

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：11301  
研究種目：基盤研究(B)（一般）  
研究期間：2020～2022  
課題番号：20H01884  
研究課題名（和文）照射環境における分割型高温超伝導マグネットの接合特性詳細分析と保全シナリオ構築

研究課題名（英文）Detailed analysis of joining characteristics and establishment of maintenance scenario for remountable high temperature superconducting magnet under irradiation environment

研究代表者  
伊藤 悟（Ito, Satoshi）  
東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：60422078  
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,900,000円

研究成果の概要（和文）：分割型高温超伝導核融合マグネットの建設・運用・保守の検討のために、1) 強磁場・照射環境における線材・接合特性の詳細評価、2) 強磁場用超伝導クエンチセンサ製作とクエンチ検出特性影響因子の解明、3) 強磁場・照射環境を踏まえた分割型高温超伝導マグネットの設計・保守の検討、を行った。1)ではREBCO線材内部の層間抵抗の温度・磁場依存性の取得、液体窒素温度で陽子線照射したREBCO線材の臨界電流特性の取得に成功した。2)ではNb-Tiセンサを用いた各種REBCOコイルのクエンチ検出を実証し、Nb3Alセンサの開発に取り組んだ。3)ではマグネット設計に対して磁場・照射が与える影響を評価した。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

将来の核融合炉のためには、強磁場・照射環境を踏まえた分割型高温超伝導マグネットの建設・保守・運用を考える必要があり、本成果はそれに資するものである。また本研究は世界で初めてREBCO線材内部の層間抵抗の温度磁場依存性を非破壊評価し、そこから抵抗発生メカニズム解明に向けた仮説を立てるに至った。本研究で行ったREBCO線材の照射特性は核融合マグネットの課題抽出をするために重要な知見である。さらに磁場環境下でのREBCOコイルの早期クエンチ検出の原理実証と強磁場用超伝導クエンチセンサ開発により、強磁場環境における早期クエンチ検出技術確立への課題抽出を行うこともできた。

研究成果の概要（英文）：For consideration of construction, operation and maintenance of segmented high-temperature superconducting (HTS) fusion magnets, we carried out 1) Detailed evaluation of REBCO tape and joint characteristics under high magnetic field and irradiation environment, 2) Fabrication of superconducting quench detectors for high field and clarification of factors affecting quench detection, and 3) Consideration of design and maintenance of the segmented HTS magnets taking into account high field and irradiation environments. In 1), we obtained temperature and magnetic field dependence of the interface resistance inside the REBCO tape, and the critical current characteristics of the REBCO tape with proton irradiation at liquid nitrogen temperature. In 2), we demonstrated the quench detection of various REBCO coils using the Nb-Ti quench detector and developed the Nb3Al quench detector. In 3), we evaluated the effects of magnetic field and irradiation on magnet design.

研究分野：核融合炉工学、応用超伝導工学

キーワード：核融合学 分割型高温超伝導マグネット REBCO線材 接合抵抗 クエンチ検出 照射特性

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

核融合原型炉・商用炉の巨大で複雑な超伝導マグネットの製作課題を解決する先進設計案として、研究代表者らは図1に示すような分割型高温超伝導マグネットの研究開発を進めている。図1はヘリカル炉に適用した場合の事例であるが、導体セグメントを接続しながら巻き線していく導体接続巻線方式、マグネットの組立・分解を可能とするコイルセグメント着脱方式の2方式が提案されている。各方式の高温超伝導 REBCO 導体に用いる接合法は、それぞれブリッジ式機械的ラップジョイント、機械的エッジジョイントであり、いずれについてもインサート金属としてインジウムを用いた固相拡散接合技術を適用している。これまでの研究において、当該マグネット建設に必要な接合技術・冷却技術は確立しつつあり、また、マグネットの状態監視保全に必要な超伝導クエンチセンサ(図2)を考案し、自己磁場環境でクエンチの早期検出・コイル焼損回避に成功するに至っている。

