

J A E R I - M
91-180

JT-60粒子入射加熱装置(NBI)用クライオポンプ
システムの自動制御法の開発

1991年10月

柴沼 清・秋野 昇・大楽 正幸
大内 豊・柴田 猛順

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura,
Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1991

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷(株)

JT-60粒子入射加熱装置(NBI)用クライオポンプ
システムの自動制御法の開発

日本原子力研究所那珂研究所核融合装置試験部

柴沼 清・秋野 昇・大楽 正幸

大内 豊・柴田 猛順

(1991年10月 5日受理)

水素ガスに対する世界最大の総排気速度 $20000\text{m}^3/\text{s}$ を有する14基のクライオポンプ、3.6Kで3000Wの国内最大のヘリウム冷凍機及び約500mの液体ヘリウム輸送用真空断熱配管から成るJT-60 NBI用クライオポンプシステムについて、自動制御法を開発し試験を行った。本自動制御法の特徴を以下に示す。

- 1) 14基のクライオポンプ間の予冷段階における不均衡冷却抑制制御
- 2) クライオポンプの各運転状態に対して、完全閉サイクルであるヘリウムループ内各機器のヘリウム保有量を考慮したクライオポンプへの液体ヘリウムの安定供給制御
- 3) クライオポンプの定常時における安定冷却制御
- 4) クライオポンプからの負荷変動に対応したヘリウム冷凍機の安定化制御

これらの制御法を用いて試験を行った結果、クライオポンプの各種の運転状態に対して、ヘリウム冷凍機を含めた全システムは安定に制御され、14基のクライオポンプは予冷開始後約16時間で全て定常に達することができた。

Development of Automatic Control Method for Cryopump System
for JT-60 Neutral Beam Injector

Kiyoshi SHIBANUMA, Noboru AKINO, Masayuki DAIRAKU
Yutaka OHUCHI and Takemasa SHIBATA

Department of Fusion Facility
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 5, 1991)

A cryopump system for JT-60 neutral beam injector (NBI) is composed of 14 cryopumps with the largest total pumping speed of 20000 m³/s in the world, which are cooled by liquid helium through a long-distance liquid helium transferline of about 500 m from a helium refrigerator with the largest capacity of 3000 W at 3.6 K in Japan. An automatic control method of the cryopump system has been developed and tested. Features of the automatic control method are as follows.

- 1) Suppression control of the thermal imbalance in cooling-down of the 14 cryopumps.
- 2) Stable cooling control of the cryopump due to liquid helium supply to six cryopanels by natural circulation in steady-state mode.
- 3) Stable liquid helium supply control for the cryopumps from the liquid helium dewar in all operation modes of the cryopumps, considering the helium quantities held in respective components of the closed helium loop.
- 4) Stable control of the helium refrigerator for the fluctuation in thermal load from the cryopumps and the change of operation mode of the cryopumps.

In the automatic operation of the cryopump system by the newly developed control method, the cryopump system including the refrigerator was stably operated for all operation modes of the cryopumps, so that the

cool-down of 14 cryopumps was completed in 16 hours from the start of cool-down of the system and the cryopumps was stably cooled by natural circulation cooling in steady-state mode.

Keywords: Automatic Operation, Cryopump, JT-60 NBI, Helium Refrigerator, Thermal Imbalance Control, Long-distance Helium Transferline, Refrigeration/Liquefaction Operation, Two-phase Helium Flow, Natural Circulation

目 次

1. はじめに	1
2. JT-60NBI用クライオポンプシステム	5
2.1 クライオポンプ	5
2.2 ヘリウム冷凍システム	5
3. 計算機システム	10
4. 自動制御方法	14
4.1 クライオポンプの予冷時における基本冷却制御	15
4.2 14基のクライオポンプ間の不均衡冷却抑制制御	16
4.3 ヘリウム冷凍機からクライオポンプへの液体ヘリウムの安定供給制御	17
4.4 クライオポンプの定常時における安定冷却制御	18
4.5 クライオポンプの負荷変動に対応したヘリウム冷凍機の安定化制御	18
5. 試験結果	26
5.1 クライオポンプの不均衡冷却抑制制御結果	26
5.2 ヘリウム冷凍機からクライオポンプへの液体ヘリウムの安定供給制御結果	27
5.3 クライオポンプの定常時における安定冷却制御結果	28
5.4 クライオポンプの負荷変動に対応したヘリウム冷凍機の安定化制御結果	29
6. 結 言	38
謝 辞	39
参考文献	39

Contents

1. Introduction	1
2. Cryopump System for JT-60 Neutral Beam Injector	5
2.1 Cryopump	5
2.2 Helium Refrigerator System	5
3. Control System for Automatic Operation of Cryopump System	10
4. Automatic Operation Method	14
4.1 Basic Cool-down Control of Cryopump in Cool-down Mode	15
4.2 Thermal Imbalance Control in Cool-down of 14 Cryopumps	16
4.3 Stable Liquid Helium Supply Control to Cryopumps from Refrigerator	17
4.4 Stable Cooling Control of Cryopump by Natural Circulation in Steady-state Mode	18
4.5 Stable Control of Helium Refrigerator for Fluctuation in Thermal Load from Cryopumps	18
5. Operation Results	26
5.1 Operation Results of Thermal Imbalance Control of Cryopumps in Cool-down Mode	26
5.2 Control Results of Liquid Helium Supplied to Cryopumps from Helium Refrigerator	27
5.3 Operation Results of Stable Cooling Control of Cryopumps in Steady-state Mode	28
5.4 Control Results of Helium Refrigerator for Fluctuation in Thermal Load from Cryopumps	29
6. Conclusions	38
Acknowledgments	39
References	39

1. はじめに

J T - 6 0 用粒子入射加熱装置 (N B I) は、図 1 に示すように 1 4 基のビームラインから構成され、ビームエネルギー $3 0 \sim 1 0 0 \text{ keV}$ で合計ビームパワー $2 0 \text{ MW}$ の中性水素ビームを J T - 6 0 プラズマに入射し加熱する装置である⁽¹⁾。各ビームライン内には、水素ビーム引き出し時に流れ出る数 $\text{Pa m}^3/\text{s}$ の水素ガスを効率よく排気して、ビームライン内を $1 0^{-3} \text{ Pa}$ 程度にするために、 3.7 K 以下に液体ヘリウムにより冷却された排気速度 $1 4 0 0 \text{ m}^3/\text{s}$ の大容量凝縮型クライオポンプが設置されている。1 4 基のクライオポンプの総排気速度は $2 0 0 0 0 \text{ m}^3/\text{s}$ にも達し、世界最大の排気容量を有している⁽²⁾。一方、図 2 に示すように、これら 1 4 基のクライオポンプに液体ヘリウムを供給するためのヘリウム冷凍機は、 3.6 K で $3 0 0 0 \text{ W}$ という国内最大の冷凍能力を有し⁽²⁾、液体ヘリウムは全長約 $5 0 0 \text{ m}$ の長尺真空断熱配管を介して 1 4 基のクライオポンプに並列に供給される過去に例のない大規模な極低温システムである。

このようなヘリウム冷凍機と 1 4 基のクライオポンプから成る J T - 6 0 N B I 用クライオポンプシステムの運転は、運転員の負担を大幅に軽減するとともに、1 4 基のクライオポンプの定常運転が短時間で達成され、システム全体が再現性よく常に安定に運転されるように、制御用計算機により自動制御運転が行われる。本システムの制御は、シーケンス制御を基本とし、その中に必要に応じてフィードバック制御を採用している。例えば、ヘリウム冷凍機に関して、起動から液体ヘリウムの液溜め運転までは、基本となるシーケンス制御に、膨張タービンの回転数制御や軸受温度制御及び液体ヘリウムデュワー内圧力制御等の従来までに行われている比較的単純な単独ループによるフィードバック制御を組み入れることにより行われる。しかし、このヘリウム冷凍機の制御に、さらに約 $5 0 0 \text{ m}$ の真空断熱配管を介しての 1 4 基のクライオポンプの並列冷却に関する制御も含めた場合、ヘリウム冷凍機単独で閉じた制御と異なり、単独ループを用いた比較的単純なフィードバック制御だけでは不十分であることが予想され、システムの起動から停止までの全運転工程を管理するシーケンス制御の中に、多ループのフィードバック制御を複合的に組み合わせた制御システムを構築することが必要となる。液体ヘリウムは約 4 K の極低温流体というだけでなく蒸発潜熱が $2 0 \text{ J/g}$ と非常に小さいために、クライオポンプを液体ヘリウムで冷却する場合、初期状態ではガス相のない液体ヘリウムも、約 $5 0 0 \text{ m}$ の真空断熱配管を通過する間に、熱負荷を受けることにより蒸発し、クライオポンプ内には気液二相の状態で供給される。このように、クライオポンプを冷却するヘリウムが気液二相であることと全長 $5 0 0 \text{ m}$ の真空断熱配管に接続されたクライオポンプの位置関係によって、各クライオポンプに供給されるヘリウムの流量分配に関する制御は容易ではない。すなわち、クライオポンプの予冷が進行するにつれて、1 4 基のクライオポンプ間で各クライオポンプの冷却の程度に大きな不均衡が生じ、システム全体を再現性よく安定に運転することは非常に困難となることが予想される。ヘリウム冷凍機の安定な運転にとっては、1 4 基のクライオポンプが均等に冷却されることが望ましく、1 4 基のクライオポンプ間の予冷過程における不均衡冷却を抑制し、システム全体を安定に保持し

ながらクライオポンプの冷却を効率よく行う制御が必要となる。また、同時に、特にクライオポンプの予冷から定常への移行過程において、クライオポンプで蒸発したヘリウムガスによる過渡的負荷変動に対して、これらクライオポンプからの大量の極低温ヘリウムの寒冷を回収することにより、ヘリウム冷凍機の能力を最大限に発揮させ、かつ安定な運転を行うために、クライオポンプからの負荷変動に対応して、ヘリウム冷凍機を最適な運転モードに円滑に移行するための制御が必要となる。さらに、ヘリウムループは完全な閉サイクルであり、系内には一定量の液体ヘリウムまたはヘリウムガスが保有されている。クライオポンプの定常運転を達成するためには一定量の液体ヘリウムがクライオポンプ内に溜められ、さらに、定常運転を正常に維持するためには連続的にクライオポンプに液体ヘリウムが供給されることが必要になる。また、ヘリウム冷凍機用圧縮機を正常に連続的に運転するためには、圧縮機の入口圧力を一定に保つ必要があり、ヘリウムガスの供給源である中圧タンク内の圧力をある一定値以上の圧力に常に確保する必要がある。このように、全システム内での運転状態に応じて、各機器内でのヘリウムの保有量が逐次変化することから、全システムを構成する各機器内ヘリウムの保有バランスを考慮に入れて、クライオポンプに安定に液体ヘリウムを供給する制御法を構築する必要がある。

以上のような大型ヘリウム冷凍機、液体ヘリウム輸送用長尺真空断熱配管、14基のクライオポンプ等により組み合わされたクライオポンプシステムに対して、システム全体を短時間で定常状態にするだけでなく、信頼性高く安定な運転を行うことのできる制御方法を開発した。ここでは、これらのシステムの全制御の中で、特に重要となるヘリウム冷凍機定常から14基のクライオポンプの定常までの制御に関して、本制御法の特徴である①クライオポンプの予冷時における基本冷却制御、②14基のクライオポンプ間の不均衡冷却抑制制御、③ヘリウム冷凍機からクライオポンプへの液体ヘリウムの安定化供給制御、④クライオポンプ定常時における安定冷却制御及び⑤クライオポンプの負荷変動に対応したヘリウム冷凍機の安定化制御等を中心に、クライオポンプシステムの制御方法とその試験結果について報告する。

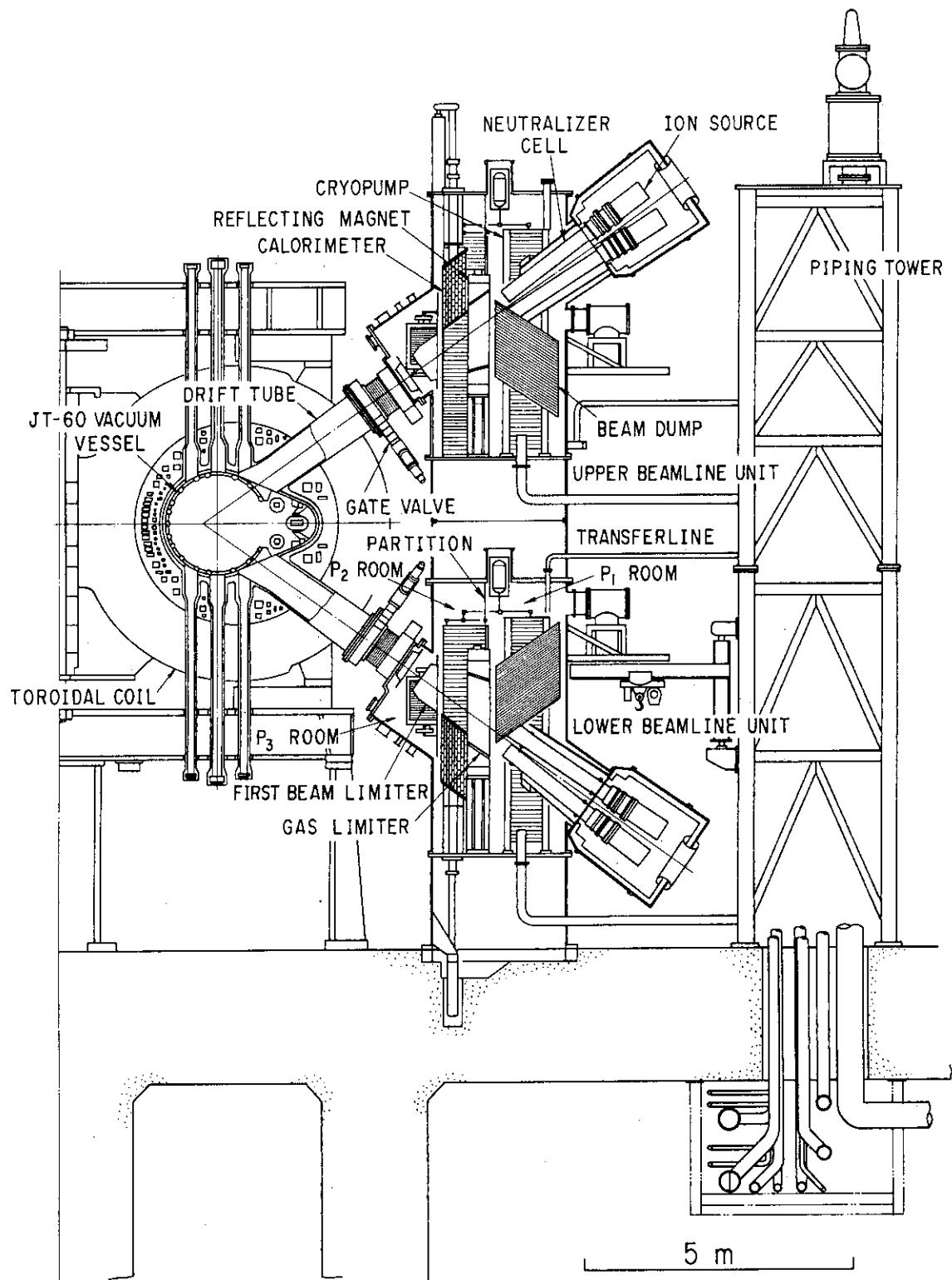
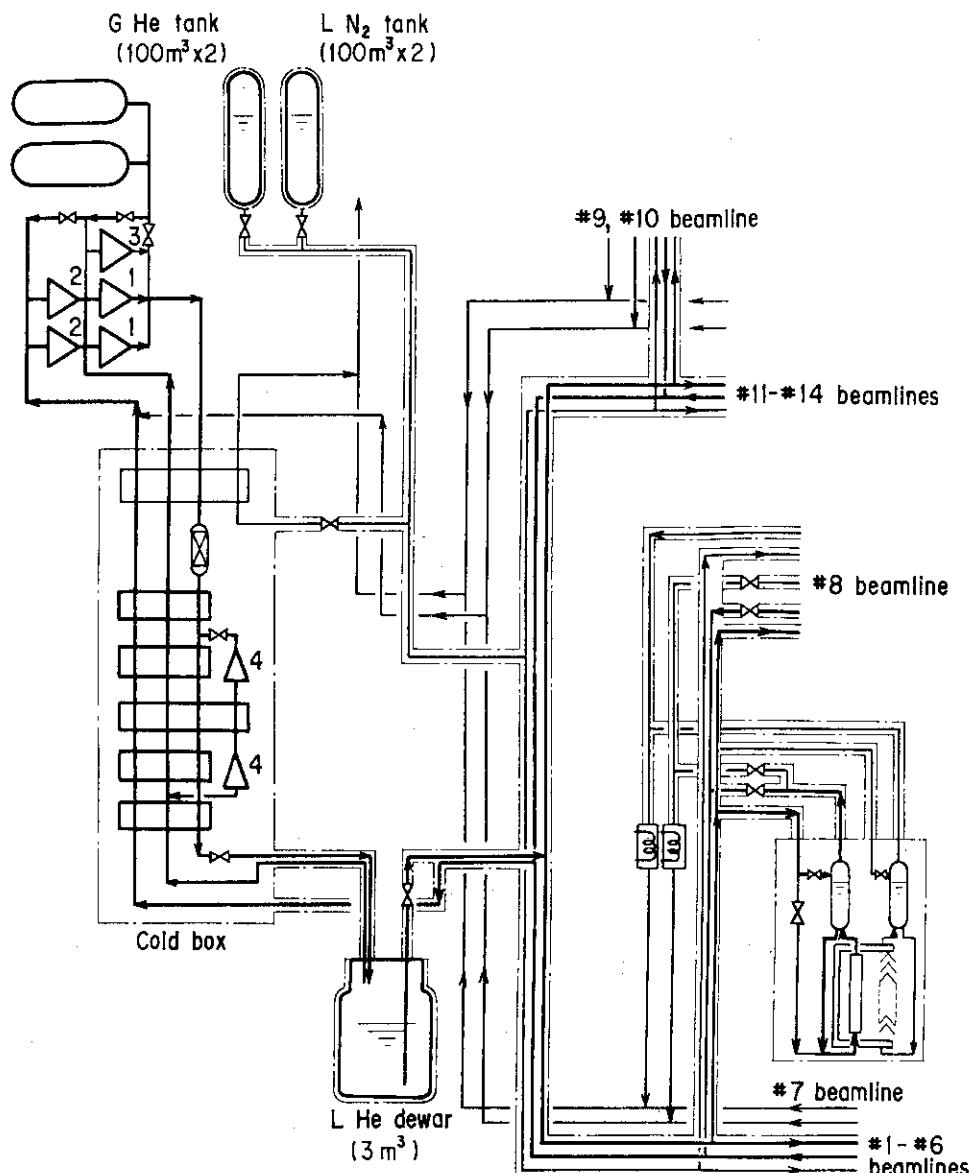


図1 JT-60 NBI



1. Main compressor
2. Pumping compressor
- 3 Recovery compressor
- 4 Exp. turbine

Helium	Refrigerator	3000 W at 3.6 K
	Main Compressor	5000 Nm³/h × 2
	Pumping Compressor	1100 Nm³/h × 2
	LHe Dewar	3000 l
	GHe Storage Tank	100 m³ × 2
Nitrogen	Recovery Compressor	100 Nm³/h
	LN₂ Storage Tank	100000 l × 2

