

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02120

研究課題名(和文) 長距離交流送電用高温超電導ケーブルの設計指針・開発基盤の確立

研究課題名(英文) Establishment of design guidelines and development basis for high-temperature superconducting cables for long-distance AC power transmission

研究代表者

津田 理 (TSUDA, Makoto)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：10267411

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：再生可能エネルギー導入拡大が急務となっている。これに対して、本研究では、国内の再エネの中で最もポテンシャルの高い洋上風力発電システムの導入拡大に不可欠な、低損失・長距離の大容量交流送電を可能にする高温超電導ケーブルを実現することを目的に、これまでに実現できなかった交流用高温超電導ケーブルの長距離化を可能にするケーブル設計方法について検討した。その結果、三相同軸型超電導ケーブル内にある内側と外側の冷媒流路間に低熱伝導層を導入することにより、ケーブル内部の温度分布を調整することに成功し、液体窒素の冷却効果を最大限活用することにより従来の交流用超電導ケーブルの5倍以上の長距離送電を可能にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大容量・低損失送電には超電導ケーブルの適用が有効であるが、これまでは、冷却システムの制約により長距離送電が不可能であった。本研究により、世界で初めて超電導ケーブルによる10km以上の長距離送電が可能になった。本成果により、大容量・コンパクト・高効率な長距離送電が可能になり、2050年の温室効果ガス排出量ゼロの実現に不可欠となる大容量洋上風力発電システムの導入拡大に大きく貢献することが期待される。

研究成果の概要(英文)：There is an urgent need to expand the introduction of renewable energy sources. The objective of this study was to realize high-temperature superconducting cables that enable low-loss, long-distance, high-capacity AC power transmission, which is indispensable for expanding the introduction of offshore wind power generation systems, which have the highest potential among renewable energy sources in Japan. A cable design method was investigated to enable the long-distance operation of high-temperature superconducting cables for AC, which has not been realized so far. By introducing a low thermal conductivity layer between the inner and outer refrigerant channels in a three-phase coaxial superconducting cable, we succeeded in adjusting the temperature distribution inside the cable and maximizing the cooling effect of liquid nitrogen to enable long-distance power transmission more than five times longer than conventional AC superconducting cables.

研究分野：応用電気エネルギーシステム

キーワード：超電導ケーブル 洋上風力 高温超電導 交流損失

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

温室効果ガスについては、2050年までに排出量ゼロを目指すとされている。しかし、現在は、東北地方太平洋沖地震の影響で、国内のほとんどの原子力発電所が停止しており、この停止分の電力を火力発電で補っている。このため、温室効果ガス排出量は、減少するどころか大幅に増加しており、今後は再エネの導入拡大が不可欠である。中でも、洋上風力の導入ポテンシャルは、国内の全再エネ導入ポテンシャルの69%程度(太陽光は16%程度)を占めるなど群を抜いて高く、導入拡大が期待されている。しかし、大容量送電が必要となる場合は、建設が容易でない洋上変圧施設を建設する必要がある。この問題の解決には、低圧での大容量送電が可能な高温超電導ケーブルの適用が有効であるが、これまでに国内で構築されている交流用高温超電導ケーブルの最長距離は500m程度で、世界的に見ても1kmを越える例は多くない。しかし、日本近海の風況を考えると、陸地から洋上風力発電施設までの送電距離が5km~10kmになるケースが多く、単一の冷却ステーションで冷却可能な超電導ケーブル長を大幅に改善する必要がある。

### 2. 研究の目的

本研究では、高温超電導線(テープ線)固有の電磁的・熱的特性を考慮し、三相同軸型高温超電導ケーブルの特徴を最大限活用しつつ、長距離化を可能とするケーブル化技術を確立し、大容量・高効率な長距離交流用高温超電導ケーブルの実現に繋げることを目的に研究を実施した。

