大型冷凍・液化機

菊池 一成

住友重機械工業株式会社平塚研究所 神奈川県平塚市夕陽ヶ丘63-30
(1972年6月16日受理)

Large-Scale Refrigerator and Liquefier

by Katsunari KIKUCHI

Hiratsuka Research Laboratory, Sumitomo Shipbuilding & Machinery Co., LTD.
63-30 Yuhigaoka, Hiratsuka-Shi Kanagawa-Pref.

(Received June 16, 1972)

Synopsis

The recent development of large scale refrigerator and liquefier at low temperatures is described.

Several typical plants which have already been installed are explained such as a large scale helium liquefiers in helium extraction plants, a tonnage hydrogen liquefier for the Saturn rocket fuel production, and combined refrigeration system of helium and hydrogen for a bubble chamber with a superconducting magnet.

1. 一般に大型冷凍機といっても大型機の実力の定義がないので、ここでは便宜上、液体ヘリウム温度の場合は液化能力で 30l/時 以上、液体水素でも液化能力 30l/時 以上と考えていきたい。本文では、ヘリウムの大型液化プラント、水素の大型プラント、泡箱用ヘリウム/水素冷凍装置の現状と問題点について、簡単に触れることにしたい。

2. ヘリウムガス生産地での液化プラント¹⁾

この液化プラントは殆んどアメリカに設置されていて、天然ガス中から分離・精製したヘリウムガスの液化機である。能力もスケールメリットを生かした大型液化機で、100l/時 以上となっている。プロセスヘリウムガスは精製後 (99.995%以上、アメリカ鉱山局規格で Grade A Helium) 液化されている。従って、天然ガスからのヘリウム分離・精製および液化プロセスを含めた全体の効率を考慮して、液化プラントの設計がなされている。例えば、液化用予冷の液体窒素は、ヘリウム分離中に使っている液体窒素の一部を用いたり、液化機への供給ヘリウムは、液体窒素温度のヘリウ

ムガスの場合があるので、ヘリウム分離プラントと液化プラントは近接して設置されている。Table 1 に参考のため、世界における 100l/時以上のヘリウム液化機の主要性能を示す。Table 1 から判るように、100l/時機以上は殆んどが、ヘリウムガス生産地における液化プラントである。そして、100~200l/時ではレシプロ膨張機による方式が多く、600~800l/時機ではタービン膨張機となっているようである。液化のエネルギー効率も、800l/時機では0.91kW・H/l、120l/時機では 1.83kW・H/l となっていて、ヘリウム液化の最小仕事は 0.23kW・H/l であることと比較すると、800~100l/時 機ではそれぞれ最小仕事の 4~8 倍の仕事を必要としている。これは、10~30l/時のヘリウム液化機が約10倍であるのと比べても、大型化でスケールメリットがでていることが判る。100l/時 以上の液化プラントは、ヨーロッパには現在ないが、ヨーロッパ各地で天然ガス中からヘリウムガスがでるので、このための大型液化機が建設される可能性が考えられる。また、日本における 100l/時以上の液化機で具体的な計画例が、電子総研 MHD プロジェクト内にあり、近

