多層断熱材の熱侵入特性に関する研究*

(第3報, 各種パラメータの影響)

天 野 俊 之*¹, 尾 原 昭 徳*²

Thermal Performance of Multilayer Insulation (3rd Report, Effects of Various Parameters on Heat Flux)

Toshiyuki AMANO and Akinori OHARA

The effects of various parameters on heat flux between room temperature and liquid nitrogen temperature through multilayer insulation (MLI) are examined using the prediction equations and experimental results. The investigated parameters were: the winding method of multilayer insulation, hot boundary temperature, mesh size of the net, number of layers of net inserted between films, direction of layer installation, film thickness, and use of single-vs. double-aluminized films. To accomplish good thermal performance, laminated winding, larger mesh size, a layer of net inserted between films, thinner film (light weight), and double-aluminized film are needed. The optimum number of layers for different parameters is also discussed. It is found that the optimum number of layers is in the range of 30 to 60 layers in many cases.

Key Words: Cryogenics, Thermal Insulation, Heat Transfer, Thermal Radiation, Multilayer Insulation

1. 序 論

超電導マグネットの実用化および普及に伴い高断熱性能化が極めて重要な課題となっている。高断熱化を図るうえで大きなウェイトを占めるものに多層断熱(MLI: Multilayer Insulation, 以下 MLI と記す)技術がある。MLI とは熱放射シールド面と低熱伝導性のスペーサとを交互に積層したものであり、たとえば熱放射シールド面としてはアルミニウムを片面あるいは両面に蒸着したポリエステル系フィルムを用い、スペーサとしてはポリエステル系ネットが用いられている。MLI 技術により高断熱化を図るには、MLI の熱侵入特性を把握する必要がある。具体的には熱侵入量を精度良く予測できる予測法を確立すること、そして MLI の熱侵入特性に及ぼす各種パラメータの影響を明らかにすることである。そのため著者らは MLI の熱侵入特性に関する研究を進めており、これまで MLI の熱侵入量予測式を導出し、簡便さ、精度、適用性に優れていることを確認している⁽¹⁾⁽²⁾。

これまで MLI の熱侵入特性については多くの研究者らによって調べられてきたが^{(3)~(6)}、その多くは層密度および層数をパラメータとしたものであった⁽³⁾⁽⁴⁾。確かに層密度は熱侵入量に大きく影響を及ぼす重要な因子であるが、MLI の実装において規定することが極めて難しいパラメータでもある。なぜなら、同じ MLI を用いても実装作業によって層密度は大きく変化し、また施工対象物の形状や設置状態によっても変化するためである。いわゆる施工定数と呼ばれるものである。したがって層密度をパラメータとして行った実験結果を直接実機に適用しても、断熱性能の予測がうまくできないのが実状であった。さて、MLI の断熱性能予測の難しさは施工定数の存在のほかに、パラメータが多いことにも原因がある。しかしこれまで種々のパラメータの影響を調べた実験結果は少なく、またあっても層密度の問題点からその影響度が明確とはいえなかった。層密度の問題点を解決する方法の一つにブランケット方式がある。たとえば MLI を 10 層 1 束とし所要所にミシンによる縫い目を入れ強制的に層密度をほぼ一定に保つ方法である。この方法によれば実装時の層密度を常に一定にでき、しかも実装作業も楽になるという利点がある。したがってこの方法により層密度の影響を排除した状態で実験を行えば、他

* 原稿受付 平成 4 年 11 月 2 日。

*¹ 正員、三菱電機(株)中央研究所 (〒661 尼崎市塚口本町8-1-1)。

*² 三菱電機(株)中央研究所。

のパラメータの影響を明らかにすることができる。このような考えから、ブランケット方式によるMLIの熱侵入量に関する実験を進めており、これまで真空度、巻付け方、施工面の形状、スペーサの影響などについて報告している⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

本論文ではその後の追試および新たな実験結果を加え、巻付け方、高温面温度、ネットの目の粗さ、ネットの挿入枚数、施工方向(層数)、アルミニウム蒸着の有無などの影響について述べる。また第2報において導出した予測式による計算値と実験値との比較をし、さらに予測式を用いて熱侵入量に及ぼす各種パラメータの依存性について考察する。

