

ヘリウム冷凍装置の新技術開発

Development of New Technology in Helium Refrigerator

核融合装置の実用化のためには、超電導マグネットの採用が不可避であり、またプラズマの有効な追加加熱装置としてNBIが重要視されている。超電導マグネット及びNBIのクライオポンプには、絶対零度に近い極低温を作り出すヘリウム液化冷凍装置が必要である。

日立製作所では、早くから膨脹タービン式大形ヘリウム液化冷凍装置の開発を進め、昭和43年に国産1号機を、また、昭和54年には、信頼性、運転性を向上させた2号機を開発した。現在までに、核融合、加速器などのプロジェクト用に4基を納入している。

技術開発として、ヘリウム液化冷凍装置の主要機器である膨脹タービンなどの開発だけでなく、トランスファチューブ、液体ヘリウムポンプ、自動制御装置などの周辺装置の開発をも並行して進めてきた。ここでは、これら周辺装置関係の新技術について報告する。

栗田義久* *Yoshihisa Awada*
高田 忠* *Tadashi Takata*
林 憲治* *Kenji Hayashi*
松田紀元** *Toshiharu Matsuda*

1 緒 言

核融合、加速器、浮上式鉄道、ジョセフソン素子、NMR-CT (Nuclear Magnetic Resonance-Computed Tomography: 核磁気共鳴コンピュータ断層撮影装置) などの先端技術分野では、絶対零度に近い極低温が不可欠なもので、ヘリウム液化冷凍装置の需要が増加しつつある。

日立製作所では、昭和30年代からヘリウム膨脹タービンの研究開発を進め、昭和43年に試作1号機¹⁾を、昭和54年には試作2号機²⁾を開発した。

特に、試作2号機は性能が優れ、コンパクトで信頼性のある装置とし、起動から定常運転、停止に至る一連の操作を自動化し、現在も自社工場内で研究開発に利用されている。

なおヘリウム液化冷凍装置の納入実績としては、自社研究所(100l/h, 300W at 4.5K)、京都大学(100W at 3.5K)、日本原子力研究所(300W at 3.7K)、高エネルギー物理学研究所(100l/h, 300W at 4.4K)がある。

超電導マグネット、クライオポンプなどの被冷却体の大形化に伴い、トランスファチューブも大口径化、長尺化し、プラント規模になるとその性能がヘリウム冷凍装置の容量を左右する要因となり、高性能化が必要となってきた。

また、被冷却体、特に超電導マグネットの冷却方法に、従来の浸せき冷却方式から強制循環冷却という新方式が採用されはじめ、液体ヘリウムの供給に液体ヘリウムポンプの必要性がでてきた。

更に、ヘリウム液化冷凍装置も実験室段階の小容量のものから、現在では日本原子力研究所で建設が進められているJT-60 NBI(Neutral Beam Injector: 中性粒子入射加熱装置)用の、冷凍能力2,400W(at 3.7K)という国内最大のものであり、この大形化に伴う信頼性、操作性などの向上のため運転の自動制御が求められている。

日立製作所では、このような背景のもとで、トランスファチューブ、液体ヘリウムポンプ、自動制御装置の開発を行ってきた。これらの開発内容について、以下に述べる。

2 トランスファチューブ

トランスファチューブの開発に当たっては、単体でも断熱性能を保證できるものを目指し、要素試験、製品試作などの研究開発を実施し、設計、製作技術を確立した。更に、その技術を実製品に適用し、性能確認などを行ない実用化を図った。

2.1 要素試験

トランスファチューブの断熱は真空断熱法を基本としており、その性能は、外部からの侵入熱の多少で評価される。侵入熱は、外部管と非接触部での輻射侵入熱と、接触部での伝導侵入熱に大別される。後者は一部の特殊な部分を除いて比較的解析が進んでおり、容易に計算が可能である。そこで研究開発は輻射侵入熱に対する解析を主体に実施した。

トランスファチューブでは、真空断熱法にSI(Super Insulator: 積層断熱材)を併用する。この真空積層断熱法は、宇宙技術、極低温技術などで利用され、基礎的な研究の結果も報告されてはいるが、SIの種類、試験条件などの相違からそのままトランスファチューブへの適用はできなかった。