図2 JT-60 NBI用クライオポンプシステムの概略フロー図

2. JT-60 NBI用クライオポンプシステム

JT-60 NBI用クライオポンプシステムは、図2に示すように14基のクライオポンプとクライオポンプに液体ヘリウムと液体窒素を供給するためのヘリウム冷凍システムから構成される。

2.1 クライオポンプ

JT-60用NBI用クライオポンプを図3に示す。このクライオポンプは、4個の大型クライオポンプモジュール（クライオパネルの大きさ、幅900mm×高さ3900mm）と2個の小型クライオポンプモジュール（クライオパネルの大きさ、幅530mm×高さ890mm）で構成され、NBI真空容器の内壁に沿って設置されている。各モジュールは水素の排気面となるクライオパネル、クライオパネル前面に設置された水素を通過させるためのシェブロンバッフル及びクライオパネル背面と側面に設置された輻射熱シールド（以下、熱シールドという）から成る。クライオパネルは、板厚1.2mmのステンレス鋼板2枚を4mmの間隔で合わせたキルティング構造であり、この内部に液体ヘリウムが溜められることにより冷却される。水素に対する排気速度はクライオパネル温度の影響を大きく受けることから、NBI真空容器内の圧力が 1.0×10^{-3} Pa台でもほぼ最大の排気速度が得られるように、液体ヘリウムの圧力を大気圧から0.58atm以下に減圧することにより、クライオパネル温度を3.7K以下に冷却する必要がある⁽³⁾。シェブロンバッフルは水素を通過させるためにアルミニウム製山型構造材をすだれ状に25mm間隔で並べたものであり、常温からの輻射を吸収してクライオパネルに入る熱負荷を減少させるため、表面は黒化処理され、77Kの液体窒素で冷却される。熱シールドもアルミニウム製であり、液体窒素により冷却される。また、各モジュールへの液体ヘリウムの供給は各クライオパネルを接続する配管によって行われ、特に熱シールドの外側に設置されているクライオポンプ1基当たり約30mの液体ヘリウム用配管には、常温からの輻射による熱負荷を低減して各クライオパネルに安定に液体ヘリウムを供給するために多層断熱材が巻かれている⁽⁴⁾。

なお、NBI真空容器全体は中性水素ビームの通過経路に沿ってP₁、P₂、P₃室の3つの部屋に仕切り板により分割され、P₁、P₂室ではそれぞれ2個の大型クライオポンプモジュールにより、又P₃室では2個の小型クライオポンプモジュールにより差動排気が行われる。

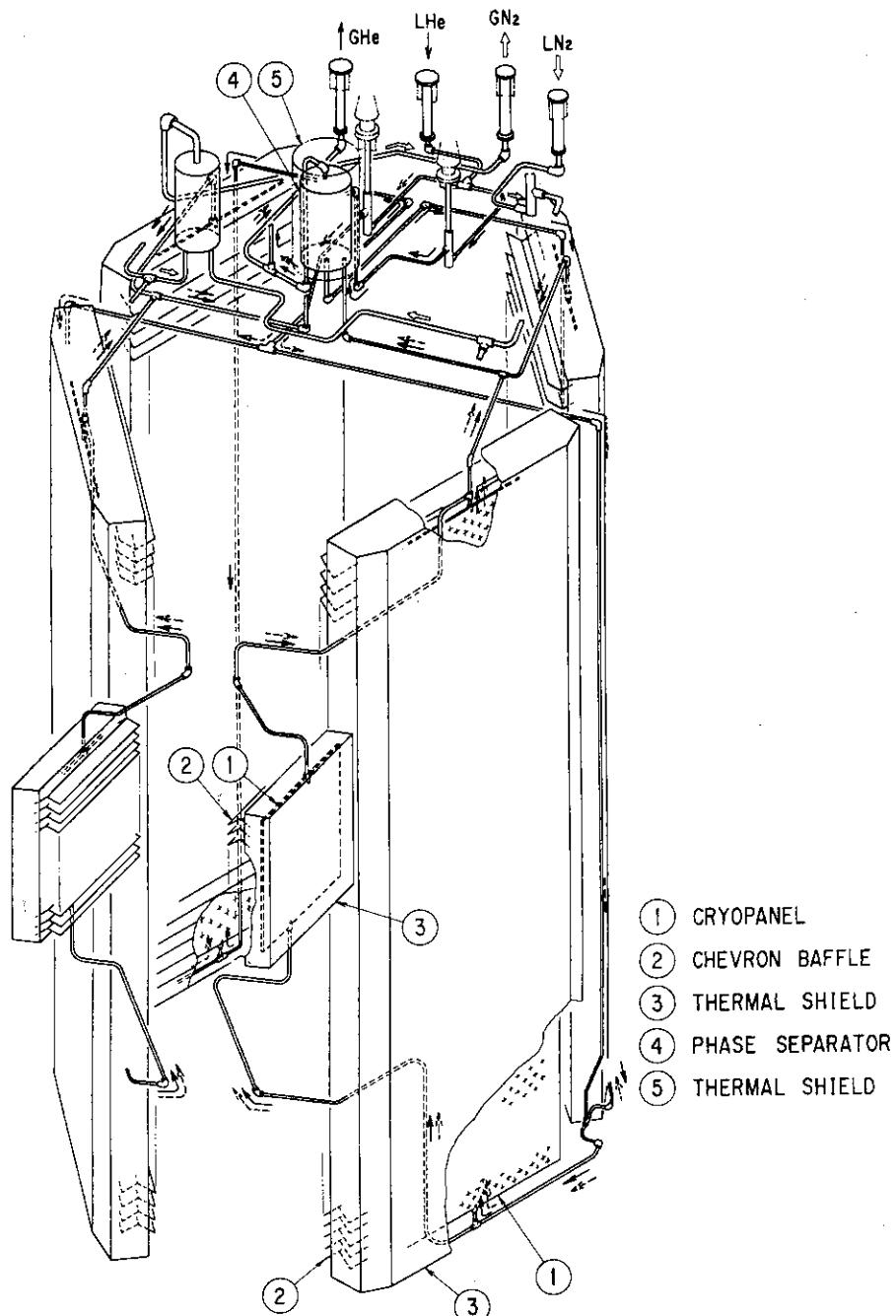
2.2 ヘリウム冷凍システム

ヘリウム冷凍システムは、ビームライン内に設置されている14基のクライオポンプに液体ヘ

リウムと液体窒素を供給するためのもので、図2に示すように水素ガスを排気するためにクライオパネルを3.7 K以下の液体ヘリウムで冷却するためのヘリウムループと、シェブロンバッフル及び熱シールドを冷却するための窒素ループから構成される。

ヘリウムループは、写真1～写真3に示すように、冷凍能力3.6 Kで3000 Wのヘリウム冷凍機1基、吐出圧力18 kg/cm²Gで容量5000 Nm³/hの主圧縮機2基、吸入圧力-50 cmHgで容量1100 Nm³/hの減圧ポンプ2基、容量3 m³の液体ヘリウムジュワー1基、圧力18 kg/cm²Gで容量100 m³の中圧タンク2基、吐出圧力18 kg/cm²Gで容量100 Nm³/hの回収圧縮機1基及び図4に示す全長約500 mの液体ヘリウム輸送用長尺真空断熱配管から成る。このヘリウムループは、液体ヘリウムとヘリウムガスがクライオポンプとヘリウム冷凍機とを接続する長尺真空断熱配管を介して循環する完全な閉サイクルである。なお、クライオパネルの温度は、減圧ポンプによりクライオパネル内の液体ヘリウムの圧力を大気圧以下に減圧することにより3.7 K以下に制御される。

窒素ループは、液体窒素を容量100 m³の液体窒素タンク2基から真空断熱配管を介して、クライオポンプのシェブロンバッフルと熱シールド及びヘリウム冷凍機に圧送方式により供給するもので、大気開放の開ループである。図4の液体ヘリウム用長尺真空断熱配管と並行する領域では、液体窒素配管は液体ヘリウム配管と同一の真空断熱配管内を通り、液体ヘリウム配管回りの熱シールドも冷却しながら、クライオポンプに液体窒素が供給され、クライオポンプで気化した窒素ガスは加温器で常温にされ大気中に放出される。



Pumping Speed $1.4 \times 10^6 \text{ l/sec}$

Pumping Area 15 m^2

Cryopanel Temperature $< 3.7 \text{ K}$

Cooling Principle Thermosiphon

Heat Load 38 W

Number of Beamline Units 14

図3 JT-60 NBI用クライオポンプ(下ユニット)の鳥観図

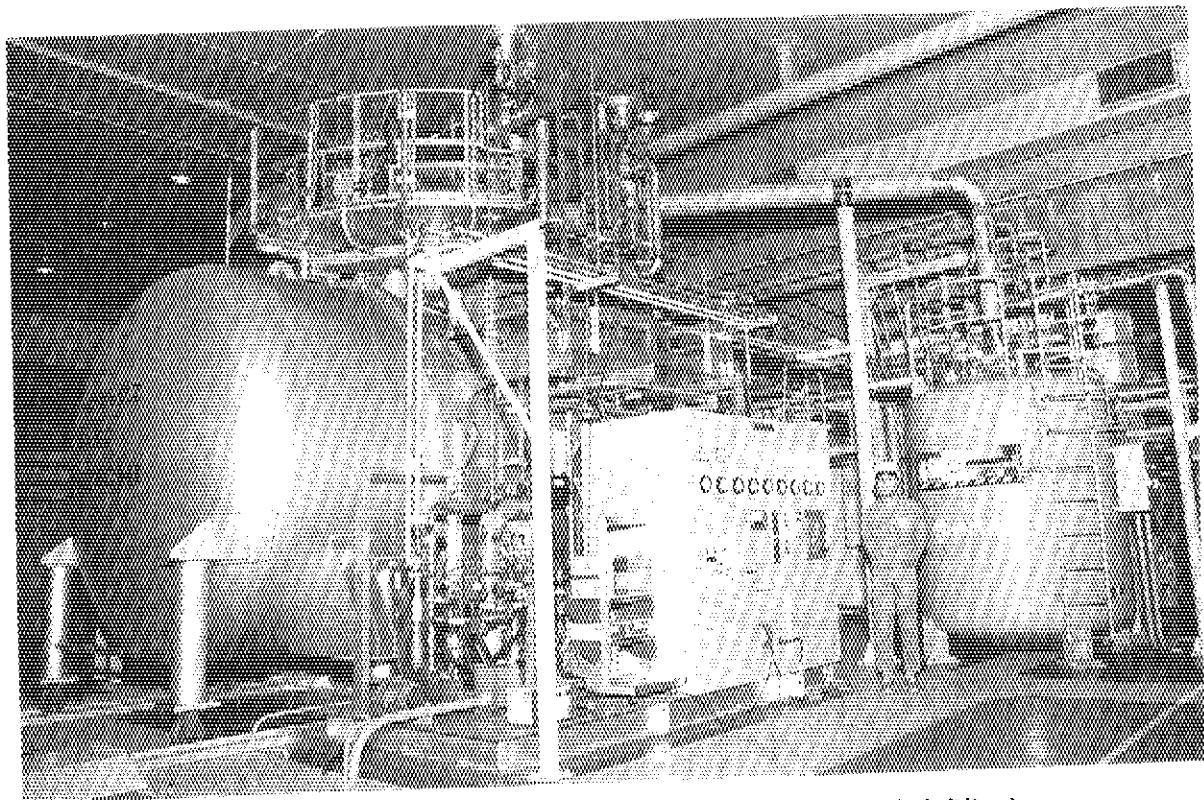


写真1 3.6K、3000Wのヘリウム冷凍機（写真左側）と
3m³の液体ヘリウムジュワー（写真右側）

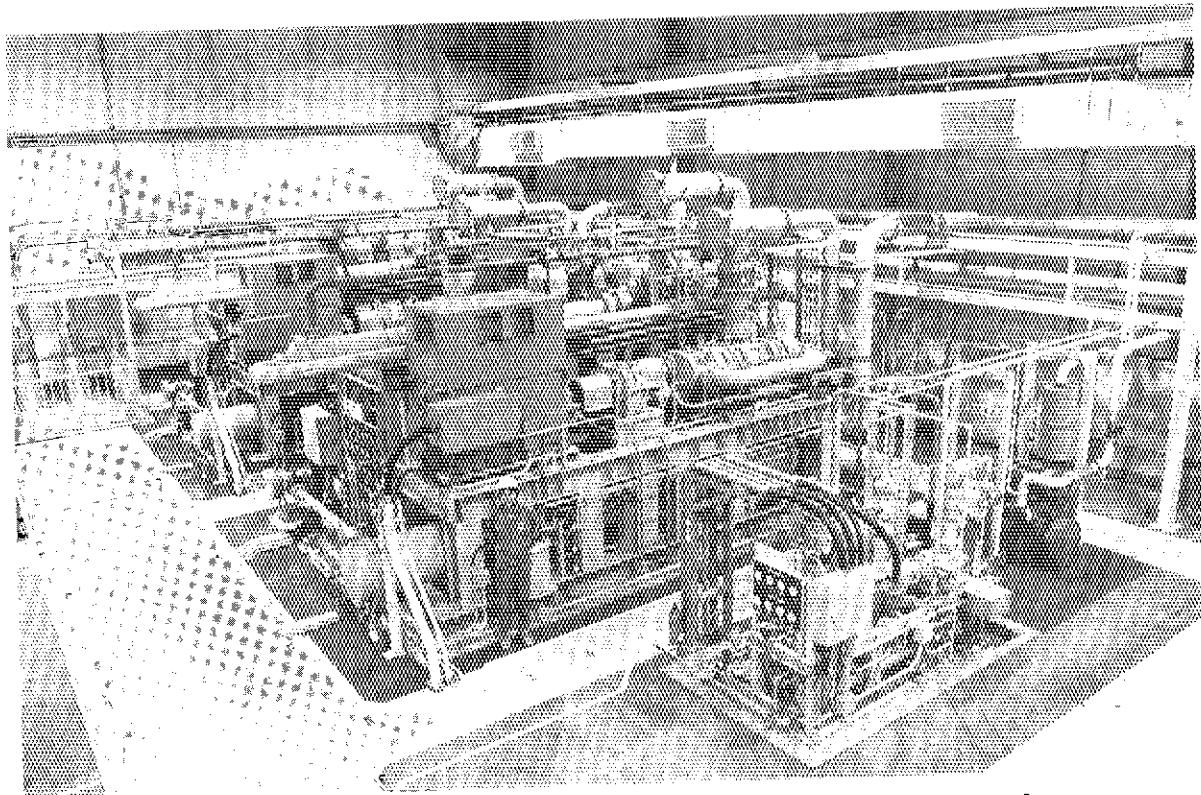


写真2 5000Nm³/hの主圧縮機（写真の下段）と1100Nm³/hの
減圧ポンプ（写真の上段）

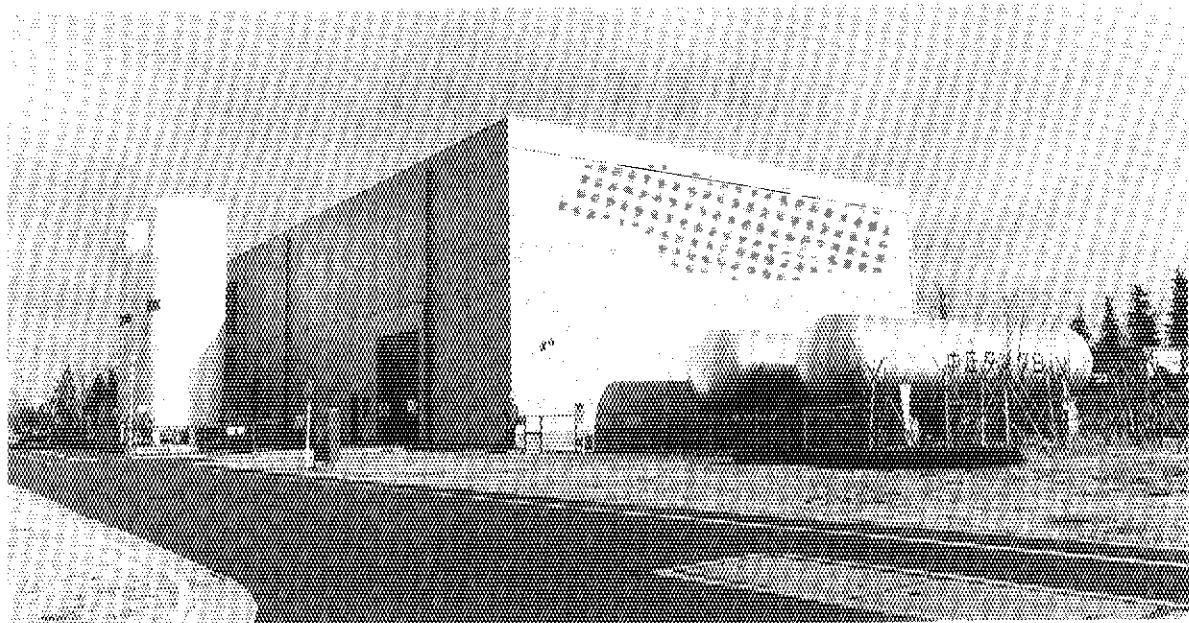


写真3 高圧ガス機械棟（写真中央）、ヘリウムガス用 $18 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ 、 100 m^3 の
中圧タンク（写真右側の2基）及び液体窒素タンク（写真左側の2基）

