

令和 4 年 6 月 13 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：19H04402

研究課題名(和文) 超伝導加速空洞の高Q値と高加速勾配の実現のための現象解明と新規材料開発

研究課題名(英文) Investigation on superconducting property and development for materials for high-Q and high gradient superconducting accelerating cavity

研究代表者

梅森 健成 (Umemori, Kensei)

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

研究者番号：60353364

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：ニオブ製超伝導空洞の高性能化(高加速勾配化および高Q値化)に向けた研究を進めてきた。磁気光学(MO)膜を用いて、空洞冷却時に捕捉される磁束のリアルタイム観測を実現し、中間磁束状態の存在を示すなど、磁束が捕捉される様子を詳細に観測し、そのメカニズムの理解を深めた。また、真空炉ベーキングと呼ばれる新たな表面処理方法を開発し、適切な温度で熱処理を行うことによりニオブ中への酸素の拡散を促し、ニオブ製空洞の高加速勾配化・高Q値化が実現できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電子や陽子、重イオンといった荷電粒子を加速するための超伝導加速空洞の高性能化に向けた研究である。捕捉磁束の低減・制御は、表面抵抗の低減に繋がり、ヘリウム冷凍機の負荷の削減を実現する。冷却時の磁束捕捉の様子をリアルタイムで示すことで、補足メカニズムについての理解を格段に進めた。また、真空炉ベーキングという簡易な手法での空洞性能の高勾配化・高Q値化を実現させた。世界的にも注目されており、今後、ビーム加速を行う超伝導加速器として実際に使われる技術になると考えられる。

研究成果の概要(英文)：We have conducted research in order to realize high-performance (higher accelerating gradient and higher Q value) of niobium superconducting cavities. Realtime measurement of flux trapping during cooldown process has been performed using magneto-optical film. Trapping of magnetic flux to the niobium samples were observed in detail, such as showing the existence of an intermediate mixed state, and its mechanism was more deeply understood. On the other hand, new surface treatment procedure, so called "furnace baking", has been developed. It was shown that the higher gradient and higher Q-value of cavities could be realized by applying an appropriate temperature heat treatment in the furnace.

研究分野：超伝導加速空洞

キーワード：超伝導加速空洞 加速器 磁束 超伝導

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 電子や陽子、重イオンなどの荷電粒子の加速に用いられる超伝導加速空洞は一般的にニオブにより製作されている。超伝導加速空洞の性能を表す指標としては、「加速勾配」と「Q 値」があげられる。加速勾配[MV/m]は、空洞 1m 当たりの加速電圧を表す。Q 値は空洞の表面抵抗(R_s)と反比例の関係にあり、Q 値の高い空洞は表面損失が小さく冷却負荷を低減できるため、運転コストの削減に直結する。超伝導空洞の開発は、「高加速勾配化」と「高 Q 値化」を目標に進められる。

(2) 表面抵抗 R_s は温度とともに指数関数的に減少する BCS 抵抗(R_{BCS})と、ほとんど温度に依存しない残留抵抗(R_{res})からなる。運転時の温度を下げることで BCS 抵抗を小さくできるが、1.3 GHz のニオブ製超伝導空洞の場合、2K 以下では残留抵抗の寄与が無視できなくなる。本研究を開始した頃に、残留抵抗の主要因は冷却時に捕捉された磁束量子に由来するものであることが示されていた。一方で、磁束捕捉のメカニズムならびに捕捉された磁束が高周波のもと抵抗成分となるメカニズムは理解されていなかった。そのため、Q 値向上のため磁束を効果的に排除する研究が世界的に展開されていた。

(3) ニオブ製超伝導空洞の高性能化を目指して、窒素ドーピングや窒素インフュージョンと呼ばれる手法が開発され、高 Q 値化ならびに高加速勾配化を目指す研究が盛んに行われていた。これらの手法では、ニオブ表面に窒素を拡散させることで、高性能化を実現していた。一方で我々は、真空炉を用いた新たな表面処理方法により高性能化を実現する手法に取り組み始めていた。この手法は、窒素の代わりに酸素を拡散させることでニオブ製超伝導空洞の高性能化を実現することを目指していた。

(4) 大電力かつ高周波という極限的な運転環境での研究開発には、現象論的なアプローチが取られることが多かった。本研究においては、加速器の専門家と超伝導の専門家がタッグを組むことで、根本的な理解を深めつつ、空洞性能の向上に取り組んだ。

