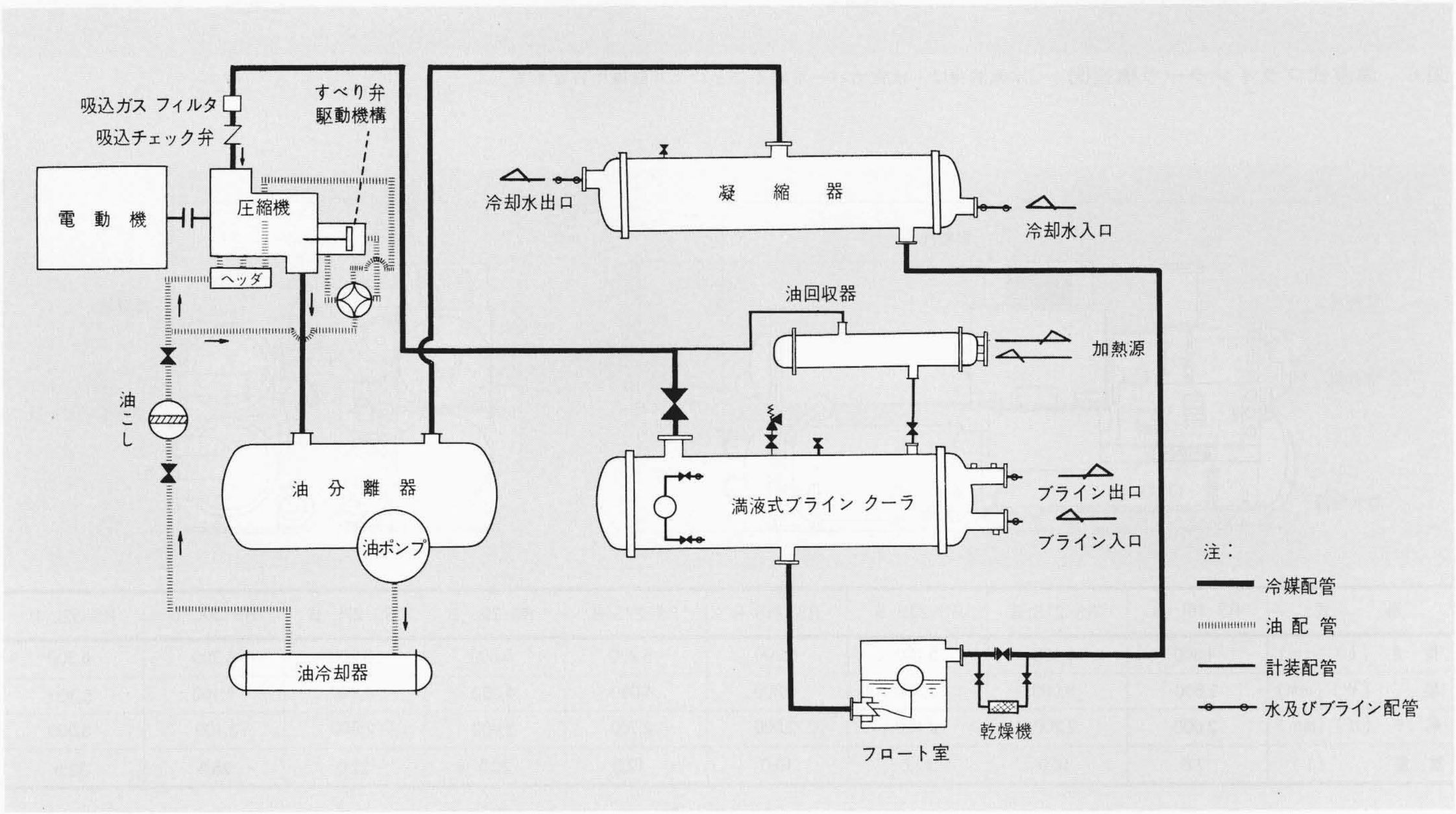


図5　低温工業用スクリュー冷凍機標準フローシート　油は軸受潤滑用，噴射用，シャフトシール潤滑用，すべり弁駆動用に分けて供給されるが，最終的には冷媒ガスとともに分離器に戻る。

