

JAERI - M

85-167

JT-60NBIクライオポンプ内部配管用
多層断熱材の開発

1985年10月

柴沼 清・大槻 正幸・黒金 正春*
小野 要一*: 柴田 猛順・寺門 拓也

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, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1985

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 山田軽印刷所

J T - 6 0 N B I クライオポンプ内部配管用多層断熱材の開発

日本原子力研究所那珂研究所核融合研究部

柴沼 清・大槻 正幸・黒金 正春^{*}

小野 要一^{*}・柴田 猛順・寺門 拓也

(1985年10月1日受理)

J T - 6 0 N B I 用 クライオポンプ の 热負荷を軽減するため に、 クライオポンプ の 内部配管に
使 用する 多層断熱材 の 断熱性能 の 向上を 試みた。 候補となる 3種類 の 断熱材 について 性能試
験を 実施した 結果、 著者らが 考案した 断熱材 が 最も 優れた 断熱性能 を 有す る こ と が 確認さ
れ た。 また、 この 断熱材 は 断熱材 の 各層 が 少しずつ ズレ て 10層 一 体とな っ て いる こと から、 断
熱材 を 10層 一 度に 卷く こ と が で きる だ け で な く、 各層 は 同心円状 に 卷か れる と い う 利点 を 持
つ て い る。

* 日立製作所国分工場

Development of Multilayer Insulator round Internal
Pipes for JT-60 NBI Cryopumps

Kiyoshi SHIBANUMA, Masayuki DAIRAKU, Masaharu KUROGANE*,
Yoichi ONO*, Takemasa SHIBATA and Takuya TERAKADO

Department of Thermonuclear Fusion Research
Naka Fusion Research Establishment, JAERI

(Received October 1, 1985)

We attempted to improve thermal insulation performance of a multilayer insulator wound around the internal pipes of a cryopump to decrease heat load in the JT-60 NBI cryopumps. In testing three kinds of multilayer insulators, it was shown that the insulation contrived by us had the best insulation performance. Our ten-layer insulator can be wound around the pipe at a time and the layers are in concentric circles, because the respective layers are staggered, i.e. start one after another in arrangement.

Keywords: Cryopump, Multilayer Insulator, Heat Load, JT-60 NBI,
Performance, Layers, Thermal Insulation

* Kokubu Works, Hitachi Ltd.

目 次

1 はじめに.....	1
2 断熱材の種類と巻き方.....	2
2.1 断熱材の種類.....	2
2.2 断熱材の巻き方.....	2
3 実 驗.....	3
3.1 実験装置.....	3
3.2 実験結果.....	3
4 考 察.....	4
4.1 侵入熱の推定.....	4
4.2 計算結果と実験結果の比較.....	5
5 結 論.....	6
謝 辞.....	6
参考文献.....	6

Contents

1. Introduction	1
2. Insulator and its winding method	2
2.1 Insulator	2
2.2 Winding method of insulator	2
3. Experiment	3
3.1 Experimental equipment	3
3.2 Experimental results	3
4. Discussion	4
4.1 Calculation heat input to pipe	4
4.2 Comparision between calculative and experimental results	5
5. Conclusion	6
Acknowledgement	6
References	6

1. はじめに

臨界プラズマ試験装置（JT-60）の二段加熱装置の一つである中性粒子入射装置（以後NBIという）は14基から構成され、現在建設中である。各NBI内には水素ガスを排気するための液体ヘリウム冷却のクライオポンプが収納されている¹⁾。クライオポンプユニットは図1に示すようにNBI 1基当り大小6枚のクライオパネルから成り、それぞれのクライオパネルは内部配管によって接続されている。これらの液体ヘリウム用内部配管のうち、クライオパネルを常温のふく射からしゃ断するための液体窒素温度に冷却されたシェブロンとシールド板によって熱シールドされていない配管領域については多層断熱材が使用されている。多層断熱配管はNBI 1基当り約30mであり、NBI 14基全体としては400m以上にも達する。このようにシステムが大型化してくると多層断熱配管の断熱性能はクライオポンプに液体ヘリウムを供給するヘリウム冷凍機の容量にも大きな影響を与えることから、重要な問題であり、断熱材の断熱性能を正確に把握すると同時に優れた断熱性能を有する多層断熱材を開発する必要がある。

JT-60 NBI 14基の建設に先立ち、その基本性能を確認するために建設された JT-60 NBI 原型ユニット²⁾のクライオポンプ内部配管用断熱材には、反射材とスペーサを一層ずつ手巻きで巻きつけるゲートル巻が採用された。しかし、この方法では断熱材の巻きつけ作業に多大な時間と労力を必要とした。そこで、JT-60 NBI 用内部配管の断熱材には断熱材の巻きつけのための作業性が非常によい反射材とスペーサがずれることなく10層重ね合わされた一体型多層断熱材を用いる方向で設計が進められた。しかし、一体型多層断熱材の一般的な巻き方であるロール巻の場合、断熱材の内層から外層までの各層の巻き終り端部が露出することや低温層と高温層とが直接接触することから熱的な短絡が生じ断熱性能はあまり期待できないとの指摘がある³⁾。そこで、著者らは以上の二つの断熱材の各々の欠点を克服する断熱材として、断熱材内の各層の巻き終わり端部が外部に対して露出しないで各断熱材がきちんと同心円状に巻かれることのできる改良一体型多層断熱材を考案した^{4), 5)}。

ここでは、従来の断熱材であるNBI原型ユニット用クライオポンプに使用された断熱材及び一体型多層断熱材、さらに著者らが考案した改良一体型多層断熱材の合計3種類の多層断熱材それについて断熱性能試験を実施し、その性能を比較した。また、佐保ら⁶⁾の方法により多層断熱配管への侵入熱の推定を行い、実験結果と比較した。

