「75 cm 水素泡箱低温装置の運転」

平 林 洋 美*・喜 多 勲**
 田 代 為 喜***・高 田 純 一***

*東京大学原子核研究所 東京都田無市緑町 3-2-1

**東京農工大学工学部 東京都小金井市中町 2-151

***日本酸素(株)東京製作所 東京都大田区下丸子 2-12-15

(1971年 9 月 16 日受理)

*現在, 高エネルギー物理学研究所

“Operation of Cryogenic System for 75 cm
 Hydrogen Bubble Chamber”

by Hiromi HIRABAYASHI*, Isao KITA**, Tameyoshi TASHIRO***
 and Junichi TAKADA***

*Institute for Nuclear Study, University of Tokyo

3-2-1 Midori-cho, Tanashi-shi, Tokyo

**Faculty of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology

2-151 Naka-machi, Koganei-shi, Tokyo

***Tokyo Factory, Japan Oxygen Co., Ltd. 2-12-15 shimomaruko, Tokyo

(Received Sept. 16, 1971)

Synopsis :

A 1kW refrigerator-liquefier for the Japanese Hydrogen Bubble Chamber was constructed and test operations with the chamber have been carried out for three times. In the first run, the refrigerator-liquefier which is Simple Linde type was confirmed that it could afford about 60 liters of liquid hydrogen per hour or the equivalent refrigerant. In the later two runs, the bubble chamber was cooled down to the liquid hydrogen temperature at the rate of less than 5°K per hour and filled up with 220 liters of liquid hydrogen. Many bubble chamber photographs were taken under the various thermodynamical conditions. An automatic bubble chamber temperature control system which regulates the direct two-phase hydrogen flow from the refrigerator-liquefier is now under testing.

1. まえがき

欧米における1960年代の低温泡箱のめざましい発展を考えると、大型の安定した性能をほこるいくつかの水素冷凍機¹⁾の存在を忘れることはできない。

なかでも BNL 80" 水素泡箱に備えられている 2.6 kW cascade cycle 冷凍機²⁾ および CERN 2m 水素

泡箱に備えられている 7.4 kW turbo 冷凍機³⁾ はそれらの典型であるといえることができる。

過去数年にわたり、われわれは日本の水素泡箱のための冷凍液化機と温度制御装置(低温装置)の製作を行ってきた。

とくに1970年には泡箱の試運転を兼ねて、低温装置の長時間にわたる運転を行なったので、その結果と問

題点をここに報告する。

この冷凍液化機の負荷は通称「75 cm 水素泡箱」と呼ばれる膨張容積 220 リットルの中型泡箱である。

この泡箱は東京大学原子核研究所素研準備室で企画建設されたものである。泡箱の本体、真空タンクおよび膨張装置は住友重機械工業(株)平塚研究所が製作を担当され1968年に納入された。水素冷凍液化機および温度制御装置の製作は日本酸素(株)東京製作所が担当し1969年に納入した。

現在、この泡箱は素研準備室がその機能を終了し新設の高エネルギー物理学研究所^{*)}が発足したことによって、同所に移管され、とりあえず東京大学原子核研究所の電子シンクロトロンによる実験を行なうため整備されている。

将来、この泡箱は1m 泡箱に改造され、筑波研究学園都市の本所に移設されて、陽子シンクロトロンによる実験に供される予定である。

2. 装置の概要

2-1 泡箱の概要

この泡箱の計画は、すでに著者の一人 (I.K.) によって述べられているので、泡箱の概念図については、参考文献 3) を参照されたい。

この泡箱は、軸を水平に置いた電磁石のコイル間隙に真空タンクを設け、上から top plate に膨張装置、neck cooler および泡箱本体を順に吊下げて固定する構造になっている。

冷凍液化機と温度制御装置との関連において重要な部品はコールド・ピストンと本体との間にある neck cooler である。これは、冷凍液化機と泡箱との間にある事実上の熱交換器である。この neck cooler は銅のシリンダーの外側に冷却管を巻きつけ、内側には液体水素との熱交換面積を増し、かつ膨張時の流体抵抗を生じないような構造で8枚のフィンを取付けたものである。(Fig. 1 参考)

