

日立ヘリウム液化冷凍装置の開発

Development of Hitachi Helium Liquefiers and Refrigerators

近年、超電導マグネット、クライオポンプなどの極低温応用技術の進歩には目覚ましいものがある。

日立製作所では、早くから膨脹タービン式大型ヘリウム液化冷凍装置の開発を進め、昭和43年に国内で初めて開発に成功した。その後、信頼性、運転操作性向上などの研究開発を引き続き進め、性能が優れ、コンパクトで、長時間連続運転が可能な信頼性のある2号機を昭和54年に開発した。

現在までに、自社研究所、京都大学及び日本原子力研究所に相次いで納入し、順調に稼動している。

また、液体ヘリウムなどを移送するトランスファーチューブの開発を進め、ヘリウム液化冷凍装置の大型化に十分対応してトランスファーチューブも大型化、長大化ができる技術を確立した。

本稿は、納入品の仕様及び性能、トランスファーチューブの開発などについて述べる。

栗田義久* Yoshihisa Awada
高田 忠* Tadashi Takata
村上 聖* Sei Murakami
林 憲治* Kenji Hayashi
吉川精一** Seiichi Kikkawa

1 緒 言

極低温領域の技術は、核融合、浮上式鉄道、超電導電動機、超電導送電、ジョセフソン素子、医学用NMR(Nuclear Magnetic Resonance)など先端技術分野で応用研究が行なわれ、ヘリウム液化冷凍装置がこれからの工業に不可欠なものとなってきた。

日立製作所では、ヘリウム液化冷凍装置の1号機を昭和43年に開発したが、その後更に研究開発を進め、昭和54年に、性能が優れ、コンパクトで信頼性のある液化能力100l/h、冷凍能力4.5Kで300Wのヘリウム液化冷凍装置2号機を開発した。本装置には、起動から運転、停止に至る自動制御装置が取り付けられ、現在も自社工場内で研究開発のため使用されている。

超電導マグネット、クライオポンプなどの被冷却体の大型化に伴い、液体ヘリウム、極低温ヘリウムガスを移送するトランスファーチューブも大型化、長大化し、侵入熱が増加するためその性能が特に重要になってきた。そのためトランス

ファーチューブの研究開発も進め、日本原子力研究所納めのヘリウム冷凍装置のシステム構成品として、最初の製品を納入した。

以上の研究開発の成果をもとに、自社研究所に液化装置を、京都大学及び日本原子力研究所には中性粒子入射装置用クライオポンプシステムの専用ヘリウム冷凍装置を相次いで納入し、計画どおりの性能を発揮し現在順調に稼動している。