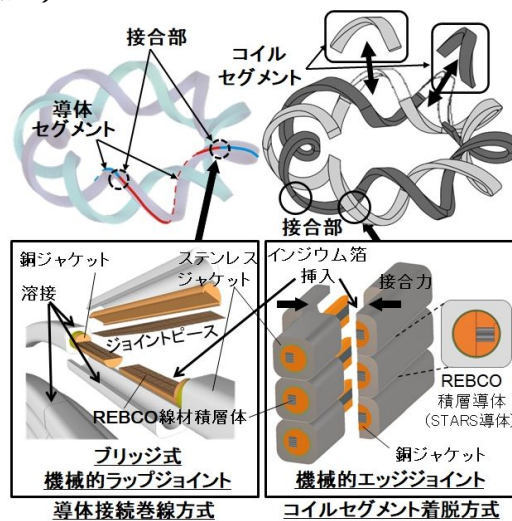


図1 分割型高温超伝導マグネット

2. 研究の目的

将来の核融合炉の建設・運転・保守のためには、強磁場環境・照射環境での接合・線材特性やクエンチ検出特性を元に、分割型高温超伝導マグネットの設計・保守の検討を行う必要がある。そこで本研究課題では、(1) 強磁場・照射環境における線材・接合特性の詳細評価、(2) 強磁場用超伝導クエンチセンサ製作とクエンチ検出特性影響因子の解明、(3) 強磁場・照射環境を踏まえた分割型高温超伝導マグネットの設計・保守の検討、を行うことを目的とする。

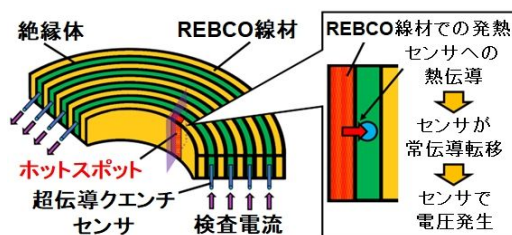


図2 超伝導クエンチセンサ

3. 研究の方法

(1) 強磁場・照射環境における線材・接合特性の詳細評価

接合抵抗の発生メカニズムの解明のためには、REBCO線材内の抵抗の詳細分析が必要である。本研究課題では、研究代表者らが発明したREBCO線材内部の界面抵抗(層間抵抗)の非破壊評価法であるインタクトプローブCTL法を用いて、層間抵抗率(単位面積相当の層間抵抗)の温度磁場依存性の詳細評価に取り組む。

また、核融合マグネットは、その運転中に中性子照射を受けるため、臨界電流の特性の正しい理解のためには、REBCO線材を冷却した状態で照射を行うことが必要となる。また、照射後に線材を常温に戻すことなく、臨界電流を測定することで、運転中の臨界電流の変化を正しく評価することができる。一方、マグネットメンテナンス時にはREBCO線材が常温に戻ると考えられるため、低温照射後の線材の温度変化が、その後の臨界電流の特性に与える影響を評価することが重要となる。本研究課題では、陽子線照射したREBCO線材の臨界電流特性を評価することで、本項目に関して必要な知見を得る。

(2) 強磁場用超伝導クエンチセンサ製作とクエンチ検出特性影響因子の解明

まず、過去の研究で自己磁場でのクエンチ検出に成功しているNb-Tiセンサを用いて、磁場中において各種REBCOコイルのクエンチ検出実験を行う。また、強磁場環境下でクエンチ検出が可能な新たな超伝導クエンチセンサを導入してクエンチ検出実験を行い、クエンチ検出に必要な条件について検討する。

(3) 強磁場・照射環境を踏まえた分割型高温超伝導マグネットの設計・保守の検討

(1)で得られた結果を踏まえ、核融合炉規模の導体接合の強磁場環境における抵抗特性を数値計算で評価する。また、マグネット構成材料の反応断面積を踏まえ、照射環境を踏まえたマグネット設計について検討する。加えて、接合部の機械特性、冷却特性を踏まえた分割型高温超伝導マグネットの総合設計を行う。

4. 研究成果

(1) 強磁場・照射環境における線材・接合特性の詳細評価

REBCO線材内部の層間抵抗の評価

REBCO線材のラップジョイントを考えた場合、接合抵抗  $R_{\text{joint}}$  は図3および式(1)のように各部の抵抗の和として表される。

$$R_{\text{joint}} = 2(R_{\text{REBCO/Ag}} + R_{\text{Ag}} + R_{\text{Ag/Cu}} + R_{\text{Cu}}) + 2R_{\text{Cu/Insert}} + R_{\text{Insert}} = 2R_{\text{RE-tape}} + 2R_{\text{Cu/Insert}} + R_{\text{Insert}} \quad (1)$$

ここで、 $R_{Ag}$ 、 $R_{Cu}$  はそれぞれ REBCO 線材内の銀、銅の抵抗、 $R_{REBCO/Ag}$ 、 $R_{Ag/Cu}$  はそれぞれ REBCO 線材内の REBCO / 銀界面の抵抗、銀 / 銅界面の抵抗、 $R_{Insert}$  はインサート金属の抵抗、 $R_{Cu/Insert}$  は REBCO 線材表面の銅とインサート金属

