

小形ヘリウム冷凍システム

Small Size Helium Refrigerating Systems

近年、医療用核磁気共鳴診断装置(通称MRI装置)に用いられる超電導マグネットの冷却用及びジョセフソン素子の冷却用として、低振動でメンテナンスフリーの小形ヘリウム冷凍システムに対する開発が進められている。

この要求を満たす冷凍システムとして、超小形・超高速の膨脹タービンと拡散接合式積層熱交換器を用いたコンパクトな小形ヘリウム冷凍機及び単段のスクリーューコンプレッサを開発した。

上記組合せで性能試験を行なった結果、第1タービンの効率は41%、第2タービンの効率は60%であった。また、冷凍能力は約70W(at 77K)+5W(at 4.5K)であり、冷凍機として実用化の見通しを得ることができた。

原田 進* *Susumu Harada*
 松田紀元* *Toshiharu Matsuda*
 松原克躬* *Katsumi Matsubara*
 松本孝三** *Kôzô Matsumoto*
 井原一夫** *Kazuo Ihara*

1 緒 言

最近、超電導を応用した医療機器や半導体素子などの研究・開発に不可欠な極低温生成用小形ヘリウム冷凍機が開発が活発になってきた。特にMRI装置(医療用核磁気共鳴診断装置)の超電導マグネット冷却用やジョセフソン素子の冷却用として、低振動でメンテナンスフリーな小形ヘリウム冷凍機に対するニーズが高まっている。

小形ヘリウム冷凍機としては種々の冷凍サイクルのものが試みられているが、一般には寒冷発生源としてレシプロ方式の膨脹機が採用されている。レシプロ方式の膨脹機は膨脹比が大きくとれるために、低周波数でも大きな寒冷を発生させることができるが、往復動に伴う機械的振動、しゅう動部分の耐久性などに問題が残されている。

一方、その他の寒冷発生源として低振動でメンテナンスの頻度が少ないものに、大形冷凍機¹⁾に用いられている膨脹タービンがある。しかし小形のものに適用しようとするれば、プロセスガス流量が小さくなり、タービンロータを小さくする必要がある。ところが、超高速回転及び超精密加工技術に難点があり、膨脹タービン式の小形ヘリウム冷凍機は今まで実用化されていなかった。

そこで日立製作所では、高速回転に適した気体軸受方式のジャーナル軸受及びスラスト軸受を検討し、しかもシステム効率向上のために、全動圧形気体軸受を用いた超小形膨脹タービンの開発を行なった。更に、この膨脹タービンと積層熱交換器を採用したコンパクトな小形ヘリウム冷凍機でヘリウムの液化に成功した。以下、本冷凍システムのこれまでの実験結果について報告する。

2 小形ヘリウム冷凍機の仕様及び構成

2.1 小形ヘリウム冷凍機の仕様

このたび開発した超小形膨脹タービン式小形ヘリウム冷凍機の主な仕様を表1に示す。液化方式は通常のクローズドサイクルであるが、液体窒素シールド負荷をとれる構成となっている。

2.2 小形ヘリウム冷凍機の構成

小形ヘリウム冷凍機は図1に示すように、ヘリウムガスを圧縮して循環する圧縮機ユニット、2個の超小形膨脹タービ

表1 小形ヘリウム冷凍機の主な仕様 開発した小形ヘリウム冷凍機
の能力及び主要機器の仕様を示す。

項 目	仕 様
液 化 方 式	クローズドサイクル
冷 凍 能 力	70W(at 77K)+5W(at 4.5K)
膨脹タービン	全動圧形気体軸受方式
熱 交 換 器	フィン管式熱交換器+積層熱交換器
圧 縮 機	単段スクリーュー式

ン²⁾及び5個の熱交換器並びにJ・T弁(ジュール・トムソン膨脹弁)などを内蔵した真空保冷槽(コールドボックス)から構成されている。ここで第1熱交換器はフィン管式熱交換器で、第2熱交換器から第5熱交換器までは積層熱交換器³⁾を採用している。図2にこれらの構成部分から成る小形ヘリウム冷凍機(外径φ400mm、高さ600mm)の外観を示す。