そこで試験では一例を図1に示すトランスファチューブの管状要素試験装置を用いて、(1)積層数、(2)積層密度、(3)管口径、(4)装着方法、(5)真空圧力などの主要な要因個々の影響度合を確認した。その結果、次のことが明らかになった。

- (1) SIの断熱性能の評価は一般に見掛けの平均熱伝達率 λ で表わすが、実際には熱流束で表わしたほうが妥当である。
- (2) 積層数を増すと性能は向上するが、積層密度のほうがより影響力が大きいいため、装着方法の良否が重要な要因となる。
- (3) 小口径管ではSIの装着で受熱面積が極端に増大するため、見掛けの熱流束が大きくなる。

更に、内管サポート(スペーサと称する。)については、試験を通して高性能なFRP(ガラス繊維強化プラスチック)製ロッド形式を開発し実用化した。

2.2 構造、特徴

研究開発、製品試作を通して開発したトランスファチューブは、各要素に高性能化を図った構造を採用している。例えば、SIについては輻射シールドフィルムに特殊な加工を施し、

* 日立製作所笠戸工場 ** 日立製作所機械研究所

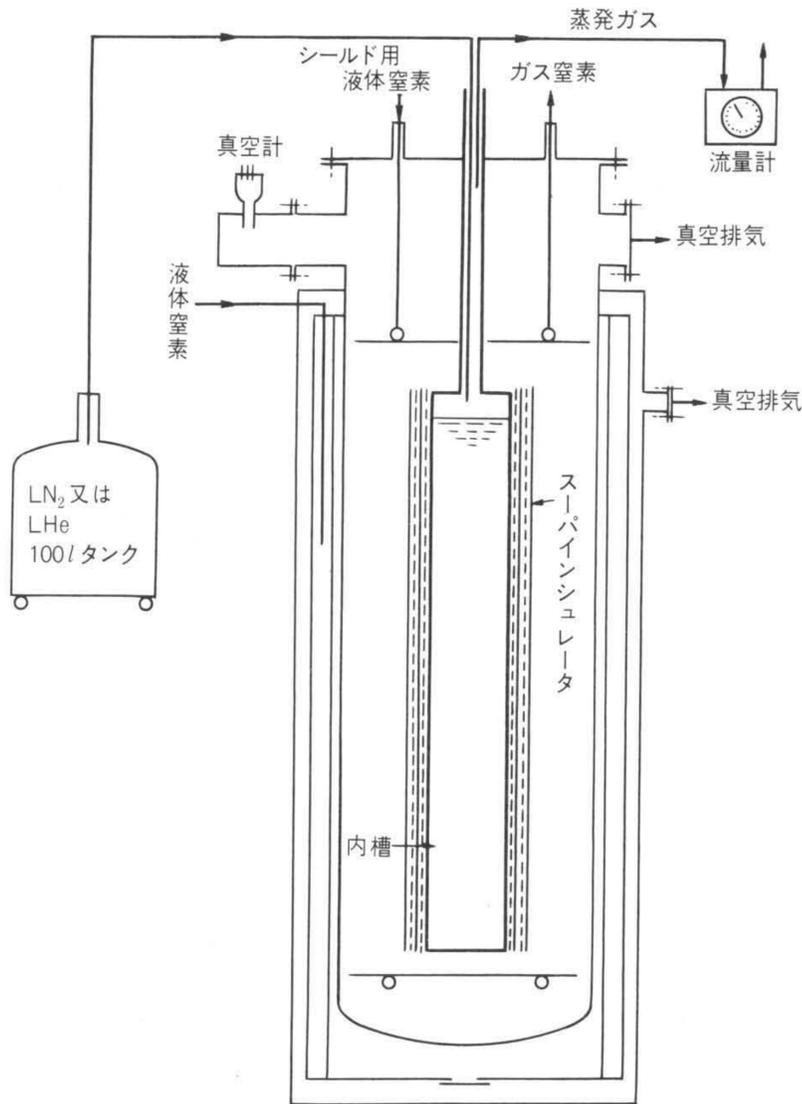


図1 トランスファチューブの管状要素試験装置の一例 内槽へSI(スーパインシュレータ)を装着し、外部からの侵入熱による冷媒の蒸発量によって、その断熱特性を測定する装置である。