泡箱の動作時においては、液体水素の充填は、この neck cooler の直上にあるコールド・ピストンの若干上方まで行なわれる。膨張体積は、このピストンの下の体積で、実測によると 220 リットルである。

本本およびシリンダーの大部分は、60~90層のスーパー・インシュレーションがほどこされている。(Fig. 2 参照) 断熱のための真空度は、通常の運転時で 10^{-6}

Torr である。

シリンダーの内径は 40 cm 肉厚は 2.7 mm、高さは約 1.8m である。コールド・スピンはシリンダーから top plate を貫通するシャフトに接続され、一度空気中に出て再びパルス状の高圧空気で作動するホット・ピストンに接続されている。ピストンの総重量は63

Fig. 1 Copper neck cooler on the chamber

Fig. 2 The chamber wrapped with superinsulation

*) National Laboratory for High Energy Physics, Tsukuba, Ibaragi Pref.

kg で 13~15 mm のストロークを 28 msec で往復する。ピストンに働く加速度の瞬間最大値は数10Gに達する。通常この膨張装置は 0.5 c/sec で運転される。

ここに報告する。運転時には電磁石はまだ製作中であつた。この電磁石は水冷銅鉄電磁石で 2,000kW の電力で 18 kG 程度の中心磁場が得られる予定である。

光学系は、泡箱のガラス窓に面する磁極を空芯にして、真空タンクを水平に延長し、これに垂直に取付けたカメラ・パネルにセットされている。照明はスコッチライトによる明視野方式が採用されており、スコッチライトはガラス窓と反対側の本体の奥面に張付けられている。

ガラス窓には特殊な低温シールがほどこされている。このシールを含めて、泡箱の本体周辺のシールは全てインジウムによるダブル・シールが行なわれ、シール間は真空中に排気されている。

加速器による実験の際は、高エネルギー粒子は本体の側面に設けられた薄いビーム窓から導入される。参考のため、この泡箱の主要パラメーターを Table 1 に示す。

Table 1 Chamber main parameters

1. Material;	Mn 11% stainless steel
2. Expansion volume;	220 liters
3. Visible volume;	140 liters
4. Chamber diameter;	84.0 cm at rear side, 72.0 cm at front side
5. Chamber depth;	35.2 cm
6. Chamber window;	High grade BK-7 optical glass, 79.0 cm ϕ (rear), 72.0 cm ϕ (front), 10.0 cm thick
7. Expansion;	Liquid expansion with cold piston of I.D. 40 cm actuated by pneumatic system
8. Typical operation;	0.5 pulsation of 28 msec full width per sec
9. Illumination;	Bright field illumination with Scotchlite SPR-1042-4
10. Vacuum system;	14" oil diffusion pump followed with rotary pumps
11. Magnet;	2 MW water cooled copper-iron magnet

2.2 冷凍液化装置の概要

冷凍液化装置は (1) 泡箱の常温から液体水素温度までの冷却, (2) 泡箱内への液体水素の充填, (3) 泡箱運転中の静的および動的熱負荷の除去と温度制御という3つの目的のために使用される。冷凍液化装置の容量は主として最後の項目によって決められるが、75 cm 泡箱では静的熱負荷 120 watts, 動的熱負荷はやや余裕を見て液体 1l 当たり、くりかえし 1 c/s 当たり 2 watts とし、くりかえし 2 c/s の運転を予想して 800 watts と算定され、冷凍液化装置の標準冷凍能力は 25°K 1,00 watts と設定された³⁾。

泡箱用冷凍機は長期連続運転に対する高い信頼性が最も重要視されるので、冷凍サイクルとしては低温における稼働部分がなく、故障率の低い液窒予冷による Simple Linde 式が採用された。そして上記標準冷凍能力は液体窒素を大気圧で用いる時に得られ、液体窒素を減圧すれば冷凍能力を 1,500 watts に増加できるよう設計された。Table 2 には本冷凍液化装置の仕様を示してある。

Table 2 Specifications of refrigerator

	Precooling LN ₂	
	Atom. press.	Reduced press.
Refrigeration power (watt)	1,000	1,500
Operating pressure (kg/cm ² G)	120	120
Precooling temperature (°K)	80	65
Hydrogen flow rate (Nm ³ /h)	300	300
LN ₂ consumption (l/h)	40	50

