

イットリウム系三相同一軸高温超電導ケーブルの 長距離電力伝送に適したケーブル構成

Suitable structure of Y-based tri-axial HTS cable for long distance power transmission

遠藤 夏実, 篠崎 勇希, 宮城 大輔, 津田 理(東北大)

ENDO Natsumi, SHINOZAKI Yuki, MIYAGI Daisuke, TSUDA Makoto (Tohoku Univ.)

E-mail: natsumi.endo.t7@dc.tohoku.ac.jp

1. はじめに

近年, 洋上風力発電の利用に注目が集まっており, 従来の銅ケーブルに比べ大容量かつ低損失に送電できる超電導ケーブルを海底ケーブルに適用することが考えられている。日本近海での洋上風力発電は 10 km 未満のポテンシャルが高いことから, 10 km 程度の超電導ケーブルが必要になる[1]。そこで, Y 系線材の交流損失特性の解析結果を踏まえ, 液体窒素の冷却特性を考慮したケーブル内部の温度分布を解析することにより, Y 系三相同一軸高温超電導ケーブルの長距離電力伝送に有効なケーブル構成方法について検討した。

2. 解析方法

本解析に用いた三相同一軸ケーブルの諸元を Table. 1 に示す。各相は, 銅テープで構成されたシールド層, 超電導層, 絶縁用の PPLP®により構成され, コルゲート管に収容されるとした。ケーブルの冷却は循環系の構築が簡易な向流を採用した。冷媒は内側流路, 外側流路の順に流れ, 回帰するものとした。各相における超電導線の交流損失特性は, 有限要素法による薄板近似モデルを用いた電磁界解析により評価した。また, ケーブルの熱解析では, 超電導線の交流損失, 銅テープ線材における渦電流損, PPLP®の誘電体損失, 冷媒の摩擦損失, ケーブル外部からの熱侵入を考慮した。冷媒となる液体窒素の流体解析では, 流れを Reynolds 数から判断し, 熱伝達と圧力損失を考慮した。

本検討では, 三相同一軸ケーブルの適用先として洋上風力送電用の海底ケーブルを想定しているため, 低損失化および長距離化が求められる。そのため, 各損失を比較し, 支配的な損失の低減に有効となるケーブル構成方法について検討した。また, ケーブルの最長距離は, 冷媒温度で決まる最長距離と冷媒圧力で決まる最長距離の短いほうに依存するとした。

3. 解析結果及び考察

解析結果より, Table. 1のY系三相同一軸超電導ケーブルでは, 外部からの侵入熱が支配的であり, 超電導層の交流損失の占める割合は小さいことがわかった。また, 伝熱解析より, ケーブル内の冷媒温度が最大となる場所が外側冷媒流路の入口付近となり, 冷媒の冷却ポテンシャルを最大限に利用できていないことがわかった。これは, 外側冷媒から内側冷媒に熱が伝搬することに起因していると考えられる。そこで, 導体と外側冷媒流路間に低熱伝導層を挿入し, ケーブル内部への熱伝搬を抑制することを考えた。外部からの侵入熱とケーブル長の関係をFig.1に示す。Fig.1において, 低熱伝導層を設けない場合は, 断熱管半径を59.0mmとし, 低熱伝導層を設けた場合は, 断熱管半径を69.0mmとした。また, Fig.1中の k は, 低熱伝導層の熱伝導率を示しており, 本解析では目安として硬質ウレタンフォームの熱伝導率($k = 0.018$)と, その10分の1の値を採用した。Fig.1より, 低熱伝導層を適用することにより, 冷媒温度の制約による最長距離が長くなった。加えて, 外部からの侵入熱が小さくなると, それに応じて最長距離が長くなり, 低熱伝導層ありの場合が, なし場合よりも, 侵入熱の減少に対する最長距離の増加率が大きくなった。これは, 熱伝導