2. 研究の目的

(1) ニオブ製超伝導空洞への磁束捕捉のメカニズムを調べることで空洞の高性能化(高 Q 値化)を実現することを目指した。そのためには現状不十分であるニオブ材の物性・超伝導特性についての理解を深めて行く必要がある。第 2 種超伝導体であるニオブ製超伝導空洞を冷却する際には、周辺磁場のうちある割合を空洞表面に捕捉(ピン止め)してしまう事が知られており、この捕捉磁場により表面抵抗が生み出されている。一方で捕捉される磁場の割合は、ニオブ材料の供給会社、熱処理温度、冷却時の空洞表面の温度勾配などに大きく依存する。ニオブの組織が大きく関与している事は明らかであるが、実際にニオブ材料のどの条件が効いているのか? どの部分に磁場が捕捉されているのか? 温度差をつけた場合に何が影響しているのか? といった事は明らかにされていない。この問題に取り組むため、磁気光学イメージング法や走査 SQUID 顕微鏡を用いた磁束状態の直接観察による磁束が捕捉されやすい場所の特定と、EBSD や SEM などでの捕捉場所の詳細分析から、磁束捕捉のメカニズムに迫ることを目的とした。

(2) ニオブ製超伝導空洞の高性能化(高加速勾配化および高 Q 値化)を目指し、新たな表面処理方法の開発を行う。標準処理と呼ばれる通常の表面処理方法においては、電解研磨で処理された後にクリーンルームにて組立てを行い、最後に 120 度 48 時間のベーキングが行われる。この標準処理においては、酸素の拡散が水素化ニオブのクラスター化を妨げ、安定的に高性能が実現されていると説明される。我々は、真空炉を用いてより高温での熱処理を行うことにより、ニオブ表面の酸化膜を適度に拡散させて、より高加速勾配かつより高 Q 値を実現する処理条件を探ることとした。空洞とともにニオブサンプルにも同様の処理を行い、SIMS 等で酸素の拡散の具合を調べながら、系統的に熱処理温度と空洞性能の関係を調査することとした。

3. 研究の方法

(1) 走査 SQUID 顕微鏡は、磁気感度が非常に優れており、捕捉された磁束量子の 1 本 1 本を観測する事ができ、捕捉磁場の詳細を研究するのに非常に有効である。一方、磁気光学膜(MO 膜)をインジケータとして利用する磁気光学イメージング法はよりマクロな分布をリアルタイムで観察するのに適している。加速器グレードの高純度ニオブ材料について、ニオブ供給会社、ニオブサンプルの熱処理温度・材料、冷却時の温度勾配等の条件など、様々な条件の違いが磁束捕捉へどのように影響及ぼすかを明らかにするため、実際の加速空洞に用いられる質の厚さ 3mm 程度の単結晶ニオブ板(数 cm ~ 10 数 cm の結晶粒界のニオブ)から 7mm ~ 10mm 角のニオブを切り出し、様々な表面処理を施した試料を準備し、それぞれ捕捉された磁束の観察を行った。

(2) Ginzburg-Landau 方程式に基づいた有限要素法シミュレーションや分子動力学シミュレー

ションを用いての磁束量子の静的配置やダイナミクスの再現を試みるとともに現象の理解に努めた。

(3)ニオブ製空洞およびサンプルの熱処理は、オイルフリーの真空炉を用いて行った。そのためこの方法は“真空炉ベーキング”と呼ばれている。200度から800度の間の温度にて熱処理を行った。窒素ドーピングや窒素インフュージョンと呼ばれる処理の場合は、窒素ガスを導入する必要があるが、真空炉ベーキングでは、ニオブ表面に安定に存在する酸化膜を用いて酸素を拡散させているため、処理方法が簡便であることも特徴の一つである。

処理を行った空洞は、液体ヘリウムと減圧ポンプを用いて2Kまで冷却されて、大電力高周波を投入して、空洞性能(加速勾配およびQ値)の評価がなされる。ニオブサンプルについてはSIMS等で深さ方向の分布の測定を行い、空洞性能との相関が調べられる。

4. 研究成果

(1) 磁束捕捉の研究については、当初、走査型SQUIDを用いた観測からスタートしたが、全体的な分布の把握が困難であった。そこで、磁気光学イメージング法により試料全体での磁束状態を把握することを優先した。新たなMO膜の購入や自作、磁束観測の精度を向上させるための光学顕微鏡の改良、確実な冷却のためのサンプルホルダーの製作など装置の高性能化に取り組んだ結果、冷却時の磁束の動きをリアルタイムで観測することができた。真空熱処理の温度により磁束捕捉の状況が異なる様子が観測されたほか、サンプル上に磁束の動きをせき止めるような場所があることなど、幾つかの特徴的な磁束の運動が確認できた。

