

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01911

研究課題名(和文)次世代加速器のための高温超伝導磁石開発の展開

研究課題名(英文)Next stage development of HTS magnet for future accelerators

研究代表者

土屋 清澄 (TSUCHIYA, Kiyosumi)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・その他部局等・名誉教授

研究者番号：20044787

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：欧州の超大型加速器(FCC)や米国のミュオンコライダー用の高磁場磁石、わが国の SuperKEKB 加速器用の特殊六極磁石などを目指して、高温超伝導磁石の基礎開発を進めた。具体的には、SuperKEKB用高温超伝導特殊六極磁石(ノーマル+スキュー6極磁場を発生)を試作し、通電試験や磁場測定を行い、その実現可能性を示した。また、高磁場磁石設計のための基礎データを得るため、市販の高温超伝導線材(人工ピン導入REBCO線材)の臨界電流や磁化特性の測定を行った。高磁場磁石に必須となる大電流導体の基礎開発では、外径3 mmのREBCO丸型ケーブルを試作し、77 Kで500 Aが通電できることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

REBCO線材の特性を十分に活かした加速器用磁石の実現可能性を示すことが出来た。この磁石が実現すれば、衝突型加速器の高エネルギー化やリミノシテー向上に大きく貢献し、高エネルギー物理学の進歩に大きな影響を与えるものと思われる。また、収集された高磁場下でのREBCO線材の特性データは、加速器用高磁場磁石の開発のみでなく他分野の高磁場磁石開発にも有益な情報であり、今後のREBCO線材開発や磁石開発を活発化させるトリガーとなるものと思われる。REBCO大電流導体はREBCO線材の各種磁石への応用の道を大きく開く可能性を秘めている。本研究で得られた情報は、大電流導体の開発を活発化させるものと思われる。

研究成果の概要(英文)：Development of superconducting magnet using REBCO conductor has been carried out for future accelerators such as FCC in Europe, muon collider in USA, and SuperKEKB in Japan. We have developed a REBCO special sextupole magnet for the SuperKEKB, which can produce normal and skew sextupole field simultaneously, and excitation test and field measurement have been performed. The data from these tests showed the feasibility of the REBCO magnet for SuperKEKB. In order to gather the basic data, which are necessary to design the high field magnet, we measured the critical current and magnetization of commercial REBCO conductors with artificial pinning centers. And in the development of REBCO round cable with large current capacity, we have fabricated a 3-mm diameter cable and confirmed that the I_c is around 500 A at 77 K, self field.

研究分野：低温工学 超伝導磁石 加速器

キーワード：超伝導磁石 高温超伝導 REBCO線材 臨界電流 加速器

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

超伝導磁石の進歩は高エネルギー物理・加速器の分野に大きな影響を与える。NbTi 超伝導磁石の進歩により Large Hadron Collider (LHC) が実現し、ヒッグスボソンの発見を導いた。この発見は次なる疑問(質量の起源やヒッグスボソンの役割など)を引き起こし、より高エネルギーでの素粒子実験の必要性を高めている。この状況下で、欧州原子核研究機構 CERN は次期計画として 100 TeV 級の超大型加速器 (FCC) の検討を開始した。この加速器用磁石として、16 Tesla 級の Nb₃Sn 超伝導磁石と 20 T 級の高温超伝導磁石が考えられている。また、米国ではミューオン・コライダー(0.75 TeV x 0.75 TeV) の検討が続いており、そこでは、高磁場で、且つミューオン崩壊による発熱に耐える磁石が要求される。これら次世代加速器では、16~20 T 級の高磁場で、かつ高放射線環境下(放射線の物質内エネルギー損失による発熱量が 5mW/cm² オーダー)で運転可能な磁石が必要となっている。この磁石用線材としては、高温超伝導線材(REBCO, Bi-2212)は非常に魅力あるものである。現在、ルミノシティ向上を目指した HL-LHC 用の Nb₃Sn 磁石の開発・製作が欧米で進められているが、もう一つの候補である高温超伝導線材(主に REBCO 線材)を用いた磁石開発は未だ初歩的段階にあり、その開発が強く望まれている。

2. 研究の目的

次世代加速器で必須となる高安定・高磁場(16-20T)超伝導磁石を目標に、REBCO 線材を用いた超伝導磁石の基礎開発を行う。具体的には、コイル製作技術の開発、小型六極磁石の開発・試作を通じて加速器用 REBCO 磁石の問題点と実現可能性を調べる。また、将来の高磁場磁石開発に備え、REBCO 線材の低温、高磁場下での臨界電流特性のデータ収集、及び大電流 REBCO ケーブルの基礎的開発を行う。

