極低温冷凍機—最近の展望—*

Cryogenic Refrigerators—an Updated Survey

T. R. Strobridge

Cryogenic Division
Institute for Basic Standards
National Bureau of Standards
Boulder, Colorado 80302
(柳井正誼**訳)

1968年末、極低温冷凍機・液化機（空気分離装置は含まない）の、効率、重量、容量、価格についての資料集めが始められ、1969年の初めに、米国およびヨーロッパから集められた95台の装置についての調査結果を発表した。この調査結果は、非常に満足すべきものであったため、調査はその後にも継続され、1969年以後現在までに開発された新しい装置49台の調査結果をこれに加えた。資料のパラッキは相当あるが、設定された目的に対する限界値を得る程度であれば、充分に有効な資料と考える。効率は、装置に必要な入力と運転費の概略を示している。装置の重量は、加速器の設計者のように大型装置を手がけている人達には、あまり興味がないかも知れないが、小容量の装置を必要とする航空機関係の人達にとっては重要な項目となる。冷凍機によって占められる空間容積は、加速器近くの限られた場所、せまい実験室、航空機、船舶において重要な項目になる。図1~4における実線は、調査結果から平均値を求め、筆者の独断で引いたもので、強い意味は含んでいない。実線の一般的傾向は、この種の装置を良く知っている人達にとっては充分予測し得るものと思うが、定まった値を出す時には、変化に幅があることを充分認識する必要がある。

熱力学の第2法則から、理想的な条件のもとで、単位冷凍量当りの最小仕事量は、次の式で求められる

$$\left(\frac{W_c}{Q}\right)_{\text{carnot}} = \frac{T_0 - T}{T} \quad (1)$$

ここで、 W_c は入力（圧縮仕事量から、膨張機によって得られる仕事量を引いたもの）、 Q は冷凍出力、 T_0 は環境温度（通常 300K）、 T は要求される冷凍温度である。表1から明らかなように、 T が低くなれば、

必要入力は急激に増大する。また、液化に必要な理想入力も読みとれる。この場合、表1における T は冷媒の沸点温度である。被冷却物を冷却する場合、液化機によって作られた液を用いるか、または、連続的に作動する冷凍機によるか、の必要入力の差は、はっきりしている。液化機の場合、冷却によって蒸発したガスの顕熱を、液化プロセスに入ってくるガスの冷却に用いることができないため、当然、入力は大きくなる。理想的なヘリウム液化機において、1l/hrの液化能力に対して要求される入力は236Wである。ヘリウムの潜熱は、非常に小さく、1.38l/hrの蒸発で、わずか1Wしか得られない。いいかえると、液化機によって作られた液で冷却する場合、4.2Kで1Wを得るためには326Wの入力が必要となる。これに対して、理想的な冷凍機を用いた場合、同じ4.2K-1Wを得るのに、わずか70.4Wで済むことになる。だからといっ

表1 必要可逆仕事量

冷 媒	T (K)	冷凍機 (W/W)	液 化 機 (W.hr/l)	液の潜熱による冷凍 (W/W)*
ヘリウム	4.2	70.4	236	326
水 素	20.4	13.7	278	31.7
ネ オ ン	27.1	10.1	447	15.5
窒 素	77.4	2.88	173	3.87
弗 素	85.0	2.53	238	3.26
アルゴン	87.3	2.44	185	2.95
酸 素	90.2	2.33	195	2.89
メ タ ン	111.5	1.69	129	2.15

* 液体の潜熱から計算された理想液化機の必要入力

*NBS Technical Note No.655 (June 1974)

**大阪酸素工業(株)開発部

て、全ての応用対象に対して必ずしも冷凍機が良いとはいえず、対象物によっては、液化機の方が都合の良いこともある。

極低温冷凍機の効率比較を行うときは、次の式を用いるとよい。

$$\text{Percent Carnot} = \frac{\frac{W_c}{Q} \text{ carnot}}{\frac{W_c}{Q} \text{ actual}} \times 100 \dots\dots (2)$$

