

一般セッション(口頭講演) | 11 超伝導：11.3 臨界電流，超伝導パワー応用

■ 2023年9月21日(木) 9:00 ~ 10:45 | 会 C301 (国際交流会館)

■ [21a-C301-1~6] 11.3 臨界電流，超伝導パワー応用

末吉 哲郎(九州産業大)、筑本 知子(中部大)

9:00 ~ 9:15

[21a-C301-1] 人工ピン入り高温超伝導線材に対する照射追加ピン止め効果(2)

○末吉 哲郎¹、尾崎 壽紀²、千星 聡³、坂根 仁⁴、西寄 照和¹、石川 法人⁵ (1.九産大、2.関学大、3.東北大、4.住重アテックス、5.原子力機構)

◆ 奨励賞エントリー

9:15 ~ 9:30

[21a-C301-2] 機械学習を導入したリール式高速磁気顕微鏡観察による高温超伝導長尺テープ線材の電流阻害因子の解析

○呉 澤宇¹、Somjaijaroen Natthawiro¹、今村 和孝¹、東川 甲平¹、木須 隆暢¹ (1.九大院シス情)

9:30 ~ 9:45

[21a-C301-3] IBAD-PLD法によって作製したREBCOテープ線材のリフトファクタに関する考察

○木須 隆暢¹、呉 澤宇¹、田中 佑斗¹、東川 甲平¹、ヴァリコフ ロマン²、ペトリキン バレリー²、リー セルゲイ² (1.九大院シス情、2.FFJ)

10:00 ~ 10:15

[21a-C301-4] 磁束クリープを考慮したHTS接合抵抗の時間依存性の解釈

○武田 泰明¹、土屋 雄司²、西島 元¹ (1.NIMS、2.東北大金研)

10:15 ~ 10:30

[21a-C301-5] 直接拡散接合法によるREBCO線材の低抵抗接続法の検討 (2)

○筑本 知子¹、加藤 誠士郎²、戸田 篤喜² (1.中部大超伝導センター、2.中部大工)

10:30 ~ 10:45

[21a-C301-6] 直流送電用超伝導ケーブルコアの自己磁界分布測定(3)

○筑本 知子¹、大倉 大佑² (1.中部大超伝導センター、2.中部大工)

人工ピン入り高温超伝導線材に対する照射追加ピン止め効果 (2)

Additional Pinning Effect by Irradiation in High- T_c Superconducting Tapes

with Artificial Pinning Centers (2)

九産大理工¹, 関学大工², 東北大³, 住重アテックス(株)⁴, 原子力機構⁵

○末吉哲郎¹, 尾崎壽紀², 千星聡³, 坂根仁⁴, 西嵯照和¹, 石川法人⁵

Kyushu Sangyo Univ.¹, Kwansei Gakuin Univ.², Tohoku Univ.³, SHI-ATEX Co., Ltd.⁴, JAEA⁵

○Tetsuro Sueyoshi¹, Toshinori Ozaki², Satoshi Semboshi³, Hitoshi Sakane⁴, Terukazu Nishizaki¹,

Norito Ishikawa⁵

E-mail: s.teturo@ip.kyusan-u.ac.jp

1. はじめに

超伝導の高磁場応用のために、磁場中で侵入する磁束線の運動を抑制するための人工ピンを予め導入し、磁場中の臨界電流密度 J_c 特性をさらに向上させた希土類系高温超伝導線材が、最近様々なメーカから市販化されている。我々は、人工ピン入り超伝導線材に対してイオン照射により、ピン止め点をさらに追加導入することで、磁場中の J_c 特性のさらなる改善や人工ピンと照射ピンからなるハイブリッドピン止め機構に注目している。前回、人工ピンとして Y_2O_3 が導入された SuperOx 社の高温超伝導線材に対して 80 MeV Xe 照射を施すと、ピン無しの線材と比較して、より顕著な J_c の改善となることを報告した[1]。