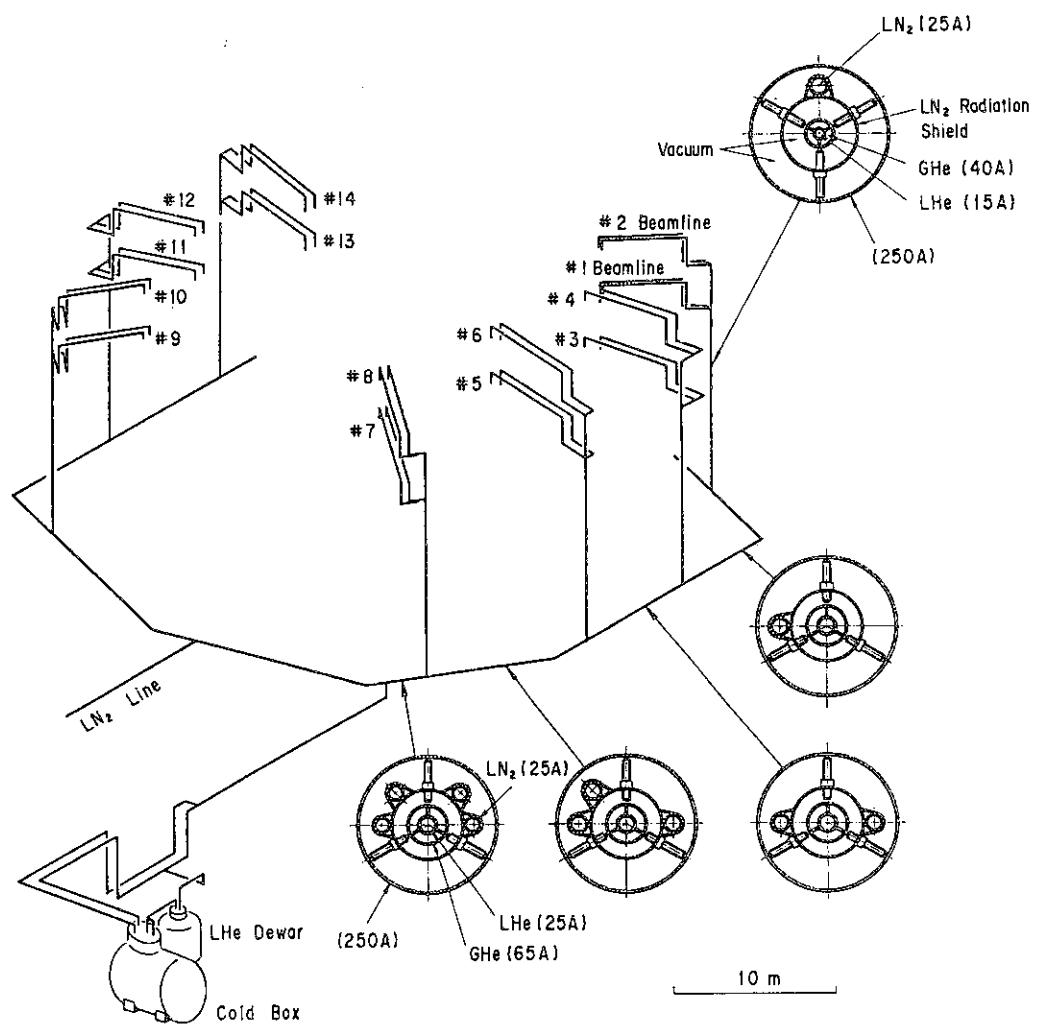


図4 液体ヘリウム輸送用長尺真空断熱配管

3. 計算機システム

14基のクライオポンプと1基のヘリウム冷凍機の自動制御を行う計算機システムは、16 bit CPUのプロセス制御用計算機ユニトロールEXシリーズ（（株）日立製作所製）であり、図5に示すように、ユニット毎に完全分散されたフィードバック制御用ループコントローラLPC（Loop Controller）、フィードバック制御とシーケンス制御を取り扱うことのできるマルチコントローラMLC（Multi-Loop Controller）、プロセス情報を一括管理するオペレーターズコンソールPOC-EX、各機器間を接続するデータ通信網DHW（Data Highway）から構成される。これらの機器の機能及び役割について、その概略を以下に示す。

(a) LPC

LPCは、フィードバック制御に必要なPID演算等を行う8bitCPUの制御演算部とアナログ信号とデジタル信号の変換等に関する入出力信号処理部から成り、LPC1ユニットで2ループのフィードバック制御を行う。このLPCは独立制御であるため、図5に示すように、各クライオポンプ毎に液体ヘリウム供給用定常弁と液体窒素供給弁の制御に合計14組のLPCを使用し、ヘリウム冷凍機の制御系異常に対しても、定常時におけるクライオポンプの運転が続行できるように対策を施した。

(b) MLC

MLCは、フィードバック制御のための16bitCPU演算部と入出力インターフェース部から成る演算制御ユニット及びアナログ信号とデジタル信号との変換等に関する入出力ユニットから構成され、多ループ並列でのフィードバック制御やシーケンス制御を行うもので、フィードバック制御とシーケンス制御との組み合わせ制御も行える。図5に示すように、MLCは3組から成り、そのうちの1組はヘリウム冷凍機の全ての制御に、他の2組はクライオポンプの制御に使用される。なお、クライオポンプ制御用MLCの場合、上述したLPCで制御される部分を除いたクライオポンプに関する全ての制御及び計測に使用される。これらのMLCにより、ヘリウム冷凍機と14基のクライオポンプに関する全てのシーケンス制御、ヘリウム冷凍機に関する全てのフィードバック制御及びクライオポンプのヘリウム供給用予冷弁と出口弁のフィードバック制御等が行われる。

(c) POC-EX

POC-EXは、写真4に示すようにクライオポンプシステムの運転に関する全体の操作、監視、システム構築と修正、システム管理、データ収集及び記録等を行うもので、LPC、MLCの各制御ユニットの全情報を一括収集・管理するための装置である。

(d) DHW

DHWは、POC-EXとMLC間、LPC間、MLCとLPC間、MLC間を結び、制御データの通信、操作監視、システム構築・修正・管理のデータ通信を行うものである。共通制御部を持たない各局対等通信方式を用い、回線の二重化により高信頼性通信を行うことができる。

この計算機システム全体におけるアナログ入力及び出力は、それぞれ253点、88点、デジタル入力及び出力は、それぞれ259点、290点であり、これらの運転データは、写真5、写真6に示すように、リアルタイムでPOC-EXのCRT画面に表示されると同時に、313点の運転データが30分毎にタイプライターに印字される。また、運転制御における時間変化の履歴が特に重要な126点については、2分毎のデータを1MBフロッピディスクに記録することにより、写真7に示すようなヒストリカルトレンドとして随时参照することができる。

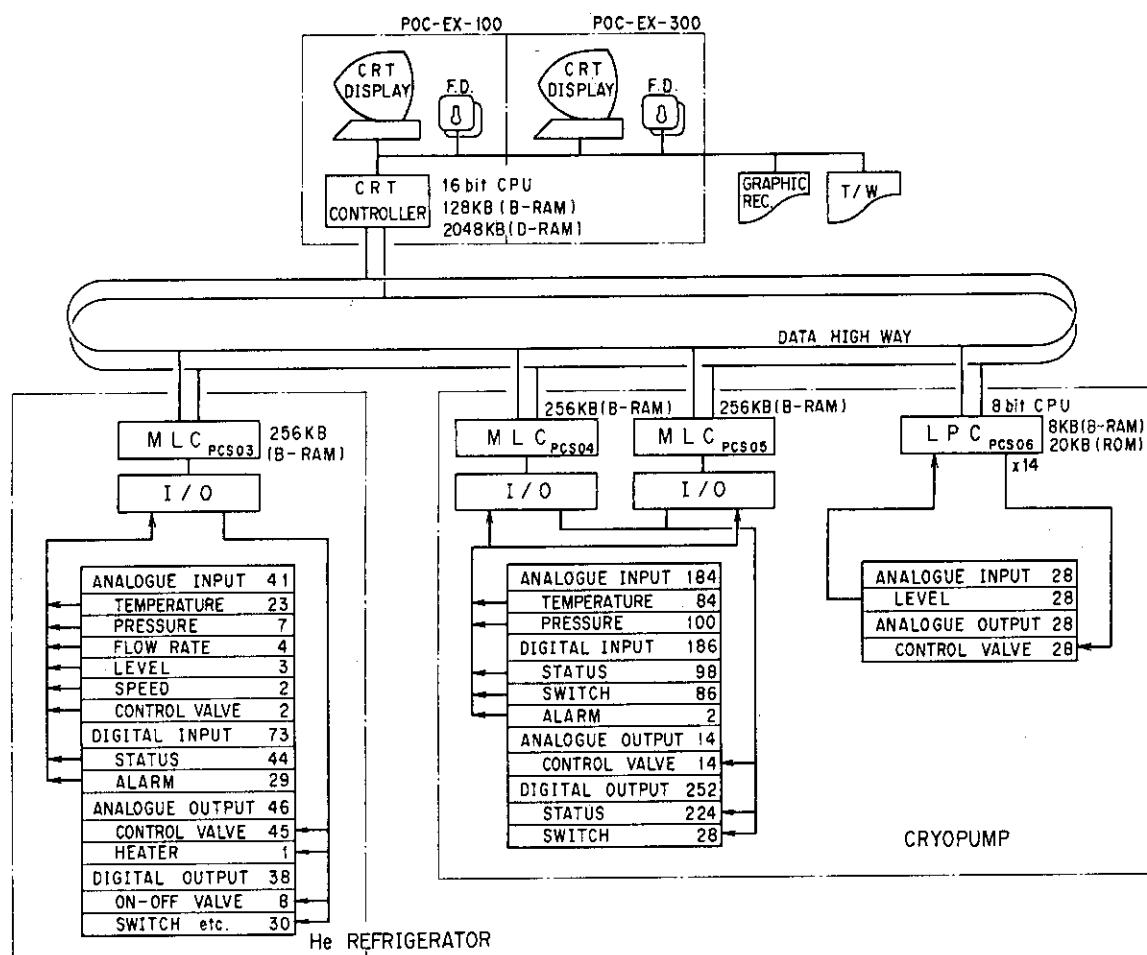


図5 JT-60 NBI クライオポンプシステムの自動制御用計算機システムの概略フロー図

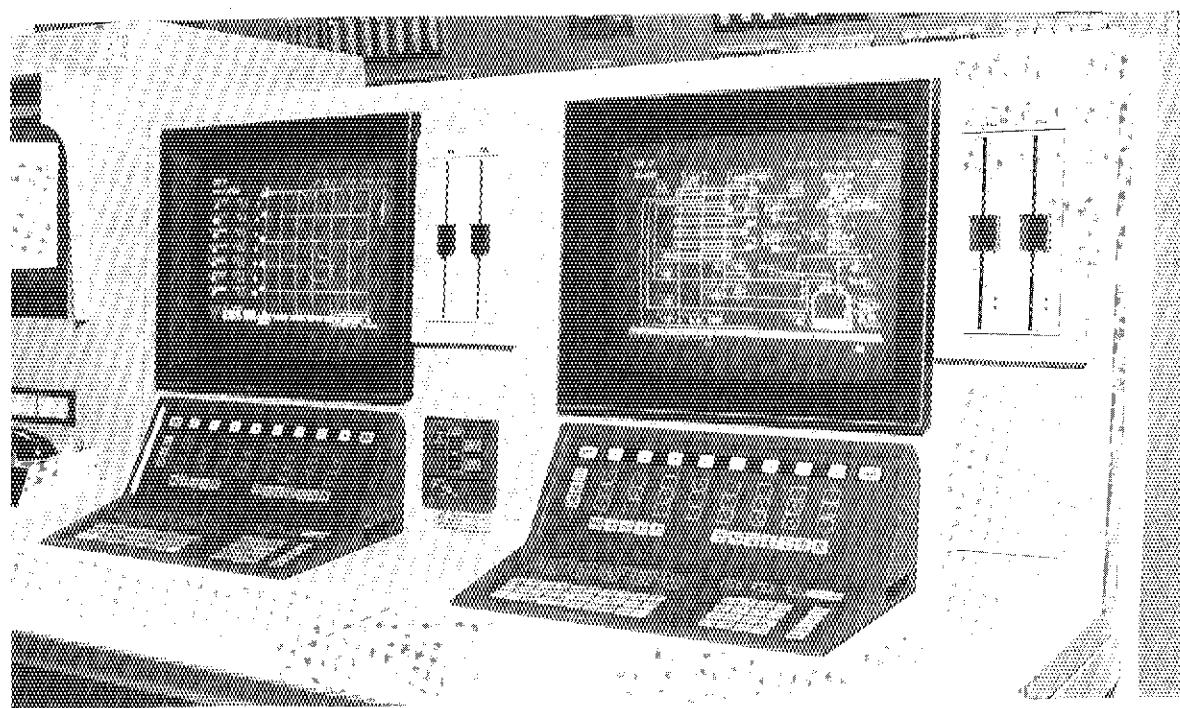


写真4 プロセス制御用計算機ユニトロールEX（P O C-E X）

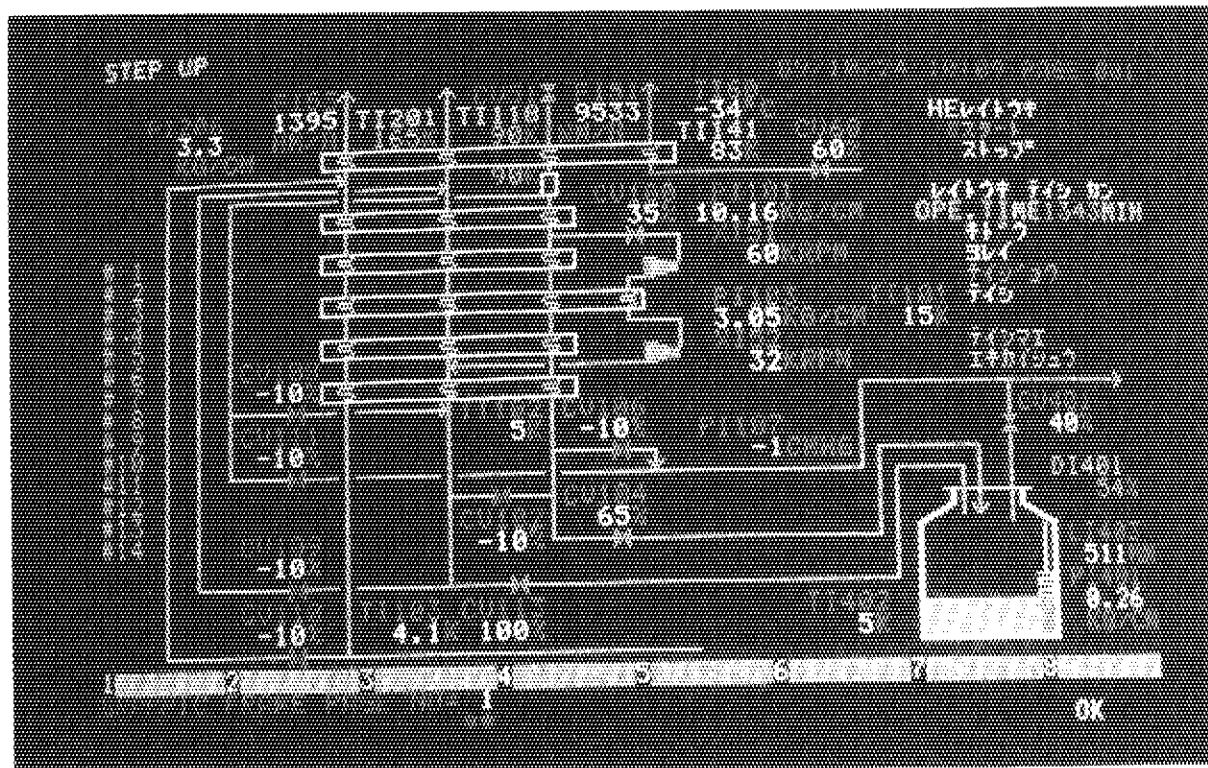


写真5 ヘリウム冷凍機のCRT画面

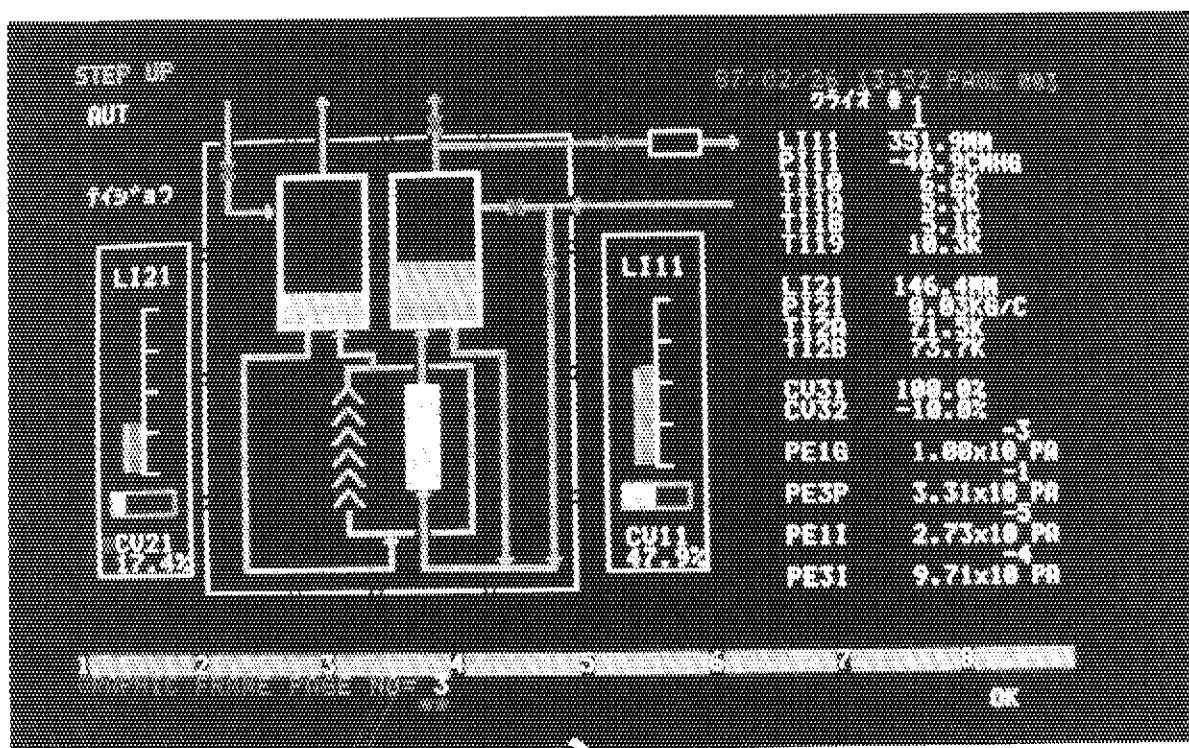


写真6 クライオポンプのC R T画面

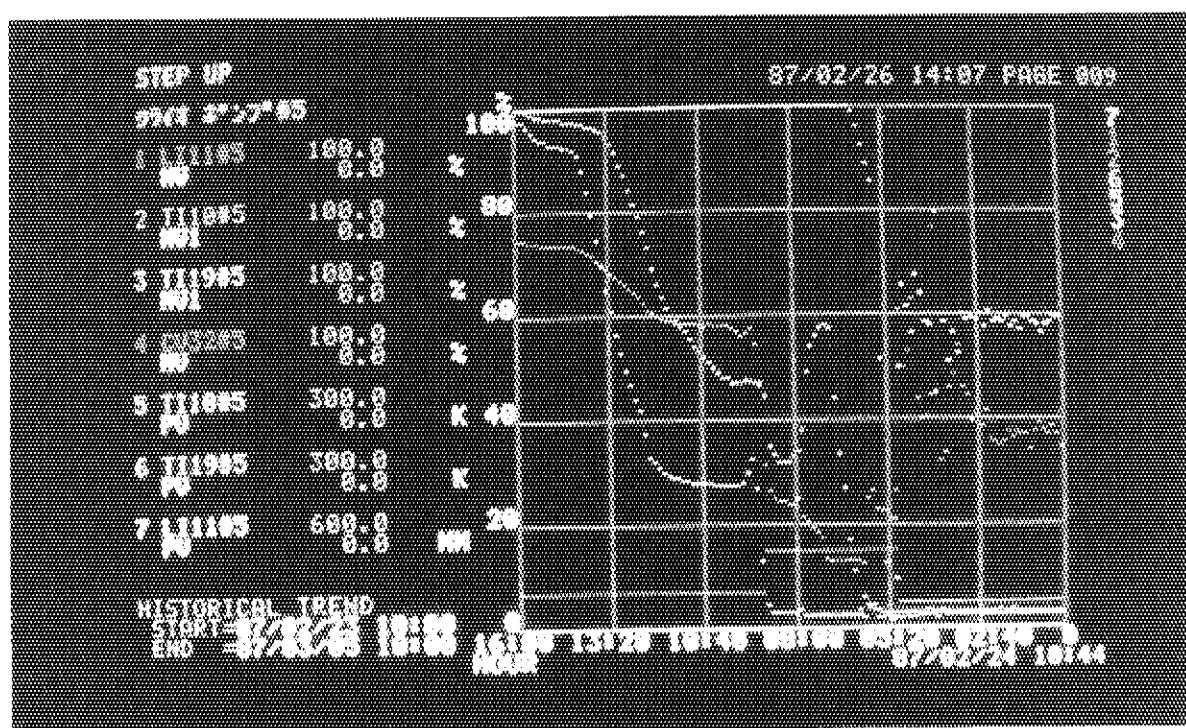


写真7 ヒストリカルトレンドによるクライオポンプの冷却曲線

4. 自動制御方法

制御対象機器としては、1基のヘリウム冷凍機と14基のクライオポンプがあり、これらの機器は起動から停止までの間に、互いに独立に制御できる運転領域と相互の影響を考慮しながら制御を行う運転領域の2つに大別される。システム全体の制御を構築するためには、これらの関係を明確にする必要があり、システム全体の全運転領域に対して、図6に示すような各機器の運転状態とそれに伴う各機器間の相互関係を示す全体シーケンスが構築できる。これがシステム全体の起動から停止までの制御を管理するための基本シーケンスであり、各機器の制御はこのシーケンスに沿ってシステム全体の制御の中で行われる。