Table 1 容 量 100l/HR 以 上 の

方 式	能 力	メ ー カ ー	納 入 先	高 圧 圧 力	膨 張 機
Claude レシプロ 膨 張 機	200l/HR	Gardner Cryogenics U. S. A.	1964年より 自社液化プラント用 ①Hightstown, N. J. ②Glendale, Calif	—	(推定) Ingersoll-Rand 製 or 自社製レシプロ膨 張機, ピストン径 102m/m×102m/m スト ローク 1 台
Claude レシプロ 膨 張 機	100l/HR	Union Carbide Linde Division U. S. A.	1962年より Amarillo, Texas の He 液化プラントと して稼働開始	19 ATM	Ingersoll-Rand 製 1 台 使用。テフロンリング使 用 (レシプロ) 効率70%
Claude レシプロ 膨 張 機	120l/HR	Cryogenic Technology U. S. A.	1964年より ①Kerr-McGee Oil Industries Navajo, Ariz ②AIRCO Richmond, Calif 液化プラントとし て稼働	18 ATM 流量?	マイカータ (ベークライ ト) 製レシプロ膨張機 2 台使用, 本体 cold box と別の cold box に収納
Claude レシプロ 膨 張 機	140l/HR, 1,320W (at 4.5°K)	Air Products And Chemicals U. S. A.	1965年より NASA, Langley Research Center の Space Chamber 冷却用に使用	レシプロ膨張機 回路 入口 30 ATM 出口 2.6 ATM J. T 回路 入口 13 ATM 出口 1 ATM	レシプロ膨張機, 2 台 J. T 弁の直前に膨張機使 用
Claude タービン 膨 張 機	660l/HR Saturated at 1.09 ATM	Gardner Cryogenics U. S. A.	1967 (推定) より自 社液化プラントとし て稼働 Greenwood, Kansas	—	タービン膨張機 方式?
Claude タービン 膨 張 機	800l/HR	Sulzer Brothers Swiss	1966年より 液化プラント用とし て稼働 Otlis, Kansas	膨張タービン回路 高圧 9 ATM 低圧 1 ATM J. I 回路 高圧 16 ATM 低圧 1 ATM	油ジュンカツ式タービン 膨張機 2 台, シリーズに 使用。 高温側 32°K, 45m/mφ 低温側 10°K, 50m/mφ それぞれ効率80%, 6×10 ⁴ rpm
Claude タービン 膨 張 機	150l/HR (油ジュン カツ式 タービン 膨張機) 120l/HR (ガスジュ ンカツ式 タービン 膨張機)	日立製作所	1969年 自社試作機	高圧 17 ATM 低圧 1.3 ATM	油ジュンカツ式およびガ スジュンカツ式タービン 膨張機 それぞれの場合 2 台の タービンシリーズ使用 ○高圧側タービン膨張機 13.5→4.3 ATM 入口温度 48.5°K 11×10 ⁴ rpm 油 20×10 ⁴ rpm ガス ○低圧側タービン膨張機 4.2→1.3 ATM 8×10 ⁴ 油 14×10 ⁴ ガス 入口温度 18.3°K 効率はそれぞれ 85%

He 液 化 機 諸 元

LN ₂	熱交換器 H. EX	compressor	cold. box	冷 却 水	フ ロ ー ト シ ー ト	コ メ ン ト	文 献
使用	方式?	—	真空断熱	—	—	—	Liquid Helium Technology (1966) Pergamon Press
"	Brazed Al fin	オイルフリー 3 段 レシプロ 1,470 Nm ³ / HR	"	—	—	—	ref. Adv. in Cryoge- nic Engineering 8, 190 (1963)
60l/HR	Brazed Al fin (高温側の み使用)	オイルフリー テフロンリン グ 3 段 レシプロ 水冷 (インガース) (ルランド製) 入力: 220kW	"	—	—	LHe 1l 当 りの動力 1.83kW. H/l 起動時間 15 HRS	Adv. in Cryoge- nic Engineering 10 B. 22 (1965)
150l/HR	—	入力 400kW?	"	—	—	—	Adv. in Cryoge- nic Engineering 11, 116 (1966)
350l/HR	Brazed Al fin	方式? 820kW	" 直径 7' 高さ 41'	62m ³ /HR	—	—	A. H. Crawford Cryogenics, 10, 28 (19r0)
使用せず feedgas は 81°K, 17 ATM で系 に入る。 He extrac- tion Plant からの cold N ₂ 使っ ている。	Brazed Al fin	オイルフリー ラビリンズ式 725kW 膨張機回路 5,600 Nm ³ /HR, 高圧 9 ATM→ 低圧 1 ATM (3 段) J. T 回路 1,690 Nm ³ /HR, 高圧 16 ATM→ 低圧 1 ATM (4 段) 供給ヘリウム 16 ATM 560 Nm ³ /HR	—	—	double J. T. feed 81°K 17 ATM 低圧ガス ホルダー なし	LHe 1l 当 りの動力 0.91kW. H/l	Liq. He Techno- logy (1966) Pergamon Press
	ハンブソン	オイルフリー カーボン/テ フロンリング 1,700 Nm ³ / HR 17 ATM 290kW (日立バラン) (ス型)	LN ₂ 温度 以上 常圧パーラ イト LN ₂ 温度 以下 スーパーイ ンシュレー ション	30m ³ /HR	—	1.93kW. H/l	松本他 日立評論 52, 781 (1970) or 産業機械 1971 4. No. 247 “低温技術”

々液化機としてまとまるようである。これは、タービン膨張機式 200l/時である。

3. 大型水素液化機²⁾

この水素の大型機も、容量の大きなものは殆んどアメリカに設置されていて、NASA、アポロ計画のための SATURN シリーズの液体酸素—液体水素ロケット燃料供給用の液化機である。現在アポロ計画はスローダウンしているので、一部の大型機は停止状態にあるようである。

