

核融合用ヘリウム液化冷凍装置の開発

Development of Helium Liquefiers and Refrigerators for Nuclear Fusions

将来の核融合炉の実用化に必要な超電導コイルに関する技術を実現させるには、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。

このたび日立製作所では、核融合用超電導の実験に適用できるヘリウム液化冷凍装置として、液化能力100 l/h、冷凍能力4.5Kで300Wのものを開発した。

この装置の開発に当たり、膨張タービンはガス軸受を使用し、回転を23万rpmにして、拡散接合式フルシュラウドロータの採用により高効率で小形化した。また、コールドボックス内の熱交換器は、アルミプレートフィン式により容積を小さくし、圧縮機は回転スクリー式で長時間連続運転を可能とした。更に、起動から運転、停止を自動化するマイクロコンピュータ応用装置を開発した。以上の内容と、核融合用ヘリウム液化冷凍装置の運転実績について述べる。

蜂谷昌彦* Masahiko Hachiya
 栗田義久* Yoshihisa Awata
 吉川精一** Seiichi Kikkawa
 田中勝之** Katsuyuki Tanaka
 松本孝三*** Kôzô Matsumoto

1 緒言

最近、核融合、浮上式鉄道、MHD発電(Magnetohydrodynamics:磁気流体発電)などへの応用に、極低温で実現できる超電導コイルに関する技術の研究開発が進められており、極低温を作り出す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、ヘリウム液化冷凍機の1号機を昭和43年に開発したが、その後、核融合用超電導試験には、より信頼性が高く、運転操作が容易なことが要求され、引き続き研究開発を進めてきた。その結果、このたび開発したヘリウム液化冷凍装置は、性能が優れコンパクトで、核融合用超電導試験に十分適合できる運転性能と信頼性をもっていることが確認できた。また要求に応じて、起動から冷却を経て定常運転に入り停止に至る自動装置も完成した。以下にこれらの内容について記述する。

2 ヘリウム液化冷凍装置の仕様及び構成

2.1 ヘリウム液化冷凍装置の仕様

このたび開発したヘリウム液化冷凍装置の仕様は、表1に示すとおりである。

2.2 ヘリウム液化冷凍装置の構成

ヘリウム液化冷凍装置は、図1の構成図に示すように、ヘ

表1 ヘリウム液化冷凍機の主な仕様 開発したヘリウム液化冷凍機の能力及び主要機器の仕様を示す。

項目	仕様
液化方式	クロードサイクル
液化能力(LN ₂ 使用時)	100l/h
冷凍能力(LN ₂ 使用時)	300W(at 4.5K)
圧縮機	油潤滑スクリー2段
膨張タービン	動圧気体軸受ファン制動式
熱交換器	アルミプレートフィン式

注: LN₂(液体窒素)