率を小さくして導体内部への熱伝導を抑制することで, 内側流路内の液体窒素温度の上昇を抑えることができたためと考えられる。

以上より, 洋上風力送電用の海底ケーブルを想定した Y 系三相同一軸ケーブルにおいて, 低熱伝導層を導体と外側流路間に設けることが, 内側冷媒・導体層への熱侵入の抑制につながり, ケーブルの長距離化に有効であることがわかった。したがって, 導体径を小さくして高負荷率で運転し, 冷媒圧力の制約を受けるまでケーブル外径を小さくした上で, 導体と外側流路間に低熱伝導層を適用することが長距離電力伝送に適していることがわかった。本検討では, 高温超電導ケーブル実証プロジェクトより, 侵入熱を $6.78[\text{W}/\text{m}^2]$ としているが[2], 侵入熱をこの約3分の1程度までに低減できれば, 熱伝導率($k = 0.018$)の低熱伝導層を設けることにより, ケーブル長10kmを達成できると考えられる。

Table. 1 Specifications of analytical model of tri-axial cable

Nominal voltage [kV]	11
Nominal current [kA]	3.0
Load factor of U phase	0.8
Inner radius of U phase [mm]	31.6
Number of coated conductor tapes (U/V/W)	45/47/50
Twist pitch [mm]	500
PPLP® insulation thickness [mm]	2.0
Thickness of low heat conduction layer [mm]	12
Flow rate of LN ₂ [L/min]	60
LN ₂ inlet temperature [K]	65
LN ₂ inlet pressure [MPa]	1.0

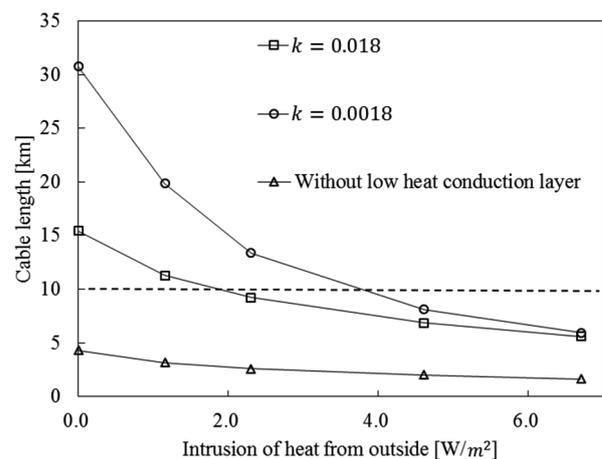


Fig.1 Dependence of maximum cable length on heat intrusion from outside.

参考文献

- NEDO: “着床式風力発電導入ガイドブック”, 第一版, pp.22(2015)
- NEDO: “超電導技術開発/高温超電導ケーブル実証プロジェクト”, 分科会資料, 資料 7-1-2①, pp.32(2014)

実規模長級 3km 66kV 系統高温超電導ケーブルの 短絡事故時の冷媒温度上昇予測解析

Simulation of Coolant in 275 kV HTS Cable on Short-circuit Current Accidents

我妻 洸, 堀田 大智, 石山 敦士(早稲田大学); 森村 俊也, 増田 孝人(住友電工); 三村 智男(東京電力)
 AGATSUMA Koh, HORITA Daichi, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University); MORIMURA Tosiya,
 MASUDA Takato (Sumitomo Electric Industries Ltd.); MIMURA Tomoo (Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc)
 E-mail: agatsumai@kurenai.waseda.jp

1. 研究背景・目的

超電導電力ケーブルは、その持つ高電流密度、経済性、環境性などの特徴から、電力システムの拡充や、超長距離送電、環境を配慮した電力輸送の技術及び手段として期待をされている。しかし、実用化に向けた課題として、事故時の影響評価や断熱管への侵入熱の低減といったものが存在する。我々は、短絡事故時の安全性評価について、事故時に生じる発熱にり変化する、ケーブル内各部の温度や冷媒の挙動を計算するシミュレーションコードの開発を行ってきた。[1] このシミュレーションコードを用いて、実用規模の長さ3km 66kV 系統の HTS ケーブルの短絡事故時のシミュレーションを行ったので報告する。