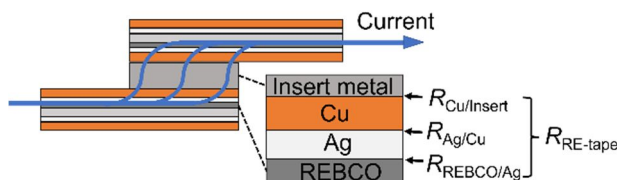


図 3 REBCO 線材のラップジョイントの接合抵抗

の界面の抵抗である  $R_{Ag}$ 、 $R_{Cu}$ 、 $R_{REBCO/Ag}$ 、 $R_{Ag/Cu}$  は REBCO 線材内部の抵抗  $R_{RE-tape}$  であり、本研究では  $R_{REBCO/Ag}$ 、 $R_{Ag/Cu}$  をまとめて層間抵抗と呼んでいる。この層間抵抗は線材の製造メーカー、製造番号によってばらつくことが報告されている。

本研究課題では、まず、各種 REBCO 線材の 77 K、自己磁場における層間抵抗率を非破壊的に評価し、事前評価を可能とすることに成功した。続いて、磁場中ノイズ対策を行った計測体系を構築し、東北大学金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究センターの超伝導マグネットと伝導冷却クライオスタットを使用して、層間抵抗率の温度・磁場依存性の評価を行った。図 4 に各温度域における層間抵抗率の磁場依存性を、図 5 に自己磁場における層間抵抗率の温度依存性を示す（それぞれ別の線材を用いて評価）。10 ~ 30 K では磁場増加とともに層間抵抗率は減少した。また、自己磁場中で層間抵抗率は温度上昇とともに減少するが、85 K ~ 臨界温度 90 K 付近では逆に増加する傾向となった。この傾向は、REBCO/Ag 界面付近のごく薄い層の REBCO が常伝導体化し、また REBCO 層内に、酸素欠損量に分布がある（臨界温度に分布がある）層が存在すると考えることで説明ができる可能性がある。今後は、REBCO 内の酸素欠損の調査や、常伝導層の出現による抵抗上昇のモデル化などを通じて、より定量的にこの仮説を検証していく必要がある。

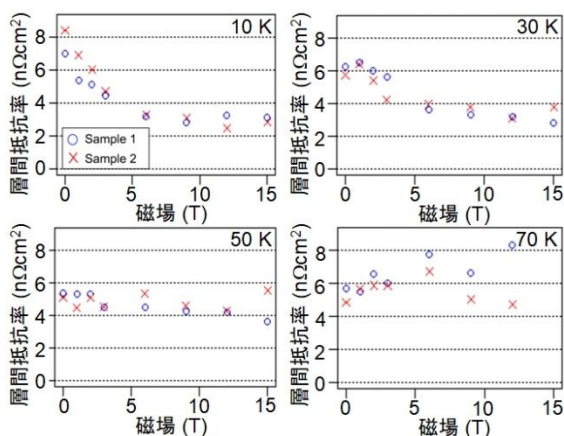


図 4 層間抵抗率の磁場依存性

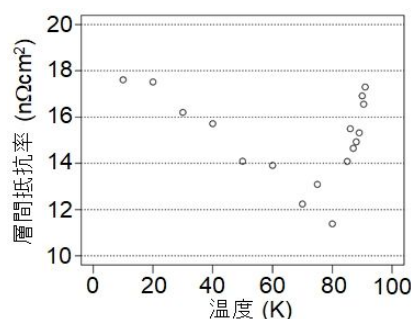


図 5 層間抵抗率の温度依存性

#### REBCO 線材の照射特性の評価

東北大学工学研究科量子エネルギー工学専攻高速中性子実験室のダイナミロン加速器および本研究で導入した液体窒素冷却ステージを用いて、80 ~ 100 K 程度で REBCO 線材に陽子線照射を行った。照射は REBCO 面側からとし、陽子線の照射エネルギーは、1.9 MeV、2.4 MeV とした。前者はブラッグピークが線材内の REBCO 層に、後者はブラッグピークがハステロイ層に位置する条件となる。

マグネットメンテナンス時の臨界電流の特性を得るための実験として、東北大学金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究センターの超伝導マグネットと伝導冷却クライオスタットを使用して、陽子線照射前の REBCO 線材の臨界電流の温度磁場依存性を予め評価しておき、照射後に同様の臨界電流評価を行った。伝導冷却クライオスタットへの REBCO 線材の設置は常温での作業が求められるため、本実験では、低温照射を行った後に REBCO 線材の温度は常温に戻っていることになる。またマグネット運転中の臨界電流の特性を得るための実験として、低温照射後に液体窒素冷却ステージごと REBCO 線材を液体窒素に浸漬させ、その場で臨界電流を測定した。