この比は、実際の冷凍機が、理想的な性能から、どの程度ずれているかを示している。液化機に関する同様の比が、表1の数値と、液化量 1l/hr に必要な実際の入力との比から求めることができる。

各データーには、液化機も含まれているが、これは液化機としての性能から%カルノーを出し、この値を用いて冷凍量に変換し、同じ入力・効率で作動する冷凍機として取り扱った。冷凍機の場合は、メーカーから表示された値をそのまま用いた。入力については、全ての事例について、メーカーの仕様値をそのまま用いており、特にモーター入力を測定したわけではない。

図1に冷凍容量(W)の関数として%カルノーを示す。1.8K~9Kの温度領域における新しい装置の中で最も容量の大きいものは、液化機として作られたものである。この液化機は、3,420Wの冷凍容量のものとして設計されたものであるが、現在は、容量を減じて運転されている。実線で示した曲線は、1969年の報告時に引いた線であるが、新しいデーターを加えたあとも、特に変更すべき根拠が出てこなかったため、そのままである。

最近まで、温度の高い冷凍機(液化機)の方が効率が高いと言われてきた。ところが、このデーターによると、10~30K(および30~90K)の温度領域において、必ずしも、そうは言い切れない結果が出ている。入力としては、より高い温度の冷凍機の方が少なくなくて済むように見うけられるが、理想に対する損失量としてはあまり変っていない。10kW以下の冷凍機では、液体窒素を予冷系に用いるということが有効な手段となるが、この液体窒素の消費量を閉サイクル冷凍機の入力量として換算し、全入力に加算するということとは行なわなかった。もし、これを考慮するなら、図1の効率の平均は、もう少し低い値になるだろう。

図1に示される最大容量のものは、大型水素液化機である。この装置は、液体窒素温度の予冷を、閉サイクル冷凍機で行っており、そのための必要入力も、

はっきりしているし、全入力に加算もされている。故に、この数値は、ほぼ正しい数値を示しているといえる。30~90Kの高い温度領域の装置は数が少ないので傾向は、比較的是っきり読みとれる。10~1,000Wの領域では一応効率は高いといえるが、最大容量(図の右端にはみ出している■印)のものは、温度の低いものと比べて効率が低いとはいえない。小容量のものの性能に関するムラは、相当地大いが、入力が非常に小さいということから、この程度のムラは、認めざるを得ないだろう。データーのムラは大きいけれども、小容量の冷凍機は、大容量のものに比べて、全部が全部ではないが、一応、損失が大きく、効率が低いといえる。出力の小さい冷凍機の大半は、軍用あるいは航空機用として開発されたもので、これらは、必然的に軽量・小型が要求されている。図2および図3において1.8~9Kの温度の低い冷凍機の大半が、平均値よりも、小さい、軽いという傾向を示している。新しいデーターでは、30~90Kのものについて、比較的多くの調査が行なわれた、この結果、出力の小さいもの的大半が、旧型に比べて、より重く、大きくなっていることが分った。これらの新型の装置は、過去において、あまり一般的でなかった。熱力学的サイクル(訳者注:ギボード・マクマホン、ソルベイ、ヴィルマイヤー等のサイクルを指していると思われる)が用いられている。この試作機の重量、容積の増加は、色々考えられるが、新しいサイクルについての改良不足、価格の低減、長寿命化といったことのために、不必要に重く、大きくなったのではないかと推測される。図4については、以前の調査結果では、点が少なかったが、4Kの装置についての傾向は、ほぼ確立していた。今回の調査結果で、相当数の点が追加されたが、傾向は、まったく変わっていない。グラフの横軸は入力で、冷凍量でないことに注意してほしい。どんな冷凍量の冷凍機でも、入力は効率によって定まる。各種機械の価格は、入力の0.7乗に比例する。水素温度および、それ以上の温度領域の冷凍機、液化機についてもよく合う。これらのデーターを基にして、1.8~9Kの温度領域の冷凍機、液化機についての推定式を次に示す。

$$C = 6,000 P^{0.7} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、Cは装置の価格(ドル)、Pは入力(kW)である。ただし、各装置は、種類、用途、製作時期等について差異があるので、ドル価格の変動ということについては考慮を払わなかった。価格が数百万ドルにおよぶような装置の代表として、大型水素液化機が挙げら

