日立膨張タービン式大形ヘリウム液化装置

松本 嘉雄*・木村 茂*・野中 旭*
平戸 瑞穂**・佐藤 新太郎***

* (株)日立製作所日立工場 茨城県日立市幸町3-1-1

** (株)日立製作所日立研究所 茨城県日立市久慈町大甕4026

*** (株)日立製作所中央研究所 東京都国分寺市東恋ヶ窪1-280

(1969年6月30日受理)

Large-Scale Helium Liquefier

Yoshio MATSUMOTO*, Shigeru KIMURA*, Akira NONAKA*,
Mizuho HIRATO** and Shintaro SATO***

* Hitachi Works, Hitachi, Ltd., 3-1-1 Saiwai-cho, Hitachi-shi, Ibaraki-ken.

** Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd., 4026 Omika, Kuji-machi, Hitachi-shi, Ibaraki-ken.

*** Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd., 1-280 Higashi-Koigakubo, Kokubunji, Tokyo.

(Received June 30, 1969)

Hitachi constructed the largest helium liquefier in Japan in 1968. Its capacity was confirmed 150 l/h as liquefier and 500W as refrigerator. The 500 hours continuous operation was concluded successfully early in 1969.

The features of the plant are as follows.

- (1) Turbine inlet pressure is high (14.5 kg/cm²g).
- (2) Turbine circuit pressure is the same as liquefaction circuit pressure.

1. 緒言

最近超電導マグネットなどの極低温応用技術が急速に進歩し、大形化しつつあり、信頼性の高い大形ヘリウム液化装置の出現が待望されている。この要望に応えるため、われわれは数年前より大形ヘリウム液化装置の開発に着手し、昨春秋試作装置を完成し、運転を行なった結果良好な成績を納めたので、その概要を紹介する。

われわれは開発当初この液化装置の具備すべき条件として次の3点を考慮した。

- (1) 液化能力 100~150 l/h の大形装置であり、液化機としても冷凍機としても使用できるものであ

ること。大形超電導マグネット冷却にはこの規模のものが必要であろう。

- (2) 長時間連続運転が可能なこと。
- (3) できるかぎり構成機器を少なくし、操作および保守の簡易化をはかること。

この3点を考慮して寒冷発生のための膨張機として膨張タービンを採用することとした。

液化装置全景を Fig. 1 に、圧縮機を Fig. 2 に、計器盤を Fig. 3 に示す。

われわれの液化装置の特徴は、次のとおりである。

- (1) 膨張タービン回路と液化回路圧力を等しくしてフローの単純化をはかっている。
- (2) 高圧ヘリウム膨張タービンを使用している。

Fig. 1 Overall view of helium liquefier

Fig. 2 Helium compressor

Fig. 3 Control panel

2. フローシート

2.1 フローの説明

フローシートを Fig. 4 に示す。ガスホルダーに貯えられているヘリウムガスは、圧縮機により $16 \text{ kg/cm}^2\text{g}$ まで昇圧され、クーラー通過後、液化回路とタービン回路に二分される。液化回路を流れるヘリウムは、第1熱交換器で低圧ヘリウムおよび窒素ガスと熱交換後、第2熱交換器で液体窒素により冷却される。さらに第3、第4、第5熱交換器で低圧ヘリウムによって冷却され、二つの膨張弁によりほぼ常圧まで膨張し、一部は液化して液体ヘリウムタンクにたまり、未凝縮ガスは第5より第1までの熱交換器の低圧側を通過してガスホルダーへ戻る。

タービン回路を流れるヘリウムガスは、液化回路ガスと同様に第1、第2、第3熱交換器で冷却され、第1膨張タービンに入り、 $5.3 \text{ kg/cm}^2\text{g}$ まで膨張して温度降下する。さらに第4熱交換器で冷却された後、第

Fig. 4 Flow sheet of helium liquefier

2 膨張タービンに入り、 $0.3 \text{ kg/cm}^2\text{g}$ まで膨張し、液化回路戻りガスと合流してガスホルダーへ戻る。膨張タービン入口温度は、それぞれ、 48.5°K 、 18.3°K である。

液体窒素は第 2 熱交換器へ自動供給され、蒸発したガスの寒冷は第 1 熱交換器で回収される。

Fig. 5 に液体窒素を使用しない冷凍機の場合の T-S 線図を示す。

2.2 フローの選定

以上に述べたようなフローを選定した理由は次のとおりである。

- (1) タービンの数
保守の手数を減らす観点から、タービンは 2 台が妥当なところではないかと考えた。
- (2) タービンの配列
2 台のタービンの配列法としては、直列と並列の二つがあるが、本装置では直列とした。これは並列にした場合、直列に比較してタービンの流量が約半分になる上、膨張比が大きくなるため回転数が高くなって、技術的にきわめて困難となるからである。
- (3) タービン入口圧力

Fig. 5 T-S diagram for helium refrigerator

従来発表されている大形ヘリウム液化装置のタービン入口圧力はほとんど 10 atm 以下であるが、本液化装置では、第 1 膨張タービン入口圧力を約 15 atm と高くして液化回路圧力と等しくした。このことはプロセスが単純化されるという利点をともなった。第 1 膨張タービン入口圧力を高くすることの利点を一例をあげて説明する。Fig. 4 において液化回路の高圧側圧力を 15 atm 、低圧側圧力を第 2 膨張タービン出口および液体ヘリウムタンクで 1.3 atm 、第 1 熱交換器出口で 1 atm としたとき、第 1 膨張タービンと第 2 膨張タービンの入口圧力をそれぞれ

