

■ 技術賞内容紹介 ■

高効率・脱フロン極低温フリーザーの開発

野間口 有*・菅波拓也**

Tamotsu Nomaguchi Takuya Suganami

二川 暁美***・森 美喜男****

Akemi Futakawa

Mikio Mori

1. 諸 言

医療品の冷凍・保存、食品の冷凍などに使用されるバイオ・メディカル機器のニーズが増加している。医用低温機器は、これまでも家庭用冷蔵庫が保冷庫として用いられてきたが、バイオテクノロジーの進歩により、より低い温度の極低温保存が要求されるようになってきた。

極低温を生成する方法には、これまでは、ドライアイスや液体窒素等の寒剤を利用したもの、あるいは、蒸気圧縮式によるものがあった。このようなシステムにおいては、寒剤が消費されるため、連続使用のためには、寒剤を常に補給する必要があり、連続運転での運用上の制約が大きかったり、蒸気圧縮式では、液化したフロンガスなどが気化するときに熱を奪うのを利用しているため、得られる到達温度は -135°C レベルに制限されていた。

このような状況のなかで、極低温生成のため従来の技術とは異なった小型で高効率な機械式スターリング冷凍機を開発し、この冷凍機を用いた極低温フリーザーを開発した。スターリング冷凍機はフロンガスの代わりにヘリウムガスを膨張させて冷却する。

本文では、開発した極低温フリーザーのシステム構成とその特徴について述べるとともに、システムのキーコンポーネントであるスターリング冷凍機の構造やその冷却特性について紹介する。

2. 極低温フリーザーの構成

* 三菱電機株式会社開発本部開発部次長

〒100 東京都千代田区丸の内2-2-3

** 三菱電機株式会社中津川製作所開発部部長

〒508 中津川市駒場町1-3

*** 三菱電機株式会社長崎製作所開発部部長

**** 三菱電機株式会社長崎製作所開発部応用技術課課長

〒850-91 長崎市丸尾町6-14

2.1 研究開発のねらい

極低温の生成には、大別して上述の寒剤による方法と機械式冷凍機を用いる方法がある。さらに、機械式冷凍機は特殊混合冷媒の相変化を利用した蒸気サイクルと、相変化を用いず作動ガスを、圧縮、膨張させ極低温を得るガスサイクルによる方法がある。蒸気サイクルの場合、冷媒ガスの相変化温度で最低冷却温度が決定され、その温度は -135°C レベルのようである。これに対して、ガスサイクルは熱負荷との関連で最低冷却温度は定まるが、その到達冷却温度レベルには制限がなく、極低温で効率が低い。

このような観点から、今回、開発した極低温フリーザーは、ガスサイクルを利用したスターリング冷凍機を適用することにより、従来のシステムにはない次のような特徴の実現を目指した。

- ① 何処でも、いつでも、連続使用が可能。
- ② -150°C レベル以下の高効率な極低温冷却。
- ③ コンパクト性。
- ④ フロンガスを使用しない。

特に極低温冷却はバイオテクノロジー分野における要望が強く、水の再結晶温度である -135°C 以下の冷却温度が重要なポイントの一つとされている。

2.2 システム構成

図-1に開発した極低温フリーザーのシステム構成を

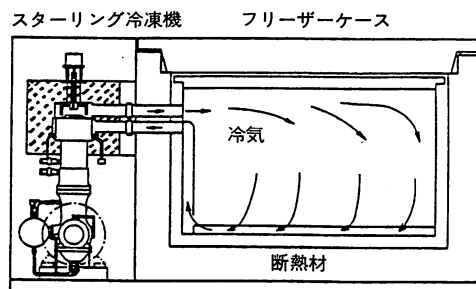


図-1 システムの構成

示す。極低温フリーザーは冷却保存物を収納する断熱のフリーザーケースとスターリング冷凍機から構成される。ケースの冷却は冷凍機のコールドヘッドにおいて熱交換して冷気を作り、ケース内に装着した冷気送気ファンによってケース内を所定の温度まで冷却する。スターリング冷凍機は連結される駆動モータによって駆動される。ケースの庫内温度のコントロールはスターリング冷凍機の回転数制御により行なう。