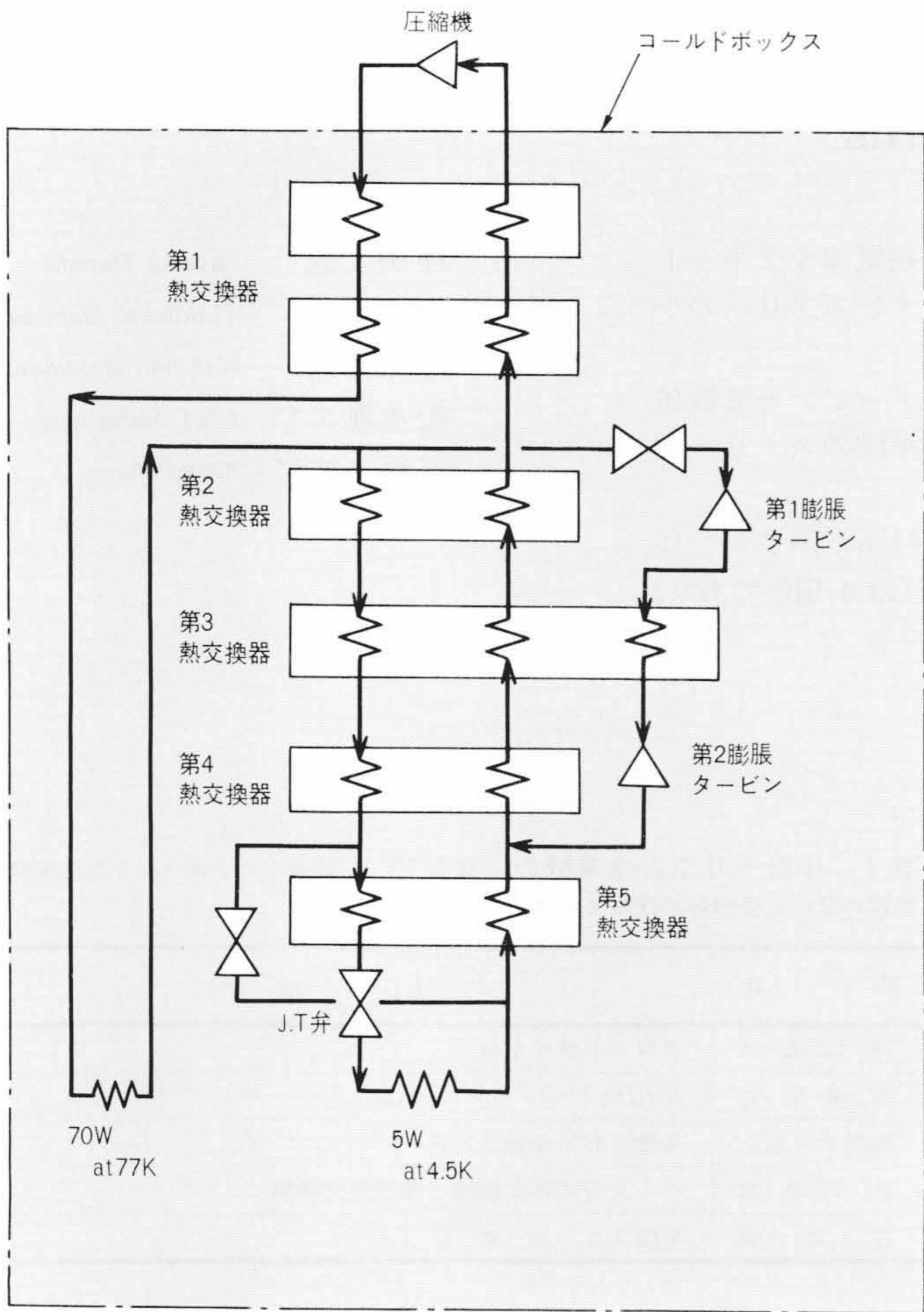
2.2.1 超小形膨脹タービン

超小形膨脹タービンは、小形ヘリウム冷凍機の最重要部分であり、2台のタービン効率が冷凍機の性能の良否を決定する。その設計仕様を表2に示す。第1タービンと第2タービンの設計回転数はそれぞれ81万6,000rpmと51万9,000rpmで、従来にない超高速回転となっている。図3に膨脹タービンの全体構造を、また図4に膨脹タービン回転体外観を示す。以下、本膨脹タービンの特徴について述べる。

タービンロータ径は両膨脹タービンともφ6mmであり、タービンロータには日立製作所の中形あるいは大形ヘリウム冷凍機に用いられて実績のある拡散接合式フルシュラウド形(ロータカバーとロータを接合した一体形ロータ)の半径流タービンを採用し、かつ従来のものよりも反動度を小さくすることにより、スラスト負荷を低減できる構造にした。

ジャーナル軸受には実績があり、高速安定性に優れたティルティングパッド形動圧気体軸受を用いた。また、予備回転実験と軸受性能計算から最適な予荷重やパッド形状などを検討した結果、室温で最高85万rpmまでの回転試験に成功し、続いてタービン入口温度が、液体窒素温度レベルでも問題なく

* 日立製作所機械研究所 ** 日立製作所笠戸工場



注：略語説明 J.T.弁(ジュール・トムソン膨脹弁)