Table 2 に世界における大型機の代表例をあげてある。Table 2 から判るように、最大級のものは、Union

Carbide が作った 60 ton/日に及ぶもので、1 時間当りの液化能力は約 35,000l/時に達する。この程度の容量の場合、原料水素の供給は、天然ガス等の水蒸気改質によるものを、常温の MEA Scrubbing absorption を通した後、低温吸着精製を行なって、特に、不純物酸素は 1ppm 以下に押えている。予冷用の窒素液化機は、もちろん付属装置として設置され、容量も液体容量で 30,000~40,000l/時 必要と思われる。水素の圧縮機はレシプロ型式が使用され、液化プロセスは Claude 法であり、膨張機はタービン膨張機を採用している。液体水素を長期間貯蔵するため、オルソ・パラ転換器をいれ、95% 程度のパラ濃度に行っている。

Table 2 世界における大型水素液化機の現状

*¹⁾ アメリカ空軍所有

Company	Air Products and Chemicals (U. S. A.)	L' Air Liquide (FRANCE)	L' Air Liquide (FRANCE)	Air Products* ¹⁾ and Chemicals (U. S. A.)	Union Carbide, Linde (U. S. A.)
Location	New Orleans, Louisiana	Le Blanc-Mesnil Seine	France Marais Nord	West Palm Beach, Florida	Sacramento California
Plant Capacity (ton/day)	30	0.168	0.84	30	60
Year on Stream	1965	1964	1966	1958	—
Source of H ₂	Natural Gas Steam Reforming	Cracked NH ₂ & Cylinders	Coke Oven Gas	Partial Oxidations of Fuel Oil, Natural gas	Natural Gas Steam Reforming
Purification methods	Partial Condensations Adsorption	Low Temperature Adsorption	Low & High Temperature Adsorption	Adsorption	MEA Scrubbing Adsorption & Adsorption
Compressors	Reciprocating (N ₂ & H ₂)	Reciprocating	Reciprocating	Reciprocating (N ₂ & H ₂)	N ₂ -Centrifugal N ₂ -Reciprocating H ₂ -Reciprocating
Refrigeration	Reciprocating Expander (N ₂ & H ₂)	J-T Expansion (H ₂) LN ₂ from Outside	Turbo Expander (H ₂) Reciprocating Expander (H ₂ & N ₂)	Turbo Expander (H ₂) Reciprocating Expander (N ₂)	Turbo Expander & J-T Expansion
Ortho-Para Conversion	Temperature Levels 7 Catalyst, A. PAACHI	Temperature Levels 2 Catalyst, Iron Oxide	Temperature Levels 7 Catalyst, Iron Oxide	Temperature Levels 5 Catalyst, Iron Oxide	Houdri Catalyst to 95% Para
Cold Box Insulation	Proprietary and Evacuated Perlite	Vacuum	Perlite and Vacuum	Rockwool & Perlite	Perlite and H ₂ Gas
Storage Capacity (m ³)	3780	10	50	75	3000
Distribution	Rail Roadcars Barges Trailers	Trailers	Trailers	Trailers	Trailers and Tankcar

Table 2 の West Palm Beach にある 30 ton/日プラントの全体のブロック・フローダイアグラムを Fig.1 に、TEXACO 部分酸化法による、原料水素発生装置を Fig.2 に、液化装置本体フローシートを Fig.3 に

示す。この 30 ton/ 日水素液化プラントの液化のためのエネルギー効率は、部分酸化のための酸素プラントおよびその他の付属装置の所要動力を全て含めて、1.4 kW・H/l である（最小仕事は 0.23kW・H/l）。

Fig. 1 30 ton/日 水素液化機フローシート

Fig. 2 30 ton/日 水素液化機用原料水素発生装置

4. 泡箱用冷凍装置³⁾

特殊な冷凍装置に入るが、高エネルギー物理の粒子検出器として大型化の傾向をたどっている装置に泡箱用の冷凍システムがある。今までは、液体水素を泡箱に貯めるための水素液化・冷凍機のみで充分であったが、泡箱の大型化・高性能化が要求されて、超電導磁石による高磁場が必要となった。そのために、泡箱用水素液化機の他に、超電導磁石冷却専用ヘリウム液

化機も設置されるようになりつつある。そこで、ここでは超電導磁石利用の泡箱冷凍装置について、下記の例をあげる。

CERN 3.7m 泡箱用ヘリウム—水素液化冷凍機

スイスにある、ヨーロッパ原子核研究所 (CERN) の泡箱で、泡箱内の液体水素の容積は 33.5m^3 、泡箱の重量は 50t 。外側の超電導磁石の重量は、 350t に達している (磁場は 35キロガウス 、磁石の蓄積エネルギー 800MJ)。

