

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H04477

研究課題名（和文）高磁場加速器マグネット用ケーブルのためのA15極細超伝導線

研究課題名（英文）Ultra fine A15 superconducting wire for high-field accelerator magnets

研究代表者

北口 仁（KITAGUCHI, Hitoshi）

国立研究開発法人物質・材料研究機構・エネルギー・環境材料研究センター・特命研究員

研究者番号：60354304

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 32,700,000円

研究成果の概要（和文）：Nb/Al複合線の断面設計を最適化し、0.05mm径で1km以上の長尺線無断線加工や、異種金属複合線として世界最細で絹糸よりも細い0.017mm径までの細線化に短尺で成功した。Nb/Sn複合線の大量導体化実証として0.05mm径線を用いて多重撚線を試作し、熱処理後の曲げやすさと5kA（4.2K、2T）までの通電を確認した。

撚線ケーブル電流分布解析では大規模回路方程式を解く必要がある。等価素子導入で要素を半減する手法（計算時間が従来法の65%）を考案した。

伸び計等を使用できない極細線材素線の機械特性を評価する手法を確立した。撚線の試験では、許容応力が単線とほぼ同レベルと判明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

上部臨界磁場の高いNb₃SnやNb₃AlといったA15型化合物の超伝導線材（以下、A15超伝導線材と記載）とそのケーブルは超伝導相を生成させる熱処理（リアクト）後は脆いためにコイル巻線（ワインド）できない。髪の毛よりも細い極細超伝導線材を撚り合わせることで、性能を劣化させることなく自在に曲げることができ、これまで前例のないしなやかさをもった超伝導ケーブルの開発を進めている。熱処理後に優れた曲げやすさを維持しながら実際に5kAの大電流通電に成功した本研究の成果は、次世代型高磁場加速器で期待されている熱処理済みのケーブルを巻くリアクト&ワインド法でのコイル製作への道を拓く。

研究成果の概要（英文）：Nb/Al ultra-fine composite wire of 0.05mm in outer diameter and >1km length was fabricated without breakage by improving its cross-sectional design. A part of this wire was successfully reduced to 0.017mm dia., which is thinner than silk thread and the world finest metal composite wire. To demonstrate the potential of Nb/Sn ultra-fine composite for accelerator cables, 7/7/36/0.05 stranded tertiary cable (3.0 mm cable dia.) was fabricated. The cable is highly flexible after heat treatment for A15 superconducting phase formation, and carries 5kA (4.2K, 2T). For the current distribution analysis, we developed a new approach by introducing an equivalent circuit element. It enables a 35-percent saving of CPU time.

A tensile testing method was established to characterize mechanical properties for ultra-fine Nb₃Sn wires without using extensometers. The allowable tensile stress for a twisted cable was confirmed to be equivalent to that of a single wire.

研究分野：応用超伝導

キーワード：超伝導線材 極細金属線加工技術 超伝導ケーブルの電磁現象 極細超伝導線の特性評価技術

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

次世代加速器の目標である 16T を超える磁場を達成するためには Nb₃Sn や Nb₃Al といった A15 型化合物の超伝導線材を用いる必要がある。マグネット製作上は熱処理を行ってからコイルに巻く方法が望ましいが、A15 超伝導線材では実現されていなかった。これは、既存の A15 超伝導線材の特性が曲げ加工によって大きく損なわれてしまうことに起因する。

研究グループでは髪の毛よりも細い極細超伝導線材の作製には既に成功しており、これを撚り合わせることで、性能を劣化させることなく自在に曲げることができ、これまで前例のないしなやかさをもった A15 型化合物ケーブルが実現できると着想した。しかしながら、当時の極細線は加速器マグネット主コイル用として十分な性能には至っておらず、一層の高性能化が必要な状況であった。また、極細線撚り合わせケーブルにおける様々な電磁現象は解明されていなかったことから、実験とシミュレーションの両面から理解を深め、ケーブル化のための基盤的知見の蓄積も必要であった。

2. 研究の目的

本研究では、直径 0.03 ~ 0.05mm と髪の毛よりも細い極細超伝導線を、熱処理後も導体を曲げてコイル巻線 (R&W 法コイル製作) が出来る高磁場加速器マグネット用ケーブルへとつなげていくことを意図した。このため、以下の二点を主たる目的とした。

- (1) 極細超伝導線材の作製プロセスの改良とケーブル実証
- (2) 極細線撚り合わせケーブルの電磁現象に関する基盤的知見の蓄積

3. 研究の方法

- (1) 極細超伝導線材の作製プロセスの改良とケーブル実証

極細超伝導線材は、異種金属複合体ビレットを準備し、押出加工を行って縮径し、ダイス引きによる伸線行程を繰り返して細線化する。出発材となるビレットの断面構成が、その後の細線化行程の円滑な進行を左右する。このため、細線化行程の状況 (断線等) や細線断面組織観察結果をフィードバックしてビレット断面構成の改善を行う。

