

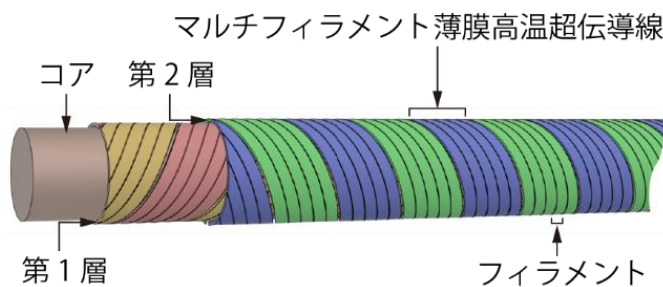
超伝導 SCSC ケーブルと巻線技術を開発

—変動磁界に強く脱炭素や核融合応用に期待—

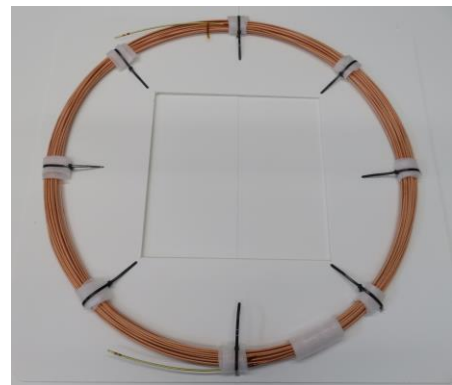
概要

京都大学 大学院工学研究科の雨宮 尚之 教授らは、変動する磁界にさらされたときに内部で発生する摩擦発熱のような損失（交流損失^{注1)}）が小さく、大きな電流が流せ、あらゆる方向に曲げられる SCSC ケーブル（エスシーエスシーケーブル）^{注2)}と名付けた高温超伝導集合導体^{注3)}の開発を進めてきましたが、今回、

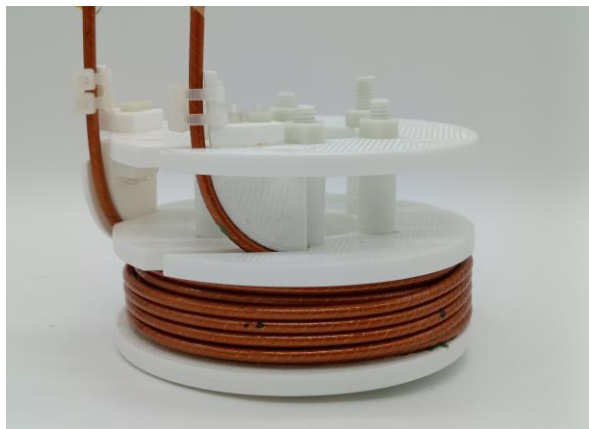
- フュージョンエネルギー発電装置の超伝導コイル用導体に応用できる水準の数キロアンペア（設計値）を流せる、銅めっきマルチフィラメント薄膜高温超伝導線^{注4)}を 24 本集合化したケーブル
- カーボンニュートラルに向けた航空機電気推進用モーターを作製できる水準の長さ 45 メートルのケーブルの試作に成功しました。さらに、SCSC ケーブルを、半径 30 ミリメートルの巻き芯に 33 巻きした円形コイルや曲げ半径 25 ミリメートルの立体形状の鞍型コイルの作製・通電に成功しました。特に鞍型コイルはモーター等で必要とされるにも関わらず、従来の高温超伝導線テープ線では巻くことが困難でした。また、試作したコイルで、従来比約 10 分の 1 の交流損失低減に成功しました。本研究成果は、2026 年 9 月 9 日（米国東部時間）に 2026 年応用超伝導会議（米国ピッツバーグ開催）にて発表されます。



SCSC ケーブルの概念図（2 層のもの）（N. Amemiya et al. 2022 Supercond. Sci. Technol. 35 025003）



長さ 45 メートルの SCSC ケーブル
（写真提供：京都大学）



半径 30 ミリメートルの円形巻き芯に 5 層にわたって
33 巻きした円形コイル（写真提供：京都大学）



曲げ半径 25 ミリメートルで 3 巻きした立体
形状の鞍型コイル（写真提供：京都大学）

1. 背景

高温超伝導線は、電気抵抗がゼロで非常に高い電流密度で電流を流せるため、モーターなどの電気機器にえば省エネ・小型軽量化に役立ちます。また、地球温暖化につながる二酸化炭素排出を抑えつつ、AI