2. モデルケーブルの解析条件

本研究では、Fig. 1 に示す 3 心一括型構造の高温超電導ケーブルを対象とし、各種パラメータは Table 1 に示す。短絡電流によって超電導ケーブル内に生じる熱の移動を、数値解析によって算出した。計算速度向上と CPU メモリの負担低減のため、3 次元の円柱座標系の非線形熱伝導方程式にエネルギーバランスを加味して、次式のような長手方向 1 次元の非線形偏微分方程式に変形し、差分法により計算を行った。

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q_{in} + Q_{out}$$

ケーブルコア壁面における冷媒への熱の移動は、強制熱伝達によるものとし算出し、長手方向に 1500 分割し、分割要素内の冷媒は均質と仮定した。入力パラメータを Table 1 に示す。冷媒の特性は GASPAC® (Cryodata 社)を用いて計算した。

3. 解析結果

ケーブルの出口部における、各層の温度変化を Fig. 2 に、ケーブル長を変えて計算した結果を Fig. 3 に示す。

また、入り口圧力を増加させた場合の計算結果は、約 6.5 atm 以上にすると、出口部の LN2 の温度を飽和温度以下に抑制できることが分かった。

Table 1. Parameters of 3km the Model Cable

Parameter	Value
Inlet Temperature of cable	67 K
Inlet pressure of LN ₂ coolant	500 kPaG
Initial volume flow rate of LN ₂ coolant	60 L/min
Heat load	2.0 W/m
Joule self-heating of conductor layer (with fault current of 31.5 kA)	73.97 kW/m/ph
Joule self-heating of shield layer (with fault current of 31.5 kA)	88.62 kW/m/ph
AC loss of conductor layer (3.0 kA)	0.6 W/m/ph
AC loss of shield layer (3.0 kA)	0.3 W/m/ph
Dielectric loss (66 kV)	0.1 W/m/ph
Outer radius of conductor layer	12.38 mm
Outer radius of dielectric layer	19.95 mm
Outer radius of shield layer	22.09 mm
Outer radius of protection layer	23.00 mm
Average inner radius of corrugated pipe	53.50 mm
Fanning friction factor	0.0175



Fig.1 Picture of a three-in-one HTS cable

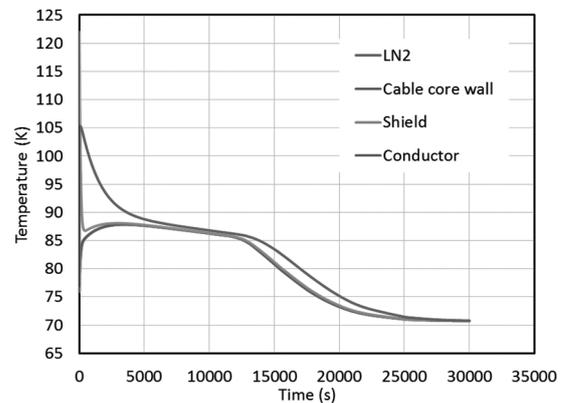


Fig. 2. Model Cable Structure and Heat flow

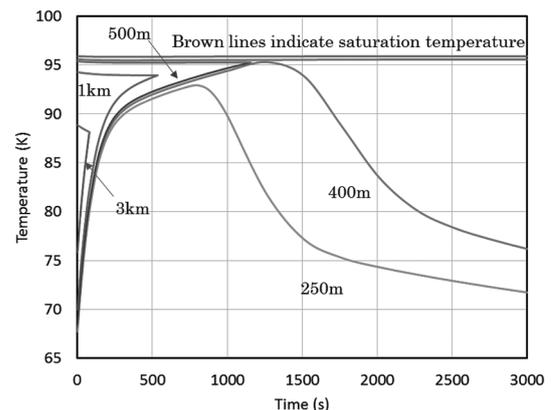


Fig. 3. Calculated temperatures of the coolant and at each layer at the outlet. (a) 20 m cable. (b) 3 km cable.

参考文献

- [1] T. Yasui, K. Agatsuma, et al. "Temperature and pressure simulation of a 1.5-km HTS power cable cooled by subcooled LN₂ with a fault current," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 26, no. 3, Apr. 2016.