### 3. 研究の方法

大容量の長距離交流用超電導ケーブルの設計指針の確立には、以下の検討が必要となる。

- ・ケーブル内部における液体窒素流路の位置や流路径・液体窒素の循環方法・液体窒素の流速と密接に関係するケーブルの冷却特性の明確化
- ・絶縁層の厚さ・超電導層の径・超電導テープ線の撚りピッチ・撚り方向に依存するケーブル内の電流分布や交流損失特性などの通電特性の明確化
- ・超電導テープ線の交流損失・絶縁層の誘電体損失・液体窒素の摩擦損失・ケーブル外部からの侵入熱などの熱特性の明確化

本研究では、三相同軸型超電導ケーブルの特徴を最大限活用して長距離化を可能にするケーブル化技術を開発し、長距離交流用高温超電導ケーブルの設計指針・開発基盤を確立するために、以下の方法に基づき研究を実施した。

#### (1) 交流用高温超電導ケーブルの長距離化のためのケーブル化技術開発

##### ①液体窒素流路における圧力低減抑制化の検討

ケーブル内の流体解析を通じて、液体窒素流路の流路径、液体窒素の循環方法、液体窒素の圧力低下抑制に有効なケーブル断面構成や液体窒素の流速などを検討した。

##### ②ケーブル内部における低損失化の検討

これまでに開発してきたケーブル内の電流制御技術と有限要素法数値解析技術を用いて、三相平衡を実現しつつ、交流損失低減に有効なケーブル構成パラメータについて検討した。また、既存の洋上風力発電機の端子間電圧を踏まえて送電電圧を選定し、送電容量が交流用高温超電導ケーブルの長距離化に及ぼす影響について検討した。

##### ③ケーブル内部における温度分布制御方法の検討

ケーブル内部の液体窒素温度を制御するために、ケーブル内部に低熱伝導層を導入することを提案し、ケーブル内部の温度分布解析を通じて、低熱伝導層の有効性を検証するとともに、低熱伝導層を用いたケーブル内部の温度分布制御方法について検討した。

#### (2) モデルケーブルを用いた低熱伝導層の有効性検証

有限要素法を用いた電磁界解析と熱解析を実施し、低熱伝導層の導入場所や低熱伝導層の厚さがケーブル内温度分布に及ぼす影響について検討した。また、低熱伝導層の導入効果の検証に適したモデルケーブル構成について検討し、1mのモデルケーブルを製作した。そして、モデルケーブル内の液体窒素温度の測定結果と、モデルケーブルの温度分布解析結果を比較することにより、低熱伝導層のケーブル径方向の熱伝導抑制効果を検証した。

#### (3) 大容量洋上風力用長距離高温超電導ケーブルの検討

欧州では、今後も大容量の洋上風力群が導入される可能性が高いため、洋上風力発電システムの発電容量と超電導ケーブルの長距離化に適したケーブル構成方法について検討し、長距離用超電導ケーブルの設計指針を明確にした。

### 4. 研究成果

#### (1) 交流用高温超電導ケーブルの長距離化のためのケーブル化技術開発

##### ①液体窒素流路における圧力低減抑制化の検討

三相同軸型ケーブルでは、内側冷媒流路と外側冷媒流路の2つの流路を設けることができ、液体窒素の流し方には、並流(Parallel flow)と向流(Counter flow)の2種類がある。そこで、三相同軸型ケーブルの長距離化に適した冷却方法を、熱平衡方程式を用いた伝熱解析と圧力損