今回の報告では、同じ人工ピン入りの高温超伝導線材において、200 MeV Xe、および 50 MeV Kr を照射し、前回の 80 MeV Xe 照射した試料とともに磁場中の J_c 特性の影響について系統的に調べた。

2. 実験および結果

測定試料は、人工ピンとして Y_2O_3 がドーブされた 4 mm 幅の Y 系高温超伝導線材 (SuperOx, 2021 年 8 月購入) である。購入時に提供されたテープスターでの I_c 値は約 188 A であった。これらの線材から約 2 mm 角に試料を切り出し、照射や測定に用いた。200 MeV Xe、および 50 MeV Kr 照射は、原子力機構のタンデム加速器で行った。照射方向は、膜面に垂直すなわち試料の c 軸方向に平行である。照射量は、 $7.26 \times 10^{10} \sim 7.26 \times 10^{11}$ ions/cm² (マッチング磁場 $B_\phi = 1.5 \sim 15$ T) である。 J_c の磁場依存性は、SQUID 磁束計を用いて c 軸方向の磁場での磁化特性から評価した。

Fig.1 に、照射量 $B_\phi = 6$ T で 200 MeV Xe と 50 MeV Kr を照射した試料の J_c の磁場依存性を 10 K と 65 K について示す。照射無しの人工ピン

入り線材と比較して、照射した試料ではともに J_c の増加を確認できる。 $B_\phi = 6$ T での照射量では、200 MeV Xe 照射試料の方が低磁場から高磁場まで高い J_c を示している。以前、我々は NdBCO 薄膜 (膜厚 400 nm) での 50 MeV Kr 照射において照射量を $B_\phi = 10$ T まで増やすと、200 MeV Xe で照射した試料が示した J_c 値より高磁場側で高い J_c を示すことを報告している [2]。一方、人工ピン入り線材では、50 MeV Kr の照射において照射量に対する J_c の増加率は低く、200 MeV Xe 照射の J_c を超えることはなかった。これは、今回人工ピン入り線材の超伝導層の膜厚が 2.9 μ m と厚かったために、50 MeV Kr では超伝導膜全体に有効なピン止め点として作用する照射欠陥を形成できなかったことが考えられる。

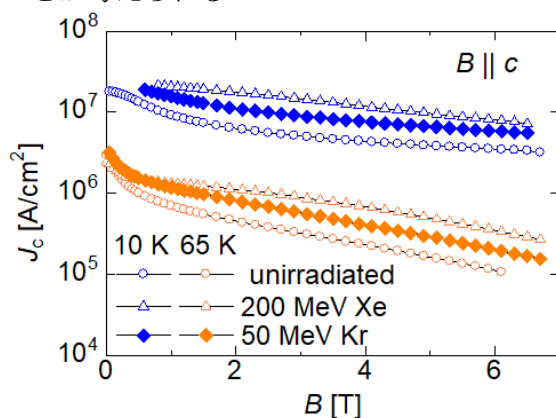


Fig.1 Magnetic field dependence of J_c in SuperOx coated conductors irradiated with 200 MeV Xe and 50 MeV Kr ions, respectively.

謝辞

本研究の一部は、原研タンデム加速器施設供用利用制度および科研費 (22K04207) の助成を受けて実施したものである。

参考文献

- [1] 末吉ら, R5 春季応用物理学会 17p-D215-3
- [2] Sueyoshi *et al.* IEEE TAS 33 (2023) 6600305.