図 6 に陽子線フルエンス  $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  ( $\text{DPA} = 1.5 \times 10^{-3}$ ) の場合の規格化臨界電流 (= 照射後の臨界電流  $I_c$  / 照射前の臨界電流  $I_{c0}$ ) の温度・磁場依存性を示す。自己磁場での臨界電流は、照射エネルギー 1.9 MeV の場合のほうが、2.4 MeV の場合よりも低くなっており、REBCO 層に欠陥が多く導入されることがわかる。一方で、1 T 以上では、照射エネルギー 1.9 MeV の場合のほうが臨界電流が高くなっており、導入された欠陥がピン止め中心としてより機能しているものと考えられる。図 7 に照射エネルギー 2.4 MeV で陽子線照射した線材の 77 K、自己磁場における臨界電流の DPA 依存性を示す。DPA =  $1.38 \times 10^{-3}$  では、照射後に昇温させずにそのまま液体窒素で冷却して臨界電流を測定したデータ (Without returned to room T.\_reformed)、および、同一サンプルをその後常温に戻した後に再び液体窒素で冷却して臨界電流を測定したデータ (Returned to room T.\_reformed) を示している。全体的な傾向として、DPA が  $2.0 \times 10^{-3}$  程度までは DPA の増加とともに臨界電流が低下するが、その後、臨界電流が上昇して、再度低下している。また、低温照射後にそのまま冷却して臨界電流を測定した場合よりも、常温に戻してから臨界電流を測定した場合の方が、臨界電流が高くなっており、欠陥が回復したことを示唆するものである。今後は他の DPA においても同様の結果が得られるかを確かめていく予定である。

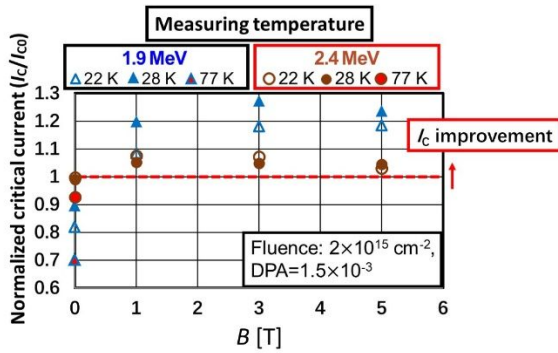


図6 臨界電流の測定温度・磁場依存性

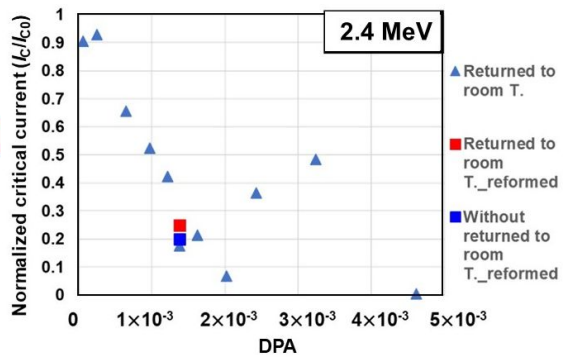


図7 臨界電流のDPA依存性

## (2) 強磁場用超伝導クエンチセンサ製作とクエンチ検出特性影響因子の解明

Nb-Ti クエンチセンサを用いた各種 REBCO コイルのクエンチ検出実験

東北大学金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究センターにおいて、高電気抵抗の Cu-Ni を安定化材とする Nb-Ti センサを用いて各種 REBCO コイルの磁場中でのクエンチ検出実験を実施した。コイルサンプルとしては、絶縁、NI (Non-insulation)、MI (Metal insulation) の 3 種類の 20 ターンシングルパンケーキ REBCO コイルを用意した (10 ターン目に長さ 3 mm 程度の劣化領域を作り、クエンチの発生源とした)。REBCO コイルおよび Nb-Ti センサには、それぞれ電圧タップを取り付け ( $V_{RE}$ : REBCO コイルでの測定電圧、 $V_{QD}$ : クエンチセンサでの測定電圧)、さらに、NI コイルおよび MI コイルには、劣化領域付近で発生するターン間の分流を検出するための追加の電圧タップ (測定電圧  $V_{tt}$ 、 $V_{tb}$ ) を配置した。サンプルは、液体ヘリウムで冷却し、最大 9 T の外部磁場  $B_{ex}$  を与えて通電試験を行った。ここで Nb-Ti クエンチセンサの電流負荷率は、数値解析によって求めた最適値に設定し、 $V_{QD}$  が 0.1 V に達した時点をクリック検出と定義した。また REBCO コイルへの通電電流  $I_{op}$  は、0 A からクエンチ検出後数秒時点での値とし、電流増加率  $\alpha_{op}$  を 1, 5, 10 A/s の 3 種類とした。