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。圧縮機吸込口には，サクション ガス フィルタを設置し，ガス中の小さな塵埃を除く。油分離器で油を効率よく分離した冷媒ガスは，凝縮器に導かれる。凝縮器で液化した冷媒は，フロート室を経て満液式のブラインクーラに入り，ここで再び蒸発する。この循環を繰り返して，冷凍サイクルが形成される。ブラインクーラに冷媒とともに流入した微量の油分は，冷媒液とともに油回収器に導かれ，ここで高温の熱源によって冷媒液を加熱蒸発させる。微量の油分は，蒸発した冷媒ガスとともに圧縮機吸込口へ戻される。一方，油分離器で分離された油は，油ポンプ，油クーラ及び油ストレーナの順を経て給油ヘッダに至り，油温が約45℃の状態で圧縮機内への噴射，軸受及びシャフト シールへの給油，すべり弁駆動用に供給される。いずれの経路をたどった油も，最終的には圧縮されるガスとともに排出され，油分離器内の油タンクに戻る。

3.4　ブラインクーラ

図6に本シリーズで採用した満液式ブラインクーラの構造を示す。ブライン側の伝熱面の清掃の際には，重量物を動かすことなく，ヒンジに支えられた水室カバーを開くだけで簡単に行なえるよう，カバー ヒンジ構造を採用している。

3.5　機器の配置

低温工業用日立スクリュー冷凍機の全体配置及び寸法を**図7**に示す。本シリーズのユニット化に当たり立体的な配置を採用することによって，据付面積の減少を図っている。全体配置は，油分離器上に圧縮機と電動機をまとめ，ブラインクーラ上に凝縮器をまとめることよりなる。工場から製品を出荷する単位としては，小容量機では一体に，大容量機でも圧縮機と電動機と油分離器のユニット及び凝縮器とブラインクーラのユニットの2分割としている。このため現地での組立作業は，不要あるいは2ユニット間の結合だけとなり，現地での据付工事は大幅に簡易化されることになる。

4　性　　能

4.1　圧縮機性能

圧縮機は，既にスクリュー冷凍機(圧縮機ユニット)として製品化されたものと基本的には同じであり，性能特性について相違点はない。**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，圧力比が小さい

