

明 細 書

発明の名称： 冷凍機及び冷凍機の予冷時の運転方法

技術分野

[0001] 本開示は、冷凍機及び冷凍機の予冷時の運転方法に関する。

背景技術

[0002] ブレイトンサイクルを冷凍サイクルに用いることによって極低温を実現でき、例えば、超電導機器の冷却、各種ガスの液化、液体窒素の代替などとして利用可能な冷凍機が医療や食品などの各種技術分野で実用化され、大きな注目を集めている。

[0003] この種の冷凍機の一例としては、冷却対象を冷媒との熱交換によって冷却する冷却部と、冷媒を圧縮するための低段圧縮機と、冷媒を圧縮するための中段圧縮機及び冷媒を膨張させるための膨張機を一体化した膨張機一体型圧縮機と、冷媒をさらに圧縮するための高段圧縮機と、上記複数の圧縮機、膨張機、冷却部等に冷媒を給送して循環させる冷媒循環ラインと、を備えて構成したものがある（例えば、特許文献1参照）。なお、膨張機一体型圧縮機は、中段圧縮機と膨張機ではなく、高段圧縮機と膨張機を一体化して構成されている場合もある。

[0004] 上記のように構成した冷凍機では、例えば、モータによって回転駆動する低段圧縮機で一段圧縮した冷媒が熱交換器で冷却された後、中段圧縮機に送られ、モータによって回転駆動する中段圧縮機でさらに圧縮される。中段圧縮機で二段圧縮した冷媒は、熱交換器で冷却された後、モータによって回転駆動する高段圧縮機でさらに圧縮される。高段圧縮機で三段圧縮した冷媒は、熱交換器で冷却された後、冷熱回収熱交換器でさらに冷却されて膨張機に送られ、膨張機によって冷媒自体が断熱膨張して低圧低温となる。

[0005] 低圧低温となった冷媒は冷却部（熱交換器）に送られて冷却対象を冷却する。その後、冷媒は冷熱回収熱交換器に送られ、そこで膨張機に送られる冷媒を冷却した後、低段圧縮機に戻される。

[0006] また、この種の冷凍機には、冷媒循環ラインの高段圧縮機と膨張機までの高圧ライン、膨張機から低段圧縮機までの低圧ラインに接続したバッファラインと、バッファラインに設けられたバッファタンクと、バッファタンクの高圧ライン側と低圧ライン側（入口側と出口側）にそれぞれ設けられたバルブ（開閉弁）と、からなるバッファライン部を備えて構成したものがある（例えば、特許文献1参照）。

[0007] これらの冷凍機では、熱負荷検出手段によって冷却対象の熱負荷の変動が検出された場合に、バッファタンクの前後のバルブを開度制御により冷媒ラインにおける冷媒流量を制御することで、冷凍能力を調整している。

先行技術文献

特許文献

[0008] 特許文献1：再公表WO 2016/178272号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0009] ここで、上記従来の圧縮機一体型膨張機を備えた冷凍機においては、冷凍機の停止中、冷媒温度上昇によって冷媒循環ラインの系内で冷媒圧力が高くなり、この状態で、冷媒循環ラインの高段圧縮機と膨張機までの高圧ラインと、膨張機から低段圧縮機までの低圧ラインとの冷媒の圧力が均衡（高低圧が均圧）する。

[0010] このため、均圧状態で、低圧ライン側の圧力が通常運転時よりも高く、この冷媒圧力が高くなった状態で冷凍機を起動運転すると、高圧ライン側の圧力が過大に上昇しやすく、特にモータ駆動の圧縮機一体型膨張機を備えて構成されていることにより、モータ負荷が高くなって、モータ容量によっては運転回転数を制限する必要があるケースがあった。

[0011] また、冷媒圧力が高くなった状態で冷凍機を起動運転した際に、循環経路では、定格運転条件で最も密度が高くなる膨張機の入口付近の流路に最小断面が存在するため、予冷時には膨張機の吸入温度が高くなりやすい（冷媒密

度が低くなりやすい)。すると、当該箇所における冷媒流量が少なくなる膨張機の入口でチョーク現象によって圧縮機のサージングが発生するおそれがあった。この起動運転時のサージングにおいても、モータ駆動の圧縮機一体型膨張機を備え、高圧ライン側の圧力が過大に上昇した場合に発生しやすくなる。

[0012] よって、上記従来の冷凍機においては、起動時から予冷運転時の初期運転期間に、高圧圧力が定常運転圧力よりも大きく上昇することを抑え、モータの過大負荷やサージングの発生を抑止して運転効率の良い予冷運転を可能にするという点で、改善の余地が残されていた。

[0013] 本開示は、上記事情に鑑み、起動時から予冷運転時の初期運転期間において、高圧圧力が定常運転圧力から大きく上昇することを抑止でき、モータの過大負荷やサージングの発生を抑止することを可能にするとともに、運転効率（冷媒、冷却対象の冷却効率）の向上を可能にする冷凍機及び冷凍機の予冷時の運転方法を提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0014] 本開示の冷凍機の一態様は、冷媒を圧縮する圧縮機、及び、前記圧縮機とモータによって駆動可能な回転軸を介して連結され、前記圧縮機で圧縮された前記冷媒を膨張させるための膨張機を含む膨張機一体型圧縮機と、前記膨張機で膨張された前記冷媒によって冷却対象を冷却するための冷却部と、前記膨張機から前記冷却部を介して前記低段圧縮機に至る低圧ライン、及び前記低段圧縮機から前記高段圧縮機に至る中圧ライン、前記高段圧縮機から前記膨張機に至る高圧ラインを備えて前記冷媒を循環させるための冷媒循環ラインと、一端を前記高圧ラインに設けられた第1接続部に接続し、他端を前記低圧ラインに設けられた第2接続部に接続されたバイパスラインと、前記バイパスラインに設けられ、開度を調整することにより前記バイパスラインを流れる前記冷媒の流量を調整可能なバイパスバルブと、を備えた。

さらに、高圧ラインの冷媒ガスを回収するバッファタンクも備えることが望ましい。

発明の効果

- [0015] 本開示の冷凍機（及びこの冷凍機の予冷時の運転方法）によれば、起動時から予冷運転時の初期運転期間において、高圧圧力が定常運転圧力から大きく上昇することをバッファタンクやバイパスラインを用いて効果的に抑止することができる。さらに、冷媒の流量検出に代わり温度検出に基づいてバイパスラインの開度及び回転数を制御することも可能になる。これにより、起動時から予冷運転時の初期運転期間に、モータの過大負荷やサージングの発生を抑止することが可能になり、安定した予冷運転を行い、運転効率（冷媒、冷却対象の冷却効率）の向上を図ることが可能になる。

図面の簡単な説明

- [0016] [図1]本開示の一実施形態に係る冷凍機の一例を示す図である。
- [図2]本開示の一実施形態に係る冷凍機の予冷時の運転方法において、起動時から予冷運転時（予冷運転完了まで）の初期運転期間における運転方法の一例を示すフロー図である。
- [図3]本開示の一実施形態に係る冷凍機の予冷時の運転方法において、起動時から予冷運転時（予冷運転完了）までの初期運転期間におけるバッファライン部の制御動作の一例を示すフロー図である。
- [図4]本開示の一実施形態に係る冷凍機及び冷凍機の予冷時の運転方法を用いた場合の運転時間と冷媒温度の関係、運転時間とバイパスバルブの開度の関係の一例を示す図である。
- [図5]本開示の一実施形態に係る冷凍機の予冷時の運転方法において、起動時から予冷運転時の初期運転期間におけるバイパス制御運転を示す図であり、段階的（ステップ）制御を行う場合の制御フローの一例を示す図である。
- [図6]本開示の一実施形態に係る冷凍機の予冷時の運転方法において、段階的（ステップ）制御によってバイパス制御運転を行った場合の冷媒温度とバイパスバルブの開度の関係の一例を示す図である。
- [図7]本開示の一実施形態に係る冷凍機の予冷時の運転方法において、起動時から予冷運転時の初期運転期間におけるバイパス制御運転を示す図であり、

連続的（比例）制御を行う場合の制御フローの一例を示す図である。

[図8]本開示の一実施形態に係る冷凍機の予冷時の運転方法において、連続的（比例）制御によってバイパス制御運転を行った場合の冷媒温度とバイパスバルブの開度の関係の一例を示す図である。

[図9]本開示の冷凍機の起動時から予冷運転時の初期運転期間における高圧ラインや低圧ライン、バッファタンクの圧力変動の状態の一例を示す図である。

発明を実施するための形態

[0017] 以下、図1から図9を参照し、本開示の幾つかの実施形態に係る冷凍機及び冷凍機の予冷時の運転方法について説明する。

ただし、これらの実施形態に記載されている又は図面に示されている構成部品の寸法、材質、形状及びその相対的配置等は、本発明の範囲をこれに限定する趣旨ではなく、単なる説明例にすぎない。

例えば、「ある方向に」、「ある方向に沿って」、「平行」、「直交」、「中心」、「同心」或いは「同軸」等の相対的或いは絶対的な配置を表す表現は、厳密にそのような配置を表すのみならず、公差、若しくは、同じ機能が得られる程度の角度や距離をもって相対的に変位している状態も表すものとする。

例えば、「同一」、「等しい」及び「均質」等の物事が等しい状態であることを表す表現は、厳密に等しい状態を表すのみならず、公差、若しくは、同じ機能が得られる程度の差が存在している状態も表すものとする。

例えば、四角形状や円筒形状等の形状を表す表現は、幾何学的に厳密な意味での四角形状や円筒形状等の形状を表すのみならず、同じ効果が得られる範囲で、凹凸部や面取り部等を含む形状も表すものとする。

一方、一つの構成要素を「備える」、「具える」、「具備する」、「含む」、又は「有する」という表現は、他の構成要素の存在を除外する排他的な表現ではない。

[0018] なお、本開示は、ブレイトンサイクルを冷凍サイクルに用いることによっ

て極低温を実現できる冷凍機及び冷凍機の予冷時の運転方法に関するものであり、特に、起動時から予冷運転時（予冷完了まで）の初期運転期間における好適な運連制御が可能な冷凍機及び冷凍機の予冷時の運転方法に関するものである。

[0019] （冷凍機）

具体的に、本実施形態の冷凍機 1 は、例えば、図 1 に示すように、冷却対象（本実施形態では冷却対象側の冷媒 R 2 を冷媒 R 1 との熱交換によって冷却するための冷却部（二次側負荷熱交換器） 2 と、冷媒 R 1 を圧縮するための低段圧縮機 C 1 と、さらに冷媒 R 1 を圧縮するための中段圧縮機 C 2 と、さらに冷媒 R 1 を圧縮するための高段圧縮機 C 3 及び冷媒 R 1 を膨張させるための膨張機 T を一体化した膨張機一体型圧縮機 7 と、低段圧縮機 C 1、中段圧縮機 C 2、高段圧縮機 C 3、膨張機 T、冷却部 2 等に冷媒 R 1 を順次給送して循環させる冷媒循環ライン 8 と、を備えて構成されている。

[0020] 膨張機一体型圧縮機 7 は、高段圧縮機 C 3 と膨張機 T とに加え、高段圧縮機 C 3 及び膨張機 T に出力軸の両端部をそれぞれ接続し、出力軸ひいては高段圧縮機 C 3 と膨張機 T を軸線周りに回転駆動するための第 1 モータ 9 を備えている。