ヘリウム冷凍機に関する起動から定常に達するまでと加温から停止に至るまで及びクライオポンプに関する定常以後の運転は、基本的にはシーケンス制御または単純なフィードバック制御であり、従来の制御法で対処することができる。しかし、クライオポンプの定常に至るまで及びヘリウム冷凍機の定常以後で加温運転までの運転領域では、14基のクライオポンプ間の不均衡冷却を抑制するための制御やクライオポンプからの急激な負荷変動に対応したヘリウム冷凍機の安定な制御を行う必要があり、これらの制御を総合的に構築するための開発課題として以下の4項目が挙げられた。

- 1) クライオポンプの予冷時における基本冷却制御
- 2) 14基のクライオポンプ間の予冷過程における不均衡冷却抑制制御
- 3) クライオポンプの予冷、液溜、定常時におけるヘリウムループ内主要機器のヘリウム保有バランスを考慮したクライオポンプへの液体ヘリウム供給に関する安定供給制御
- 4) クライオポンプ定常時における6枚のクライオパネルの安定冷却制御
- 5) クライオポンプからの負荷変動に対応したヘリウム冷凍機の安定化制御

以上5項目について、具体的制御方法を以下に述べる。なお、これらの制御を構築する上での基本的的前提条件を以下に示す。

- 1) 本システム内においては、各種の運転状態に伴うほとんど全ての影響がヘリウム冷凍機に反映されることから、クライオポンプからの負荷変動に対応した制御や各運転状態における各機器内ヘリウムの保有バランスを保つための制御は、液体ヘリウムデュワーを含めたヘリウム冷凍機側で集中的に行う。
- 2) ヘリウム冷凍機とのデジタル信号の授受以外のクライオポンプの全制御は、クライオポンプ側で行い、ヘリウム冷凍機の運転状態に応じたクライオポンプのフィードバック制御は行わない。
- 3) 液体ヘリウム温度付近の極低温領域において、流量を測定するためのオリフィス流量計等の設置は、クライオポンプシステムに対して大きな熱負荷の原因となり、クライオポンプの冷却に重大な影響を与えることから、極低温領域におけるヘリウムの流量測定に基づいた制御法は構築しない。

4) 各種の最終的な制御用パラメータは試運転結果に基づいて決定する。

また、本クライオポンプシステムは、ヘリウムループと窒素ループの2つのループから成るが、この中で、窒素ループは従来の比較的簡単な制御法で十分制御可能であり、以下ではヘリウムループのみの制御について述べる。

4.1 クライオポンプの予冷時における基本冷却制御

クライオポンプの予冷は、図7に示すように、ヘリウム供給用予冷弁CV12と2つの出口弁（定常弁：CV31、予冷弁：CV32）の3つの弁によって行われる。クライオポンプが定常になるまでの予冷段階においては、ヘリウム冷凍機は液化運転が主体であり、その設計液化能力は4.5Kで $0.92\text{ m}^3/\text{h}$ であることから、液体ヘリウムデュワー内の液体ヘリウムを減じることなくクライオポンプ1基に供給できる最大供給量は、 $(0.92\text{ m}^3/\text{h}) / 14 = 0.066\text{ m}^3/\text{h}$ ($= 4.4\text{ Nm}^3/\text{h}$)となる。予冷時において、 $4.4\text{ Nm}^3/\text{h}$ の一定量のヘリウムがクライオポンプに供給されるように、クライオポンプ入口温度TI10を検知して、図8(a)に示す弁開度曲線 $f_0(TI10)$ に沿って弁開度が逐次設定される。これが各クライオポンプへのヘリウムの供給量を一定とするための基本制御法である。

一方、クライオポンプ出口弁は、定常弁CV31と予冷弁CV32から成り、それぞれ以下のように制御される。クライオポンプの定常時には、クライオポンプで蒸発した極低温ヘリウムガスが定常弁CV31を通してヘリウム冷凍機に戻り、ヘリウム冷凍機でこの極低温ヘリウムの寒冷が回収される。しかし、クライオポンプ予冷時において、クライオポンプを冷却したヘリウムガスの温度が比較的高い場合、ヘリウム冷凍機を低温に安定に保持するために、このヘリウムガスをヘリウム冷凍機に直接戻すことはできず、予冷弁CV32を通すことにより加温器で常温にしてから、ヘリウム冷凍機の圧縮機を介して、ヘリウム冷凍機に間接的に戻す必要がある。このように、クライオポンプがある程度冷却された段階で、クライオポンプの定常運転前に、定常弁CV31と予冷弁CV32の出口弁の円滑な切り換えを行う必要がある。しかし、図7に示すように、CV31弁が設置された戻り管とクライオポンプへの液体ヘリウムの供給管とは、真空断熱配管をコンパクトにするために3重管同心円構造を形成していることから、クライオポンプへの供給ヘリウムとクライオポンプからのヘリウムガスの間で配管を介して熱交換が行われる。この真空断熱配管内における熱交換によるクライオポンプへの供給ヘリウムの温度上昇を最小限に抑え、クライオポンプを安定に冷却するために、CV31弁を通過できるヘリウムガスの温度には上限を設け、また、熱交換された後の供給ヘリウムの温度にも上限を設けて、CV31弁とCV32弁とを切り換えるための制御法を構築した。具体的制御法は図8(b)であり、4つのタイマー $t_1 \sim t_4$ と3つの弁開度勾配 $k_1 \sim k_3$ とを設定することにより、CV31弁とCV32弁の切り換え制御が行われる。なお、この切り換え制御の進行条件は、クライオポンプ入口温度TI10と出口温度TI19の設定温度に対して、これらの設定温度以下の条件を同時に満足することであり、その場合、CV31弁とCV32弁の弁開度の制御が図8(b)に従って進行する。しかし、この設定温度以下の同時条件が満足されない場合、CV31弁及びCV32弁の弁開度の進

行は一旦停止され、条件が同時に満足されるまでその弁開度がそのまま保持される。また、C V 3 1 の開度に関する勾配設定は2段階とし、初期段階は弁開度の勾配値を比較的低く設定することにより、円滑に定常運転へ移行できるよう考慮した。

4.2 14基のクライオポンプ間の不均衡冷却抑制制御

14基のクライオポンプ間の予冷段階における不均衡冷却を抑制し、システム全体を安定に保持しながらクライオポンプを効率よく冷却するために以下の制御方式を構築した。前述したように、クライオポンプの入口温度T I 10により各クライオポンプ内に一定流量のヘリウムガス（気液二相ヘリウムの場合もヘリウムガスとして換算）が供給されるように、入口温度T I 10の関数として定義された予冷弁C V 1 2 の弁開度曲線 $f_0(T I 10)$ により、各クライオポンプは、基本的に同じ供給量の低温ヘリウムで冷却されることになる。しかし、この方法だけでは、クライオポンプの冷却が進むにつれて、徐々に各クライオポンプ間で冷却の不均衡が発生する。この不均衡を是正するために、さらに、各クライオポンプの代表温度であるクライオパネル温度T I 1Aと14基のクライオポンプのクライオパネル温度の平均値 $\overline{T I 1A}$ との偏差D Vをとり、比例感度Kを用いて式(1)により各クライオポンプの予冷弁C V 1 2 の弁開度fの修正を行うことによって、14基のクライオポンプ間の不均衡冷却の抑制を行う。

$$f = f_0(T I 10) \cdot (1 + K \cdot D V) \quad (1)$$

ここで、

$$D V = \frac{\overline{T I 1A} - T I 1A}{T I 1A} \quad (2)$$

さらに、クライオポンプが液体ヘリウムで冷却され、クライオポンプ入口温度T I 10及びクライオパネル温度T I 1Aが液体ヘリウム温度に近づいた場合、予冷中のクライオポンプ間に温度差なくなり、(1)式によるクライオポンプ間の不均衡冷却抑制制御だけでは、14基のクライオポンプを同様に定常運転に導くことは不可能となることが予想される。そこで、ここでは、クライオポンプ全ユニットの定常運転の早期達成を行うために、定常状態に達していないクライオポンプに関して、温度的には十分に冷却されていると判断できる予冷開始後のある一定時間後に、予冷中クライオポンプ内への液体ヘリウムの液溜めを行うために、予冷弁C V 1 2 の弁開度を一定開度に開く制御を取り入れた。予冷中クライオポンプのC V 1 2 一定開度制御の時期は、クライオポンプが本格的に冷却されるのは液体ヘリウムの供給開始からであることから、液体ヘリウムデューラからの液体ヘリウム供給開始からのタイマーにより設定することとした。

これらの不均衡冷却抑制制御は予冷中クライオポンプのみについて行い、定常に達してからは除外され、4.4節で後述するが、気液分離器内液体ヘリウムの液面制御により定常弁C V 1 1

を制御し、定常時におけるクライオポンプへの液体ヘリウムの供給制御が行われる。

4.3 ヘリウム冷凍機からクライオポンプへの液体ヘリウムの安定供給制御

完全な閉サイクルであるヘリウムループ内で、ヘリウムを大量に保有する主要機器は、クライオポンプ、クライオポンプへの液体ヘリウムの供給源である液体ヘリウムデュワー及びヘリウム冷凍機用圧縮機入口圧力を一定に保ちヘリウムガスの供給源となる中圧タンクの3者である。液体ヘリウムデュワーからクライオポンプへ液体ヘリウムを安定に供給するためには、ヘリウムループ内ヘリウムの総量が一定であることから、クライオポンプの運転状態に応じて、これら3者のうち、2者のヘリウム量を決めれば、3者のヘリウム量の制御は可能となり、ヘリウムループ内でのヘリウムの保有バランスを崩すことなく、クライオポンプに液体ヘリウムを安定に供給することができる。ここでは、制御に必要なヘリウム量として、液体ヘリウムデュワー内液体ヘリウム量とクライオポンプ定常時におけるクライオポンプ内液体ヘリウム量の2者を選定した。具体的には、図9に示すように、液体ヘリウムデュワー内の液体ヘリウムの液面に関して、異なった概念をもつ2種類の液面設定値を設けることにより、液体ヘリウムデュワーとクライオポンプ内に保有されているヘリウム量の管理を行う。すらわち、一方は、クライオポンプに液体ヘリウムを安定に供給するための液体ヘリウムデュワーに取り付けられた液体ヘリウム供給弁 C V 4 0 1 制御のための液面である。他方は、クライオポンプに液体ヘリウムを供給することによって定常に達したクライオポンプ内に保有される液体ヘリウム量に相当する液体ヘリウム量をヒーター D I 4 0 1 により液体ヘリウムデュワー内から蒸発させ、中圧タンク内に回収することにより、ヘリウムループ内ヘリウムの保有バランスを正常に保つための液面設定である。前者の液面の設定値 L I 4 0 3 S V 1 は、式(3)に示すように、クライオポンプ予冷の最終段階であるクライオポンプへの液体ヘリウムの液溜めを行うためのものである。すなわち、この設定値 S V 1 は、クライオポンプに液体ヘリウムを効率よく溜めるために、十分に冷却されたと判断されるクライオパネル温度 15 K 以下の「液溜め許可信号」を有するクライオポンプのユニット数 n 1 により決定され、この設定値 S V 1 と液体ヘリウムデュワー内保有液面との関係より、液体ヘリウム供給弁 C V 4 0 1 が制御される。後者の液面設定値 L I 4 0 3 S V 2 は、式(4)に示すように、クライオポンプの「定常信号」を有するクライオポンプのユニット数 n 2 より決定され、この設定値 S V 2 と液体ヘリウムの保有液面との関係より液体ヘリウムデュワー内ヒータ D I 4 0 1 が制御される。ここで、ヒータ D I 4 0 1 制御用液体ヘリウム液面の増分値 ΔH_2 は、クライオポンプの1基当たりの内容積から決定され、液体ヘリウム供給弁 C V 4 0 1 制御用液体ヘリウム増分値 ΔH_1 は、クライオポンプ液溜めに必要な液体ヘリウム量として、クライオポンプ容積より多い値として決定される。

$$S V_1 = H_{\theta 1} - n_1 \cdot \Delta H_1 \quad (3)$$

$$S V_2 = H_{\theta 2} - n_2 \cdot \Delta H_2 \quad (4)$$

ここで、 $H_{\theta 1}$ 、 $H_{\theta 2}$ は、CV 401 及び DI 401 制御用の液体ヘリウムデュワー内液体ヘリウム液面に関する各初期値である。

4.4 クライオポンプの定常時における安定冷却制御

クライオポンプ定常時には、クライオポンプの設置位置により異なって供給される気液二相ヘリウムの気液比に関係なく、かつ、クライオポンプ1基当たり6枚のクライオパネル全てに気相分の少ない液体ヘリウムを安定に供給することができるクライオポンプ冷却法として、気液二相ヘリウムの浮力を利用した自然循環方式を採用した⁽⁵⁾。この方式は、図10に示すように、まず、気液分離器内液体ヘリウムの液面が一定となるように定常弁 CV 11 により液体ヘリウムが気液分離器内に供給され、気液分離器内で気液が分離されることにより、液体ヘリウムのみが気液分離器内に溜められる。次に、クライオパネルでの熱負荷によって発生した気相の浮力により、気液分離器内の液体ヘリウムは、気液分離器とクライオパネルとを接続する自然循環ループ内を循環することから、クライオポンプの設置場所に無関係に6枚のクライオパネル全てを安定に気相分の少ない液体ヘリウムにより冷却することができる。自然循環時における各クライオパネル内へ供給される気液二相ヘリウムの流動様式は、既報⁽⁵⁾で述べたように、ガラスモデルによる流動様式の観察結果より均質流であり、この結果に基づいて、各クライオパネル内へ供給される液体ヘリウムに関して、自然循環時の各クライオポンプへの液体ヘリウムの流量分配を計算した結果、図11に示すように、各クライオパネルの予想熱負荷に対して必要となる液体ヘリウムの40倍以上の液体ヘリウムが各クライオパネルに供給されることが予想された⁽⁵⁾。

4.5 クライオポンプの負荷変動に対応したヘリウム冷凍機の安定化制御

ヘリウム冷凍機は、液体ヘリウムデュワー内に単に液体ヘリウムを溜める液化運転とクライオポンプからの極低温ヘリウムガスの寒冷を回収してヘリウム冷凍機としての運転の効率化を図った冷凍運転の2種類の運転モードがあり、クライオポンプの予冷の最終段階から定常に達するまでの間に、ヘリウム冷凍機を最大の液化能力が得られるように液化運転から冷凍運転に円滑に移行する制御を構築する必要がある。ヘリウム冷凍機の液化運転時と冷凍運転時の2種類の運転モードにおけるT-S線図をそれぞれ図12と図13に示す。これらの図より、どちらの運転モードに対しても、ヘリウム冷凍機に導入されるヘリウムガス量が一定であることから、ヘリウム冷凍機の液化運転から冷凍運転への運転モードの変換は、冷凍機内でタービンラインと液化ラインに分岐されるヘリウムガスの流量のどちらか一方を制御することにより行うことができる。ここでは、図14に示すように、精密機器であるタービンを有するタービンラインの流量制御を主制御とし、液化運転と冷凍運転間の運転モード変換をタービンラインに設置された流量調整弁 CV 100 により行い、副制御として、圧縮機から冷凍機に導入されるヘリウムガスの一定流量制御を液化ラインに設置された JT弁(ジュール・トムソン弁) CV 104 で行うこととした。なお、

J T弁 C V 1 0 4 による流量一定制御には、これと並行して、液体ヘリウムデュワー内の異常な圧力上昇を避けるために、圧力 P I 4 0 1 を検知して C V 1 0 4 を制御する圧力制御が付加され、最終的な C V 1 0 4 の制御はこれら 2 つの制御の低値選択として行われる。

ヘリウム冷凍機の液化運転と冷凍運転間の運転モード変換を以下の方法により構築する。

タービンラインの流量 m_T は、入口温度 T_i 、入口圧力 P_i 、出口圧力 P_e 、比例定数 C を用いて、一般に次式で表される⁽⁶⁾。

$$m_T = C \frac{P_i}{\sqrt{T_i}} \sqrt{1 - \left(\frac{P_e}{P_i} \right)^2}$$

$$\sim C \frac{P_i}{\sqrt{T_i}} \quad (5)$$

ここで、タービン入口温度 T_i は、ヘリウム冷凍機定常時には一定と考えることができるので、タービンライン流量 m_T はタービン入口圧力 P_i で制御できる。また、ヘリウム冷凍機の冷凍能力 Q は、一般に循環流量 m_c と循環ヘリウムのエンタルピ差 Δh から次式で求められる⁽⁷⁾。

$$Q = m_c \cdot \Delta h \quad (6)$$

ここで、 Δh は一定と考えることができるので、ヘリウム冷凍機の冷凍能力 Q は循環流量 m_c に比例する。

これらの式(5)、(6)の一般的な関係に基づいて、ヘリウム冷凍機の液化運転から冷凍運転への安定移行に関する制御は以下となる。本システムでは、まずヘリウム冷凍機の液化運転モードと冷凍運転モードの各運転領域における最大能力を示す関係は、図 1 5 に示すように、一般的に、近似的に線形関係で表される⁽⁷⁾。次に、液化運転と冷凍運転間の運転モードを決定するタービンラインの流量は線形で近似するとして、図 1 5 に併記した第 2 タービン入口圧力 P I 1 0 3 により、ヘリウム冷凍機の運転モードを定義することができる。すなわち、まず、式(6)より、循環流量であるクライオポンプからの減圧流量 F I 5 3 により冷凍能力を予想することができ、次に、図 1 5 における冷凍能力と第 2 タービン入口圧力との関係より、第 2 タービン入口圧力 P I 1 0 3 の設定値が決定され、この設定圧力を満足するようにタービンラインの流量が流量調節弁 C V 1 0 0 により制御されることになり、最終的にヘリウム冷凍機の運転モードの移行が可能となる。

以上の運転モードに関する移行制御の他に、ヘリウム冷凍機をより安定に制御するために以下の 2 つの制御を付加した。1 つは、前節で述べたように、ヘリウムループ内ヘリウムの保有バランスを保つための液体ヘリウムデュワー内におけるヒータ D I 4 0 1 の容量制御に対するヘリウム冷凍機の安定化制御である。ヘリウム冷凍機の液化能力増大に伴う液体ヘリウムデュワー内液体ヘリウム量の増加時において、ヒータ D I 4 0 1 の容量オーバーによる制御不能を避け、ヒー