2. 実験方法

2.1 実験装置 実験装置を図1に示す。1の装置は既報⁽⁷⁾のものの改良品である。真空槽の中にその上下をガードタンクではさんだ蒸発タンクをつり下げ、タンクの周囲にMLIを巻き付ける構造である。タンクはすべて円筒状であり、上下のガードタンクは蒸発タンク上下面のMLI未施工部への熱侵入を遮断するために設けられている。蒸発タンクは表面温度を均一に保つためステンレススチール製円筒の表面に銅をはんだ付けしてある。これらのタンクに液体窒素をためることで低温側温度を規定することができる。蒸発タンクの周囲表面積はほぼ 0.5 m^2 である。なお、MLIの施工方向(垂直施工、水平施工)の影響を調べるため横置きにもできる構造とするため上下のガードタンクを結ぶ連通配管を2本としている。

一方、高温面としてタンクと真空空間を隔てて水槽が設けてある。水槽内にはブライン(不凍液の一種)を混入した水がためてある。この混合液は外部ポンプにより強制循環でき、やはり外部に取付けた熱交換器と温度調節器により温度を制御することができる。したがってこの流体により高温側温度を規定できる。真空槽内の真空引きはターボ分子ポンプによって行っている。このような構成により、MLIから侵入する熱は蒸

図1 実験装置概略

発タンク内の液体窒素の蒸発量となって現れる。その蒸発ガス流量を計測することで熱侵入量を求めることができる。また温度計測はクロメル-コンスタンタン熱電対にて行い、計測点は蒸発タンク外壁、水槽内壁、そしてMLI10層ごととした。

2.2 供試材料 測定に供したMLIは応研機材社製のもので、主な仕様は下記のとおりである。スペーサ用ネットには形番KN-20とKN-10を採用し、ここではそれぞれS(標準)ネット、R(粗目)ネットと呼ぶことにする。また本文中では用いたMLIを、例えば“6 D 30 lami-1 S”と記し、順番にフィルム厚さ、両面蒸着/片面蒸着、施工層数、巻き方、そして“-”の後はスペーサの挿入枚数、ネット目の粗さを表している。各パラメータには以下のものがある。

- ・フィルム厚さ(μm): 6, 9, 25
- ・蒸着面: D(両面), S(片面)
- ・施工層数: 10, 20, 30, 40, 50, 60
- ・巻き方: lami(ラミネート巻き), roll(ロール巻き)
- ・スペーサ挿入枚数: 1, 2, 3
- ・ネット目の粗さ: S(標準品), R(粗目品)

したがって表記の例は、 $6\mu\text{m}$ の両面蒸着フィルムと標準ネット1枚とを交互に積層したものを30層ラミネート巻きにしたことを表している。なお、層数および巻付け方の詳細については4章で述べる。

3. 熱侵入量予測基礎式

既報⁽¹⁾にて導いた予測基礎式は下式で与えられる。

$$q = (C_1 \sigma / N) T_N^4 + (C_2 / N + C_3 N^n) \Delta T \cdots \cdots (1)$$

ただし、 σ はStefan-Boltzmann定数、 N は施工層数、 T_N はMLI最外層の温度、 $\Delta T = (T_N - T_L)$ である。 T_L は低温槽温度である。式(1)の右辺第1項が熱放射量を、第2項が接触面に依存する熱伝導成分を、第3項がMLIの自重に起因する圧縮力による熱伝導成分を表している。熱放射量と熱伝導量との成分比は施工層数にもよるが、およそ1:(2~10)である。また第2項と第3項との成分比はMLIの種類および層数によって異なるが、通常のMLI、例えば6 D(N) lami-1 S, R などでは同程度である。