[0021] また、本実施形態の冷凍機 1 では、低段圧縮機 C 1 と中段圧縮機 C 2 も一体型で構成され、この一体型圧縮機 10 は、低段圧縮機 C 1 と中段圧縮機 C 2 に出力軸の両端部をそれぞれ接続し、出力軸ひいては低段圧縮機 C 1 と中段圧縮機 C 2 を軸線周りに回転駆動するための第 2 モータ 11 を備えている。

[0022] また、本実施形態の冷凍機 1 は、低段圧縮機 C 1、中段圧縮機 C 2、高段圧縮機 C 3、膨張機 T を冷媒循環ライン 8 で直列に接続して構成されている。

[0023] 冷媒循環ライン 8 は、膨張機 T から低段圧縮機 C 1 までの間が低压ラインとされ、高段圧縮機 C 3 から膨張機 T までの間の間の高圧ラインとされている。低段圧縮機 C 1 から高段圧縮機 C 3 までの間が中圧ラインとされている。

- [0024] 第1中圧ラインには、低段圧縮機C1から吐出された冷媒を冷却するための第1熱交換器12、中段圧縮機C2から吐出された冷媒R1を冷却するための第2熱交換器13、高圧ラインには、高段圧縮機C3から吐出された冷媒を冷却するための第3熱交換器14がそれぞれ配設されている。また、高圧ラインの第3熱交換器14と膨張機Tの間には、冷熱回収熱交換器（再生熱交換器）15が設けられている。
- [0025] 第1熱交換器12、第2熱交換器13、第3熱交換器14は、例えば冷却水wなどによって冷媒R1を冷却する。冷熱回収熱交換器15は、冷却部2で冷却対象R2の冷却に用いられた後の冷媒R1によって高圧ラインの冷媒R1を冷却する。
- [0026] また、低圧ラインの膨張機Tから冷熱回収熱交換器15の間に冷却部2が設けられている。なお、本実施形態において、冷却ラインは低圧ラインの一部とされている。
- [0027] 本実施形態では、冷却部2の熱交換器に送られた冷媒R1で冷却する冷却対象が冷却対象用冷媒（二次冷媒）R2であり、この冷却対象用冷媒R2は冷却対象側循環ライン16を循環して順次冷却部2に送られて所定温度に冷却される。
- [0028] 上記構成からなる本実施形態の冷凍機1では、第2モータ11によって回転駆動する低段圧縮機C1で一段圧縮した冷媒が第1熱交換器12で冷却された後、中段圧縮機C2に送られ、第2モータ11によって回転駆動する中段圧縮機C2でさらに圧縮される。中段圧縮機C2で二段圧縮した冷媒R1は、第2熱交換器13で冷却された後、第1モータ9によって回転駆動する高段圧縮機C3でさらに圧縮される。高段圧縮機C3で三段圧縮した冷媒R1は、第3熱交換器14で冷却された後、さらに冷熱回収熱交換器15で冷却されて膨張機Tに送られ、膨張機Tによって断熱膨張し、冷熱を生成する。すなわち、冷媒自体が断熱膨張して低圧低温となる。高段圧縮機C3及び膨張機Tもまた、共通の動力源である第1モータ9の出力軸の両端にそれぞれ連結されることによって、膨張機Tで回収した動力が高段圧縮機C3の圧

縮動力に寄与して効率化が図られる。

[0029] また、低圧低温となった冷媒 R 1 は冷却部 2 の熱交換器に送られ、この冷媒で冷却対象側循環ライン 16 を流れる冷却対象用冷媒 R 2 を所定温度に冷却する。その後、冷媒 R 1 は冷熱回収熱交換器 15 に送られ、そこで膨張機 T に送られる冷媒 R 1 を冷却した後、低段圧縮機 C 1 に戻る。

[0030] ちなみに、この冷凍機 1 では、冷媒 R 1 として、例えば、ヘリウム、ネオン、水素、窒素、空気、炭化水素等を挙げることができる。そして、冷媒 R 1 の温度は、例えば、膨張機 T の入口側で約 $-190 \sim -200^{\circ}\text{C}$ ($83.15 \sim 73.15\text{ K}$)、出口側で約 $-210 \sim -220^{\circ}\text{C}$ ($63.15 \sim 53.15\text{ K}$) の極低温にすることができる。

[0031] これにより、本実施形態の冷凍機 1 は、例えば、超電導機器の冷却、各種ガスの液化、液体窒素の代替などとして利用することができる。

[0032] 具体的に、図 1 に示すように、冷却部 2 で冷媒 R 1 と熱交換して冷却する冷却対象は、超電導ケーブルなどの超電導機器 20 を冷却するための液体窒素（冷却対象用冷媒 R 2）を一例として挙げることができる。

この場合には、例えば、冷却部 2、超電導機器 20 及びリザーバタンク 21 の間を循環する冷却対象側循環ライン（液体窒素循環ライン）16 を設け、さらに冷却対象側循環ライン 16 に循環ポンプ 22 を設け、冷却部 2 で極低温に冷却された液体窒素 R 2 を超電導機器 20 に循環するように構成される。

[0033] 一方、冷凍機 1 においては、前述の通り、冷凍機停止中、冷媒温度上昇によって冷媒圧力が高くなり、この状態で高低圧が均圧する。このため、冷媒圧力が高くなった状態で冷凍機 1 を起動運転すると、低圧ラインの冷媒圧力が高いことから高圧ラインの冷媒圧力が上昇し、モータ（11（9））の負荷が高くなってモータ容量によっては運転回転数を制限する必要があるケースがあった。

また、冷媒圧力が高くなった状態で冷凍機 1 を起動運転した際に、膨張機 T の入口でチョーク現象が生じ、圧縮機（C 1、C 2、C 3）にサージング

が発生することもある。

[0034] (予冷工程の制御フロー)

これに対し、本実施形態の冷凍機 1 の予冷運転工程（冷凍機の予冷時の運転方法）は、図 1 及び図 2 に示すように、冷凍機予冷運転制御、バイパス制御、バッファタンク冷媒回収制御で構成されている。

[0035] まず、冷凍機予冷運転制御は、冷凍機 1 の起動から予冷完了までの運転制御を行うもので、目標温度設定（ T_1 、 T_2 ）と膨張機 T の入口または出口の計測温度（ T ）に基づいて冷却速度が一定に維持されるよう制御回転数制御を行う。

[0036] バイパス制御は、計測温度（ T ）に従ってバイパスライン 3 1 の開閉バルブ 3 2 の開度を制御するもので、段階（ステップ制御）と連続制御がある。目標設定温度（ T_1 ）まで冷媒 R 1 が冷却されると開閉バルブ 3 2 が閉となり、バイパスなし制御運転となる。

[0037] また、バッファタンク冷媒回収制御は、高圧ラインからバッファタンク 2 7 に冷媒 R 1 を回収して、冷凍機 1 の予冷運転の負荷を低減するもので、設定する圧力差以上になると開閉バルブ 2 8 が開となり高圧ラインからバッファタンク 2 7 に冷媒 R 1 が流入する。

[0038] これらの制御は、冷凍機予冷運転制御に対して並列にバイパス制御、バッファタンク冷媒回収制御が行われ、常時モニタリングする組合せになっている。

[0039] 以下、より詳細に制御内容について説明する。

[0040] (バッファライン部)

本実施形態の冷凍機 1 は、第一に、バッファライン部 2 5 が具備されている。

[0041] バッファライン部 2 5 は、高圧ラインの第 3 熱交換器 1 4 と冷熱回収熱交換器 1 5 の間の第 3 接続部 S 3 に一端を接続し、低圧ラインの冷熱回収熱交換器 1 5 と低段圧縮機 C 1 の間の第 4 接続部 S 4 に他端を接続したバッファライン 2 6 と、このバッファライン 2 6 に設けられて冷媒 R 1 を一時的に貯

留するためのバッファタンク 27 と、バッファタンク 27 の入口側（バッファタンク 27 と第 3 接続部 S 3 の間の高圧ライン側）に設けられた第 1 開閉弁（高圧側バッファバルブ）28 と、バッファタンク 27 の出口側（バッファタンク 27 と第 4 接続部 S 4 の間の低圧ライン側）に設けられた第 2 開閉弁（低圧側バッファバルブ）29 と、を備えて構成されている。

[0042] そして、入口側の第 1 開閉弁 28 を開くことにより、且つ、第 1 開閉弁 28 の開度に応じ、高圧ラインから圧力差（差圧）を利用してバッファタンク 27 に冷媒 R 1 を一時的に送って貯留し、冷媒循環ライン 8 を流れる冷媒 R 1 の量（流量）を調節することができる。また、第 1 開閉弁 28 を閉じ、出口側の第 2 開閉弁 29 を開くことにより、且つ第 2 開閉弁 29 の開度に応じ、バッファタンク 27 から圧力差を利用して冷媒 R 1 を低圧ラインに戻し、冷媒循環ライン 8 を流れる冷媒 R 1 の量を調節することができる。

[0043] （バイパスライン部）

さらに、本実施形態の冷凍機 1 においては、バイパスライン部 30 を備えている。

[0044] バイパスライン部 30 は、高圧ラインの第 3 熱交換器 14 と第 3 接続部 S 3 の間の第 1 接続部 S 1 に一端を接続し、低圧ラインの第 4 接続部 S 4 と低段圧縮機 C 1 の間の第 2 接続部 S 2 に他端を接続して設けられたバイパスライン 31 と、このバイパスライン 31 に設けられた第 3 開閉弁（バイパスバルブ）32 と、を備えて構成されている。

なお、バッファライン部 25 とバイパスライン部 30 の高圧ライン及び低圧ラインの接続部は、位置が入れ替わっても何ら支障はない。

[0045] （冷媒状態／動力状態検出手段）

冷媒循環ライン 8 には、高圧ラインの冷熱回収熱交換器 15 と膨張機 T の間に、ここを流通する冷媒 R 1 の温度を検出するための第 1 温度センサ 33 が具備されている。

冷却ラインの膨張機 T と冷却部 2 の間には、ここを流通する冷媒 R 1 の温度を検出する第 2 温度センサ 34 が設けられている。

冷却対象側循環ライン１６には、冷却部２によって冷却された冷却対象の液体窒素Ｒ２の温度を検出する第３温度センサ（二次冷媒温度センサ）３５が設けられている。

[0046] 冷媒循環ライン８の高圧ラインのライン上、例えば第３接続部Ｓ３と第１接続部Ｓ１の間には高圧ラインの冷媒Ｒ１の圧力を検出するための第１圧力センサ３６が設けられている。

バッファタンク２７には、バッファタンク２７の内部の圧力を検出するための第２圧力センサ３７が設けられている。

[0047] 膨張機一体型圧縮機７には、第１モータ９の駆動状態、ひいては回転軸、高段圧縮機Ｃ３及び膨張機Ｔの回転数を検出するための第１動力計３８が設けられている。

一体型圧縮機１０には、第２モータの駆動状態、ひいては回転軸、低段圧縮機Ｃ１及び中段圧縮機Ｃ２の回転数を検出するための第２動力計３９が設けられている。

[0048] さらに、本実施形態の冷凍機１は、第１温度センサ３３、第２温度センサ３４、第３温度センサ３５、第１圧力センサ３６、第２圧力センサ３７、第１動力計３８、第２動力計３９のそれぞれの検出結果を受けて、第１モータ９、第２モータ１１の駆動、第１開閉弁２８、第２開閉弁２９、第３開閉弁３２の開度（開閉駆動）を制御するコントローラ（制御装置）４０を備えている。