機械学習を導入したリール式高速磁気顕微鏡観察による 高温超伝導長尺テープ線材の電流障害因子の解析

Analysis of Current Blocking Obstacles in High Temperature Superconducting Long Tape by High Speed Reel-to-Reel Magnetic Microscopy with Introduction of Machine Learning

九大院シス情[○] 吳 澤宇, Somjaijaroen Natthawiro, 今村 和孝, 東川 甲平, 木須 隆暢
Kyushu Univ. [○]Zeyu Wu, Somjaijaroen Natthawiro, Kazutaka Imamura, Kohei Higashikawa,
Takanobu Kiss

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

1. はじめに

希土類系 (REBCO) 高温超伝導材の応用における臨界電流 (I_c) の空間均一性は実用性能を制限する重要な因子の一つである。我々は、前報において、リール式磁気顕微鏡観察[1]によって得られたテープ面内の磁化電流分布の結果に、深層学習による画像解析を適用して局所欠陥部位の自動検出を可能とすることで、200 m 長級の市販 REBCO 線材において、一般的な I_c の1次元分布の計測では検出出来ない、局所不均一性が内包されていることを示した[2]。しかしながら、局所的な I_c 低下領域のサイズや頻度等の統計事象については未だ十分に捉えきれていない。本研究では、これらの局所 I_c 低下部位について、物体検出モデルを新たに適用し、そのサイズ分布等に関する詳細な解析を行った。

2. 実験方法

IBAD-PLD 法による 200 m 長 REBCO テープ線材を用いて、液体窒素浸漬冷却条件でリール式磁気顕微鏡システムによる残留磁場測定を行った。得られたテープ面内の磁化電流の二次元電流分布画像において、Fig. 1 に示すような J_c 低下領域が孤立している Isolated obstacle と、それらがクラスターとして集まっている Cluster of obstacles の2種類の欠陥領域が存在する事が分かった。教師データとして Isolated obstacle (44 個)、Cluster of obstacles (39 個) を用いてモデルのトレーニングを行い、200 m 長の測定結果に対して解析を行った。

3. 実験結果及び考察

全長 200 m に対応する約 10,000 枚の電流分布画像を用いて、作成した物体検出モデルに入力し、画像ごとに2種類の欠陥領域に応じたラベル付けした bounding box を得た。Bounding box の情報より、長手方向の長さを計算して欠陥領域のサイズを取得し、そのヒストグラムを Fig. 2 に示した。解析の結果より、Isolated obstacle は 0 ~ 8 mm に分布するのに対し、Cluster of obstacles は 4 ~ 36 mm まで広く存在する。Cluster of obstacles の結果は先行研究[2]で報告した結果とおおよそ一致し、局所 I_c を低下させる支配的な因子に対応していると考えられる。当日の講演では、局所 I_c との関係についても考察する。

謝辞: 本研究は、JSPS 科研費 JP19H05617 の助成を受けて実施したものである。

参考文献

- [1] K. Higashikawa et al., *SuST*, vol. 33, no. 6, 2020, Art. No. 064005.
- [2] 木須ら, 2022 応用物理学会秋季大会予稿集 22a-A304-5.

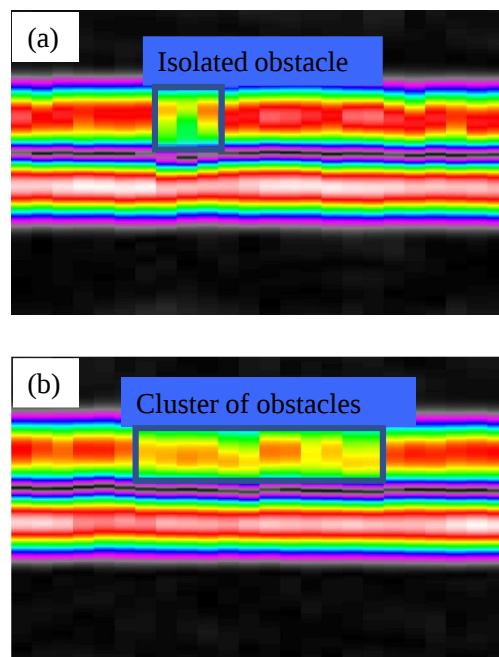


Fig. 1 Magnetization sheet-current-density map obtained by reel-to-reel magnetic microscopy. Examples of object used as training data for Isolated obstacle (a) and Cluster of obstacles (b), for training deep-learning based Object Detection model. The length of label in (a) is about 2.5 mm, and (b) is about 10 mm.