2. 断熱材の種類と巻き方

2.1 断熱材の種類

断熱材は反射材とスペーサから構成され、今回の実験で使用した反射材は2種類であり、その仕様を表1に示す。フラット加工の反射材は最も一般的な構造の反射材であるが、エンボス加工の反射材は断熱材の層密度を小さくし、層間の接触熱伝達を低減するようにしたものであり、反射材が熱処理によって凸凹構造となっている。なお、スペーサはどちらも共通で、厚さ200μmのポリエスチル製ネットを使用した。

2.2 断熱材の巻き方

断熱材を評価する際には、単に断熱性能だけでなく断熱材の巻きつけのための作業性も考慮に入れる必要がある。今回は図2に示すような3種類の断熱材の巻き方による多層断熱材について断熱性能を評価した。以下簡単に断熱材の巻きつけのための作業性も含め各々の断熱材の巻き方についてその特徴を説明する。

1) ゲートル巻

ゲートル巻はNBI原型ユニットクライオポンプの内部配管用多層断熱材として用いられたもので、50mm幅の反射材及びスペーサをそれぞれ1層毎に螺旋状に巻きつける方法である。この方法は配管の形状に依存することなく断熱材を巻きつけることが可能であり、さらに断熱材の各層は図2(a)のように同心円状にきちんと巻かれた断面形状を有している。しかし、断熱材は1層毎に巻きつけられるため、巻きつけのための作業に多大な時間を必要とする。

2) ロール巻

ロール巻は通常の一体型多層断熱材の巻き方としては最も一般的なもので、図3のように各反射材とスペーサとがずれることなく10層重ね合わされた一体型多層断熱材を配管の円周方向にうず巻き状に巻きつける方法である。この方法は一体型を構成する断熱材の内層から外層までの各層の端部が図2(b)のように断熱材巻き終り部で表面に露出するものの、断熱材を巻きつけるための作業性は非常によい。

3) 改良型ロール巻

改良型ロール巻は著者らが独自に考案したものであり、図4のように反射材及びスペーサが各層毎に少しずつずれた10層から成る一体型多層断熱材を配管の周囲に数回巻きつける方法である。断熱材各層は図2(c)のように配管の回りに同心円状にきちんと巻きつけられ、かつ断熱材を巻きつけるための作業性もよい。

3. 実験

3.1 実験装置

多層断熱材の断熱性能を試験するための実験装置の概略図を図5に示す。液体ヘリウム用気液分離器は常温からのふく射による熱負荷を防止するために液体窒素によって熱シールドされ、気液分離器内の液体ヘリウムは自然循環方式によって多層断熱配管内に供給される。多層断熱材の熱負荷は断熱層内反射材に取り付けた金鉄一クロメル熱電対 (Au + 0.07%鉄対クロメル熱電対) の指示が一定となった後、気液分離器外へ放出されるヘリウムガスを湿式積算流量計にて測定することにより算出した。なお、このとき、多層断熱材の熱負荷は多層断熱配管を取り付けない状態での気液分離器のみの熱負荷を差し引いた値として求められる。実験に用いた配管モデルはら旋状のNo. 1 モデルとジグザグ状のNo. 2 モデルの2種類であり、配管はどちらもJT-60 NBI用クライオポンプの内部配管として予定されている外径17.3mmのSUS-316L管で多層断熱材測定部の有効長さはそれぞれ6.0m, 5.1mである。

実験は合計6パターンについて行い、各パターンについての実験条件を表2に示す。反射材としては、層間の接触による熱伝達の軽減を図ったエンボス加工の反射材を主に採用し、NBI原型ユニット用クライオポンプで使用したフラット加工の反射材でゲートル巻の断熱材も比較のため用いた。なお、改良型ロール巻は直管部のみしか断熱材を巻きつけることができないので、曲管部についてはフラット加工の反射材を用いたゲートル巻を採用した。また、線径0.2mmの金鉄一クロメル熱電対を銅粘着テープにて反射材の外層側にはりつけ、液体窒素温度定点で断熱材内の反射材の温度を測定した。さらに、熱シールド及びタンク内壁温度測定には前述の金鉄一クロメル熱電対の他に銅ーコンスタンタン熱電対も併用した。

3.2 実験結果

各断熱材についての熱負荷の測定結果を図6に示す。この結果より、改良型ロール巻が最も断熱性能に優れ、断熱材層数が20層の場合の熱負荷は0.69W/mである。この熱負荷はNBI原型ユニットで用いられたゲートル巻11層の熱負荷1.16W/mよりも約40%軽減された値であり、改良型ロール巻は非常に有効な方法であることが示された。しかし、ロール巻は改良型ロール巻に比べ熱負荷が約2倍の1.37W/mと大きく、また断熱材の層数の効果がほとんどないことが示された。このような各断熱材の巻き方による熱負荷の相違は断熱材内の反射材の温度分布にも表われ、その結果を図7、図8に示す。ゲートル巻と改良型ロール巻はほぼ同様の温度分布を示し、断熱材の最内層から最外層までゆるやかに温度が上昇している。これに対し、ロール巻は最内層の第一層めから急激に温度が上昇するためにゲートル巻や改良型ロール巻に比べ断熱性能が低下することが示された。