[0049] ＜バッファタンク冷媒回収制御：バッファライン部を用いた初期運転期間の運転制御＞

まず、バッファタンクを用いて冷媒回収を行う予冷運転制御について説明する。

これにより、バッファライン部２５による冷媒循環ライン８に対する冷媒Ｒ１の流出入量は、コントローラ４０による第１開閉弁２８、第２開閉弁２９の開度調整によって制御することができる。なお、バイパスライン部３０の第３開閉弁３２を含み、第１開閉弁２８、第２開閉弁２９は電動弁である

ことが好ましい。

[0050] より具体的に、冷媒循環ライン 8 の系内の圧力が高い状態で、冷凍機 1 (モータ 9、11) を運転すると圧縮機でサージングが生じて回転数を高くすることが難しい。

[0051] これに対し、本実施形態の冷凍機 1 では、起動時の冷凍機 1 の回転数を高くするために低圧ラインと高圧ラインの間にバッファタンク 27 を設け、冷凍機 1 の吐出圧力が一定圧力以上とならないように余分な冷媒 R 1 を回収する。

[0052] これにより、第 1 圧力センサ 36、第 2 圧力センサ 37 の検出結果に基づいて、コントローラ 40 が第 1 開閉弁 28 の開閉駆動制御、開度調整を行うことで、高圧ラインとバッファタンク 27 の冷媒圧力差を利用し、冷媒 R 1 を流入させることができ、冷凍機 1 の吐出圧力が一定圧力以上とならないように余分な冷媒 R 1 をバッファタンク 27 に回収することが可能になる。

[0053] (起動時／予冷運転開始時の制御)

そして、図 1、図 2 及び図 3 に示すように、冷凍機 1 の停止後に、起動／予冷運転開始を行う際には (Step 1)、冷凍機 1 の停止に伴って高圧ラインと低圧ラインの冷媒圧力が高圧で均衡している場合、第 1 圧力センサ 36、第 2 圧力センサ 37 の検出結果に基づいて (Step 3)、バッファライン部 25 でバッファタンク 27 への冷媒回収を実施する (Step 2)。

[0054] このとき、コントローラ 40 が第 1 圧力センサ 36 と第 2 圧力センサ 37 の検出結果を受け、高圧ラインとバッファタンク 27 の冷媒圧力の差圧を求め (Step 3)、高圧ラインとバッファタンク 27 の冷媒圧力が高圧で均衡しているか否かを確認し、例えば、冷媒圧力の差圧が 10 kPa などの設定値 (閾値) 以上である場合には (Step 4)、第 1 開閉弁 28 を開制御し (Step 5)、バッファライン部 25 による冷媒回収を実施する (Step 6)。

[0055] すなわち、バッファタンク 27 の圧力と高圧ラインの冷媒圧力の差圧を求め、この差圧が予め設定した設定値 (10 kPa など) を超える場合には、

コントローラ40が第2開閉弁29を閉じた状態で第1開閉弁28を開制御する(Step5)。

- [0056] 第1開閉弁28の開制御(Step5)を行うとともに、バッファタンク27と高圧ラインとの圧力差によってバッファタンク27に冷媒R1が送られて一時的に貯留され(Step6)、ブレイトンサイクルを流れる冷媒R1の流量(圧力)が減少する。

これにより、予冷初期における冷媒循環ライン8の圧力上昇による過負荷運転(第1モータ9、第2モータ11の過大なモータ負荷)を防止できる。

なお、バッファタンク27に冷媒R1が送られて一時的に貯留され、ブレイトンサイクルを流れる冷媒R1の流量(圧力)が減少し、冷媒圧力の差圧が設定値を下回ると(Step7)、第1開閉弁28が閉制御される(Step8)。また、前記(Step4)で冷媒圧力の差圧が設定値を下回る場合には、第1開閉弁28の閉状態が維持される(Step8)。

- [0057] (予冷運転中の制御)

前述の通り、バッファタンク27と高圧ラインの差圧が10kPaなどの設定値を超えると、高圧ラインから第1開閉弁を介してバッファタンクに冷媒が回収され、バッファタンクと高圧ラインの差圧が小さくなる(Step6、Step7)。

- [0058] このため、冷凍機1の停止後の予冷運転開始時において、差圧が設置値を超え続けている場合には高圧の冷媒R1がバッファタンク27に回収されていくが、冷凍機1の運転に伴い高圧ラインの冷媒R1の圧力(吐出圧力)に大幅な変動が生じなければ、バッファタンク27と高圧ラインの差圧が小さくなって、その状態で維持される。すなわち、バッファタンク27と高圧ラインの間での冷媒R1のやり取りがなくなり、冷媒循環ライン8の冷媒R1の増減が生じず、高圧ラインの圧力は維持される。

- [0059] 逆に、冷凍機1の停止後の予冷運転開始時において、冷凍機1の運転に伴い高圧ラインの冷媒R1の圧力(吐出圧力)に大幅な変動が生じた場合には、高圧ラインから能力調整用のバッファタンク27に冷媒R1が回収され続

ける。

[0060] このように、本実施形態の冷凍機 1 は冷媒循環ライン 8（冷媒流路系）が密閉構造であることによって、常温で余分な冷媒 R 1 をバッファタンク 2 7 に貯めることができる。すなわち、予冷運転時には、上記のように、流量を計測することなく、第 1 圧力センサ 3 6 と第 2 圧力センサ 3 7 の検出結果に基づいて第 1 開閉弁 2 8 の開閉駆動制御を行うだけで自動的に冷媒 R 1 の回収量の調整を行うことができ、過大なモータ負荷が生じない好適な状態にしてこれを維持することが可能になる。

[0061] なお、前記（S t e p 3）から（S t e p 6）の圧力検出結果から冷媒圧力の差圧を求めて、コントローラ 4 0 により差圧が設定値（閾値）以上である場合には第 1 開閉弁 2 8 を開制御し、バッファライン部 2 5 による冷媒回収を行う実施例を示している。

一方、別の実施例として、差圧に変え、高圧ラインの圧力が設定値（閾値）以上である場合に、第 1 開閉弁 2 8 を開制御して、バッファライン部 2 5 によって冷媒回収を行うことができるようにしてもよい。

[0062] （通常（定常）運転への移行制御）

そして、冷凍機 1 の起動後、高圧ライン側の冷媒 R 1 が一時的に昇圧してバッファタンク 2 7 に余分な冷媒を貯めるが、冷却が進むにつれて低压ラインと高圧ライン、ひいては冷凍機 1 の装置／システム全体の冷媒 R 1 の圧力が降下して通常運転時の圧力状態に近づいていく。言い換えれば、低压ラインと高圧ラインのそれぞれの圧力が通常運転時の圧力となって運転が進み、過大なモータ負荷が生じない状態となる。バッファ機構圧力設定値を下回る状態になった段階で第 1 開閉弁 2 8 を閉じられる（S t e p 8）。

[0063] 一方、冷媒 R 1 には、例えば、常温から 1 0 0 K 以下まで冷却すると密度が大きくなって、容量が減じるものがある。具体的には、冷熱回収熱交換器 1 5 から膨張機 T、膨張機 T から冷却部 2、冷却部 2 から冷熱回収熱交換器 1 5 までの機器や配管で冷媒 R 1 の温度が 1 0 0 K 以下となり、冷媒 R 1 の密度が増加して容量不足となる。逆に、運転中も低压ラインの冷熱回収熱交

換器 15 の出口から圧縮機を経て高圧ラインの冷熱回収熱交換器 15 の入口までは冷媒温度が常温付近のため冷媒 R 1 の冷媒容量が変わらない。

このため、低温側である高圧ライン側、冷却ライン側の冷媒容量の減少に応じた分を系内で保持しておく必要がある。

[0064] したがって、本実施形態の冷凍機 1 及び冷凍機 1 の運転方法では、優先的にバッファタンク 27 への冷媒 R 1 の貯留を行うようにする。例えば、起動直後など、起動時から予冷運転時（予冷完了まで）の初期運転期間に余分の冷媒 R 1 がバッファタンク 27 に回収されるように、第 1 圧力センサ 36 と第 2 圧力センサ 37 で検出される圧力差が 10 kPa などの予め設定した設定値以上の条件で冷媒回収用の第 1 開閉弁 28 が開くようにする。

[0065] また、本実施形態の冷凍機 1 及び冷凍機 1 の運転方法では、第 1 圧力センサ 36 と第 2 圧力センサ 37 で検出される圧力差（差圧）に変え、高圧ラインの圧力が設定値（閾値）以上である場合に、第 1 開閉弁 28 を開制御し、バッファライン部 25 により冷媒回収を行うこともできる（図 9（バイパス制御運転の段階的制御時の高圧ライン、低压ライン、バッファタンク 27 の圧力変動の状態の一例を示す図）参照）。

[0066] <冷凍機予冷運転制御／バイパス制御：バイパスライン部を用いた初期運転期間の運転制御>

次に、冷凍機 1 は、例えば、常温から 100 K 以下までの大温度差で冷媒 R 1 を冷却していく必要があるため、冷媒循環ライン 8 には、従来、最も密度が高くなる膨張機 T の入口付近に最小断面の絞り部を設けるようにしている。

[0067] ここで、予冷運転時には、吸入温度が高くなりやすく、言い換えれば、冷媒密度が低くなりやすく、膨張機 T の入口付近の最小断面の絞り部における冷媒流量が小さくなり、これに起因して圧縮機 C 1、C 2、C 3 にサージングが発生するおそれがある。このため、予冷運転時には、このサージングを抑止できるように十分な冷媒流量を確保することが必要になる。

[0068] これに対し、本実施形態の冷凍機 1 においては、高圧ラインから低压ライ

ンに冷媒R 1を返送可能なバイパスライン3 1及びバイパスバルブの第3開閉弁3 2からなるバイパスライン部3 0を備えている。

[0069] これにより、コントローラ4 0によって第3開閉弁3 2を開制御することにより、高段圧縮機C 3で圧縮された冷媒R 1の一部を膨張機Tに供給することなく、再び低段圧縮機C 1ひいては高段圧縮機C 3に戻すことができる。また、コントローラ4 0によって第3開閉弁3 2の開度を調整することにより、圧縮機C 1、C 2、C 3に戻される冷媒流量を調整できる。

[0070] よって、本実施形態の冷凍機1においては、予冷時に、第3開閉弁3 2の開度を運転状態に応じて適宜変更することでサージングを起こさず、且つ冷却に使用されない冷媒R 1を減らすことができ、動力が無駄とならない効率的（高COP : C o e f f i c i e n t o f P e r f o r m a n c e）な運転が可能になる。

[0071] 次に、本実施形態の冷凍機1、及び冷凍機1の予冷時の運転方法では、図2（図5、図7、図1）に示すように、第3開閉弁3 2の開度を冷媒R 1の温度条件によって制御し（S t e p 9）、バイパスライン部3 0を用いた冷凍機予冷運転制御とバイパス制御からなる予冷時運転制御を行う。また、冷凍機予冷運転制御とバイパス制御は前述のバイパス制御と並列で行われる。

[0072] （冷凍機予冷運転制御）

まず、冷凍機予冷運転制御（S t e p 9）では、例えば、回転数6 0 %で1 0分間運転を行う（S t e p 1 0）。

[0073] また、高圧ラインに設けられた第1温度センサ3 3、又は冷却ラインに設けられた第2温度センサ3 4で検出した冷媒温度に基づいて、第3開閉弁3 2の開度を調整、制御する。