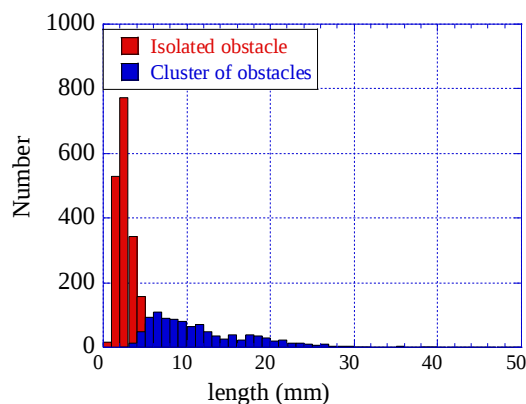


Fig. 2 Histogram of length of two different type obstacles, i.e., “Isolated obstacle (IC)” and “Cluster of obstacles (CO)”. The counted numbers are 1961 and 1036 in 200-m-long REBCO tapes for IC and CO, respectively.

IBAD-PLD 法によって作製した REBCO テープ線材のリフトファクタに関する考察

Consideration on Lift-factors of I_c in IBAD-PLD based REBCO Coated Conductors

九大院シス情: °木須 隆暢, 吳 澤宇, 田中 佑斗, 東川 甲平

ファラデー ファクトリー ジャパン: ロマン ヴァリコフ, バレリー ペトリキン, セルゲイ リー

Dept. of Elect. Engineering, Kyushu Univ.: °Takanobu Kiss, Zeyu Wu, Yuto Tanaka, Kohei Higashikawa

Faraday Factory Japan: Roman Valikov, Valery Petrykin, Sergey Lee

E-mail: kiss@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

希土類系高温超伝 (REBCO) 導線材は、その優れた臨界電流特性からマグネットを始めとする多様な電磁システムへの応用が期待されている。この時、線材の長手方向の均一性は重要な材料性能の一つで、一般には、液体窒素中高精度の連続磁化計測によって、線材長手位置の局所 I_c を評価し、出荷試験が行われている。一方、線材が実際に利用される環境は、低温域、磁界中である場合がほとんどで、これらの特性は、短尺試料を用いて、四端子用を適用した I_c 測定によって評価し、77 K、自己磁界中の I_c との比を取って、リフトファクタとして供されているのが現状である。この時、線材の空間均一性は液体窒素中の測定を基に均一性が担保されている事が前提となっているが、1) 低温環境や、磁界中で液体窒素中と同様な空間均一性の議論を適用して良いのが否かは十分な検証が行われていない。また、2) 大型のマグネットなどの製造に際して、線材の I_c の統計分布に対するデータが取得されるにしたがって、実際の線材におけるリフトファクタのバラツキが大きいという指摘も散見される。

この様な背景のもと、本研究では REBCO 線材の局所 I_c の長手依存性について、リール式局所磁化計測を行って 77 K ならびに 4.2 K の磁界中で計測し、両者の比較を基に考察を行った。

2. 実験方法

試料には IBAD-PLD 法による市販の REBCO 線材と線材長手方向に系統的にプロセス条件の組み合わせを変化させて作製したコンビナトリアル試料を用いた。一般にコンビナトリアル試料は、組成の組み合わせを変化させて合成した試料を指すが、ここではこの概念を拡張して、基板温度やレーザ出力などのプロセス条件の組み合わせに対しても用いる。