リウム液化冷凍機、回収精製装置、被冷却体及び液体ヘリウム容器で構成される。ここでは、ヘリウム液化冷凍機、回収精製装置について述べる。

2.2.1 ヘリウム液化冷凍機

ヘリウム液化冷凍機は、図2に示すように、膨張タービン、熱交換器、弁、配管などを収容したコールドボックスと、循環圧縮機で構成される。

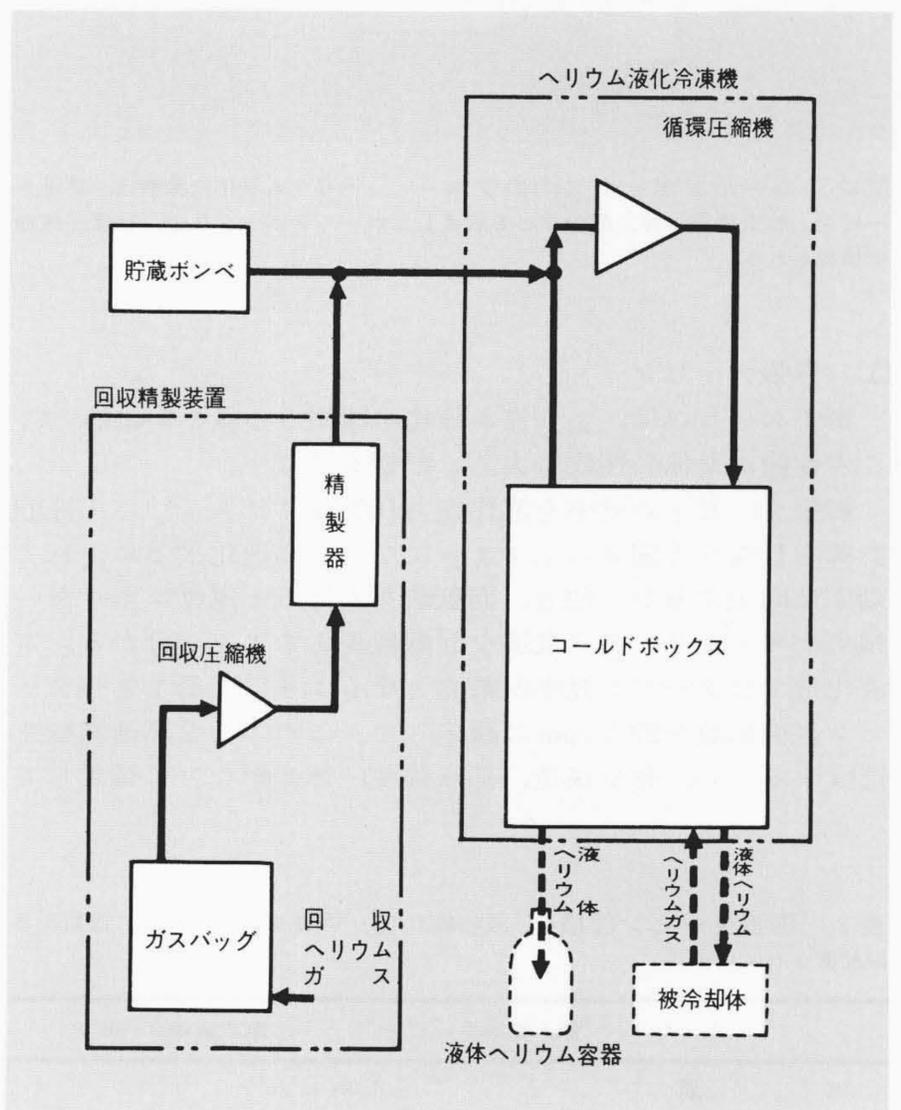


図1 ヘリウム液化冷凍装置構成図 ヘリウム液化冷凍装置は、ヘリウム液化冷凍機、回収精製装置、被冷却体及び液体ヘリウム容器で構成される。

* 日立製作所笠戸工場 ** 日立製作所機械研究所 *** 日立製作所機電事業本部

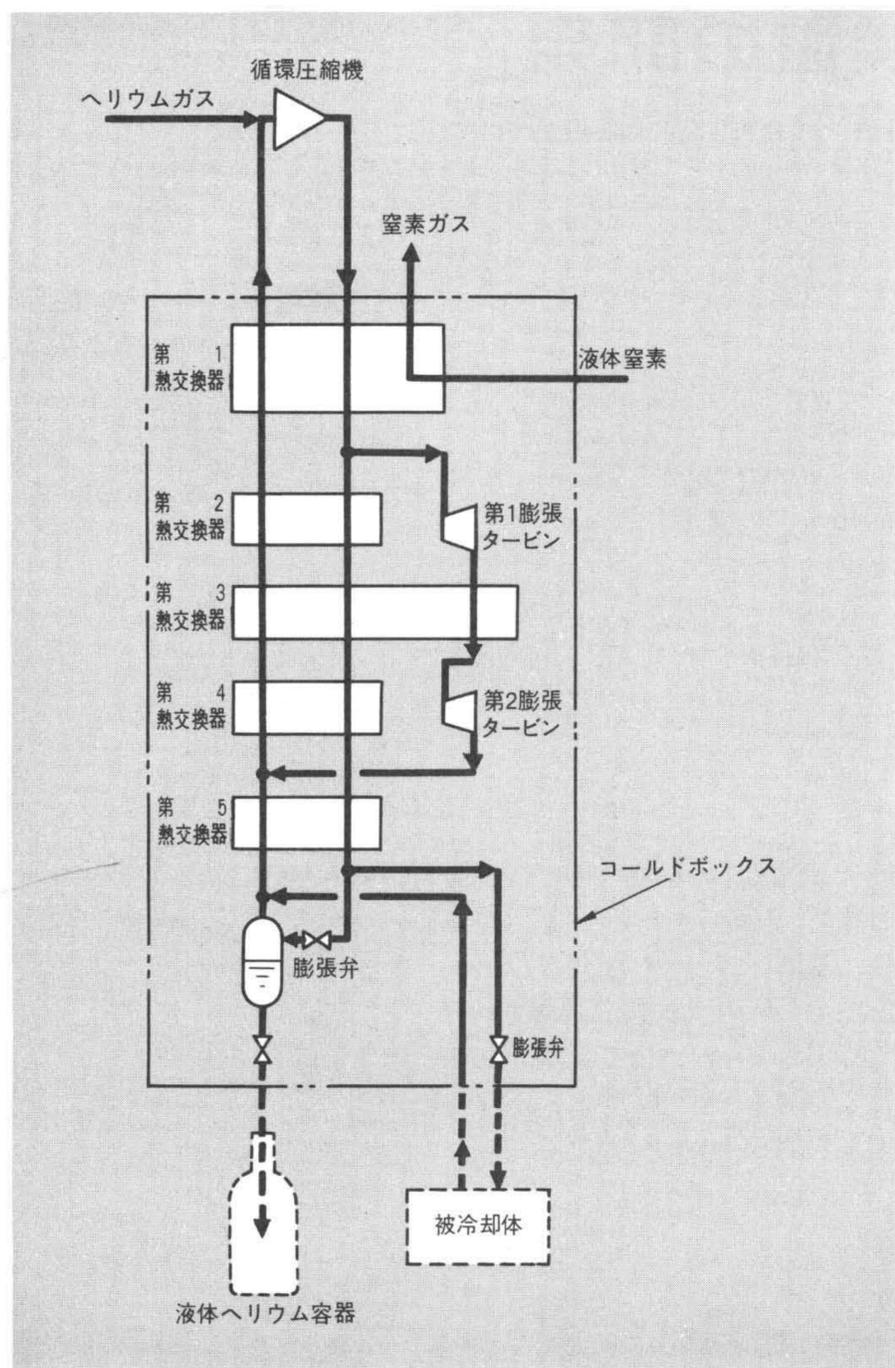


図2 コールドボックス内のフロー ヘリウム液化冷凍機は、膨張タービン、熱交換器、弁、配管などを収容したコールドボックスと、循環圧縮機で構成される。

(1) 膨張タービン

膨張タービンは、ヘリウム液化冷凍機の心臓となるもので、この性能が全体の性能に大きく影響を及ぼす。

膨張タービンの効率を液化能力100 l/hクラスについて性能計算を行なうと図3に示すようになる。高速化するにつれて効率は向上するが、他方、回転数を上げると運動エネルギー損失が多くなり、ある最適な回転数があることが分かる。本液化機ではタービン効率が最高となるように、第1膨張タービンの回転数を23万rpmに設定した。このような高速回転を達成するため、軸受構造、回転強度、熱変形などに留意して

表2 膨張タービン仕様 液化能力100 l/h用膨張タービンは、直列に2段配置されている。

	第1膨張タービン	第2膨張タービン
流量	850N・m ³ /h	
入口圧力	16atm	6 atm
入口温度	40K	15K
出口圧力	6 atm	1.2atm
回転数	230,000rpm	163,000rpm