3. 研究の方法

(1) 高精度コイル製作技術の開発

先行の科研究費研究に於いて製作した樹脂含浸コイルの寸法誤差を 1/10(0.2 mm 以下)にするコイル製作法の開発を進めた。具体的には、線材の絶縁テープに B ステージ樹脂を塗布し、その樹脂厚をコイル巻線後の加圧成形により制御することによりコイル寸法精度を上げを試みた。図 1 にその加圧成形装置とコイルの写真を示す。十分な接着力を有し、コイル寸法を制御できる樹脂厚を求め、コイルを試作した。試作コイルでは寸法計測のみでなく、LN2 温度で通電試験も行い、超伝導特性の劣化の有無も調べた。

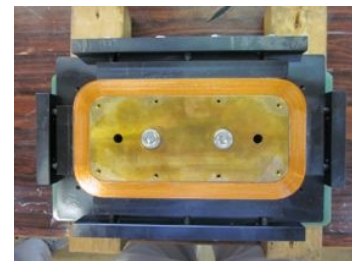


図 1 コイル加熱加圧成形装置

(2) クエンチ時のコイル最高温度推定法の開発

先行研究にて製作した予備コイル

(試作 REBCO 六極磁石のコイルと同一サイズ)を用いて、六極磁石の実用運転条件を想定したクエンチ保護検証試験を行なった。このコイル表面には、NiCr 箔ヒーターを接着し、ヒーター区間及びその両隣に電圧タップ(V2, V1, V3)を取り付け、ヒーター加熱によりコイルに常伝導転移を誘導しクエンチ試験を行なった(図 2 参照)。クエンチ検出はコイル両端及び 2 層コイルの中間部に合計 3 個の電圧端子を取り付け、1 層目コイルと 2 層目コイルの電圧差(ΔV)により行う。コイル励磁回路に取り付ける外部保護抵抗は、REBCO 六極磁石の遮断時定数 94 ms と同じになるように 0.1 Ω を選択し、六極磁石のクエンチ遮断条件と電流減衰を模擬する。実験は、250 A (T= 30 K, 六極磁石の設計電流)と 300 A (T= 30 K, 設計電流の 120 %の値)で行った。クエンチ解析は、ヒーター周辺のコイルをメッシュモデル化し有限要素法(FEM)解析を行った。

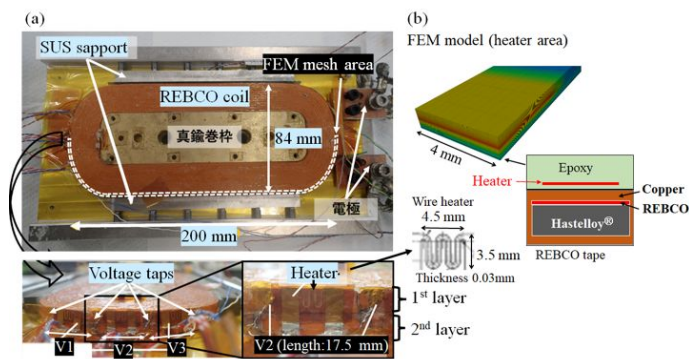


図 2 a)コイル及びヒーター部写真と、b)FEM モデル

(3) REBCO 特殊六極磁石の試作と特性評価

1 特殊六極磁石の試作

先行科研究費研究にて製作・試験を行ったノーマル六極磁石に、本研究で試作したスキュー六極コイルを組み合わせて、ノーマル六極磁場と、スキュー六極磁場を同時に発生できる特殊六極磁石

を組み上げた。製作性を考慮して、スキューコイルはREBCO線材と銅テープを交互に巻くダブルパンケーキ方式とし、線材表面に巻いたポリイミドテープに塗布した樹脂により線材を接着する方法で製作した。

2 六極磁石の試験

試作磁石の試験は、液体窒素の浸漬冷却および液体ヘリウムでの浸漬冷却で行なった。試験では、定格通電試験、電流遮断試験、コイル間接続抵抗測定、磁場測定を行い、加速器用磁石としての実現可能性を調べた。