謝辞

本研究の一部は NEDO の助成事業「高温超電導実用化促進技術開発」により実施した。

石狩断熱2重管の熱侵入をもとにした100km高温超電導直流送電システムの検討 Thermo-hydrodynamic analysis of 100km DC superconducting power transmission system based on Ishikari Project

山田 貴雄, 藤波 貢, 飯塚 隆(日揮**,**); 佐藤 昭夫(JFE スチール**,**); 澤村 徹(さくらインターネット**,**);
阿部 洋一(住友電設**); 平井 寛一(大陽日酸**); 平井 真一(ジェック東理社**); 和歌森 毅(イーグル工業**);
小橋 康浩(パワーユナイテッド**); 石原 範之(みずほ情報総研**); リー セルゲイ(SuperOx Japan**); 小林 修二(三菱商事**);
水澗 亨(清水建設**); 砂山 浩紀(安藤・間**); 山口 作太郎(中部大**,**)
YAMADA Takao, FUJINAMI Mitsugu, IITSUKA Takashi (JGC); SATO Akio (JFE Steel); SAWAMURA Toru (Sakura Internet);
ABE Yoichi (SEM); HIRAI Hirokazu (Taiyo Nippon Sanso); HIRAI Shinichi (JTC); WAKAMORI Tsuyoshi (Eagle Ind.);
KOBASHI Yasuhiro (PU); ISHIIHAEA Noriyuki (Mizuho); LEE Sergey (SuperOx Japan); KOBAYASHI Shuji (MC);
MIZUMA Toru (Shimizu); SUNAYAMA Hiroki (Hazama Ando); YAMAGUCHI Sataro (Chubu Univ., S4L)
E-mail: yamada.takao@jgc.com

1. はじめに

超電導直流送電に期待される特長には「低損失」が最初に挙げられる。これはケーブルが長くなればなるほどその特長を生かすことができる。このため、長距離ケーブルの開発が必然的に重要なテーマになる。低損失を実現するためには、断熱2重管への熱侵入量を低減する必要があるが、同時に冷媒循環のためのポンプ吐出圧やその動力の課題もある。現在までの多くの超伝導ケーブル実験装置では、ケーブル用冷媒流量が数十L/minで、2K/km - 4K/km程度である。このため、冷凍機からの吐出冷媒温度が70Kとし、77Kで冷凍機に戻すとすれば、冷凍機を設置する距離は精々5kmほどになる。流量を上げれば温度上昇を低減できるが、それには極めて高い冷媒循環ポンプの吐出圧が必要となり、距離が数kmでさえ技術的には極めて実現が困難な状況である。

一方、日本での一次変電所や二次変電所の距離は大都市では10km - 20kmであり、発電所、変電所間距離は海外ではもっと長い。このため、変電所以外に冷凍機ステーションを設置することが求められる。これは超伝導ケーブルを用いて、低電圧・大電流送電を行い、都市部での変電所設置を節約できる特長を殺すことになる。

この状況を抜本的に解決するために、石狩プロジェクトでは輻射シールド付き断熱2重管の研究開発を行い、試験を行ってきた。その結果、冷媒流量が30L/minで温度上昇が0.04K/kmと言う極めて低いデータと同時に、断熱2重管の冷媒往復で熱侵入量が0.88W/mと言う低い値を得ることができた。このため、このデータを利用して長距離超伝導ケーブルの設計検討を一昨年の学会では10kmケーブルについて山口他が既に発表しているが、このたび(一社)新金属協会に設置さ