4. 考察

4.1 侵入熱の推定

多層断熱材の侵入熱の推定はネット状スペーサのふく射伝熱を考慮した佐保ら^{6), 7)}の方法により行う。彼らは反射材の表裏2面のうち1面のふく射率を反射材それ自身のふく射率とし、他の1面のふく射率を反射材の他にネット状スペーサによるふく射伝熱も含んだ平均ふく射率とし、それぞれを実験的に求めることによって層間のふく射伝熱を解析している。また、反射材間の接触による伝熱は層密度に対する有効接触熱伝達率を実験的に求めることによって算出している。すなわち、N層から成る多層断熱材の単位長さ当りの熱負荷Qは次の式(1)～式(4)により与えられ、また、各反射材の温度は式(5)によって与えられる。

$$\left\{ \sigma \bar{\varepsilon}_{N-1} + \sigma D_N \bar{\varepsilon}_N \left(\sum_{i=0}^{N-1} \frac{1}{D_i} \right) T_N^4 + \bar{K}_{N-1} T_N + \sigma (\bar{\varepsilon}_0 - \bar{\varepsilon}_i) T_i^4 \right. \\ \left. - \left\{ \sigma \bar{\varepsilon}_0 T_0^4 + \bar{K}_0 T_0 + \sigma D_N \bar{\varepsilon}_N \left(\sum_{i=0}^{N-1} \frac{1}{D_i} \right) T_S^4 \right\} = 0 \quad (1) \right.$$

$$\bar{\varepsilon}_i = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_i^{OUT}} + \frac{D_i}{D_{i+1}} \left(\frac{1}{\varepsilon_i^{IN}} - 1 \right)} \quad (2)$$

$$\bar{K}_i = 0.0557 \left(\frac{N}{\delta} \right)^{1.734} \quad (3)$$

$$Q = \pi \sigma D_N \bar{\varepsilon}_N \left(T_S^4 - T_N^4 \right) \quad (4)$$

$$\sigma \bar{\varepsilon}_{i-1} T_i^4 + \bar{K}_{i-1} T_i - \left(\sigma \bar{\varepsilon}_{i-1} T_{i-1}^4 + \bar{K}_{i-1} T_{i-1} + \frac{Q}{\pi D_{i-1}} \right) = 0 \quad (5)$$

ここで、

Q : 単位長さ当りの熱負荷

γ : ステファン・ボルツマン定数

D_i : i層断熱材の直径

T_i : i層反射材の温度

ε_i^{IN} : i層のスペーサ付き反射材の平均ふく射率

ε_i^{OUT} : i層反射材のふく射率

D_0 : 内部配管の外径

T_o : 内部配管の表面温度
 ϵ_o : 内部配管のふく射率
 T_s : タンク内壁の温度
 $\bar{\epsilon}_i$: i 層反射材と $i+1$ 層スペーサ付き反射材間の有効ふく射率
 \bar{K}_i : i 層と $i+1$ 層反射材間の接触による有効熱伝達率
 δ : N 層断熱材の厚さ

本実験で用いた多層断熱材は佐保らが用いたものと同じであるので、彼らが実験的に求めた反射材のふく射率、ネット状スペーサ付き反射材の平均ふく射率及び層密度に対する有効熱伝達率を用いて、多層断熱材が継目なく理想的に配管の回りに巻きつけられている場合について内部配管への侵入熱と各反射材の温度を推定した。計算に用いた各値を表3に示す。SUS-316L管のふく射率は多層断熱材を巻かない状態の裸管内に液体窒素を供給し、熱負荷を測定することによって求めた値である。また、改良型ロール巻の場合、直管部のみが改良型ロール巻であり、曲管部はゲートル巻が採用されているので、それぞれの長さについて熱解析を行い、合計した値を熱負荷とした。

4.2 計算結果と実験結果の比較

各断熱材の巻き方における熱負荷の計算結果を図6に、反射材の温度分布の計算結果を図7、図8にそれぞれ実験結果とともに示す。

ロール巻の反射材の温度分布について計算結果と実験結果とを比較すると、10層の場合も20層の場合も同様に実験における反射材の温度分布が低温である内層側で計算結果より異常に高く、外層側では反対に低くなっている。これは、図2(b)の断熱材の断面図からわかるようにロール巻の場合、一体型多層断熱材の巻き終り端部が低温層から高温層まで室温の外壁又は次に巻かれる一体型多層断熱材の内層に対して露出していることから、室温又は高温層のふく射が直接低温層内に侵入し、断熱材の効果を低減させていることや高温側反射材と低温側反射材とがスペーサ1枚を介して接触してしまっているオーバラップ部分が存在していることのためだと思われる。これに反し、ゲートル巻と改良型ロール巻は1層毎に配管の回りに同心円状に巻かれており、計算モデルにも近いことから反射材の温度分布の計算値と実験値とは比較的一致している。しかし、熱負荷に関しては、いずれの場合も実験値が計算値より高い値を示し、ゲートル巻で1.5倍、改良型ロール巻で約3倍実験値の方が大きな値を示した。特に、改良型ロール巻の場合、反射材の温度分布が計算結果と実験結果とでゲートル巻の場合と同様に比較的一致しているにもかかわらず、熱負荷の計算結果が実験結果と異なる最も大きな要因として配管長手方向の断熱材と断熱材が不連続となる接続部分からの熱リードが考えられる。ここで、反射材に取りつけた温度センサーは一体型多層断熱材の長手方向端部から十分離れた位置に設置されており、断熱材の接続箇所付近の温度分布は測定したもの異なっているものと予想される。改良型ロール巻の場合、断熱材の接続箇所は17個存在し、この接続部からの熱リードは今のところ定量的に明確になっていないが、図9のように、一体型多層断熱材の接続部となる長手方向端部を各層毎に少しずつずらして断熱材を次々と接続していくれば、断熱材接続部からの熱リード低減をはかることができる⁸⁾。