Fig. 3 は冷凍液化装置の系統を示したものであるが、以下装置の構成および特長について簡単に説明する。

まず、長期連続運転に対する配慮として圧縮、精製系統の主要機器は全て二基並列に設置されている。全装置を通じて唯一の稼働部分である圧縮機は2基を同時に運転した時冷凍機は標準冷凍能力を得られるようになっており、定期点検あるいは故障によって片方が停止しても約1/2の冷凍能力を確保することができる。また泡箱を常温からの冷却期間中あるいは動的熱負荷のない泡箱ピストン停止期間中は必要冷熱量が少いの

で半量運転を行なうことも考慮されている。Fig. 4 には圧縮機の外観を示す。

装置が冷凍機として使用される場合系内水素ガスは循環使用されるので不純物の混入はほとんどないが、万全を期して油吸着器、乾燥器、低温精製器の一連の機器よりなる精製装置は常時一列を使用し、他の系列は再生、切替に備えておく。低温精製器の吸着剤としては酸素ガスの吸着による万一の事故を防ぐため特にシリカゲルが選ばれた。

冷凍液化機本体は H_2-H_2 熱交換器、 H_2-N_2 熱交換器、液体窒素予冷器および J-T 熱交換器よりなり、断熱容器に収められている。熱交換器は Fig. 5 に示すごとく全てハン普森式を用い、断熱は高真空積層断熱法を使用している。

標準的な運転の場合、装置は高圧圧力 $120 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ で操作されるが、冷凍液化機内の J-T 熱交で冷却された高圧水素ガスは冷凍機断熱容器内に設けられた

膨張弁 V_1 で中圧に膨張し、全長約 3m のトランスファチューブを通じて泡箱に導かれる。この中圧圧力はトランスファチューブ内での 2 相流を避けるため、臨界圧力よりやや高い $15 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ に調節される。泡箱の neck cooler に入る前に中圧水素ガスは第 2 膨張弁 V_2 によって例えば $2 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ に膨張、一部が液化する。泡箱の neck cooler で液の蒸発により泡箱内の液体水素を冷却したのち superheater と称する電気ヒーターにより飽和蒸気温度より $1 \sim 2^\circ \text{K}$ 昇温されたガスは第 3 の膨張弁 V_3 で大気圧に膨張し戻りのトランスファチューブを通じて冷凍液化機の J-T 熱交換器に入る。Fig. 6 はこの冷凍サイクルを T-S 線図で表わしたものである。なお、泡箱真空槽内の膨張弁 V_4 を使用して液体水素溜に水素を液化貯蔵することもできるようになっている。

泡箱本体内に充填する水素は冷凍液化機系循環水素とは別系統の高圧水素気蓄器より供給され、充填用低

Fig. 3 Schematic flow diagram of the refrigerator for 75cm hydrogen bubble chamber

温精製器を通じて精製したのち泡箱真空槽内の液体窒素で予冷し、次いで液体水素溜のコイルで液化されて本体に導入される。このように充填水素系統を別個に設けたのは将来泡箱に重水素やネオンを用いることも配慮したからである。

以下に冷凍液化装置構成各機器の形式および仕様を示す。

冷凍系高压ガス気蓄器 容量：175 Nm³×3 基

脱酸素装置 パラジウム触媒

低压水素ガスホルダー 容量：30m³

水素ガス圧縮機

形 式：堅型単動 4 筒 4 段圧縮油潤滑式

容 量：160 Nm³/h×2 基

圧 力：最高 150 kg/cm²G

電動機：60 kW×2 台

水油分離器 デミスターフィルター式

油 吸 着 器 アルミナゲル吸着式

乾 燥 器 モレキュラーシーブス吸着式

低温精製器 液窒冷却シリカゲル吸着式

冷凍液化機

形 式：Simple Linde 式

Fig. 4 Hydrogen compressor

熱交換器：Hampson 式

容 量：25°K, 1,000 watts (80°K 予冷)

25°K, 1,500 watts (65°K 予冷)