失を考慮した流体解析の両面から検討した。並流式と向流式における冷却特性を、同一の液体窒素流量とケーブル条件において解析したところ、伝熱特性については、液体窒素温度上昇が少ない向流の方が適しているものの、流体特性については、圧力損失が小さい並流の方が適していることがわかった。しかし、洋上風力用ケーブルとして三相同軸型ケーブルを適用する場合は、洋上に冷却ステーションを設置することが困難であるため、冷却ステーションを陸地に設置し、超電導ケーブル内の冷媒流路を用いて液体窒素を循環させる必要がある。このため、洋上風力用超電導ケーブルでは、向流の方が適しているが、向流の場合は、液体窒素温度が上昇しにくいものの、圧力損失が大きくなるため、ケーブルの長距離化には、冷媒流路断面積を大きくする必要がある。なお、外側流路断面積を大きくすると、流速が低下し、外側冷媒流路におけるコルゲート管の大きな管摩擦係数に起因する圧力損失が低減する。ただし、ケーブル径が大きくなるとケーブル表面積の増加により侵入熱が増加し、外側冷媒流路の液体窒素温度が上昇する。以上の様に、ケーブルの長距離化には、液体窒素の温度上昇と圧力損失の抑制が重要となるが、この両者にはトレードオフの関係があるため、液体窒素の単位時間あたりの流入量や流速が液体窒素の温度上昇や圧力損失に及ぼす影響を明確にした上で、内部冷媒流路および外部冷媒流路の流路断面積を決める必要があることがわかった。

### ②ケーブル内部における低損失化の検討

電流ベクトルポテンシャル  $T$  を用いた電磁界解析により、高温超電導テープ線で構成される三相同軸型ケーブルの交流損失特性について検討した。なお、本解析では、 $T$  法の薄板近似を採用している。解析より、全ての相において、通電電流の増加に伴い、交流損失が増加し、各通電電流において、中間層の  $V$  相での交流損失が、 $U$  相や  $W$  相における交流損失よりも大きくなることがわかった。また、三相同軸型ケーブルでは、 $U$  相の電流負荷率を設定負荷率に合わせるため、各相で最大数のテープ線を使用すると、 $V$  相や  $W$  相では電流容量に余裕ができる。そこで、 $V$  相や  $W$  相で使用するテープ線数を減少させた場合における交流損失特性について検討した。解析より、 $V$  相と  $W$  相のテープ線数が少なくなるにつれて  $V$  相と  $W$  相における交流損失が増加することがわかった。これは、テープ線数の減少により、 $V$  相や  $W$  相の電流負荷率が増加したことと、各相のテープ線間の周方向ギャップが増加したことにより、テープ線間の磁気的な相互作用が小さくなったことが原因と考えられる。また、3相のテープ線数が同じ場合に  $W$  相の交流損失が最大となった。これは、 $W$  相のテープ線間の周方向ギャップが最大となり、テープ線の周方向端部に印加される垂直磁場が増加したことと、内側の  $V$  相でも周方向のテープ線間ギャップが大きくなり、 $V$  相電流の作る周方向磁場がギャップ部分で歪み、 $W$  相のテープ線に印加される垂直磁場が増加したことが原因と考えられる。以上の様に、三相同軸型ケーブルを構成する場合は、内側冷媒流路径や、各相間の絶縁層の厚さ（線間電圧）によって、各相で使用するテープ線数が異なり、各相の交流損失が大きく変化する。ケーブルコスト削減には、使用するテープ線数を少なくする必要があるが、テープ線数を最小限とすると、交流損失が大きくなり、液体窒素温度が上昇する。このため、各相での使用テープ線数は、経済性と交流損失量を考慮して選定する必要がある。