(4) REBCO線材の電磁特性の測定

16-20 Tの高磁場磁石の開発にはREBCO線材の4.2 K、高磁場下における電磁特性データが必須であるが、その公表データは少ない。本研究では、高磁場での通電特性を向上するために開発された人口ピン入りREBCO-AP線材の超伝導特性の測定を行なった。測定に用いた市販線材は、ピン入り線材を製作しているメーカー4社から入手し、各社線材の特性比較も行なった。

1 臨界電流測定

開発した臨界電流測定ホルダーを用いて測定を行なった。測定は4.2 Kで、2-18 Tの磁場下で行い、臨界電流値のみでなく、n-値も求めた。また、77 Kにおける臨界電流値、n-値、臨界電流の角度依存性の測定も行なった。

2 磁化特性及び臨界温度の測定

市販REBCO-AP線材の磁化測定をMPMS装置にて行なった。測定の磁場領域は0-7 T、温度域は4.2-77 Kである。また、磁化の温度依存性から臨界温度を求めた。

(5) REBCO大電流ケーブルの基礎開発

SuperPower社製のREBCO線材(SCS2030-AP)を用いて丸型ケーブルを試作した。線材の幅は2 mm、厚みは0.12 mm(ハステロイ: 30 μm , 銅メッキ厚: 40 $\mu\text{m}/\text{side}$)である。ケーブルは、直径1.8 mmの銅撚線を芯線として、その上にREBCO線材を巻き付けて試作した。試作ケーブルの臨界電流測定は、液体窒素中で行なった。

4. 研究成果

(1) 高精度コイル製作技術の開発

ポリイミドテープの上に、種々の厚みのB-ステージ樹脂を塗布したサンプルを準備して、加熱+加圧キュア試験を行い、最適な樹脂厚(12 μm)を求めた。この知見を元に、スキュー六極コイルの試作を行ったが、コイルの加圧成形過程で線材劣化(77 Kでの通電試験で確認)が発生し、やむなく加圧力を下げた。その為、目標としたコイル寸法精度を達成することはできなかった(図3)。然しながら、このようなB-ステージ樹脂を塗布したポリイミドテープを用いればコイルの樹脂含浸工程を省くことができ、コイル製作が簡略化できることが明らかとなった。

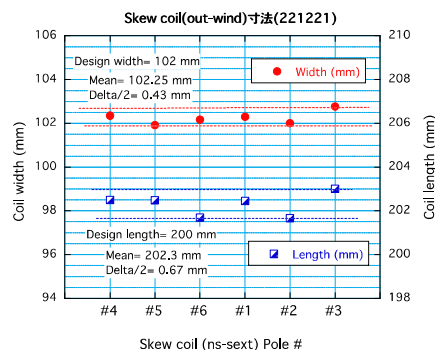


図3 6個の試作コイルの寸法

(2) クエンチ時のコイル最高温度推定法の開発

250 A通電時のヒータークエンチ試験で得られたコイル電圧、温度とシミュレーション結果の詳細な比較を行なった。その結果、ヒーターによって誘起された常伝導領域はヒーター区間に集中し、ほとんど伝播しないことが明らかとなった。また、ヒーター区間の平均温度とヒーター温度がそれぞれ約280 Kと340 Kまで上昇したと推察されたが、実験後のコイル励磁試験において特性の劣化は見られなかった。よって、ここで用いたクエンチ検出法と外部抵抗保護法はREBCO六極磁石に適用できることが確認された。それと共に、実験結果と解析結果がよく一致していることから、解析方法の妥当性も証明された。この手法により、種々のクエンチ検出条件($\Delta V = V_d$, t_d)で遮断した時のREBCO六極磁石(250A)のコイル最高温度を推定した結果を図4に示す。この情報は、六極磁石のみでなく、高温超伝導磁石全般に役立つもので、その実用化の可能性を高めるものであった。

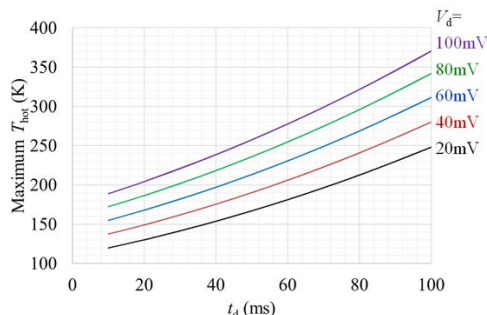


図4 種々のクエンチ検出条件で遮断した時のコイル最高温度(六極磁石 250 A)