5. 結 論

JT-60 NB I用クライオポンプの熱負荷軽減対策の一つとして、内部配管に使用される多層断熱材の断熱性能を高めるために、NB I原型ユニットクライオポンプの内部配管用として使用された断熱材をはじめ合計3種類の断熱材について断熱性能試験を実施した。その結果、著者らが考案した一体型多層断熱材が最も優れた断熱性能を有することが確認された。この断熱材がJT-60 NB I 内部配管用多層断熱材として用いられた場合、NB I原型ユニット用多層断熱材の場合よりも約40%ほど多層断熱材における熱負荷が軽減されることになり、クライオポンプ熱負荷軽減に大きく貢献することになる。また、この断熱材は一体型であることから、断熱材の巻き付けの作業性も非常によく、再現性のある安定した品質を有する多層断熱配管を容易に製作することができる利点も有し、一般の極低温用トランスファーラインにも広く適用できる。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、協力・有益な議論をして頂いた加熱工学第一研究室、臨界プラズマ加熱開発室の皆様に感謝します。また不斷の激励を頂いた松田慎三郎加熱工学第一研究室長、白形弘文臨界プラズマ加熱開発室長に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) T. Shibata et al. : 10th Symp. on Engineering Problems of Fusion Research, Philadelphia, USA, 1983
- 2) T. Shibata et al. : 9th International Cryogenic Engineering Conference, Kobe, Japan, 1982
- 3) 信貴 豊一郎他 低温工学ハンドブック 内田老鶴園新社, 1982
- 4) 柴田 猛順, 柴沼 清, 小野 要一; 実用新案申請中
- 5) 柴沼 清, 柴田 猛順; 特許申請中
- 6) N. Saho, T. Takada : 9th International Cryogenic Engineering Conference, Kobe, Japan, 1982
- 7) N. Saho et al. : 10th International Cryogenic Engineering Conference, Helsinki, Finland, 1984
- 8) 柴沼 清, 柴田 猛順; 特許申請中

5. 結論

JT-60 NB I用クライオポンプの熱負荷軽減対策の一つとして、内部配管に使用される多層断熱材の断熱性能を高めるために、NB I原型ユニットクライオポンプの内部配管用として使用された断熱材をはじめ合計3種類の断熱材について断熱性能試験を実施した。その結果、著者らが考案した一体型多層断熱材が最も優れた断熱性能を有することが確認された。この断熱材がJT-60 NB I 内部配管用多層断熱材として用いられた場合、NB I原型ユニット用多層断熱材の場合よりも約40%ほど多層断熱材における熱負荷が軽減されることになり、クライオポンプ熱負荷軽減に大きく貢献することになる。また、この断熱材は一体型であることから、断熱材の巻き付けの作業性も非常によく、再現性のある安定した品質を有する多層断熱配管を容易に製作することができる利点も有し、一般の極低温用トランスファーラインにも広く適用できる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、協力・有益な議論をして頂いた加熱工学第一研究室、臨界プラズマ加熱開発室の皆様に感謝します。また不断の激励を頂いた松田慎三郎加熱工学第一研究室長、白形弘文臨界プラズマ加熱開発室長に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) T. Shibata et al. : 10th Symp. on Engineering Problems of Fusion Research, Philadelphia, USA, 1983
- 2) T. Shibata et al. : 9th International Cryogenic Engineering Conference, Kobe, Japan, 1982
- 3) 信貴 豊一郎他 低温工学ハンドブック 内田老鶴園新社, 1982
- 4) 柴田 猛順, 柴沼 清, 小野 要一; 実用新案申請中
- 5) 柴沼 清, 柴田 猛順; 特許申請中
- 6) N. Saho, T. Takada : 9th International Cryogenic Engineering Conference, Kobe, Japan, 1982
- 7) N. Saho et al. : 10th International Cryogenic Engineering Conference, Helsinki, Finland, 1984
- 8) 柴沼 清, 柴田 猛順; 特許申請中

5. 結 論

JT-60 NBI用クライオポンプの熱負荷軽減対策の一つとして、内部配管に使用される多層断熱材の断熱性能を高めるために、NBI原型ユニットクライオポンプの内部配管用として使用された断熱材をはじめ合計3種類の断熱材について断熱性能試験を実施した。その結果、著者らが考案した一体型多層断熱材が最も優れた断熱性能を有することが確認された。この断熱材がJT-60 NBI 内部配管用多層断熱材として用いられた場合、NBI原型ユニット用多層断熱材の場合よりも約40%ほど多層断熱材における熱負荷が軽減されることになり、クライオポンプ熱負荷軽減に大きく貢献することになる。また、この断熱材は一体型であることから、断熱材の巻き付けの作業性も非常によく、再現性のある安定した品質を有する多層断熱配管を容易に製作することができる利点も有し、一般の極低温用トランスマーケットにも広く適用できる。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、協力・有益な議論をして頂いた加熱工学第一研究室、臨界プラズマ加熱開発室の皆様に感謝します。また不断の激励を頂いた松田慎三郎加熱工学第一研究室長、白形弘文臨界プラズマ加熱開発室長に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) T. Shibata et al. : 10th Symp. on Engineering Problems of Fusion Research, Philadelphia, USA, 1983
- 2) T. Shibata et al. : 9th International Cryogenic Engineering Conference, Kobe, Japan, 1982
- 3) 信貴 豊一郎他 低温工学ハンドブック 内田老鶴園新社, 1982
- 4) 柴田 猛順, 柴沼 清, 小野 要一; 実用新案申請中
- 5) 柴沼 清, 柴田 猛順; 特許申請中
- 6) N. Saho, T. Takada : 9th International Cryogenic Engineering Conference, Kobe, Japan, 1982
- 7) N. Saho et al. : 10th International Cryogenic Engineering Conference, Helsinki, Finland, 1984
- 8) 柴沼 清, 柴田 猛順; 特許申請中