各種パラメータの変化に応じて予測式(1)における各係数 C_1 , C_2 , C_3 が変化するが、どのように変化するかを考える。まず C_1 は高温面側から低温面への実効熱放射率と放射面積との積にスペーサの屈折率の影響を考慮した値である。したがって屈折率の影響を考慮した実効熱放射率が E_0 から E に変化した場合、もとの係数 C_{10} に対して

$$C_1 = (E/E_0)C_{10} \dots\dots\dots (2)$$

となる。また C_2 は接触面の状態に依存する係数であるから、仮に接触面状態の変化により接触熱コンダクタンスが K_0 から K に変化した場合、もとの係数 C_{20} に対して

$$C_2 = (K/K_0)C_{20} \dots\dots\dots (3)$$

となる。一方 C_3 は圧縮力に依存する係数であり、MLI 自身の重さや層密度により変化する。それらの量が B_0 から B に変化した場合、もとの係数 C_{30} に対し

$$C_3 = (B/B_0)^n C_{30} \dots\dots\dots (4)$$

となる。ここで $n=0.5$ とし、式(2)~(4)を式(1)に代入すると、基になる予測式として 6 D(N)lami-1 S の垂直施工の場合を採用すれば次式が得られる。

$$q = \{0.014(E/E_0)\sigma/N\} T_N^4 + \{0.081(K/K_0)/N + 4.5 \times 10^{-4}(B/B_0)^{0.5} N^{0.5}\} \Delta T \dots\dots\dots (5)$$

さて、式(1)はある層数のときに最小熱侵入量を取る。つまり最適層数 N_0 が存在し、それは次式で与えられる。

$$N_0 = \{(C_1 \sigma T_N^4 + C_2 \Delta T) / n c_3 \Delta T\}^{1/(n+1)} \dots\dots (6)$$

式(6)より最適層数は各係数の値、つまり各パラメータによって変化することがわかる。

4. 各種パラメータの影響

10 層 1 束のブランケット方式を採用すると、たとえば応研機材社製のフィルム KF-6 B とネット KN-20 との組合せにおける垂直施工状態での実測によれば、10 層あたりの厚さは約 2.5 mm となった。層密度にして約 40 層/cm である。この値はあらゆる場合において極めて再現性の良いことを確認している。ここでいう 10 層の MLI とは 11 枚のネットの間にそれぞれ 1 枚ずつ計 10 枚のフィルムが入った MLI のことである。さてフィルム、ネットの 1 枚あたりの厚さはそれぞれ 0.006, 0.2 mm であるから、単純加算によると MLI 10 層の厚さは 2.26 mm となる。このことからミシン縫いをしたブランケット MLI は、おおむね自身の厚みで規定される層密度になっていることがわかる。先に述べた再現性の良さはこのためといえる。したがって、この方式によるブランケット MLI を施工することで実装における層密度のばらつきをなくすることができる。これはまた、同方式により MLI を施工した実機に対して本研究結果を直接適用できることを示している。

以下、各パラメータの影響について述べる。

4.1 巻き方の影響 MLI を数十層施工する場合にはブランケットを数周巻き付けることになる。この

ときの巻付け方としては 10 層ずつ積み重ねて巻くラミネート巻き(多重巻き)と、連続的に巻き付けるロール巻き(連続巻き)とがある⁽⁷⁾⁽⁸⁾。ラミネート巻きのほうが施工手間はかかるが、熱侵入量は小さくなる。なぜならラミネート巻きでは MLI に沿った周方向の熱伝導成分がないのに対し、ロール巻きでは MLI に沿った周方向の熱伝導成分が存在するためである。

熱侵入量に対する巻き方の影響を示したものが図 2 である。横軸は施工層数であり、縦軸は熱流束である。測定した MLI は 6 D(N)lami-1 S, 6 D(N)roll-1 S である。ラミネート巻きのほうがロール巻きより熱侵入量が小さいことがわかる。そして両者の差がそのまま周方向の熱伝導による熱侵入量とみなせる。ロール巻きとした場合の予測式は式(5)に周方向の熱伝導成分を付加した次式となる⁽²⁾。

$$q = (0.014 \sigma T_N^4 / N) + (0.081 / N + 4.5 \times 10^{-4} N^{0.5}) \Delta T + 9.7 \times 10^{-4} n \Delta T w / \{(N/n) - 1\} \dots\dots\dots (7)$$