本報告では、納入品仕様、トランスファーチューブ及び自動制御技術の開発、核融合用ヘリウム冷凍装置の性能について述べる。

2 ヘリウム液化冷凍装置の仕様

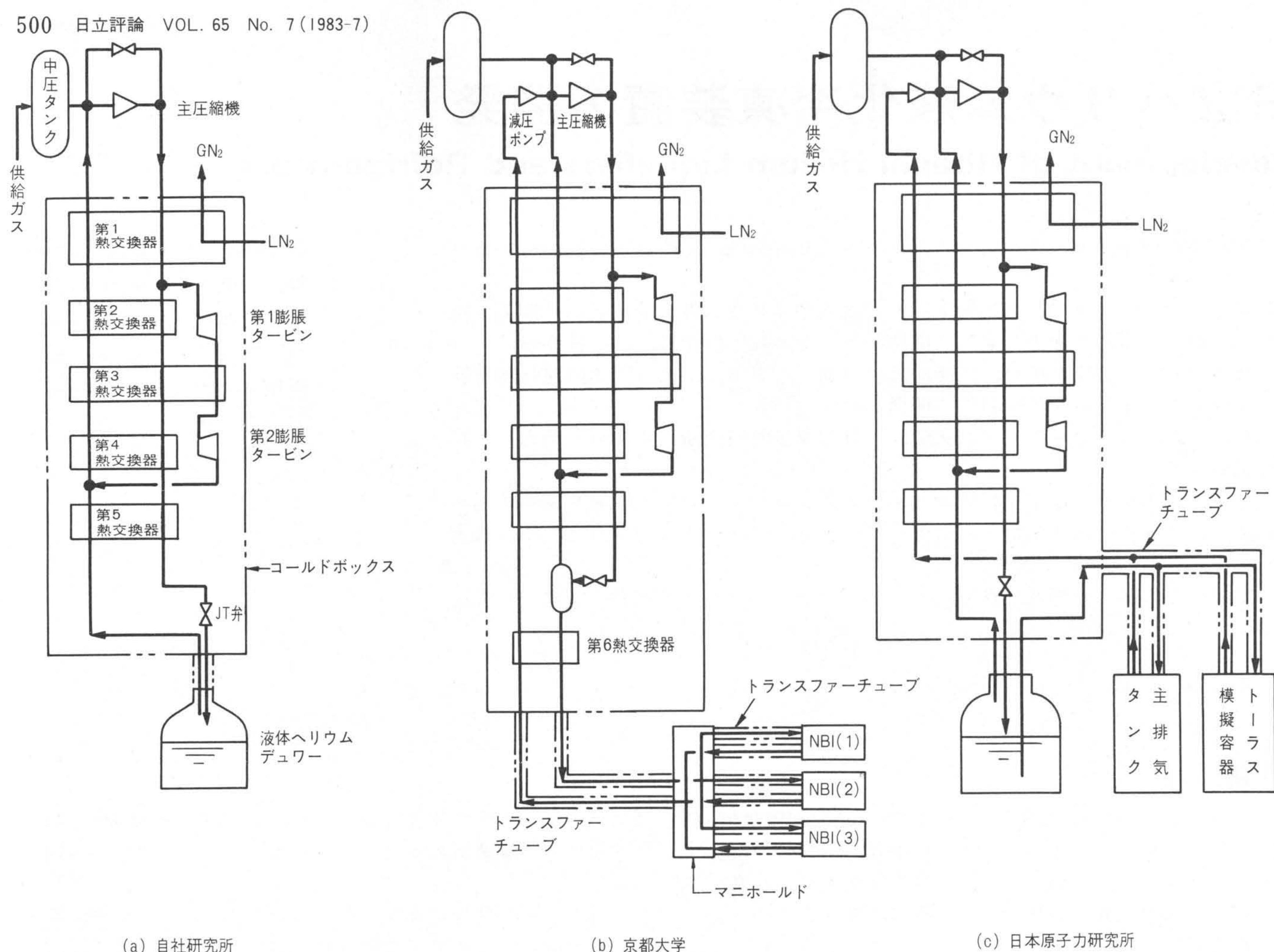
自社研究所、京都大学及び日本原子力研究所へ納入したヘリウム液化冷凍装置について、その仕様を表1に、また、コールドボックス及び被冷却体周りのフローを図1に示す。

以下、その内容について述べる。

表1 ヘリウム液化冷凍装置の仕様 自社研究所、京都大学、日本原子力研究所納めの装置仕様を示す。

項 目		自 社 研 究 所	京 都 大 学	日本原子力研究所
装 置 能 力	液 化 能 力 (l/h)	100	—	—
	冷 凍 能 力 (W)	300	100	300
	冷 凍 温 度 (K)	4.5	3.5	3.7
コ ー ル ド ボ ッ ク ス	形 式	真空断熱縦形	真空断熱縦形	真空断熱縦形
	熱 交 換 器	アルミプレートフィン式	アルミプレートフィン式	アルミプレートフィン式
	膨 脹 タ ー ビ ン	動圧気体軸受ファン制動式	動圧気体軸受ファン制動式	動圧気体軸受ファン制動式
液体ヘリウムデュワー	容 量 (l)	2,000	—	1,000
	蒸 発 率 (%/d)	1.0	—	1.0
主 圧 縮 機	形 式	油潤滑スクリー式	油潤滑スクリー式	油潤滑スクリー式
	電 動 機 (kW)	240	120	270
減 圧 ポ ン プ	形 式	—	油潤滑スクリー式	油潤滑スクリー式
	電 動 機 (kW)	—	15	45
トランスファーチューブ	液 体 ヘ リ ウ ム 用 (m)	5.5	71	102
	液 体 窒 素 用 (m)	—	—	196