図1 小形ヘリウム冷凍機のフロー ヘリウム冷凍機は膨脹タービン、熱交換器、弁などを収容したコールドボックスと圧縮機から構成される。

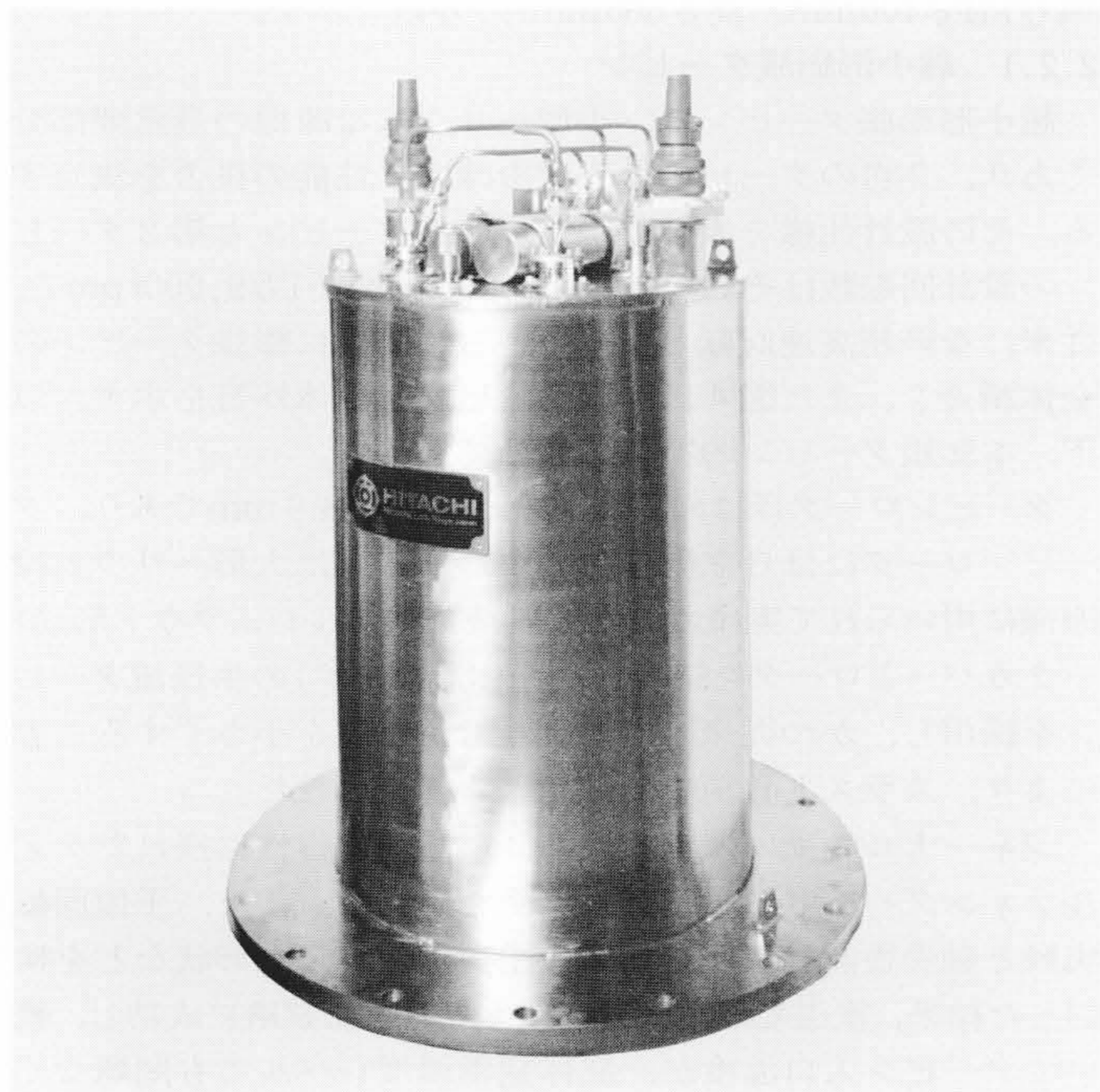


図2 小形ヘリウム冷凍機外観〔外径φ400×高さ600(mm)〕 膨脹タービン、熱交換器、弁などを収容したコンパクトな小形ヘリウム冷凍機の外観を示す。

回転することを確認した。結果の一例として、タービン主軸の振動特性を図5に示す。この図から使用範囲内には軸受共振回転数が存在せず、ホワールの発生がない安定な高速回転を行なっていることが分かる。

スラスト軸受には、従来の静圧形軸受に比べてシステム効率の良いレーリーステップ形動圧軸受を適用した。本軸受採用に当たっては、あらかじめ単体のスラスト負荷実験を行ない、設計のスラスト負荷に十分耐えられることを確認した。

また動力吸収方法としては比較的構造が簡単で、かつ高速での吸収動力を大きくとれる遠心ファン動力吸収方式を採用

表2 超小形膨脹タービンの仕様 本冷凍機では、二つのタービンを直列に配置した冷凍サイクルを用いている。

項目	第1膨脹タービン	第2膨脹タービン
回転数	816,000rpm	519,000rpm
入口圧力	1.62MPa	0.61MPa
入口温度	77K	19K
出口圧力	0.61MPa	0.12MPa
出口温度	65K	14K
質量流量	2.8g/s	2.8g/s