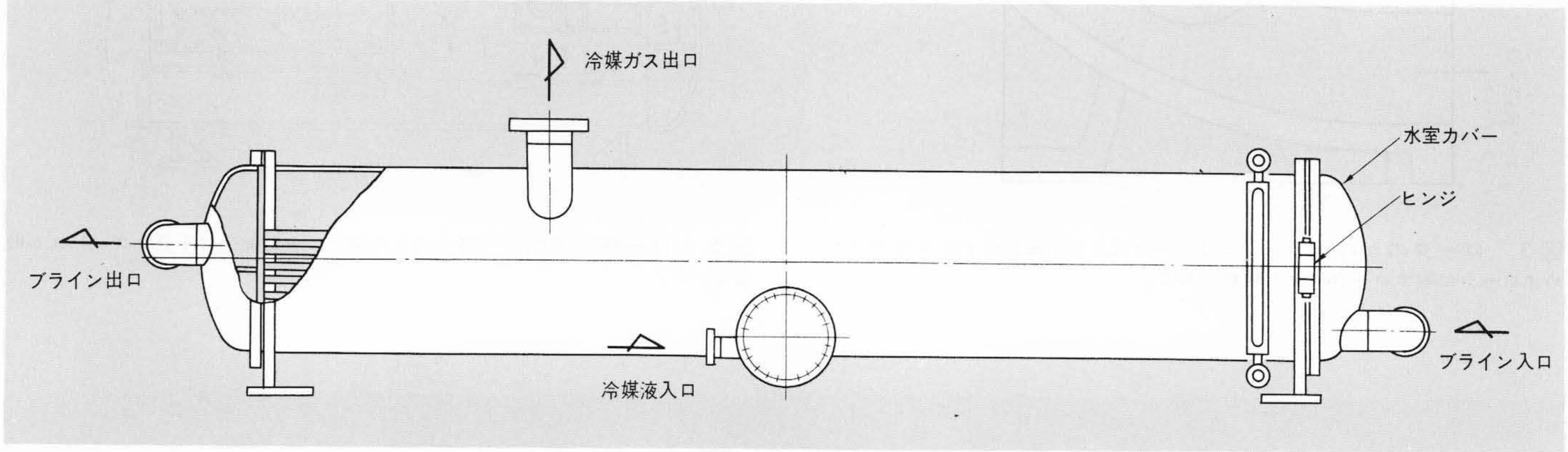
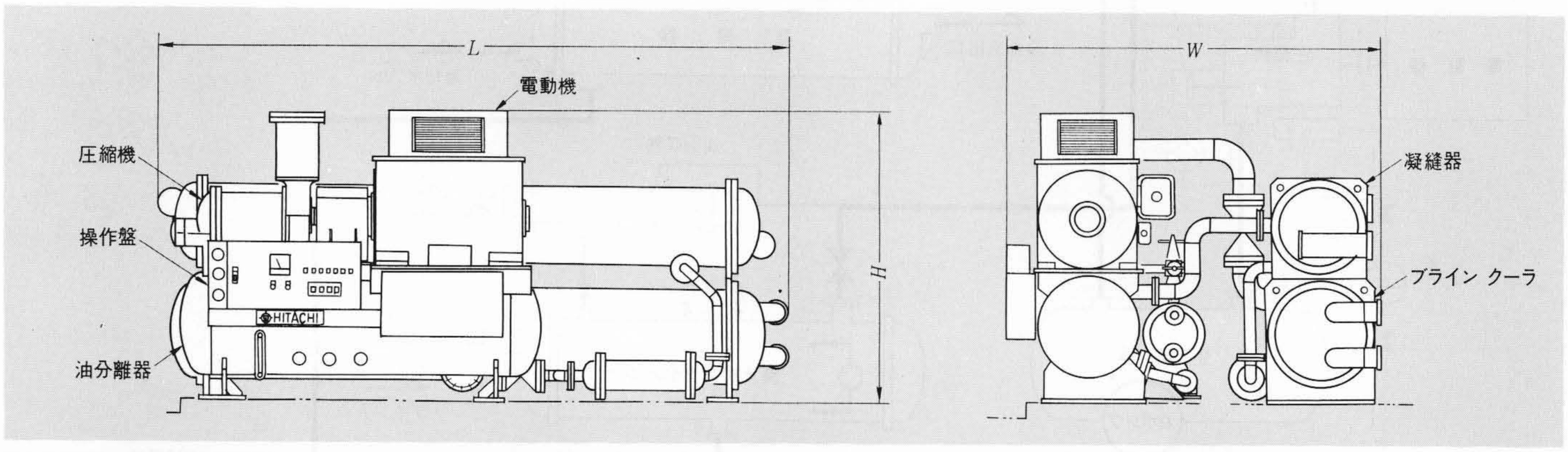


図6　満液式ブラインクーラ構造図　　水側清掃は，水室カバーを開くことにより簡単に行なえる。



形　　式	RS-16L-B	RS-21S-B	RS-23S-B	RS-25S-B	RS-27S-B	RS-30S-B	RS-27L-B	RS-30L-B	RS-32L-B
長　さ　(*L*)　(mm)	4,300	4,400	5,100	5,200	5,200	5,300	6,200	6,300	6,300
幅　　(*W*)　(mm)	2,600	3,000	3,350	3,800	4,050	4,550	4,750	5,100	5,300
高　さ　(*H*)　(mm)	2,000	2,200	2,400	2,500	2,700	2,900	2,800	3,100	3,500
重　量　　(t)	7.6	10.0	12.5	15.0	17.0	20.5	22.0	26.5	32.5