式(7)右辺の最終項が周方向の熱伝導成分である。ただし $\Delta T w$ は第 2 報⁽²⁾の式(22)で与えられ、 $m=0.45$ である。なお n はブランケット層数である。各巻き方における予測値を図 2 に併載する。なお、ロール巻きの場合の計算値は第 2 報の式(22)において $j=5$ としたものである。どちらの巻き方も予測値と実験値はほぼ一致しているといえる。

さて式(7)によると、熱伝導量に占める各成分(第 2, 第 3, 第 4 項)の割合は同程度である。しかし周方向の熱伝導は施工面の寸法により変化する。たとえば円筒施工面を想定した場合、径が大きいほど小さくなり、熱侵入量全体に占める割合は小さくなる。したがって小形のマグネットではできる限りロール巻きを避けるべきであるが、中大型マグネットなどではロール巻きにしても断熱性能の劣化はそれほど大きくはなら

図 2 熱侵入特性に及ぼす巻き方の影響

ないことがわかる。ただし加速器用マグネットなどのように全長が長く MLI の全施工面積が非常に大きな場合には、ロール巻きとラミネート巻きのわずかな差がトータルでは大きな問題となることもある。またロール巻きの場合の最適層数 N_0 は、式(6)の分子に周方向熱伝導成分が付加されるため、ラミネート巻きに比べ大きくなることがわかる。

なお、これ以後記述する特性はラミネート巻きにおけるものである。

4.2 高温側温度の影響 MLI の熱侵入量は高温側の温度によっても変化する。その影響を 6 D 30 lami-1 R の垂直施工について調べた結果が図 3 である。予測式は第 2 報⁽²⁾の式(26)により高温側温度の影響を考慮した次式であり、 $T_H=300\text{ K}$ を基準としている。

$$q = (0.011\sigma T_H^4/N) + (0.027/N + 3.5 \times 10^{-4} N^{0.5}) \Delta T \times \{(T_H - T_L)/(T_{300} - T_L)\}^{M/m+1} \dots\dots\dots (8)$$

高温側温度の上昇とともに熱侵入量が増えるのは当然であるが、その依存性は四乗温度差ではなく一乗温度差といえる。これは MLI の熱侵入量は熱放射成分より熱伝導成分のほうが支配的であることを示している。予測式(8)の両成分の大きさは前述のように(熱放射量):(熱伝導量) = 1:(2~10)程度であり、この実験傾向を裏付けている。このことはまた、熱放射面を多層化することにより熱放射量の低減化は図れるが、よりいっそうの断熱化を図るには熱伝導成分の低減化を図らねばならないことを示している。参考のため図 3 には水平施工におけるデータも併載してある。

4.3 ネット目の粗さの影響 ネットは熱放射面であるアルミニウム蒸着フィルム同士の接触を避けるためのスペーサの役を担っている。したがって材質(熱伝導率)、目の粗さ(接触面積)、フィルム間への挿入枚

数(接触熱抵抗)によって MLI の熱侵入量が変わることが考えられる。材質については本研究ではポリエステルに固定しているため、残り二つの因子についてその影響を調べた。

目の粗さに関する実験結果を垂直施工の場合について図 4 に示す。図 4 は横軸が温度、縦軸が熱流束であり、測定に供した MLI は 6 D(N)lami-1 S と 6 D(N)lami-1 R である。R ネットのほうが S ネットに比べ熱侵入量は数十% 小さくなっている。したがって、R ネットのほうがかなり断熱性に優れていることがわかる。これはネットの目を粗くすることより接触面積が減少したこと、またネットの重さも軽くなり圧縮力が小さくなったためである。6 D(N)lami-1 R の垂直施工の場合の予測式は第 2 報で導いた

$$q = (0.011\sigma/N) T_H^4 + (0.027/N + 3.5 \times 10^{-4} N^{0.5}) \Delta T \dots\dots\dots (9)$$

で与えられる。S ネット、R ネットにおける計算値を実線で示してあるが、実験値とよく一致している。式(5)と式(9)とを比べると、R ネットにした場合には第 3 項の減少率に比べ第 2 項の減少率が大きいことがわかる。したがって、式(6)より R ネットにした場合の最適層数は S ネットに比べ小さくなることがわかる。

