

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 20 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630104

研究課題名(和文) ヒートパイプを適用した長距離送電用伝導冷却型超電導ケーブルの冷却特性に関する研究

研究課題名(英文) Cooling characteristics of conduction-cooled superconducting cable with heat pipe for long distance electric power transmission

研究代表者

津田 理 (TSUDA, Makoto)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10267411

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、日本と大陸間の海峡横断電力ケーブルに高温超電導ケーブルを適用する場合のボトルネックとなるケーブル長尺化に対して、ヒートパイプの超電導ケーブルへの適用の有効性を検証するものである。まず、ヒートパイプを適用したHTSケーブルの基本設計を行い、ヒートパイプの基礎実験と三次元有限要素法熱解析により、従来のHTSケーブルとの冷却特性の違い、長距離送電用ケーブルに適したヒートパイプの構成方法等について検討した。その結果、ヒートパイプの適用によりケーブルの等価熱伝導率が大幅に改善されること、ヒートパイプを最外相の銅安定化層とHTS層間に適用することでケーブル長を効果的に長くできること等がわかった。

研究成果の概要(英文)：This research has been performed to verify the effectiveness of application of heat pipe to HTS cable for solving the bottleneck of lengthening the HTS cable for connecting Japan and the Asian continent. The basic design of the HTS cable with the heat pipe was performed by thermal analysis based on the three-dimensional finite element method. The difference of cooling characteristics between the HTS cables with/without the heat pipe and the constituting method of the HTS cable with the heat pipe effective for long distance electric power transmission were also investigated both experimentally and analytically. It was revealed as results that the equivalent thermal conductivity of an HTS cable and the HTS cable length could be greatly improved by applying a heat pipe between the HTS and copper stabilization layers in the outermost layer of a tri-axial HTS cable.

研究分野：超電導応用

キーワード：超電導ケーブル ヒートパイプ 冷却特性

1. 研究開始当初の背景

近年、太陽光発電や風力発電など自然エネルギーの活用について盛んに検討されており、導入量も年々増加している。しかし、現在の日本は、エネルギー源となる化石燃料を100%近く輸入に頼っており、自然エネルギーだけで国内の消費エネルギーを賄うことは不可能である。以上を踏まえ、アジア各国を送電線で結び、各国の風力発電や太陽光発電で発電した電力を各国間でやりとりするという構想が立ち上がっている。しかし、日本は島国であり、大陸との間で電力をやりとりするには、海峡を横断するための低損失型電力ケーブルが不可欠となる。これには超電導ケーブルが有効であるが、現在、国家プロジェクトで研究開発が進められている超電導ケーブルは、交流用の三相一括型超電導ケーブルであり、液体窒素冷却時の冷却可能距離は数 km と非常に短い。

そこで、超電導線材使用量が三相一括型ケーブルの半分程度でよい三相一軸ケーブルに着目し、これまでに、三相一括型よりも交流損失を大幅に削減でき、液体窒素冷却時の冷却可能距離を数十 km 以上にできることを明らかにしてきた。しかし、大陸間距離は最低でも 50km と言われており、更なる冷却効率の改善が不可欠となる。液体窒素冷却型超電導ケーブルは、冷媒である液体窒素を長距離にわたって循環させる必要があり、この時の圧力損失が冷却可能距離の長距離化を困難にさせている。

以上を踏まえ、圧力損失による制約を受けずに、超電導ケーブル内の発熱や侵入熱を速やかに排除する方法の一つとして、ヒートパイプを超電導ケーブルに適用する方法を考え、その冷却特性の評価を通じて、その実現可能性を検証することにした。

2. 研究の目的

本研究では、日本の将来のエネルギー確保に不可欠な、日本と大陸間の低損失型海峡横断電力ケーブルに超電導ケーブルを適用する場合のボトルネックとなる、冷却可能距離の長距離化のブレイクスルーを目指し、ヒートパイプ用いた超電導ケーブルの実現可能性を検証することを目的としている。

3. 研究の方法

まず、ヒートパイプを適用した伝導冷却型超電導ケーブルの基本設計を行い、三次元有限要素法熱解析を用いて、従来の液体窒素冷却型ケーブルとの冷却特性の違いについて検討した。また、長距離送電用超電導ケーブルに適したヒートパイプの構成方法やケーブル断面構成方法について検討した。そして、ヒートパイプを用いたモデルケーブルを製作し、ケーブル長手方向の温度分布測定を通じて、ヒートパイプの高熱伝導性と実現可能性について検討した。