図7　スクリュー冷凍機全体配置図及び寸法　　据付スペースを小さくするため，平面的な配置を避け，立体的な配置を採用している。

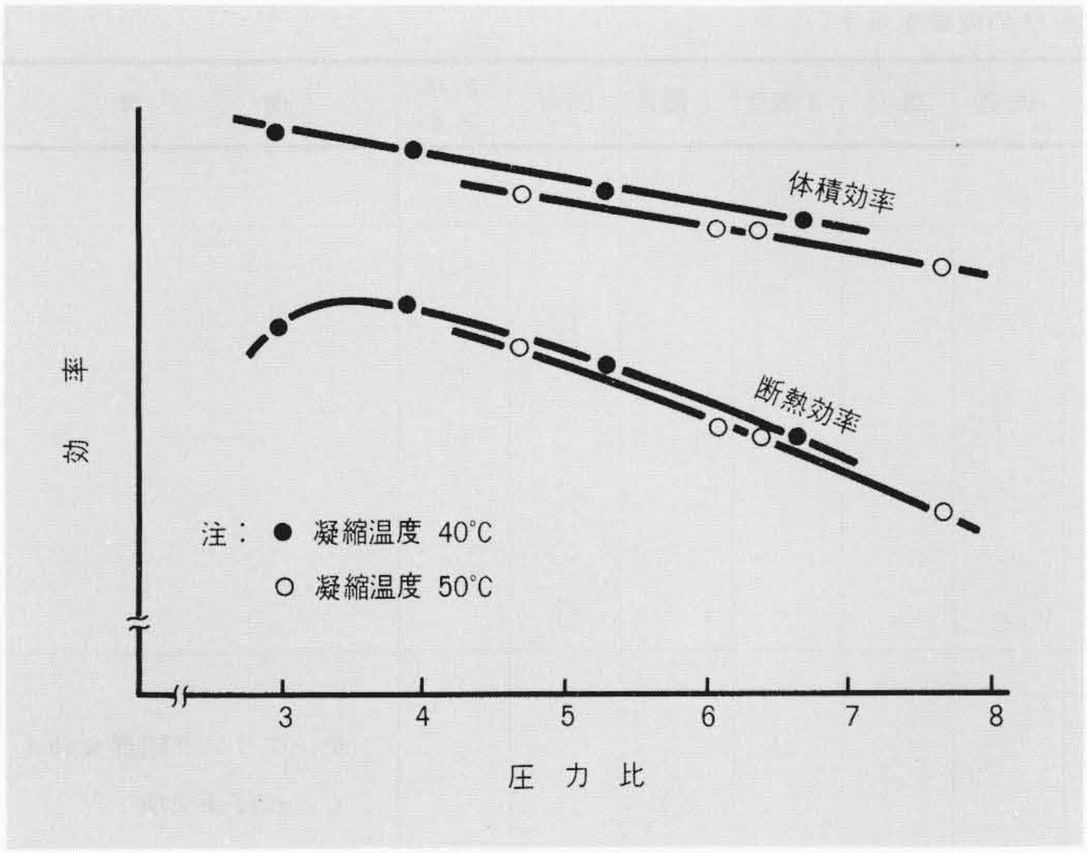


図8　圧力比，凝縮温度と圧縮機効率との関係　　体積効率は，圧力比が増加するとともに減少するが，断熱効率は最大となる圧力比が中間に存在する。

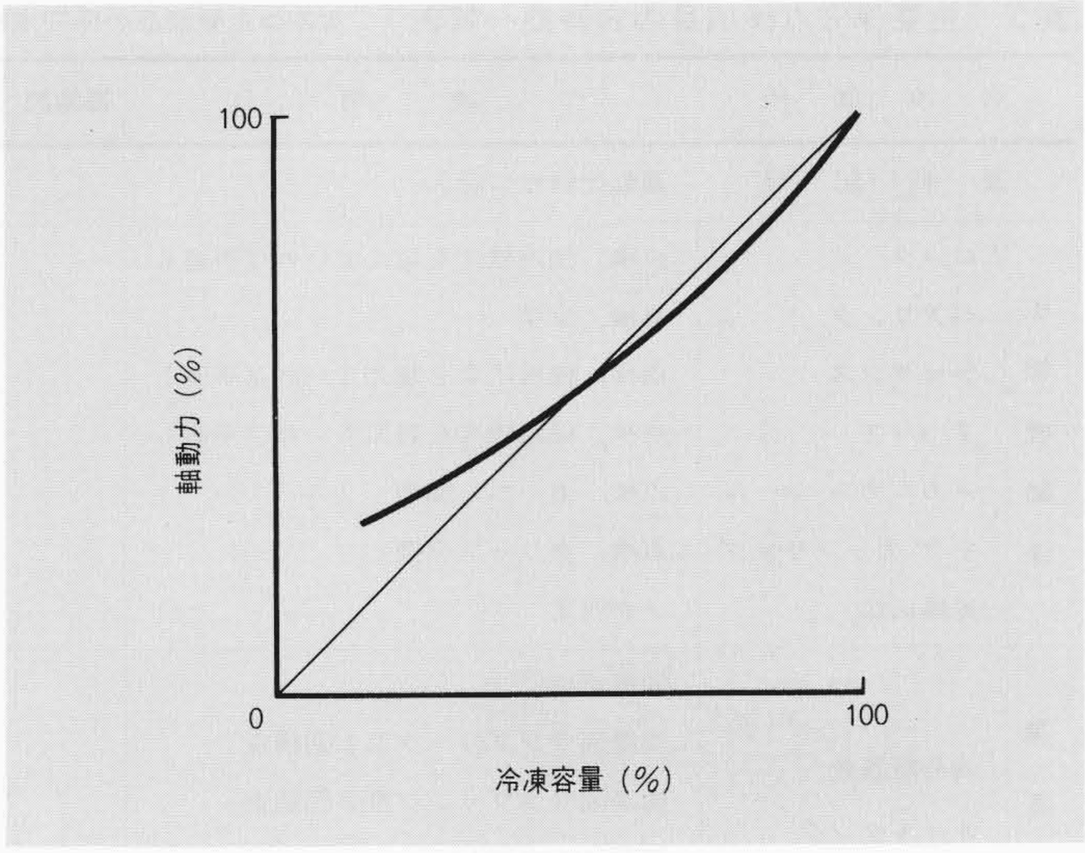


図10　容量制御特性　　低容量まで効率よく制御できる。

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。これは吐出しポートの選定と密接に関係しており，本シリーズでは，設計圧力比に最高効率点が合致するように吐出しポートを選定している。

4.2　容量範囲

図9は，低温工業用日立スクリュー冷凍機のブライン温度に対する容量範囲の概要を示す。ブライン出口温度が−20℃以下の場合には，スクリュー圧縮機の圧縮比が大きくなるため効率が低下し，消費動力が急増するので2段形にすることが望ましい。

4.3　容量制御と軸動力

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。これにより100％～約10％の範囲内で無段階に効率よく制御することが可能である。**図10**に，本シリーズの冷凍機の冷凍容量と軸動力との関係を示す。

4.4　騒音と振動

スクリュー冷凍機の騒音は，ロータのかみあいにおいて，おすロータ1回転ごとに歯数分だけ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大半を占める。従って，本機の騒音は，2極モータ直結で駆動する場合には，50Hz地区では200Hz，60Hz地区では240Hzが基本周波数である。更に，これらの倍音，3倍音などが伴う。このほか，ロータが機械的に接触しながら回転しているため，ギヤの発生音と同様な回転接触音も発生する。日立スクリュー冷凍機シリーズでは，開発当初より低騒化を念頭において，加工精度向上による発生原音の減少及びケーシングによるしゃ音や，油分離器内の消音器設置など，透過音対策に最大限のくふうを図っている。**図11**は，低温工業用日立スクリュー冷凍機の騒音レベルの一例を示すものであって，スクリュー冷凍機としては良好な水準にある。**図12**は機械振動測定の一例であるが，測定値は3