2.3 スターリング冷凍機

スターリング冷凍機とは、熱機関として知られるスターリングサイクルの逆サイクルを利用したものである。このサイクルはこれを冷却に最初に使用することに成功した人になんでカークサイクルと呼ばれることもある。以下このスターリングサイクルの動作、特徴と開発した冷凍機の構造等について述べる。

(1) スターリングサイクル

図-2にスターリングサイクルの基本的構成を示す。スターリングサイクルは作動ガスを等温で圧縮、膨張する行程と等積で冷却、加熱する行程とからなり、この動作を行なうためのピストンとディスプレイサが必要となる。2つの作動空間は蓄冷器と呼ばれる熱交換器で連通される。ピストンとディスプレイサは一本のクランク軸に連結され、互いのピストンは所定の位相差をもって往復運動を行なう。

寒冷の発生は図-2(c)のサイクル線図に示すように等温圧縮と等温膨張の2つの等温過程と等積冷却と等積加熱の等積過程からなる熱サイクルより行なわれる。動作の詳細を図-2(b)に基づいて説明する¹⁾²⁾。

① 1→2 (等温圧縮行程)

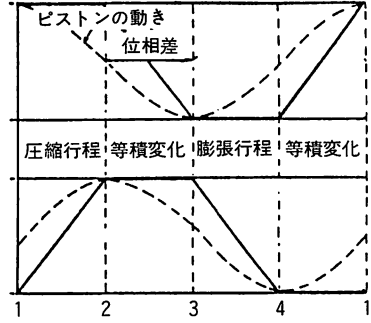
ピストンの上昇によって内部の作動ガスは圧縮され、圧力が上昇する。この時発生する圧縮熱はシリンダー表面より放熱され、作動ガス温度は一定に保たれる。この時、ディスプレイサピストンは上死点にある。

② 2→3 (等積冷却行程)

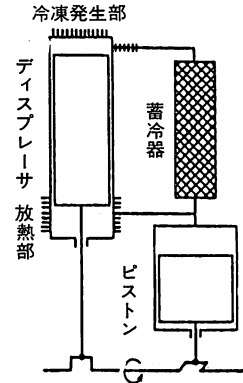
次に、ディスプレイサが下死点方向に動き始める。作動ガスは圧縮空間から蓄冷器を通過して、膨張空間へ移送される。蓄冷器を通る時、作動ガスは蓄冷器に熱を与えて冷却される。この過程は、ディスプレイサが位置を変えただけであるので、等積変化である。

③ 3→4 (等温膨張行程)

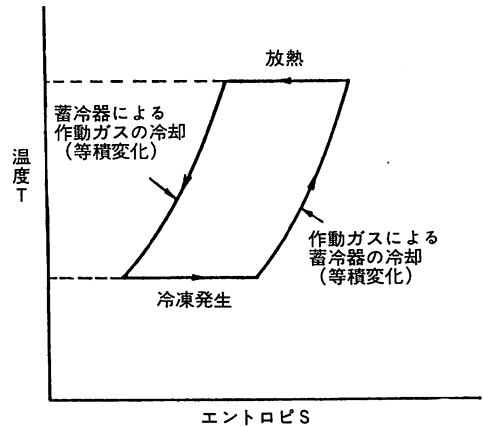
ピストンが下死点方向に動くとき作動ガスは膨張空間で膨張して圧力が低下し、同時に温度が下が



(a) 原理構成図



(b) ピストン動作



(c) T-S線図

図-2 スターリングサイクル

る。この時、外部に熱負荷があればガス温度は一定に保たれ寒冷が発生する。この過程では、ディスプレイサピストンは下死点にある。

④ 4→1 (等積加熱行程)

下死点にあるディスプレイサピストンが上死点方向に動き始め、膨張空間の作動ガスは蓄冷器を通過して圧縮空間へ移送される。この時、ガスは蓄

冷器に冷熱を与え、ガス温度は上昇する。この過程では、圧縮機ピストンは下死点にある。

上記の説明は図-2(b)の中の実線で示す理想的なサイクルにおける過程である。実際の冷却機では、クランク軸駆動であるため、それぞれのピストンは図中破線のような動きになる。