表 1 反射材の種類

種類	フィルム素材	フィルム厚さ	蒸着膜	蒸着面	蒸着膜厚さ
フラットタイプ	ポリエスチル	6 μm	アルミニウム	両面	約 800 \AA
エンボスタイプ	ポリエスチル	25 μm	アルミニウム	両面	約 800 \AA

表 2 断熱材の実験条件

巻き方	反射材	層数	配管 No.
ロール巻	エンボス	11	1
		11	2
ゲートル巻	フラット	10	1
		20 (10 + 10)	1
改良ロール巻	エンボス (曲管部フラット)	10	2
		20 (10 + 10)	2

表 3 侵入熱推定に用いた各物性値

	ロール巻	ゲートル巻	改良型ロール巻	
			改良型ロール巻	ゲートル巻
SUS-316L 管ふく射率 ϵ_s			0.1	
スペーサ付き反射材ふく射率 ϵ_i^{IN}			0.135 ⁶⁾	
反射材ふく射率 ϵ_i^{OUT}			0.04 ⁶⁾	
平均層間熱伝達率 \bar{K}_i	0.199	0.438	0.199	0.208
SUS-316L 配管径 D_o			17.3	
断熱材最外層径 D_N	34 (N=10) 46 (N=20)	24 (N=11)	26 (N=10) 37 (N=20)	25 (N=10) 36 (N=20)
SUS-316L 配管温度 T_o			4.2	
真空タンク内壁温度 T_s			290	