4. 研究成果

(1) ヒートパイプを適用した三相同軸型ケーブルの冷却特性と長尺化に関する解析

通常の三相同軸型ケーブルは内側流路と外側流路が存在し、それらに液体窒素が満たされている。このため三相同軸型ケーブルにヒートパイプを適用する方法としては、以下の4つの方法が考えられる。

- 内側流路をヒートパイプに置き換える
- 外側流路をヒートパイプに置き換える
- 内側流路と外側流路の両方をヒートパイプに置き換える
- ケーブル導体部にヒートパイプを挿入する

従来の液体窒素流路をヒートパイプに置き換えるメリットとしては、液体窒素の沸点温度 77 K 以上の温度でヒートパイプを作動させることができ、ケーブルの冷却特性の改善を見込めることや、ケーブル内で発生する損失の中で支配的となる冷媒の圧力損失を考慮しなくてもよくなることが考えられる。また、導体部にヒートパイプを挿入するメリットとしては、導体部で発生した熱をヒートパイプで吸熱することにより、冷媒への熱伝達量を抑制し、冷却特性の改善を見込めることが挙げられる。

以上の点を踏まえ、まず、三相同軸型ケーブルの平衡モデルを用いて、通常の三相同軸型ケーブルの熱特性、流体特性解析を行い、ケーブル内部の温度分布を解析した。本解析に使用した解析モデル図を図1に示す。

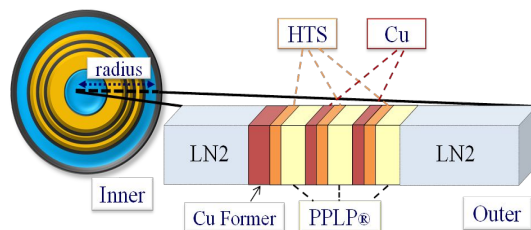


図1 三相同軸型ケーブルの解析モデル

本解析では、有限要素法を用いて、以下の熱平衡方程式を数値解析し、ケーブル内部の温度分布を評価した。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q$$

ここで、T [K]は温度、 ρ [kg/m³]は密度、c [J/kg/K]は定圧比熱、k [J/m/K]は熱伝導率、Q [W/m³]は発熱項である。発熱項 Q では、超電導線内の超電導層で発生する交流損失、銅フォーマ層や銅安定化層で発生する渦電流損失、絶縁層で発生する誘電損失、流体の摩擦損失を考慮している。なお、三相同軸型ケーブルは回転対称な構造であるため、回転対象3次元解析を行っている。また、液体窒素のフロー経路については、リターンパスが不要で、リターンパスで生じる熱侵入を考慮する必要が無い向流方式(図2)を採用した。

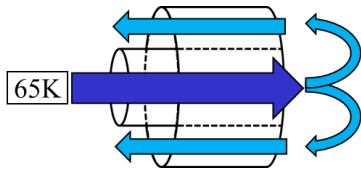


図2 液体窒素のフロー経路

本熱解析における境界条件は、ケーブル半径方向外側から液体窒素への侵入熱を熱流束で与え、ケーブルの入口と出口については、導体部では断熱条件、液体窒素部では、液体窒素流入部分に固定境界条件として 65K を、向流における液体窒素の復路流入部では、固定境界条件として、往路流出部の液体窒素温度の平均値を、復路流出部では自由境界条件を与えた。

解析結果のうち、液体窒素流量 20 liter/min、ケーブル長 100 m、ケーブル導体内半径 23.5 mm、外半径 41.0 mm で、内側流路断面積と外側流路断面積が同じになる場合におけるケーブル断面における温度分布を図3に示す。

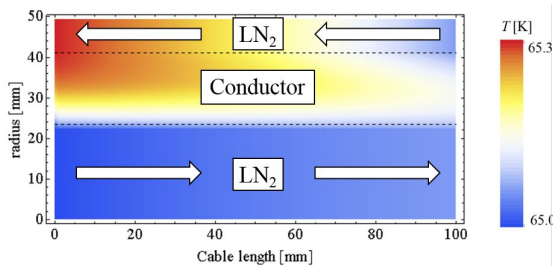


図3 温度分布解析結果例 (100 m)