高断熱性能化の点から MLI として R ネットを使用するのがよいことは明白であるが、ネット目の粗さについては最適値が存在すると思われる。なぜなら、目を粗くするほど接触面積(伝導面積)および重量が減るため熱侵入量は減少するが、粗くし過ぎると今度はフィルム面同士が接触してしまい熱伝導分がかえって大きくなるためである。なお、ここで与えた予測式からネット目の最適粗さに関する情報を得ることはできない。

4.4 ネットの挿入枚数の影響 ネットの挿入枚

図 3 熱侵入特性に及ぼす高温側温度の影響

図 4 熱侵入特性に及ぼすネット目の粗さの影響

数を増やすと、接触熱抵抗が種々変化し熱伝導量に変化する。そこで熱侵入量に与えるネットの挿入枚数の影響を調べた。その結果を図5に示す。図5は横軸が挿入枚数、縦軸が熱流束である。測定したMLIは6 D 30 lami-1 S, 2 Sおよび6 D 30 lami-1 R, 2 R, 3 Rである。もしフィルム間熱伝導が伝導距離に大きく依存するのであれば熱放射量は等しいから、ネットの挿入枚数が増えるにつれ熱侵入量は減るはずである。しかしR ネット1枚挿入時および2枚挿入時の熱流束はほぼ同じ値であり、3枚挿入時には他の場合より大きな値となっている。これはネットを介したフィルム間の熱伝導成分は伝導距離に依存せず、接触熱抵抗(接触熱コンダクタンス)によって支配されていることを表している。

さて第2報において、ネットを複数枚挿入した場合の予測式を求めた。その予測式は以下の各式である。

$$q_{2S} = (0.014\sigma/N) T_N^4 + (0.066/N + 5.9 \times 10^{-4} N^{0.5}) \Delta T \dots\dots\dots (10)$$

$$q_{2R} = (0.011\sigma/N) T_N^4 + (0.016/N + 4.2 \times 10^{-4} N^{0.5}) \Delta T \dots\dots\dots (11)$$

$$q_{3R} = (0.011\sigma/N) T_N^4 + (0.011/N + 4.9 \times 10^{-4} N^{0.5}) \Delta T \dots\dots\dots (12)$$

式(10)による計算値を示したのが図5の破線であり、式(11), (12)による計算値を示したのが実線である。測定値と実験値とはほぼ一致していることがわかる。これよりネットの挿入枚数を増やすと、ネットとネット間の接触熱抵抗増加により熱伝導量は小さくなるものの重量増による熱伝導量の増大が大きく、結果として断熱性能が落ちることがわかる。またネットの挿入枚数を増やすと係数 C_2 が小さくなり、係数 C_3 が大きくなることから最適層数 N_0 は小さくなることもわかる。

以上に述べた結果から、ネットの挿入枚数は1枚で

よいことがわかる。

4.5 施工方向(施工層数)の影響 MLIの熱侵入特性には自身の重さによる圧縮力(self-compression)が大きく影響する。MLIを垂直面に施工した場合には、自身の重さによる圧縮力について考慮する必要はない。しかしMLI用あるいは加速器用の超電導マグネットにMLIを使用する場合には、水平円筒面上に設置するためMLI自身の重さによる圧縮力が加わることになる。したがってMLIを垂直施工(垂直円筒面上)とするか水平施工(水平円筒面上)とするかで熱侵入量特性が異なってくる。これらの違いを示したのが図6であり、横軸は層数、縦軸は熱流束である。垂直施工の場合、測定した施工層数の範囲ではおおむね施工層数が増えるにつれ熱侵入量は小さくなっている。また、水平施工の場合には層数が増えると初めのうちは熱侵入量が小さくなるが、ある程度まで増えると自重による圧縮力が大きくなりMLIが押し付けられ逆に熱侵入量は大きくなる。

水平円筒面上に施工した場合の圧縮力については大森⁽⁹⁾が理論解析を行っており、全周にわたる平均では自重の2倍の圧縮力が働くことを導いている。一方、垂直施工の場合、少なくともMLI自身が円筒面からずり落ちないための締付け力が必要となる。つまり、垂直施工の場合にはMLIの自重相当の圧縮力が働いていると考えられる。このことを踏まえて求めた水平施工の場合の予測式が、S ネットにおいて

$$q_{hS} = (0.014\sigma/N) T_N^4 + (0.081/N + 6.3 \times 10^{-4} N^{0.5}) \Delta T \dots\dots\dots (13)$$