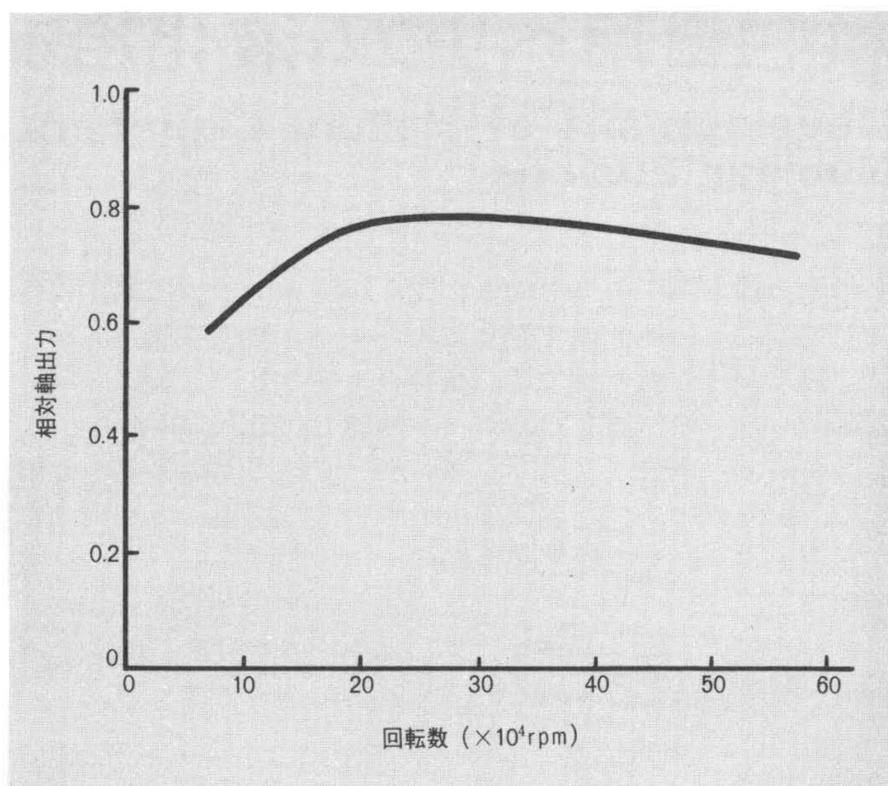


図3 回転数とタービン効率 液化能力100 l/hクラスの膨張タービン効率は、20万~30万rpm(計算値)当たりが最高効率となっている。

膨張タービンの設計を行なった。膨張タービンの主な仕様を表2に、全体構造を図4に示す。

以下、本膨張タービンの特長について述べる。

(a) 動圧気体軸受

一般に、気体軸受は軸受損失が少なく、極低温でもプロセスガス(ヘリウムガス)を潤滑剤として、高速回転が可能である。数多い気体軸受式膨張タービンの製作経験から、ジャーナル軸受は、高速安定性に優れたティルティングパッド式動圧気体軸受を開発した。これは、外部から加圧軸受ガスを供給しなくても、気体の粘性を利用して気体膜上に回転体を支持するものである。スラスト軸受は、羽根車の前後の圧力差により生ずるスラスト力を受けるため、静圧軸受を採用した。図5に膨張タービン回転体及びジャーナル軸受パッドを示す。

(b) 拡散接合フルシュラウド形羽根車

ヘリウムガス中の熱エネルギーを機械エネルギーに変換する羽根車は、単段熱落差を大きくとれるラジアル形を採用した。また、膨張タービン効率の向上とスラスト荷重低減のために、フルシュラウド形とした。羽根車材料は、比強度の高いチタン合金を使用している。シュラウドの接合には、接合強度の強い拡散接合(接合すべき二部材を真空中で加圧、加熱して接合する方法)を採用した。この方法により、接合面は母材とほぼ同等の強度を確保できた。

(c) ファン制動式動力吸収

膨張タービンで発生した機械エネルギーを吸収する方法として、発電機制動、ファン駆動による制動及び油ポンプ駆動による制動などが考えられるが、本膨張タービンでは小形・高速で、かつ吸収動力を大きくとれるものとして、遠心ファンによる動力吸収方式を採用した。吸収動力の大きさは、ファン入口側の弁を開閉して調節している。ファン羽根車形状は、弁開度が20~100%の範囲でサージングが生じないようにした。