図3より、冷媒の復路出口における温度がケーブル内部で最高となり、外側流路の冷媒の温度上昇を抑制することが冷却特性改善に有効となることがわかった。このため、外側流路の液体窒素の温度上昇に影響を及ぼす熱を吸収することにより、ケーブル内部の冷却特性が改善されることが考えられる。しかし、ケーブル導体部にヒートパイプを挿入すると導体径が大きくなるため、外側流路の断面積が小さくなり、冷媒の圧力損失が増加する。このため、地中ケーブルの様に、ケーブルの断熱管内径に制約がある場合よりも、断熱管内径に制約が無い場合の方がヒートパイプの導入効果が大きいと考えられる。

そこで、定格電圧 66 kV、定格電流 2 kA、定格容量 230 MVA、ケーブル導体径 92 mm、断熱管内径 160 mm、液体窒素流量 40 liter/min、ケーブル長 1 km のケーブルに対して、直径 5 mm、熱伝導率 10000 W/m/K のヒートパイプを挿入した場合について解析した。解析結果のうち、ヒートパイプの挿入位置に対する液体窒素の温度上昇の解析結果を図4に示す。なお、液体窒素の初期温度は 65 K とし、図4の縦軸は、初期温度 65 K からの温度上昇分を表している。

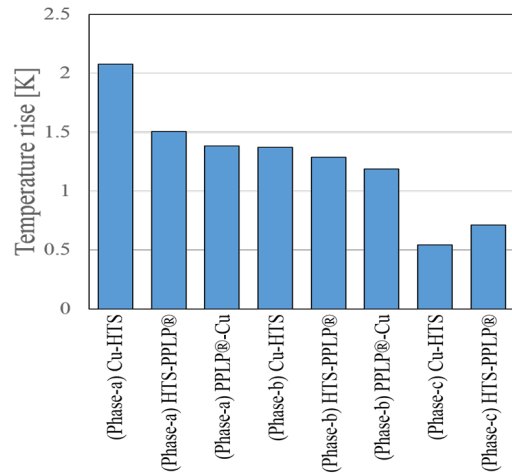


図4 ヒートパイプの挿入位置と温度上昇

これより、ケーブル導体部の内側よりも外側(c相側)にヒートパイプを設置した方が、液体窒素の温度上昇を効果的に抑制できることがわかる。これは、ケーブル導体部の外側にヒートパイプを挿入すると、ケーブルで発生した熱が外側流路の液体窒素に到達する前に、ヒートパイプによってケーブル長手方向に拡散するためであると考えられる。また、最外層の HTS 層と絶縁層の間と Cu 安定化層と HTS 層との間で温度上昇の大小関係が逆転しているのは、絶縁層として用いる PPLP® の熱伝導率が非常に小さいために絶縁層に熱が蓄積され、ヒートパイプの熱拡散効果が低減したためであると考えられる。

以上より、ケーブル導体部にヒートパイプを設置する場合は、可能な限り外側に設置し、絶縁層と接触しない層間に設置することが有効であることがわかった。そこで、ケーブル断熱管内径の制約がある場合(地中管路への布設を想定したケーブルの場合)と、制約が無い場合において、図5の様に、ヒートパイプを c 相の Cu 安定化層と HTS 層の間に挿入した場合について検討した。

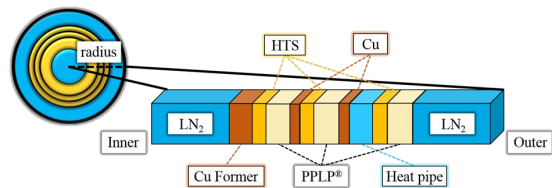


図5 ヒートパイプ挿入時のケーブル構成

まず、ケーブル断熱管内径に制約がある場合で、ケーブル導体径 86 mm、断熱管内径 98.8 mm、ヒートパイプ径 2 mm、液体窒素流量 40 liter/min の場合において、液体窒素の上昇温度とケーブル長との関係について検討した。その結果を図6に示す。これより、ケーブル長が長くなるほど、ヒートパイプによる冷却効果が顕著となり、液体窒素の温度上昇を抑制できることがわかった。