本研究で作製した極細線を撚り合わせてケーブルを試作し、超伝導特性や曲げやすさを評価する。複数の撚線ケーブルを撚り合わせる多重撚線も試作して評価する。

- (2) 極細線撚り合わせケーブルの電磁現象に関する基盤的知見

多数の線材を撚り合わせたケーブルの電流分布を詳細に解析するには、大規模な回路方程式を解く必要がある。従来法 (節点電位法、スパース・タブロー法) では、回路網の構成要素が素線間接触点と素線本数の積に比例して増大するため、現実的な時間での計算が困難と予想される。それを克服するために、回路モデル化や要素の取り扱いを考察・工夫する。

電磁現象の理解の重要パラメータである線材機械特性と応力が超伝導特性に与える影響を調べる。今までに経験のない超伝導極細線を取り扱うことから、極細線に対応できる試験方法も考察・工夫する。

4. 研究成果

- (1) 極細超伝導線材の作製プロセスの改良とケーブル実証

極細超伝導線の連続伸線加工を高効率で行うことのできるノンスリップ型連続伸線機を導入した。従来のスリップ型伸線機と比較してダイス毎の後方張力の精密制御が可能で、難加工性素材の伸線加工中における断線防止が期待できる。ジェリーロール法 Nb/Al 複合線の伸線加工を試行し、外径 0.05mm で長さ 1km 以上の長尺線が無断線で加工できた。この一部についてさらなる極細化に挑み、短尺ではあるが絹糸よりも細い外径 0.017mm までの細線化に成功するとともに、超伝導特性を維持していることも確認できた (図 1)。この超極細 Nb/Al 線は異種金属の複合細線として世界最細の事例と考えている。

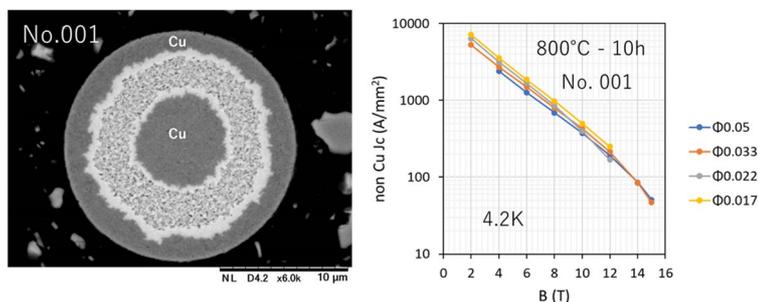


図 1 外径 0.017mm Nb/Al 複合線の断面及び
外径 0.05 ~ 0.017mm 極細線熱処理後の超伝導特性

Nb/Sn 複合線では、ピレット外径 215mm の量産規模で、極細線に特化したデザインでは世界初の、熱間押出線材試作を実施した。押出加工では問題なかったが、断面観察により外皮銅とブロンズ間の Nb バリアが異常変形していると判明した。原因として、ピレット組立時の隙間が大きいこと、バリアの材質に問題があると考えた。その後の伸線加工と中間焼鈍の繰り返しでバリアの異常変形は著しくなった。最終的に外径 0.05mm までの伸線加工には成功したが、バリアの異常変形は断線原因となるため改善が必要と判断した。そこで、種々の改良を加えたピレットで熱間押出試作を実施した。改良前同様に熱間押出には問題はなく、押出時の定常圧力も大きな違いは無かった。しかしながら、押出後の断面ではバリアの異常変形は認められず大きく改善された(図2)。量産規模で試作した線材 2 種は、いずれも外径 0.05mm まで縮径することができ、極細線に特化したデザインでの量産化の目処がついた。さらに、外径約 3mm の 3 次撚りケーブル(7 本 × 7 本 × 36 本: 合計 1764 本を撚ったもの)を試作した(図3)。熱処理後に優れた可撓性(曲げやすさ)を維持していることを確認(図3)した上で、実際に 5kA (4.2K、2T) の大電流通電実験を行って臨界電流特性確認(図4)し、多重撚線導体として実証した。