図 8 に代表的な結果として、 $\alpha_{op} = 10 \text{ A/s}$ 、 $B_{ex} = 9 \text{ T}$  のときの各コイルサンプルにおける通電試験結果を示す。(a)の絶縁コイルのケースでは、 $I_{op} \sim 47 \text{ A}$  で  $V_{QD} > 0.1 \text{ V}$  となっており、十分に早い段階で REBCO コイルのクエンチ検出ができた。その他の  $\alpha_{op}$ 、 $B_{ex}$  の条件においても同様にクエンチ検出が早期に実現できることを実験的に確認した。(b)の NI コイルのケースでは、 $I_{op} \sim 133 \text{ A}$  で  $V_{QD} > 0.1 \text{ V}$  となっており、 $B_{ex} = 9 \text{ T}$  の他の  $\alpha_{op}$  の条件も含めて考えると、検出時の  $I_{op}$  は、絶縁コイルのケースの 2.8 ~ 5.1 倍となった。 $V_{tt}$ 、 $V_{tb}$  の値から劣化領域でのホットスポット近傍で分流が生じていることも確認できており、絶縁コイルの場合に比べて、劣化領域での発熱が小さく抑えられ、REBCO コイルの温度上昇が抑制されたことが原因であると考えられる。コイル焼損に至る  $I_{op}$  を直接確認はできていないが、絶縁コイルのケースに比べて大きな  $I_{op}$  までコイル焼損は生じないと考えられ、十分に早い段階でクエンチ検出ができていると推測できる。(c)の MI コイルのケースでは、 $I_{op} \sim 79.7 \text{ A}$  で  $V_{QD} > 0.1 \text{ V}$  となっており、絶縁コイルと NI コイルでのクエンチ検出時の  $I_{op}$  の中間の値となった。これは、コイルサンプルの特性から考えると、定性的には妥当な結果であると考えられる。なお NI コイル、MI コイルいずれの場合においても、コイル焼損前に、クエンチ検出ができることを実験的に確認した。

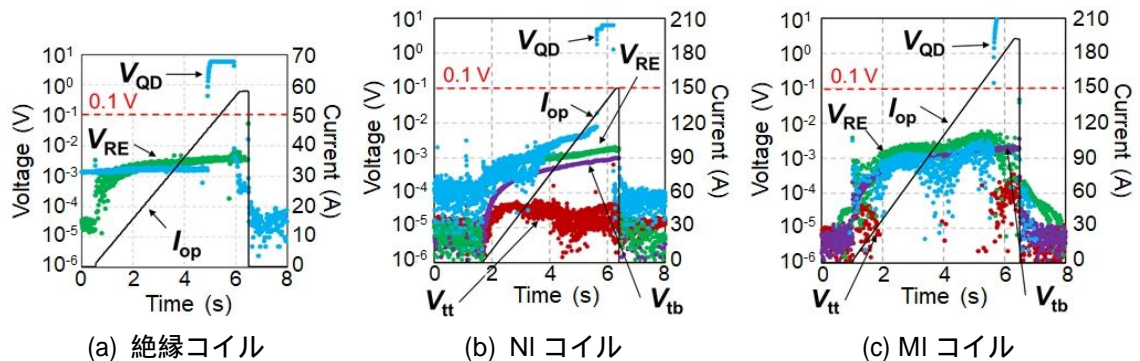


図8 Nb-Ti センサを用いた各種 REBCO コイルのクエンチ検出実験結果

## 強磁場用 Nb<sub>3</sub>Al クエンチセンサーの開発

候補となるセンサとして物質・材料研究機構 (NIMS) より提供された外径 0.05 mm の極細 Nb<sub>3</sub>Al フィラメント[1]を用いた。図 9 に示すように GFRP ボビン上に這わせた REBCO 線材上に Nb<sub>3</sub>Al センサを共巻きにし、これを液体ヘリウムで浸漬冷却し、10 T の磁場を印加してクエンチ検出実験を行った。図 10 に試験結果を示す。REBCO 線材の電圧は 133.2 秒付近で上昇したが、Nb<sub>3</sub>Al センサでの電圧発生もほぼ同時刻に発生しており、この条件において早期クエンチ検出はできなかった。Nb<sub>3</sub>Al センサの検査電流の負荷率 (= 検査電流 / 臨界電流) は、予備試験として実施した自己磁場でのクエンチ検出実験の半分程度に設定した (自己磁場では早期検出に成功した) が、臨界電流が 10 T では著しく低下するため、検査電流自体は自己磁場下で 4 A に対し、

10 T で 0.028 A と大きく異なる．REBCO 線材側の発熱で Nb<sub>3</sub>Al センサ側のクエンチを誘発するためには，検査電流の増加が必要と考えられるが，負荷率 1 を超える設定にすることはできない．したがって，Nb<sub>3</sub>Al センサの安定化材を変える，断面積比率を減らすなどして，センサが常伝導転移した際に高磁場下でも高抵抗を示すセンサ設計が可能かを検討する必要がある．