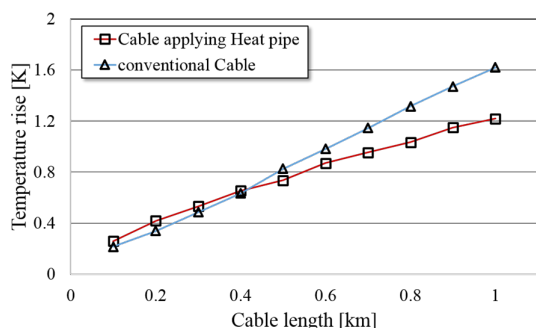


図6 断熱管内径に制約がある場合の液体窒素の温度上昇

これは、ケーブル長が長くなると、ケーブル内部での全発熱量が増加し、ヒートパイプによる冷却効果の影響がより顕著になるためであると考えられる。ヒートパイプの導入効果を向上させるには、液体窒素の圧力損失を抑制しながら液体窒素の流量を多くする必要があり。しかし、これに伴う圧力損失が大きくなり過ぎると、液体窒素の圧力低下により、長距離送電が困難となる。このため、冷却特性と流体特性の両者を考慮して最適な条件を見出す必要がある。そこで、冷却特性については、液体窒素の初期温度を 65 K、許容温度を 77 K とし、流体特性については、液体窒素入口圧力を 1.0 MPa、出口の許容圧力を 0.2 MPa とし、送電可能距離について検討した。液体窒素の流量と 65 K の液体窒素が 77 K に到達するケーブル長の関係、および、液体窒素の流量と 1 MPa の液体窒素圧力が 0.2 MPa になるケーブル長の関係についての解析結果をそれぞれ図7と図8に示す。

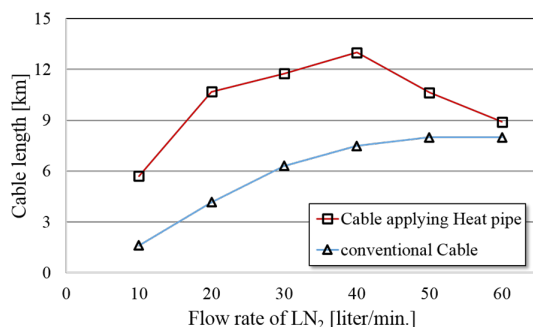


図7 65 K の液体窒素が 77 K に到達するケーブル長の液体窒素流量依存性

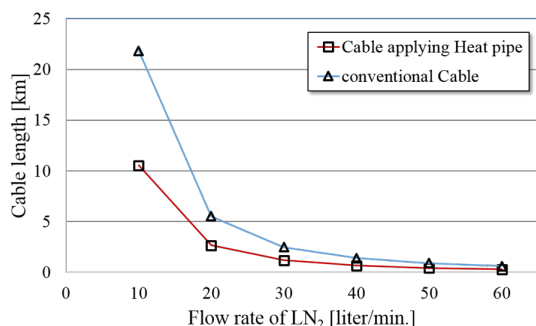


図8 1 MPa の液体窒素が 0.2MPa に到達するケーブル長の液体窒素流量依存性

図7より、液体窒素流量が 40 liter/min 以下の場合には、ヒートパイプを導入することによりケーブル内部の冷却特性が改善されるため、ケーブル長を長くできることがわかった。しかし、図8より、液体窒素流量が多くなると圧力損失が増加するため、0.2 MPa に到達するケーブル長が減少することがわかる。この様に、冷却特性と流体特性を同時に改善することは困難であるため、ケーブル長の長尺化に適した液体窒素流量を選定する必要がある。本解析では、各液体窒素流量において図7と図8のケーブル長のうち短い方が、その液体窒素流量における許容ケーブル長となり、その許容ケーブル長の中で最長となる場合が最適な液体窒素流量となる。以上より、ヒートパイプを導入した場合と導入しない場合それぞれの最適な液体窒素流量（棒グラフ）とその時のケーブル長（プロット）をまとめたものを図9に示す。