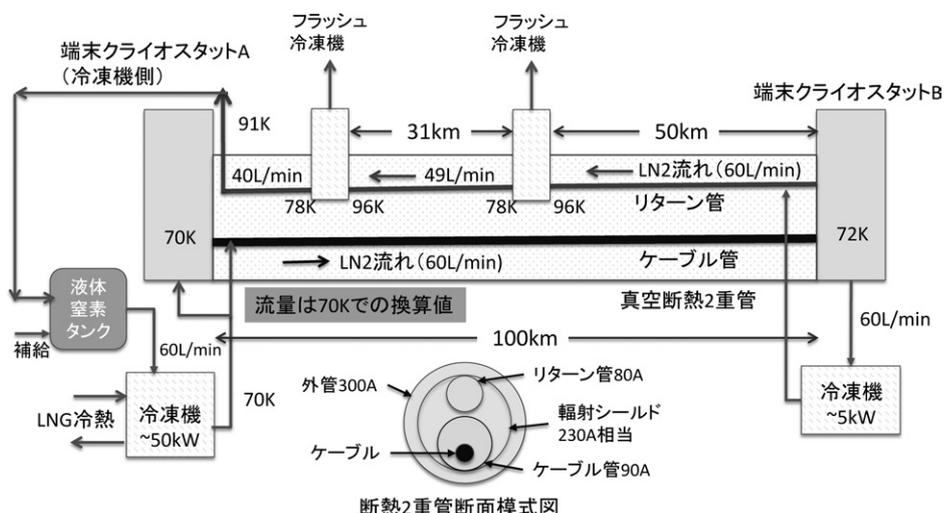
れた地域低温熱エネルギー利用電力システム実用化研究会(略称S4L)で本格的な機器パラメータやコスト評価を含め検討を行って来た。ここでは、熱・流体力学検討を中心に述べる。

2. 100kmケーブルの設計例

Fig. 1に100kmに亘って冷却ステーションを設置せず、端末両端にのみ冷凍機を設置した検討結果の一例を示す。これは石狩回線2の輻射シールド付き断熱2重管のデータを利用して検討を行っているが、同時に幾つかの仮定も設定している。冷媒流量を60L/minと石狩実験の倍にすると、圧損が上昇し、現有のポンプ吐出圧を1MPaの範囲に収めるため、管径を大きくしている。一方、輻射シールドのサイズは変わらないため、特に冷媒リターン管に入る熱量は変わらないとしている。冷媒としての液体窒素の最高温度を96K(飽和圧力が=0.5MPa)とし、それを超えたときには大気中にフラッシュすることで77Kに再冷却される。この類似方式はドイツ・エッセン市のAmpaCity Projectで用いられている。これから分かるように50kmではフラッシュ冷凍機が不要になる。このため、次期計画では熱侵入量目標を石狩の半分とするつもりである。また、現状の熱侵入量であっても、流量を80L/minとすれば、フラッシュ冷凍機は1台で済む。

3. 電力パラメータ等

輸送電力は500MWとし、B-to-Bの電力輸送を想定して、電圧は±50kV以下の複数のパラメータでケーブル及び電力変換器及び安全器の検討を進めている。



本研究を進めるために石狩市、新金属協会、(株)ABB、(株)三徳、愛知電機(株)の協力を頂いた。記して感謝を表す。

(*)石狩超電導・直流送電システム技術研究組合
(**)地域低温熱エネルギー利用電力システム実用化研究会

参考文献

S. Yamaguchi et al, "Construction and 1st Experiment of the 500-meter and 1000-meter DC Superconducting Power Cable in Ishikari", Physics Procedia, Volume 81, 2016, Pages 182-186.

Fig. 1 Thermo-Hydrodynamic analysis of 100km SC power transmission line

再生可能エネルギーの大量利用の鍵となるエネルギー貯蔵機能を有する超伝導ケーブルの可能性

Potential of Superconducting Cable with Energy Storage Function for Large-scale Introduction of Renewable Energies

東川 甲平, 木須 隆暢 (九大)

HIGASHIKAWA Kohei, KISS Takanobu (Kyushu Univ.)