スペーサについてはSIの外側に装着できるFRP製ロッド形式とすることで、高性能化、装着性及び信頼性を向上させている。更にHeライン用などでは、液体窒素シールドを併用することによって、より高性能な構造としている。

2.3 実績

表1に納入実績と仕様を、図2に納入品の一例を示す。日本原子力研究所JT-60 NBIの実機用は現在製作中で、他の納入品は、すべて初期の設計性能を満足していることを現地性能試験などにより確認している。

なお、表1中の実機液体窒素配管は、現地建設スケジュールの都合上、その一部約102mだけを製作したもので、性能試験用普通保冷部も含めた全長での侵入熱は、設計値600Wに対して実測値500Wを得、良好な結果であった。

また、京都大学納めのもは、昭和56年に設置されたNBIの能力増強改造工事に伴うトランスファチューブの新品への置き替えて、NBIの冷凍負荷は25.5Wから37Wへ変わり、そ

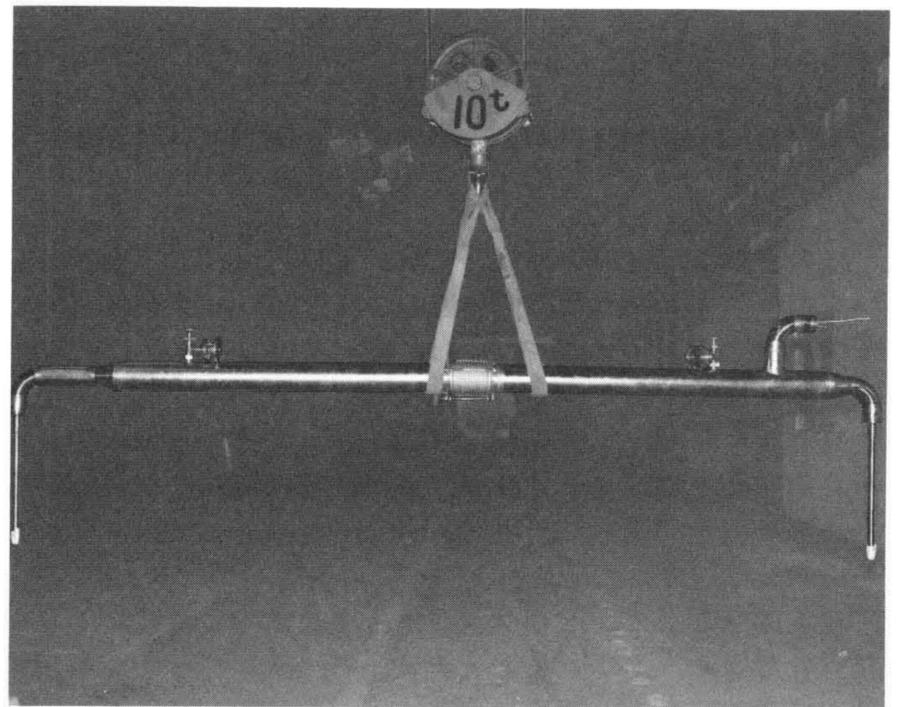


図2 JT-60 NBI 原型ユニット用トランスファチューブの一部外観 内管口径15A(φ21.7×1.65t)、外管125A液体窒素シールド付スプールである。外管中央のベローズは、据付スパン調整用である。

の増加分をヘリウム冷凍機容量をそのままとして、トランスファチューブの性能アップでカバーしたものである。性能アップの方法として、液体窒素シールドをトランスファチューブの曲り部にも取り入れ、また、SI、スペーサは前述の研究開発の成果を採用した。

3 液体ヘリウムポンプ

大形の超電導マグネットは、マグネットの内部に張り巡らせたパイプに液体ヘリウムを強制的に循環させて、超電導を保持する強制循環冷却方式が今後の主流になるものと予想される。この方式の実現のため、4.2Kで運転できる信頼性の高いポンプが不可欠である。このような背景のもとで、遠心式で、軸受に動圧ガスベアリングを採用し液体ヘリウムを扱ったポンプを開発した。