(3) REBCO 特殊六極磁石の試作と特性評価

1 採用したコイル製作方法では目標とした寸法精度を達成できなかったが、ノーマル六極コイルとスキュー六極コイルを組合せた REBCO 特殊六極磁石を完成させ(図 5)、定格電流までクエンチ無しで通電できることが確認できた。また、サーマルサイクルを経ても性能劣化は生じないことも確認できた。これは試作磁石の設計・製作法に問題が無いことを意味し、加速器用高温超伝導磁石の実現可能性が高まった。

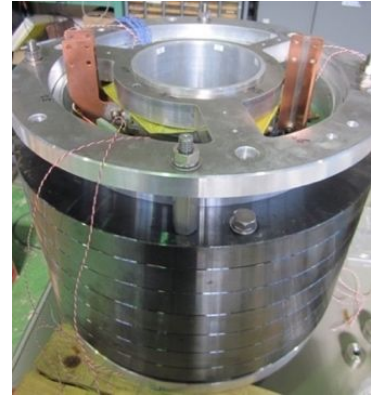


図 5 完成した特殊六極磁石

2 磁石製作で重要な項目の一つに、コイル間の接続抵抗を如何に小さくするかがある。本六極磁石で採用した銅板上に REBCO テープを貼り付ける接続法で $R=5\sim 2\ \mu\Omega$ @ 77 K, $0.15\sim 0.58\ \mu\Omega$ @ 4.2 K が得られることが分かり、将来の高温超伝導磁石設計に有益な情報となった。

3 液体窒素および液体ヘリウム温度での磁場測定を行い、以下に示す磁場特性を得た。

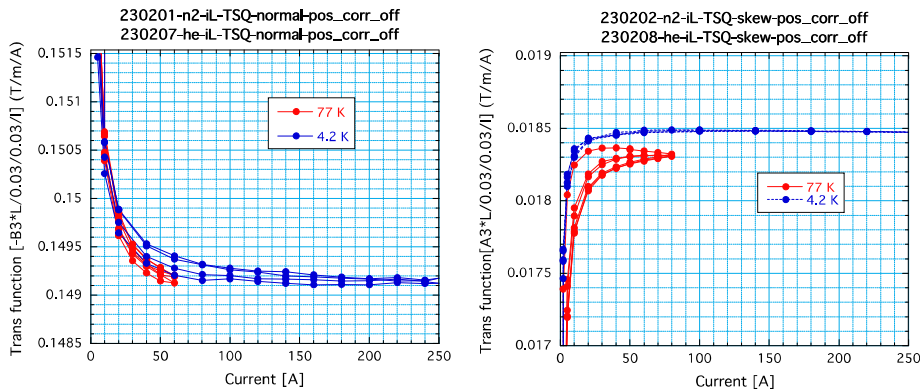


図 6 ノーマル六極磁石及びスキュー六極磁石の Transfer function

これらより、本六極磁石においては超伝導体の遮蔽電流が磁場に及ぼす影響ほとんど問題とならないこと(図 6 参照) 又、多極磁場成分は最大でも 6 極磁場の 8×10^{-4} 程度である事がわかった(図 7 参照)。更に、詳細な試験データの解析から、現在のスキュー六極磁石では 1 つのコイルの巻き数が 1 ターン間違っている事が判明した。このことから、ターン数を間違えないようにコイル巻線を行えば、加速器磁石で要求される磁場性能 ($c4\sim c9 < 5 \times 10^{-4}$) を実現することは可能であるとの感触が得られ、加速器用 REBCO 磁石の実現に大きく近づいた。