の普及などで増大する電力需要を賄うために期待が高まっているフュージョンエネルギー発電（核融合発電）においても、超高磁界を発生する超伝導コイルへの応用が期待されています。

しかし、モーターやフュージョンエネルギー発電において、1) 時間的に変動する磁界のもとで使うと交流損失と呼ばれる損失が発生すること、2) 必要とされる数キロアンペアから数十キロアンペアの電流を1本の超伝導線では流せないこと、3) テープ形状をしているためテープの面の方向には曲げ易いものの幅の方向には曲げにくく多様な形のコイルに巻けないこと、といった欠点が高温超伝導線を応用を妨げています。

2. 研究手法・成果

テープ状の高温超伝導線の中の超伝導薄膜を細いフィラメント^{注4)}に分割することで、交流損失は原理的に小さくできます。さらに、フィラメント上の微小な不良部を迂回できるようにするためにはフィラメント同士を銅めっきの層で電氣的に接続することが有効です。このような銅めっきマルチフィラメント薄膜高温超伝導線^{注4)}を、直径3ミリメートル以下の細い金属コアのまわりにらせん状に巻きつけることでフィラメントと銅めっきの間を流れる結合電流と呼ばれる一種のうず電流を抑制し、交流損失を有効に低減するSCSCケーブルと呼ばれる超伝導集合導体を、京都大学の雨宮 尚之 教授を中心としたグループは開発してきました。SCSCケーブルは、交流損失が小さく、高温超伝導線を金属コアのまわりに多層に多数本巻きつけることで大きな電流を流すことができ、らせん構造をしているためにあらゆる方向に自由に曲げられる超伝導集合導体で、背景で述べた高温超伝導線の三つの欠点を克服するものです。

雨宮 教授のグループでは、手巻きのケーブルや手作りのケーブル作製（ケーブリング）装置で作ったケーブルでSCSCケーブルによる交流損失低減などの原理検証を行ったのち、連続で長いSCSCケーブルを作製できるケーブリング装置を導入し、大きな電流を流せる長いSCSCケーブルの作製技術（ケーブリング技術）、それを使ってコイルを巻く巻線技術の開発を進め、作ったコイルにどれだけ大きな電流を流せるか、交流損失をどれだけ減らせるかを評価してきました。

SCSCケーブルの実用化に向けては、ケーブリング技術の中でも、大きな電流を流すために金属コアのまわりに精密かつ多層に、多数本の高温超伝導線を巻き付ける技術（多層化技術）の開発と、コイルを巻くために必要な長いケーブルを作る技術（長尺化技術）の開発が必要です。今回、多層化技術に関しては、高温超伝導線の巻き付け角度や間隔を慎重に設計し、金属コアのまわりに8層にわたって合計24本の銅めっきマルチフィラメント薄膜高温超伝導線を巻き付けたSCSCケーブルの試作に成功しました。このケーブルは理論上、数キロアンペアの電流を流せるもので、ケーブルを作る素材となる高温超伝導線の種類を変えることによってフュージョンエネルギー発電の超伝導コイル用導体に応用できる技術水準に迫るものです。長尺化技術に関しては、ケーブリング装置の改良や運転技術の向上により長時間の安定したケーブリングを可能にして、長さ45メートルのSCSCケーブルの試作に成功しました。この45メートルという長さは、航空機の電気推進用モーターといった用途には十分な長さです。

SCSCケーブルをモーターなどの電気機器に使用する際には、多くの場合、コイルに巻く必要があります。SCSCケーブルをどのくらいまで曲げることが可能かを実験的に調べるところから始め、円形のコイルや馬の鞍のような立体形状をしたコイルを巻くための巻線技術の開発を進めました。その結果、SCSCケーブルを、半径30ミリメートルの円形巻き芯に5層にわたって33巻きした円形コイルや曲げ半径25ミリメートルで3巻きした立体形状の鞍型コイルを作製し、理論予測とほぼ等しい水準の電流を流すことに成功しました。高温超伝導集合導体でコイルを巻く場合、一般に、小さな半径に巻くことの方が困難であり、半径30ミリメートルの円形巻き芯に巻くことができれば、これより大きな巻き半径の実用コイルの巻線も可能です。また、鞍