[0074] このとき、予冷時の冷却速度（冷媒の温度の減少速度）を6 0 K / hなど、予め設定した一定の冷却速度に保ちながら第3開閉弁3 2の開度をバイパス制御によって段階的あるいは連続的に小さくしてゆき、冷媒R 1が第1目標温度（本実施形態では1 0 0 K）に達した段階で第3開閉弁3 2の開度が0 %となるようにする（S t e p 1 1）。

[0075] そして、膨張機出口温度が第1目標温度（100K）に達した段階で（Step12）バイパスライン部30の使用（バイパス制御）が停止され、冷媒全量を膨張機Tに供給するように制御（バイパス無し制御）を行う（Step13）。

[0076] また、バイパスライン部30の使用を停止した後、冷媒温度が第2目標温度以下（本実施形態では67K以下）で維持されるように、第2温度センサ34によって検出した膨張機Tの出口側の冷媒温度に基づいて冷凍機回転数の制御を行う（Step14）。

[0077] すなわち、本実施形態において、冷却対象側循環ライン16である液体窒素循環ラインで冷却対象用冷媒R2である液体窒素の循環を開始するまでは、第2温度センサ34によって膨張機Tの出口側の冷媒温度を検出し、膨張機Tの出口側の冷媒温度を温度制御点として第2目標温度を67K以上に設定しておく。これにより、冷却部2で液体窒素が凍結することを回避する。

[0078] 液体窒素循環ラインで液体窒素の循環を開始した後、温度制御点を超電導ケーブル等に近い第3温度センサ35に切り替え、この第3温度センサ35で検出した液体窒素の出口側の冷媒温度に基づいて、冷凍機1の運転制御を行う。これにより、冷凍機1の予冷運転が完了し（Step15）、容易で精度よく冷却対象の液体窒素を冷却することができる。

[0079] なお、第1温度センサ33、第2温度センサ34のどちらの検出結果を用いて第3開閉弁32の開度制御を行っても、特に熱負荷変動がなければ、同様の作用効果が得られることが確認されている。このため、本実施形態の冷凍機1では、第1温度センサ33、第2温度センサ34を備えているが、場合によってはどちらか一方の温度センサのみで構成して、温度の監視点、温度センサの数を減らすことも可能である。

[0080] （バイパス制御）

一方、本実施形態の冷凍機1及び冷凍機1の予冷時の運転方法では、図2、図5、図7（図1）に示すように、上記の冷凍機予冷運転制御と並列に、第3開閉弁32の開度を段階的あるいは連続的に制御（ステップ制御あるいは

は比例制御)してバイパス制御(Step 16)を行うことによって、膨張機Tへ流れる流量変化を小さくする。すなわち、開度変動時の冷却能力の変動を抑え、冷却速度制御を行いやすくする。

[0081] 具体的に、バイパスライン部30を用いた予冷運転制御時に、冷却速度を一定に制御する第一の理由は、熱交換器が急激に冷却されると、熱変形によって破損が生じるおそれがあるためである。

第二の理由は、冷却温度の変化が大きいと、第3開閉弁32の開度の調整幅や冷凍機回転数の変動が大きくなり、安定した運転が難しくなるためである。すなわち、バイパスライン31を流れる冷媒流量は運転効率にも影響するため、効率的な運転を行うために冷却速度を一定にする。

[0082] そして、これに基づき、本実施形態の冷凍機1の予冷時の運転方法では、前述の通り、予冷時において、バイパスライン部30のバイパスバルブの第3開閉弁32の開度制御と冷凍機1の回転数制御の2つの制御を組み合わせ、冷却速度を一定にする温度制御を行うこととした。

[0083] また、本実施形態の冷凍機1の予冷時の運転方法では、冷媒R1の一部を膨張機Tに供給することなく、バイパスライン部30の第3開閉弁32の開度を調整することで、流量計を用いることなく、バイパスライン31を通じて高圧ラインから低圧ラインに流量を調整しながら冷媒R1を戻し、サージングの発生を抑止している。

[0084] この一方で、第3開閉弁32を開けすぎると、必要以上の流量が圧縮機に供給され、無駄な動力を消費することになって、結果、効率的な運転ができなくなる。

このため、本実施形態の冷凍機1の予冷時の運転方法では、サージングが生じない流量を保持するように、第3開閉弁32の開度を段階的又は連続的に調整制御(ステップ制御又は比例制御)し、膨張機Tの設計流量に近づいた段階で第3開閉弁32が閉(開度0%)となるようにしている。

[0085] また、バイパスライン部30の第3開閉弁32の開度制御では、膨張機Tとバイパスライン31の2つのルートに流れる冷媒流量を調整し、効率的な

運転ができるように条件を設定することになる。このため、バイパスライン部30による冷媒流量の調整制御だけでは、冷媒R1の温度制御という観点からは必ずしも高精度で制御が行えないことも考えられる。

[0086] これに基づき、本実施形態の冷凍機1の予冷時の予冷時運転方法では、前述の通り、バイパスライン部30の第3開閉弁32の開度制御に加え、冷凍機1の回転数制御を行うことで冷却速度を調整／修正し、冷却速度が一定となるようにした。

すなわち、本実施形態の冷凍機1の予冷時の運転方法では、冷媒R1の設定目標温度と実測温度の乖離の大きさに応じ、冷却速度が一定となるように冷凍機1の回転数を制御して、冷媒温度を精度よく制御できるようにした。

[0087] このように、本実施形態の冷凍機1の予冷時の運転方法では、バイパスライン部30の第3開閉弁32の開度調整制御と冷凍機1の回転数制御を併用することで、起動時から予冷完了までの初期運転期間において、サージングの発生を好適に抑制でき、且つ冷却速度を一定にして精度よく冷媒R1を冷却でき、効率的な運転制御を行うことが可能になる。

[0088] ここで、本実施形態の冷凍機1の予冷時の運転方法では、上記作用効果を好適に奏功するために、バイパス制御（Step16）でバイパスライン部30の第3開閉弁32の開度調整を段階的あるいは連続的に行う。

これらバイパスライン部30の第3開閉弁32の段階的な開度制御（ステップ制御）と連続的な開度制御（比例制御）を用いたそれぞれの一例を挙げ、本実施形態の冷凍機1の運転方法について詳細に説明する。

[0089] ＜バイパスライン部を用いた段階的運転制御（ステップ運転制御）＞

まず、バイパスライン部30のバイパスバルブの第3開閉弁32の開度を段階的に制御する方法について説明する。

[0090] このバイパスライン部30の第3開閉弁32の段階的な開度調整制御では、図5、図6（図1、図2、図4参照）に示すように、例えば、冷凍機予冷運転制御（Step9）によって最大値の60%の回転数とするとともに（Step10）、第3開閉弁32の開度40%とする（Step17）。ま

た、第1温度センサ33又は第2温度センサ34に起動時の冷媒R1の温度を計測する(Step18)。そして、冷凍機1を起動し、予冷運転を開始した段階から、第3開閉弁32の開度を第1温度センサ33又は第2温度センサ34による冷媒の検出温度に応じて段階的に変更してゆく(Step19)。

[0091] このバイパスライン部30を用いた段階的運転制御では、各ステップの温度の始点と終点が第3開閉弁32の開度ステップ(本実施形態では、ステップ1~6:図6)を決定する。例えば、あるステップ温度幅を T_{01} から T_{02} として、第3開閉弁32の開度を $V_{01}\%$ とすると、第1温度センサ33又は第2温度センサ34の計測温度 T_a が $T_{02} < T_a \leq T_{01}$ の状態では第3開閉弁32の開度 $V_{01}\%$ を維持し続ける。

[0092] そして、冷媒温度が徐々に下がってゆき、計測温度 T_a が T_{02} となった段階で次のステップ温度幅の T_{02} から T_{03} ($T_{03} < T_a \leq T_{02}$)に対応する第3開閉弁32の開度 $V_{02}\%$ ($V_{02} < V_{01}$)を維持し続ける。

[0093] このように、冷却温度の降下に従いステップ(ステップ1~6)を順次変え、次段のステップへ変更毎に第3開閉弁32の開度を一段下の開度に切り替えてゆく。

[0094] 順次ステップを変更して第3開閉弁32の開度を段階的に小さくすると、バイパスライン31を流通して高圧ラインから低圧ラインに流れる冷媒R1の流量が、段階的に減少する。この冷媒R1の流量の段階的な減少に応じ、低段圧縮機C1側から膨張機T側に流れる冷媒量が段階的に増えるため、本実施形態の冷凍機1では、冷却速度を一定に維持するように回転数制御(冷凍機予冷運転制御)を併用する。

[0095] 例えば、図5、図6では、起動時(回転開始時)の冷凍機回転数を60%、第3開閉弁32の開度を40%とし、それ以降の第1温度センサ33又は第2温度センサ34による冷媒R1の計測温度が第1目標温度の100Kに達するまで5ステップとし、225K、190K、155K、120K、1

00 K、での温度範囲と第3開閉弁32の開度を設定している。

[0096] このように、バイパスライン部30の第3開閉弁32の段階的な開度制御と、冷凍機1の回転数制御とを併用することによって、本実施形態の冷凍機1の予冷時運転方法では、各ステップの温度区間ごとに第3開閉弁32の開度を設定でき、それぞれの区分けした温度区間において冷却速度が予め設定した一定の設定値（60 K/hなど）となるようにPID制御などを用いて回転数制御（例えば、回転数N = 60 ~ 75 %）を行うことができる。

これにより、本実施形態の冷凍機1の予冷時運転方法によれば、冷凍機1の回転数や圧力の変動が少ない安定した予冷運転が可能になる。

[0097] また、第1目標温度の100 Kに達した段階で、第3開閉弁32の開度が0 %となり、バイパスライン部30を用いた運転制御は終了し、バイパス無し制御運転に移行する（Step 20）。このバイパス無し制御運転に移行することで、圧縮機から膨張機Tに冷媒循環量の全てが流れる。

[0098] そして、バイパス無し制御運転の予冷運転では、次の目標温度である第2目標温度の67 Kに向けて回転数制御を行う。このとき、第2目標温度の67 Kまで、冷却速度が予め設定した一定の設定値（60 K/hなど）となるようにPID制御などを用いて回転数制御（例えば、回転数N = 75 ~ 95 %）を行う（Step 13）。また、第2目標温度の67 Kに達するとともに、負荷のかかる窒素循環運転まで第2目標温度を維持するように制御を行う（Step 13、14、15）。

なお、回転数制御は、PID（Proportional-Integral-Differential）制御を用いることに限定する必要はない。例えば、P（Proportional）制御、PI（Proportional-Integral）制御などを用いても勿論構わない。

[0099] したがって、本実施形態の冷凍機1及び冷凍機1の予冷時運転方法によれば、バイパスライン部30の第3開閉弁32の段階的な開度調整制御と冷凍機1の回転数制御を併用することで、起動時から予冷完了までの初期運転期間において、サージングの発生を好適に抑制でき、且つ冷却速度を一定にし

て精度よく冷媒 R 1 を冷却でき、効率的な運転制御を行うことが可能になる。

[0100] <バイパスライン部を用いた連続的運転制御（比例運転制御）>

次に、バイパスライン部 30 のバイパスバルブの第 3 開閉弁 32 の開度を連続的に制御する方法について説明する。

[0101] このバイパスライン部 30 の第 3 開閉弁 32 の連続的な開度調整制御では、図 7、図 8（図 1、図 2、図 4 参照）に示すように、段階的な開度調整制御と同様、例えば、冷凍機予冷運転制御（Step 9）によって最大値の 60% の回転数とするとともに（Step 10）、第 3 開閉弁 32 の開度 40% とする（Step 17）。また、第 1 温度センサ 33、又は第 2 温度センサ 34 に起動時の冷媒 R 1 の温度を計測する（Step 18）。そして、冷凍機 1 を起動し、予冷運転を開始した段階から、第 3 開閉弁 32 の開度を第 1 温度センサ 33 又は第 2 温度センサ 34 による冷媒の検出温度に応じて連続的に変更してゆく（Step 20）。