* 日立製作所笠戸工場 ** 日立製作所機械研究所



注：略語説明 GN₂(窒素ガス)，LN₂(液体窒素)，NBI(中性粒子入射装置)

図1 ヘリウム液化冷凍装置のフロー コールドボックス及び被冷却体周りのフローを示したものである。

2.1 自社研究所用ヘリウム液化装置

超電導マグネットは、核融合装置用などでは大型化の傾向にあり、実験規模も大きくなってきたため、これに対応するように本装置を昭和55年10月に完成したものである。

本装置は液化能力100l/hをもち、図1(a)に示すように液体ヘリウムデューワーに液体ヘリウムの採取を行なう液化装置である。

また、本装置は超電導マグネットなどの被冷却体と直結して冷凍運転が可能な仕様となっており、4.5Kで冷凍能力300Wを出力できる。

2.2 京都大学納め3.5K冷凍装置

核融合装置「ヘリオトロンE」用NBI(中性粒子入射装置)のクライオポンプシステムに直結した専用冷凍装置として、本装置を昭和56年4月に納入した。

本装置とNBI3台の間は、図1(b)に示すようにマニホールドで分配し往復別々のトランスファーチューブ8本で結び、NBIへ液体ヘリウムを供給し、低温ガスをコールドボックスへ回収している。トランスファーチューブ8本は、すべてLN₂シールド付で、両端にバイオネット継手を設けた取外しのできる構造とし、延長71mである。

クライオポンプは3.5Kの温度を得るため、液体ヘリウム圧力を0.46atmの負圧まで減圧した。そのため、コールドボックス内の熱交換器には減圧ラインが追加され、負圧維持のための減圧ポンプを設置した国内初のヘリウム冷凍装置である。

2.3 日本原子力研究所納め3.7K冷凍装置

大型核融合装置「臨界プラズマ試験装置“JT-60”」の建設が日本原子力研究所によって進められている。このJT-60NBI原型ユニット排気系に使用される3.7K冷凍装置を昭和56年11月に納入した。

原型ユニット排気系の主排気タンク及びトーラス模擬容器のクライオポンプシステムに3.7Kの液体ヘリウムを供給する専用冷凍装置である。そのため本装置では、京都大学納め冷凍装置と同じように減圧ポンプを備え、クライオポンプ内の圧力を0.58atmまで減圧し、3.7Kの温度を発生させる。冷凍能力は、3.7Kで300Wという国内最大のものである。図1(c)にフローを示した。

冷凍装置と主排気タンク及びトーラス模擬容器の間は自社製のトランスファーチューブを採用した。このトランスファーチューブはLN₂シールド付で二重管タイプと三重管タイプを有機的に組み合わせた延長102mのものである。二重管タイプは、液体ヘリウム又は低温ヘリウムガスだけが流れる。三重管タイプは中心に液体ヘリウムを、その外側の同心管に低温ヘリウムガスを流す。工場内でできるだけプレハブを行ない、現地溶接部を最小限にした。また工場出荷前には、液体窒素及び液体ヘリウムによる性能試験を行ない、性能の見通しを得た上で現地へ搬入した。