泡箱充填用高压水素気蓄器 容量：210 Nm³

2.3 安全対策

1962年に東京大学原子核研究所に泡箱実験室が新設された。この実験室は鉄骨スレート張りで東西15.0m 南北27.3m 軒高12.3m で 1.3 GeV INS 電子シンクロトロン of 西南に位置する。この実験室は、大量の水素を取扱うための諸設備がととのえられている。すなわち、泡箱の周りは高さ3.5m のコンクリート障壁がめぐられ、電気配線は防爆構造となっている。さらに水素の漏洩に備えて 300 m³/min の下から上に向う通常の換気装置のほかに、実験室内8箇所の水素濃度計と連動する 460 m³/min の強制換気扇が取付られている。

泡箱の制御は原則として空気圧式制御器で行われ、止めを得ない場合は防爆配線による電気機器が使用されている。全体として、われわれはこの実験室を JIS

Fig. 5 Heat Exchangers of Refrigerator

C 0903 に規定する「第二種場所」と考え、労働省産業安全研究所の「工場電気設備防爆指針 (1965)」に従って電気工事をを行った。

コントロール室は泡箱実験室の南西隅にある防爆壁にかこまれた面積約 50m^2 の室である。泡箱の制御に必要な防爆構造でない機器はすべてこの室に設置されている。実験室内の主要装置は ITV で監視され、緊急操作に属するものを含めて全ての操作をこの室で実施することができる。

水素系統に対する安全上の考慮は設計の段階から厳密に行なわれたことは当然であるが、各装置の運転前の検査および日常の安全管理が特に重要であることは申すまでもない。

安全対策上この泡箱の水素系統に取付けられている装置は 2 種類あると考えてよい。その一つは、液体水素緊急放出に関するものであり、他の一つは低圧水素ガスの排気に関するものである。

前者は泡箱の異常事態に対処するもので、泡箱本体

下部に取付られたコールド・バルブと断熱真空槽の外側に取付けられた破裂板、安全弁、および実験室屋上の気液分離装置 (容量 200 リットル) を結ぶ系統である。

泡箱の異常昇圧によってコールド・バルブが開放されると液体水素は破裂板または安全弁を経て水平距離約 13m、垂直距離約 13m の一部断熱された配管を通り実験室屋上に出て気液分離装置に一時的に蓄えられ徐々に放出される。万一、泡箱本体が破損しても、真空槽に放出された低温水素はこの系統に接続される。設計段階で合理的であったこの系統も、約 100 リットルの液体水素を一時に放出して、その結果にもとづき、現在は一部改良されて使用している。

後者の装置は、通常 vent line とよばれているもので、日常の低圧水素の排気に使用されている。この系統は $100\text{mm}\phi$ の配管にまとめられ水封式安全器を経て屋上に水素を放出している。いずれにしても実験室内に水素が漏洩する可能性はほとんどない。

Fig. 6 Temperature Entropy Diagram of Refrigerator

3. 運転試験とその結果

3.1 冷凍液化機性能試験

泡箱本体を冷却する運転に先立って冷凍液化機の単独性能試験が実施された。冷凍液化機の性能試験は泡箱の機器構成上冷凍能力を直接測定することが難しいので液化能力試験を実施し、この結果から冷凍能力を算定する方法によった。本冷凍液化機は Simple Linde 式であるので、冷凍液化能力はほとんど J-T 熱交換器の性能のみによってきまるから実測液化能力から冷凍能力の算定は比較的高い精度で行なうことができる。

液化能力試験は泡箱の neck cooler には水素を流さず、泡箱真空槽内の液体水素溜に水素を液化し、その液面上昇を測定することによって行なわれた。試験の結果は Table 3 に示すごとく、圧縮機 2 台を使用し高圧圧力 120kg/cm²G にて 80°K 予冷の時液化量は 58l/h であり、これより冷凍能力は 1,200 watts を得られると計算され標準冷凍能力の仕様を満足することが確認された。

また圧縮機を 1 台のみ使用した場合の試験も実施され、この場合には液化能力 28l/h、冷凍能力 560 watts の結果が得られた。

Table 3 Operating Results of Refrigerator.