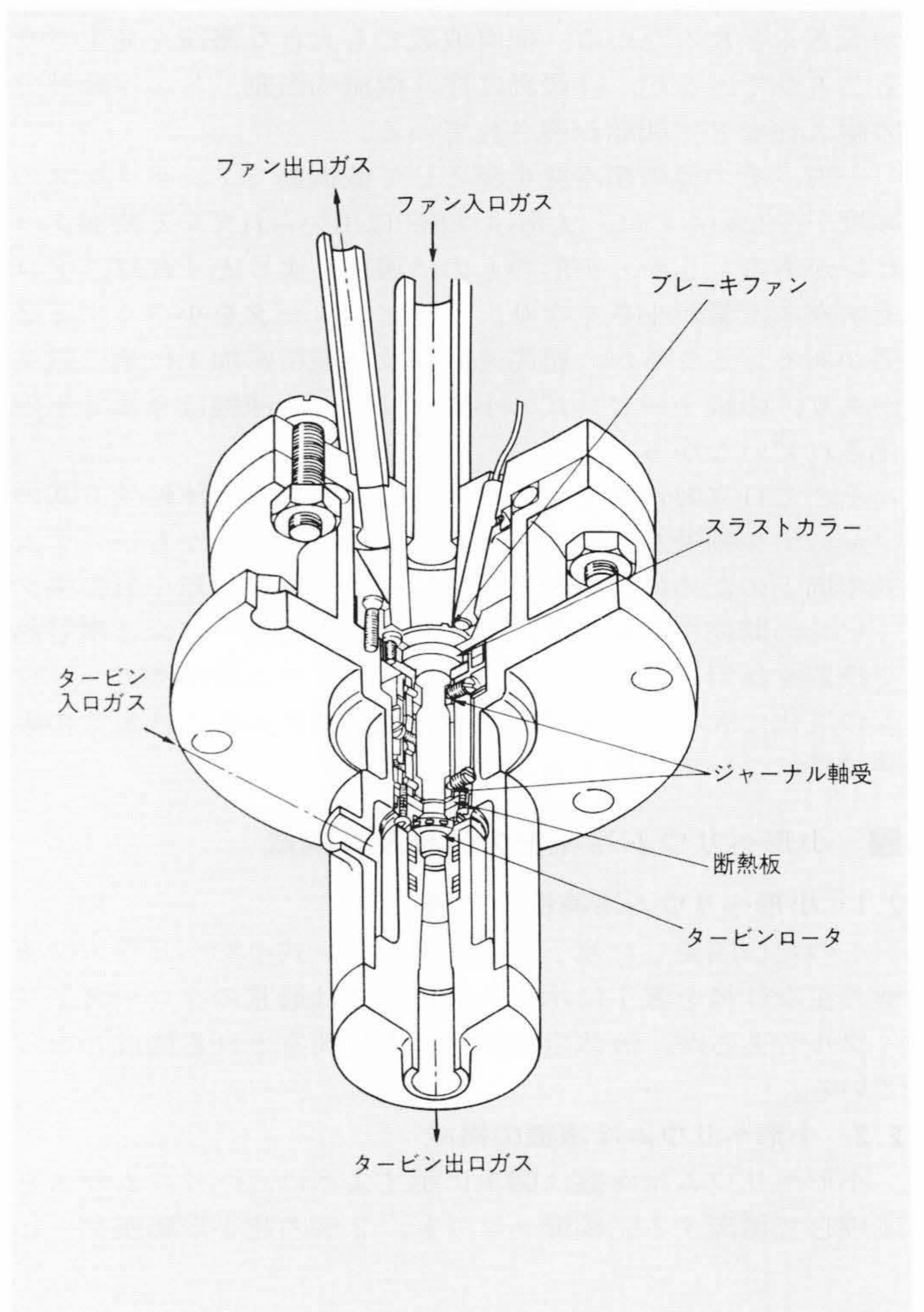


図3 超小形膨脹タービンの構造図 膨脹タービンの断面構造を示す。

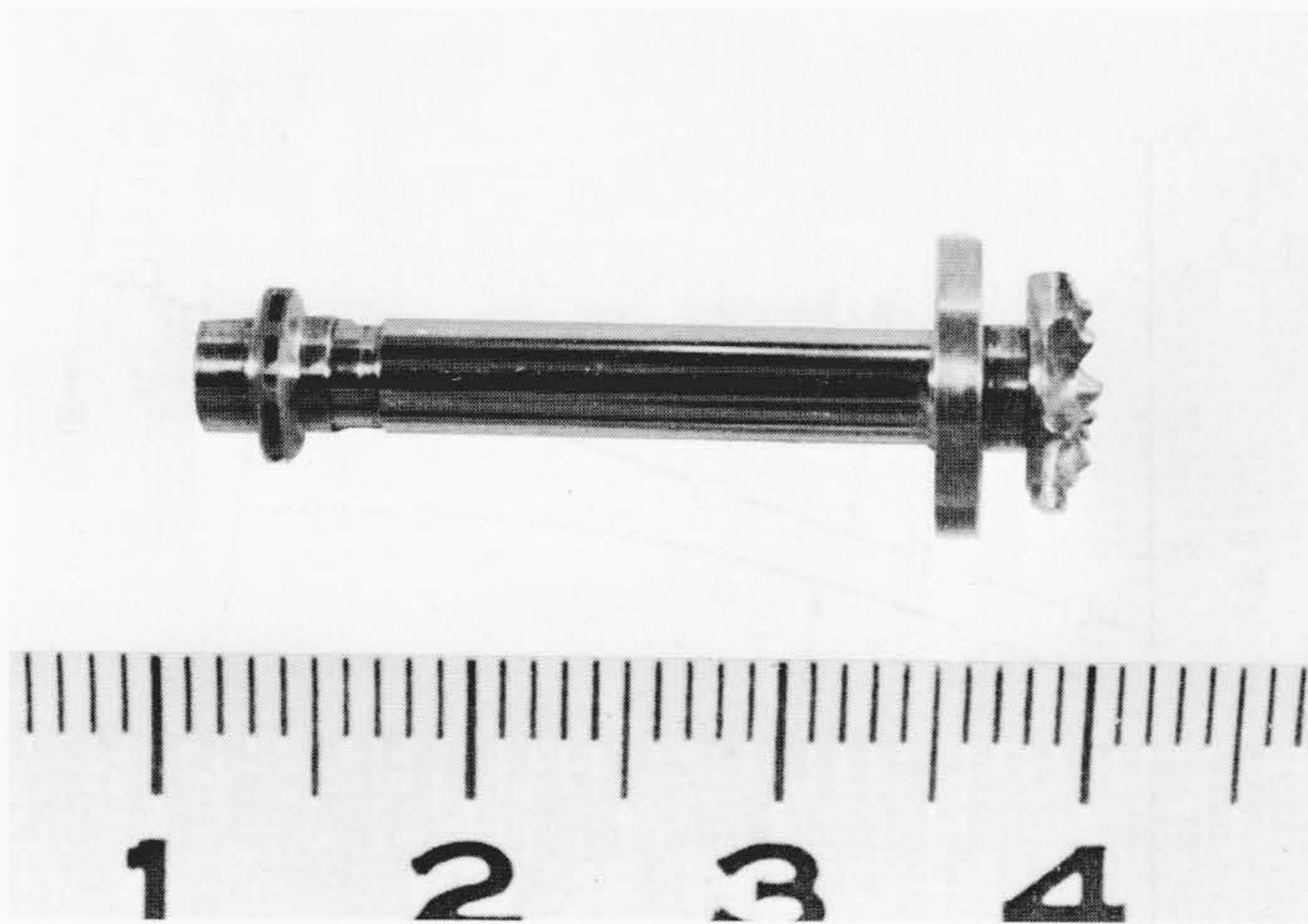


図4 膨脹タービン回転体 回転体はタービンロータ(左端部), スラストカラー及びブレーキファン(右端部)から構成される。

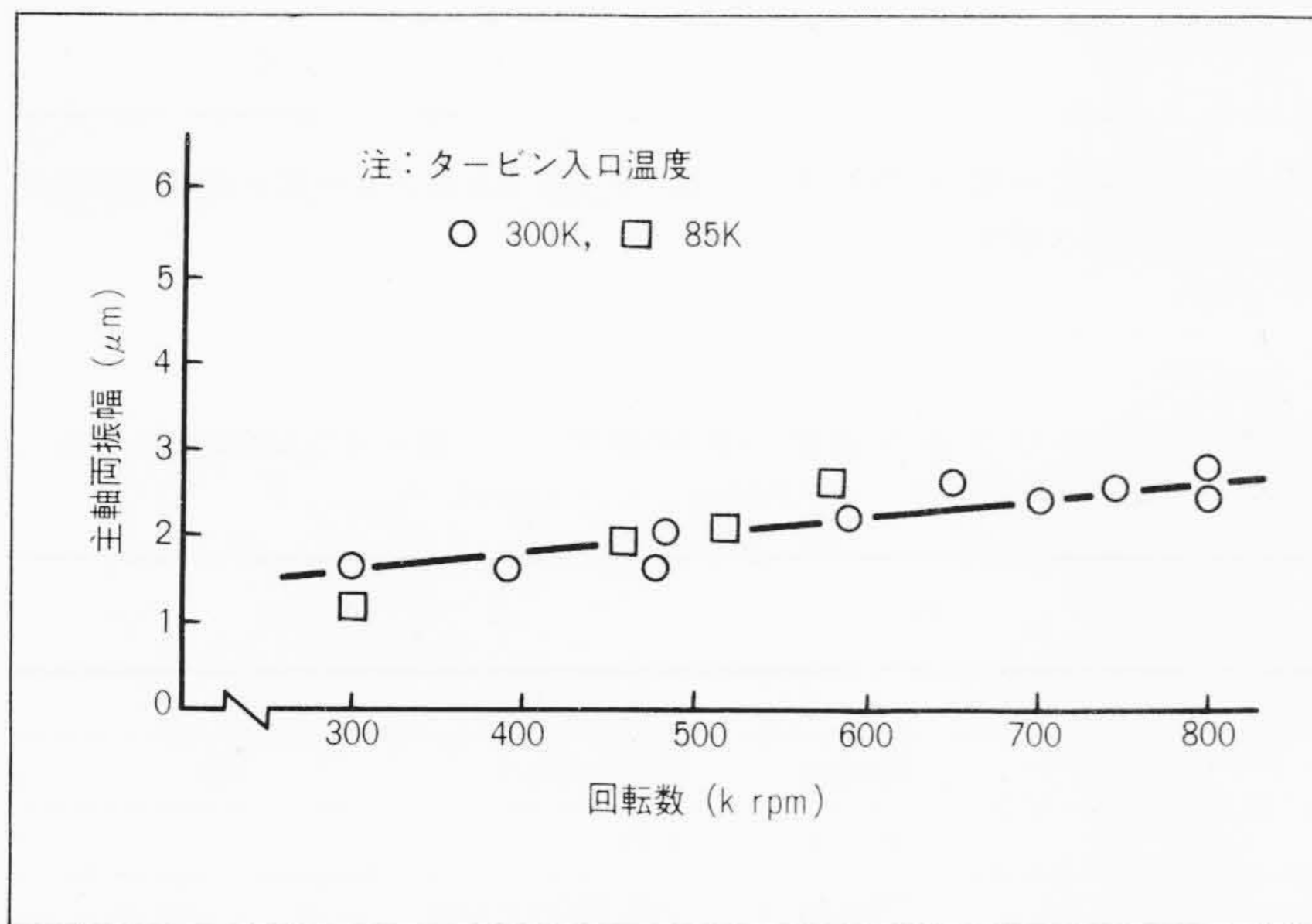


図5 タービン主軸の振動特性 タービン入口温度が300K及び85Kでの主軸の振幅測定結果を示す。

した。

一方、タービンロータ部は極低音(77~20K)で、ブレーキファン制動部は常温(330K)であり、その温度差が大きいため侵入熱によるタービン効率の低下を起こしやすい。そこでタービンケーシングの薄肉化を行なうとともに、タービンロータと軸受部分の間には断熱板を設けて、侵入熱の低減を図った。なお、タービン入口の高圧低温ガスが軸受部あるいは出口部にリークしないようにシール部の構造に対しても十分配慮を行なっている。