であり、R ネットにおいて

$$q_{hR} = (0.011\sigma/N) T_N^4 + (0.027/N + 5.0 \times 10^{-4} N^{0.5}) \Delta T \dots\dots\dots (14)$$

である。垂直施工時の予測式は先に示したように、S ネットでは式(5)、R ネットでは式(9)である。これ

図5 熱侵入特性に及ぼすネット挿入枚数の影響

図6 熱侵入特性に及ぼす施工方向の影響

らの各予測式による計算値も図6中に実線で示してある。実験値と良く一致していることがわかる。

各ケースにおける予測式から、式(6)により最適層数 N_0 を求めてみると、 $T_H = 300\text{ K}$ において

$$\begin{aligned} (N_0)_{vs} &= 62 & (N_0)_{hs} &= 49 \\ (N_0)_{vr} &= 43 & (N_0)_{hr} &= 34 \end{aligned} \quad \cdots \cdots (15)$$

となる。ただし添字の s, r がネット目の粗さを表し、 v, h が垂直施工、水平施工を表している。水平施工時の計算値は実験値と良く一致している。また垂直施工時にしても、本実験範囲は最適層数が明確に現れる範囲ではないため厳密な確認はできないが、実験曲線の傾向から判断してほぼ一致すると思われる。MLIの施工層数は施工作業性、コスト、真空引き作業性などから決める必要があるが、上限値は40～50層程度とすべきであることがわかる。また水平施工の場合の最適層数は垂直施工に比べ小さくなる。これは水平施工では垂直施工に対し圧縮力が2倍になり C_3 が大きくなるためである。

4・6 フィルム厚の影響 フィルム厚さはMLIの重量変化として熱侵入量に影響を及ぼす。したがってフィルム厚さが変化したときの予測式は、Sネットでは垂直施工の場合、式(6)の C_1, C_2 の変化率を1とした

$$\begin{aligned} q_{vs} &= (0.014\sigma/N) T_H^4 + \{0.081/N \\ &+ 4.5 \times 10^{-4} (B/B_0)^{0.5} N^{0.5}\} \Delta T \end{aligned} \quad \cdots \cdots (16)$$

において、 B_0 をフィルム厚さ $6\text{ }\mu\text{m}$ のMLIの重量とし、 B に各フィルム厚さのMLI重量を代入すれば求められる。また水平施工の場合には式(13)より得られる予測式

$$\begin{aligned} q_{hs} &= (0.014\sigma/N) T_H^4 + \{0.081/N \\ &+ 6.3 \times 10^{-4} (B/B_0)^{0.5} N^{0.5}\} \Delta T \end{aligned} \quad \cdots \cdots (17)$$

に対し、垂直施工と同様の取扱いをすれば求められる。これらの予測式による計算値を示したのが図7の実線および破線である。図7の横軸はフィルム厚さであり、縦軸は熱流束である。

さて、一般に利用されている蒸着フィルムの厚さは $6 \sim 25\text{ }\mu\text{m}$ である。フィルムの役割である反射膜としての機能、フィルムの厚さ方向温度差の抑制などの点では、上記の厚さの範囲で有意な差はない。差異が生じるのは先に述べた自重による影響と施工時の作業性である。そこでフィルム厚さが熱侵入量に与える影響について、6, 9, 25 D 20 lami-1 S のMLIについて熱侵入量を測定した。その結果を図7に併載する。測定値は予測値とだいたい一致している。熱侵入量はフィルムの厚さが薄くなるほど小さくなる傾向があるが、これは垂直施工、水平施工とも同じである。したが

って高断熱性能化の点では、薄いフィルムが良い選択といえる。ただしフィルムの厚さを薄くすると、重量が減り係数 C_3 が小さくなるため最適層数 N_0 は大きくなる。