タの容量制御が安定に行われるよう、ヘリウム冷凍機の液化能力を制御する必要がある。そのために、上述した液化運転と冷凍運転間の最適運転を行うための第2タービン入口圧力の設定値 P I 1 0 3 S V₁とは別に、ヒータ D I 4 0 1 の負荷容量に応じたタービン入口圧力設定値 P I 1 0 3 S V₂を設定し、ヘリウム冷凍機の液化能力を下げる制御を付加する。他は、タービンの過冷却防止制御である。すなわち、クライオポンプ異常時等によるクライオポンプ等からの大量の極低温ヘリウムの寒冷により、ヘリウム冷凍機全体が冷却され、その結果、第2タービン入口温度 T I 1 0 1 が異常に低下することによって、第2タービン内でヘリウムが液化しタービンが破損する可能性がある。この破損を含めたタービンの異常運転を防止するために、第2タービン入口温度 T I 1 0 1 を検知し、タービンライン流量を C V 1 0 0 で制御することにより第2タービン入口温度の制御を行う。なお、最終的な C V 1 0 0 の制御値は、この温度制御と第2タービン入口圧力制御における2つの P I D 出力値の低値選択により行われる。

REFRIGERATOR	Start	Turbine Start	Cool Down	LHe Filling	Steady State		Worm Up	Stop
		Liquefaction Mode			Refrigeration Mode			
CRYOPUMP #1	Start	Cool Down by GHe		Cool Down by LHe	Steady State		Regeneration	Stop
CRYOPUMP #2	Start	Cool Down by GHe		Cool Down by LHe	Steady State		Regeneration	Stop
CRYOPUMP #3	Start	Cool Down by GHe		Cool Down by LHe	Steady State		Regeneration	Stop
CRYOPUMP #4								
CRYOPUMP #13								
CRYOPUMP #14	Start	Cool Down by GHe		Cool Down by LHe	Steady State		Regeneration	Stop

図6 クライオポンプシステムの全体シーケンス

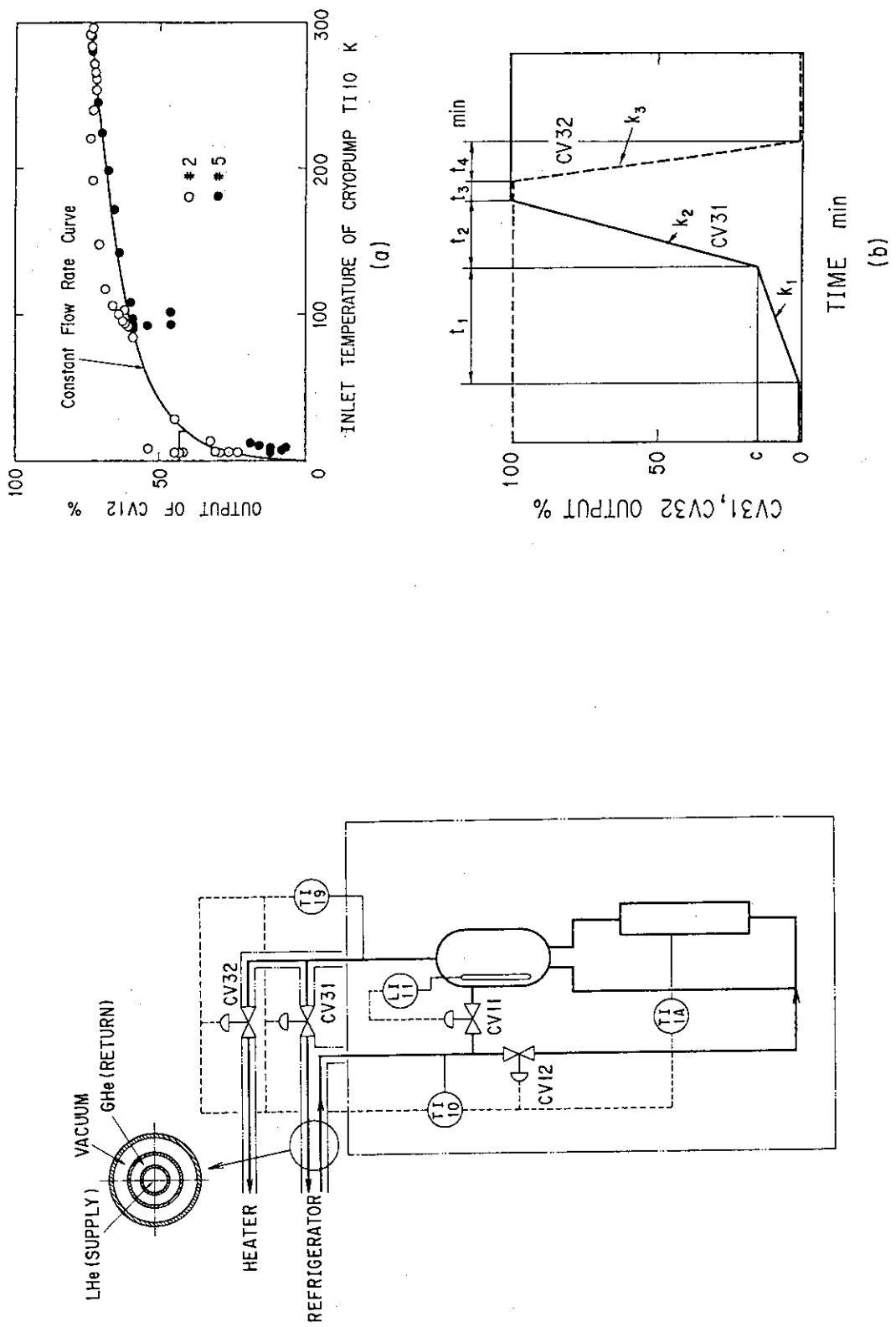


図7 クライオポンプの制御用フロー図

図8 クライオポンプの予冷時におけるヘリウム供給弁と出口弁の基本冷却制御法
 (a) 予冷弁 CV12 の制御法
 (b) 出口弁 CV31, CV32 の制御法