更に、本タービンはメンテナンスを考慮して、容易にコールドボックスから着脱できる構造となっている。すなわち、タービンロータ、シャフト、ブレーキファン、軸受構成部品及びノズルを一体構造としている。このために、簡単にタービンケーシングから常温側へ抜き出してメンテナンスを行なうことができる。

2.2.2 熱交換器

大形ヘリウム冷凍機では、一般にアルミプレートフィン式熱交換器を用いているが、本冷凍機では大幅にコールドボックスの小形化が可能な積層熱交換器を採用した。第1熱交換器は従来の円筒状のフィン管式であるが、その内側に配置した第2熱交換器から第5熱交換器までは拡散接合式積層熱交

換器を適用した。図6にコールドボックス内の構造図を示す。またこの積層熱交換器は、熱伝導率の大きい銅の多孔板と熱伝導率の小さいステンレスのスペーサを交互に重ね合わせ、その両端にヘッダを設けて、それらを拡散接合して製作した。積層熱交換器の概略図を図7に示す。本熱交換器は単位体積当たりの伝熱面積を大きく(1,500m²/m³以上)とれるために、例えば本冷凍機の第5熱交換器の条件では、従来のアルミプレートフィン式熱交換器の $\frac{1}{4}$ 程度の容積にすることができた。