一方、作業性については $10\text{ }\mu\text{m}$ 前後が良好である。あまり薄くしすぎると腰がなく破れやすくなるという問題が生じ、また逆にあまり厚くなると重くなりしかも固くなるため扱いにくくなる。しかし $6\text{ }\mu\text{m}$ 程度の薄さでもミシン縫いをしたブランケット方式とすることで施工作業性の問題をほぼなくすることができる。

以上、熱侵入特性、施工作業性の点から厚さ $6 \sim 10\text{ }\mu\text{m}$ 程度のフィルムが実用上良いといえる。

4・7 蒸着の有無の影響 MLIの熱侵入量には熱放射と接触熱抵抗が効いている。熱放射成分に対してはアルミニウムを蒸着面とする限り現状以上の低減化が難しいため、断熱性能の向上を図るには接触熱抵抗を大きくする方法が有力となる。接触熱抵抗に影響を及ぼす因子は、接触体の材質、接触面の表面粗さ、接触面積、それと押付け力であることはすでに述べた。そして、接触面積および押付け力(圧縮力)についてはその影響を調べ、結果をすでに述べている。そこで接触面の材質を変えることによって、高断熱化が図れるか否かを調べることにした。

接触面の材質の効果を見るため、片面蒸着フィルムによるMLIの熱侵入量を調べた。片面蒸着フィルムを使用することにより、アルミニウム蒸着面とポリエステルネット面との接触数の半数をポリエステル面同士の接触にすることができるためである。ただし蒸着の有無による接触熱抵抗の違いだけを見るため、蒸発タンクおよび水槽に対向する面は必ず蒸着面としている。つまり、MLIの最外層あるいは最内層のみ両面蒸着フィルムを用いている。この場合については実験に先立ち予測値を求めている。予測式は第2報に示した

図7 熱侵入特性に及ぼすフィルム厚さの影響

式(19)より次式で与えられる。

$$q_{uss} = (0.028/N) T_H^4 + [0.162/\{(1+n)N\} + 4.5 \times 10^{-4} N^{0.5}] \Delta T \dots\dots\dots (18)$$

$$q_{vsr} = (0.022\sigma/N) T_H^4 + [0.054/\{(1+\eta)N\} + 3.5 \times 10^{-4} N^{0.5}] \Delta T \dots\dots\dots (19)$$

ここで η は蒸着面とネット間の接触熱抵抗と非蒸着面とネット間の接触熱抵抗との比を表している。式(18)、(19)はそれぞれ6 D 30 lami-1 S, 1 Rの場合であり、どちらも垂直施工の場合である。図8に予測値と測定値との比較を示す。横軸は η であり、縦軸は熱流束である。横軸に平行に引いた細線および細破線が測定値であり、実線および破線がそれぞれ式(18)、(19)による予測値である。Sネット、Rネットとも予測値と測定値とは良く一致している。そして両ネットにおける予測値と測定値との一致性の点から η は1程度であることがわかる。これはポリエステルフィルムとポリエステルネット間の接触熱抵抗がアルミニウム蒸着面とポリエステルネット間の接触熱抵抗とほぼ同じ値であることを示している。通常の接触熱抵抗を考えた場合、接触面の熱伝導率の違いが大きく影響するが、ここではあまり影響していないことになる。これは通常の接触熱抵抗は押付け力が数十 kg/cm² 以上の場合を論じているのに対し、MLIの押付け力は数百 g/m² 程度であり押付け力のオーダーが大きく異なり、それに加え非蒸着面でも極めてなめらかな表面であり蒸着面の表面粗さと同程度であるためと思われる。あるいは接触熱抵抗を支配するのがフィルム面ではなくネット面であるためとも考えられる。

以上のように片面蒸着を用いても接触熱抵抗の増大による断熱性能の向上は期待できず、むしろ熱放射量が両面蒸着に比べ2倍となるため断熱性能は劣化する。したがって断熱性能の点から両面蒸着フィルムを用いる必要のあることがわかる。

4-8 MLIの層温度について 垂直施工の場合、同一フィルム面内の周上温度は一定である。しかし水平施工の場合には同一フィルム面内の周上温度はその位置により変化する。これは周方向位置により圧縮力が変わるためである。そこで水平施工時の同一フィルム層内の代表温度について調べた。その結果、水平施工では円筒面の上下の温度の平均値、あるいは真横(上下に対し90°ずれる)位置の温度を採用すれば、垂直施工の場合と同様の扱いができることがわかった。

