

超伝導送電用低温配管の 断熱性能向上に関する研究

渡邊裕文

Study to improve thermal insulation performance of cryogenic pipes for superconducting power transmission

Hirofumi Watanabe

Thermal insulation performance by different wrapping methods of multi-layer insulation (MLI) was experimentally investigated to improve the thermal insulation performance of cryogenic pipes for superconducting power transmission. The experiments were performed with vertical and horizontal boil-off calorimeters, in which boil-off nitrogen gas resulting from heat leak through MLI to the liquid nitrogen filled in the calorimeters was measured. In the measurements with the vertical calorimeter, when the wrapping of MLI was tightened, the increase of the heat leak was measured. Furthermore, when the results measured with the vertical and horizontal calorimeters were compared, the heat leak of the horizontal calorimeter was larger than that of the vertical calorimeter. In both cases, it is considered that the contact thermal resistance was reduced due to the compression of MLI by tightening or its own weight, which resulted in the increase of the heat leak.

Keywords : *Cryogenic pipe, Superconducting power transmission, Thermal insulation, Multi-layer Insulation*

1. はじめに

中部大学では、エネルギー損失の少ない送電システムを確立するために超伝導直流送電の研究を行っている^{1,2,3)}。電気抵抗ゼロの超伝導を利用した超伝導直流送電を含む超伝導送電では、電気抵抗による発熱がないため損失の少ない送電が可能になる。一方、超伝導送電では超伝導を利用するために-200℃程度の極低温が必要となる。そのため、送電を行う超伝導ケーブルは送電路となる低温配管の中で循環する液体窒素などの極低温液化ガスにより冷却されるが、その冷却に必要なエネルギーが実質的な超伝導送電の損失となる。従って、超伝導送電が真にエネルギー損失の少ない送電システムとなるにはこのエネルギーを極限まで減らす必要がある。この方法は主に二つある。一つは効率良く低温を作ることであり、もう一つは低温への熱負荷を減らすことである。前者は高効率の冷凍機を開発することに対応し、後者は高断熱の低温配管を開発することに対応する。ここで、冷却に必要な電力を検討する。低温配管の低温部分への単位面積当たりの熱侵入量 q 、送電距離 L 、液体窒素の密度 ρ 、液体窒素の比熱 C 、管径 D 、ケーブル径

d 、冷却ステーション間での液体窒素の許容温度差 dT 、管摩擦係数 λ 、冷凍機効率 η_c 、循環ポンプ効率 η_p とすると、冷却に必要な電力 P は

$$P = \frac{1}{\eta_c} q \pi D L + \left(1 + \frac{1}{\eta_c}\right) \frac{8 \pi \lambda q^3 D^3 L^4}{\eta_p \rho^2 C^3 d T^3 (D^2 - d^2)^2 (D - d)} \quad (1)$$

と表すことができる。この式で右辺第 1 項は低温への熱侵入による熱を冷却するのに必要な電力を表し、第 2 項は循環に必要な電力及び循環の摩擦損失による低温への熱負荷を冷却するのに必要な電力を表す。この式から分かるように短距離送電では右辺第 1 項が効くものの、長距離送電では、右辺第 2 項は送電距離の 4 乗に比例するため、循環に関わる電力消費が極めて大きくなる。液体窒素密度と比熱は物性値であり変えることはできない。また、ケーブル径と許容温度差はケーブル設計で決まるため大きく変えることはできない。そのため、冷却に必要な電力を減らすためには冷凍機又は循環ポンプの効率を上げるか、熱侵入量を減らすか、管径を大きくするかが基本であると考えられる。中でも、熱侵入量の削減は熱侵入と循環に関わる熱負荷の両者を同時に減らすだけで無く、熱侵入量は必要電力に対して 3 乗に比例するため、その削減は低損失化のために効果が大きい。このため、我々は超伝導送電用低温配管の断熱に注目して研究を行っている。