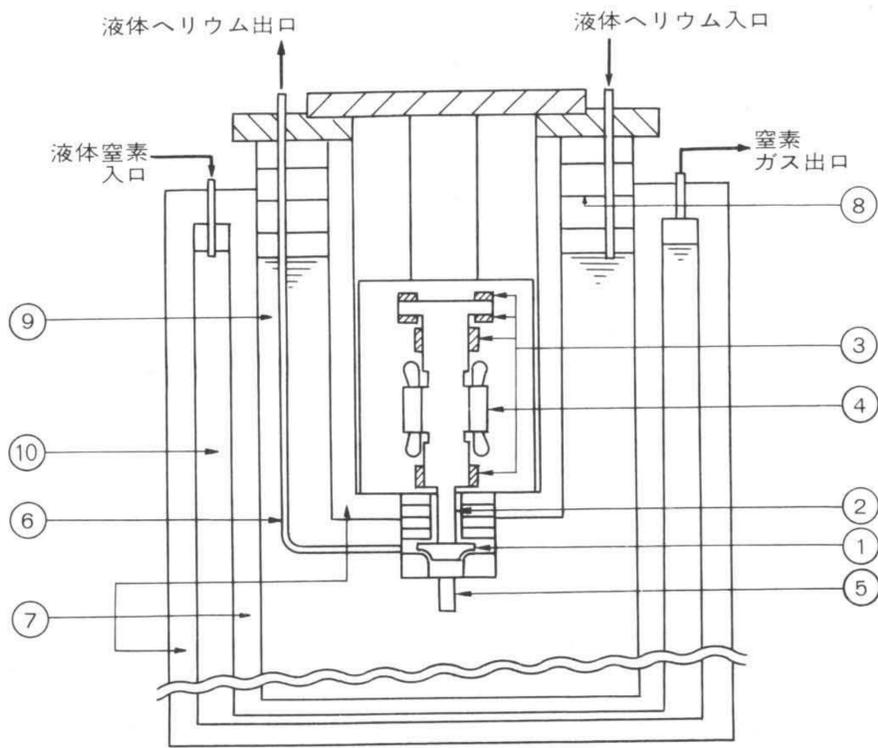
3.1 ポンプ構造

ポンプ試験装置及びポンプの断面を図3に示す。同図に示すように、ポンプ本体は、ポンプ羽根車及びシャフトで構成される回転体を、ガスベアリング(ジャーナル軸受及びスラスト軸受)で支持し、駆動は高周波電動機で、2万min⁻¹の高速回転を実現している。図4に回転体を示す。ポンプは、NPSH(Net Positive Suction Head: 正味吸込水頭)が必要で、特に液化ガスを扱う場合はそれが十分確保されねばならない。そのため本構造では、電動機、ベアリングなどの常温部を真空槽で断熱して、ポンプ本体を液体ヘリウム中に浸せきし、NPSHの確保を図っている。

表1 トランスファチューブの納入実績と仕様 現在までに納入したトランスファチューブのサイズ、全長を示したもので、長尺化していることが分かる。

納入先		日本原子力研究所				宇宙開発事業団	京都大学
適用先		JT-60 NBI 原型ユニット		JT-60 NBI 実機		タンク熱特性試験装置	ヘリオトロンE
仕様	移送流体	液体ヘリウム	液体窒素	液体窒素	液体ヘリウム	液体窒素	液体水素
	内管口径	10A~32A	15A~32A	40A~80A	10A~80A	20A~80A	15A~100A
	全長(m)	102	196	102	約531	約318	70
							液体ヘリウム
							6A~10A
							65

注:太枠囲みは、製作中



項番	名 称	項番	名 称
①	ポンプ羽根車	⑥	吐出しノズル
②	シャフト	⑦	真空槽
③	ガスベアリング	⑧	シールド板
④	高周波電動機	⑨	液体ヘリウム
⑤	吸込ノズル	⑩	液体窒素シールド