E-mail: kohei@super.ees.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

地球環境のみならず、我が国のエネルギー安全保障の観点からは、輸入に頼る化石燃料への依存を緩和せねばならず、太陽光や風力に代表される再生可能エネルギーの導入拡大が喫緊の課題となっている。実際に、固定価格買い取り制度の実施により、その導入拡大は飛躍的に進んでおり、2017年のゴールデンウィークには九州電力管内で太陽光発電が電力需要の7割をカバーするようなタイミングがあった^[1]。このようなポテンシャルが見られる一方、特に再生可能エネルギーの大半を占めていくと考えられる太陽光発電では、曇りの日における日射量の変化が大幅かつ急激となり、その変動の吸収には非現実的な出力容量の電池類が必要となるなど、現状の電力システムでは、受け入れ許容量に限界が迫っている^[2]。そこで本研究では、再生可能エネルギーの大量利用の鍵となるエネルギー貯蔵機能を有する超伝導ケーブルの可能性を検討する。

2. 提案内容

Fig. 1 に本提案の概略を示す。インダクタンスの大きな超伝導ケーブルを直流で運用することにより、電力を磁気エネルギーとして貯蔵することを可能とするものである。これまでのところ、超伝導技術の導入により電力輸送時の損失を低減することだけでもメリットが叫ばれていたが、それに加えて今後の再生可能エネルギー大量導入拡大を支える機能まで有することになる。また、原理は SMES に近いが、そのための多大なスペースや設備を必要としないところも特長となっている。その他、①再生可能エネルギーと近年の負荷に親和性の高い直流運用であること、②再生可能エネルギー導入時の電力貯蔵設備の逐次増強が不要となること、③電池類では困難となる高速大出力動作を電力システム自体が行えることが特長として挙げられる。

3. 検討例

一例として、Fig. 2 に示すように、太陽光発電を有する 10 MW 級 (1 kV, 10 kA 級) のマイクログリッドの直流運用を考え、このマイクログリッドと商用系統の接続点を 1 kV の電圧源とし、そこにインダクタンスの大きな超伝導ケーブルを導入することを想定した。このようなマイクログリッド内の調整可能電源の応答速度、またその動作停止・再運転にかかる時間を考慮し、超伝導ケーブルが蓄えておくべきエネルギーは最大でも 1 GJ であると見積もり、超伝導ケーブルのインダクタンスを 20 H (2 mH/m を 10 km と想定) と設定した。なお、COMSOL を用いた電磁界解析により、このような超伝導ケーブルが非現実的ではないことを確認した。このとき、太陽電池パネルからの出力変動が商用系統側にどのように伝わるかを MATLAB/Simulink によって計算した。その結果を Fig. 3 に示す。太陽電池パネルからの出力 (P_{PV}) 波形は、文献^[3]のデータを定格 15 MW に換算したものを用いた。1 秒に定格の 5% 以上も変化するような激しい変動であり、このような急峻な変化を調整可能電源で補償することは困難である。一方、商用系統側に流れる電力 (P_{IB}) は、かなり平滑化されており、その変化は 1 秒に定格の 0.15% 未満にまで抑制された。このような平滑化は、超伝導ケーブルがそのエネルギー貯蔵機能により自動的に出力 (P_{SC}) 補償したことによるものである。すなわち、この単純な例では、10 MW

級のマイクログリッドにおいて 5 MW にも及ぶ出力変動補償を、電池類もなしに超伝導ケーブルだけで行えることとなった。

謝辞

本研究は、NEDO の「エネルギー・環境新技術先導プログラム/未踏チャレンジ 2050/革新的エネルギーネットワーク基盤技術の創製」の一環として行うとともに、岩谷直治記念財団による助成を得て行ったものである。

参考文献

- [1] 「太陽光、一時需要の7割 九電のGW電力需給状況」日本経済新聞(2017年5月24日)。
- [2] 「再生エネ政策仕切り直し」日本経済新聞(2014年10月1日)。
- [3] 「八戸市 水の流れを電気で返すプロジェクト」NEDO。

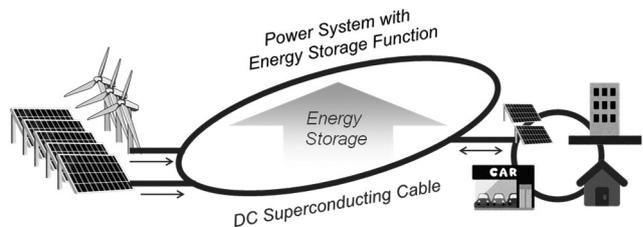


Fig. 1. Conceptual diagram of power system with energy storage function by DC superconducting cable.