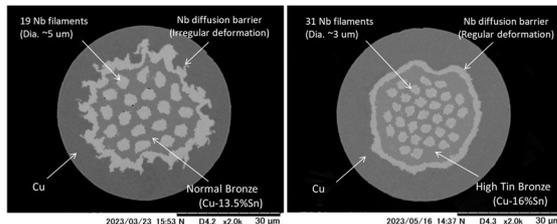


図2 ピレット断面構成改良前後の加工後断面の比較

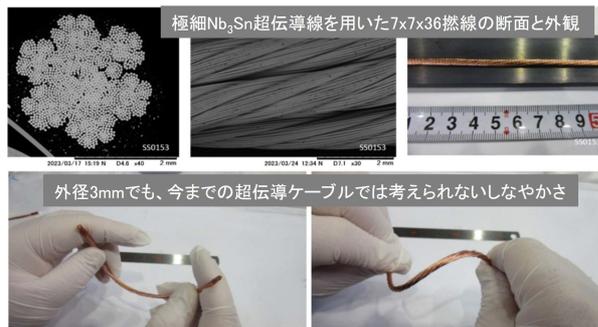


図3 直径 0.05mm の Nb₃Sn 超伝導線を用いた 3 次撚線 (7x7x36、ケーブル径 ~ 3.0 mm)

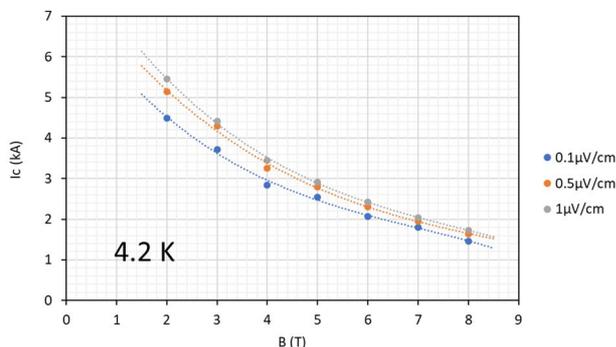


図4 7x7x36 撚線(図3に示す)の通電試験結果

(2) 極細線撚り合わせケーブルの電磁現象に関する基盤的知見

直径 0.05 mm のブロンズ法 Nb₃Sn 線材を 19 本撚り合わせたケーブルの電流分布を詳細に解析するには、インダクタンスとコンダクタンスで構成される回路網の構成要素が素線間接触点と素線本数の積に比例して増大するため、大規模な回路方程式を解く必要がある。当初に導入した節点電位法(スパース・タブロー法)は、全ての枝電流、枝電圧、節点電位を未知変数とすることで最も汎用性の高い回路定式化法であるが、取り扱う回路網の構成要素が素線間接触点と素線本数の積に比例して増大するため、計算時間が膨大となる。そこで、枝で素子をまとめて直列で等しい電流とした等価素子を導入することで未知数を大幅に減らす修正スパース・タブロー法を考案した。例えば、電流源接続の素線 1 本、軸方向分割 1 の回路モデル(図5)であれば、従来法では節点数 2、枝数 4 で 10x10 マトリックスであったところを、修正法では節点数 1、枝数 3 で 7x7 マトリックスとすることができ、計算時間を 35%低減できる。この修正スパース・タブロー法は多数本導体の電流分布解析では前例のない手法であり、クエンチでコンダクタンス枝が新たに出現しても、枝数(計算マトリックスサイズ)は変わらない等の利点があることで大容量導体の電流分布解析のための強力なツールとして期待できる。一層の発展を図るため、素線間・要素間相互インダクタンスを考慮した定式化や不均一インダクタンスと素線間接触抵抗・端部接続抵抗を考慮した電流分流のモデル計算を行うことが望まれる。

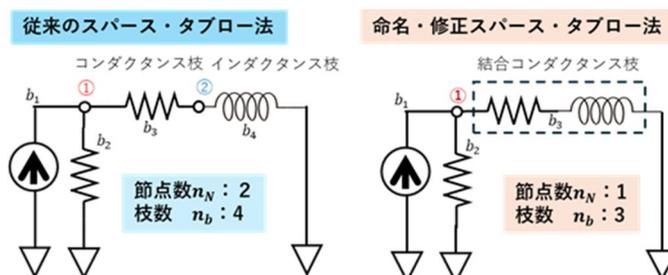


図5 素線 1 本、軸方向分割 1 の回路モデルにおける従来法と修正法の比較

直径 0.025 ~ 0.05mm の極細多芯 Nb₃Sn 線材素線の室温引張強度評価のため、既存の引張試験機に組み合わせる治具を本研究で新規に考案・製作し、試験を行った。5 N 容量の小型ロードセルを自作し、荷重校正の結果、荷重と出力電圧の間に良好な線形性が確認できた。単繊維引張試験法により、熱処理前、後の直径 0.05mm の Nb₃Sn 線材の室温引張試験を実施し、再現性良く破断強度を評価できることが確認できた (図 6)。異なるゲージ長の試験片の荷重-変位曲線から見積もった装置変形を差し引くことで、伸び計やひずみゲージを使用できない極細線材のヤング率や破断ひずみを評価することに成功した。