(2) コールドボックス

コールドボックス内のフローは、図2に示したが、その外観を図6に示す。熱交換器は、容積当たりの伝熱面積が大きい

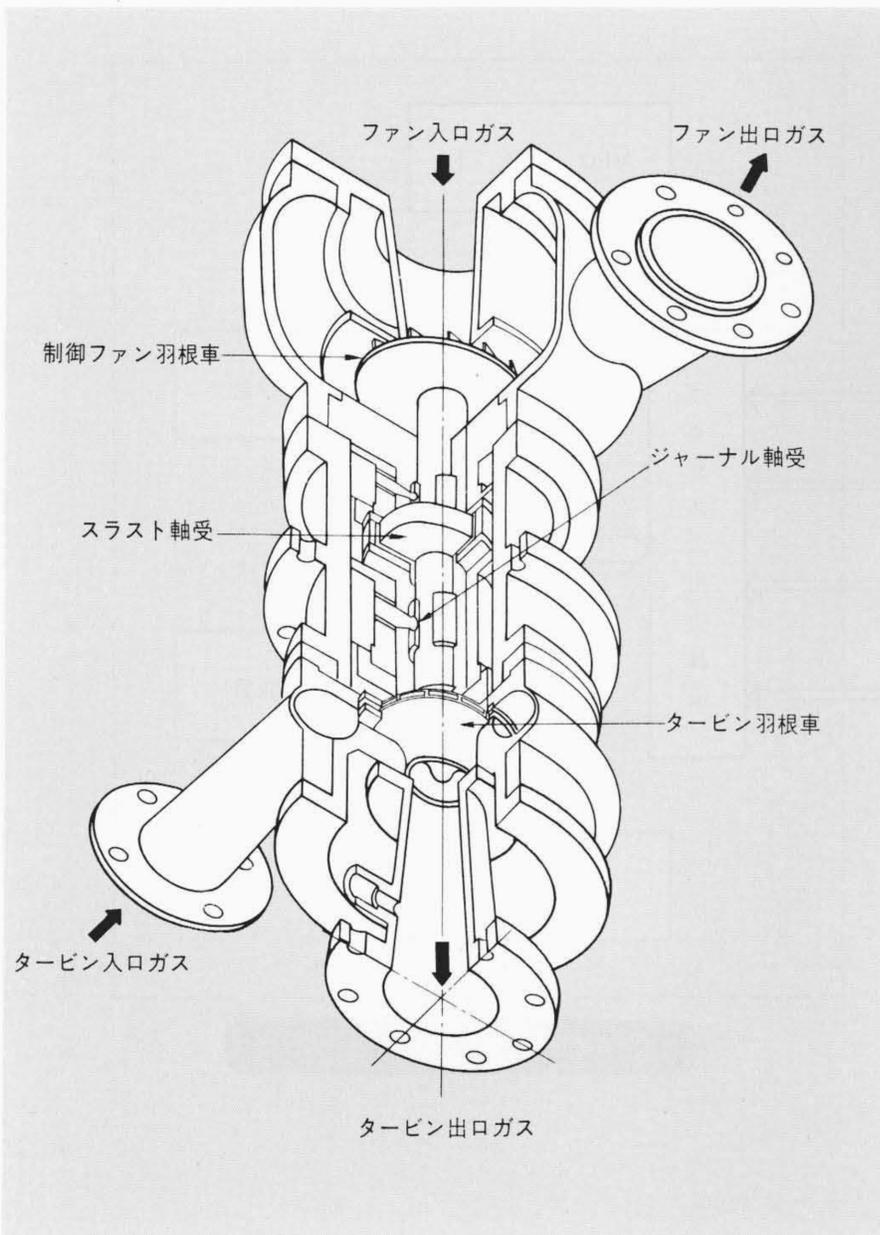


図4 膨胀タービン構造図 膨胀タービンの断面構造を示す。

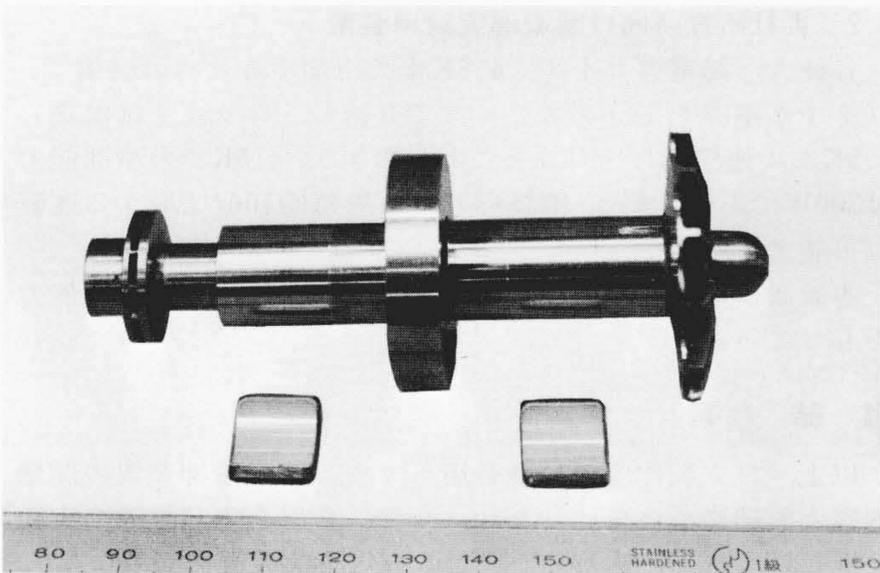


図5 膨胀タービン回転体及びジャーナル軸受パッド 回転体は、中央にスラストカラー設置したシャフト、タービン羽根車及びファン羽根車で構成される。

いアルミプレートフィン式熱交換器を採用して小形化を図っている。膨胀タービンは、前述の動圧気体軸受式を採用し、機構の簡素化を図り信頼性を高めている。熱交換器、膨胀タービン、配管、弁などを収容する容器は、高真空容器を使用し寒冷損失の低減を図った。

(3) 循環圧縮機