	2 compressors	1 compressor
High pressure (kg/cm ² G)	120	120
Hydrogen flow rate (Nm ³ /h)	310	160
Precooling temp. (°K)	80	80
Lig. H ₂ vessel press. (kg/cm ² G)	0.14	0.07
Liquefaction rate (l/h)	58	23
Refrigeration power (w, cal.)	1,200	560

3.2 泡箱の冷却および運転

泡箱の冷却に先立って、準備作業として泡箱の組立が行なわれる。この作業は面倒で長時間を要するが、小さな作業上のミスが決定的に重大な事態につながるため特に重要な作業である。

泡箱の組立は、本体にガラス窓を取付ける作業が、特に難しく、高度の熟練を要する。ガラス窓は直径79

cm、厚さ 10cm の BK-7 光学ガラスである。このガラスとステンレス鋼本体との間には、この泡箱のために特別に開発された Inflatable Gasket を用いる低温シールがほどこされている⁹⁾。

Top plate の下に膨張装置の低温部と neck cooler および泡箱本体が取付けられ、内部配管の接続が行なわれたのち、厳重な気密耐圧試験と mass spectrometer leak detector による leak test が行なわれる。複雑な内部配管系統から断熱真空槽への total leak rate が 10⁻³ lusec 程度になると膨張装置を運転し、その強裂な振動が leak rate の増大をもたらさないかを調べる。これらの検査によって強度と安全性に充分の見通しを得た後、断熱のためのスーパー・インシュレーションを行なって真空槽に封入する。さらに本体のガスを純粋な水素に置換して準備作業が終わる。

泡箱の冷却は、膨張装置と泡箱本体との間に取付けられた neck cooler (Fig. 1) で行なわれる。neck cooler は銅製で、その重量は約 120 kg である。この neck cooler の外側に巻付けた冷却管に冷媒水素を流し、泡箱を上部から冷却する。したがって泡箱は熱伝導と充填ガスに発生する対流とで冷却されることになる。

冷却を要する部品の重量はステンレス鋼 650 kg、BK-7 ガラス 160 kg およびチタン（窓枠）50 kg が主なものである。

冷却時の注意事項としては、冷却速度の決定と低温シールの取扱いの問題がある。本体には BK-7 の大きな光学ガラス窓が取付けられており、これが冷却速度を決定し、低温シールの取扱いを支配することになる。

冷却速度はガラスに発生する熱歪による応力が、その温度における破壊強度を超えないことを条件に算定される。この計算では材料がガラスであることを考慮して 4 以上の安全率がかけられる⁹⁾。基本的には、この問題はガラスに発生する温度勾配と内部の熱流束の分布に影響されるが、シール圧力、ガス圧力等による local stress が加算される。いくつかの試算の結果、こ泡箱の冷却速度は 5°K/h を一応の目標にすることになった。もちろんこの値は温度の函数であり、低温になればスピード・アップすることが可能である。

冷却の際の低温シールの取扱いは、このシールが Inflatable gasket を用いていることから、充分な注意を要する。現在この泡箱に使用されている gasket はいくつかの試作品の試験結果にもとづき作られたもので Fig. 7 のような断面の構造を有し内径は73.0cm

である。この gasket は SUS-33 のリング状板材を溶接して作られている。この gasket は Inflatability に富み、シール圧力は gasket のヘリウム圧力（内圧）

Fig. 7 Cross sectional view of the window Seal

- ① Gasket, ② Indium wires, ③ Pump out space, ④ BK-7 glass window, ⑤ Window frame and, ⑥ Stainless steel body

を変えることによって調節される。常温から液体水素温度までの冷却時は、 $2 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ のヘリウム圧力で水素のシールを行なった。液体水素を充填する前にこの圧力は $6 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ に高められ、泡箱の膨張運転時には最高 $12 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ まで高められた。

泡箱の液体水素温度までの最初の冷却は、水素の代りにヘリウムを充填して行なわれた。この冷却は、泡箱の液体水素温度での耐圧試験を目的としたもので、試験終了後、ヘリウムは液体水素と置換された。続いて、泡箱の内圧をあげ、緊急放出系統を動作させ、液体水素を安全かつ急速に放出させた。緊急放出系統は、おおむね正常に働き、液体水素は気液分離装置を経て実験室屋上から安全に放出された。この試験結果にもとずき若干の改良が行なわれたのち、第2回目の冷却運転が行なわれた。