[0102] このバイパスライン部 30 を用いた連続的運転制御では、各ステップの温度の始点と終点が第 3 開閉弁 32 の開度ステップ（本実施形態ではステップ 1～6：図 8）を決定する。

[0103] ただし、運転初期の状態は、回転数 60% 運転（Step 10）や第 3 開閉弁バルブ開度 40%（Step 17）の運転制御が優先し、さらに（Step 18）で冷媒 R 1 の温度が 225 K に冷却されるまでバルブ開度 40% を維持されるので、連続的運転制御は実質的には（ステップ 2）から開始される。

[0104] 例えば、あるステップ温度幅を T01 から T02 とした場合、ステップ温度幅 T01 から T02 となるまでの間で、第 3 開閉弁 32 の開度を V01% から V02% まで漸次小さくしてゆく。

すなわち、第 1 温度センサ 33 又は第 2 温度センサ 34 による冷媒 R 1 の計測温度を Ta とした場合に、第 3 開閉弁 32 の開度 V% は、次の式（1）によって求める。

[0105] [数 1]

$$V\% = V_{O1} - ((V_{O1} - V_{O2}) / (T_{O1} - T_{O2})) \times (T_{O1} - T_a) \cdots (1)$$

ここで、 $T_{O2} < T_a < T_{O1}$

[0106] このように求めた開度に従って第3開閉弁32を連続的に制御し、この連続的制御に伴う冷却温度の降下に従いステップ（ステップ1～6：図8）を順次変えてゆく。

[0107] 順次ステップが変わって第3開閉弁32の開度を連続的に小さくすると、第3開閉弁32の開度を連続的に小さくすると、バイパスライン31を流通して高圧ラインから低圧ラインに流れる冷媒R1の流量が連続的に減少する。バイパスラインを流通して高圧ラインから低圧ラインに流れる冷媒の流量が連続的に減少する。この冷媒の流量の連続的な減少に応じ、低段圧縮機C1側から膨張機T側に流れる冷媒量が連続的に増えるため、本実施形態の冷凍機1では、冷却速度を一定に維持するように回転数制御（冷凍機予冷運転制御）を併用する。

[0108] 例えば、図7、図8では、起動時（回転開始時）の冷凍機回転数を60%、第3開閉弁32の開度を40%とし、それ以降の第1温度センサ33又は第2温度センサ34による冷媒R1の計測温度が第1目標温度の100Kに達するまでのステップ2からステップ5までの4ステップとし、225K、190K、155K、120K、100Kで温度範囲を、各温度範囲ごとに式（1）に従って第3開閉弁32の開度を連続的に設定している。

[0109] このように、式（1）に従ったバイパスライン部30の第3開閉弁32の連続的な開度制御と、冷凍機1の回転数制御とを併用することによって、本実施形態の冷凍機1の予冷時運転方法では、各ステップの温度区間ごとに第3開閉弁32の開度を設定でき、それぞれの区分けした温度区間において冷却速度が予め設定した一定の設定値（60K/hなど）となるようにPID制御などを用いて回転数制御（例えば、回転数N＝60～75%）を行うことができる。

これにより、本実施形態の冷凍機 1 の予冷時運転方法によれば、冷凍機 1 の回転数や圧力の変動が少ない安定した予冷運転が可能になる。

[0110] また、段階的開度制御と同様、第 1 目標温度の 100 K に達した段階で、第 3 開閉弁 32 の開度が 0 % となり、バイパスライン部 30 を用いた運転制御は終了し、バイパス無し制御運転に移行する (Step 13)。このバイパス無し制御運転に移行することで、圧縮機 C1、C2、C3 から膨張機 T に冷媒循環量の全てが流れる。

[0111] そして、バイパス無し制御運転の予冷運転では、次の目標温度である第 2 目標温度の 67 K に向けて回転数制御を行う。このとき、第 2 目標温度の 67 K まで、冷却速度が予め設定した一定の設定値 (60 K/h など) となるように PID 制御などを用いて回転数制御 (例えば、回転数 $N = 75 \sim 95$ %) を行う (Step 13)。また、第 2 目標温度の 67 K に達するとともに、負荷のかかる窒素循環運転まで第 2 目標温度を維持するように制御を行う (Step 13、14、15)。

なお、連続的開度制御を用いた場合においても、回転数制御は、PID (Proportional-Integral-Differential) 制御を用いることに限定する必要はない。例えば、P (Proportional) 制御、PI (Proportional-Integral) 制御などを用いても勿論構わない。

[0112] したがって、本実施形態の冷凍機 1 及び冷凍機 1 の予冷時運転方法によれば、バイパスライン部 30 の第 3 開閉弁 32 の連続的な開度調整制御と冷凍機 1 の回転数制御を併用することで、起動時から予冷完了までの初期運転期間において、サージングの発生を好適に抑制でき、且つ冷却速度を一定にして精度よく冷媒 R1 を冷却でき、効率的な運転制御を行うことが可能になる。

[0113] <予冷時の温度冷却制御>

バイパスライン部 30、バッファライン部 25 を備えた本実施形態の冷凍機 1 による予定時の温度冷却制御 (予定時の運転方法) の要点をまとめると

、以下ようになる。

- [0114] 1) 起動時に、冷凍機の所定回転数をRPM(1)とし(圧縮機C1、C2、C3と膨張機Tのうち少なくとも膨張機Tの回転数を所定の回転数RPM(1)とし)、バイパスライン部30のバイパスバルブである第3開閉弁32の開度を所定の開度V%(2)として運転を開始する(起動運転工程)。
- [0115] 2) また、膨張機Tの入口側の冷媒温度又は膨張機Tの出口側の冷媒温度を第1温度センサ33又は第2温度センサ34で検出する。そして、膨張機Tの入口側の冷媒温度又は膨張機Tの出口側の冷媒温度が、例えば、190K(225K)から第1目標温度の100Kとなるまで、第3開閉弁32の開度V%を段階的又は連続的に小さくしつつ、高圧ラインの冷媒R1を低圧ラインにバイパスライン31を通じて流通させる。また、第3開閉弁32の開度V%の段階的又は連続的制御を行いつつ、冷媒R1を起動時の温度から第1目標温度となるまで冷却する(バイパス制御運転工程)。
- [0116] 3) 次に、第3開閉弁32の開度が0%(閉)となって冷媒温度が第1目標温度になった段階で、第2温度センサ34で検出される膨張機Tの出口側の冷媒温度(又は第1温度センサ33で検出される冷媒温度)に基づき、冷媒温度が第1目標温度から第2目標温度となるまで冷却する(バイパス無し制御運転工程)。
- [0117] 4) また、バイパス制御運転工程とバイパス無し制御運転工程を行う際にはそれぞれ、少なくとも冷却目標温度(第1目標温度、第2目標温度)になるまで冷却速度を一定に保持するように、第2温度センサ34による冷媒温度に基づいて冷凍機1の回転数を連続的に調整制御する(冷却速度制御工程)。
- [0118] 5) また、上記の1)から4)の起動から予冷運転を行っている間で、第1圧力センサ36と第2圧力センサ37によって高圧ラインの冷媒圧力がバッファタンク27の圧力よりも予め設定した設定値(10kPa)以上大きくなる状態が検出された場合には、第1開閉弁28を開き、圧力差を利用し

てバッファタンク 27 に冷媒 R 1 を回収する（冷媒回収工程）。

[0119] 6) そして、上記の 1) から 5) の起動から予冷運転の制御によって、第 2 目標温度まで冷却到達して冷媒温度が一定になった段階で予冷運転が完了し、この予冷運転完了後に、液体窒素の循環開始とともに、第 1 温度センサ 33 又は第 2 温度センサ 34 による冷媒温度検出点を、冷却対象用冷媒 R 2 の温度を検出する第 3 温度センサ 35 での冷却対象側循環ライン 16 の冷媒温度検出点に切り替え、本冷却運転に移行する（本冷却運転切替工程）。

[0120] このように冷凍機 1 の起動から本冷却運に移行するまでの予定運転を制御することにより、例えば、図 4 に示すように、予冷中、一定の温度勾配で冷媒 R 1 を冷却することが可能になる。

[0121] さらに、第 3 開閉弁 32 の開度調整ひいてはバイパスする冷媒流量の調整制御を、膨張機 T の入口付近や出口付近に設けた第 1 温度センサ 33 又は第 2 温度センサ 34 の検出値に基づいて段階的又は連続的に制御することで、冷媒 R 1 の流量を検出する場合と比較して、装置構成の複雑化を招くことなく精度よく制御を行うことが可能になる。

[0122] したがって、本実施形態の冷凍機 1 及び冷凍機 1 の予冷時の運転方法によれば、冷媒 R 1 の流量を検出することなく冷媒 R 1 の流量制御によってサージング回避を達成できるので、装置構成の簡略化を図りつつ、安全性を向上することができる。また、圧縮機 C 1、C 2、C 3 や膨張機 T を高回転で運転した予冷が可能になり、スムーズな予冷運転が実現できる。

[0123] ちなみに、例えば、サージングの回避を回転数制御のみによって行おうとすると、回転数の無段階制御を行うことになるが、この回転数の無段階制御を実施するためには冷媒流量を計測する流量計を用いることになる。これにより、装置構成が複雑になってしまう。また、第 3 開閉弁 32 の開度を一定とする方法も考えられるが、この場合には、冷却が進むにつれて不要にバイパスされる冷媒 R 1 が増加してしまう。

[0124] そして、本実施形態の冷凍機 1 では、適宜タイミングで第 3 開閉弁 32 の開度を大きくすれば、バッファタンク 27 に冷媒 R 1 を回収することなく、

高压ラインから低压ラインに冷媒 R 1 を逃がし、冷媒 R 1 の流量を確保することができる。これにより、必ずしもバッファライン部 25 を備えなくても、予冷時における圧縮機 C 1、C 2、C 3 のサージングを抑止することが可能である。

[0125] ここで、図 9 は、バイパス制御運転（段階的制御時）の高压ライン、低压ライン、バッファタンク 27 の圧力変動の状態の一例を示す図である。

また、例えば、図 9 及び図 4 において、（a）は冷凍機運転開始時、（b）は初期運転制御のステップ 1 の終点（冷媒温度：225 K 時）、（c）は段階的あるいは連続的な運転制御のステップ 2 の終点（冷媒温度：190 K 時）、（d）は段階的あるいは連続的な運転制御のステップ 5 の終点（冷媒温度：100 K 時）をそれぞれ示している。

[0126] そして、図 9（及び図 4）に示すように、冷凍機運転開始の（a）からステップ 1 の終点の（b）までの間（ステップ 1 に相当）は、高压ラインの冷媒圧力が高くなるため、この（a）から（b）までの間で第 1 開閉弁 28 を開制御し、バッファライン部 25 によって冷媒回収を行う。すなわち、本実施形態の冷凍機 1 及び冷凍機 1 の運転方法では、（a）から（b）までの間において高压ラインの圧力が設定値（閾値）以上となり、このときに、第 1 開閉弁 28 を開制御し、バッファライン部 25 によって冷媒回収を行う。