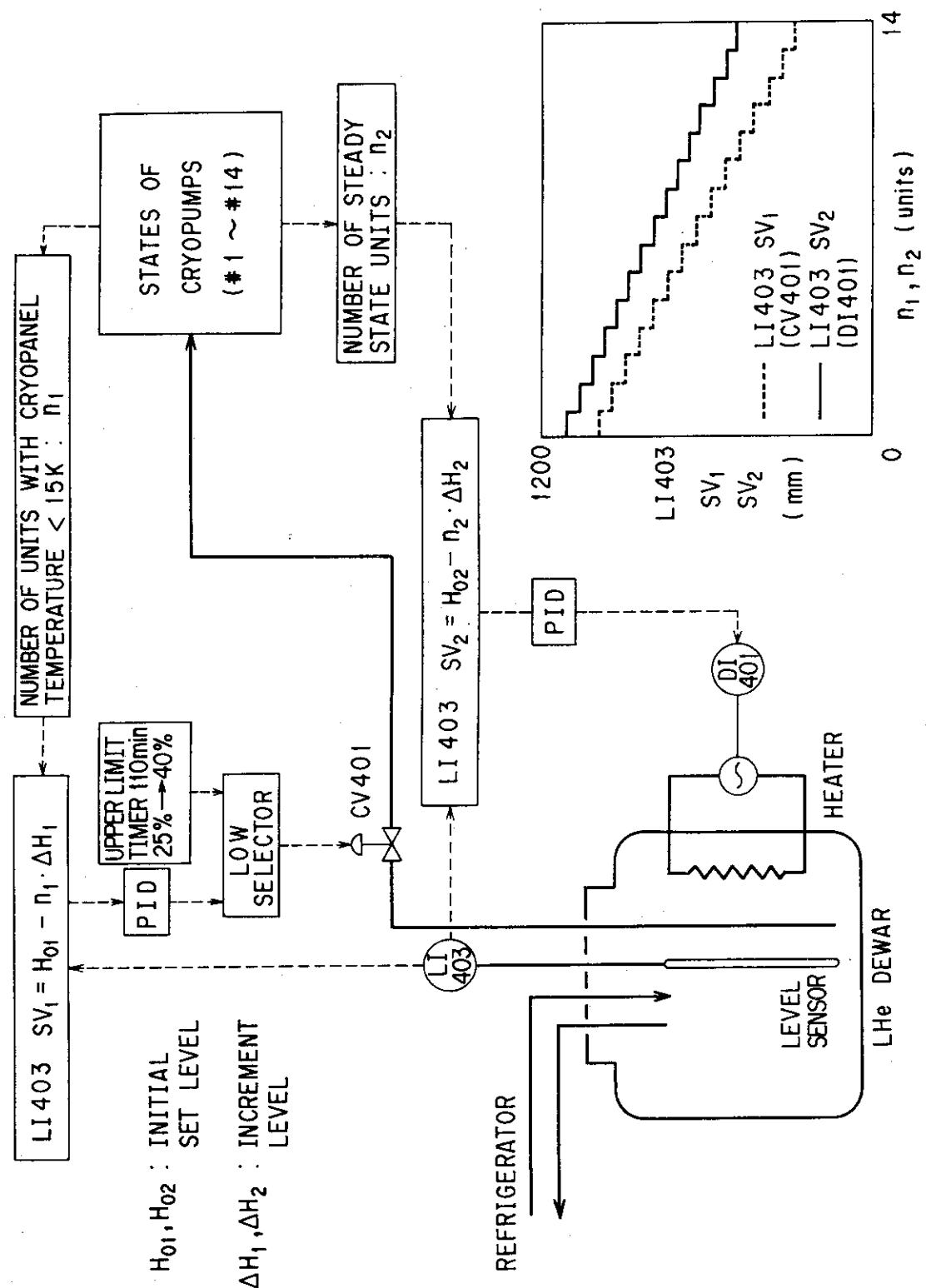


図9 ヘリウム冷凍機からクライオポンプへの液体ヘリウムの安定供給制御法

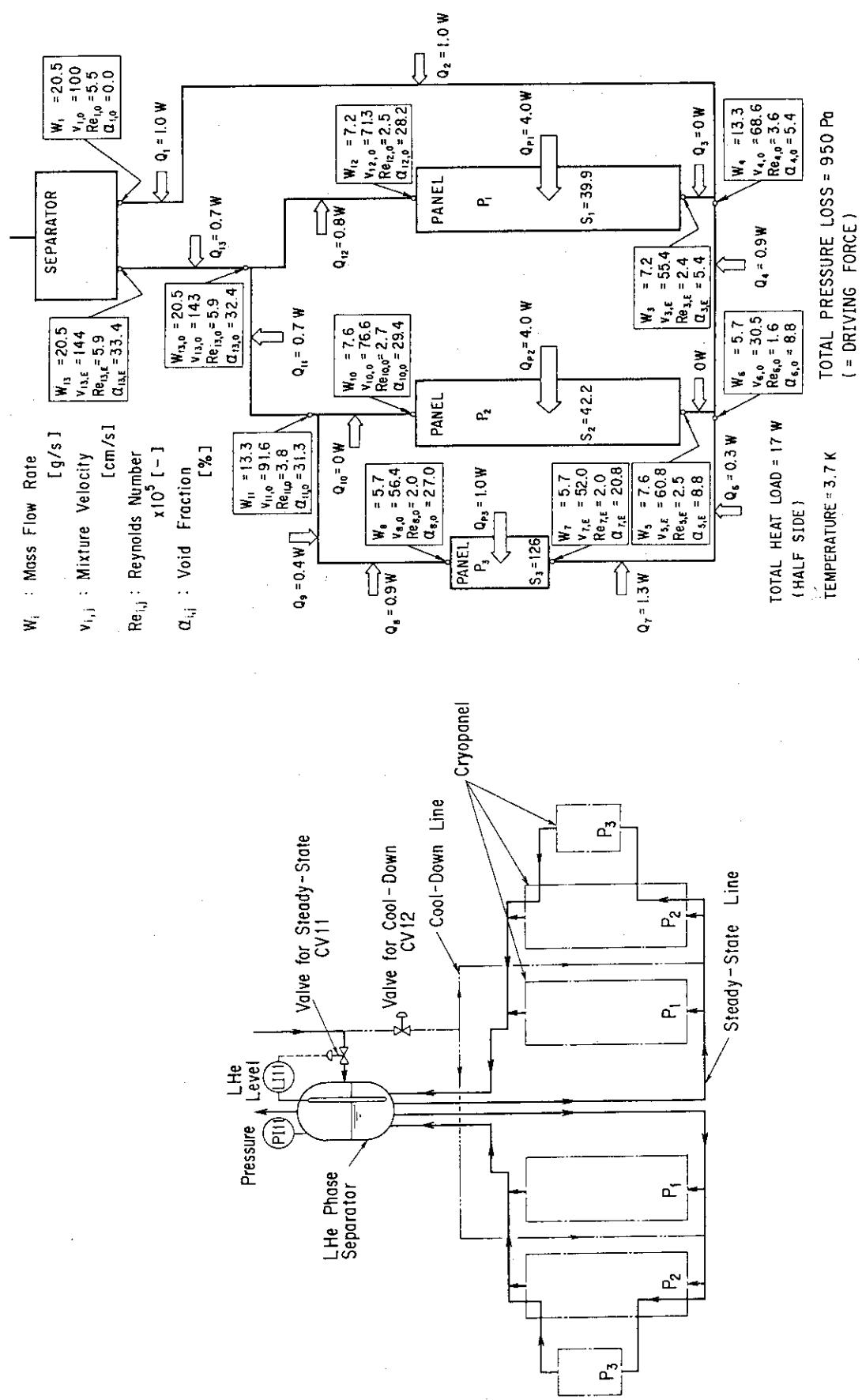


図10 クライオポンプの定常時における安定冷却制御法

図11 自然循環時における各クライオパネルに供給される
気液二相ヘリウムの流動特性の解析結果

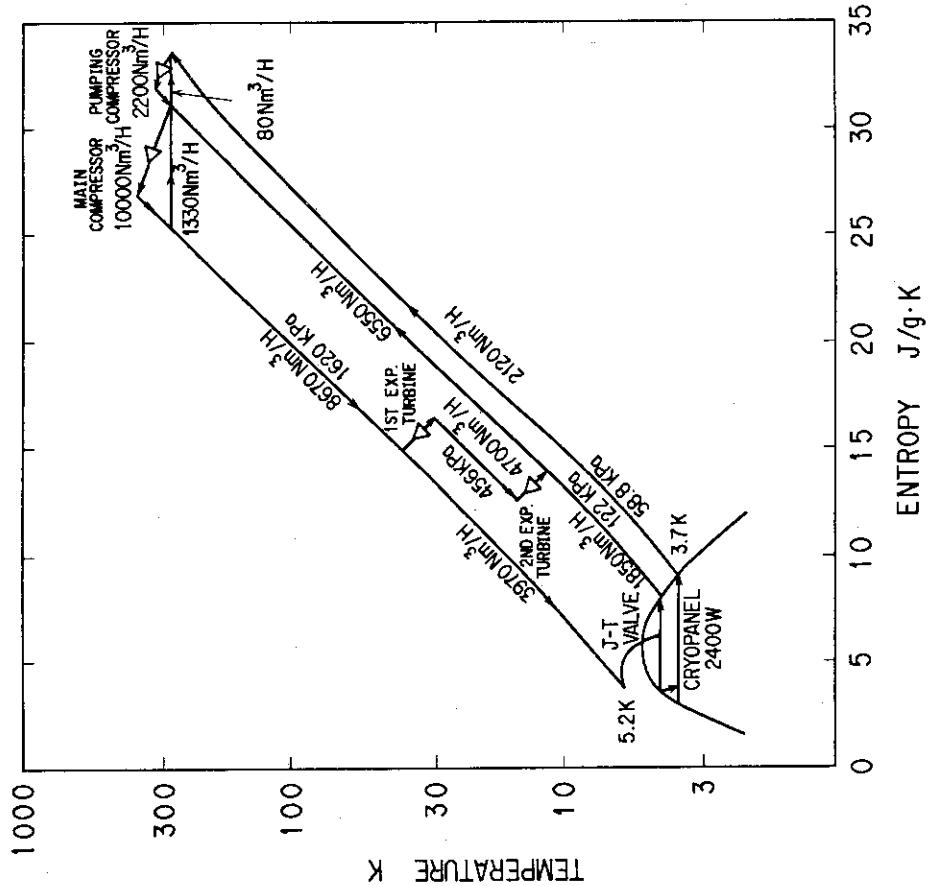


図13 ヘリウム冷凍機の冷凍運転時におけるT-S線図

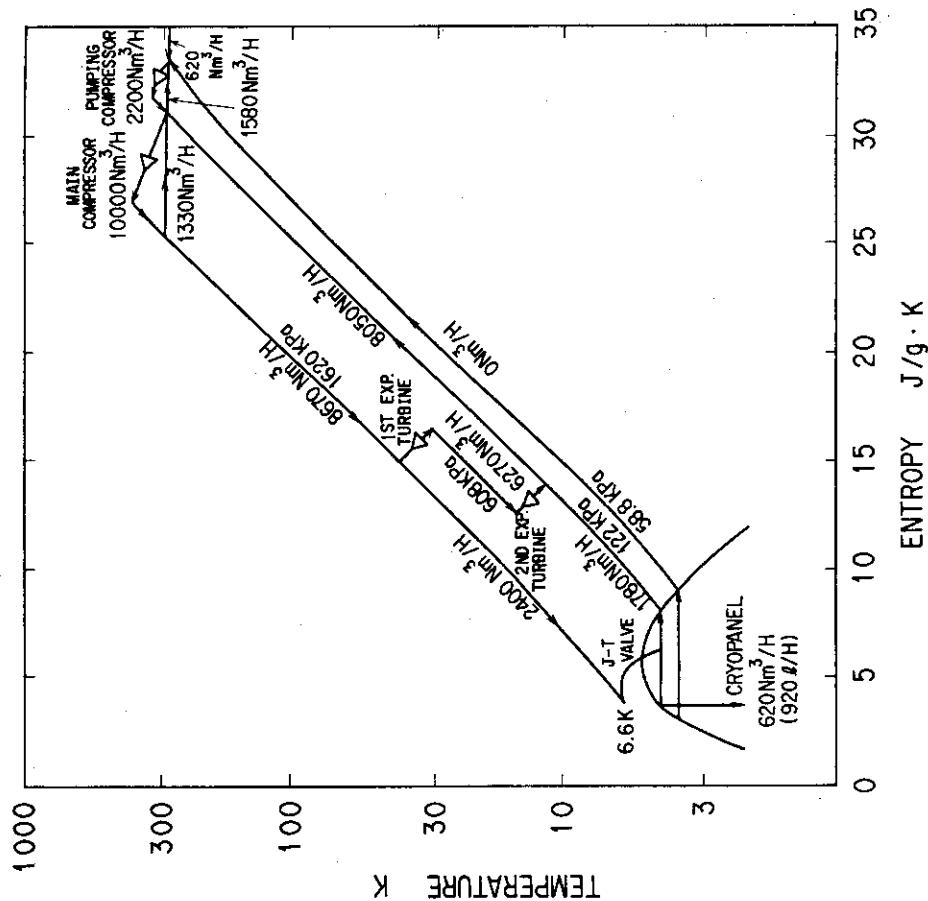


図12 ヘリウム冷凍機の液化運転時におけるT-S線図

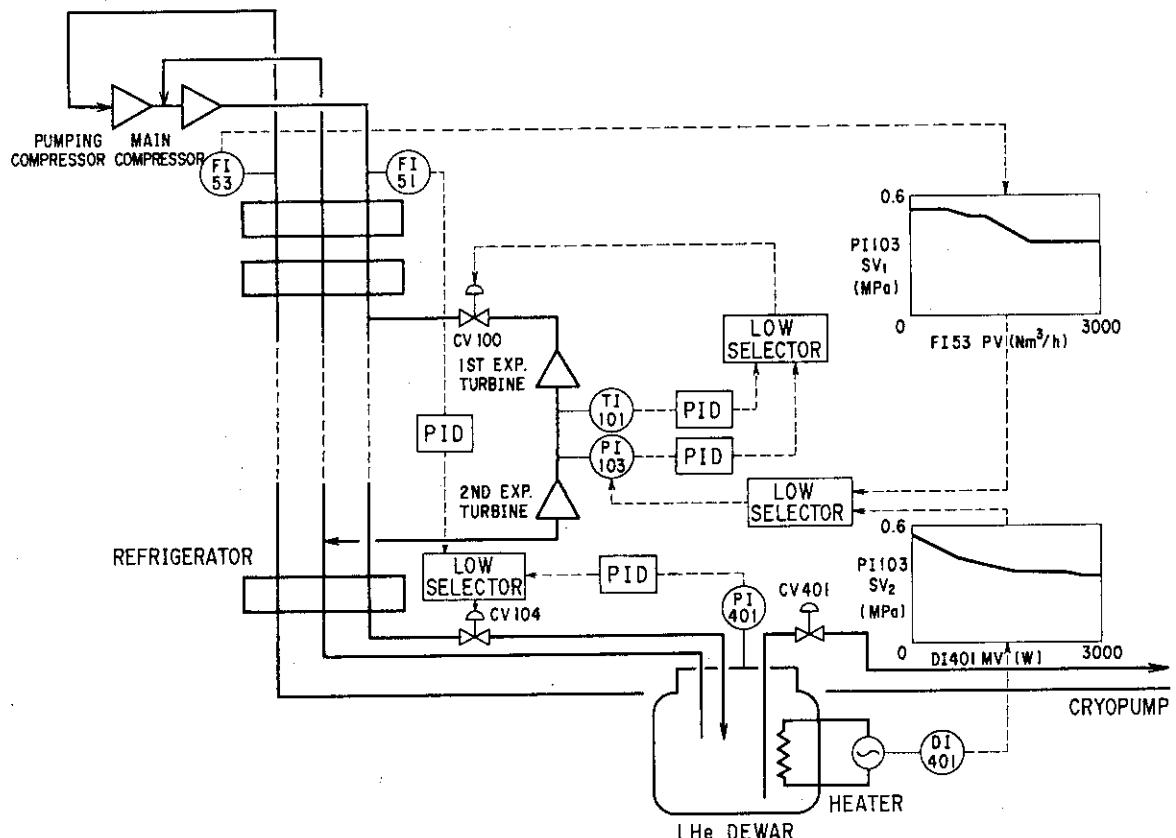


図14 クライオポンプの負荷変動に対応した
ヘリウム冷凍機の安定化制御法

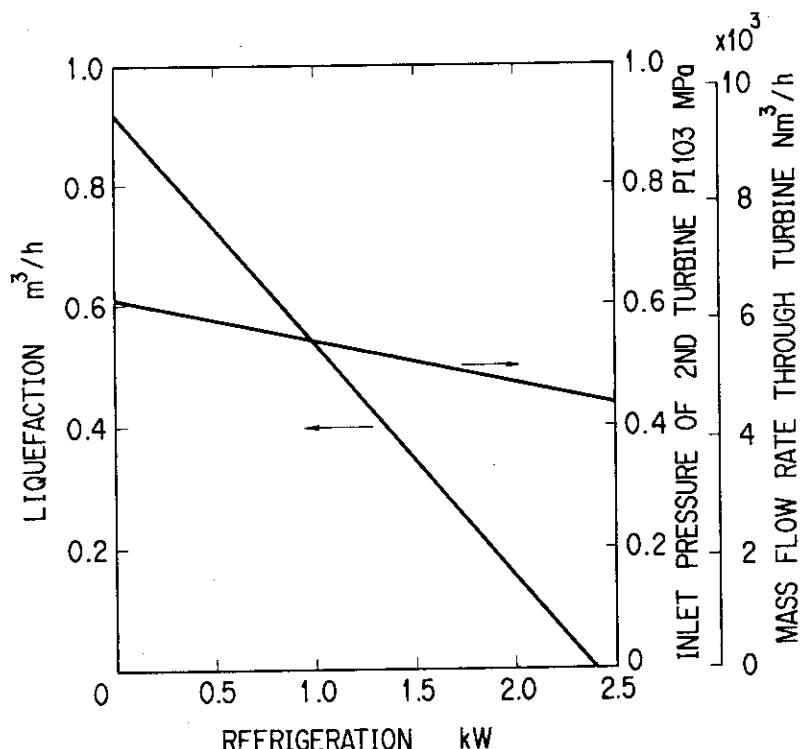


図15 ヘリウム冷凍機の液化運転モード／冷凍運転モードと
第2タービン入口圧力との関係

5. 試験結果

前述した制御法を用いた典型的な試験結果について以下に述べる。なお、以下に示す一連の試験結果は、各制御が相互に密接に関係していることから、同一運転時の試験結果を用いた。

5.1 クライオポンプの不均衡冷却抑制制御結果

5.1.1 クライオポンプの予冷弁制御結果

予冷段階における 14 基のクライオポンプ間の不均衡冷却抑制制御を用いた場合の各クライオポンプの冷却曲線を図 16 に示す。さらに、本制御法の具体的制御結果として、14 基のクライオポンプの中で予冷段階において最も冷却の早かった #5 クライオポンプと最も冷却の遅かった #2 クライオポンプについて、30 分毎の予冷弁 CV12 の弁開度を図 8 (a) のヘリウムの一定流量曲線に併記した。また、同様に #2 と #5 のクライオポンプについて、予冷開始から定常に達するまでの入口温度 TI10、クライオパネル温度 TI1A、予冷弁 CV12 の弁開度の時間変化を図 17 に示す。これらの結果より、クライオポンプの予冷の初期段階から、各クライオポンプ間で冷却特性が異なり始め、予冷開始から約 5 時間後における 14 基のクライオパネル間での最大温度差は、#2 と #5 のクライオポンプ間で約 50 K となった。これ以後、例えば、クライオポンプ間の不均衡冷却抑制制御を行わない場合、クライオポンプの予冷が進行するにつれて、14 基のクライオポンプ間の温度差は、一般的には、さらに加速度的に拡大することが予想される。しかし、不均衡冷却抑制制御により、最も冷却の進んでいた #5 のクライオポンプの冷却は抑えられ、その反対に、最も冷却の遅っていた #2 のクライオポンプの冷却は促進された。その結果、14 基のクライオポンプは同様の冷却特性を示し、液体ヘリウムによる冷却が開始されても、この不均衡冷却抑制制御はさらに効力を発揮し、14 基のクライオポンプの冷却特性に関する時間的差異は、1 時間以内となり、全てのクライオポンプはほとんど同様に冷却された。これにより、不均衡冷却抑制制御は 14 基のクライオポンプをほぼ均等に冷却するための非常に有効な方法であることが確認された。しかし、これ以後、クライオポンプが液体ヘリウム温度まで十分冷却されると、予冷中のクライオポンプ間におけるクライオパネル温度に差異がなくなり、不均衡冷却抑制制御の効果が少なくなる。このクライオポンプ予冷の最終段階である液体ヘリウムの液溜め運転状態において、すでに定常に達しているクライオポンプを除いた予冷中のクライオポンプに関して、液体ヘリウムによる冷却開始からのタイマー設定により 5.5 時間後に、予冷弁 CV12 を 43 % の一定値弁開度に自動設定した。この制御により、14 基のクライオポンプに対して、定常に達した時の最大時間差を約 2.5 時間に抑えることができた。以上の不均衡冷却抑制制御及び一定時間後の予冷弁 CV12 の一定弁開度設定制御により、14 基のクライオポンプ

ンプは、予冷開始後約16時間で全て定常状態に達することができ、これらの制御は、クライオポンプ全ユニットの予冷時間を短縮する上で大きな効力を発揮した。

5.1.2 クライオポンプの出口弁制御結果

クライオポンプの出口弁（定常弁CV31, 予冷弁CV32）制御における図8(b)の開度設定に関する各パラメータをそれぞれ $t_1 = 30$ 分、 $t_2 = 17$ 分、 $t_3 = 5$ 分、 $t_4 = 10$ 分、 $k_1 = 0.5\%/\text{分}$ 、 $k_2 = 5\%/\text{分}$ 、 $k_3 = 10\%/\text{分}$ 、 $c = 15\%$ とし、また、2つのクライオポンプ出口弁の開閉条件となるTI10とTI19の温度設定をそれぞれ17K, 15Kとした。クライオポンプ予冷弁CV12の制御結果と同様に、#2と#5のクライオポンプについて、予冷開始から定常に到るまでの入口温度TI10、出口温度TI19、定常弁CV31と予冷弁CV32の弁開度に関する時間変化を図18に示す。図18より、クライオポンプの2つの出口弁CV31とCV32の基本制御である弁開度に関する勾配設定とこの制御に付加したクライオポンプ入口温度TI10と出口温度TI19の設定温度に対応した弁開度保持制御により、クライオポンプの冷却を妨げることなく、クライオポンプからのヘリウムガスは、加温器を通り常温ヘリウムガスとなる予冷ラインからヘリウム冷凍機に直接戻る定常ラインへの切り換えが安定に行われた。また、このクライオポンプの冷却を妨げないヘリウムガスの戻りラインに関する安定な切り換え制御は、極低温ヘリウムの寒冷をヘリウム冷凍機で回収するための液化運転から冷凍運転への安定な移行を行うための前提条件であり、その条件は以上の試験結果より十分満足された。

5.2 ヘリウム冷凍機からクライオポンプへの液体ヘリウムの安定供給制御結果

ヘリウム冷凍機からクライオポンプへの液体ヘリウムの安定化供給制御に関する試験結果を図19に示す。ここで、液体ヘリウムデュワー内ヒータDI401制御のための液体ヘリウム液面の初期値 H_{0e} 及び増分値 ΔH_2 はそれぞれ 1100 mm, 40 mm (クライオポンプの内容積 0.08 m³ に相当) とし、液体ヘリウム供給弁CV401制御用の液体ヘリウム液面の初期値 H_{0l} 及び増分値 ΔH_1 はそれぞれ 980 mm, 50 mm (0.1 m³ に相当) とした。なお、増分値 ΔH_1 は、クライオポンプの冷却及び液溜めを行うことから、クライオポンプ1基当たりの内容積 ΔH_2 より約 25 % 増加させ 0.1 m³ とした。

図19から、予冷開始後約9時間で液体ヘリウムデュワー内に液体ヘリウムが規定量 (1.7 m³) 溜められ、その後、液体ヘリウム供給用調節弁CV401が徐開し、クライオポンプの冷却はヘリウムガスから液体ヘリウムを用いた冷却に移行した。液体ヘリウム供給用調節弁CV401の弁開度には、主制御である液体ヘリウムデュワー内液面設定値SV₁によるPID制御の他に、その補助として、クライオポンプの急冷を避けるために、25 % と 40 % の2段階の弁開度上限値を設定した。なお、弁開度 25 % から 40 % への上限値移行はタイマー設定により行い 110 分とした。クライオポンプの液体ヘリウムによる冷却が進行するにつれて、図19に示すように、14基のクライオポンプは不均衡冷却抑制制御によりほぼ均一に冷却されるので、ほぼ同時期に

各クライオポンプのクライオパネル温度が15K以下となり、大多数のクライオポンプから「液溜め許可信号」がヘリウム冷凍機に発せられ、液体ヘリウム供給調節弁CV401を制御するための液面設定値SV₁が急に低下した。この液面設定値の低下に伴い、実際の液体ヘリウムデュワー内液面もクライオポンプの液溜めを行うために多量の液体ヘリウムがクライオポンプに供給され低下した。クライオポンプの液体ヘリウムの液溜めが徐々に完了し、クライオポンプから「定常信号」がヘリウム冷凍機に発せられると、クライオポンプは各ユニット毎に一定量の液体ヘリウムを保有したことになり、その液量に相当する液体ヘリウムを液体ヘリウムデュワーから蒸発するために、液体ヘリウムデュワー内のヒータDI401を制御する液面設定値SV₂が徐々に低下した。これらの2つの液面設定値SV₁とSV₂により、液体ヘリウムデュワー内の実際の液体ヘリウム液面は、2つの液面設定値SV₁とSV₂の間でほぼ制御され、これら2つの液面設定値の範囲外に実際の液体ヘリウム液面が外れた場合、液体ヘリウム供給調節弁CV401が開閉またはヒータDI401が負荷されることにより、液体ヘリウムデュワー内液体ヘリウム液面は常に安定に制御されていることが確認された。なお、ヒータDI401の容量制御は、ヒータによる急激な負荷変動をさけるために、最大ヒータ負荷容量3000Wに対して2100Wを上限値とした。また、ヒータDI401が負荷されることにより液体ヘリウムデュワーで蒸発したヘリウムガスは、中圧タンクに回収され、中圧タンクの圧力はヘリウム冷凍機用圧縮機の入口圧力設定値0.11MPaに対して、0.4MPa以上を常に確保することができ、システム全体の運転状態の変動に対しても圧縮機の安定な運転を可能とした。これらの試験結果より、ヘリウムループ内でのヘリウムの保有バランスを崩すことなく、液体ヘリウムデュワーからクライオポンプに液体ヘリウムが安定に供給されることが確認された。

5.3 クライオポンプの定常時における安定冷却制御結果

クライオポンプ定常時における6枚のクライオパネル温度、気液分離器内液体ヘリウム液面LI11、定常弁CV11の試験結果を図20に示す。ここで、クライオポンプ定常の判定は、気液分離器内液体ヘリウム液面450mm（気液分離器全長の75%）とし、通常の定常時における液面を350mm(58%)とした。クライオポンプは定常信号を受けて、予冷弁CV12が閉となり、定常弁CV11による液面制御に切り換わると、気液分離器内の液体ヘリウムは自然循環によりクライオパネルに供給される。この時、クライオポンプ内の液体ヘリウムは、それまでの予冷時における気相分の多い液体ヘリウムから気相分の少ない液体ヘリウムに変わり、そのために、気液分離器内液面が一旦低下した。しかし、その後、CV11により液面の定常時における設定値350mm(58%)に液体ヘリウム液面が安定に制御されることが確認された。また、クライオパネル温度に関して、一般に、4K以下の極低温であるクライオパネル温度の絶対値を正確に測定することは、周囲の高温構造体からの輻射や熱伝導による侵入熱のために難しいので、ここでは、クライオポンプの運転制御に重点をおき、温度センサー及びその取り付け法を決定した。すなわち、クライオパネル表面に銅ブロックをろう付けし、その中に接着剤にて固定した白金-コバルト測温抵抗体によりクライオパネル温度を測定した。この方法では、クライオ

パネルの温度を正確に求めることはできないので、クライオパネルの実際の温度は気液分離器内の圧力を測定し、この圧力における液体ヘリウムの飽和温度から算出した（圧力から求めたクライオポンプの定常時におけるクライオパネル温度は3.5 Kである）。ただし、測温抵抗体による温度測定は、クライオポンプの運転制御の観点からは十分であり、前述したように、クライオポンプ予冷時における不均衡冷却抑制制御のために十分な温度センサーの役割を果たし、また、クライオポンプ定常時においても、クライオパネルに液体ヘリウムが安定に供給されているかどうかの判定にも十分使用することができる。すなわち、図20より、クライオポンプ予冷の最終段階において、各クライオパネル温度は一定値に定まらず不安定であったが、定常に達してからは、自然循環により気液分離器内の気相分の少ない液体ヘリウムによって各クライオパネルが冷却されると、クライオパネル温度の測定値は圧力から求めた値3.5 Kから少しシフトしているものの全て安定に冷却されることが確認された。これにより、クライオポンプ定常時において、液体ヘリウムの自然循環方式は、クライオパネルの安定冷却に関して非常に有効であることが示された。

5.4 クライオポンプの負荷変動に対応したヘリウム冷凍機の安定化制御結果

クライオポンプからの負荷変動に伴うヘリウム冷凍機の液化運転から冷凍運転への移行は、クライオポンプからの減圧流量F153を検知し、第2タービン入口圧力P1103の設定値を図21内の1点鎖線に基づいて変えることにより行うが、減圧流量F153の微少変化に対して、タービン入口圧力P1103が小刻みに変わることによるタービンの不安定化を避けるために、液化運転／冷凍運転の関係を示す1点鎖線の基準線に対して、設定値P1103SV₁を図21の実線で示すように、数ヶ所の一定値領域を設けた曲線とした。さらに、ヒータDI401出力に対するヘリウム冷凍機の液化能力を低下させるための第2タービン入口圧力の設定値P1103SV₂に関して、同様の理由により、数ヶ所の一定値領域を設けて図21に点線で併記した。また、タービンの過冷却を防止するための第2タービン入口温度T1101、ヘリウム冷凍機に導入されるガスヘリウム流量F151、液体ヘリウムデュワー内圧力P1401の各設定値はそれぞれ13K, 9500 Nm³/h, 0.14 MPa（ただし、液体ヘリウムデュワー内液体ヘリウムの液溜め完了までは0.16 MPa）とした。

ヘリウム冷凍機起動からクライオポンプ定常運転までの各運転領域におけるタービン入口圧力P1103の設定値に関する制御結果を図22に示す。液体ヘリウムデュワー内に規定量の液体ヘリウムが溜められるまでの第2タービン入口圧力P1103の設定値は、JT弁CV104入口温度T1102を検知したシーケンス制御により決定され、それ以後のP1103の設定値は、減圧流量F153とヒータ出力DI401との各PID出力に対する低值制御で決定された。すなわち、第2タービン入口圧力P1103の設定値は、図22に示すように、液体ヘリウムデュワー内に液体ヘリウムが規定量溜め込まれた後は、規定量以上の液体ヘリウムを蒸発させるためのヒータ出力値DI401により決定され、その後、液化運転のための設定値となり、クライオポンプからの減圧流量F153増加に伴い、液化運転から冷凍運転への移行制御を行うための減

圧流量 F I 5 3 により決定され、14基のクライオポンプが定常に達してからは、ヘリウムループ内ヘリウムの保有バランスを保持するための制御となるヒータ出力値 D I 4 0 1 により決定された。このように、システム全体における各種の運転状態に応じて第2タービン入口圧力 P I 1 0 3 の設定値が決定された。これらの制御により決定された第2タービン入口圧力 P I 1 0 3 の設定値に対応したタービンライン流量調節弁 C V 1 0 0 の P I D 制御値と第2タービン入口温度 T I 1 0 1 の一定温度保持用 P I D 制御値との間で低值制御を行い、その結果として、実際に運転された第2タービン入口圧力 P I 1 0 3 及びタービン流量調節弁 C V 1 0 0 の各制御値は図2 3となり、液体ヘリウムデュワー内に必要以上の液体ヘリウムを保有することなく、かつ、第2タービン入口温度 T I 1 0 1 を安定に保ちながら、ヘリウム冷凍機を液化運転から冷凍運転に円滑に移行することができた。