図3 ポンプ試験装置及びポンプ断面図 ポンプのガスベアリング、高周波電動機の常温部は真空槽で断熱し、液体ヘリウムへの入熱対策を行なっている。

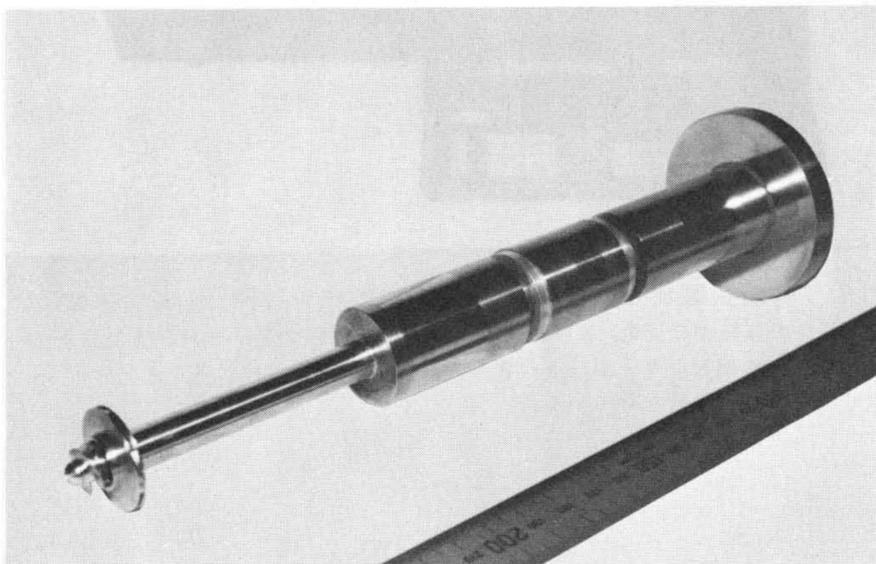


図4 液体ヘリウムポンプの回転体 左端はインデューサ、インペラが取り付けられており、中央部に駆動用のロータが組み込まれている。

3.2 ポンプの特徴

(1) 動圧ガスベアリング方式を採用

2万 min^{-1} の高速回転を支えるジャーナル及びスラストの各ベアリングに、摺動部のないヘリウムガスによる動圧ガスベアリング方式を採用したので、油潤滑方式では得られないクリーンさと、往復動式とは比較にならない長時間連続運転を可能にした。

(2) シャフトの軽量化、侵入熱の低減化（チタン合金使用）

強度を保持しながら回転質量をできる限り減らし、またシャフトからの侵入熱を抑えるため、軽くて強度があり、熱伝導率の小さいチタン合金を採用している。

(3) フルシュラウド羽根車による効率向上

フルシュラウドタイプの羽根車は、チタン合金の素材を精密加工し、最後に拡散接合ではり合わせる方法で、外形25mmという小形羽根車の製作に成功し、効率向上を図っている。

(4) 液体ヘリウムの蒸発抑止

真空壁などを採用した断熱構造にして、液体ヘリウムの蒸発を徹底して抑えている。

(5) 保守点検の確保

保守点検が容易にできるように、回転体を簡単に外部から抜き出しできる構造としている。

3.3 ポンプ仕様及び性能試験結果

開発したポンプの仕様を、表2に示す。

ポンプ完成後、液体ヘリウムを使って性能試験を実施した。図5に、性能試験結果としてポンプ特性曲線を示す。揚程0.029MPa{0.3kgf/cm²}のとき、吐出し量400l/hを得て、設計値を十分満足した。また、NPSHは-222mm、ポンプ効率(エンタルピー効率)は51.2%を得た。

信頼性確認の一つとして、液体ヘリウムを使った連続運転を実施し、安定した運転結果を得ることができた。

3.4 実績

高エネルギー物理学研究所に、昭和59年3月、ヘリウム液化冷凍機などとともに、前述の開発品と同仕様のを1台納入した。

4 自動制御

ヘリウム液化冷凍装置の起動から定常運転、停止に至るま

表2 開発したポンプ仕様 羽根車外径が25mmという小形の遠心式ポンプで、20,000 min^{-1} という高速回転で運転される。

項 目	仕 様
形 式	遠心式
流 体	液体ヘリウム
流 量	10g/s
入 口 圧 力	1 atm
入 口 温 度	4.2K
吐 出 し 圧 力	1.3atm
回 転 数	20,000 min^{-1}
羽 根 車 外 径	25mm