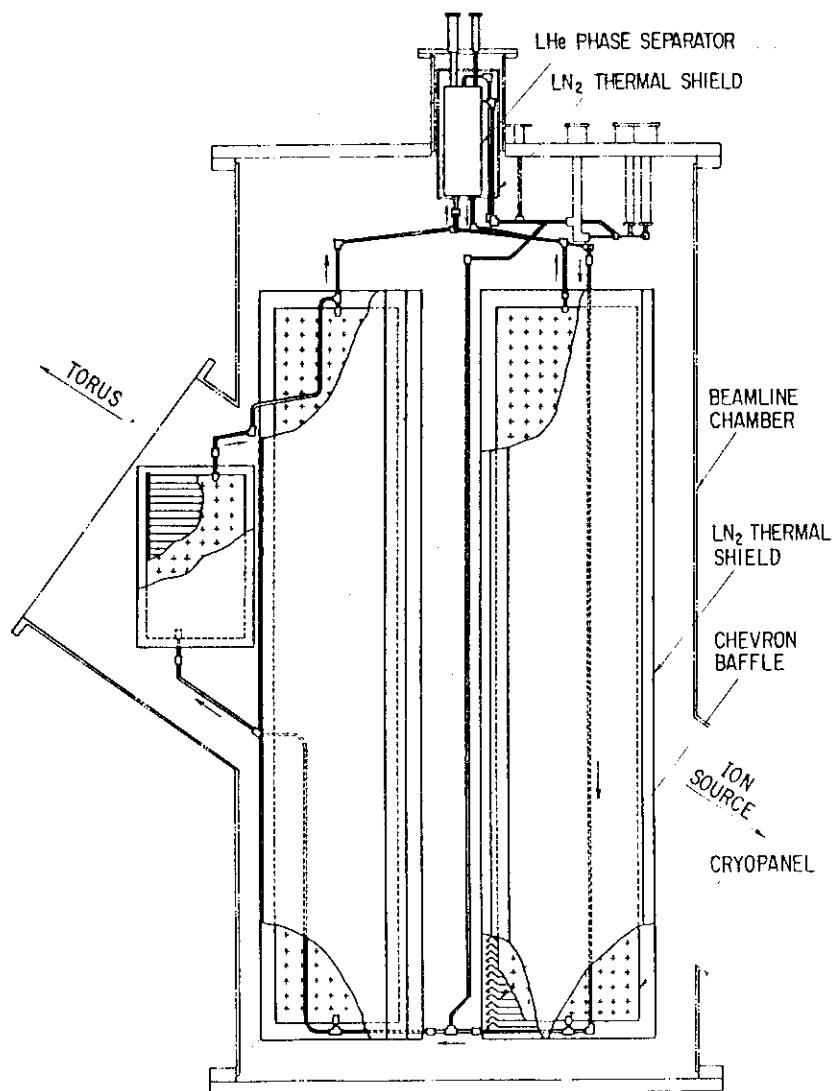


図1. JT60NBI用クライオポンプ

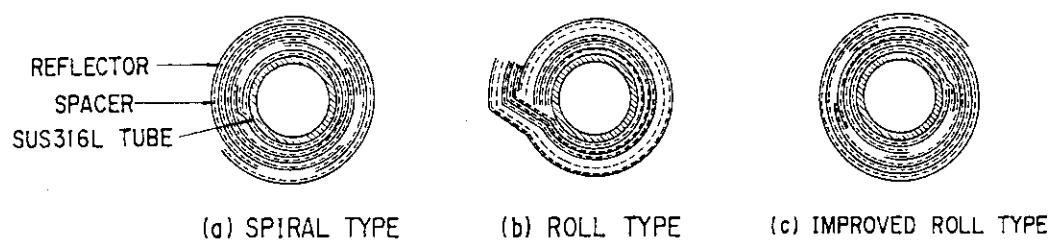


図2. 各断熱材の断面図

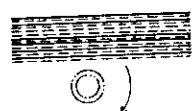
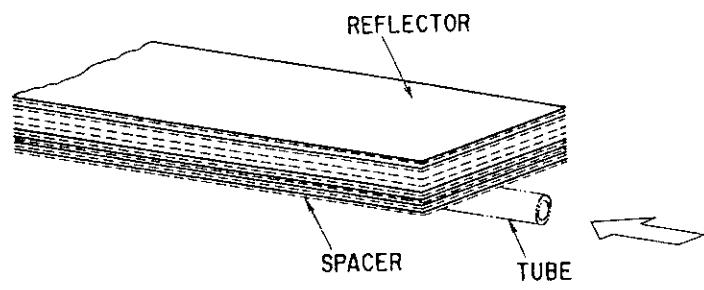