なお、この（a）から（b）までの間におけるバッファタンク 27 の内部圧力の変動はほぼ高压ラインの冷媒圧力の変動と同様となる（同様の挙動／傾向を示す）。

[0127] 次に、ステップ 1 の終点の（b）からステップ 2 の終点の（c）までの間（ステップ 2 に相当）は、バイパスライン部 30 の第 3 開閉弁（バイパスバルブ）32 の開度が減少（例えば 40 % から 35 % に減少）し、冷媒のバイパス量が減少する。これにより、（b）から（c）までの間では、圧縮機 C 3 から膨張機 T に向かう冷媒量が増加し、一時的に高压ラインの圧力が高くなる。

[0128] このため、本実施形態の冷凍機 1 及び冷凍機 1 の運転方法では、（b）か

ら（c）までの間（ステップ2に相当）において、高圧ラインの圧力が設定値（閾値）以上、言い換えればバッファタンク27の内部圧力以上となり、この（b）から（c）までの間で、第1開閉弁28を開制御し、バッファライン部25によって冷媒回収を行う。すなわち、高圧ラインの冷媒圧力がバッファタンク27の内部圧力よりも高い領域で冷媒の回収を行う。

[0129] さらに、（a）から（b）、（b）から（c）までの間では、冷却速度を一定に維持するように回転数を増加する制御を行うことにより（例えば、第3開閉弁32の開度を一定（40%）、回転数を60%で（10分間）運転後に60～75%の回転数制御を行うことにより）、冷媒の冷却速度を一定に保ち、この冷媒の温度降下に伴って高圧ラインの冷媒圧力が低下していく。

[0130] また、本実施形態の冷凍機1及び冷凍機1の運転方法では（a）から（b）までの間、すなわち、冷媒温度が概ね225 Kになるまでは、第3開閉弁32の開度を一定にして冷却運転を継続する。

[0131] 具体的に、（a）から（b）までの間で、第3開閉弁32のバルブ制御を行うと、（b）から（c）の間で見られるような外乱が生じ、高圧ラインの冷媒圧力の変動、さらに回転数の変化が生じて、冷媒の冷却速度を一定に維持する際の運転効率の低下を招くおそれがある。

このため、本実施形態の冷凍機1及び冷凍機1の運転方法では、段階的あるいは連続的な運転制御を行う場合にも、（a）から（b）までの間のステップ1では第3開閉弁32の開度を変更せず、一定開度で維持するようにしている。

[0132] そして、本実施形態の冷凍機1及び冷凍機1の運転方法において、バッファタンク27での冷媒回収は、第一に、（a）から（b）までの間の初期運転時（冷媒温度225 Kまで）で行って余分な冷媒を回収し、第二に、それ以降、第3開閉弁32の開度の変更時に一時的に冷媒の圧力上昇分だけ回収できるように行われる。

[0133] （通常運転中の冷凍機能力の調整制御）

なお、本実施形態において、通常（定常）運転への移行制御を行った後の通常運転中は熱負荷の状況に応じて冷凍機能力の調整を行う。

冷凍機 1 の能力を上げる際には、第 2 開閉弁 2 9 を開制御して低圧ライン 8 a にバッファタンク 2 7 内に貯留した冷媒 R 1 を戻す。

冷凍機 1 の能力を下げる際には、第 1 開閉弁 2 8 を開制御してバッファタンク 2 7 に冷媒 R 1 を回収する。

[0134] このとき、本実施形態の冷凍機 1 では、冷凍機能力の調整を行う判断条件、すなわち、第 1 開閉弁 2 8 と第 2 開閉弁 2 9 の開閉駆動制御の判断条件として、冷媒 R 1 の設定温度と冷凍機 1 の回転数（第 1 モータ 9 と第 2 モータ 1 1、ひいては各圧縮機 C 1、C 2、C 3 の回転数）を用いる。また、低圧ラインには第 3 圧力センサ 4 1 を設ける。

[0135] 例えば、第 2 開閉弁 2 9 は、第 1 温度センサ 3 3（又は第 2 温度センサ 3 4）で検出される冷媒温度が予め設定した設定温度以上（圧力不足）で、且つ冷凍機回転数 1 0 0 %（モータ負荷が好適）の場合に開とし、バッファタンク 2 7 の圧力が一定圧力分減少、又は冷媒温度が設定温度以下（冷媒量が過大）で、且つ冷凍機回転数が 1 0 0 % を下回った（モータ負荷が上昇）場合に閉とする。高圧ライン、バッファタンク 2 7、低圧ラインは各圧力センサで圧力を計測し、設定差圧以上の条件で冷媒 R 1 の放出や回収を行う。

[0136] 第 1 開閉弁 2 8 は、第 1 温度センサ 3 3（又は第 2 温度センサ 3 4）で検出される冷媒温度が予め設定した設定温度以下（冷媒量が過大）で、冷凍機回転数が 9 8 % など、予め設定した閾値を下回った（モータ負荷が過大）場合に開（冷媒循環ラインの冷媒量低減）とし、バッファタンク 2 7 の圧力が一定圧力分増加、又は冷媒温度が設定温度以上（冷媒量が減少）で、且つ冷凍機回転数が増加（モータ負荷が低減）して 9 8 % などの閾値以上になった場合に閉（冷媒回収停止）とする。

[0137] これにより、バッファタンク 2 7 の容量は限られ、冷媒回収量や回収時間を調整することが必要になるが、上記のように第 1 開閉弁 2 8 と第 2 開閉弁 2 9 の開閉駆動制御を行うことによって、冷媒回収量や回収時間の調整を行

うことができ、通常運転中、冷凍機能力を好適な状態に調整して維持することが可能になる。

[0138] 以上、本開示の冷凍機及び冷凍機の予冷時の運転方法の実施形態について説明したが、本開示に係る冷凍機及び冷凍機の予冷時の運転方法は、上記の実施形態に限定されるものではなく、変更例等を含め、その趣旨を逸脱しない範囲で適宜変更可能である。

[0139] 例えば、本実施形態では、低段圧縮機、中段圧縮機、高段圧縮機の3つの圧縮機を備えて冷凍機が構成されているものとしたが、少なくとも低段圧縮機、高段圧縮機を備えていれば、特に圧縮機の数进行限定する必要はない。

[0140] また、本実施形態では、一つのコントローラ40が、第1温度センサ33、第2温度センサ34、第3温度センサ35、第1圧力センサ36、第2圧力センサ37、第1動力計38、第2動力計39のそれぞれの検出結果を受けて、第1モータ9、第2モータ11の駆動、第1開閉弁28、第2開閉弁29、第3開閉弁32の開度（開閉駆動）を制御するものとしたが、コントローラは必ずしも一つである必要はない。すなわち、各センサなどの検出結果を分担して受け、各モータや弁などを分担して駆動制御する複数のコントローラを備えて構成してもよい。

[0141] なお、本開示の冷凍機及び冷凍機の予冷時の運転方法の実施形態については、冷凍機が常温で均圧している状態からの起動だけでなく、冷凍機の停止直後の再起動においても有効に機能する。その場合は、冷凍機の冷媒温度や低温機器の温度が昇温していない条件でも、各種センサの計測値をもとにコントローラで冷凍機予冷運転制御、バイパス制御、バッファタンク冷媒回収制御が行われるので、支障なく予冷運転が開始、継続できる。

[0142] 最後に、実施形態に記載の内容は、例えば以下のように把握される。

[0143] （1）本開示の一態様に係る冷凍機（冷凍機1）は、冷媒（冷媒R1）を圧縮する圧縮機（高段圧縮機C3）、及び、圧縮機とモータ（第1モータ9）によって駆動可能な回転軸を介して連結され、圧縮機で圧縮された冷媒を膨張させるための膨張機（膨張機T）を含む膨張機一体型圧縮機（膨張機一体

型圧縮機 7) と、膨張機で膨張された冷媒によって冷却対象（冷却対象、液体窒素、二次冷媒 R 2）を冷却するための冷却部（冷却部 2）と、膨張機から冷却部を介して低段圧縮機（低段圧縮機 C 1）に至る低压ライン、及び低段圧縮機から高段圧縮機に至る中圧ライン、高段圧縮機から膨張機に至る高压ラインを備えて冷媒を循環させるための冷媒循環ライン（冷媒循環ライン 8）と、一端を高压ラインに設けられた第 1 接続部（第 1 接続部 S 1）に接続し、他端を低压ラインに設けられた第 2 接続部（第 2 接続部 S 2）に接続されたバイパスライン（バイパスライン 3 1）と、バイパスラインに設けられ、開度を調整することによりバイパスラインを流れる冷媒の流量を調整可能なバイパスバルブ（第 3 開閉弁 3 2）と、を備えた。

[0144] 上記（1）の冷凍機においては、バイパスバルブを開制御することにより、高段圧縮機で圧縮された冷媒の一部を膨張機に供給することなく、再び低段圧縮機へは高段圧縮機に戻すことができる。また、バイパスバルブの開度を調整することにより、圧縮機に戻される冷媒流量、ひいては膨張機に流れる冷媒流量を変化させることができる。

[0145] これにより、起動時から予冷完了までの初期運転期間において、バイパスバルブの開度を運転状態に応じて適宜変更することでサージングを起こさず、且つ、冷却に使用されない冷媒を減らすことができ、動力が無駄とならない効率的（高 COP）な運転が可能になる。

[0146] （2）本開示の別の態様に係る冷凍機は、上記（1）の冷凍機であって、高压ラインのうち第 1 接続部と膨張機との間を流れる冷媒の温度を検出するための温度センサ（第 1 温度センサ 3 3）と、温度センサの検出結果に基づいて、バイパスバルブの開度、及び回転軸の回転数を制御するためのコントローラ（コントローラ 4 0、制御装置）と、を備えた。

[0147] 上記（2）の冷凍機においては、バイパスバルブの開度調整ひいてはバイパスする冷媒流量の調整制御を、膨張機の入口付近など、第 1 接続部と膨張機との間を流れる冷媒の温度を検出する温度センサの検出値に基づいて制御することで、冷媒の流量を検出する場合と比較し、装置構成の複雑化を招く

ことなく精度よく制御を行うことが可能になる。

[0148] よって、冷媒の流量を検出することなく冷媒の流量制御によってサージング回避を達成できるので、装置構成の簡略化を図りつつ、安全性を向上することができる。また、圧縮機や膨張機を高回転で運転した予冷が可能になり、スムーズな予冷運転が実現できる。

[0149] すなわち、初期運転期間において、従来よりも、サージングの発生を好適に抑制でき、且つ冷却速度を一定にして精度よく冷媒を冷却でき、効率的な運転制御を行うことが可能になる。

[0150] (3) 本開示の別の態様に係る冷凍機は、上記(1)の冷凍機であって、低压ラインのうち冷却部と膨張機との間の冷媒の温度を検出するための温度センサ(第2温度センサ34)と、温度センサの検出結果に基づいて、バイパスバルブの開度、及び回転軸の回転数を制御するためのコントローラと、を備えた。

[0151] 上記(3)の冷凍機においては、バイパスバルブの開度調整ひいてはバイパスする冷媒流量の調整制御を、膨張機の出口付近など、冷却部と膨張機との間を流れる冷媒の温度を検出する温度センサの検出値に基づいて制御することで、冷媒の流量を検出する場合と比較し、装置構成の複雑化を招くことなく精度よく制御を行うことが可能になる。

[0152] よって、冷媒の流量を検出することなく冷媒の流量制御によってサージング回避を達成できるので、装置構成の簡略化を図りつつ、安全性を向上することができる。また、圧縮機や膨張機を高回転で運転した予冷が可能になり、スムーズな予冷運転が実現できる。