以上の第2タービン入口圧力の制御と並行して行われたヘリウム圧縮機からヘリウム冷凍機に導入されるヘリウムガスの一定流量制御の結果を図2 4 に示す。J T弁 C V 1 0 4 の制御は、ヘリウム冷凍機の予冷が完了するまではシーケンス制御で行われるが、その後、ヘリウムガス流量 F I 5 1 を検知することにより、ヘリウム冷凍機へ導入されるヘリウムガスの一定流量制御が行われた。その結果、液体ヘリウムデュワー内への液体ヘリウム液溜め完了後のヒータ負荷時及びヘリウム冷凍機の液化運転から冷凍運転への移行時における運転状態の急激な変化に対しても、ヘリウム冷凍機に導入されたヘリウムガスの流量はほぼ一定に安定に制御された。また、ガスヘリウム流量調節弁 C V 1 0 4 は、ヘリウムガス導入流量 F I 5 1 と液体ヘリウムデュワー内圧力 P I 4 0 1 に関する各 P I D 制御値との低值制御であるが、今回の試験結果のような通常の運転では、液体ヘリウムデュワー内圧力による制御は、実際には行われていないが、液体ヘリウムデュワー異常時等に対して有効となる。

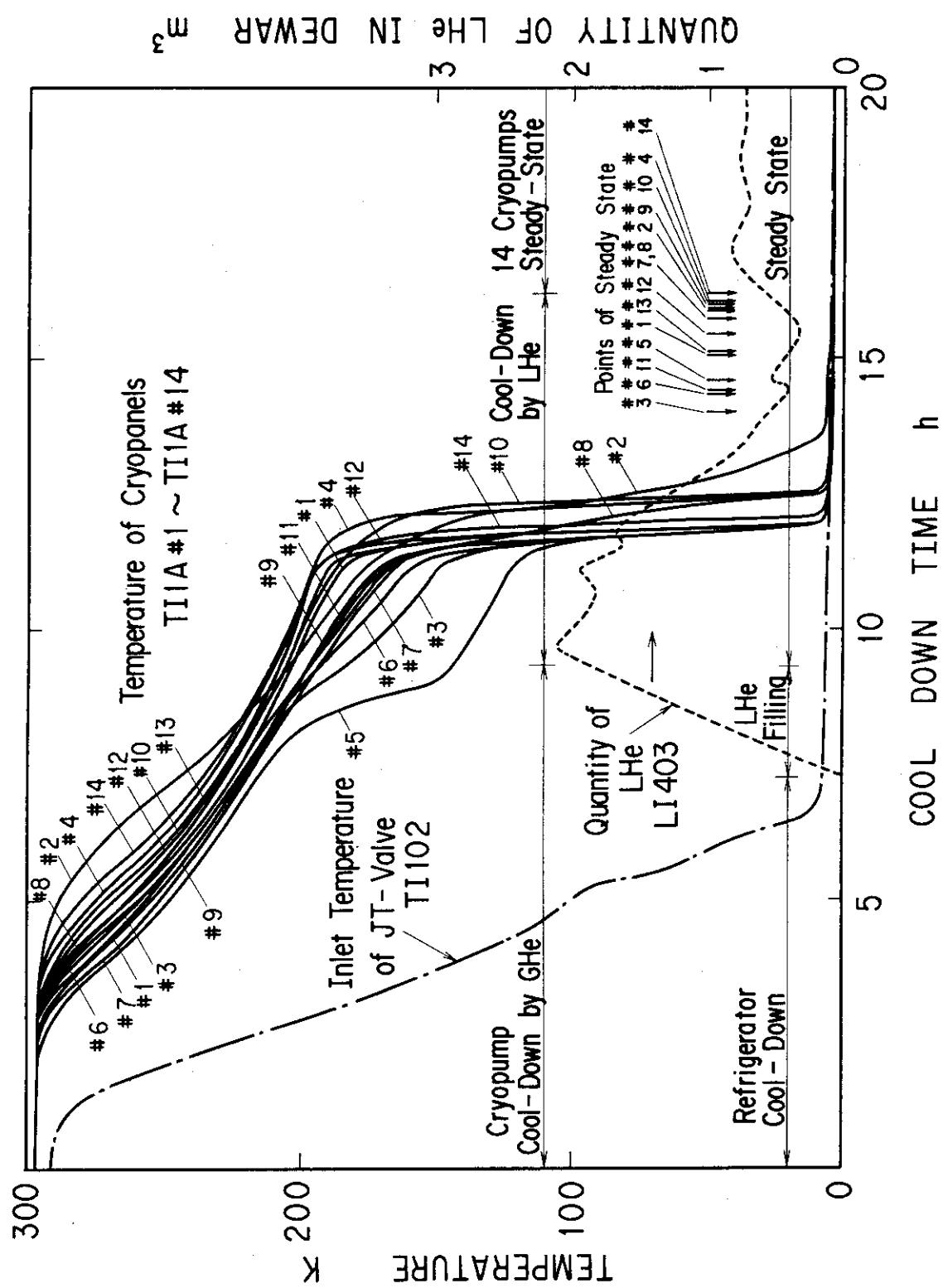


図 16 予冷段階における 14 基のクライオポンプ間の不均衡冷却抑制制御に関する試験結果

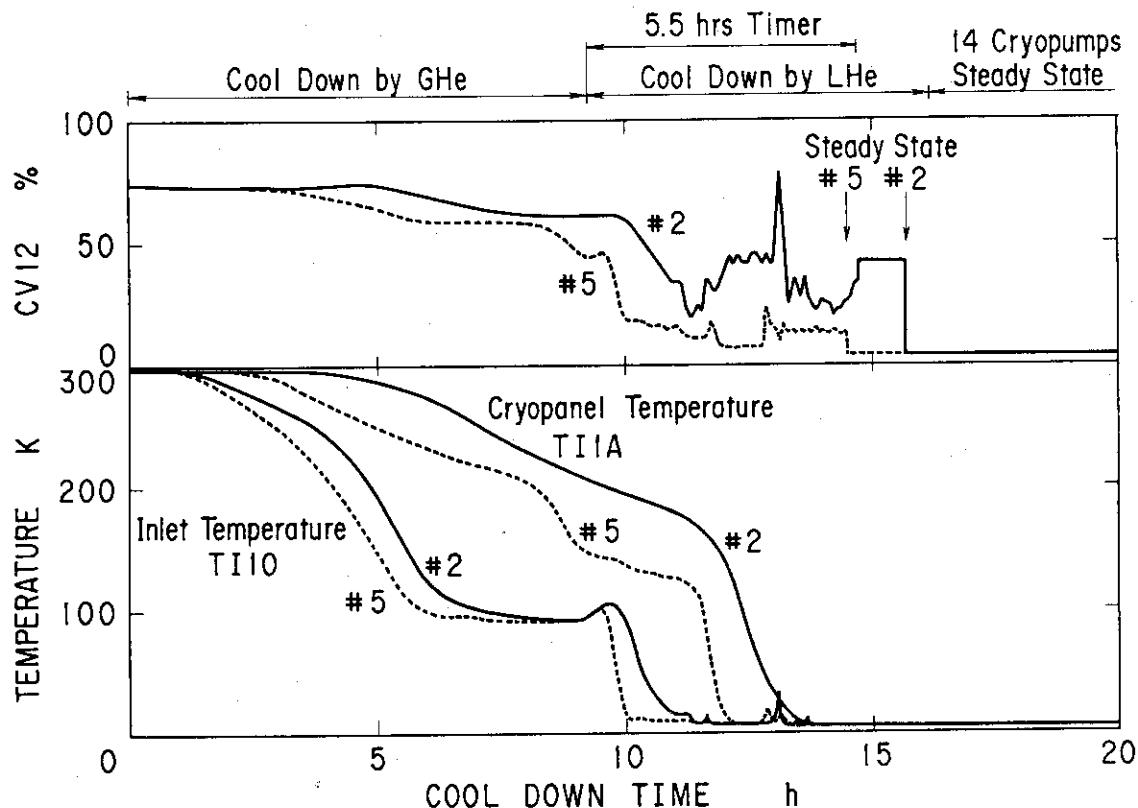


図1.7 クライオポンプ予冷時における不均衡抑制制御による予冷弁CV12の試験結果と
クライオポンプ入口温度TI10及びクライオパネル温度TI1Aとの関係

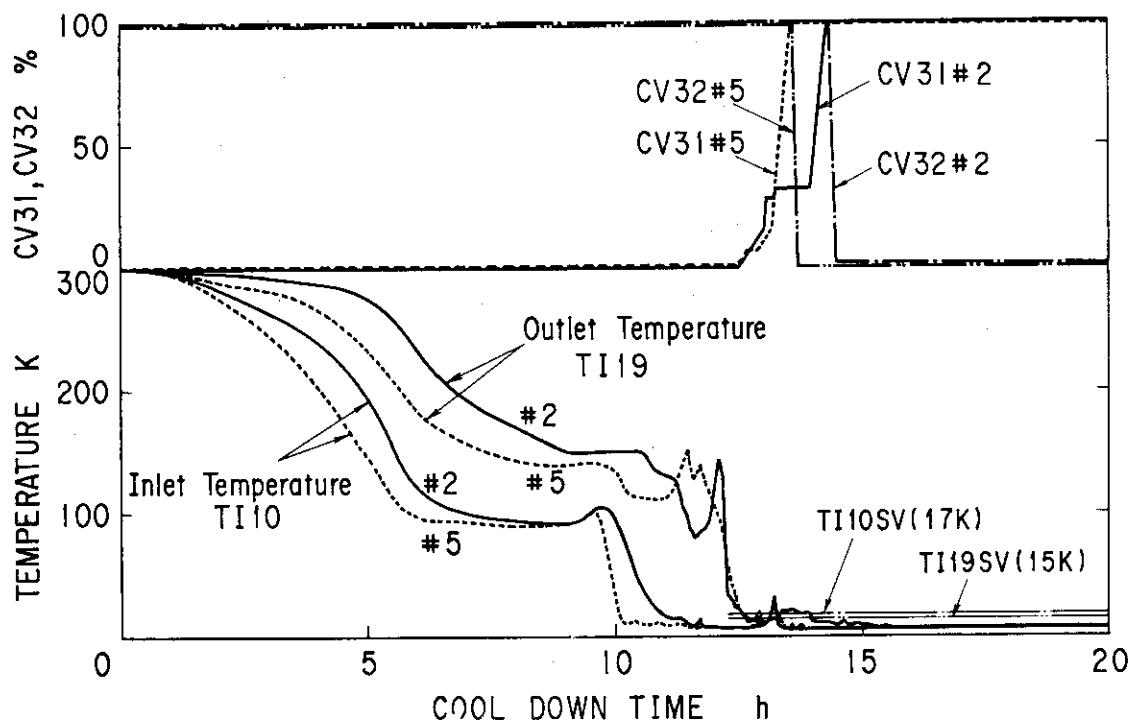


図1.8 クライオポンプ予冷時における出口弁(CV31, CV32)の試験結果と
クライオポンプ入口温度TI10及びクライオパネル温度TI1Aとの関係

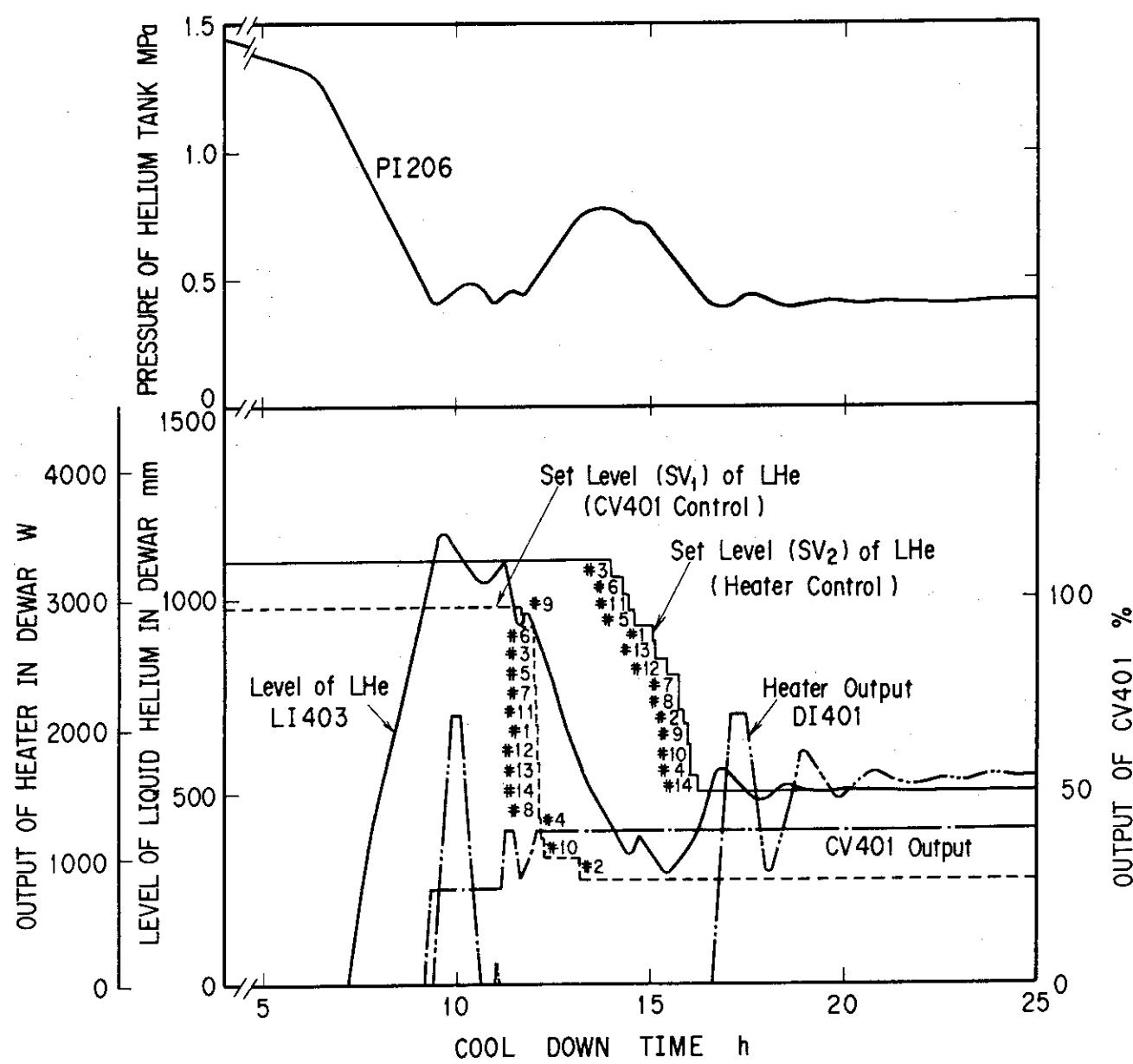


図19 ヘリウム冷凍機からクライオポンプへの液体ヘリウムの安定供給制御に関する試験結果

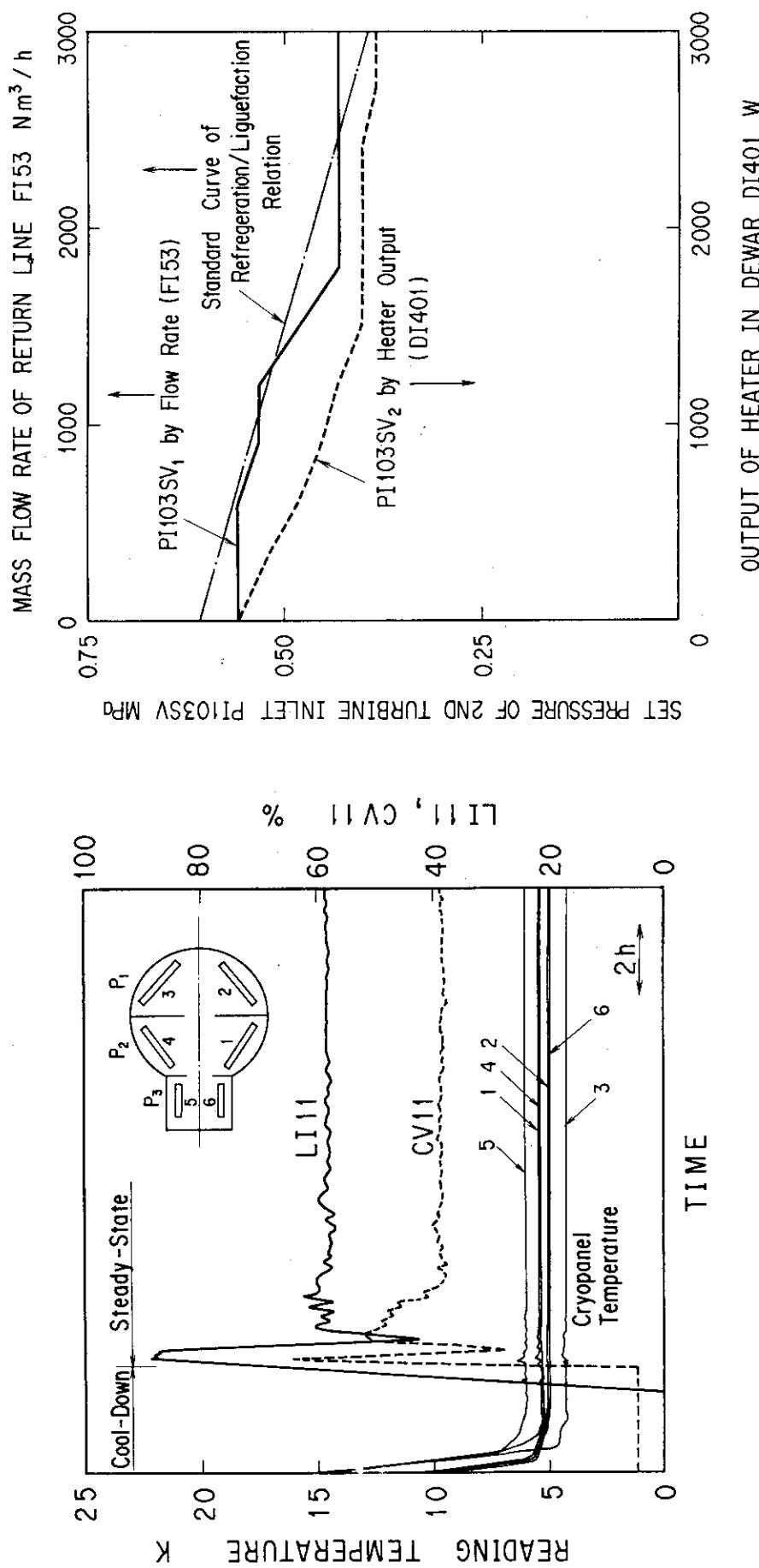


図20 クライオポンプ定常時における安定冷却制御に関する試験結果

図21 クライオポンプの負荷変動に対応したヘリウム冷凍機の安定化制御を行うための第2タービン入口圧力の設定
(PI103SV₁、PI103SV₂)