### ③ケーブル内部における温度分布制御方法の検討

三相同軸型ケーブルの長距離化には、内側冷媒流路と外側冷媒流路に流れる液体窒素の冷却効果を最大限活用することが望ましい。まず、従来の超電導ケーブルの設計指針に基づいて三相同軸型ケーブルを設計し、ケーブル内部における温度分布を解析した。同解析では、超電導層で生じる交流損失、導体フォーマと高温超電導テープ線の安定化層（銅層）で生じる渦電流損失、絶縁層で生じる誘電体損失、流体の摩擦損失を考慮した。また、三相同軸型ケーブル内部の熱解析では、周方向温度を一定とした軸対称三次元有限要素法解析を採用した。流体解析では、冷媒流路内の流体の振る舞いを簡略化し、内側冷媒流路と外側冷媒流路を流れる流体の速度は、ケーブル長手方向に一定であると仮定した。なお、半径方向の流体速度は  $0\text{m/s}$  とし、内側冷媒流路に流入する液体窒素の温度と圧力をそれぞれ  $65\text{K}$ 、 $1.0\text{MPa}$  とした。また、外側冷媒流路出口における液体窒素温度と圧力が  $77\text{K}$  以下かつ  $0.2\text{MPa}$  以上となる最長のケーブル長を、三相同軸型ケーブルの送電可能距離とした。解析結果のうち、従来のケーブル設計指針に基づいて設計した、電圧階級  $6.6\text{kV}$ 、送電容量  $44\text{MW}$  のケーブルで、ケーブル長が  $2.3\text{km}$ （最長）の場合におけるケーブル内部の温度分布図を図 1 に示す。なお、図 1 では、横軸がケーブル長手方向、縦軸がケーブルの径方向を表している。これより、内側冷媒流路（Inner）より流入する液体窒素の温度が徐々に上昇し、外側冷媒流路（Outer）入口（図 1 の右上端部）付近の温度が、液体窒素の沸点である  $77\text{K}$  に到達していることがわかる。これに対し、外側流路出口（図