3. 結果および考察

市販線材の I_c の長手依存性の結果を Fig. 1 に示す。測定条件は、77 K において $B = 0.02 \sim 0.1$ T, 4.2 K において 0.2 ~ 1.0 T である。それぞれの条件の長手 x に対する $I_c(x)$ を測定条件での平均値で規格化してプロットしたものを Fig. 1 に示す。空間変化の結果はほぼ重なっており、 T 、 B に対する依存性はほとんど無い。この結果は、この線材のリフトファクタは線長方向に寄らずほぼ一定値と近似して良い事を示している。

一方、長手方向に作製条件を変化させた試料の 77 K, s.f. の I_c と 4.2 K, 1.0 T の I_c とを比較した結果を Fig. 2 に示す。両者とも最大の I_c 値が揃うように縦軸のレンジを調整している。矢印を付した 3 つの条件下において 77 K の I_c は同程度の良好な値を示す。しかし 4.2 K の結果はプロセスに対する依存性が 3 つのピーク位置で異なる事を示している。すなわち、プロセスに対する依存性は 77 K の I_c と 4.2 K のそれとは異なっており、したがって、リフトファクタもどの条件を適応して作製するかによって変化する。さらに、プロセスに対する依存性は 4.2 K の I_c の方が大きい。これらの事がリフトファクタのロットごとのバラツキにも影響を与えていると推定できる。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費 JP19H05617 の助成を受けたものである。

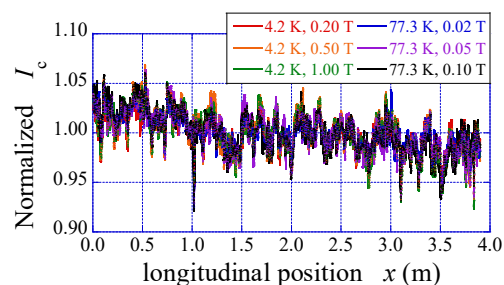


Fig. 1. Comparison of spatial variation of in-field I_c measured at 77 K and 4.2 K, where each I_c value was normalized by spatial average at each condition.

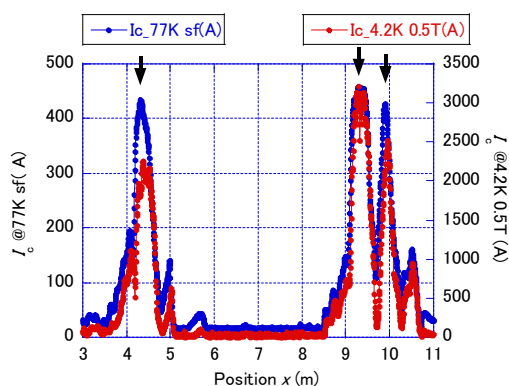


Fig. 2. Comparison between critical current at 77 K, s.f. and that at 4.2 K, 0.5 T in a long sample made by combinatorial process conditions as a function of longitudinal position x .