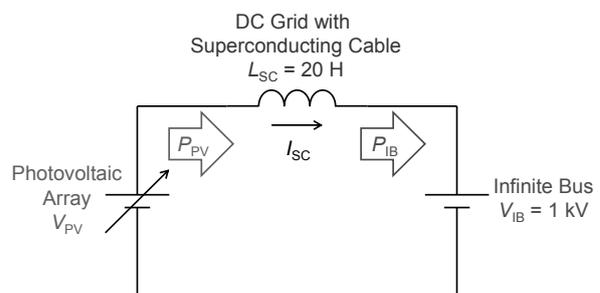


Fig. 2. Example of the application of DC superconducting cable to 10-MW-class micro grid.

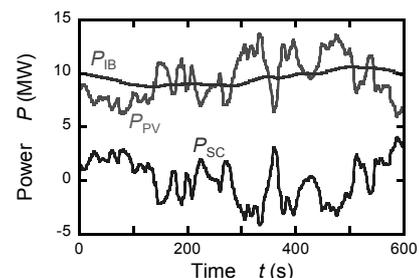


Fig. 3. Smoothing of output fluctuation from photovoltaic array based on energy storage function by DC superconducting cable: P_{PV} : output from photovoltaic, P_{IB} : output to infinite bus, P_{SC} : output compensation by the cable.

インジウム箔を用いた高温超伝導線材の超音波接合の基礎検討

Fundamental examination of ultrasonic welding of high-temperature superconducting tapes using an indium foil

伊藤 悟, 藤井 啓道, 佐藤 裕, 橋爪 秀利(東北大学)

ITO Satoshi, FUJII Hiromichi T., SATO Yutaka S., HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku Univ.)

E-mail: satoshi.ito@qse.tohoku.ac.jp

1. はじめに

著者らは高温超伝導線材の簡易接合法として、インジウム箔を接合部に挿入し、100°C 程度の熱処理でプレスして接合する機械的接合法[1]の開発に取り組んできた。一方、さらに簡易的に接合できる可能性がある超音波接合を用いた REBCO 線材の直接接合・はんだ接合の事例[2]も報告されている。このたび、著者らはインジウム箔を接合部に挿入する体系で REBCO 線材、Bi-2223 線材をそれぞれ超音波接合した接合サンプルを製作し、液体窒素浸漬冷却下にて、その接合抵抗、臨界電流を評価した。本発表では、得られた超音波接合サンプルの評価結果、および機械的接合サンプルの接合性能との比較について報告する。

2. 実験方法

高温超伝導線材として、4 mm 幅の銅安定化層付 REBCO 線材 (Superpower, SCS4050-AP, 臨界電流 100 A at 77 K, self-field) および 4.3 mm 幅の Bi-2223 線材 (住友電工, DI-BSCCO Type-H, 臨界電流 180 A at 77 K, self-field) を用いた。まず各線材の接合面を #240 の研磨紙で研磨し、エタノールで洗浄した後に、厚さ 100 μm の In 箔を接合面に挟み、1) Fig. 1 に示す超音波接合機 (精舎電子工業, SNOJET SGM-1200) で接合圧力 0.3 MPa, 超音波振動周波数 19.15 kHz, 超音波振動振幅 51 μm , 接合時間 0.1 秒に設定 (超音波接合: 線材ごとに 3 サンプルずつ)、2) プレス機で接合圧力 100 MPa を接合部に与えながら 100°C に 10 分間保持 (機械的接合: 線材ごとに 1 サンプルずつ) して各接合サンプルを製作した。続いて、製作した接合サンプルを液体窒素浸漬冷却して通電試験を実施し、接合抵抗および臨界電流を四端子法を用いて評価した。なお、接合長がサンプルによってばらついていること (4~6 mm 程度) や、他接合法との比較のために、接合抵抗と接合面積の積である接合抵抗率 (単位 $\text{n}\Omega\text{cm}^2$) を接合性能の評価基準として用いる。