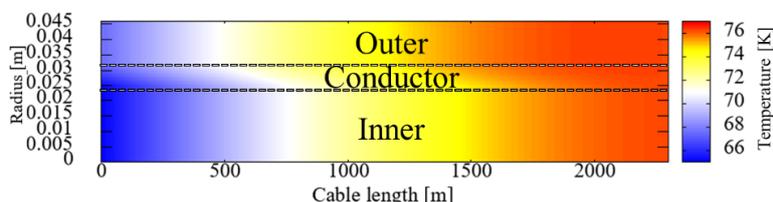


図 1 従来設計法で設計したケーブル内の温度分布（ケーブル長：2.3 km）

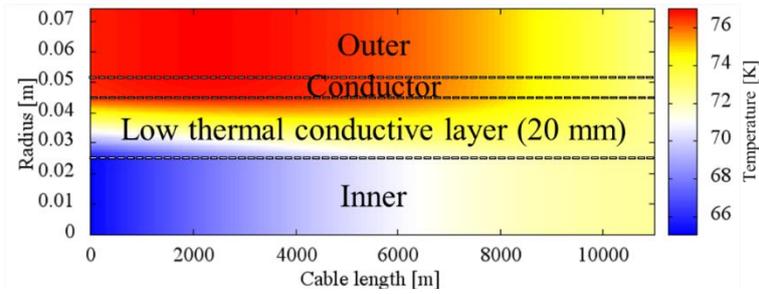


図2 低熱伝導層を導入したケーブル内の温度分布（低熱伝導層厚さ：20mm）

1の左上端部）では70K以下となっており、液体窒素の冷却効果が最大限有効活用されていないことがわかる。この原因としては、ケーブル外側表面からの侵入熱が内側冷媒流路の液体窒素温度上昇に影響を及ぼしていることと、内側冷媒流路入口より流入する65Kの液体窒素の冷却効果により外側冷媒流路出口付近の液体窒素温度が低下していることが考えられる。液体窒素の冷却効果を最大限活用するには、内側冷媒流路入口温度を最低の65K、外側冷媒流路出口温度を最高かつ許容最大温度の77Kにする必要があるが、図1では、左側端部付近の温度が低く、右側端部に向かって温度が徐々に上昇している。そこで、液体窒素の冷却効果を最大限活用するために、ケーブル外部表面からの侵入熱の内側冷媒流路への侵入と、内側冷媒流路入口付近における液体窒素の冷却効果による外側冷媒流路出口付近の液体窒素温度低下を抑制するために、内側冷媒流路と外側冷媒流路間の熱伝導を抑制するための低熱伝導層を導入した。20mmの低熱伝導層を導体層の内側に導入した場合における、ケーブル内温度分布を図2に示す。これより、低熱伝導層を導入することにより、従来の設計指針に基づき設計された送電可能距離（2.3km）を大幅に改善でき、11kmの送電が可能となることがわかった。また、低熱伝導層の導入により、内側冷媒流路出口付近の温度上昇が抑制され、内側冷媒流路入口から外側冷媒流路出口に向けて、液体窒素温度が徐々に上昇しており、外側冷媒流路出口付近の液体窒素温度が約77になっている。このように、液体窒素の冷却効果を最大限活用するには、内側冷媒流路と外側冷媒流路間に低熱伝導層を導入し、低熱伝導層の厚さによって内側冷媒流路と外側冷媒流路間の熱伝導量を調整することが有効であることを明らかにした。

(2) モデルケーブルを用いた低熱伝導層の有効性検証

低熱伝導層の熱伝導抑制効果を実験的に検証するため、1mのモデルケーブルを作製した。解析では、ケーブル長が10km程度であったのに対し、モデルケーブル長は1mと短いため、ケーブル内部温度はほとんど上昇せず、低熱伝導層の導入効果を確認することは困難である。そこで、有限要素法に基づく数値解析を用いて、低熱伝導層の有無により、内側冷媒流路入口と外側冷媒流路出口の液体窒素温度に違いが生じるようなモデルケーブルの構成方法について検討した。その結果、モデルケーブルでは真空断熱層を設置せず、径の異なる2種類の円筒状GFRPで内側冷媒流路と外側冷媒流路を構成し、内側冷媒流路を構成する円筒状GFRPと外側冷媒流路を構成する円筒状GFRP間にアルミ層を設けることが有効であるとわかった。このため、低熱伝導層の導入効果を検証する際は、アルミ層の一部を低熱伝導率の断熱シート層で置き換えることにした。そして、両者の径方向厚さの比率を変えることにより、低熱伝導層の径方向厚さと径方向熱伝導抑制効果の関係を検討することにした。また、実験では、2mの冷媒流路長で液体窒素温度を上昇させるために、液体窒素流量を少なくした。しかし、流量が少ない場合の液体窒素流量制御は容易ではないため、外側冷媒流路出口を通過した液体窒素を気化させ、窒素ガスの圧力弁で窒素ガスの流量を調整することにより、液体窒素の流量を制御した。また、65Kの過冷却液体窒素を生成し、モデルケーブルに過冷却窒素を送り出すために、図3のような試験装置を作製した。実験での内側冷媒流路入口温度は約70Kであり、モデルケーブルに過冷却窒素を流し始めてから、内側冷媒流路入口と外側冷媒流路出口に設置した温度センサの出力が落ち着くまで数十分程度の時間を要した。実験結果のうち、内側冷媒流路と外側冷媒流路間の低熱伝導層の厚さを変化させた場合の外