型コイルはモーターや粒子加速器のマグネットにおいてニーズがあるにも関わらず、従来、テープ形状の高温超伝導線そのままでは巻くことが困難でした。

さらに、標準的な 4 mm 幅の超伝導線で構成したケーブルで巻いた円形コイルの交流予測値に比べて、上に挙げた 33 巻き円形コイルの交流損失実測値を約十分の一に低減することに成功しました。これは、モーターの回転磁界を発生する巻線やフュージョンエネルギー発電装置のプラズマ電流駆動用コイルに高温超伝導を応用する上で重要な成果です。

3. 波及効果、今後の予定

今回、実用的な水準の大電流を流せる多数本の線材を集合化した SCSC ケーブル、実用的な長さの SCSC ケーブルの試作を通して、ケーブリング技術が実用水準にほぼ達していることを実証しました。また、SCSC ケーブルを用いて小さな曲げ半径の円形コイルや立体形状の鞍型コイルが巻けることも実証し、コイルに巻いた状態における交流損失の低減も実証しました。これらの成果は、SCSC ケーブルによって、1) 変動する磁界に弱い、2) 十分大きな電流を流せない、3) 自由な形状に巻けないという高温超伝導線の欠点が克服可能であることを示すものです。

今後、様々な超伝導コイルを巻く複合素材としての SCSC ケーブル自体の製品化、超伝導コイルを用いた超伝導モーターなどの電気機器の社会実装、SCSC ケーブルをサブケーブルとした超伝導導体で構成したコイルによるフュージョンエネルギー発電の実証などを通して、カーボンニュートラルに貢献することが期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

本成果は、科学技術振興機構（JST）の支援による研究開発で得られたものです。

科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 先端的カーボンニュートラル技術開発 ALCA-Next

技術領域：未来本格型

（プログラムディレクター：魚崎 浩平 北海道大学 名誉教授／物質・材料研究機構 名誉フェロー／科学技術振興機構 研究開発戦略センター 上席フェロー）

研究開発課題：低交流損失と高ロバスト性を両立させる高温超伝導技術

（研究開発代表者：雨宮 尚之 京都大学 教授、共同研究機関：株式会社東芝、新潟大学）

課題番号：JPMJAN24G1

研究開発期間：2024 年 4 月～

<用語解説>

注 1) 交流損失：磁束が細い線（磁束量子線）となって超伝導体の中に侵入し移動するときに発生する摩擦発熱のようなものです。ピン止め力（摩擦力に相当）に逆らいながらローレンツ力（フレミングの左手の法則による力）によって磁束量子線が動くときに発生します。交流損失が大きいと、超伝導線の温度が上昇して超伝導状態を保てなくなる可能性があるほか、除熱のために必要な電力が電気機器の効率を低下させてしまいます。

注 2) SCSC ケーブル（エスシーエスケーブル）：京都大学を中心に研究開発が進められている、交流損失が小さく、大きな交流電流を流すことができ、任意の方向に曲げられる高温超伝導集合導体（注 3 で説明）です。金属のコア（芯材）のまわりに、銅めっきマルチフィラメント薄膜高温超伝導線（注 4 で説明）をらせん状に、複数層にわたって巻き付けた構造をしています。英語の Spiral Copper-

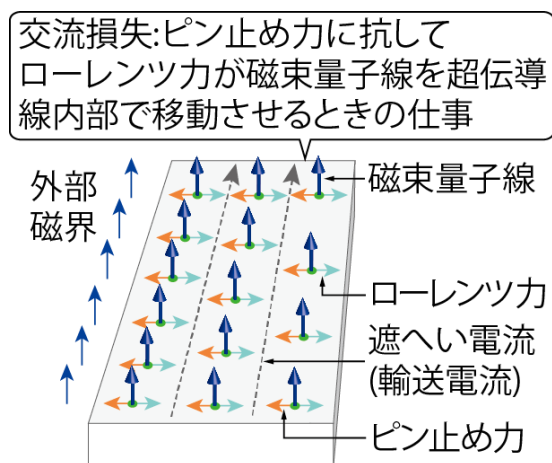
plated Striated Coated-conductor cable（スパイラルー銅めっき一条痕付きー薄膜超伝導線ーケーブル）の単語の頭文字をとって名付けました。