磁束クリープを考慮した HTS 接合抵抗の時間依存性の解釈

Interpretation of time-dependent resistance of HTS joint considering flux creep

NIMS¹, 東北大金研² [○]武田 泰明¹, 土屋 雄司², 西島 元¹

NIMS¹, IMR, Tohoku Univ.², [○]Yasuaki Takeda¹, Yuji Tsuchiya², Gen Nishijima¹

E-mail: TAKEDA.Yasuaki@nims.go.jp

1. はじめに

一般的に永久電流の超伝導マグネットには超伝導接合が使われ、低い接合抵抗 (R_j) は時間的に安定な磁場の発生を可能にする。典型的な超伝導接合の $R_j < 10^{-13} \Omega$ は、通電測定で測定するには低すぎるため、超伝導接合を持つ閉ループ試料を使った電流減衰法によって評価される[1]。回路抵抗 R 、試料の自己インダクタンス L の場合、ループ電流 I_{loop} の時間 t による変化は $I_{loop} \propto \exp(-Rt/L)$ に従うため、 $R = R_j$ かつ R_j が一定 (時間変化しない) と仮定することで R_j は見積もられてきた。近年開発が盛んな高温超伝導 (HTS) 線材の接合においても、 R_j 評価のための電流減衰測定が報告されている。しかし、超伝導接合を持つ HTS 閉ループで観測される I_{loop} の時間依存性は、この式ではうまく fitting できない[2,3]。これは HTS の R_j に時間依存性があることを示唆している。一方、磁束クリープは超伝導体内の電圧発生要因としてよく知られている[4,5]。磁束クリープが HTS 接合での抵抗発生に寄与することは、実験的に示唆されている[1,2]ものの、理論的には証明されていない。そこで本研究では、超伝導接合を持つ HTS 閉ループの電流減衰の解釈を提案する。電流減衰法で一般的な current sharing [1]に加えて、接合での磁束クリープも考慮することで、 I_{loop} と R_j の時間依存性を定量的に説明する。

2. 実験方法

前回の本学会で報告したホットプレス処理[6,7]を使って、1.6 m 長の 1 本の銀シース (Bi,Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O_y [Bi-2223] 多芯線材 (住友電工製 DI-BSCCO[®]) 両端を拌み合わせ接合した 3 ターン閉ループ試料 (自己インダクタンス $L = 1.4 \mu\text{H}$) を作製した。我々が開発した接合抵抗評価装置[8]を使って、接合に 1 T の磁場を印加して、4.2 K で電流減衰測定を行うことで I_{loop} の時間依存性を調べた。得られた $I_{loop}-t$ から、上記の I_{loop} の式を使って様々な時間範囲で fitting を行い、回路抵抗 R の時間依存性を見積もった。

3. 結果と考察 [9]

様々な時間範囲での fitting から、 R に時間依存性があること、 $I_{loop}-t$ 曲線全体を上記の式で fitting できないことを確かめた。次に current sharing を考慮した Fig. 1 の等価回路モデルを使って実験結果を数値解析した。 R_0 は接合近傍の Ag の抵抗に相当し、一定である。 R_j には Anderson-Kim モデルの磁束クリープ[4,5]に相当する可変抵抗を使った。 I_{loop} の時間発展を計算することで解析結果を得た。Fig. 2 に実験および解析で得られた R 、および解析による I_j/I_{loop} の時間変化を示す。 R は実験と解析で良く一致しており、我々の解釈が妥当であることを示唆している。長時間経過後には I_j/I_{loop} がほぼ 1 であるため、current sharing が無視でき、 $R = R_j$ を想定して良い。この領域では、ほぼ $R_j \propto 1/t$ となることが、実験と理論の両方から確かめられている。このことは、時間が経つことで R_j が低下し、低い回路抵抗が実現できることを示唆している。

謝辞

本研究は、JST 未来社会創造事業 JPMJMI17A2、JSPS 科研費 JP22K14482、JP22H01522 の支援を受けたものである。

参考文献

- [1] Brittles *et al.*, *SuST* **28** (2015) 093001. [2] Ohki *et al.*, *SuST* **30** (2017) 115017. [3] Takeda *et al.*, *SuST* **35** (2022) 02LT02. [4] Anderson, *PRL* **9** (1962) 309. [5] Kim *et al.*, *PRL* **9** (1962) 306. [6] 武田ら, 第 70 回春季応物学会 (2023) 16p-D221-5. [7] Takeda *et al.*, *IEEE TAS* **33** (2023) 6400207. [8] Kobayashi *et al.*, *IEEE TAS* **30** (2020) 9000204. [9] Takeda *et al.*, to be submitted.