(2)冷凍機の構造

開発したスターリング冷凍機の構造断面図と外観写真を図-3、4にその主要諸元を表1に示す。構造は単気筒ピストン/ディスプレイサ形式で、それぞれのピストンは同一のクランク軸に装着され、所定の位相差を持って往復駆動される。ディスプレイサは作動ガスの移送を行なうだけで軽負荷であり、このような構造を採ることにより、機械損失が小さくでき、高効率な冷

表1 スターリング冷凍の主要諸元

項目	諸元
圧縮ピストン	ボア：80mm ストローク：33mm
ディスプレイサ ピストン	ボア：80mm ストローク：33mm
クランク角位相差	68°
圧縮室掃気容積	153cc
膨張室掃気容積	75cc

凍機の実現が期待できる。主な作動空間はディスプレイサピストン上部の膨張空間、圧縮ピストン上部の圧縮空間で、これらの空間を連通する蓄冷器があり、これらの空間には作動ガスであるHeガスを密封する。冷熱を発生する位置はコールドヘッドで、この箇所冷熱生成の熱交換器を形成する。クランク駆動機構は加圧構造のクランクケース内に装着される。摺動部の潤滑はオイルによって行っており、オイルとガスの外部への漏れはクランク軸端に設けたメカニカルシールによって防止している。また、上記作動空間へのオイルの侵入はオイル蒸気の凝固による性能低下を引き起こすため、油上がり防止機構を設けてこれを防止している。

2.4 フリーザーケース

図-5に開発した極低温フリーザーケースの外観写真を、表2にその主要諸元を示す。ケースに要求される特性はできるだけ保温性に優れていることである。断熱材にはできるだけ熱伝導率の小さい硬質ポリウレタン発砲材を用い断熱性能を確保している。また、ケースの外装には高級仕上げ鋼板を採用して、商品性を高めている。

スターリング冷凍機には往復運動部があるため、フリーザーケースには振動発生が予想される。そこで、

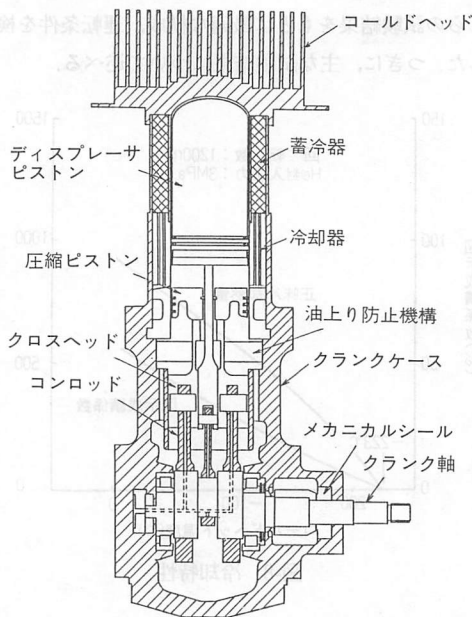


図-3 スターリング冷凍機の構造

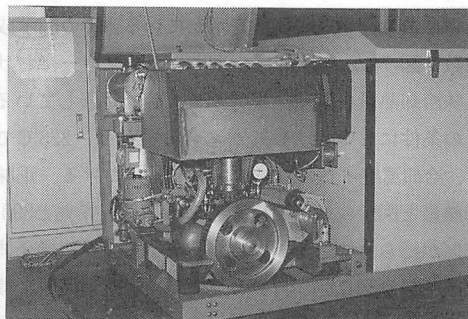


図-4 冷凍機の外観写真

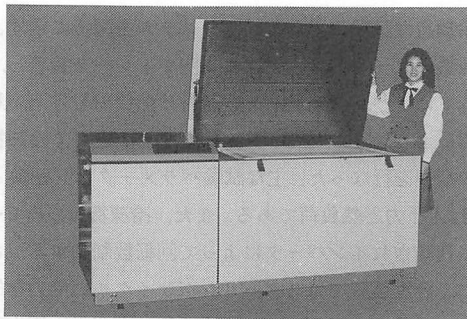


図-5 フリーザーケースの外観写真

表2 極低温フリーザーの主要諸元

項目	諸元
外形寸法	幅2120 * 奥900 * 高980
重量	約550kg
フリーザーケース	幅900 * 奥480 * 高470 (200リットル)
モータ入力	最大3.7kW
冷却	空冷ラジエーター方式
到達温度	-165℃
メンテナンス時間	10000時間 (目標)