液体窒素貯槽から冷凍装置、主排気タンク及びトーラス模擬容器への液体窒素供給配管に、二重管タイプの延長196mの

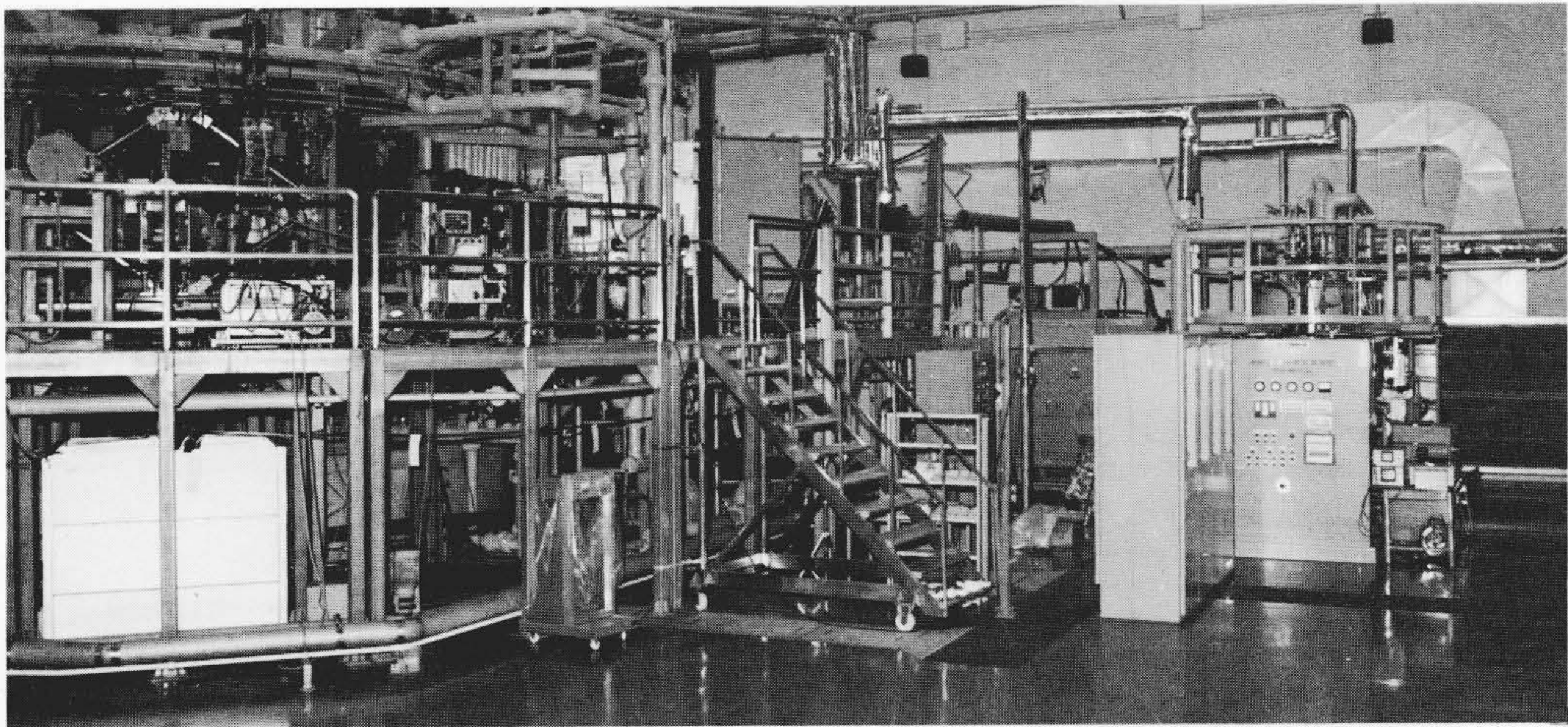


図2 「ヘリオトロンE」用装置の外観 ヘリウム冷凍機(写真右)は、「ヘリオトロンE」(写真左)用NBIとトランスファーチューブで接続される。

トランスファーチューブを採用した。

3 核融合用装置の性能

核融合用装置としては、NBI内のクライオポンプ冷却用として京都大学納め「ヘリオトロンE」用装置及び日本原子力研究所納め「JT-60 NBI原型ユニット」用装置の2基を納入し、現在順調に稼動中である。

これらの装置は、コールドボックスとクライオポンプをトランスファーチューブで結んだ直結冷凍装置であり、クライオポンプからの低温戻りガスをコールドボックス内へ導き、寒冷を回収することによって効率的な冷却が可能である。また、トランスファーチューブが長大となり、そこでの侵入熱が装置の冷凍能力に大きく影響するため、トランスファーチューブの断熱性能が重要になる。

以下に両装置の性能について述べる。

3.1 「ヘリオトロンE」用装置

「ヘリオトロンE」用装置は3基のNBI内のクライオポンプを冷却するための装置である。図2に本装置の外観を示す。装置の性能は表2に示すように、トランスファーチューブを除き計画仕様を満足していることが確認された。

3.2 「JT-60NBI原型ユニット」用装置

「JT-60NBI原型ユニット」では、NBI1基のほかにトラス模擬容器内にもクライオポンプが設置されており、本装置で両方のクライオポンプを冷却する。図3に本装置の外観を示す。本装置ではトランスファーチューブを自社製とし、表3に示すように装置性能はすべて計画仕様を満足することが確認された。