3. 結果と考察

Fig. 2 に得られた電流-電圧特性を、Table 1 に各サンプルの評価結果を示す。なお、臨界電流は接合抵抗分の電圧を引いたうえで 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 基準で評価した。Fig. 2, Table 1 に載せたサンプル名は、RE: REBCO 線材, Bi: Bi-2223 線材, UW: 超音波接合, MJ: 機械的熱合を意味する。REBCO 線材の接合サンプルでは、いずれの接合方法でも同等の接合抵抗率が得られており、また、臨界電流の低下もほとんどない結果となった。一方、Bi-2223 線材の場合、特に超音波接合の場合に臨界電流が大幅に低下した。今後、超音波接合時に Bi-2223 線材に発生するひずみ、および温度上昇を詳細分析して、臨界電流低下の原因を特定し、条件を最適化する必要がある。なお接合抵抗率については、接合法による大きな違いは見られていない。

REBCO 線材の接合サンプルで得られた接合抵抗率は、銅安定化層付 REBCO 線材のハイブリッド接合 (超音波接合と InSn ハンダ接合の組合せ) での結果 (57 $\text{n}\Omega\text{cm}^2$) [2] や銅安定化層無 REBCO 線材の金属ナノ粒子ペースト接合 (48 $\text{n}\Omega\text{cm}^2$) [3] に比べて小さい。また、Bi-2223 線材の接合サンプルで得られた接合抵抗率も、同線材のはんだ接合で得られる接合抵抗率 ($\sim 30 \text{n}\Omega\text{cm}^2$) [4] と比べて小さい、またはわずかに大き

い程度であった。一方、比較している接合法[2-4]では、より長い接合部を有するサンプルでの接合抵抗評価を行っており、インジウム箔を用いた機械的接合法や超音波接合法においても、より長い接合部を有するサンプルを製作し、その接合性能を評価する必要がある。

4. まとめ

In 箔を接合部に挿入して REBCO 線材と Bi-2223 線材の超音波接合サンプルを製作した。接合抵抗率は機械的接合法のそれと同等のものが得られたが、Bi-2223 線材を用いた場合は臨界電流の低下も確認された。今後、臨界電流低下の原因特定・防止を図るとともに、より長い接合部を有する接合サンプルの製作に取り組む予定である。

参考文献

1. T. Nishio, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 27 (2017) Art ID 4603305.
2. HS. Shin, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 29 (2016) Art ID 015005
3. T. Nakanishi et al.: Physics Procedia, Vol. 81 (2016) pp.105-108.
4. G. Osabe et al.: Physica C, Vol. 470 (2010) pp.1365-1368.



Fig. 1 Ultrasonic welding machine and its joint sample.

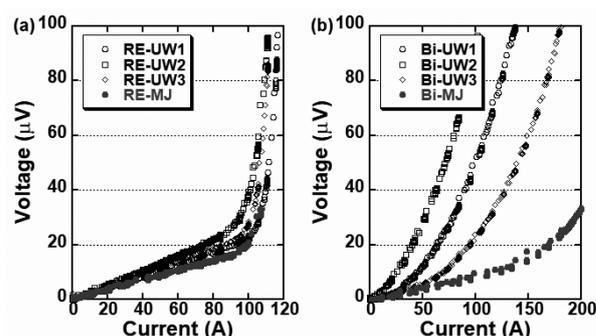


Fig. 2 Current-voltage characteristics of joint samples: (a) REBCO tapes and (b) Bi-2223 tapes.

Table 1 Specifications for each sample (I_c : Critical current, R_j : Joint resistance, S_j : Joint area, $R_j S_j$: Joint resistivity).

Sample	I_c (A)	R_j ($\text{n}\Omega$)	S_j (mm^2)	$R_j S_j$ ($\text{n}\Omega\text{cm}^2$)
RE-UW1	101	220	14.4	31.7
RE-UW2	92	268	12.6	33.8
RE-UW3	99	236	13.8	32.6
RE-MJ	100	176	20.0	35.2
Bi-UW1	37	106	18.9	20.0
Bi-UW2	22	233	16.6	38.6
Bi-UW3	71	107	17.0	18.2
Bi-MJ	159	90	23.7	21.3