冷却機本体を防振ゴムマウンドに装着して適切な固有振動数にチューニングする。このような防振構造を適用して、冷凍機からの振動伝達を低減し低振動化を図っている。

3. 冷却性能試験結果

3.1 冷凍機単体特性

極低温フリーザーへの組込み試験に先立ち、冷凍機構成の最適化を目的として、冷凍機単体での冷却特性の把握と評価を行なった。以下、その結果について簡単に紹介する。

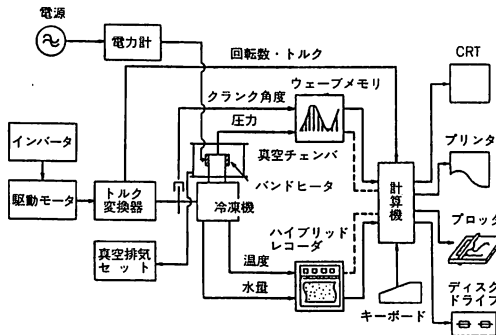


図-6 計測システムブロック図

冷却特性試験に用いた計測システムを図-6に示す。冷凍機のコールドヘッド部に真空チャンバを装着し、ヘッドにはバンドヒータを巻き付け熱負荷を与え、熱電対によりコールドヘッド冷却温度を測定して冷却特性の把握を行なった。主な試験パラメータは回転数とHe封入圧力と熱負荷である。また、冷凍機は駆動モータに連結されインバータによって回転数制御する。さらに、計測装置ではスターリングサイクルの熱力学的サイクル効率を評価するために、作動空間内の圧力変動を測定する圧力センサや冷却温度および排熱温度を

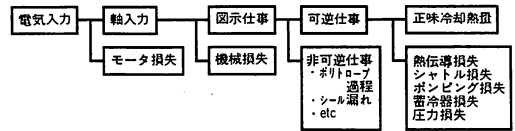


図-7 冷凍機のエネルギーフロー

測定する熱電対が取付けられている。

図-7にスターリング冷凍機におけるエネルギーフローを示す³⁾。モータへの電気入力熱力学的な仕事に変換されるとともに、種々の損失へ散逸される。有効に利用できるのは正味冷却量で、この大きさが冷凍機の冷却能力に対応する。

冷凍機は He 封入圧力や回転数などを変化させて、その時の冷却温度と冷却能力や成績係数を測定し、これらの試験結果をもとに最適な構成、運転条件を検討した。つぎに、主な試験結果について述べる。

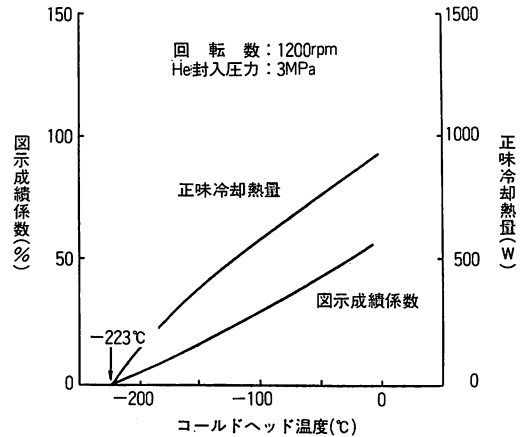


図-8 冷却特性

図-8に回転数1200rpm, He封入圧力が3MPaの条件における冷却特性の測定結果を示す。なお、この結果ではスターリング冷凍機の熱力学的な効率を表わす指標である図示成績係数を示している。この図示成績係数は図-7に示す冷却機のエネルギーフローにおける正味冷却熱量を図示仕事で割った値で定義している。この条件において、最低到達冷却温度は-223℃である。冷却温度-190℃および-150℃における、正味冷却熱量と図示成績係数はそれぞれ200W, 7%と390W, 16%が得られている。なお、実用の際の冷凍機全体の成績係数は図-7から判るように、図示成績係数に機械効率およびモータ効率を乗ずることによって算出される。この冷凍機では機械効率およびモータ効率ともに