4 トランスファーチューブの開発

冷凍装置と被冷却体がトランスファーチューブによって直結された大型装置になると、トランスファーチューブの断熱性能が非常に重要になってくる。そのため、トランスファーチューブ単体でも断熱性能を保証できるものを目指し開発を進めてきた。

今回、開発し実用化した大型トランスファーチューブの一例を図4に示す。真空層内の内管外周に装着した積層断熱材により断熱を行なうが、特に高性能を要する場合は、液体窒素によるシールド構造を併用する。

積層断熱材はアルミニウム蒸着ポリエステルフィルムとポリエステルネットを交互に積層して使用する。日立製作所ではフィルムに特殊加工を施し、断熱性能の向上を図っている。

断熱性能を把握する上で重要なもう一つの要因が内管サポ

表2 「ヘリオトロンE」用装置の性能 トランスファーチューブは計画値よりも侵入熱が大きい、装置全体としての冷凍能力は計画値を満足している。

項 目	性 能	
	計 画 値	実 測 値
冷 凍 温 度	3.5K	3.5K
冷 凍 能 力	100W	106.6W
トランスファーチューブ侵入熱	52W	64W

表3 「JT-60NBI原型ユニット」用装置の性能 トランスファーチューブを含め、すべて計画仕様を満足している。

項 目	性 能	
	計 画 値	実 測 値
冷 凍 温 度	3.7K	3.7K
冷 凍 能 力	300W	301W*
トランスファーチューブ侵入熱	130W	120W*