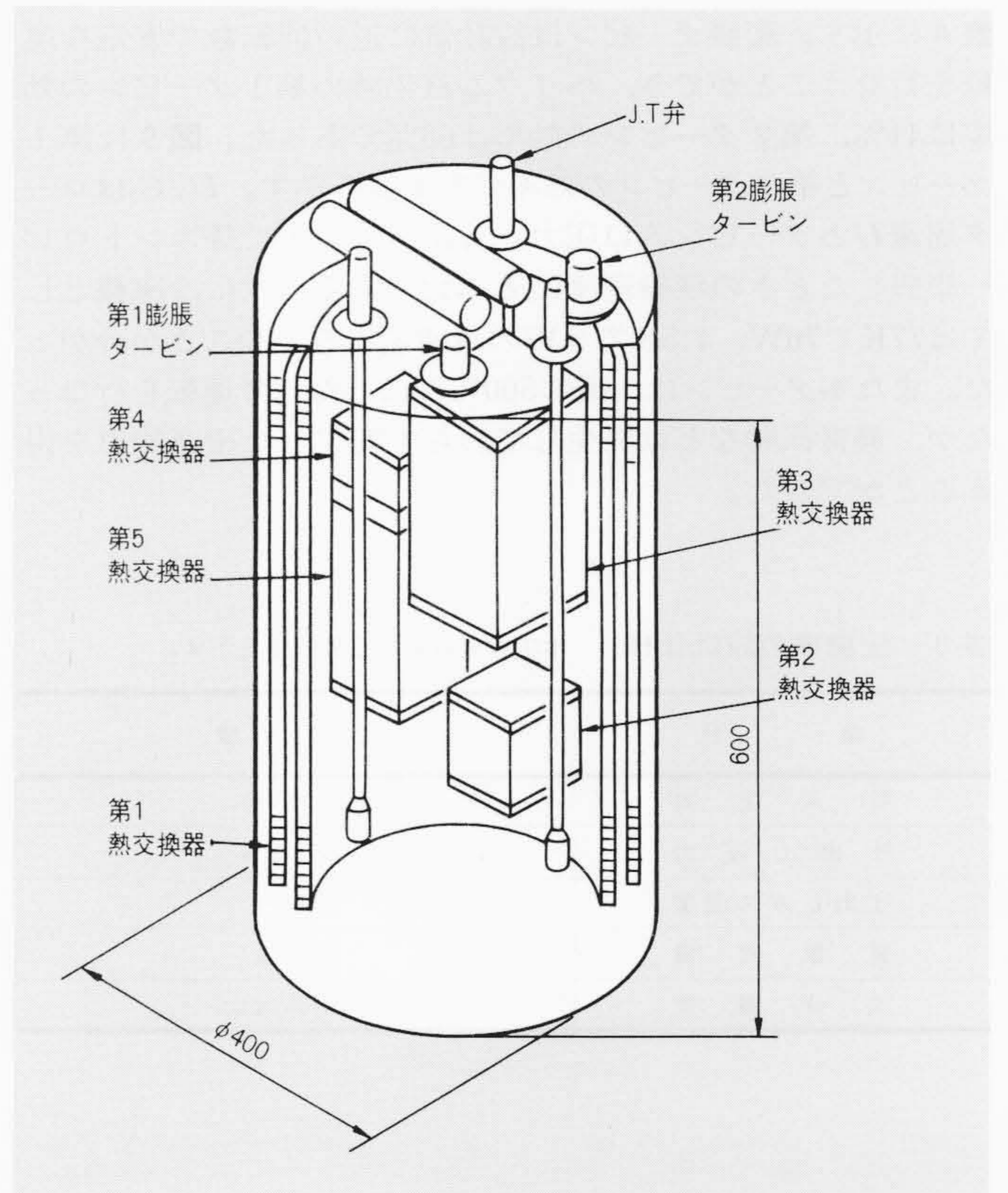


図6 コールドボックス内の構造図 コールドボックス内には、5個の熱交換器がコンパクトに収納されている。

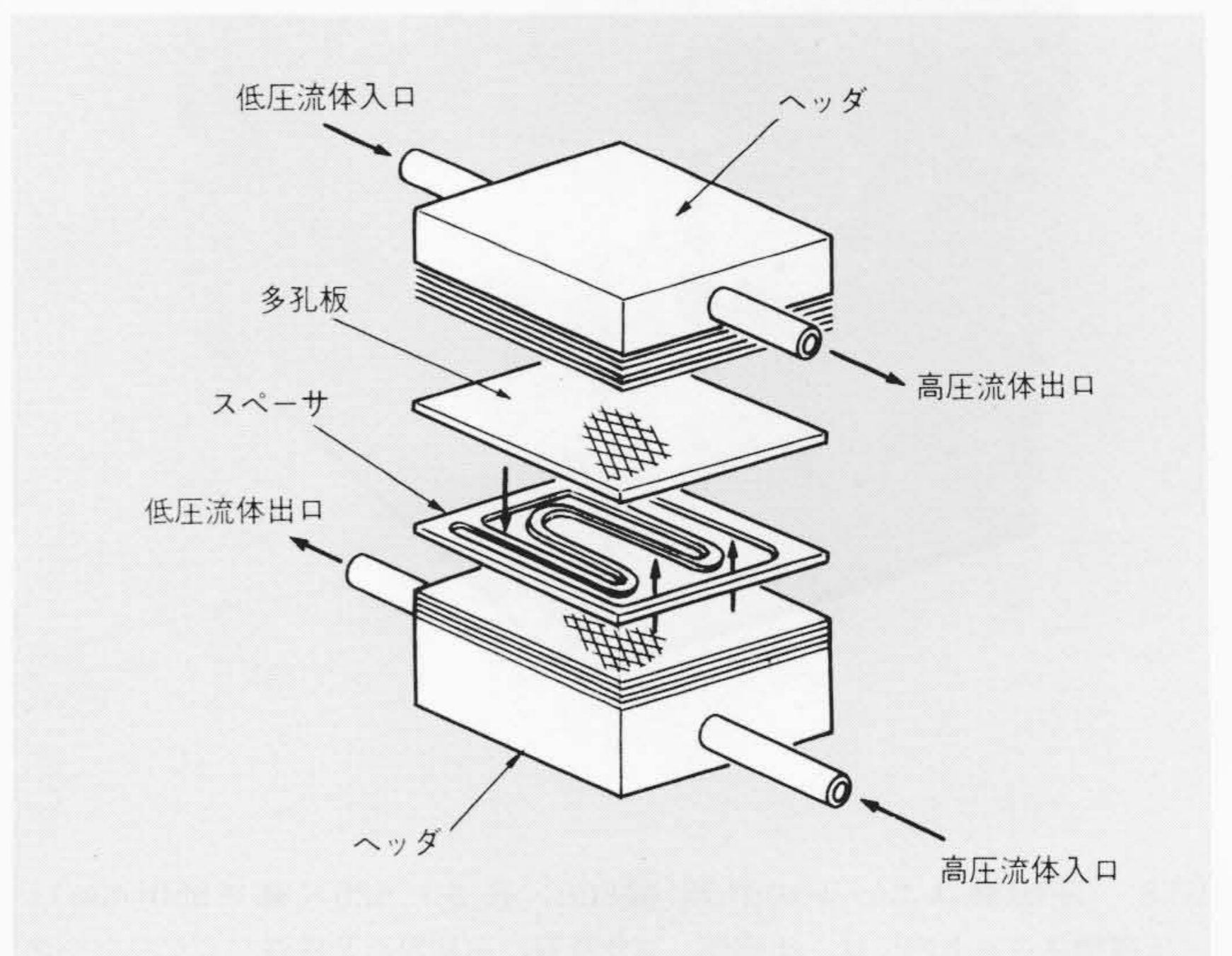


図7 積層熱交換器の概略図 本熱交換器は、銅の多孔板とステンレスのスペーサを交互に重ね合わせ、その両端にヘッダを設けて拡散接合により製作される。

2.2.3 圧縮機

今回開発したスクロール圧縮機⁴⁾の特徴は、油噴射の最適化などにより圧力比18を単段圧縮で実現し、全断熱効率76~78%の高効率を達成していることである。その設計仕様を表3に、外観を図8に示す。圧縮機、油分離器、熱交換器などは一体化して圧縮機ユニットとしてまとめ、取扱いを容易にしている。

3 小形ヘリウム冷凍機の実験結果

以上述べてきた小形ヘリウム冷凍機の実験結果の一例を表4に示す。膨脹タービンは設計値に近い回転数で安定な運転を行なうことができ、ヘリウム液化時の第1タービンの効率は41%、第2タービンの効率は60%であった。図9に第1タービンと第2タービンの効率の実測値を示す。 U/C_0 はロータ周速 U とタービン入口圧力から出口圧力まで等エントロピー膨脹したときの理論速度 C_0 との比である。次に冷凍機としては77Kで70W、4.5Kで5Wの冷凍能力をもつことが分かった。また本タービンは、延べ500時間にわたって運転を行なったが、異常振動などは発生しておらず安定した冷凍能力を得ることができた。

表3 圧縮機の設計仕様 本圧縮機的主要な設計仕様を示す。

項目	仕様
吸入圧力	0.11MPa
吐出し圧力	1.87MPa
吐出しガス温度	35℃
質量流量	3.5g/s
油分濃度	0.1vol. ppm



図8 圧縮機ユニットの外観[幅800×長さ1,520×高さ950(mm)]
圧縮機ユニット内には、圧縮機、油分離器、冷却用熱交換器などがコンパクトに収納されている。