### (3) 強磁場・照射環境を踏まえた分割型高温超伝導マグネットの設計・保守の検討

コイルセグメント着脱方式に用いる機械的エッジジョイントの接合抵抗の磁場方向依存性を評価し，導体・接合部の配置が設計に与える影響を評価した．図 11 にモデル化した機械的エッジジョイントの接合部を示す．このモデルを用いて商用有限要素解析コード COMSOL Multiphysics により接合抵抗を評価した．導体は銅ジャケット内に REBCO 線材と銅テープを交互に 50 枚積層したものとし，銅テープ厚さ，磁場方向をパラメータに接合抵抗を評価した．温度 20 K，磁場 12 T，接合長 500 mm のときの接合抵抗の銅テープ厚さおよび磁場方向依存性を図 12 に示す．磁場が接合面に対して垂直となる場合，導体を構成する銅ジャケット，銅/インジウム界面抵抗，インジウムの磁気抵抗効果が最も低くなり，接合抵抗が抑えられる．核融合マグネットの最大経験磁場となるコイル内側においては，磁場は機械的エッジジョイントの接合面に対して垂直になるため，磁気抵抗効果は比較的抑えられる配置にはなっている．

導体に用いる REBCO 線材の超伝導材料として代表的なものに YBCO と GdBCO がある．磁場中における臨界電流特性は GdBCO のほうがよく，応用超伝導分野では GdBCO 線材はよく使われている．一方，核融合マグネットにおいては，放射化の観点からの材料選定が重要である．そこで，Gd と Y の中性子反応断面積（全断面積 = 散乱断面積 + 吸収断面積）を断面積ライブラリ JENDL-5 を用いて計算した．結果の一部を表 1 に示す．Gd については Gd-152, 154, 155, 156, 157, 158, 160 の各断面積を天然存在比に合わせて平均したもの，Y については安定核種である Y-89 のものを示した．例えば，MIT が設計している小型トカマク炉 ARC を例にとると，REBCO コイルにおける中性子スペクトルにおいて中性子束の比は熱中性子域:MeV オーダーの高速中性子域 = 1:4 程度と示されている[2]．Y に関しては中性子エネルギーによる大きな差はなく，また散乱断面積が支配的である．一方，Gd に関しては熱中性子の全断面積が高速中性子のそれに比べて著しく大きく，また，熱中性子では吸収断面積が支配的となっている．本研究で行った陽子線照射は中性子散乱を模擬しているものであるが，特に GdBCO を用いる場合には吸収反応とその後の放射化の影響が支配的であり，今後，この影響について詳細に検討していく必要がある．

その他，REBCO 線材の機械的ラップジョイントの曲げ・捻り特性や，金属多孔質体を用いた極低温冷媒の伝熱促進技術の重力方向依存性に基づき，分割型マグネットの総合設計についても検討した．紙面の都合上，本成果報告書では詳細は割愛するが，磁場，照射，構造，冷却の各観点からの総合設計に取り組んでおり，今後も設計・保守に関する検討を進めていく予定である．

表 1 Gd と Y の反応断面積（単位：b）

元素	高速中性子 (1.0 MeV)			熱中性子 (0.025 eV)		
	全断面積	散乱断面積	吸収断面積	全断面積	散乱断面積	吸収断面積
Gd	7.257	7.091	0.166	$4.876 \times 10^4$	$1.377 \times 10^2$	$4.863 \times 10^4$
Y	6.280	6.247	0.033	8.939	7.656	1.284

参考文献：[1] B. N. Sorbom, Doctoral thesis of Massachusetts Institute of Technology, (2017).

[2] A. Kikuchi et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 31, (2021), Art. no. 6000105.