注：*は文献5)による。

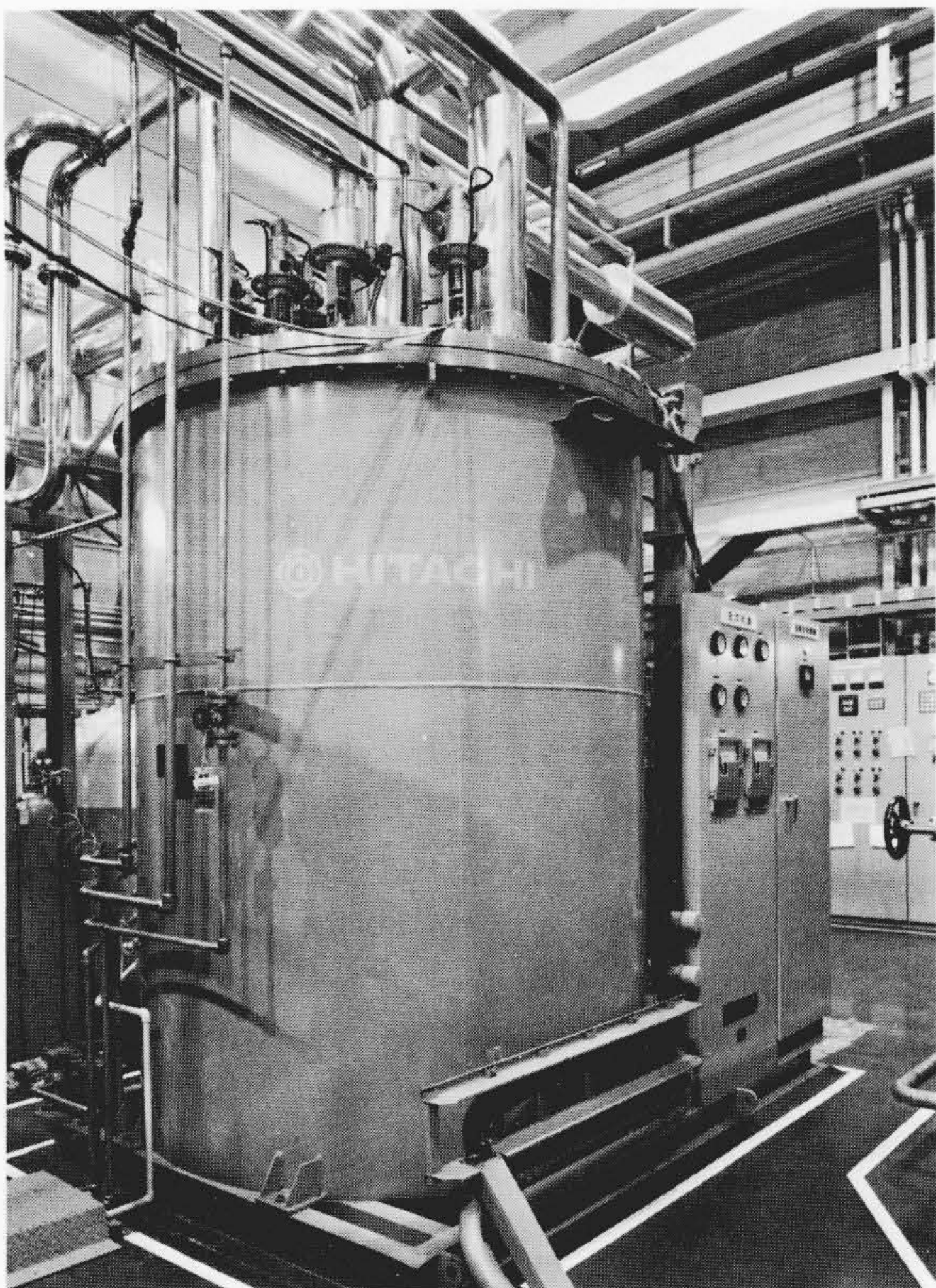


図3 「JT-60NBI原型ユニット」用装置の外観 自社製トランスファーチューブを用いて、ヘリウム冷凍機頂部から液体ヘリウムを送出する。

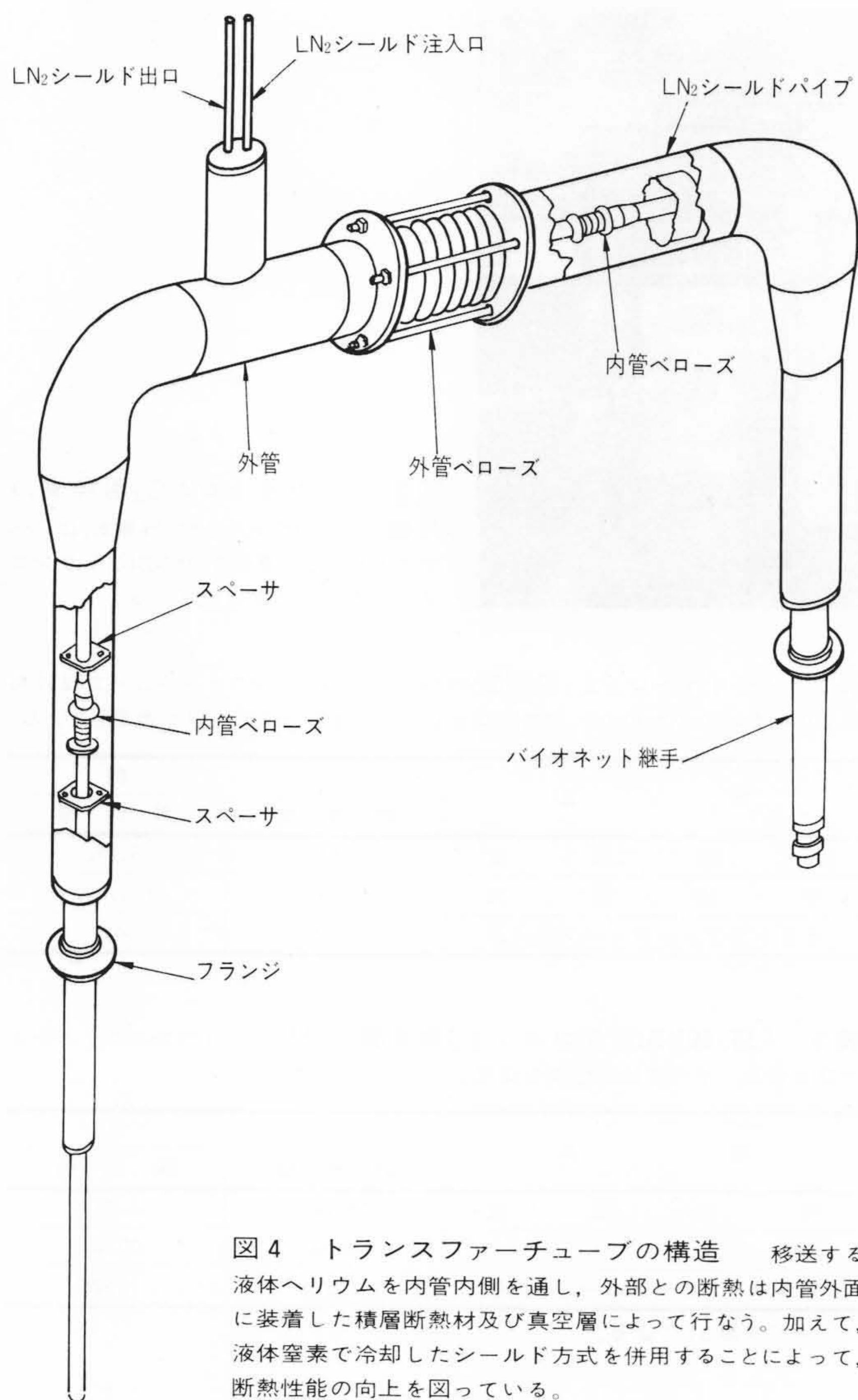


図4 トランスファーチューブの構造 移送する液体ヘリウムを内管内側を通し、外部との断熱は内管外側に装着した積層断熱材及び真空層によって行なう。加えて、液体窒素で冷却したシールド方式を併用することによって、断熱性能の向上を図っている。

ート(以下、スペーサという。)である。このスペーサは、内管を外管に対して同心状に保持する部材のため、4.2Kの内管と約300Kの外管が短絡されることになり、伝導侵入熱が生じる。そこで要素試験などを行ない、FRP(ガラス繊維強化プラスチック)製ロッド型スペーサを開発し、また新開発の装着方式により、従来の板状スペーサの侵入熱量の $\frac{1}{2.5}$ に低減できた。

これらの主要要因と更に継手、弁などの付帯構成部材の断熱性能をも加味したトランスファーチューブの総合的な設計法を確立し、実機によってその性能を確認した。

5 ヘリウム液化冷凍装置の自動化

ヘリウム液化冷凍装置の起動から定常運転、停止に至るまでの自動制御技術を開発し、良好な運転結果を得た。

制御装置は16ビット分散形デジタルコントローラ「日立DSC-18」を使用した。

自動運転は起動ボタンを押すと開始され、膨脹タービン起動操作及び装置内各部温度に応じた弁類の切換えを行ない、定常運転まで自動的に進行する。また、停止のため停止ボタンを押した場合及び異常時の自動停止の場合は、膨脹タービン停止操作から常温までの加温運転を自動的行なう。

以上のシーケンス制御のほかに、起動及び定常運転中、並びに膨脹タービン入口圧力、膨脹タービン回転数及び気液分離器液面をそれぞれ一定に保つPID(比例、積分、微分)制御を行なっている。