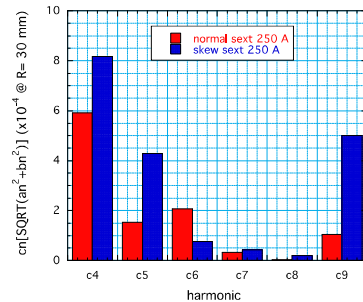


図 7 六極磁石の高次磁場成分

(4) REBCO-AP 線材の超伝導特性の測定

1 臨界電流 (I_c) 測定

各種市販 REBCO-AP 線材 (4 mm 幅) の臨界電流特性を明らかにし(図 8)、低温超伝導線材 (NbTi, Nb₃Sn) の特性と比較した。

これらのデータは今後の高磁場磁石の設計・開発に有用なものであると共に、線材メーカーの今後の開発目標を定めるための貴重な情報となるものと思われる。

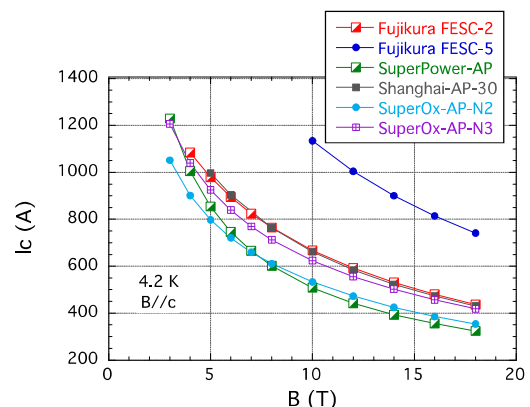


図 8 市販 REBCO-AP 線材の I_c 特性

2 磁化特性及び臨界温度(Tc)の測定

上記の臨界電流測定に用いた REBCO-AP 線材の磁化測定を行なった。温度は 4.2 K~77 K、磁場は 0~7 T の範囲で行なった。この磁化の値を通電法により実測した臨界電流値 (4.2K) で規格化することにより広い温度範囲での I_c 値推定を試みた。その結果、20~30 K 以下の温度域における I_c 値は < 20 % の誤差で推定可能であることがわかった。然しながら、より高温域の I_c 値推定では誤差が 25-80% にも昇ることが判明した。又、磁化の温度依存性の測定から市販 REBCO-AP 線材の T_c を求めた。線材の T_c は線材により 6 K 程度の幅があること、 T_c は線材の RE 元素のイオン半径に比例していることなどが確認された。 T_c 測定結果を図 9 に示す。

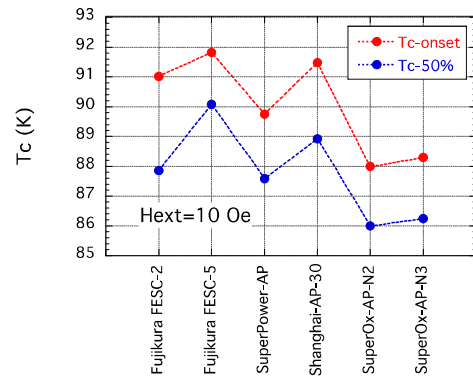


図 9 REBCO-AP 線材の臨界温度

(5) REBCO 大電流ケーブルの基礎開発

研究の方法の項に記したように、1.8 mmφの銅撚線の上に REBCO 線材を複数枚巻き付けたケーブルの試作を行った(図 10 参照)。11 枚の REBCO 線材を巻いた試作品の製作にまで漕ぎつけ、そのケーブルの臨界電流値が ~500 A @ 77 K であることを確認した。今後、更なる大電流化を目指したケーブル開発を進めることが必要であるが、REBCO 線材の特性劣化を 20% 程度に抑えたケーブル試作ができたことは大電流ケーブル開発の大きな一歩であると思われる。