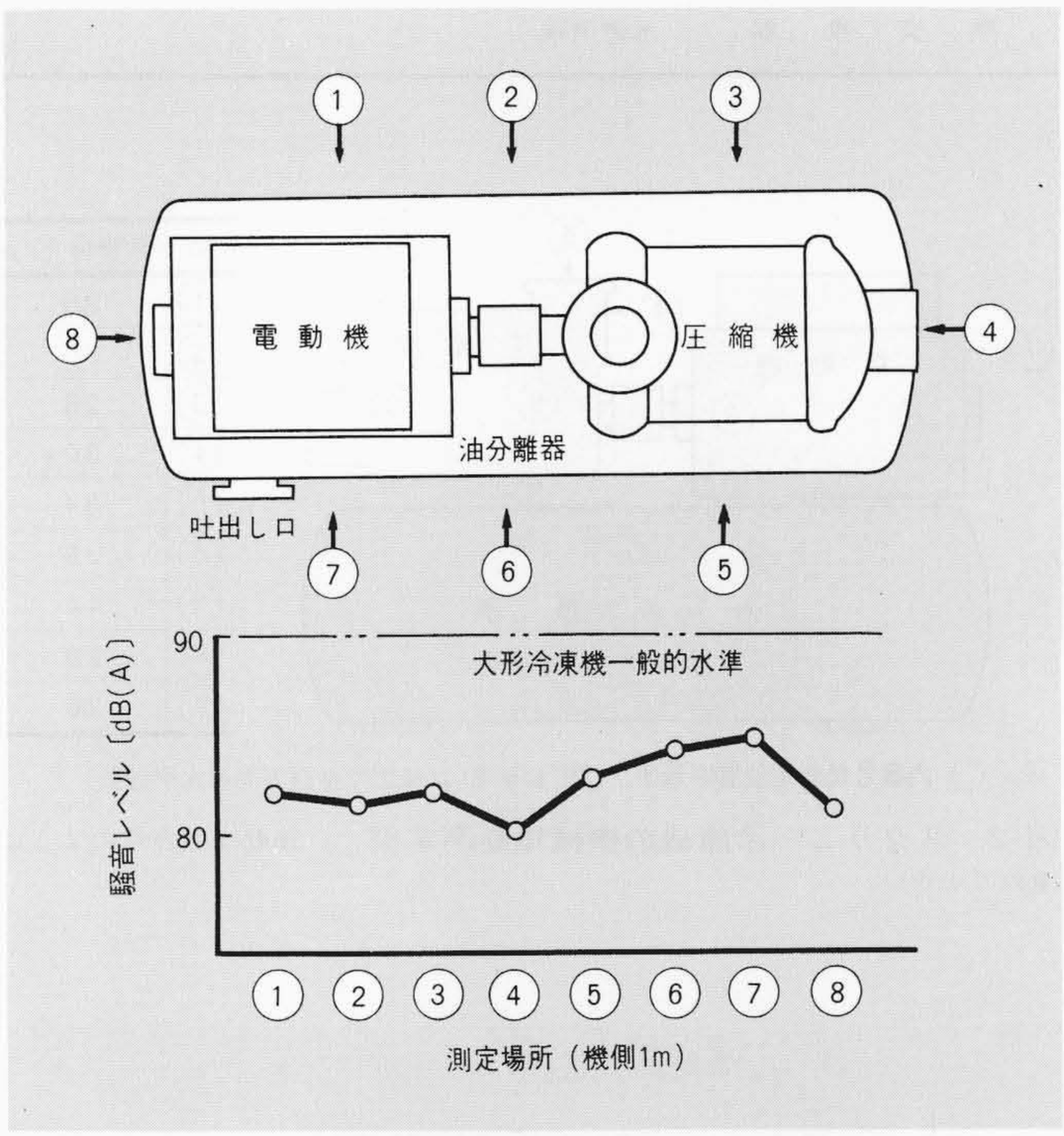


図11　スクリュー冷凍機の騒音　　主な騒音の発生源は，ロータのかみあいごとに間欠的に発生するガス音である。