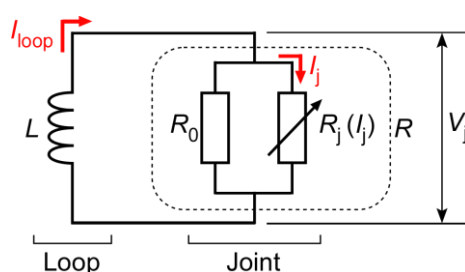


Fig. 1 Schematic of equivalent circuit model of HTS closed loop with superconducting joint and constant resistance considering current sharing. [9]

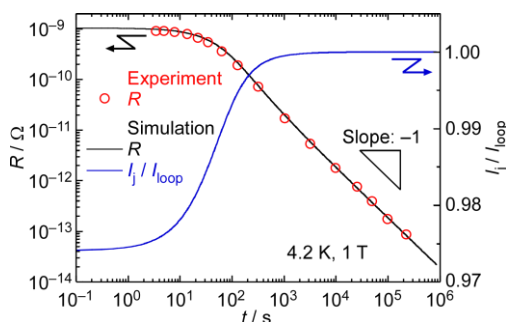


Fig. 2 Time dependence of R and I_j/I_{loop} obtained by current decay measurements using closed-loop sample at 4.2 K and 1 T and numerical simulation.[9]

直接拡散接合法による REBCO 線材の低抵抗接続法の検討 (2)

Optimization of low resistance joint method for REBCO tapes by direct diffusion bonding method (2)

中部大超伝導センター¹, 中部大工² ○筑本 知子¹, 加藤 誠士郎², 戸田 篤喜²

Chubu Univ.[○]Noriko Chikumoto, Seishirou Kato, Atsuki Toda

E-mail: nchiku@isc.chubu.ac.jp

高温超伝導(HTS)パワー応用の重要な課題の一つが安全かつ再現性の高い接続技術の確立である。特に送電ケーブルにおいては超伝導接続は必ずしも必要ではないものの、百数本の超伝導線材からなる集合導体を布設現場で接合するため、簡便な方法で低抵抗接続できることが重要なポイントとなる。これまでは様々な技術上制約からテープを金属シースごと重ね合わせはんだ接続する方法が一般的に行われてきたが、はんだ特有の問題があるため、我々のグループでは、はんだを用いずに REBCO 線材の銅安定化層を直接固相拡散することにより低抵抗接続を行う方法について、これまで検討を行ってきており、前回までに、本方法で再現性に課題があるものの接合抵抗 $60\text{--}80 \times 10^{-9} \Omega \text{cm}^2$ 程度の接合が得られることを報告した。本講演では、さらなる接合抵抗の改善に向けて接合界面の観察結果及びそれに基づいて研磨方法を検討した結果について報告する。

本研究で用いた接合方法は Step 1: 接合界面の研磨、Step 2 : 酸洗浄と Step 3 : 加圧・加熱による接合形成の 3 ステップから成る。本来接合は物質表面間の相互作用で形成されるものであり、金属表面が十分平滑な場合には、表面の酸化膜や汚れを除いて内部をむき出しにした新生面同士を接近させるだけで、原子間の結合が生じ、加圧・加熱は不要である。しかしながら、実際の試料では表面は平滑ではないため、加圧・加熱により表面付近の原子が拡散することで接合が形成される。このことから、接合のためには、「①表面の平滑性」「②酸化膜の除去」「③加圧・加熱」の 3 つのプロセスが必要であり、上記接合方法の Step1~3 がそれぞれに対応する。これまでの最適化検討の結果より、Step1 : ラッピングペーパー ($3 \mu\text{m}$) による研磨、Step2 : 10%クエン酸による酸洗浄 (50°C 、5 分)、Step3 : 接合圧力 30–40MPa、 $200^\circ\text{C} \times 5$ 分以上の加圧・加熱を基本条件とした。この方法で接合した試料の接合部(接合中央部)の断面 SEM 観察の結果を Fig.1 に示す。接合部の Cu 層では、接合領域と未接合領域が存在していることがわかる。接合領域について SEM-EDS 元素分析より、酸素等の不純物を介さずに Cu 同士が直接接合していることが確認された。この結果より Step1 の研磨方法についての改善により接合特性の向上が得られる可能性が示唆される。当日は研磨方法の検討結果も合わせて報告する。



Fig.1 Cross-section SEM images of REBCO joint.