- 注3） 超伝導、高温超伝導体、高温超伝導線、薄膜高温超伝導線、高温超伝導集合導体：低温で電気抵抗がゼロになる現象が超伝導です。超「電」導と書く場合もあります。超伝導になる温度が摂氏マイナス248度以上の物質を高温超伝導体、それ未満のものを低温超伝導体と呼びます。高温超伝導体を用いた電線が高温超伝導線、高温超伝導線体の薄膜を金属テープの上に重ねたような構造の高温超伝導線を薄膜高温超伝導線と呼びます。幅4ミリメートルの薄膜高温超伝導線が、現在は、標準的な高温超伝導線となっています。大きな電流を流せるように高温超伝導線を集合化した（束ねた）ものを高温超伝導集合導体と呼びます。
- 注4） フィラメント、銅めっきマルチフィラメント薄膜高温超伝導線：薄膜高温超伝導線内部の超伝導薄膜を細く分割すれば、注1で説明したように、原理的には交流損失を小さくできます。このような薄膜高温超伝導線をマルチフィラメント薄膜高温超伝導線、細く分割した超伝導薄膜をフィラメントと呼びます。しかし、フィラメントに分割して、フィラメント同士を完全に電氣的に絶縁したのでは、万一、あるフィラメントに超伝導ではない部分（不良部）があったときに、電流が迂回できず、そのフィラメントは全く電流を流すことができなくなってしまう。そこで、超伝導薄膜をフィラメントに分割した上で、超伝導薄膜全体の上を銅でめっきして、フィラメント同士を電氣的に接続するという対策が考えられます。ここでは、このような超伝導線を「銅めっきマルチフィラメント薄膜高温超伝導線」と呼ぶことにします。
- 注5） 2026年応用超伝導会議：応用超伝導会議は、偶数年に米国で開催される応用超伝導分野でもっとも権威ある学術会議です。

<発表タイトルと著者>

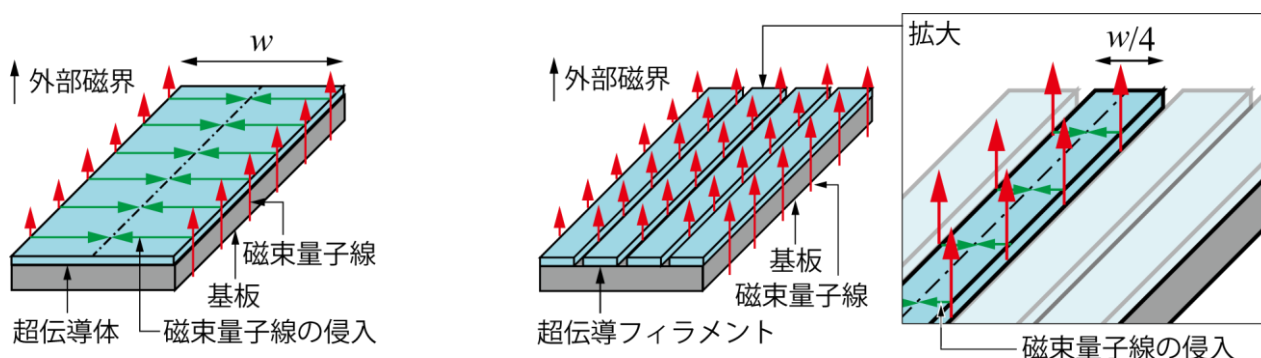
- タイトル： “Progress of development of small-magnetization and low-AC-loss round SCSC cable and its winding technology”
（低磁化・低交流損失な円形導体 SCSC ケーブルとその巻線技術開発の進展）
- 著 者： Naoyuki Amemiya, Yusuke Sogabe (Kyoto University)
Keita Sakamoto, Toshiaki Nonaka (Toshiba Corporation)
Satoshi Fukui (Niigata University)
Kiyoshige Hirose (Furukawa Electric Co., Ltd.)
Michinaka Sugano, Toru Ogitsu (KEK)
Marek Mosat, Tengming Shen (Lawrence Berkeley National Laboratory)
- 発表会議： 3Lor1D-01, The Applied Superconductivity Conference (ASC 2026) (Pittsburgh, U.S.A., presented on September 9, 2026) (2026年応用超伝導会議（米国 ピッツバーグにて開催）、3Lor1D-01、2026年9月9日発表)