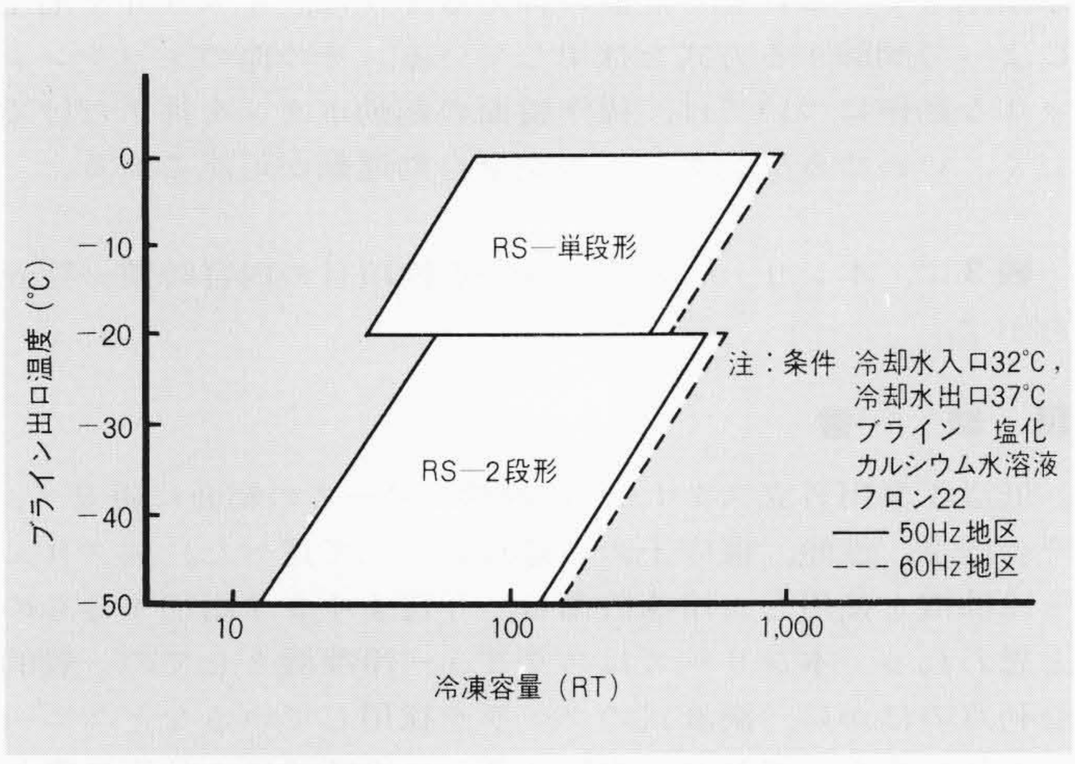
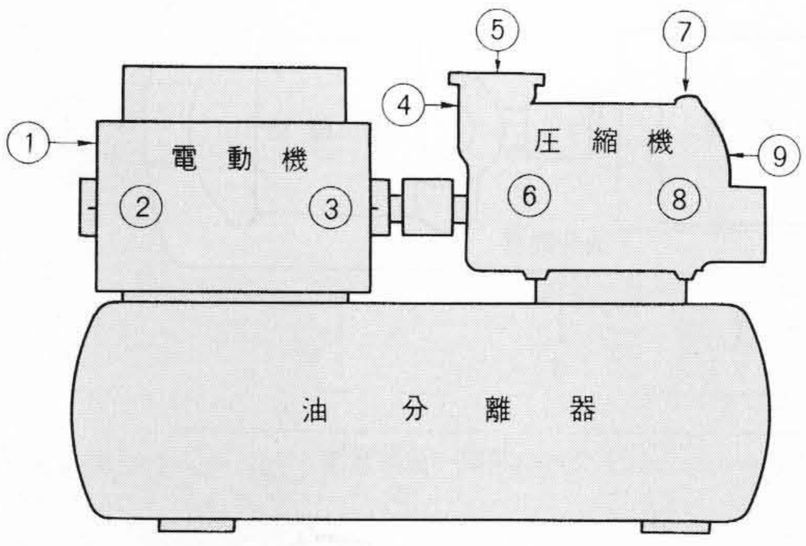