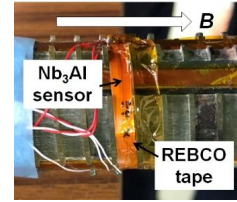


図 9 Nb<sub>3</sub>Al センサを用いたクエンチ検出実験体系

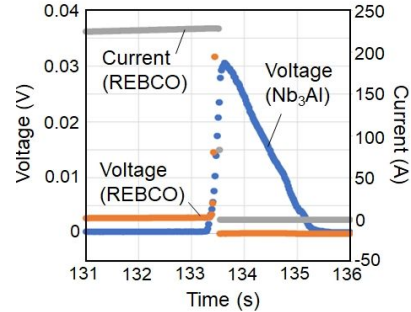


図 10 Nb<sub>3</sub>Al センサを用いたクエンチ検出実験結果

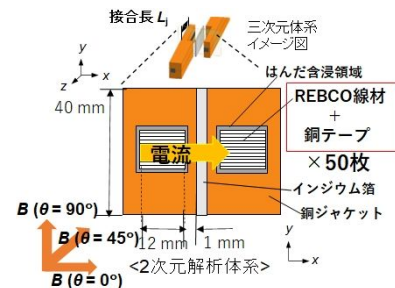


図 11 モデル化した機械的エッジジョイントの接合部

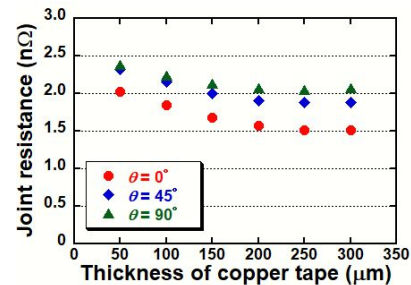


図 12 接合抵抗の磁場方向依存性

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6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 Yosuke Atake, Satoshi Ito, Kohki Takahashi, Hidetoshi Hashizume	4. 巻 32
2. 論文標題 Evaluation of Magnetic Field Dependence of the Interface Resistivity in REBCO Tape	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 4803205 1~5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2022.3186268	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 -
1. 著者名 Hitoshi Tamura, Takuya Goto, Junichi Miyazawa, Teruya Tanaka, Nagato Yanagi	4. 巻 32
2. 論文標題 Seismic Analysis of Magnet Systems in Helical Fusion Reactors Designed With Topology Optimization	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 4900504 1~4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2022.3149731	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 -
1. 著者名 Yosuke Atake, Satoshi Ito, Kohki Takahashi, Hidetoshi Hashizume	4. 巻 33
2. 論文標題 Evaluation of the Interface Resistance on Heated REBCO Tape	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 6600604 1~4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2023.3240387	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 -
1. 著者名 Qifan Zhang, Satoshi Ito, Hidetoshi Hashizume	4. 巻 33
2. 論文標題 Bending and Twisting Characteristics of REBCO Lap Joint With Indium	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 4201305 1~5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2023.3261841	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 -

1. 著者名 Satoshi Ito, Hitoshi Tamura, Nagato Yanagi, Hidetoshi Hashizume	4. 巻 61
2. 論文標題 Low-resistance joint development for segment-fabrication of high-temperature superconducting fusion magnets	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 115002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ac269e	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 -