直流送電用超伝導ケーブルコアの自己磁界分布測定 (3)

Self-magnetic field distribution measurement of superconducting cable core for DC power transmission(3)

中部大工¹, 中部大超伝導センター² (M2)大倉大佑¹, ○筑本知子²

Chubu Univ. (M2)Daisuke Ohkura, ○Noriko Chikumoto

E-mail: nchiku@isc.chubu.ac.jp

超伝導直流送電システムは基幹線の応用等が期待されているが、超伝導ケーブルのメリットを最大限に活かすには、大容量化が必要である。その際に考慮すべき課題は自己磁界の影響である。そこで本研究では超伝導ケーブルコア周囲の自己磁界分布の測定する方法として回転走査型ホール素子を用いた測定手法の開発と測定を行ってきた。前回までの報告では、素線とホール素子の間隔が広い、電流供給用通電用ケーブルの自己磁界の影響等の課題があった。そこで、本研究では、装置の改良を行い、再測定を行なったので、その結果について報告する。

測定試料は定格 2 kA の直流送電用ケーブルコア (DI-BSCCO[®]、内導体: 11 本/12 本; 外導体: 16 本、外径 35 mm) を用いた。磁場分布測定は Arepoc 社 (型番: HHP-VP) の一軸型ホール素子を用い、Fig.1 のように任意の線材に電流(I_a)を流した状態でホール素子の磁場の測定方向がケーブル外周の接線方向となるように外周に沿って回転させて測定をした。これまでホール素子の固定に用いていたジグは位置がずれやすい構造であったため、今回固定ジグを新たに作成し、ホール素子とケーブルの位置関係がずれないように工夫をした。Fig. 2 に外導体の任意の線材 (No.1~5) の 1 本にそれぞれ $I_a=100\text{A}$ の電流を流した時の磁場分布の測定結果を示す。ここで、磁場が最大となる $B_{\max}$ はホール素子が電流の流れている線材の上に位置する時と考えられ、隣接するテープの $B_{\max}$ となる角度間隔は約 21.0° でテープの角度間隔とほぼ一致した。当日は様々な条件で通電した結果も合わせて報告する。

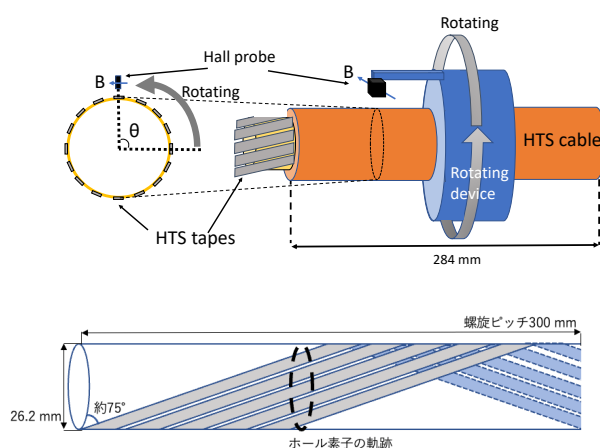


Fig. 1. Schematic illustration of scanning Hall probe measurement system and measured sample.

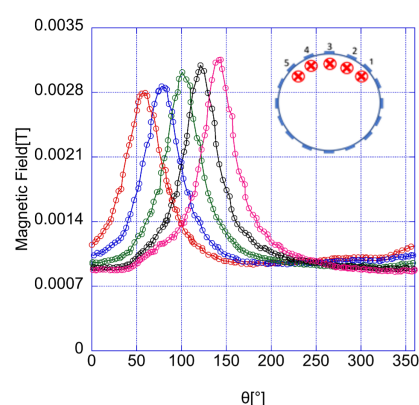


Fig. 2. The magnetic profiles when $I_a = 100\text{A}$ is applied to different tapes, from No.1 to No.5.