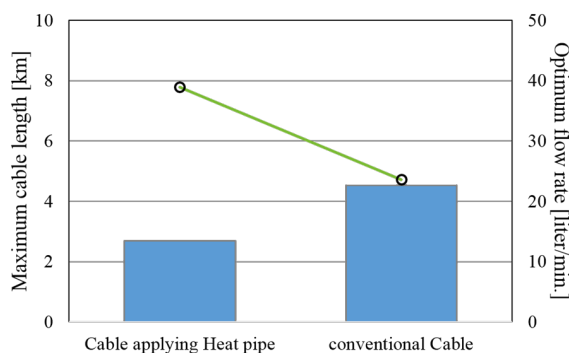


図9 ヒートパイプの有無が許容ケーブル長に及ぼす影響

これより、ヒートパイプを適用した場合のケーブル長は、適用しない場合の2倍程度になり、ヒートパイプの適用がケーブルの長尺化に有効であることがわかる。また、ヒートパイプを適用した場合、ケーブル長尺化に適した液体窒素流量は、ヒートパイプを適用しない場合と比べて小さくなっている。これは、ヒートパイプの適用により、冷却特性が改善されたためであると考えられる。また、地中ケーブルにヒートパイプを適用し、最適な液体窒素流量以上で通電する場合は、液体窒素の圧力損失が支配的となるため、ケーブル内部の冷却特性の改善は困難となるものの、最適な液体窒素流量以下で運転する場合は、ケーブル内部の冷却特性は改善され、長距離化が可能となることがわかった。

次に、ケーブル外径に制約を設けず、断熱管の内径を 120 mm ~ 200 mm で変化させた場合について検討した。断熱管の内径を大きくすると、圧力損失は低下するが、ケーブル表面積が大きくなり、外部からの熱侵入量が増加する。このため、まず、断熱管内径とケーブル長の長尺化に適した液体窒素の最適流量の関係について解析した。本解析では、ケーブル導体径を 82 mm、ヒートパイプ径を 5 mm、液体窒素の最大流量を 80 liter/min とした。ヒートパイプを適用した場合と適用しない

場合における断熱管内径とケーブル長の長尺化に適した液体窒素流量の関係を図 1 0 に、断熱管内径と最適流量におけるケーブル長の関係を図 1 1 に示す。

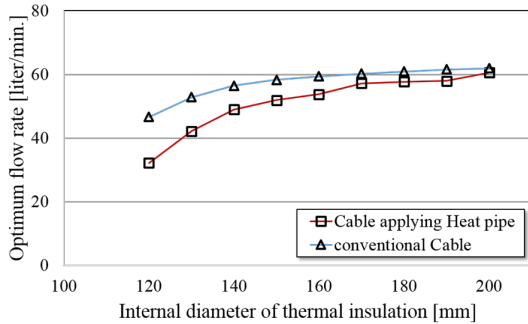


図 1 0 断熱管内径と液体窒素の最適流量

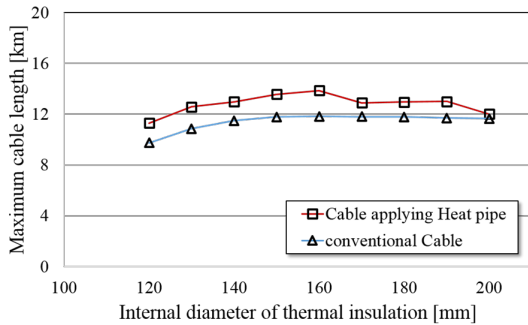


図 1 1 断熱管内径と許容ケーブル長

図 1 0 より、断熱管内径が大きくなるにつれ、最適な液体窒素流量が増加していることがわかる。これは、断熱管内径が大きくなると、ケーブル外側の液体窒素流路の断面積が大きくなり、外側流路での圧力損失が減少するためであると考えられる。また、図 1 1 より、ヒートパイプ適用の有無にかかわらず、断熱管内径を大きくすると、許容ケーブル長が長くなるのがわかる。これは、断熱管内径を大きくすることにより圧力損失が減少し、より多くの液体窒素を流すことができる様になり、冷却効果が向上するためであると考えられる。しかし、断熱管内径が 160 mm 程度以上では、ケーブル長はほとんど増加していない。これは、断熱管内径を大きくすると、ケーブル外側の圧力損失よりも、ケーブル内側流路の圧力損失が大きくなり、外側流路増大の効果が表れにくくなるためである。