圧縮機は、油潤滑式スクルー圧縮機を採用した。プロセスガス中の油分除去のため、油除去器を4段設置し0.1ppm以下まで除去している。

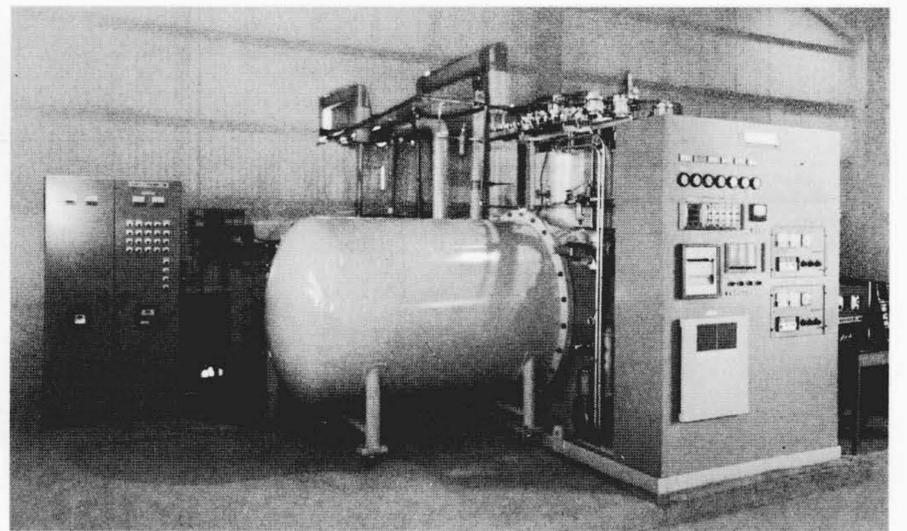


図6 コールドボックス外観 操作盤及びコールドボックスの真空引き装置を同一スキッドにまとめ、コンパクト化を図っている。

2.2.2 回収精製装置

ヘリウムガスは、循環使用している間に空気混入などにより純度低下のおそれがあるため精製を行ない、純度を99.995 vol%以上に上げ、再使用する。この精製のために回収精製装置が必要となる。本装置は、ガスバッグ、回収圧縮機、精製器及び貯蔵ボンベで構成している。循環使用し、精製の必要なヘリウムガスは、回収圧縮機でゲージ圧力150kg/cm²まで昇圧し、低温活性炭吸着式の精製器で高純度に精製した。