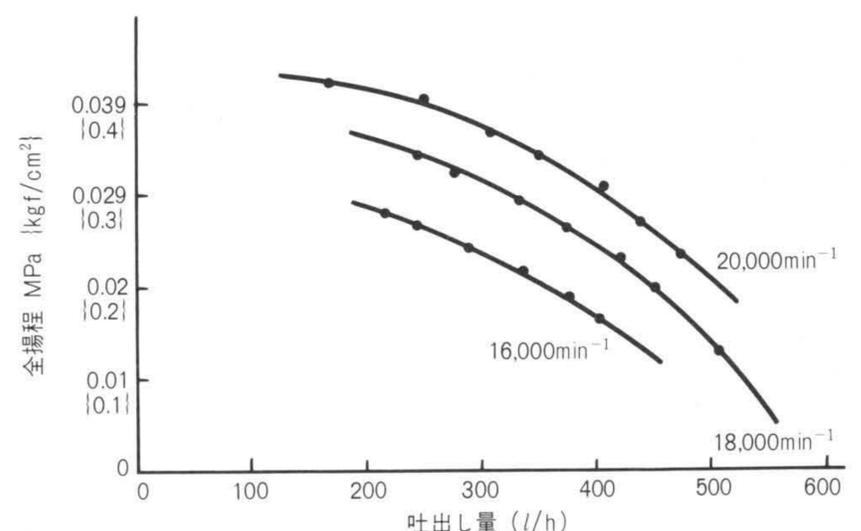


図5 ポンプ特性曲線 設計点20,000 min^{-1} 、0.029MPaで400l/hの性能を得た。ポンプの回転数はインバータにより可変となっている。

での自動制御技術は、コールドボックスについて社内試作機で開発している。これには制御装置に、16ビット分散形デジタルコントローラ「日立DSC-18」を使用し、良好な運転結果を得た³⁾。

次に、このたびヘリウム冷凍機と被冷却体としてクライオパネルを組み合わせた自動制御装置を開発し、納入した。

本自動制御装置は、京都大学ヘリオトロン核融合研究センター納めのもので、既納ヘリウム冷凍機に追加設置したものである。以下、その内容について述べる。

(1) 自動化内容

被冷却体として、3台のNBIに各々クライオパネルがあり、ヘリウム冷凍機とは途中の分配用のマニホールドを介してトランスファチューブで結ばれている。

自動化内容としては、(a)予冷及び定常運転、(b)停止運転、(c)加温運転の各運転が、スイッチをオンにすることにより自動運転できる。

各運転の中でのモード移行は、圧力、温度、膨脹タービン回転数などを検出し、定められた条件に応じて自動的に行なわれる。

このようなシーケンス制御のほかに、膨脹タービン入口圧力、各々のクライオパネルの液体ヘリウムの液面高さを一定に保つためのフィードバック制御も行なっている。

なお、膨脹タービンなどの装置異常のときは、自動的に停止運転に移行するシステムとしている。

(2) 特徴

- (a) CRTによる集中管理操作を行なっている。
- (b) 運転中のスイッチ操作などを大幅に減らすことができた。
- (c) 熟練運転員を必要とせず、いつも安定した運転が得られる(予冷時間の短縮など)。
- (d) 異常検出時には、まず異常回復の処置を行ない、更に異常が進行した場合だけ装置を停止することにより、機器の保護とともに、安定した運転の継続が可能となった。

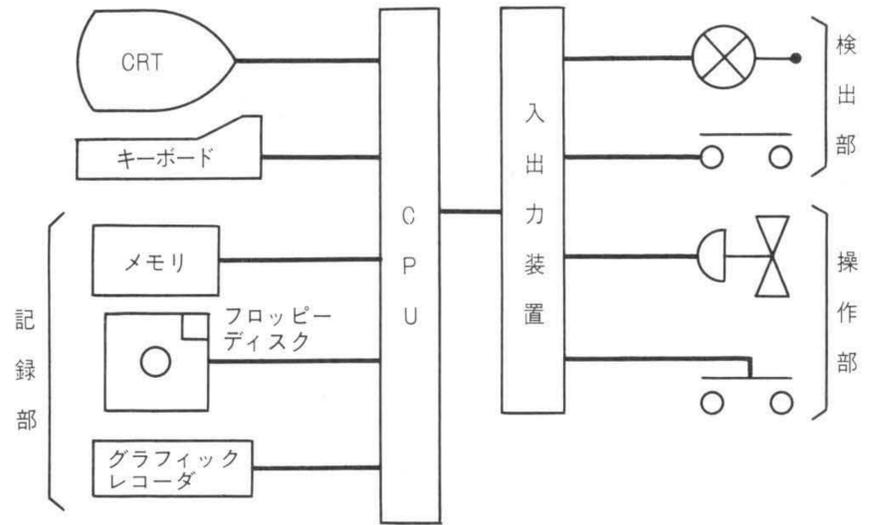
(3) 制御装置仕様

制御装置は、検出部、操作部、入出力装置、CPU(中央処理装置)、CRT(Cathode Ray Tube)及び記録部から構成される。図6にシステム構成図を示す。これには、16ビットデジタル制御システム「日立ユニテロールEX-S」を採用した。