< 参考図表 >



参考図 A 交流損失発生の原理 (図提供: 京都大学)

交流損失は、磁束が細い線（磁束量子線）となって超伝導体の中に侵入し移動するときに発生する摩擦発熱のようなものです。ピン止め力（摩擦力に相当）に逆らいながらローレンツ力（フレミングの左手の法則による力）によって磁束量子線が動くときに発生します。交流損失が大きいと、超伝導線の温度が上昇して超伝導状態を保てなくなる可能性があるほか、除熱のために必要な電力が、電気機器の効率を低下させてしまいます。

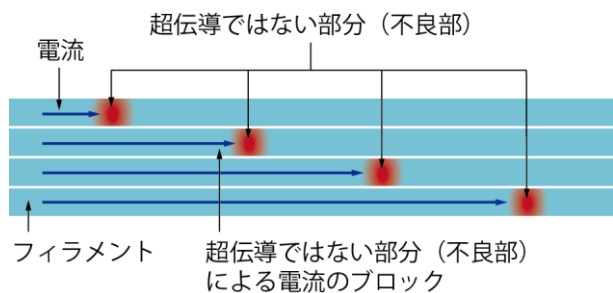


(a) 超伝導薄膜を分割しない場合

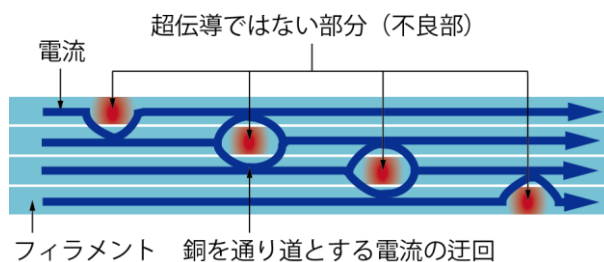
(b) 超伝導薄膜をフィラメントに分割した場合

参考図 B マルチフィラメント薄膜高温超伝導線における交流損失低減の原理 (図提供: 京都大学)

超伝導薄膜を細いフィラメントに分割すると、磁束量子線の移動する距離が短くなり、磁束量子線が移動するときに発生する摩擦発熱のようなものである交流損失も小さくすることができます。



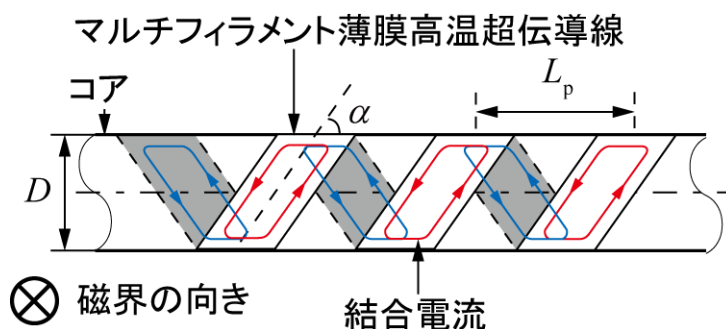
(a)フィラメント間を電氣的に絶縁した場合



(b)フィラメントの上に銅をめっきした場合

参考図 C マルチフィラメント線における超伝導ではない部分（不良部）の電流迂回（図提供：京都大学）

フィラメント同士を完全に電氣的に絶縁すると、万一、あるフィラメントに超伝導ではない部分（不良部）があったときに、電流が迂回できず、そのフィラメントは全く電流を流すことができなくなってしまいます。マルチフィラメント薄膜高温超伝導線のフィラメントの上を銅でめっきしフィラメント同士を電氣的に接続すると電流が迂回できるようになります。



補足図 D SCSC ケーブルにおける交流損失低減の原理：結合電流の速やかな減衰（図提供：京都大学）

マルチフィラメント薄膜高温超伝導線のフィラメントの上を銅でめっきしフィラメント同士を電氣的に接続すると、磁界がかかったときに銅を介して結合電流という一種の渦電流が流れ、この結合電流が減衰しない限りは、フィラメントに分割したことによる交流損失低減効果が損なわれてしまいます。銅めっきマルチフィラメント薄膜高温超伝導線をコアのまわりにらせん状に巻き付けることで結合電流を速やかに減衰させ、交流損失の低減効果を維持できるようになります。