図9　低温工業用日立スクリュー冷凍機容量範囲　　ブライン出口−20℃以下の場合には，2段形を使用したほうが運転コストの面で有利である。

表3　主要保守点検項目内容時期一覧表　　本表は主要部品の保守点検のピッチの概要を示す。

点検個所		作業項目	毎時間	毎日	毎週	毎月	3個月	6個月	毎年	2年ごと	備考
運転記録		運転記録紙に記入	○								――
圧縮機関係	ロータ	点検，使用限度を超えていれば手直し								○	
	ベアリング	点検，交換							○		
	ラビリンス	点検，使用限度を超えていれば手直し								○	
	すべり弁	点検，使用限度を超えていれば手直し								○	――
	メカニカル シール	点検，カーボン交換							○		
	ギヤ カップリング	点検，グリース交換							○		
	絶縁抵抗	メグ測定							○		
潤滑油系統	油分離器兼オイルタンク	油量点検		○							
		潤滑油サンプリング第1回調査					○				サンプリング限界を超えていれば油交換
		潤滑油サンプリング第2回調査						○			
		潤滑油の交換								○	
		内部清掃								○	
	油ポンプ	分解点検							○		――
	ストレーナ	エレメント清掃							○		――
熱交換器		水側清掃							○		水質により点検ピッチが異なる。



No.	両振幅 (μ)
①	2.8
②	3.0
③	2.8
④	3.0
⑤	3.4
⑥	3.0
⑦	4.4
⑧	2.0
⑨	2.6

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12　スクリュー冷凍機の機械振動測定例　　振動は図表示のように極めて小さい。