許容ケーブル長については、ヒートパイプ適用の有無にかかわらず、断熱管内径に制約がある場合よりも長くなった。これは、断熱管内径の制約が無い場合は、外側流路を大きくすることによる圧力損失低減効果が大きくなるためであると考えられる。このため、断熱管内径の大きさににかかわらず、ヒートパイプの適用により、許容ケーブル長を大幅に改善できるものの、断熱管内径に制約がある場合に比べて、制約が無い場合の方が、ヒートパイプ適用の有無による許容ケーブル長の差が小さくなっている。なお、本解析にお

ける、ヒートパイプを適用した場合の最大許容ケーブル長は、断熱管内径が 160 mm の場合に 13.9 km であった。

以上より、三相のうち最外相の Cu 安定化層と HTS 層の間にヒートパイプを適用することが、許容ケーブル長の長尺化に有効であること、液体窒素流量を最適流量以下で運転し、三相同一軸型ケーブルの導体部にヒートパイプを適用することにより、ケーブル内部の冷却特性改善、および、ケーブルの長尺化が可能となることがわかった。

(2) ヒートパイプの製作と冷却特性評価

三相同軸型ケーブルに適用するヒートパイプの熱特性を評価するために、図 1 2 に示す様な、外径 9.52 mm、長さ 400 mm の銅製ヒートパイプを作製した。

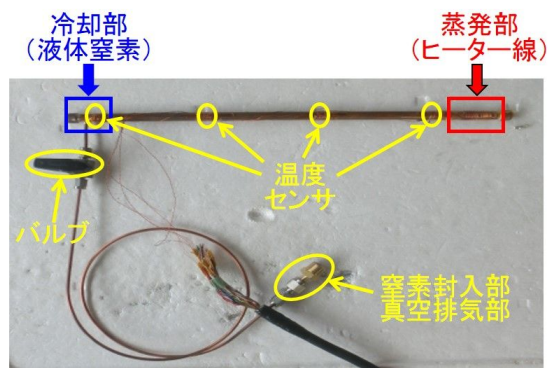


図 1 2 ヒートパイプの概観

ヒートパイプの先端には、高温部を作るためのヒーター線を巻きつけ、ヒートパイプの温度分布を測定するための温度センサを 4 箇所取り付け付けた。実験では、まず、真空排気部に真空ポンプを取り付け、ヒートパイプ内を真空状態にした。次に、窒素封入部より窒素ガスを注入し、バルブを閉めて窒素ガスを封入した。そして、図 1 3 に示す様に、外部からの熱侵入の影響を排除するために、このヒートパイプをスタイロフォームの容器の中に収納した。

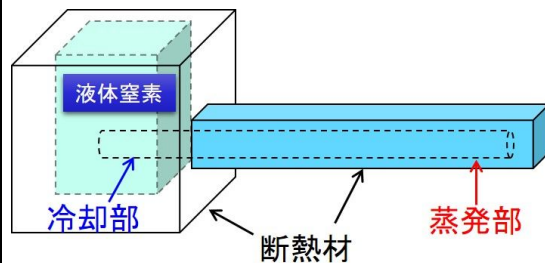


図 1 3 ヒートパイプを収納した断熱容器

実験結果のうち、常温に置かれたヒートパイプの冷却部を液体窒素に浸したときの、冷却部から 30 mm、130 mm、230 mm に設置された温度センサの測定値の時間推移を測定した。図 1 4 に、ヒートパイプ内を真空にした状態 (窒素ガスの注入前) でのヒートパイプの温度分布推移を示す。

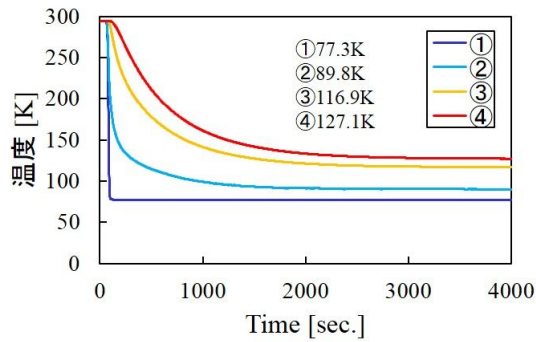


図 1 4 ヒートパイプの熱伝導特性試験結果
(ヒートパイプ内：真空)