90%以上であることを考慮すると、 -150°C において12%以上の高い総合成績係数が得られていることになる。従来の蒸気サイクルを利用した冷凍機では最低到達冷却温度は高々 -150°C レベルであり、かつ、実用の設定温度である -135°C での成績係数が数%程度であることを考えると、スターリング冷凍機の持つ高効率性と冷却温度範囲の広さと言った優れた特徴が良く理解される。また、図-9には、 -150°C における正味冷却熱量と図示成績係数の回転数依存性の試験結果の一例を示す。この結果から、回転数の増大に伴って正味冷却熱量は大きくなるが、逆に、図示成績係数は低下する傾向が見受けられる。これは回転数の増大によって作動空間内における圧力損失が増加し無効な図示仕事が増えることによるものと考えられる。

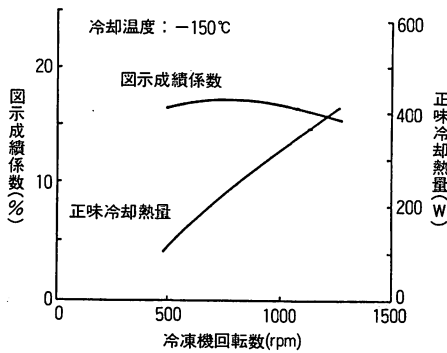


図-9 冷却特性の回転数依存性

3.2 庫内温度特性

図-10にスターリング冷凍機をフリーザーケースに組み込み、無負荷において庫内温度のプルダウン特性を測定した結果の一例を示す。この結果より起動から約200分程度で庫内を -165°C の温度まで冷却することができることが分かる。到達庫内温度は侵入熱量の大きさに決まるため、より高性能な断熱構造が要求される。

3.3 連続寿命試験

実用化のためにはシステムの寿命や信頼性の確保が重要な課題となる。こういった観点より冷凍機をフリーザーケースに組み込んだ状態での連続寿命試験を実施した。5000時間の連続試験を行なった結果、冷却性能の低下や運転に支障をきたすようなトラブル等は発生しなかった。また、試験後分解してクランク駆動機構やシール部の摩耗状態について調査したが、特に、累常な箇所も無く正常であった。さらに、油上り防止機構も正常に機能し、作動空間への潤滑オイルの侵入

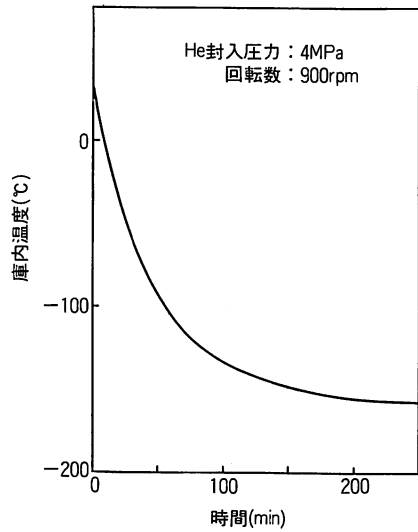


図-10 プルダウン特性

は観察されなかった。

4. 結 言

極低温生成のためのスターリング冷凍機を開発し、さらに、この冷凍機を適用した極低温フリーザーを開発した。庫内冷却温度は -165°C まで容易に到達することができ、従来のフリーザーでは得られなかった冷却効率の高さ、冷却温度範囲の広さといった優れた特長を実現し、高性能な極低温フリーザーの可能性が実証できた。さらに、このフリーザーでは地球温暖化で問題とされているフロンガスを使用しておらず、今日的意義も大きく、今後の低温利用分野の拡大・発展に貢献するものとする。今後は、冷却効率の向上のためのシステム最適化の検討や実使用条件のもとで信頼性の実証を図り、実用化を目指す予定である。最後に、本極低温フリーザーの開発にあたって多大なる協力をされた三菱電機の高石、数本、熊田、古賀の各氏に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 菅波, 藤原, 酒井, 幸田, 野間口: 三菱電機技報・Vol. 62・No.10・1988
- 2) 近藤, 横井, 中村, 中山, 奥村: 冷凍・第63巻第733号, 昭和63年11月号
- 3) 野間口: 冷凍・第62巻第719号, 昭和62年9月号