この冷却は Fig.8 に示す通り順調に進んで、液体水素が充填され、泡箱の運転、写真の撮影が行なわれた。

まず、泡箱冷却期間中は冷凍機の高圧圧力および流量を加減して発生寒冷を調節し、冷却速度を調節する操作が行なわれた。冷却初期段階では冷凍機の高圧圧力は $50 \sim 60 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ に設定し、泡箱の温度降下速度を監視しつつ流量を調節した。 5°K/h 以内の冷却速度に保つにはこの初期段階では流量は $20 \sim 40 \text{ m}^3/\text{h}$ 以下であった。冷却の終期では高圧圧力 $100 \sim 120 \text{ m}^3/\text{h}$ 、流量は $140 \sim 150 \text{ m}^3/\text{h}$ で操作されたが、 5°K/h 以内の

Fig. 8 Cool down curves of the Chamber

冷却速度では圧縮機は1台のみで充分であった。泡箱を常温より液体水素温度まで冷却するには72時間必要とし、泡箱に液体水素を充填するのにさらに19時間が必要とした。

泡箱本体の温度は熱電対と水素蒸気圧温度計で監視記録された。泡箱内部の圧力は静圧については Wallace & Tierman 社の精密圧力計 NFA 145 によって 2 g/cm^2 の精度で読みとられ、また膨張、圧縮時の動圧およびピストン・ストロークは電気的な方法で検出された。

泡箱の運転は本体内の液体水素の圧力、温度、膨張率および上下の温度差を変えて行なわれ、宇宙線および Co^{60} γ 線による compton 電子の bubble track を撮影した。Fig. 9 はその写真の一例である。また今回の運転中ピストンのくりかえしの周期は $0.2 \sim 0.5 \text{ c/s}$ の範囲で操作され、合計約30,000回の膨張が行なわれ、約8,000枚の写真が撮影された。

これらの運転結果により、この泡箱は液体水素の温度 26°K のとき圧力 5.0 atm で 0.75% の膨張に相当するピストンの変位を与えるとき最高の泡箱写真が得られることが判明した。また泡箱本体への静的熱流入は約 40 W であり、動的熱発生は平均して $150 \text{ W}/0.5 \text{ expansion/sec}$ 以下であった。

Fig. 9 Bubble tracks of a cosmic ray and Compton electrons form Co^{60} γ -rays

今回の泡箱運転条件のもとでは上記のごとく必要冷凍量が少なかったため、冷凍液化機は高圧圧力を下げ、出力を落して運転された。泡箱運転中の冷凍液化機運転条件は、常圧液体窒素予冷方式にて高圧圧力は $50 \sim 60 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ 、流量 $90 \sim 100 \text{ m}^3/\text{h}$ であり、泡箱冷却期間中と同様、水素圧縮機は1台のみの運転で充分であった。

3.3 運転結果の解析

泡箱を液体水素で充填し膨張装置の運転を停止したときに発生す熱流入を static heat loss と称し、その大きさは泡箱の構造と断熱シールドの性能によって決まる。

この泡箱の場合、その大きさは測定法によるバラツキはあるが、約 40 W である。この値は、適当な仮定による計算値より小さい。このことは、泡箱の断熱シールドは基本的にはスーパー・インシュレーションと 10^{-6} 程度の真空中で得られることを示すものと判断される。

膨張装置の運転にともなう熱発生は dynamic heat loss と称され、液体水素の単位体積あたりの発熱量は泡箱の構造と大きさによって決まり、大型のものほど小さい。

この泡箱の場合、実測の結果は $1 \text{ J/liter/expansion}$ に近く、中型泡箱として妥当な値である。

したがって、冷凍液化機の出力は毎秒5回程までの多重膨張を許容することになる。

次に泡箱において精度の高い写真を得るためには泡箱内の温度分布を均一に保ち、またその時間的な変化が極めて少ないよう精密な温度制御を必要とする。この 75 cm 泡箱用冷凍液化装置には $23 \sim 30^\circ\text{K}$ の範囲において $\pm 0.02^\circ\text{K}$ の精度で温度調節を行なうことを目標とする自動制御装置が設けられている。

この温度制御方式についてはすでに本誌に報告されているので²⁾ 詳細の説明は省略するが、BNL-80" 泡箱で採用された方法⁶⁾ にならったもので、cooling line の出入口に自動調節弁を設け、入口の弁では cooling line 出入口の温度差を一定にするよう冷却用水素の流量を調節し、出口の弁では泡箱内液体水素の設定温度に応じて冷却系の圧力すなわち冷却水素の温度を調節するものである。