3 ヘリウム液化冷凍装置の運転性能

3.1 運転性能

核融合用の超電導コイルの冷却方法として現在考えられる方法は、液体ヘリウムへの浸せき冷却、超臨界圧ヘリウムによる強制冷却などがある。冷凍機側への要求は液体ヘリウム、あるいは超臨界圧ヘリウムの定常的な生成であるが、ここでは、本開発の液化冷凍機による運転の難しい前者の液化運転、及び液体ヘリウムの蒸発潜熱を利用する冷凍運転の性能試験の結果について述べる。表3に液化及び冷凍運転の性能を示した。膨胀タービンは設計値に近い回転数で安定な運転を行ない、液化量110l/h、冷凍能力300Wという期待どおりの性能を得た。本開発装置の現在の冷凍運転でのカルノー効率率は約10%であるが、現在進めている効率化により14%程度までの効率向上は可能である。

超電導コイルの初期冷却では、冷凍機としては負荷に応じて供給ヘリウムの温度を常温から所定の冷却速度で10Kまで

表3 運転性能 今回開発したヘリウム液化冷凍機は、設計条件に近い運転条件で所期の性能を挙げている。

項	目	液化運転	冷凍運転
液	化	110l/h	—
冷	凍	—	300W
所	要	3h	3h
第1膨胀タービン	回転数	210,000rpm	217,000rpm
	効率	77%	78%
第2膨胀タービン	回転数	168,000rpm	163,000rpm
	効率	73%	72%