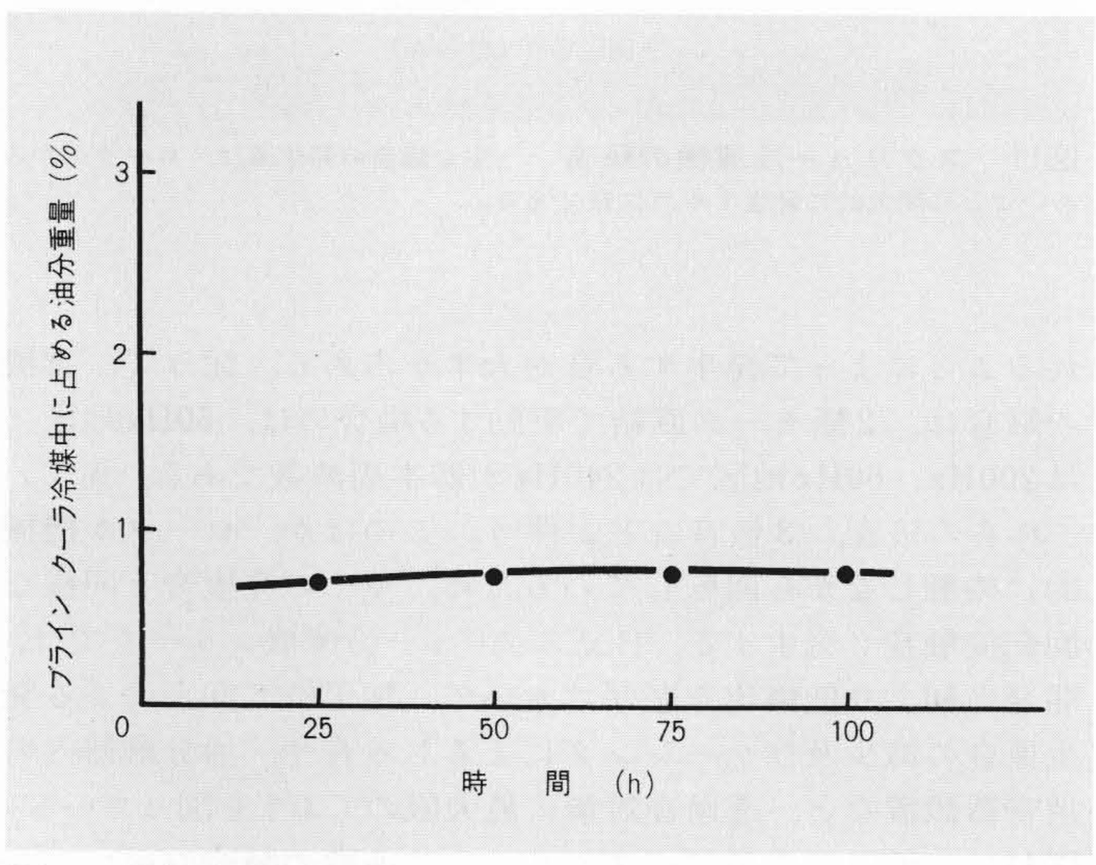


図13　運転時間とブラインクーラ冷媒中に混入した油分重量　　混入油分は短時間で安定し，長時間での冷凍能力低下の心配はなく，安定した運転ができる。

方向〔垂直方向(V)，水平方向(H)，軸方向(A)〕とも極めて小さい。従って，防振ゴム1枚を，本機と床の間に敷設することにより防振可能であるため，基礎に費用をかけないで本機を設置することができる。

4.5　連続運転中の油分離

既に述べたように満液式のブラインクーラの採用において，最も重要な課題は，冷媒中の油分の除去技術である。**図13**は，本シリーズの運転時間とブラインクーラ冷媒中に溶け込んだ油分の重量%を示す。一般に，クーラの冷媒中の油分は，2～3%までは，冷凍容量に悪影響を及ぼさないとされているが，同図では，1%以内で時間経過とともに安定する傾向にあり，十分満足できる状態である。

5　保護装置及び保守

保護装置としては，吐出しガス高圧，高温，吸込ガス低圧，給油差圧低下，給油高温，ブライン断水などのリレーを操作盤及び計器盤に収めている。容量制御は，ブライン出口温度を検出して，これを一定値に抑えるように，すべり弁を油圧によって制御する方式を採用している。その他のシーケンシャルな動作については，操作盤面の起動ボタンを押すだけでよく，いわゆるワンタッチの完全自動運転が可能である。

表3に，本シリーズの主要保守点検項目の内容時期一覧表を示す。

6　結　　言

低温工業用日立スクリュー冷凍機シリーズの紹介に併せて，その構造，性能，保守上の留意点について述べた。スクリュー冷凍機を使用した冷凍設備は，今後ますます増加するものと思われる。本シリーズはスクリュー冷凍機としての一般的な利点のほかに，満液式のクーラを採用しているなどユニークな特長をもっており，本稿を新しい冷凍設備の計画に際し参考に供していただければ幸いと考える次第である。