上記の自動調節弁には全て空気圧作動式の低温用長軸調節弁を新たに設計して用い、また泡箱および cooling line の温度測定には水素蒸気圧式温度計を使用した。泡箱温度測定には泡箱中部の液体水素中に 30

cm の間隔をもって上下 2 つの蒸気圧温度計 bulb を挿入し、蒸気圧の測定には読取り精度 2 g/cm^2 (26°K 付近にて 0.003°K に相当) の Wallace & Tierman 社製圧力計を用いた。

今回の運転では自動温度制御系の試験として前記 2 種類の制御の内、先ず cooling line 入口の流量制御弁の試験が行なわれ、この制御系は正常に作動することが確認された。流量制御を行なった場合、cooling line 前後の温度差は 1.0°K に保たれ、その変化は 0.1°K の範囲内に制御された。続いて出口弁により制御が試みられたが、泡箱ピストンの駆動による振動のため自動弁駆動部の一部に故障が起きての系の制御動作は確認するにいたらなかった。今回の運転は泡箱用電磁石が準備されていないので泡箱は仮の架台に組立てられているためピストン駆動による装置全体の振動がやや激しく、この結果を招いたものと考えられる。

また今回の運転において泡箱冷却配管の取付位置に若干改良の必要があることがわかった。泡箱の温度が例えば 26.0K の場合、圧力は 5.0 atm 程度が軌跡を得るのに適当であるが、温度を 26.0°K に保つよう冷却量を調節すると圧力が徐々に上昇し、逆に圧力を一定に保持するよう冷却量を増加すると温度が徐々に下降する傾向が見られた。これは冷却量調節動作の適否によるものではなく、泡箱自身の構造および冷却を与える位置の良否によって起るものと解される。従って泡箱内の圧力を決定するピストン周辺の液体水素液温の調節が可能なように冷却系統を増加するなどの改造が必要と考えられる。これらの問題点については次回運転において解決すべく準備が進められている。

4. あとがき

以上述べた通り、われわれは安定した長時間の連続運転に耐える 1 kW の水素冷凍液化機を製作し、これによって中型の泡箱を動かすことに成功した。今後は、泡箱の運転が routine work になる日に備えて、より良質の泡箱写真を得ることを目標に冷凍液化機の整

備泡箱温度制御装置の調整を続けなければならない。

この泡箱は、当面は東京大学原子核研究所の電子シンクロトロンによる実験に使用される。この実験が行なわれるのと並行して、泡箱を 1m に改造する計画が実施される。すでに、この泡箱の電磁石は 1m 泡箱を収容することを見込んで若干オーバー・サイズに製作されている。この実験が終了する 1973 年には、この泡箱は筑波研究学園都市に新設された高エネルギー物理学研究所に移設され陽子シンクロトロンによる実験に備えられる。

いうまでもなく、泡箱の建設は低温、機械、光学および電磁石にわたる広範囲の技術を結集して遂行されるものであり、多くの人々の好意的な助力をいただいた。おわりにあたり、この泡箱計画の立案者の一人であり、適切な指導をしていただいた三浦功教授、機械工学上の助言をしていただいた池田弘教授に感謝の意を表したい。また、この泡箱の本体、真空タンクおよび膨張装置の製作と液体窒素による試験を担当された住友重機械工業(株)平塚研究所の方々、特に前田日出人氏に感謝したい。

さらに neck cooler と gasket の製作をしていた東京大学原子核研究所工作室の方々、この運転に参加された 同所旧素研準備室の泡箱グループの方々、水素冷凍液化機の計画、設計、製作および運転に参加された日本酸素(株)東京製作所の各位に感謝します。

参 考 文 献

- 1) J.A.Bamberger, D.P.Brown and J.E.Jensen; BNL Internal Report E-117, BC-30-OD (1962).
- 2) C.Trepp; Sulzer Tech. Rev. **45** (1963) 11
- 3) I.Kita; 低温工学 **3** (1968) 16
- 4) E.Yamaga et al; INS Internal Report JPS/INT/BC 1 (1971)
- 5) L.Lucas; UCRL Report UCID-219 (1957)
- 6) J.G.Androulakis; BNL Internal Report BC-03-OE