OUTPUT OF HEATER IN DEWAR DI401 W

0 1000 2000 3000

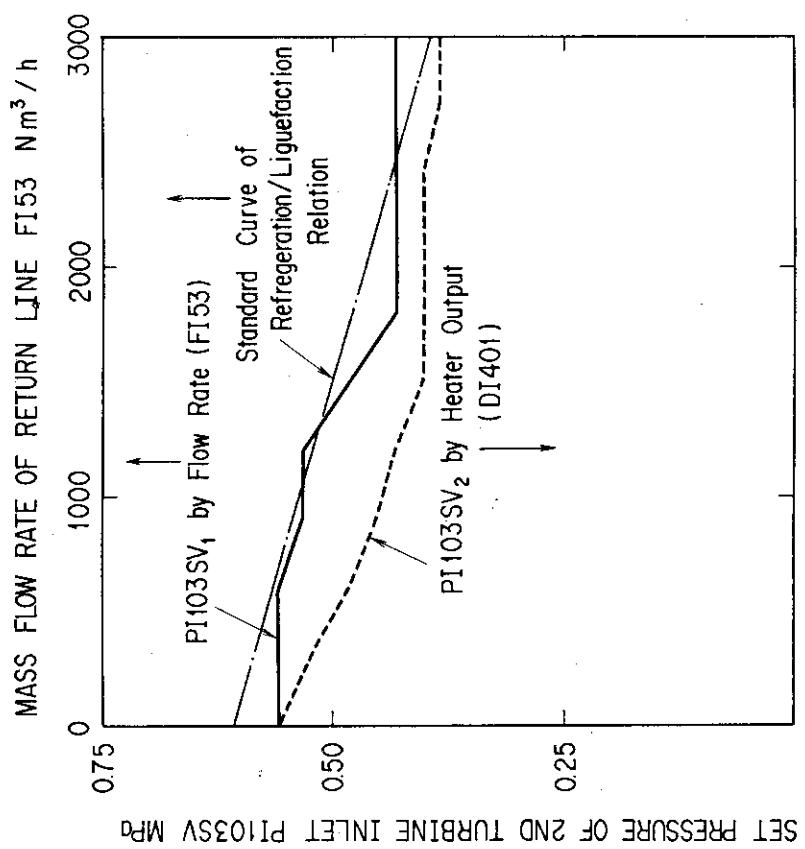
0

TIME

0 1000 2000 3000

0

TIME



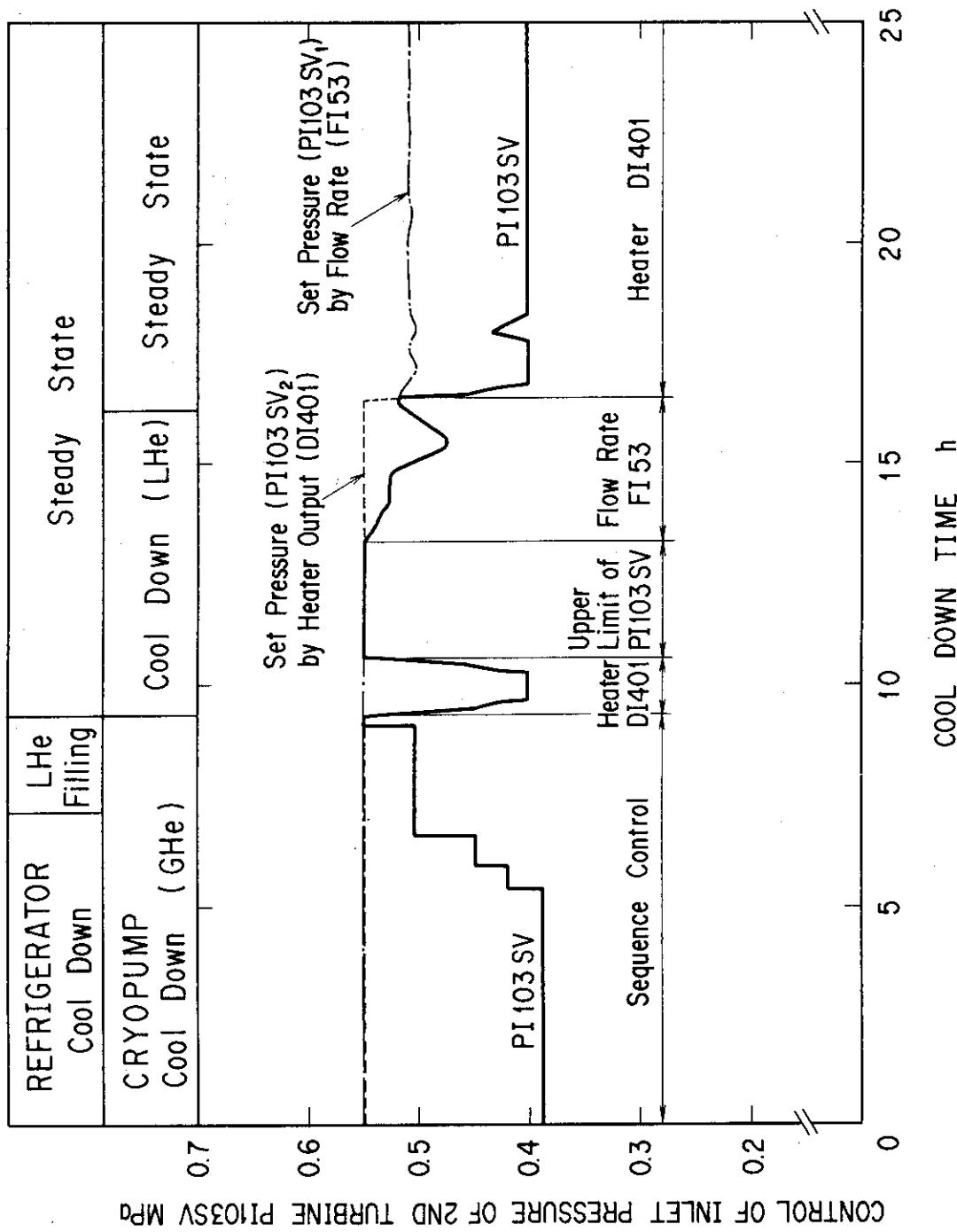


図22 クライオポンプの負荷変動に対応したヘリウム冷凍機の安定化制御時の
第2タービン入口圧力に関する最終的設定値PI103SVの試験結果

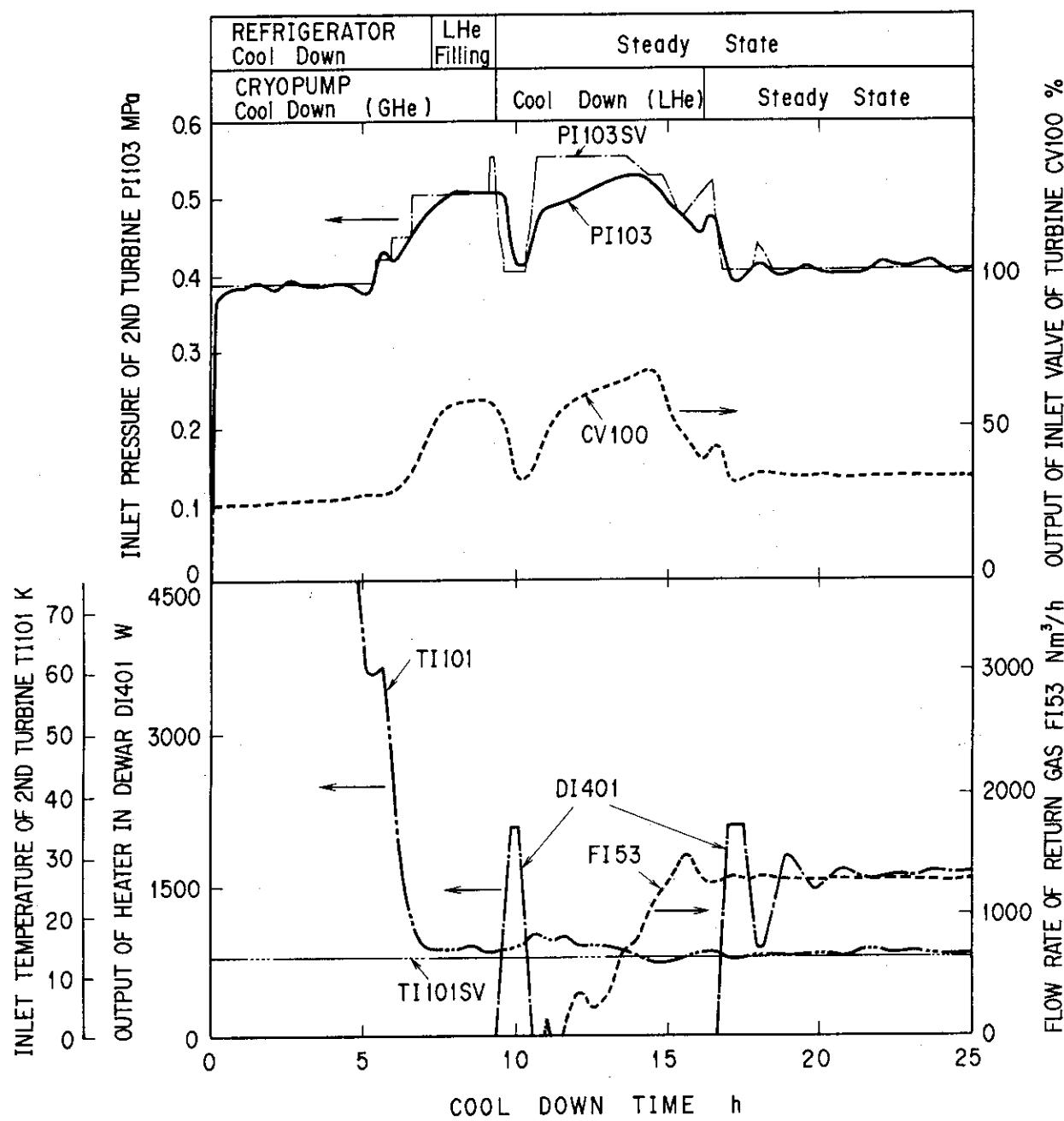


図23 クライオポンプの負荷変動に対応したヘリウム冷凍機の安定化制御時の
第2タービン入圧力P1103及びタービン流量調節弁口CV100の
試験結果

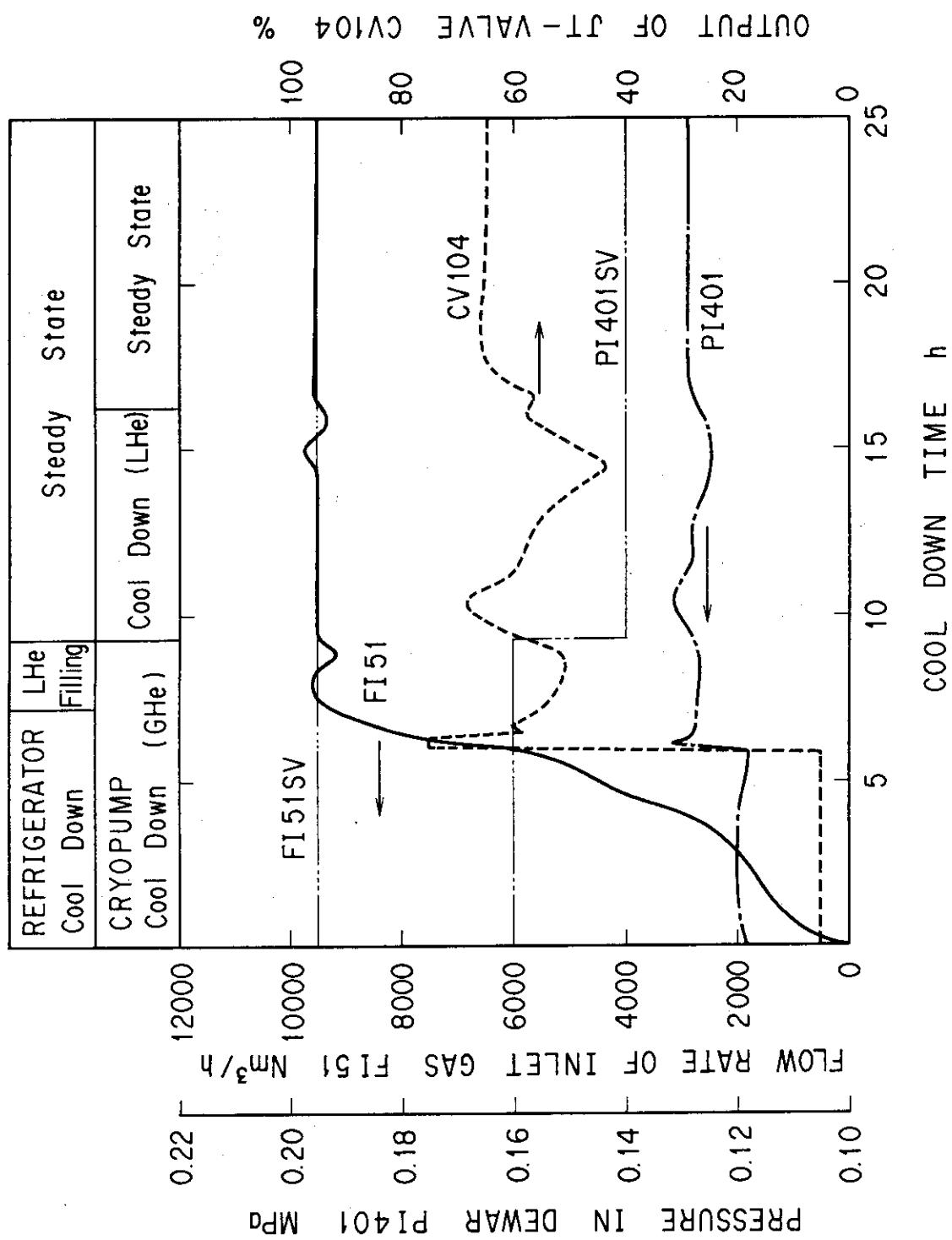


図24 ヘリウム冷凍機に導入されるヘリウムガスの流量一定制御の試験結果

6. 結 言

水素ガスに対する総排気速度 $20000 \text{ m}^3/\text{s}$ の世界最大の排気装置である 14 基のクライオポンプと 3.6 K で 3000 W の国内最大のヘリウム冷凍機及び約 500 m の液体ヘリウム輸送用真空断熱配管から成る JT-60NBI 用クライオポンプシステムの自動制御法を開発し、試験を行った結果、以下の結論を得た。

(1) 予冷段階における 14 基のクライオポンプ間の不均衡冷却抑制制御により、クライオポンプの設置位置の違い及びクライオポンプに供給される気液二相ヘリウムの気液比の違いによる各クライオポンプ間の冷却特性の不均衡を是正し、14 基のクライオポンプをほぼ均等に冷却することができた。また、この不均衡冷却抑制制御の効果が少なくなるクライオポンプ予冷の最終段階において、予冷弁のタイマー起動による一定値弁開度制御により、14 基のクライオポンプを予冷開始から 16 時間で全て定常に達することができた。

(2) クライオポンプの 2 つの出口弁（定常弁、予冷弁）の弁開度に関する一定勾配制御とクライオポンプ入口及び出口温度の設定温度に対応した弁開度保持制御により、クライオポンプからヘリウム冷凍機に回収されるヘリウムガスの予冷ラインから定常ラインへの切り換え制御が、クライオポンプの安定な冷却及びヘリウム冷凍機の正常な運転を妨げることなく、円滑に行われた。

(3) クライオポンプの運転状態に応じて、液体ヘリウムデュワー内にクライオポンプへの液体ヘリウムの供給制御用液面と液体ヘリウムデュワー内ヒータの容量制御用液面の 2 種類の液面を設定することにより、完全閉サイクルであるヘリウムループの各機器内ヘリウムの保有バランスを崩すことなく、各クライオポンプに液体ヘリウムを安定に供給することができた。

(4) 定常時におけるクライオポンプの安定冷却制御として、気液二相ヘリウムの浮力を利用した自然循環方式を採用した結果、クライオポンプの設置位置により異なって供給される気液二相ヘリウムの気液比に無関係に、6 枚のクライオパネルに気相分の少ない液体ヘリウムを供給することができ、各クライオパネルを安定に冷却することができた。

(5) ヘリウム冷凍機に導入されるヘリウムガスの一定流量制御とクライオポンプからヘリウム冷凍機に回収されるヘリウムガス流量による第 2 タービン入口圧力の設定制御によって、クライオポンプからの負荷変動に対応して、ヘリウム冷凍機を安定に液化運転から冷凍運転に移行することができた。また、液体ヘリウムデュワー内液体ヘリウムの保有量増大時における液体ヘリウムデュワー内ヒータの負荷容量制御に対応して、ヘリウム冷凍機の液化運転と冷凍運転間の移行制御用第 2 タービン入口圧力の設定値とは別の第 2 タービン入口圧力を設定することにより、ヘリウム冷凍機の液化能力を制御し、ヒータによる液体ヘリウムデュワー内液面制御を安定に行うことができた。

(6) 以上のヘリウム冷凍機を含めたクライオポンプシステムの予冷及び定常時における自動制御により、過去約 100 回の運転を行った結果、システムの起動から 14 基のクライオポンプ定常までの予冷時間が 16 時間 ± 1 時間以内であり、また、定常時におけるクライオポンプの冷却

も安定に再現できた。これにより、14基のクライオポンプから成るJT-60NBI用クライオポンプシステムをはじめとする大規模クライオポンプシステムの自動制御法の基本型が確立された。

謝辞

本研究を推進するに当り、終始激励をいただいた飯島勉 那珂研究所所長、田中裕二核融合装置試験部部長、白形弘文大型放射光施設計画推進室室長代理、国枝俊介NBI装置試験室室長に感謝いたします。また、多くの有益な議論をしていただいたNBIグループの諸氏に感謝いたします。

参考文献

- (1) S.Matsuda, et al. : Fusion Eng. Des., 5, 85(1987).
- (2) 柴沼 清、他：原子力誌、33, No.10(1991)掲載予定。
- (3) 柴田猛順、他：JAERI-M 7869(1978).
- (4) 柴沼 清、他：原子力誌、33, No.11(1991)掲載予定。
- (5) 柴沼 清、他：原子力誌、31, 399(1989).
- (6) 仲山 善裕、他：低温工学、23, 23(1988).
- (7) R.A.Byrns : LBL-15167(1984).

も安定に再現できた。これにより、14基のクライオポンプから成るJT-60NBI用クライオポンプシステムをはじめとする大規模クライオポンプシステムの自動制御法の基本型が確立された。

謝
辞

本研究を推進するに当り、終始激励をいただいた飯島勉 那珂研究所所長、田中裕二核融合装置試験部部長、白形弘文大型放射光施設計画推進室室長代理、国枝俊介NBI装置試験室室長に感謝いたします。また、多くの有益な議論をしていただいたNBIグループの諸氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) S.Matsuda, et al. : Fusion Eng. Des., 5, 85(1987).
- (2) 柴沼 清、他：原子力誌、33, No.10(1991)掲載予定.
- (3) 柴田猛順、他：JAERI-M 7869(1978).
- (4) 柴沼 清、他：原子力誌、33, No.11(1991)掲載予定.
- (5) 柴沼 清、他：原子力誌、31, 399(1989).
- (6) 仲山 善裕、他：低温工学、23, 23(1988).
- (7) R.A.Byrns : LBL-15167(1984).