1. 著者名 Shin Hasegawa, Satoshi Ito, Gen Nishijima, Hidetoshi Hashizume	4. 巻 31
2. 論文標題 Quench Detection Performance of Low-Temperature Superconducting Quench Detectors for REBCO Tape in Magnetic Fields	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 4701605
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2021.3063645	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24件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 阿竹洋輔、伊藤悟、高橋弘紀、橋爪秀利
2. 発表標題 REBCO線材内部層間抵抗の臨界温度近傍までの温度依存性評価
3. 学会等名 2022年度春季 第103回 低温工学・超電導学会研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Satoshi Ito, Nagato Yanagi, Hitoshi Tamura, Hidetoshi Hashizume
2. 発表標題 R&D of low-resistance joint of HTS STARS conductors with indium insertion
3. 学会等名 5th HTS4fusion Conductor Workshop (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤悟、橋爪秀利
2. 発表標題 分割型高温超伝導マグネットのための接合抵抗分析研究および照射特性研究の現状
3. 学会等名 第14回核融合エネルギー連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Qifan Zhang, Satoshi Ito, Hidetoshi Hashizume
2. 発表標題 Evaluation of Bending and Twisting Characteristics of REBCO Lap Joint with Indium for Segment-fabrication of Fusion Magnets
3. 学会等名 第14回核融合エネルギー連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yosuke Atake, Satoshi Ito, Kohki Takahashi, Hidetoshi Hashizume
2. 発表標題 Evaluation of the Interface Resistance on Heated REBCO Tape
3. 学会等名 Applied Superconductivity Conference 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Qifan Zhang, Satoshi Ito, Hidetoshi Hashizume
2. 発表標題 Bending and Twisting Characteristics of REBCO Lap Joint With Indium
3. 学会等名 Applied Superconductivity Conference 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 鈴木和也、伊藤悟、橋爪秀利
2. 発表標題 分割型高温超伝導用機械的エッジジョイントにおける接合抵抗の温度磁場依存性分析
3. 学会等名 日本原子力学会東北支部第46回研究交流会発表
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤悟
2. 発表標題 共巻き線材によるREBCOコイルのクエンチ検出
3. 学会等名 2022年度第2回中温度域超伝導材料の性能向上と実用化に関する調査研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木和也、伊藤悟、橋爪秀利
2. 発表標題 分割型高温超伝導マグネット用機械的エッジジョイントの接合抵抗の導体構造・温度磁場依存性評価
3. 学会等名 日本原子力学会2023年春の年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 阿竹 洋輔、伊藤悟、高橋 弘紀、橋爪 秀利
2. 発表標題 コンタクトプローブCTL法を用いた磁場中におけるREBCO線材内部層間抵抗の評価
3. 学会等名 2021年度春季（第101回）低温工学・超電導学会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Satoshi Ito, Hitoshi Tamura, Nagato Yanagi, Hidetoshi Hashizume
2. 発表標題 Low-resistance joint development for segment-fabrication of high-temperature superconducting fusion magnets
3. 学会等名 28th IAEA Fusion Energy Conference (FEC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yosuke Atake, Satoshi Ito, Kohki Takahashi, Hidetoshi Hashizume
2. 発表標題 Evaluation of magnetic field dependence of interface resistivity in REBCO tape with contact-probing CTL method
3. 学会等名 The 27th International Conference on Magnet Technology (MT27) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Satoshi Ito, Hitoshi Tamura, Nagato Yanagi, Hidetoshi Hashizume
2. 発表標題 Current status of technical development for segment-fabrication of high-temperature superconducting fusion magnet
3. 学会等名 The 30th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (ITC30) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 馬宇傑、伊藤悟、三輪美沙子、遠山翔、松山成男、橋爪秀利
2. 発表標題 Evaluation of Electrical Performance of REBCO Tapes in Proton Irradiation
3. 学会等名 日本原子力学会東北支部第45回研究交流会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 張啓帆、伊藤悟、橋爪秀利
2. 発表標題 Evaluation of Bending Characteristic of Lap Joint of REBCO Tapes for Segment-Fabrication of Fusion Magnets
3. 学会等名 日本原子力学会東北支部第45回研究交流会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Romain Wagner, Kohei Yuki, Satoshi Ito, Hidetoshi Hashizume
2. 発表標題 Experimental Study of Porous Cooling System Characteristics with Different Heating Directions
3. 学会等名 日本原子力学会東北支部第45回研究交流会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 馬宇傑、伊藤悟、三輪美沙子、遠山翔、松山成男、橋爪 秀利
2. 発表標題 Evaluation of Temperature Effect in Proton Irradiation on Critical Current Behavior of REBCO Tapes
3. 学会等名 日本原子力学会2022年春の年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 張啓帆、伊藤悟、橋爪 秀利
2. 発表標題 Joint Performance Evaluation of Curved REBCO Lap Joint for Segment-Fabrication of Fusion Magnets
3. 学会等名 日本原子力学会2022年春の年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Romain Wagner, Kohei Yuki, Satoshi Ito, Hidetoshi Hashizume
2. 発表標題 Buoyancy Force Direction Influence on Porous Cooling System Characteristics for Remountable High Temperature Superconducting Magnets
3. 学会等名 日本原子力学会2022年春の年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 APARICIO Luis、伊藤悟、橋爪秀利
2. 発表標題 Vノッチせん断試験アプローチを用いたREBCO線材のIn接合のせん断強度解析
3. 学会等名 2020年度春季（第99回）低温工学・超電導学会研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 泊瀬川晋、伊藤悟、西島元、橋爪秀利
2. 発表標題 超伝導クエンチ検出器のクエンチ検出性能支配因子の検討
3. 学会等名 2020年度春季（第99回）低温工学・超電導学会研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shin Hasegawa, Satoshi Ito, Gen Nishijima, Hidetoshi Hashizume
2. 発表標題 Quench Detection Performance of Low-temperature Superconducting Quench Detectors for REBCO Coil in Magnetic Fields
3. 学会等名 Applied Superconductivity Conference 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊藤悟
2. 発表標題 シンポジウム「高温超伝導技術が切り拓く新たな核融合研究展開」着脱式先進高温超伝導マグネット技術
3. 学会等名 第37回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 泊瀬川晋、伊藤悟、西島元、橋爪秀利
2. 発表標題 共巻き低温超伝導線材によるREBCOパンケーキコイルのクエンチ検出の実証
3. 学会等名 2020年度秋季（第100回）低温工学・超電導学会研究発表会
4. 発表年 2020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	田村 仁  (Tamura Hitoshi)  (20236756)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授   (63902)	
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・機能性材料研究拠点・グループリーダー   (82108)	
研究分担者	松山 成男  (Matsuyama Shigeo)  (70219525)	東北大学・工学研究科・教授   (11301)	

6. 研究組織（つづき）

	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	柳 長門  (Yanagi Nagato)  (70230258)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授    (63902)	
研究分担者	宍戸 博紀  (Shishido Hiroki)  (90827792)	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