- (a) 15 atm および 6 atm
- (b) 8 atm および 4 atm

とした二つの場合を比較してみる。圧縮機の 所要動力、保冷損失、熱交換器温端温度差、タービン効率として同一の値を用いて二つの場合の最大冷凍能力を計算してみると

- (a) 568 W
- (b) 514 W

となり、第 1 膨張タービン入口圧力の高い方が、冷凍能力は大きくになっている。このように効率のよいタービンの開発さえできれば、タービン入口圧力は高いほど装置の能力を増大させる。

3. 構成機器

3.1 膨張タービン

2 台の膨張タービンは内向き半径流反動タービンで、本装置のために新しく開発したものである。膨張タービンの仕様を Table 1 に示す。第 1、第 2 膨張タービンの回転数はそれぞれ $110,000 \text{ rpm}$ および $80,000 \text{ rpm}$ と非常に高速である。膨張タービンの回転軸は縦形でジャーナルおよびスラスト軸受は油潤滑で、発生動力は油ブレーキにより吸収している。タービン入口圧力は第 1 膨張タービン入口で 14.5 kg/cm^2

Table 1 Helium Expansion Turbines

	1st Expansion Turbine	2nd Expansion Turbine
Inlet Press.	$14.5 \text{ kg/cm}^2\text{g}$	$5.2 \text{ kg/cm}^2\text{g}$
Outlet Press.	$5.3 \text{ kg/cm}^2\text{g}$	$0.3 \text{ kg/cm}^2\text{g}$
Inlet Temp.	48.5°K	18.3°K
Speed	$110,000 \text{ rpm}$	$80,000 \text{ rpm}$
Efficiency	85%	85%
Bearings	Oil-Lubricated	Oil-Lubricated
Brake	Oil Brake	Oil Brake

Fig. 6 Helium expansion turbine with oil-lubricated bearings

Table 2 Helium Compressor

Type	Balanced-Opposed Teflon Ring Oil Free 3 Stage Reciprocating
Capacity	1,700 Nm ³ /h
Delivery Press.	16 kg/cm ² g
Motor	290 kW

g と従来発表されているヘリウムタービン中最も高い圧力を採用しており、断熱効率も85%と高い値を示している。

回転計は高周波コイル形で、高速ヘリウムタービン用として日立で開発したものである。

Fig. 6 は本装置で使用している膨張タービンである。

3.2 圧縮機

圧縮機は日立バランス形テフロンリング式オイルフリー3段往復動圧縮機で、4つのシリンダーが二列に配列してある。この圧縮機は、ヘリウムガスの外部への漏れを少なくするために、グランド部はとくに考慮された構造となっている。圧縮機の仕様を Table 2 に示す。

3.3 熱交換器

熱交換器はすべてハンブソン形熱交換器を採用した。設計および製作にあたり、これら熱交換器をコンパクトにまとめることと長さ方向の熱伝導による寒冷

Table 3 Operating Results

	With LN ₂ Precooling	Without LN ₂ Precooling
Liquefaction Rate	150 l/h	75 l/h
Refrigeration Capacity	500 W*	450 W*
Liquid Nitrogen	100 l/h** 30 l/h***	— —
Starting Time	4 hours	8 hours
Power Requirement	265 kW	265 kW
Cooling Water	30 m ³ /h	30 m ³ /h

* at 4.5°K

** Liquefaction

*** Refrigeration

Fig. 7 Performance of helium expansion turbines

損失をきわめてわずかにおさえることに意を用いた。

3.4 保冷容器

この装置の低温機器は三つの保冷容器に収容され、常温から液体窒素温度までの保冷は常圧バーライト断熱法によって行ない、それ以下の温度の保冷は高真空積層断熱法を採用した。後者の真空容器は運転中10⁻⁶ mmHg の高真空に維持された。

3.5 計測

温度は常温から20°Kまでを銅-コンスタンタン熱電対、20°K以下をゲルマニウム半導体温度計で測定を行なった。ヘリウムガスの純度は微量酸素分析計を用いて連続的に測定を行なった。

Fig. 8 Cooling-down performance curve of helium liquefier without liquid nitrogen precooling

Fig. 9 Helium expansion turbine with gas-lubricated bearings

4. 運転結果

この装置は1968年10月に運転を開始し、最初の運転で液体ヘリウムが得られた。その後12月に100時間連続運転、1969年初頭に500時間連続運転を行なった。運転中装置はきわめて良好な状態にあり、何らトラブル発生はなかった。この結果から今後4,000~8,000時間の連続運転も可能であるとの見通しを得ることができた。

装置の運転結果を Table 3 に示す。設計温度で運転した場合の膨張タービンの効率 η は Fig. 7 に示す通りである。Fig. 7 において U/C_0 はローター周速度 U とタービン入口状態から出口圧力まで等エントロピー膨張したときの理論速度 C_0 との比である。第1, 第2膨張タービンともに最高効率は85%に達している。Fig. 8 は液体窒素による予冷を行わない場合の冷却特性曲線である。

装置の運転は簡単で、2人の運転員が起動から停止までのすべての操作を行なうことができた。

5. 結 言

日立が開発した大形ヘリウム液化装置は、運転の結果液化能力 150 l/h、冷凍能力 500 W に達し、500時間の連続運転も問題なく終了した。引き続き1969年4月からガス潤滑軸受膨張タービンによる実験を成功裏に行なっている。Fig. 9 はこの実験に使用しているガス潤滑ヘリウム膨張タービンである。