これより、ヒートパイプ冷却 3000s 以上に定常状態に落ち着き、冷却部温度 77.3 K に対して、一番ヒーター寄りに配置された温度センサでの温度が 127.1 K となり、冷却部と蒸発部の温度差は 49.8 K になった。これに対して、ヒートパイプに 0.8 MPa と 1.0 MPa の窒素ガスを封入した場合のヒートパイプの温度分布推移をそれぞれ図 1 5、図 1 6 に示す。

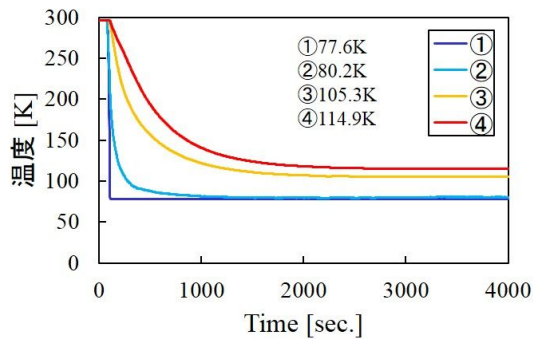


図 1 5 ヒートパイプの熱伝導特性試験結果
(ヒートパイプ内：0.8 MPa 窒素ガス)

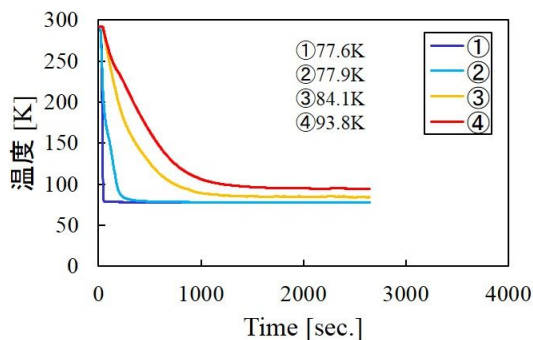


図 1 6 ヒートパイプの熱伝導特性試験結果
(ヒートパイプ内：1.0 MPa 窒素ガス)

冷却部温度 77.6 K に対する温度センサの温度は、封入した窒素ガスが 0.8 MPa の場合は 114.9 K、1.0 MPa の場合は 93.8 K であった。これより、ヒートパイプ内の窒素ガスを増やすことにより、ヒートパイプ長手方向の温度勾配が小さくなり、等価的な熱伝導率が高くなることわかる。本実験では、窒素ガスを封入していない場合に対する窒素

ガスを封入した場合の等価熱伝導率は、0.8 MPa の窒素ガスを封入した場合で約 1.3 倍、1.0 MPa の場合で約 3.0 倍であった。

以上の結果より、超電導ケーブルにヒートパイプを適用することにより、ケーブル内の発熱や侵入熱を速やかにケーブル長手方向に拡散可能であると考えられる。等価熱伝導率を更に向上させるには、等価熱伝導率向上に適した銅パイプの形状や大きさ、封入する窒素ガス量などを明確にする必要がある。当初は、これらの最適化検討を行い、その結果を踏まえて、ヒートパイプを用いた超電導モデルケーブルを製作し、ヒートパイプの超電導ケーブルへの適用効果についても検討する予定であった。しかし、ヒートパイプ製作業者の事情により、ヒートパイプを適用した超電導ケーブルはもとより、ヒートパイプの作製が困難となり、ヒートパイプの準備に想定外の時間を要した。このため、ヒートパイプの超電導ケーブルへの適用効果については、研究期間内に明確にするまでには至らなかった。

5. 主な発表論文等

[学会発表](計 3 件)

榊原稜二, 津田理 他, 各相が 2 層で構成される三相同一軸高温超電導ケーブルの構成方法に関する検討, 平成 28 年電気学会全国大会, 2016 年 03 月 18 日, 東北大学(仙台)

篠崎勇希, 津田理 他, 三相同一軸高温超電導ケーブルの電流容量に対するケーブル構成方法と交流損失特性, 平成 28 年電気学会全国大会, 2016 年 03 月 18 日, 東北大学(仙台)

北谷大貴, 津田理 他, 各相が多層で構成される三相同一軸高温超電導ケーブルの電流分布と交流損失特性, 2015 年度秋季低温工学・超電導学会, 2015 年 12 月 02 日, 姫路商工会議所(姫路)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

津田 理 (TSUDA, Makoto)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：10267411