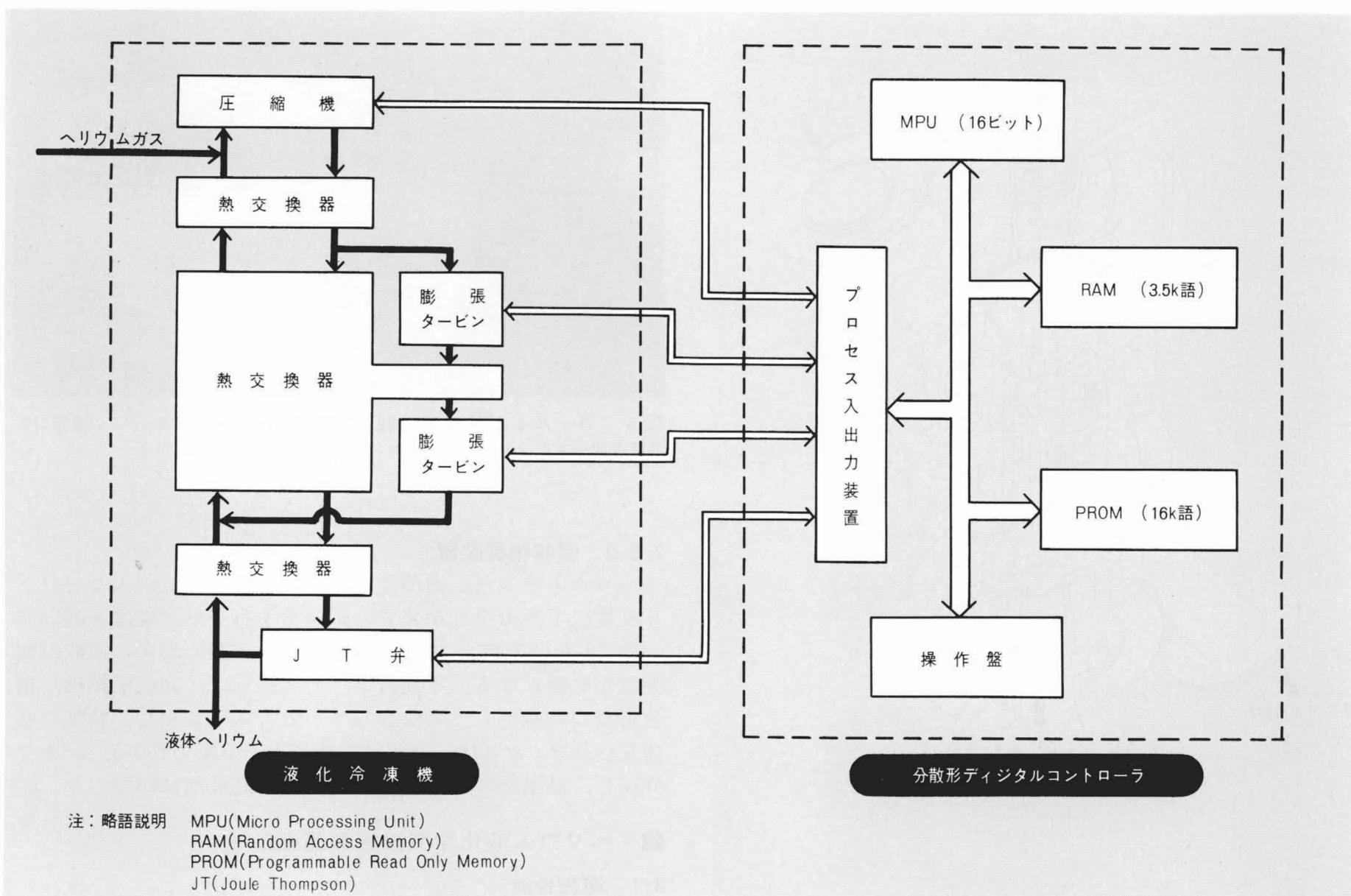


図7 液化冷凍機の自動運転システム 分散形デジタルコントローラにより、液化、冷凍運転を起動から定常運転、停止の全操作にわたって自動化している。

低下させる必要があるが、本開発の液化冷凍機ではこれが可能な性能をもっている。

3.2 自動運転

本液化冷凍装置の液化及び冷凍の両運転方式で、起動から定常運転、停止に至るまでを自動化するため、16ビットのマイクロコンピュータを内蔵した分散形デジタルコントローラSDC-18により、自動化装置を開発した。図7に本開発の自動運転システムを示す。起動では、低温ヘリウムの温度に応じて膨張タービンへのヘリウム供給量及び圧力を変え、回転速度を制御して常温から4.5Kまでヘリウム温度を下げ液化させて、定常運転に移行する。負荷変動に対してはヘリウム温度あるいは供給量の設定値を変更する。停止の場合は、所定のシーケンスに従って制御する。実際の運転に当たっては、自動化のアルゴリズム又はパラメータの変更は、これらをRAM(Random Access Memory)に記憶させておき、操作盤で修正の上、最適な運転を行ない得るように配慮した。

4 ヘリウム液化冷凍装置の実績

4.1 京都大学納め「ヘリオトロンE」用装置

「ヘリオトロンE」のNBI(Neutron Beam Injection)装置に使用されるヘリウム液化冷凍機は、NBI装置とトランスファ管で直結され、3.5Kの冷凍運転が行なわれる。3.5Kの温度を得るため、NBI装置内の液体ヘリウム圧力を大気圧以下に常時保つよう、減圧ポンプで蒸発したヘリウムガスを排出する方式を採用した。また本機は、液体ヘリウムを液体ヘリウム容器に取り出す液化運転が可能な方式とした。

4.2 自社研究所向け超電導実験用装置

各種大形超電導コイルを4.5Kまで冷却するための装置で、コイルと本機をトランスファ管で直結し、コイルを常温から4.5Kまで連続的に冷却することができる。4.5Kでの冷凍能力は300Wである。また、液体ヘリウムを毎時100l採取する運転も可能である。

本装置には回収精製装置も付属され、 $60\text{N}\cdot\text{m}^3/\text{h}$ の処理能力をもっている。

5 結 言

以上、日立製作所の核融合用ヘリウム液化冷凍装置の開発内容と実績について述べたが、今後、核融合用超電導の実験が進むにつれて、大形のヘリウム液化冷凍装置が必要になり、その液化能力規模は、1万l/h以上と言われている。このためには大形化のスケールアップ技術の確立と、液化効率を上げコンパクト化を進めながら信頼性を高めなければならないと考える。

参考文献

- 1) 松本、外：膨張タービン式大形ヘリウム液化装置、日立評論、52、781～784(昭45-9)
- 2) A. J. Glassman：Computer Program for Design Analysis of Radial-Inflow Turbines NASA TN D-8164(Feb. 1976)
- 3) H. E. Rohlik：Radial-Inflow Turbines. Ch. 10 of Turbine Design and Application, Vol.3, Arthur J. Glassman, SP NASA SP-290(1975)