[0153] すなわち、初期運転期間において、従来よりも、サージングの発生を好適に抑制でき、且つ冷却速度を一定にして精度よく冷媒を冷却でき、効率的な運転制御を行うことが可能になる。

[0154] (4) 本開示の別の態様に係る冷凍機は、上記(2)又は(3)の冷凍機であって、コントローラは、冷凍機の起動開始時から予冷運転完了時までの初期運転期間において、温度センサによって検出される冷媒の温度が予め設定

した第1目標温度に達するまで段階的に開度が小さくなるようにバイパスバルブを制御するとともに、温度センサによって検出される冷媒の温度の減少速度が一定に維持されるように回転数を制御する。

[0155] 上記(4)の冷凍機においては、起動時から予冷完了までの初期運転期間において、バイパスバルブの開度制御に加え、冷凍機(圧縮機、膨張機)の回転数制御を行うことで冷却速度を調整/修正し、冷却速度を一定に維持することによって、冷媒温度を精度よく制御することが可能になる。

[0156] また、バイパスバルブの段階的な開度制御と、冷凍機の回転数制御とを併用することによって、各ステップの温度区間ごとにバイパスバルブの開度を設定でき、それぞれの区分けした温度区間において冷却速度が予め設定した一定の設定値になるように回転数制御を行うことができる。

これにより、冷凍機の回転数や圧力の変動が少ない安定した予冷運転が可能になる。

[0157] (5) 本開示の別の態様に係る冷凍機は、上記(2)又は(3)の冷凍機であって、コントローラは、冷凍機の起動開始時から予冷運転完了時までの初期運転期間において、温度センサによって検出される冷媒の温度が予め設定した第1目標温度に達するまで連続的に開度が小さくなるようにバイパスバルブを制御するとともに、温度センサによって検出される冷媒の温度の減少速度が一定に維持されるように回転数を制御する。

[0158] 上記(5)の冷凍機においては、起動時から予冷完了までの初期運転期間において、バイパスバルブの開度制御に加え、冷凍機(圧縮機、膨張機)の回転数制御を行うことで冷却速度を調整/修正し、冷却速度を一定に維持することによって、冷媒温度を精度よく制御することが可能になる。

[0159] また、バイパスバルブの連続的な開度制御と、冷凍機の回転数制御とを併用することによって、各ステップの温度区間ごとにバイパスバルブの開度を設定でき、それぞれの区分けした温度区間において冷却速度が予め設定した一定の設定値になるように回転数制御を行うことができる。

これにより、冷凍機の回転数や圧力の変動が少ない安定した予冷運転が可

能になる。

[0160] (6) 本開示の別の態様に係る冷凍機は、上記(4)又は(5)の冷凍機であって、コントローラは、温度センサによって検出される冷媒の温度が第1目標温度に達した段階で開度が0%となるようにバイパスバルブを制御し、温度センサによって検出される冷媒の温度が第1目標温度よりも低温で第1目標温度より低く設定された第2目標温度に達するまで開度を0%に維持しながら、温度センサによって検出される冷媒の温度の減少速度が一定に維持されるように回転数を制御する。

[0161] 上記(6)の冷凍機においては、第1目標温度に達した段階で、バイパスバルブの開度が0%となり、バイパスラインを用いた運転制御が終了し、圧縮機から膨張機に冷媒循環量の全てが流れるバイパス無し制御運転に移行する。そして、バイパス無し制御運転の予冷運転で、次の目標温度である第2目標温度に向けて冷却速度が一定に維持されるように回転数制御を行う。

これにより、バイパスバルブの段階的又は連続的な開度調整制御と冷凍機の回転数制御を併用し、起動時から予冷完了までの初期運転期間において、一層効果的に、サージングの発生を抑制でき、且つ冷却速度を一定にして精度よく冷媒を冷却でき、効率的な運転制御を行うことが可能になる。

[0162] (7) 本開示の別の態様に係る冷凍機は、上記(6)の冷凍機であって、冷却対象を冷却する二次冷媒(冷却対象用冷媒R2)と冷媒とを熱交換するための熱交換器(冷却部、二次側負荷熱交換器2)と、二次冷媒の温度を検出するための二次冷媒温度センサ(第3温度センサ35)と、を備え、コントローラは、温度センサによって検出される冷媒の温度が第2目標温度より低くなった場合、二次冷媒温度センサの検出結果に基づいて回転数を制御する。

[0163] 上記(7)の冷凍機においては、第2目標温度に達した段階で温度センサから二次冷媒温度センサに温度検出点を切り替え、二次冷媒温度センサの検出結果に基づいて回転数を制御することで、初期運転期間の予冷運転から円滑に通常(定常)運転に移行することが可能になる。

[0164] (8) 本開示の別の態様に係る冷凍機は、上記(1)乃至(7)の何れかの冷凍機であって、冷却部で冷却対象の冷却に用いられた後の冷媒によって高压ラインの冷媒を冷却する冷熱回収熱交換器(冷熱回収熱交換器15)と、一端を高压ラインの冷熱回収熱交換器と膨張機との間に設けられた第3接続部(第3接続部S3)に接続し、他端を低压ラインの膨張機と冷却部との間に設けられた第4接続部(第4接続部S4)に接続したバッファライン(バッファライン26)と、バッファラインに設けられ、高压ラインから送られた冷媒を貯留可能なバッファタンク(バッファタンク27)と、バッファラインのうちバッファタンクと第3接続部との間に設けられた高压側バッファバルブ(第1開閉弁28)と、バッファラインのうちバッファタンクと第4接続部との間に設けられた低压側バッファバルブ(第2開閉弁29)と、高压ラインのうち第1接続部と第3接続部との間における冷媒の圧力を検出するための第1圧力センサ(第1圧力センサ36)と、バッファタンクの内部圧力を検出するための第2圧力センサ(第2圧力センサ37)と、第1圧力センサ及び第2圧力センサの検出結果に応じて高压側バッファバルブ及び低压側バッファバルブの開度を制御するためのコントローラと、を備えた。

[0165] 上記(8)の冷凍機においては、起動から予冷運転を行っている間で、第1圧力センサと第2圧力センサによって高压ラインの冷媒圧力がバッファタンクの圧力よりも予め設定した設定値以上大きくなる状態が検出された場合に、高压側バッファバルブを開き、圧力差を利用してバッファタンクに冷媒を回収することができる。

これにより、過大なモータ負荷の発生、サージングの発生をより効果的に抑止することが可能になる。

[0166] (9) 本開示の一態様に係る冷凍機の予冷時の運転方法は、冷媒を圧縮する圧縮機及び、圧縮機とモータによって駆動可能な回転軸を介して連結され、圧縮機で圧縮された冷媒を膨張させるための膨張機を含む膨張機一体型圧縮機と、膨張機で膨張された冷媒によって冷却対象を冷却するための冷却部と、膨張機から冷却部を介して低段圧縮機に至る低压ライン、及び低段圧縮機

から高段圧縮機に至る中圧ライン、高段圧縮機から膨張機に至る高圧ラインを備えて冷媒を循環させるための冷媒循環ラインと、一端を高圧ラインに設けられた第1接続部に接続し、他端を低圧ラインに設けられた第2接続部に接続されたバイパスラインと、バイパスラインに設けられ、開度を調整することによりバイパスラインを流れる冷媒の流量を調整可能なバイパスバルブと、高圧ラインのうち第1接続部と膨張機との間を流れる冷媒の温度、又は低圧ラインのうち冷却部と膨張機との間の冷媒の温度を検出するための温度センサと、温度センサの検出結果に基づいて、バイパスバルブの開度、及び回転軸の回転数を制御するためのコントローラと、を備えた冷凍機の起動時から予冷完了までの初期運転期間の運転方法であって、回転軸の回転数を初期運転期間の後の定常運転時よりも低い予め設定した回転数にするとともにバイパスバルブの開度を予め設定した開度にして運転を開始する起動運転工程と、コントローラによって、温度センサで検出される冷媒の温度が予め設定した第1目標温度に達するまで段階的にバイパスバルブの開度が小さくなるように制御するバイパス制御運転工程と、冷媒の温度が第1目標温度になった段階で、バイパスバルブの開度を0%として、第1目標温度から予め設定した第2目標温度になるまで冷媒を冷却するバイパス無し制御運転工程と、コントローラによって、バイパス制御運転工程とバイパス無し制御運転工程とのうち、少なくともバイパス制御運転工程で、冷媒の温度の減少速度が一定に維持されるように回転数を制御する冷却速度制御工程と、を備えた。

[0167] 上記(9)の冷凍機の予冷時の運転方法においては、バイパスバルブを開制御することにより、高段圧縮機で圧縮された冷媒の一部を膨張機に供給することなく、再び低段圧縮機へは高段圧縮機に戻すことができる。また、バイパスバルブの開度を調整することにより、圧縮機に戻される冷媒流量、ひいては膨張機に流れる冷媒流量を変化させることができる。

[0168] これにより、起動時から予冷完了までの初期運転期間において、バイパスバルブの開度を運転状態に応じて適宜変更することでサージングを起こさず、且つ冷却に使用されない冷媒を減らすことができ、動力が無駄とならない

効率的（高COP）な運転が可能になる。

[0169] また、起動時から予冷完了までの初期運転期間において、バイパスバルブの開度制御に加え、冷凍機（圧縮機、膨張機）の回転数制御を行うことで冷却速度を調整／修正し、冷却速度を一定に維持することによって、冷媒温度を精度よく制御することが可能になる。

[0170] そして、バイパスバルブの開度調整ひいてはバイパスする冷媒流量の調整制御を、膨張機の入口付近や出口付近に設けた第1温度センサ又は第2温度センサの検出値に基づいて制御することで、冷媒の流量を検出する場合と比較し、装置構成の複雑化を招くことなく精度よく制御を行うことが可能になる。

[0171] よって、冷媒の流量を検出することなく冷媒の流量制御によってサージング回避を達成できるので、装置構成の簡略化を図りつつ、安全性を向上することができる。また、圧縮機や膨張機を高回転で運転した予冷が可能になり、スムーズな予冷運転が実現できる。

[0172] すなわち、初期運転期間において、従来よりも、サージングの発生を好適に抑制でき、且つ冷却速度を一定にして精度よく冷媒を冷却でき、効率的な運転制御を行うことが可能になる。

[0173] （10）本開示の別の態様に係る冷凍機の予冷時の運転方法は、上記（9）の冷凍機の運転方法であって、バイパス制御運転工程では、コントローラによって、温度センサで検出される冷媒の温度が予め設定した第1目標温度に達するまで段階的にバイパスバルブの開度が小さくなるように制御する。

[0174] 上記（10）の冷凍機の予冷時の運転方法においては、起動時から予冷完了までの初期運転期間において、バイパスバルブの開度制御に加え、冷凍機（圧縮機、膨張機）の回転数制御を行うことで冷却速度を調整／修正し、冷却速度を一定に維持することによって、冷媒温度を精度よく制御することが可能になる。

[0175] また、バイパスバルブの段階的な開度制御と、冷凍機の回転数制御とを併用することによって、各ステップの温度区間ごとにバイパスバルブの開度を

設定でき、それぞれの区分けした温度区間において冷却速度が予め設定した一定の設定値になるように回転数制御を行うことができる。

これにより、冷凍機の回転数や圧力の変動が少ない安定した予冷運転が可能になる。

[0176] (11) 本開示の別の態様に係る冷凍機の予冷時の運転方法は、上記(9)の冷凍機の運転方法であって、バイパス制御運転工程では、コントローラによって、温度センサで検出される冷媒の温度が予め設定した第1目標温度に達するまで連続的にバイパスバルブの開度が小さくなるように制御する。