また、同じ線材を使用した 19 本撚線ケーブルの室温引張試験を行った。ケーブルと単線で破断強度、ヤング率はよく一致する一方、ケーブルの 0.2%耐力は単線より低く、ケーブルの柔軟性の議論には塑性変形による永久ひずみの蓄積に注意が必要であることがわかった。単線、ケーブルに室温で軸方向の引張応力を負荷、除荷後に 4.2 K、外部磁場中で臨界電流の測定を行い、許容応力は単線、ケーブルともほぼ同レベルであることがわかった (図 7)。

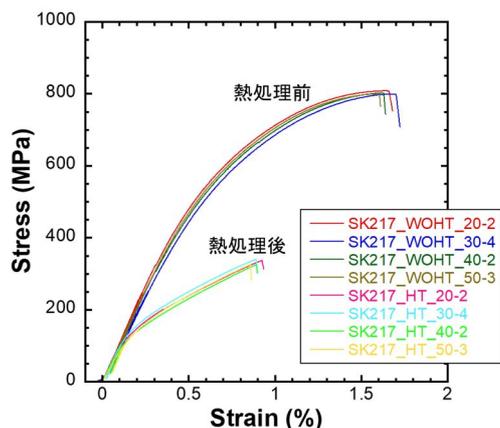


図 6 0.05mm 多芯極細 Nb₃Sn 線材素線の熱処理前後の室温における応力-ひずみ曲線

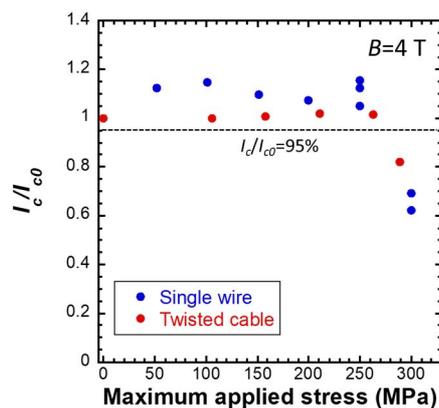


図 7 0.05mm 極細 Nb₃Sn 線材素線と 19 本撚線の許容応力の比較

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 Sugano M., Kikuchi A., Kitaguchi H., Nishijima G., Yagai T.	4. 巻 34
2. 論文標題 Uniaxial Tensile Stress Tolerance of Ultra-Thin Nb3Sn Composite Wires and Twisted Cables	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2024.3355355	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7件（うち招待講演 1件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Kikuchi A
2. 発表標題 The Ultrafine superconducting wires and bundled cables
3. 学会等名 11th Workshop on Mechanical and Electromagnetic Properties of Composite Superconductors（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Sugano M., Kikuchi A., Kitaguchi H., Nishijima G., Yagai T.
2. 発表標題 Uniaxial Tensile Stress Tolerance of Ultra-Thin Nb3Sn Composite Wires and Twisted Cables
3. 学会等名 MT-28 International Conference on Magnet Technology（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kikuchi A., Iijima Y., Kitaguchi H., Kumakura H., et al.
2. 発表標題 Ultrafine Superconducting Composite Wires and Round Cables
3. 学会等名 MT-28 International Conference on Magnet Technology（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 菊池 章弘, 飯嶋 安男, 北口 仁 他
2. 発表標題 超極細ブロンズ法Nb3Sn線材及びフレキシブルケーブルの開発
3. 学会等名 2023年度秋季第106回 低温工学・超電導学会研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Sugano M., Kikuchi A., Kitaguchi H., Nishijima G., Yagai T.
2. 発表標題 Mechanical Properties of Ultra-thin Nb3Sn Composit Wire
3. 学会等名 Applies Superconductivity Conference 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kitaguchi H. and Kikuchi A.
2. 発表標題 Ultra-thin A15 wires for future SC cables
3. 学会等名 7th Japanese-French High Field & HTS Magnet Technology Research Collaboration Workshop (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Akihiro Kikuchi, Yasuo Iijima, Masaru Yamamoto, Masatoshi Kawano, Junya Imani, Ataru Ichinose
2. 発表標題 Jelly-Roll Processed Nb3Al Super-Fine Monofilament Wires with Cu/non-Cu Ratio of 1.0
3. 学会等名 The 27th International Conference on Magnet Technology (MT27) (国際学会)
4. 発表年 2021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	菊池 章弘 (KIKUCHI Akihiro) (50343877)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・エネルギー・環境材料研究センター・グループリーダー (82108)	
研究分担者	西島 元 (NISHIJIMA Gen) (30333884)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・エネルギー・環境材料研究センター・グループリーダー (82108)	
研究分担者	谷貝 剛 (YAGAI Tsuyoshi) (60361127)	上智大学・理工学部・教授 (32621)	
研究分担者	菅野 未知央 (SUGANO Michinaka) (30402960)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・超伝導低温工学センター・准教授 (82118)	

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
---------	---------