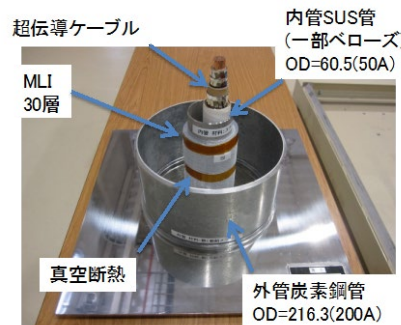


図 1 超伝導送電用低温配管模型

超伝導送電用の低温配管は様々なタイプがあるが、例として中部大学の 200 m 超伝導直流送電実験装置の低温配管の模型を図 1 に示す⁴⁾。超伝導送電用の低温配管の基本構造は真空隔壁となる外管の中に、超伝導ケーブルが設置され液体窒素が流され極低温となる内管が設置された二重管であり、外管と内管の間を真空にすることにより真空断熱が行われる。また、通常、放射による熱侵入を減らすために多層断熱材(Multi-Layer Insulation, MLI)が用いられる⁵⁾。

MLI はアルミなどを蒸着した薄くて軽いフィルムを放射シールドとして多数重ねることで多重鏡面反射により放射伝熱を低減し、それらの間に熱伝導率の小さいスペーサーを挟み、接触熱抵抗を大きくすることで伝導伝熱を低減する。MLI は極低温の断熱には最も有効な断熱材の一つとされ、現在、MLI を用いた真空断熱技術は極低温の断熱技術の主流となっている。しかしながら、MLI は薄くて軽いフィルムの積層体であり、層間の接触熱抵抗は層間圧縮圧の影響を受けるため、その断熱性能の予測は困難であるという問題点がある。実際に我々は、今まで行った超伝導直流送電の実証研究により、MLI の施工の仕方の違いにより低温への熱侵入量がかなり異なることを経験してきた^{6,7)}。現在、MLI を施工するには可能な限り「緩く」巻き付けることが常識となっているが、どのように緩く巻き付ければ良いのかは明確にはなっていない。これらのことから MLI の断熱性能を測定するためのカロリメーターに MLI を実際に巻き付け、断熱性能を評価することにより、どのような方法で MLI を施工すると断熱性能がより良い超伝導送電用低温配管を実現できるか研究を行っている。

2. MLI の断熱性能測定用カロリメーター

実験には縦型及び横型のガードタンク付きボイル・オフ・カロリメーターを用いる。ボイル・オフ・カ

ロリメーターは、真空容器となる外管と、MLI を巻き付け、液体窒素を充填する液体窒素タンクから構成される⁸⁾。MLI を巻いた液体窒素タンクは真空中に置かれ、液体窒素が充填される。MLI を通過した熱により蒸発した窒素ガスの流量を測定することにより、それに比例する MLI の通過熱量を求める。MLI の断熱性能測定用のボイル・オフ・カロリメーターには通常液体窒素タンクの軸方向からの熱の侵入を防ぐため、ガードタンクと呼ばれる液体窒素タンクが軸方向上下に取り付けられる。また、熱侵入量は外管温度に依存するため、外管温度は外管に巻き付けられたヒーター等により制御される。

用いた縦型のカロリメーターの模式図を図 2 に示す。縦型カロリメーターの液体窒素タンクの全長は 1.2 m である。測定用の中タンクは 600 mm、ガード用の上下タンクは 290 mm であり、それぞれの間に 10 mm の隙間がある。液体窒素タンクの外径は 89.1 mm であり、実際の超伝導送電用の低温配管を模擬する 80A 配管の径に対応している。また、外管の内径は 159.6 mm である。横型のカロリメーターの模式図を図 3 に示す。超伝導送電用の低温配管は通常横置きで使用され、MLI は自重により管の上側では圧縮され、下側では緩む。そのため、熱の伝わり方は縦型のカロリメーターで測定した場合と異なると考えられる。カロリメーターを横型にすることで、実際の低温配管を模擬することができる。横型カロリメーターの液体窒素タンクの全長は 1 m である。測定用の中タンクは 500 mm、ガード用の上下タンクは 240 mm であり、それぞれの間に 10 mm の隙間がある。縦型同様、液体窒素タンクの外径は 89.1 mm であり、外管の内径は 159.6 mm である。