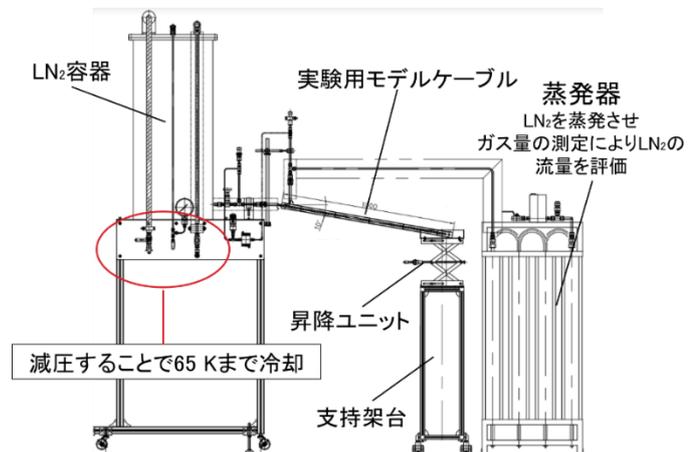


図3 低熱伝導層の有効性検証試験装置の構成

側冷媒流路出口の液体窒素温度の結果を図4に示す。図4より、低熱伝導層が無い場合は、内側冷媒流路入口と外側冷媒流路出口間の温度差がほとんどなく、内側冷媒流路入口付近の過冷却窒素の冷却効果により、外側冷媒流路出口付近の液体窒素温度が低下していることがわかる。一方、低熱伝導層を導入して厚くすることにより、内側冷媒流路と外側冷媒流路間の熱伝導率が抑制され、外側冷媒流路出口温度は上昇した。これは、液体窒素温度が、ケーブル内部で徐々に上昇しており、低熱伝導層の導入により液体窒素の冷却効果をより活用できていることを表している。以上より、低熱伝導層導入の有効性を検証した。

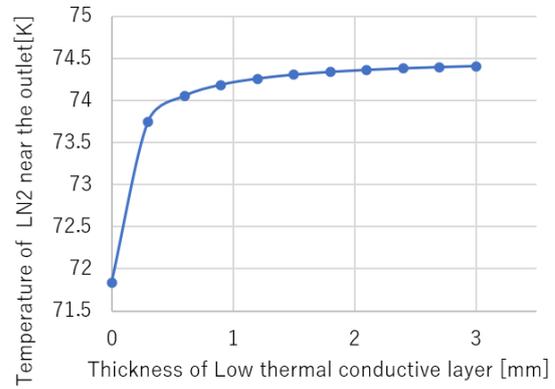


図4 外側冷媒流路出口温度の低熱伝導厚さ依存性

### (3) 大容量洋上風力用長距離交流用高温超電導ケーブルの検討

洋上風力用三相同軸型ケーブルの長距離化検討では、国内の洋上風力発電システムへの適用を想定し、6.6kV、44MWのシステムを検討対象としていたが、欧州は日本よりも遠浅であり発電環境がよいため、これまでもより大容量の洋上風力発電システムが多く導入されている。このような大容量洋上風力発電システムに三相同軸型超電導ケーブルを導入する場合は、使用する高温超電導テープ線数も多くなり、導体層の径を大きくするだけでなく、各相を複数層で構成する必要がある。導体層径を大きくすると、ケーブル外径も大きくなり、侵入熱も増加するため、ケーブルの長距離化に適した導体層の構成方法を明確にするには、導体層で発生する交流損失量だけでなく、ケーブル外部表面からの侵入熱量も考慮して検討する必要がある。そこで、ケーブル送電容量を100MWから1000MWまで変化させた場合における交流損失と侵入熱を、各相の導体層数をパラメータとして解析し、送電可能距離について検討した。解析結果のうち、送電電圧33kV、真空断熱層の径方向厚さ15mm、低熱伝導層厚さ10mm、各相の電流負荷率75%時の損失量の送電容量依存性の結果を図5に示す。

これより、交流損失を抑制するには、導体層径を大きくして各相の導体層数を少なくすることが効果的であるといえる。導体層径を大きくすると、ケーブル外径が大きくなり、ケーブル外部表面からの侵入熱量が多くなるが、送電容量が大きくなると、送電電流が大きくなり、ケーブルの単位長さあたりの交流損失量が侵入熱を上回るため、侵入熱よりも交流損失の低減に有効な導体構成にすることが望ましい。このため、送電容量が増えるにつれて、各相の導体層数が多い方が送電可能距離は長くなった。ただし、各相を3層で構成する場合は、使用するテープ線数によっては、交流損失よりも侵入熱が大きくなる場合もあるため、設計条件に応じて、最適なケーブル構成方法を選択する必要がある。