[0177] 上記(11)の冷凍機の予冷時の運転方法においては、起動時から予冷完了までの初期運転期間において、バイパスバルブの開度制御に加え、冷凍機(圧縮機、膨張機)の回転数制御を行うことで冷却速度を調整/修正し、冷却速度を一定に維持することによって、冷媒温度を精度よく制御することが可能になる。

[0178] また、バイパスバルブの連続的な開度制御と、冷凍機の回転数制御とを併用することによって、各ステップの温度区間ごとにバイパスバルブの開度を設定でき、それぞれの区分けした温度区間において冷却速度が予め設定した一定の設定値になるように回転数制御を行うことができる。

これにより、冷凍機の回転数や圧力の変動が少ない安定した予冷運転が可能になる。

[0179] (12) 本開示の別の態様に係る冷凍機の予冷時の運転方法は、上記(9)乃至(11)の何れかの冷凍機の運転方法であって、冷凍機は冷却対象を冷却する二次冷媒と冷媒とを熱交換するための熱交換器と、二次冷媒の温度を検出するための二次冷媒温度センサと、を備え、コントローラは温度センサによって検出される冷媒の温度が第2目標温度より低くなった場合に、二次冷媒温度センサの検出結果に基づいて回転数を制御する本冷却運転切替工程を備えた。

[0180] 上記(12)の冷凍機の予冷時の運転方法においては、第2目標温度に達した段階で温度センサから二次冷媒温度センサでの温度検出点を切り替え、

二次冷媒温度センサの検出結果に基づいて回転数を制御することで、初期運転期間の予冷運転から円滑に通常（定常）運転に移行することが可能になる。

符号の説明

- [0181]
- 1 冷凍機
 - 2 冷却部（二次側負荷熱交換器）
 - 7 膨張機一体型圧縮機
 - 8 冷媒循環ライン
 - 9 第1モータ
 - 10 一体型圧縮機
 - 11 第2モータ
 - 12 第1熱交換器
 - 13 第2熱交換器
 - 14 第3熱交換器
 - 15 冷熱回収熱交換器（再生熱交換器）
 - 16 冷却対象側循環ライン
 - 20 超電導機器（冷却対象）
 - 25 バッファライン部
 - 26 バッファライン
 - 27 バッファタンク
 - 28 第1開閉弁（高圧側バッファバルブ）
 - 29 第2開閉弁（低圧側バッファバルブ）
 - 30 バイパスライン部
 - 31 バイパスライン
 - 32 第3開閉弁（バイパスバルブ）
 - 33 第1温度センサ（温度センサ）
 - 34 第2温度センサ（温度センサ）
 - 35 第3温度センサ（二次冷媒温度センサ）

3 6 第 1 圧力センサ

3 7 第 2 圧力センサ

4 1 第 3 圧力センサ

3 8 第 1 動力計

3 9 第 2 動力計

4 0 コントローラ（制御装置）

C 1 低段圧縮機

C 2 中段圧縮機

C 3 高段圧縮機

T 膨張機

R 1 冷媒

R 2 冷却対象用冷媒（液体窒素、二次冷媒、冷却対象）

S 1 第 1 接続部

S 2 第 2 接続部

S 3 第 3 接続部

S 4 第 4 接続部

w 冷却水

請求の範囲

- [請求項1] 冷媒を圧縮する圧縮機、及び、前記圧縮機とモータによって駆動可能な回転軸を介して連結され、前記圧縮機で圧縮された前記冷媒を膨張させるための膨張機を含む膨張機一体型圧縮機と、
- 前記膨張機で膨張された前記冷媒によって冷却対象を冷却するための冷却部と、
- 前記膨張機から前記冷却部を介して前記低段圧縮機に至る低压ライン、及び前記低段圧縮機から前記高段圧縮機に至る中圧ライン、前記高段圧縮機から前記膨張機に至る高压ラインを備えて前記冷媒を循環させるための冷媒循環ラインと、
- 一端を前記高压ラインに設けられた第1接続部に接続し、他端を前記低压ラインに設けられた第2接続部に接続されたバイパスラインと、
- 前記バイパスラインに設けられ、開度を調整することにより前記バイパスラインを流れる前記冷媒の流量を調整可能なバイパスバルブと、
- を備えた、
- 冷凍機。
- [請求項2] 前記高压ラインのうち前記第1接続部と前記膨張機との間を流れる前記冷媒の温度を検出するための温度センサと、
- 前記温度センサの検出結果に基づいて、前記バイパスバルブの開度、及び前記回転軸の回転数を制御するためのコントローラと、を備えた、
- 請求項1に記載の冷凍機。
- [請求項3] 前記低压ラインのうち前記冷却部と前記膨張機との間の冷媒の温度を検出するための温度センサと、
- 前記温度センサの検出結果に基づいて、前記バイパスバルブの開度、及び前記回転軸の回転数を制御するためのコントローラと、を備えた、

請求項 1 に記載の冷凍機。

[請求項4]

前記コントローラは、

前記冷凍機の起動開始時から予冷運転完了時までの初期運転期間において、前記温度センサによって検出される前記冷媒の温度が予め設定した第 1 目標温度に達するまで段階的に開度が小さくなるように前記バイパスバルブを制御するとともに、前記温度センサによって検出される前記冷媒の温度の減少速度が一定に維持されるように前記回転数を制御する、

請求項 2 又は 3 に記載の冷凍機。

[請求項5]

前記コントローラは、

前記冷凍機の起動開始時から予冷運転完了時までの初期運転期間において、前記温度センサによって検出される前記冷媒の温度が予め設定した第 1 目標温度に達するまで連続的に開度が小さくなるように前記バイパスバルブを制御するとともに、前記温度センサによって検出される前記冷媒の温度の減少速度が一定に維持されるように前記回転数を制御する、

請求項 2 又は 3 に記載の冷凍機。

[請求項6]

前記コントローラは、

前記温度センサによって検出される前記冷媒の温度が前記第 1 目標温度に達した段階で前記開度が 0 % となるように前記バイパスバルブを制御し、前記温度センサによって検出される前記冷媒の温度が前記第 1 目標温度よりも低温で前記第 1 目標温度より低く設定された第 2 目標温度に達するまで前記開度を 0 % に維持しながら、前記温度センサによって検出される前記冷媒の温度の減少速度が一定に維持されるように前記回転数を制御する、

請求項 4 又は 5 に記載の冷凍機。

[請求項7]

前記冷却対象を冷却する二次冷媒と前記冷媒とを熱交換するための熱交換器と、

前記二次冷媒の温度を検出するための二次冷媒温度センサとを備え、

前記コントローラは、

前記温度センサによって検出される前記冷媒の温度が前記第2目標温度より低くなった場合、前記二次冷媒温度センサの検出結果に基づいて前記回転数を制御する、

請求項6に記載の冷凍機。

[請求項8]

前記冷却部で前記冷却対象の冷却に用いられた後の冷媒によって前記高圧ラインの冷媒を冷却する冷熱回収熱交換器と、

一端を前記高圧ラインの前記冷熱回収熱交換器と前記膨張機との間に設けられた第3接続部に接続し、他端を前記低圧ラインの前記膨張機と前記冷却部との間に設けられた第4接続部に接続したバッファラインと、

前記バッファラインに設けられ、前記高圧ラインから送られた前記冷媒を貯留可能なバッファタンクと、

前記バッファラインのうち前記バッファタンクと前記第3接続部との間に設けられた高圧側バッファバルブと、

前記バッファラインのうち前記バッファタンクと前記第4接続部との間に設けられた低圧側バッファバルブと、

前記高圧ラインのうち前記第1接続部と前記第3接続部との間における前記冷媒の圧力を検出するための第1圧力センサと、

前記バッファタンクの内部圧力を検出するための第2圧力センサと、

前記第1圧力センサ及び前記第2圧力センサの検出結果に応じて前記高圧側バッファバルブ及び前記低圧側バッファバルブの開度を制御するためのコントローラと、を備えた、

請求項1乃至7の何れか1項に記載の冷凍機。

[請求項9]

冷媒を圧縮する圧縮機、及び、前記圧縮機とモータによって駆動可

能な回転軸を介して連結され、前記圧縮機で圧縮された前記冷媒を膨張させるための膨張機を含む膨張機一体型圧縮機と、

前記膨張機で膨張された前記冷媒によって冷却対象を冷却するための冷却部と、

前記膨張機から前記冷却部を介して前記低段圧縮機に至る低压ライン、及び前記低段圧縮機から前記高段圧縮機に至る中圧ライン、前記高段圧縮機から前記膨張機に至る高压ラインを備えて前記冷媒を循環させるための冷媒循環ラインと、

一端を前記高压ラインに設けられた第1接続部に接続し、他端を前記低压ラインに設けられた第2接続部に接続されたバイパスラインと

、

前記バイパスラインに設けられ、開度を調整することにより前記バイパスラインを流れる前記冷媒の流量を調整可能なバイパスバルブと

、

前記高压ラインのうち前記第1接続部と前記膨張機との間を流れる前記冷媒の温度、又は前記低压ラインのうち前記冷却部と前記膨張機との間の冷媒の温度を検出するための温度センサと、

前記温度センサの検出結果に基づいて、前記バイパスバルブの開度、及び前記回転軸の回転数を制御するためのコントローラと、を備えた冷凍機の起動時から予冷完了までの初期運転期間の運転方法であって、

前記回転軸の回転数を前記初期運転期間の後の定常運転時よりも低い予め設定した回転数にするとともに前記バイパスバルブの開度を予め設定した開度にして運転を開始する起動運転工程と、

前記コントローラによって、前記温度センサで検出される冷媒の温度が予め設定した第1目標温度に達するまで前記バイパスバルブの開度が小さくなるように制御するバイパス制御運転工程と、

冷媒の温度が前記第1目標温度になった段階で、前記バイパスバル

ブの開度を0%として、前記第1目標温度から予め設定した第2目標温度になるまで冷媒を冷却するバイパス無し制御運転工程と、

前記コントローラによって、バイパス制御運転工程とバイパス無し制御運転工程とのうち、少なくともバイパス制御運転工程で、前記冷媒の温度の減少速度が一定に維持されるように前記回転数を制御する冷却速度制御工程と、を備えた、

冷凍機の予冷時の運転方法。

[請求項10] 前記バイパス制御運転工程では、前記コントローラによって、前記温度センサで検出される冷媒の温度が予め設定した第1目標温度に達するまで段階的に前記バイパスバルブの開度が小さくなるように制御する、

請求項9に記載の冷凍機の予冷時の運転方法。

[請求項11] 前記バイパス制御運転工程では、前記コントローラによって、前記温度センサで検出される冷媒の温度が予め設定した第1目標温度に達するまで連続的に前記バイパスバルブの開度が小さくなるように制御する、

請求項9に記載の冷凍機の予冷時の運転方法。

[請求項12] 前記冷凍機は、
前記冷却対象を冷却する二次冷媒と前記冷媒とを熱交換するための熱交換器と、

前記二次冷媒の温度を検出するための二次冷媒温度センサと、を備え、

前記コントローラは、

前記温度センサによって検出される前記冷媒の温度が前記第2目標温度より低くなった場合、前記二次冷媒温度センサの検出結果に基づいて前記回転数を制御する本冷却運転切替工程を備えた、

請求項9乃至11の何れか1項に記載の冷凍機の予冷時の運転方法。
。