また、測定によれば低温側温度とMLI最内層温度とは大きな温度差が生じており、一方MLI最外層温度と高温側温度とは数°Cしか差がない。これらの特性は熱放射量のみを考えた熱バランスから得られる特性

図8 熱侵入量特性に及ぼす蒸着の有無の影響

である。もし低温側における熱コンダクタンスが大きければ、低温側に大きな温度差は生じない。したがって、低温側では熱コンダクタンスが小さくなっていることがわかる。さらに高温側にはわずかな温度差しか生じないことから、MLIの最外層フィルム上にネットがあれば真空槽(高温槽)と接触しても熱侵入量の大きな増加にはならないことがわかる。なぜなら、MLIの最外層フィルムの温度は常温真空槽に対しわずか数°Cしか低くなく、仮に接触したことで最外層フィルムの温度が少々上昇したとしても熱侵入量の増加は数%程度にしかすぎないからである。さらにネットがない場合でも、最外層フィルムが真空槽に接触し真空槽と同じ温度になったとしても、そのときはMLIの施工層数が1層分だけ少ない場合と等価になるにすぎない。したがってたとえば10層以下のような施工層数が少ない場合を除き、高温槽に最外層フィルムが接触しても大きな問題とはならない。

5. 結 論

MLIの要所にミシン縫い目を入れたブランケット方式を採用することで層密度の影響をなくし、他のパラメータがMLIの熱侵入特性に与える影響を実験的に調べた。そして実験結果および熱侵入量予測式から各種パラメータの影響について考察し、以下の知見を得ることができた。

(1) 巻き方 基本的にラミネート巻きがよいが、施工周長の長いマグネットではロール巻きでも断熱性能の劣化は小さい。また最適層数はラミネート巻きのほうが小さい。

(2) ネット目の粗さと挿入枚数 施工方向によらずRネット(KN-10)のほうがSネット(KN-20)より断熱性能が良く、最適層数は小さくなる。ネットの

場合挿入枚数は1枚で十分である。

(3) 施工方向 水平円筒上に施工した場合、垂直円筒上の場合に比べ熱侵入量は数割大きくなり、最適層数は小さくなる。

(4) フィルム厚さ 軽量化、作業性から数 μm ～10 μm 程度がよい。

(5) 蒸着の有無 断熱性能の点で片面蒸着より両面蒸着のほうがよい。これはポリエステルフィルム面とポリエステルネット間の接触熱抵抗が蒸着面とポリエステルネット間のそれと同程度の値となるためである。

(6) MLIの高温槽への接触 MLIの施工層数が10層以下のように少ない場合を除き、接触しても断熱性能の劣化は小さく、劣化量は10%以下である。

(7) 施工層数 施工層数は断熱性能の点から最適層数とするのがよく、MLIのコストの点を考え合わせると最適層数以下とするのがよい。最適層数はMLI

により異なるが、一般的には40～50層程度である。

(8) 重量 フィルム、ネットとも軽いほどよい。

文 献

- (1) 天野, 機論, 59-563, B(1993), 2142.
- (2) 天野, 機論, 60-569, B(1994), 284.
- (3) Cunnington, G. R. and Tien, C. L., *AIAA Paper*, No. 69-607 (1969).
- (4) 稲井, 機論, 43-365 (1977), 217.
- (5) Shu, Q. S., ほか2名, *Adv. Cryo. Eng.*, 33 (1988), 291.
- (6) Taneda, M., ほか3名, *Adv. Cryo. Eng.*, 33 (1988), 305.
- (7) Amano, T., ほか2名, *Proc. 12th Int. Cryo. Eng. Conf.*, (1988), 162.
- (8) 天野・ほか3名, 三菱電気技報, 66-5 (1992), 15.
- (9) Ohmori, T., *Proc. Int. Symp. New Develop. Appl. Superconduct.*, (1988), 455.
- (10) 天野, 機論, 56-521, ABC (1990), 146.