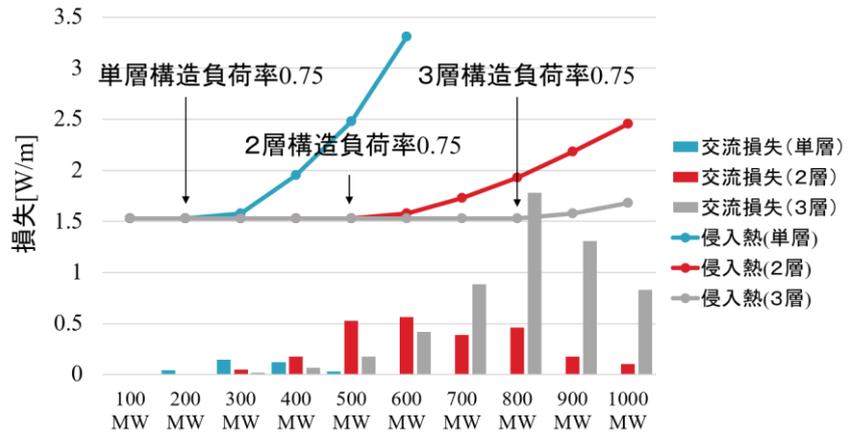


図5 各導体構成における交流損失と侵入熱の送電容量依存性

以上より、三相同軸型高温超電導ケーブルの特徴を最大限活用して長距離化を可能とするには、以下の設計指針に基づいてケーブル構成を決定することが有効であるとわかった。

- ① 送電距離や液体窒素を供給するための循環ポンプ能力を踏まえ、圧力損失の制約条件を考慮して内側冷媒流路と外側冷媒流路を決定する
- ② 最内相の電流負荷率が設定電流負荷率以下となるように各相の導体層数を決定し、電圧階級を考慮して絶縁層厚さを決定する
- ③ 導体層の内側に導入する低熱伝導層厚さとケーブル内温度分布を考慮して、送電可能距離を最大にする低熱伝導層厚さを決定する

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Endo Natsumi, Nagasaki Yoh, Miyagi Daisuke, Tsuda Makoto	4. 巻 32
2. 論文標題 Suitable Structure of Triaxial HTS Cable With Low Thermal Conductive Layer for Increasing Power Transmission Cable Length	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2021.3125996	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 富岡 和貴 , 遠藤 夏実 , 長崎 陽 , 津田 理 , 宮城 大輔
2. 発表標題 洋上風力用三相同一軸型高温超電導ケーブルの低熱伝導層の厚さがケーブル内の温度分布に及ぼす影響
3. 学会等名 2020年度秋季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 N. Endo, Y. Nagasaki, M. Tsuda, and D. Miyagi
2. 発表標題 Influence of Low Thermal Conductive Layer Thickness on Heat Balance in Long Distance Triaxial HTS Cable
3. 学会等名 10 th ACASC / 2 nd Asian-ICMC / CSSJ Joint Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 N. Endo, Y. Nagasaki, M. Tsuda, and D. Miyagi
2. 発表標題 Influence of Low Thermal Conductive Layer Thickness on Heat Balance in Long Distance Triaxial HTS Cable
3. 学会等名 10 th ACASC / 2 nd Asian-ICMC / CSSJ Joint Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 遠藤夏実, 長崎陽, 宮城大輔, 津田理:
2. 発表標題 三相同一軸型高温超電導ケーブルの低熱伝導層がケーブルの長距離化に及ぼす影響
3. 学会等名 2019 年度春季 (第98回) 低温工学・超電導学会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	宮城 大輔  (MIYAGI Daisuke)  (10346413)	千葉大学・大学院工学研究院・教授   (12501)	
研究分担者	長崎 陽  (NAGASAKI Yoh)  (60823747)	東北大学・工学研究科・助教   (11301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------