図7に、オペレータコンソールの外観を示す。

5 結 言

以上、トランスファチューブ、液体ヘリウムポンプ及び自動制御装置の開発状況について述べたが、今後、被冷却体の超電導マグネット、クライオポンプなどがますます大形化し、それに対応した液体ヘリウムの効率のよい供給、移送の技術を今以上に求められると考えるので、更に開発を進めたいと考える。また、自動制御の技術は、ユーザー側の要求により、今後はどの装置にも標準として設置するようになると思われるので、いっそう質の高い自動化研究を進めたい。



注：略語説明 CRT(Cathode Ray Tube)
CPU(中央処理装置)

図6 自動制御装置のシステム構成図 装置各所の圧力、温度などの入力データをCPUで処理し、プログラムに応じた出力を操作部の自動弁などに送り、制御を行なっている。入力データなどは任意時間ごとに記録できる。

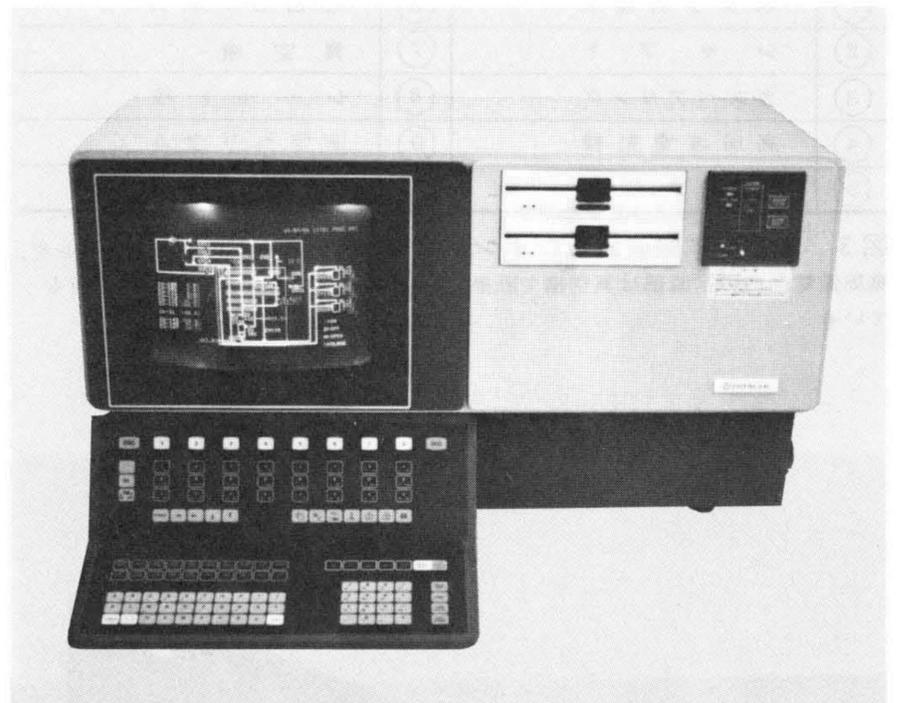


図7 自動制御装置のオペレータコンソール外観 He 冷凍機及び被冷却体の運転中の圧力、温度、システムフローのグラフィック表示ができる。また装置への指令はキーボードによりできる。このオペレータコンソールで、運転の集中管理を行なっている。

参考文献

- 1) 松本, 外: 膨脹タービン式大形ヘリウム液化装置, 日立評論, 52, 9, 781~784 (昭45-9)
- 2) 蜂谷, 外: 核融合用ヘリウム液化冷凍装置の開発, 日立評論, 62, 5, 387~390 (昭55-5)
- 3) 栗田, 外: 日立ヘリウム液化冷凍装置の開発, 日立評論, 65, 7, 499~502 (昭58-7)