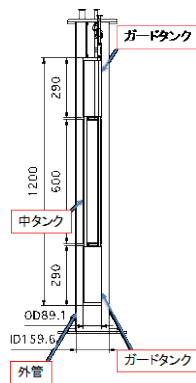


図 2 縦型カロリメーター模式図

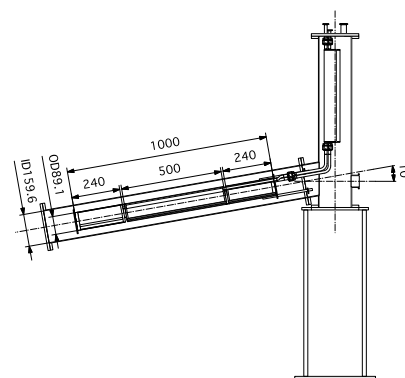


図 3 横型カロリメーター模式図

3. 実験方法

MLI の巻き方として三種類の巻き方を対象として実験を行った。それらの模式図を図 4 に示す。一つ目はブランケット巻きと呼び、MLI のフィルムを積層して片側を縫い付けてブランケット化したものを巻き付ける方法。二つ目はスイスロール巻きと呼び、一枚のフィルムをスイスロール状に連続に巻き付ける方法。三つ目は交互巻きと呼び、一層ずつ、重ね合わせ部分をタンクに対し反対側になるように交互に巻き付ける方法である。実験に用いた MLI は栃木カネカ製 KFHN-9B05 であり、これは 9 μm のポリエステルフィルムにアルミを両面蒸着したものと、5 g/m^2 の不織布を交互に積層したものである。一層の厚みは合わせて 100 μm 程度である。実験ではこれを 7 層巻き付けた。

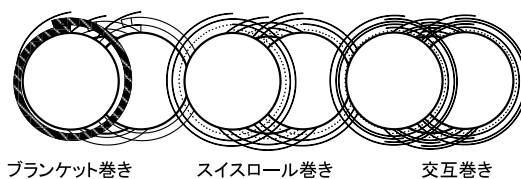


図 4 実験の対象とした MLI の巻き方の模式図

実験では液体窒素タンクに MLI を巻き付けた後、タンクを外管内に設置し、真空引きを行った。MLI からの放出ガスが枯れるのを待ため 100 時間以上待ち、液体窒素を充填した。全体の温度が一様になるのを待ため一晩程度待ち、液体窒素を再充填後、流量計を接続し、蒸発窒素ガス流量を測定した。外管温度は温度調節器とヒーターにより制御し、設定温度は 25-50℃とした。蒸発窒素ガス流量に加え液体窒素タンク各部の温度、外管各部の温度、真空度を測定した。

4. 結果と考察

図 5 に測定結果の例を示す。この結果は縦型カロリメーターを用いたスイスロール巻きに対する結果（外管温度 39.4℃）である。横軸は時間、左側の縦軸は中タンク入口の熱電対で測定された温度（TL4）、右側の軸は窒素ガス流量である。解析には TL4 の温度が上昇後 1 時間のデータを中タンク満液時のデータとして用いる。窒素ガス流量 Q (20℃, 1 atm) [L/min]、中タンクの長さ L [m] とすると、中タンク 1 m 当たりの熱侵入量 q [W/m] は

$$q = \frac{3.86 \times Q}{L} \quad (2)$$

と表される。ここで、縦型の場合 $L = 0.6$ m、横型の場合 $L = 0.5$ m である。

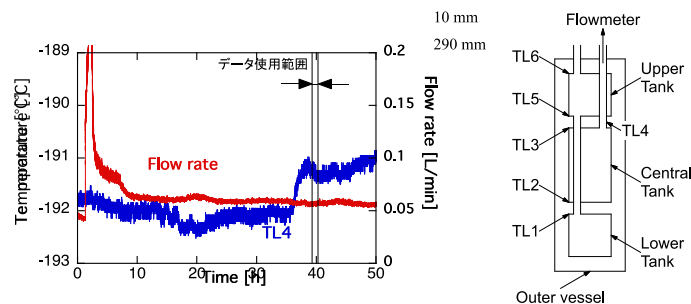


図 5 外管温度 39.4℃における中タンク入口温度と窒素ガス流量

図 6 に縦型のカロリメーターを用いて測定したブランケット巻き、スイスロール巻き、交互巻きの熱侵入量の外管温度依存性を示す。全ての巻き方で外管温度が上昇するに連れて熱侵入量が増加している。ブランケット巻き、スイスロール巻きは巻き方が異なるにも関わらず同程度の熱侵入量なのに対して、交互巻きはそれらの 84%程度と少ない熱侵入量であった。この原因が交互巻きが MLI の外側の層ほど緩く巻き付けていたのに対し、ブランケット巻きとスイスロール巻きは同周長で巻きつけていたことにありと考へ、スイスロール巻きで外側の層ほど緩く巻き付け熱侵入量の測定を行った。結果を図 7 に示す。緩く巻き付けた物は同周長で巻き付けたものに比べ著しく熱侵入量が減少していることが分かる。同周長の場合、外側から押さえつけられることにより接触熱抵抗が減少し、熱侵入量が増加したものと考えられる。