図 1 極低温冷凍機(液化機)の冷凍出力と効率の関係

図 2 極低温冷凍機(液化機)の冷凍出力と装置容積の関係

図 3 極低温冷凍機(液化機)の冷凍出力と装置重量の関係

図 4 極低温冷凍機(液化機)の入力と価格の関係

れるのが、これについては、例も少ないし、液化用の水素ガス供給装置などの価格も含まれており、この式で限定することは出来ない。

ここで、もう一度、図 1~4 のチャートは、目標を推定するためのものであることを強調しておきたい。結果的には、広い範囲に存在する各種極低温冷凍機が相当良く予言されていると思う。効率については、この数年間に、非常に向上したとは言いがたい。ただし特定の例については向上したものはある。低い評価の熱力学サイクルが用いられているにもかかわらず、大型の装置は効率が高くなっている。同じ傾向を小型にも充当できるはずとは思いますが、小型の装置は価格的にも制限されているであろうし、運転費を節約しても量的にははれており、あまりメリットがないといった点で考慮されていないのではないかと推測している。価格と重量・容積との関係にも、同じ傾向がみられ、価格が高くなっても、重量・容積が軽減できれば良いといった風潮がみえる。標準型冷凍機の主価格については、ほぼ予測することができそうである。特別注文の装置は高くつくといえるが、図 4 にも含まれている、ヨーロッパの 21 台の装置の価格をみると、市場がせまく、競争の激しいことがうかがえる。最後に、この資料作りに協力いただいた下記の方々に謝意を表します。

G. P. Combs, W. E. Gifford, J. Hablitzel, R. S. Hunt, J. E. Kercheval, R. J. Senn, A. J. Steel, J. J. Thibault.

〔訳者追記〕

Strobridge による極低温冷凍機、液化機に関する調査は、1966年の米国低温会議 (CEC) で最初に発表されて以来、継続して続けられてきた。それらの調査の結果は、(参考文献として示すように) 段階的に発表されている。

この論文訳には、それらも参考として考慮した。調査の対象となった企業名および、その企業の協力者名は、この論文には記述されていないが、1969年までの調査結果を発表した論文には、記載されており、参考までに紹介記載しておく。()内は、その企業の責任者または協力者。

North American Philips Co., Inc (A. Austin)
Gardner Cryogenics (R. F. Benedict)
General Electric Co., (D. B. Colyer)
500 Inc=現 Cryogenic Technology Inc. (G. P. Coombs)
Cryomech Inc. (W. E. Gifford)
Santa Barbara Research Center (P. J. Granke, J. S. Buller)
Airco Cryogenics (H. D. Lindhardt)
Malaker Corporation (J. B. Malaker)
Hymatic Engineering Co. (K. E. Nicholds)
Philips Research Laboratory (G. Prast)
Superior Air Products Co., (L. E. Putman)
Linde Aktiengesell (V. Shlus, Seipfingen)
L'Air Liquide (P. L. Solente)
British Oxygen Co. Ltd. (A. J. Steel)
Cryogenic Consultants Inc. (P. C. Vander Arend)

参 考 文 献

- 1) Strobridge, T. R. and D. B. Chelton, "Size and Power requirements of 4.2 K refrigerators" Advance in Cryogenic Engineering Vol. 12, p. 276 (1967)
- 2) Strobrige, T. R., "Refrigeration for Superconducting and Cryogenic Systems", IEEE Transactions on Nuclear Science Vol. NS-16, No. 3 (Proceedings of 1969 Particle Accelerator Conference, March 5~7, 1969)