図3. ロール巻による断熱材の巻き方

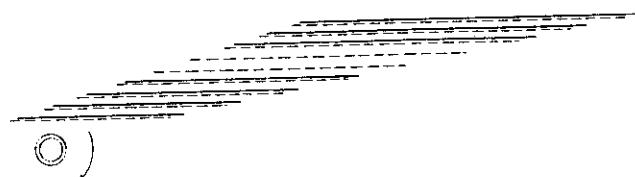
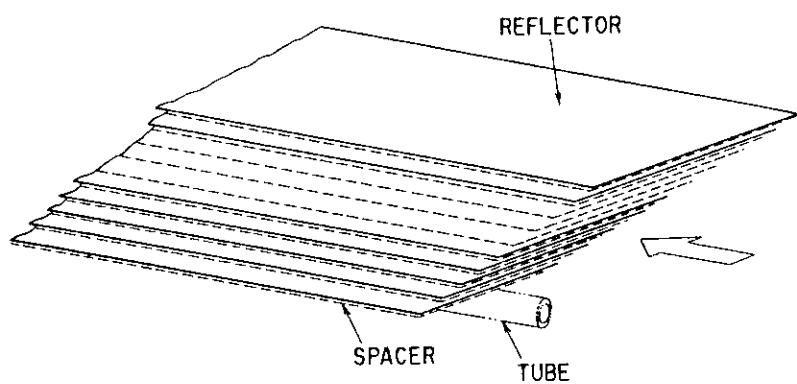
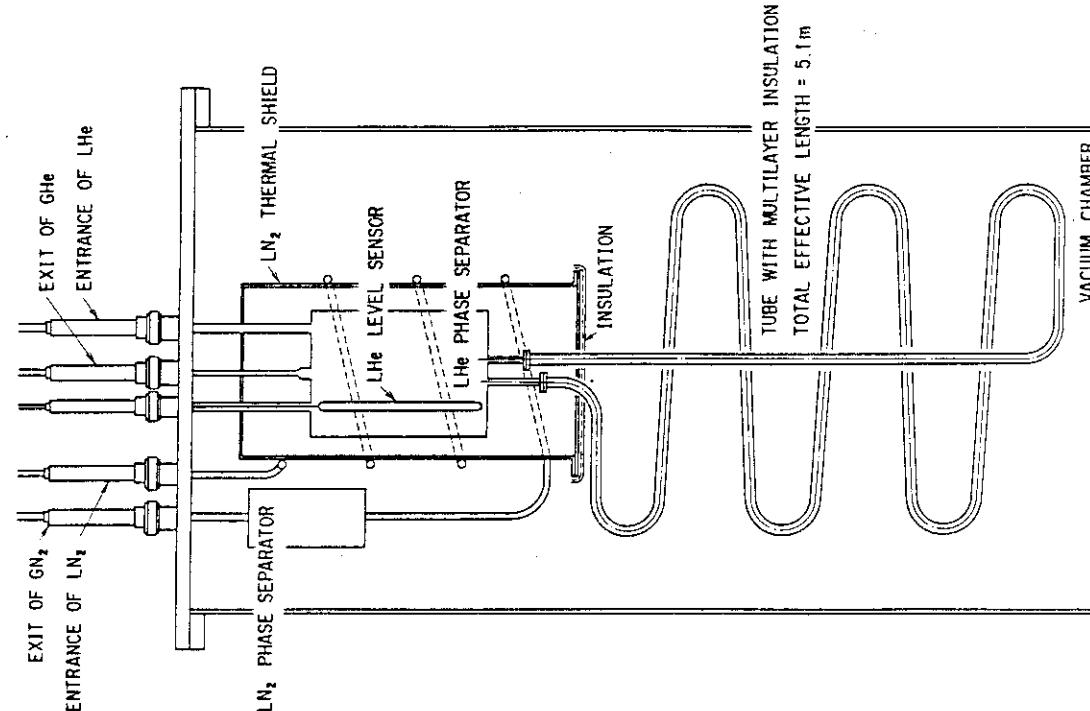
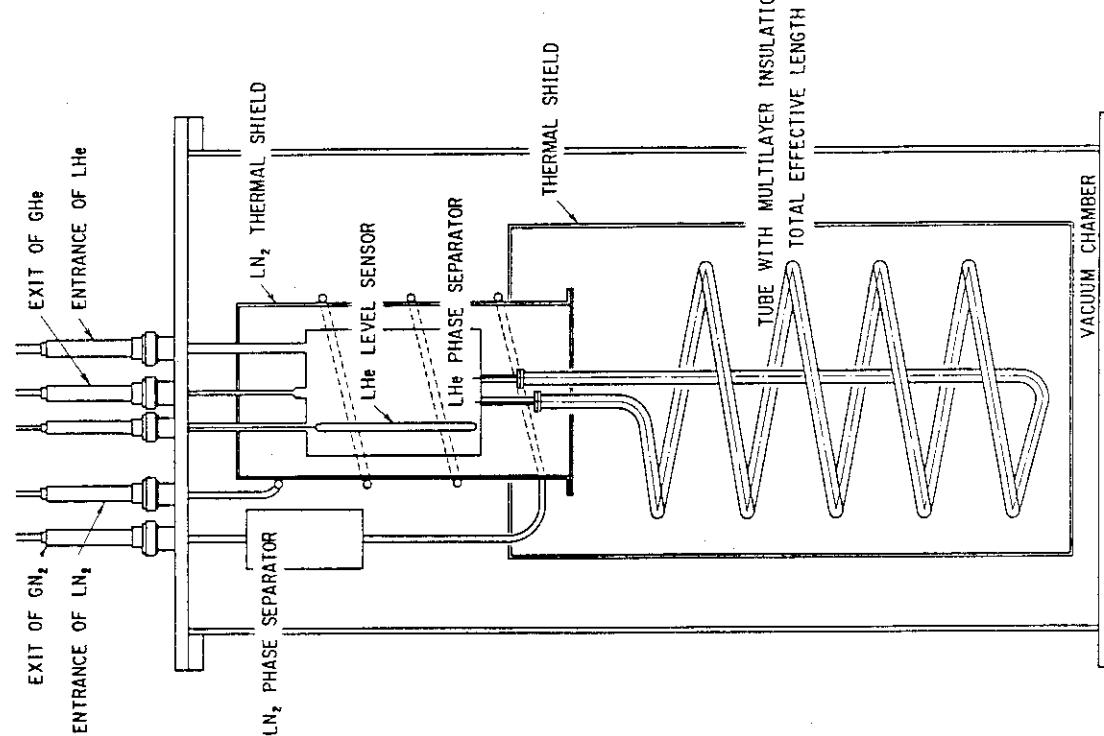