Fig. 3 30 ton/日 水素液化機本体フローシート

定常運転時の冷凍能力はそれぞれ $\begin{cases} 25\text{kW} & -22^{\circ}\text{K} \\ 1.5\text{kW} & -44^{\circ}\text{K} \end{cases}$

泡箱系の発熱は、静的負荷 5 kW、動的負荷（膨張機によるもの）20 kW 以下となっている。冷凍機に事故があると、泡箱は液体水素が蒸発するのみであるが、超電導磁石では 800 MJ ものエネルギーが発生し、大事故が予想されるので、超電導磁石の emergency 対策は第 1 と考えて、設計を行なっている。

冷凍サイクルは Fig. 4 および Fig. 5 に示す通り

Fig. 4 CERN 3.7m 泡箱用ヘリウム・
であっ水素液化冷凍機のサイクル

て、予冷用液体窒素は Philips の逆スターリングサイクル式で液化して使用し、ガス化分は再液化している。超電導磁石冷却は、Sulzer のタービン膨張機を採用した Claude 法であり、泡箱用水素は上述の液体窒素および Claude 法によるヘリウム冷凍サイクルで予冷後、液化するシンプルリンデサイクルを使っている。とにかく安全運転の立場から、超電導磁石の冷凍には主力をおき、タービン膨張機、ヘリウム圧縮機の事故がおきても、冷凍がストップしないように、ヘリウム系は、タービン膨張機および圧縮機を 2 基ずつ据付けである。しかも、さらに安全のため、外部より液体ヘリウムを供給できるようにしてある。全体の冷凍系は Sulzer がまとめている。

全体的にみて、この CERN の超電導磁石利用の泡箱の冷凍系の設計の考え方は、安全第一であり、窒素・水素・ヘリウムの 3 種類の液化機が内蔵しており、それぞれの液化方式も最も信頼性の高い方式をとっていることに特長がある。イギリスのラザフォードでも、この複合冷凍方式を採用しているようである。

Fig. 5 CERN 3.7m 泡箱用ヘリウム・水素液化冷凍機フローシート

Table 3 世界中の主なヘリウム液化冷凍機メーカー

国名	100l/HR 以上の実績	会社名	最大容量 l/HR (実績)	T:タービン 膨張機 R:レシプロ 膨張機
アメリカ	○	CRYOGENIC TECHNOLOGY INC	120	R
	○	GARDNER CRYOGENICS	660	T, R
		AIRCO CRYOGENICS	~30	T
		CVI CORP	50	R?
		CRYOGENIC ENGINEERING CO.	—	—
	○	UNION CARBIDE, LINDE DIVISIO	100	R
	○	AIR PRODUCTS & CHEMICALS	140	R
		GARRETT CORPORATION	—	—
イギリス		MALAKER CORP	—	—
		BRITISH OXYGEN CO.	~50	T
		HYMATIC ENGINEERING	—	—
フランス		AIRCO-BOC	~30	—
ドイツ		L'AIR LIQUIDE	~30	T
スイス		MESSER GRIESHEIM A.G.	—	—
オランダ		LINDE A.G.	~60	T, R
日本	○	SULZER BROTHERS	800	T
		PHILIPS	10	R
		日本酸素	60	R
		三菱電機	25	R
	○	日立製作	150	T
		大阪酸素	10	R
		住友重機	25	R

5. ま と め

大型液化冷凍機に関して、特に痛感することは、ヘリウム、水素いずれの場合も大型プロジェクトに関連して開発設置されたものであり、コマーシャルベースで考えられたものでないようである。ヘリウム液化冷凍に関しての見通しは、やはり超電導大型機器の冷凍機、例えば、超電導電力機器、超電導送電・送信ケーブル、磁気浮上用超電導マグネット等々に専用冷凍機として採用されることが考えられ、容量は 520l/時から 200l/時位までが適当なサイズと思われる。水素液化、冷凍に関しては、NASA の液体酸素-液体水素ロ

ケット等の計画が日本でスタートすれば別であるが、現在のボンベづめの高圧水素ガスの代りに、液体水素で貯蔵運搬、消費するシステムが実現すれば、大型水素液化プラントが稼働ようになる。

終りに、参考のため世界中のヘリウム液化・冷凍機を製作している主な会社のリストを Table 3 に示す。

参 考 文 献

- 1) R. H. Kropschot et al, Technology of Liquid Helium, NBS Monograph 111 (1968)
- 2) R. B. Scott et al, Technology and Uses of Liquid Hydrogen, Pergamon Press. (1964)
- 3) U. Giger et al, Cryogenics, **11** (1971) 451.