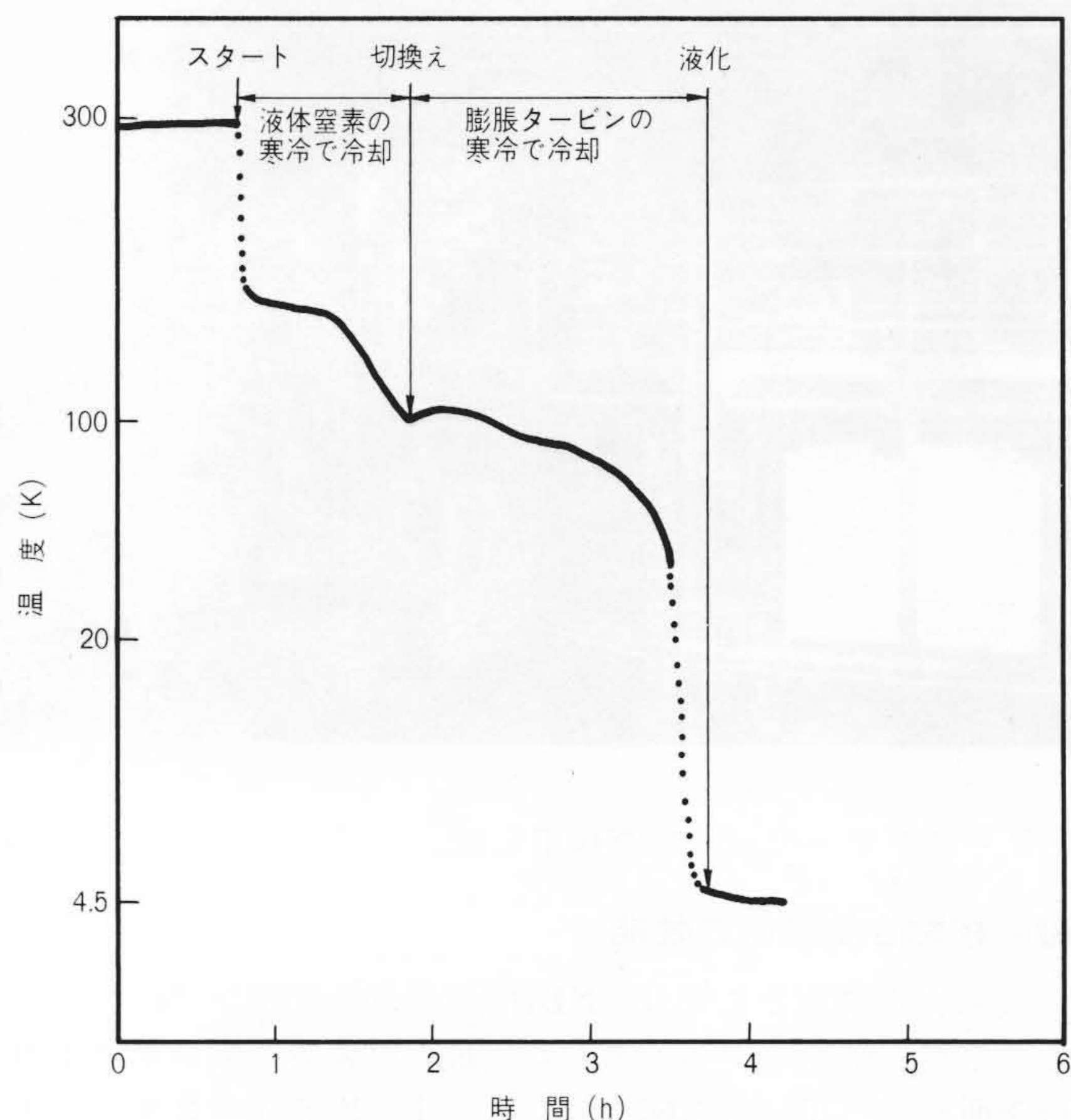


図5 ヘリウム液化冷凍装置予冷状況(JT弁出口温度) 自動運転により約3時間で液化が始まっている。

装置異常の判断は主に膨脹タービン周りの温度、圧力、回転数などを監視することによって自動的行なっている。

本自動化により複雑な運転操作を簡略化することはもとより、起動から定常運転まで常に膨脹タービン入口圧力を最適値に保ち、タービン回転数を定格回転数に保持できるため、タービン効率が向上し、予冷時間の短縮、原単位の低減に寄与することができる。また、異常時に自動停止することによって、膨脹タービンを保護することができる。

図5に本自動制御装置を用いて、ヘリウム液化冷凍装置を運転した場合の予冷状況を示す。

6 結 言

以上、日立製作所のヘリウム液化冷凍装置の最近の開発状況、及び核融合用ヘリウム冷凍装置の実績について述べた。

今後、加速器、核融合用などのマグネットの超電導化が進むにつれ、数千リットル毎時間以上の大型ヘリウム液化冷凍装置も必要になってくるものと思われる。この大型化に対応した要素機器の開発とともに、全体効率の向上、被冷却体を含めた運転の自動化などの研究開発を更に進めながら、製品の信頼性を高めてゆく考えである。

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) 宇尾, 外: 核融合装置「ヘリオトロンE」用中性粒子入射装置, 日立評論, 64, 2, 119~124(昭57-2)
- 4) N. Hosomi, et al.: Cryogenic System for Heliotron E NBI, ICEC-9, 251~254(1982)
- 5) T. Shibata, et al.: Cryopumps and Cryogenic Systems of Prototype Injector Unit for JT-60, ICEC-9, 612~615(1982)