図4. 改良型ロール巻による断熱材の巻き方



(b) No. 2 実験装置



(a) No. 1 実験装置

図 5. 実験装置

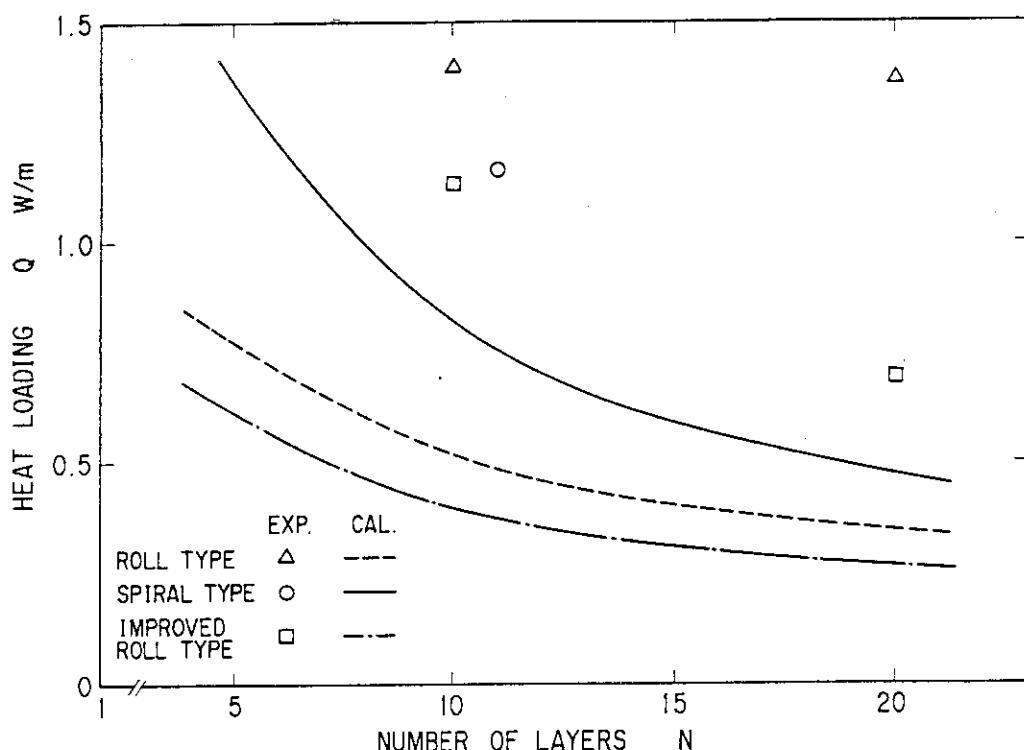


図 6. 各断熱材の熱負荷

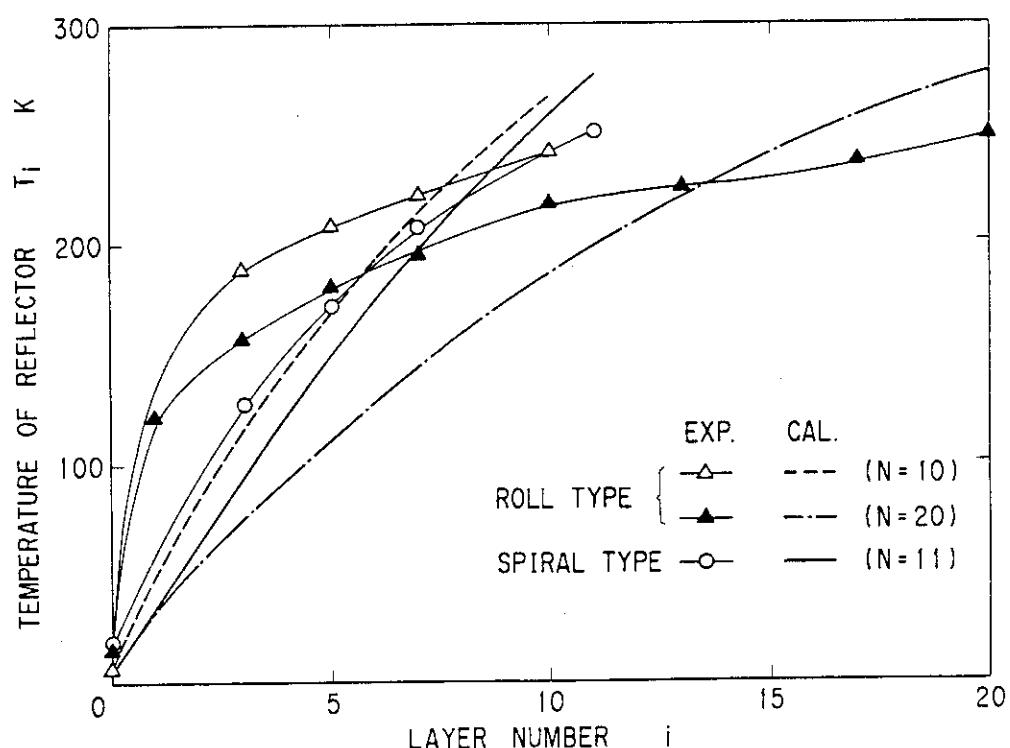


図 7. ゲートル巻及びロール巻の各々の温度分布

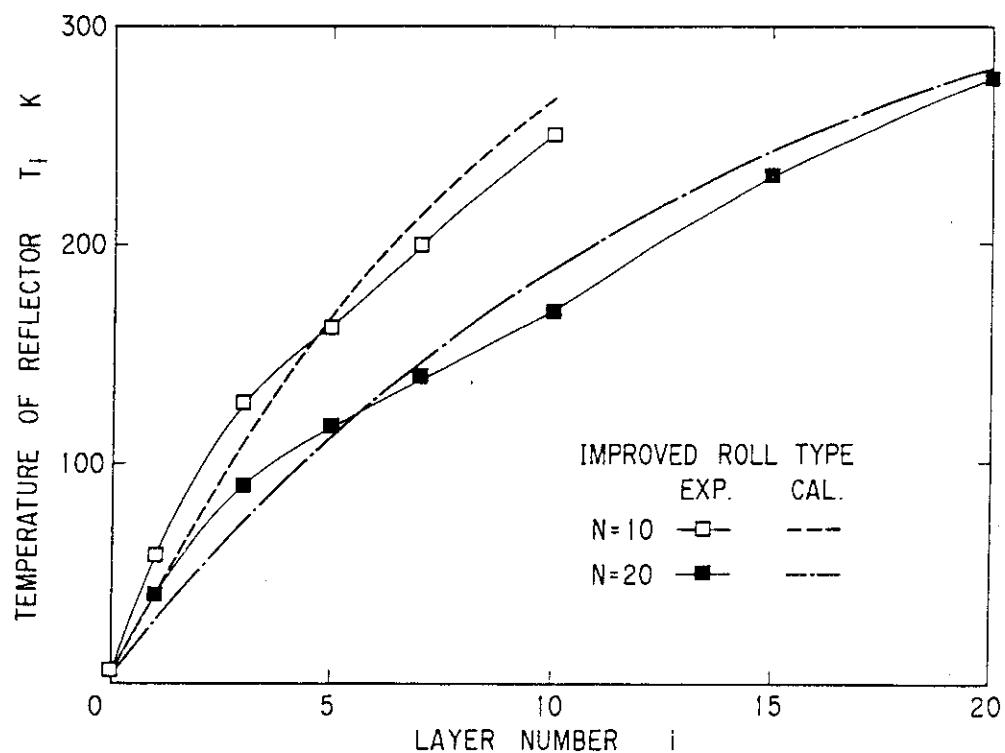


図8 改良型ロール巻の各々の温度分布

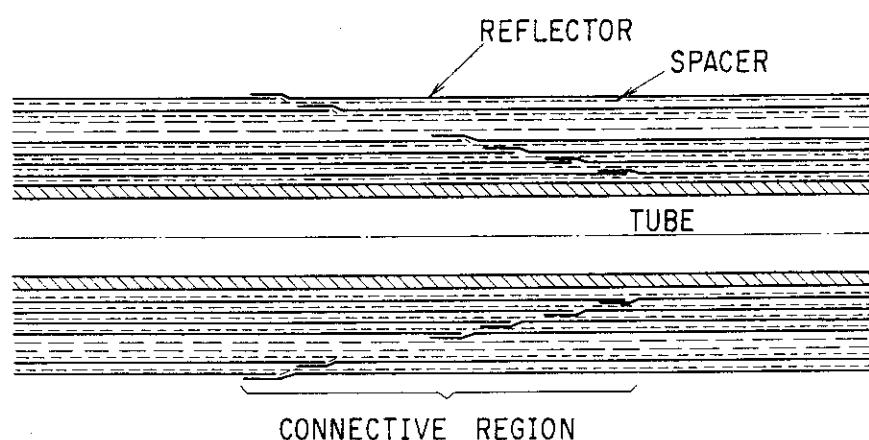


図9 多層断熱材の接続部の改良