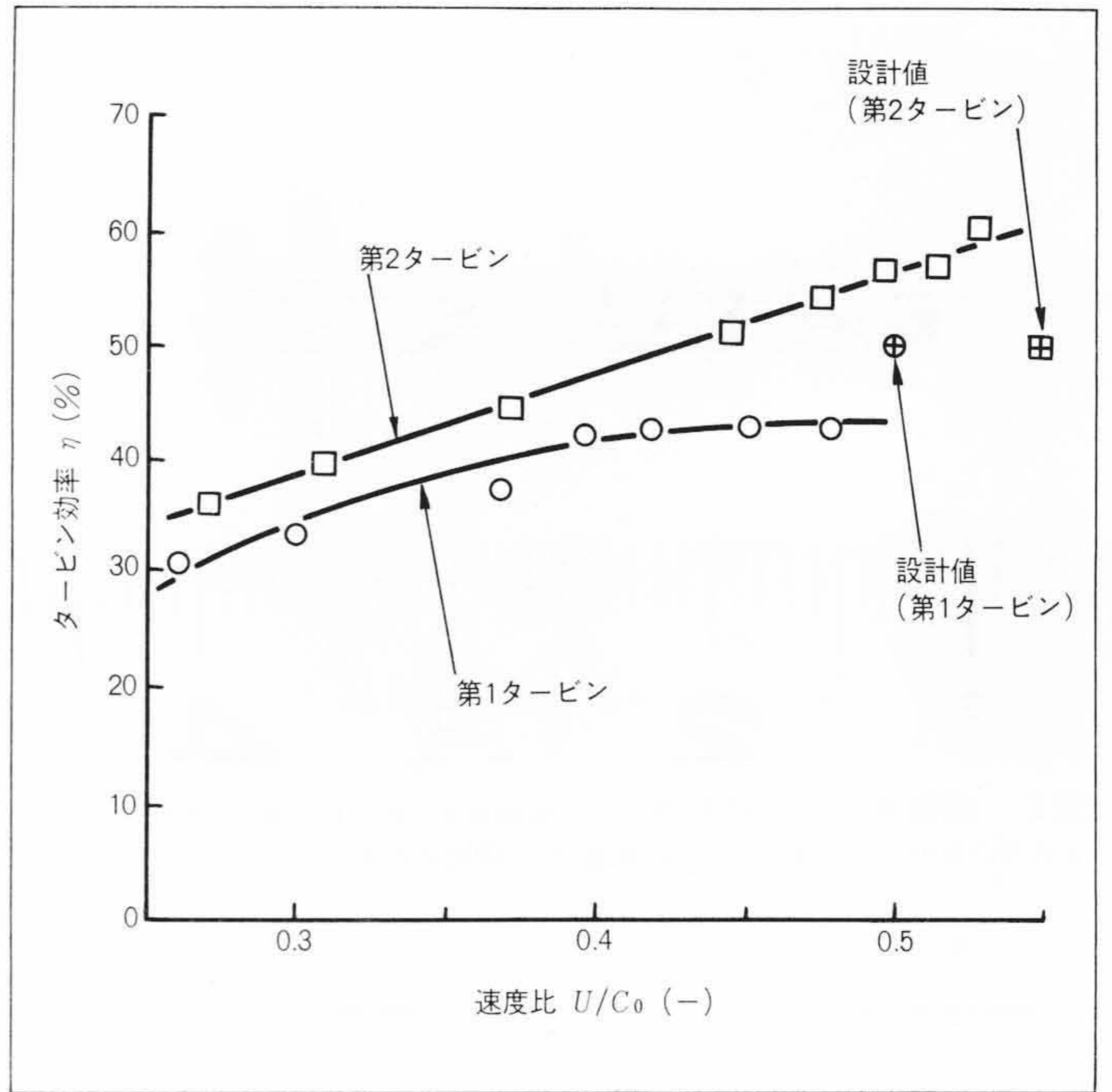


図9 膨脹タービンの効率 第1タービンと第2タービンの効率を速度比 U/C_0 に対して示す。

表4 小形ヘリウム冷凍機の実験結果 小形ヘリウム冷凍機の実験結果を、冷凍能力と膨脹タービンの特性について示す。

項目	液化運転	
冷凍能力	70W(at 77K) + 5W(at 4.5K)	
第1膨脹タービン	回転数	740,000rpm
	効率	41%
第2膨脹タービン	回転数	500,000rpm
	効率	60%

4 結 言

MRI装置やジョセフソン素子冷却用に適用可能な、低振動でメンテナンスフリーの超小形膨脹タービン式小形ヘリウム冷凍機を開発した。本冷凍機は70W(at 77K) + 5W(at 4.5K)以上の冷凍能力をもっていることが分かった。今後は更に長時間の連続運転を行ない、信頼性を確立するとともにタービンの効率向上を図っていく予定である。

参考文献

- 1) 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)
- 2) 中元, 外: 超小形膨脹タービンの開発, 第33回低温工学研究発表会予稿集, p.110(1985)
- 3) 原田, 外: 拡散接合式積層熱交換器の伝熱性能, 第31回低温工学研究発表会予稿集, p.46(1984)
- 4) N. Arai, et al.: Scroll and Screw Compressors: The Latest Compressor Technology for Air Conditioning and Refrigeration, Hitachi Review, 34, 3, pp.141~146(1985)