図 10 試作した各種 REBCO ケーブル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 王 旭東, 土屋清澄, 武藤翔吾, 土屋光揮発, 藤田真司 | 4. 巻 57 |
| 2. 論文標題 SuperKEKB加速器用高温超伝導六極磁石のクエンチ検出と保護 REBCOコイルを用いたクエンチ実験と数値解析 | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 低温工学 | 6. 最初と最後の頁 293-300 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2221/jcs.57.293 | 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 Xudong Wang, Kiyosumi Tsuchiya, Shinji Fujita, Shogo Muto, Koki Tsuchiya | 4. 巻 32 |
| 2. 論文標題 Quench study on a REBa2Cu3Oy coil for a high temperature superconducting sextupole magnet | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 IEEE Trans. Appl. Superconductivity | 6. 最初と最後の頁 4005305 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2022.3163677 | 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 K. Tsuchiya, X. Wang, S. Fujita, A. Ichinose, K. Yamada, A. Terashima, A. Kikuchi | 4. 巻 34 |
| 2. 論文標題 Superconducting properties of commercial REBCO-coated conductors with artificial pinning centers | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Supercond. Sci. Technol. | 6. 最初と最後の頁 105005 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6668/ac1e65 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |
| 1. 著者名 X. Wang, K. Tsuchiya, Y. Arimoto, A. Terashima, S. Fujita, M. Tawada, R. Ueki, Z. Zong, M. Kawai, M. Masuzawa, N. Oguchi, A. Kikuchi | 4. 巻 30 (4) |
| 2. 論文標題 Excitation and magnetic field performances of a prototype REBCO sextuple coil at 4.2 K | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 IEEE Transaction on Applied Superconductivity | 6. 最初と最後の頁 4600304 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2020.2969396 | 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12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 土屋清澄、王 旭東、寺島昭男、有本 靖、大内徳人、宗 占国、増澤美佳、菊池章弘、藤田真司 |
| 2. 発表標題 加速器用HTSマグネットの開発(10-1) -全体概要- |
| 3. 学会等名 低温工学・超電導学会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 王 旭東、土屋清澄、寺島昭男、有本 靖、大内徳人、宗 占国 |
| 2. 発表標題 加速器用HTSマグネットの開発(10-2) -特殊六極マグネットの励磁試験- |
| 3. 学会等名 低温工学・超電導学会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 有本 靖、大内徳人、王 旭東、宗 占国、寺島昭男、土屋清澄 |
| 2. 発表標題 加速器用HTSマグネットの開発(10-3) -特殊六極マグネットの磁場測定- |
| 3. 学会等名 低温工学・超電導学会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 王 旭東、土屋清澄、寺島昭男、田邊 豪、根岸伸行、菊池章弘 |
| 2. 発表標題 加速器用HTSマグネットの開発(10-4) -加速器用REBCO丸型ケーブルの基礎研究- |
| 3. 学会等名 低温工学・超電導学会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 藤田真司、武藤翔吾、土屋光輝、王 旭東、寺島昭男、土屋清澄 |
| 2. 発表標題 加速器用HTSマグネットの開発(9-1) -スキュー6極マグネットの製作 - |
| 3. 学会等名 低温工学・超電導学会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 川井正徳、王 旭東、土屋清澄、大内徳人、宗 占国、青木和之 |
| 2. 発表標題 加速器用HTSマグネットの開発(9-2) -LHeフリー伝導冷却システムの開発- |
| 3. 学会等名 低温工学・超電導学会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 土屋清澄、王旭東、寺島昭男、藤田真司、一瀬 中、山田喬平、菊池章弘 |
| 2. 発表標題 市販REBCO-APC線材の臨界電流特性 |
| 3. 学会等名 低温工学・超電導学会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 土屋清澄、王旭東、町 敬人、藤田真司、一瀬 中、菊池章弘 |
| 2. 発表標題 通電法および磁化法より求めたREBCO線材のIc値比較 |
| 3. 学会等名 低温工学・超電導学会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 土屋清澄、王旭東、寺島昭男、大内徳人、有本 靖、植木竜一、川井正徳、宗 占国、山岡 広、多和田正文、増澤美佳、菊池章弘、町 敬人、一瀬 中、藤田真司 |
| 2. 発表標題 加速器用HTSマグネットの開発(8-1) -全体概要- |
| 3. 学会等名 低温工学・超電導学会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 藤田真司、武藤翔吾、土屋光輝、王旭東、寺島昭男、土屋清澄 |
| 2. 発表標題 加速器用HTSマグネットの開発(8-2) -矩形REBCOコイルのクエンチ実験- |
| 3. 学会等名 低温工学・超電導学会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 王旭東、土屋清澄、武藤翔吾、土屋光輝、藤田真司 |
| 2. 発表標題 加速器用HTSマグネットの開発(8-3) -矩形REBCOコイルのクエンチ解析- |
| 3. 学会等名 低温工学・超電導学会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Xudong Wang, Kiyosumi Tsuchiya, Shinji Fujita, Shogo Muto, and Koki Tsuchiya |
| 2. 発表標題 Quench study on a REBa2Cu3Oy coil for a high temperature superconducting sextuple magnet |
| 3. 学会等名 27th International Conference on Magnet Technology (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 | 増澤 美佳 (MASUZAWA Mika) (10290850) | 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・教授 (82118) | |
| 研究分担者 | 王 旭東 (WANG Xudong) (20550346) | 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・助教 (82118) | |
| 研究分担者 | 大内 徳人 (OHUCHI Norihito) (50194080) | 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・教授 (82118) | |
| 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・機能性材料研究拠点・グループリーダー (82108) | |
| 研究分担者 | 一瀬 中 (ICHINOSE Ataru) (70371284) | 一般財団法人電力中央研究所・電力技術研究所・上席研究員 (82641) | |
| 研究分担者 | 町 敬人 (MACHI Takato) (80415934) | 国立研究開発法人産業技術総合研究所・エネルギー・環境領域・主任研究員 (82626) | |

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|