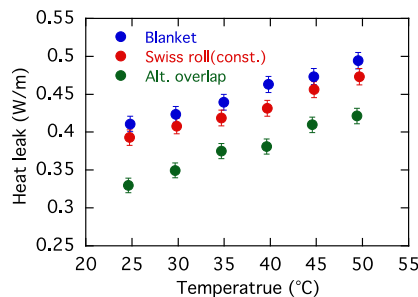


図 6 ブランケット巻き(Blanket)、スイスロール巻き(Swiss roll)、交互巻き(Alt. overlap)での熱侵入量の外管温度依存性

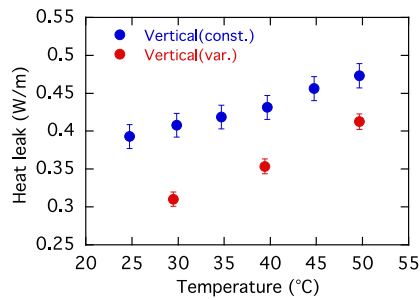


図 7 縦型カロリメーターを用いスイスロール巻きの周長一定で巻いた場合(const.)と外側ほど緩く巻いた場合(var.)の熱侵入量の外管温度依存性

図 8 にスイスロール巻きで外側の層ほど緩く巻き付けた場合について、縦型と横型のカロリメーターで熱侵入量を測定した結果を示す。横型の結果が縦型の結果に比べ僅かに熱侵入量が大きくなっている。7 層という比較的少ない層数においても、横置きの場合自重による圧縮力で層間の接触熱抵抗が低下し熱侵入量が増加したものと考えられる。

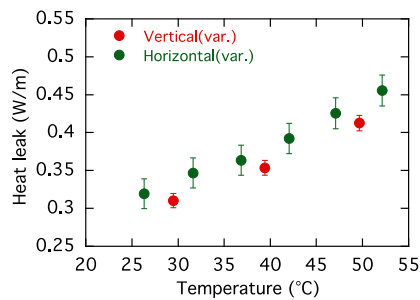


図 8 スイスロール巻きで外側ほど緩く巻いた場合の縦型(Vertical)と横型(Horizontal)カロリメーターで測定した熱侵入量の外管温度依存性

5. まとめ

縦型と横型のボイル・オフ・カロリメーターを用い、MLI の巻き方の違いによる断熱性能への影響を実験的に調べた。実験に用いた MLI は栃木カネカ製の KFHN-9B05 であり、これを 7 層のブランケット巻き、スイスロール巻き、交互巻きとしてカロリメーターに施工し、実験を行った。カロリメーターの外管温度に対する熱侵入量の依存性を測定すると、外管温度上昇と共に熱侵入量は増加した。縦型のカロリメーターを用いた測定では外側から締め付けられる巻き方をすると熱侵入量が増加することが確認された。また、縦型と横型のカロリメーターを用いた測定の結果を比較すると横型の測定では MLI の自重の影響で熱侵入量が増加することが確認された。これらは、締め付け又は自重により MLI が圧縮され接触熱抵抗が減少し熱侵入量が増加したものと考えられる。今後、更に巻きつけ強さや層数を変更したパラメーター・サーベイを行うことで MLI の施工条件による断熱性能変化の系統性を調べ、より断熱性能を良くする MLI の施工方法を求める予定である。

謝辞

本研究は中部大学先端研究センター 2023 年度プロジェクト 8 の援助を受け遂行されたものであり、ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) S. Yamaguchi *et al.*, J. Phys.: Conf. Series **97**, 012290 (2008).
- 2) S. Yamaguchi *et al.*, Physica C **471**, 1300 (2011).
- 3) N. Chikumoto *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **26**, 5402204 (2016).
- 4) H. Watanabe *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **26**, 5400504 (2016).
- 5) T. Ohmori, J. Cryo. Super. Soc. Jpn. **51**, 248 (2016).
- 6) H. Watanabe *et al.*, Physics Procedia **67**, 239 (2015).
- 7) H. Watanabe *et al.*, J. Phys.: Conf. Series **1590**, 012059 (2020).
- 8) T. Ohmori, J. Cryo. Super. Soc. Jpn. **51**, 312 (2016).