特に、十分高温で真空熱処理した試料においては、数~数100 Oe程度の磁場中冷却において試料冷却時に温度変化とともに磁束量子が凝集した磁束クラスター状態へと変化する様子を可視化することに初めて成功した[1]。高純度ニオブがT_c直下の通常タイプII超伝導状態から、温度低下とともに中間磁束状態が現れるタイプII/1と呼ばれる状態へ相変化することを確かめた。観察結果から、高純度ニオブにおける磁束量子間には、磁場侵入長の4倍程度の距離を保つような引力相互作用が働くことを明らかにした。図1に、100 Oeにおける中間磁束状態の磁気光学イメージング像を示す。

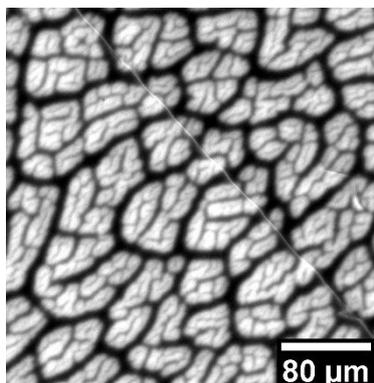


図1: 100 Oeにて磁場中冷却後、6 Kにおける磁気光学像。磁束量子の凝集によりマイスナー相と磁束相が相分離した様子が観察される。

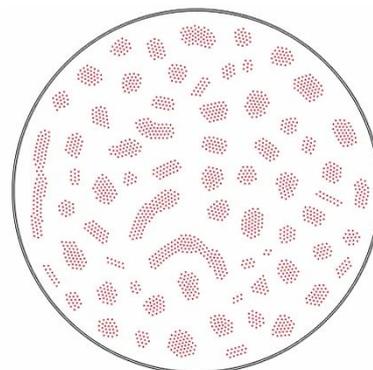


図2: 磁束バンドル形成過程の2次元分子動力学シミュレーション。

中間磁束状態はGLパラメータが第1種と第2種の境界に近い超伝導体において存在が知られていたが、これまで加速空洞において考慮されていなかった。また、中間磁束状態が観られるかどうかは、熱処理温度だけでなく窒素インフュージョンや窒素ドーピング処理などの表面処理プロセスでも変化し、磁束状態が表面状態と密接に関係していることを示唆する。さらに中間磁束状態の存在は、磁束間に引力相互作用が働くことを示しており、効率的な磁束排除方法を探る上で、磁束クラスターの静的・動的な物性の理解は欠かせない。今回の知見は、磁束捕捉のメカニズムの理解、また捕捉磁束が高周波磁場の元で抵抗をもたらす起源を理解する上で重要な結果である。

理論的な面からは、引力を含むような磁束間相互作用ポテンシャル形状を仮定して分子動力学シミュレーションを行い、中間磁束状態の磁束パターンを再現できた。図2にその一例を示す。今後、より詳細な実験との比較を通して、磁束間相互作用についての理解が深まると期待する。

[1] S. Ooi et al., “Observation of intermediate mixed state in high-purity cavity-grade Nb by magneto-optical imaging”, Phys. Rev. B 104, 064504 (2021).

(2)真空炉ベーキングは、まず200度から800度の温度範囲で、それぞれ3時間の熱処理が行われ、空洞性能の評価が行われた[2]。測定結果を図3(左)に示す。2Kでの加速勾配(Eacc)ならびにQ値(Q₀)が示されている。特徴的なのは、300~400度で熱処理を行うと非常に高いQ値

を示すことである。ただし一方で加速勾配は 25 MV/m 程度に制限されてしまっている。熱処理温度が 600 度を超えると 25MV/m 以上の加速勾配で Q 値が下がってしまう、いわゆる High Field Q-slope という現象が観測されている。200 度付近の熱処理では、35 MV/m を超える高い加速勾配が実現できていることがわかる。

図 3(右)には、1 ~ 3 時間の熱処理時間における 200 度真空炉ベーキングの結果を示す。200 度 1 時間では、High Field Q-slope が見えている。200 度で 2 時間以上の熱処理を行うことで、 2×10^{10} を超える Q 値で、40MV/m 近い加速勾配が得られている。これは、高加速勾配かつ高 Q 値を目指すうえで非常に有望な処理方法であることを示している。

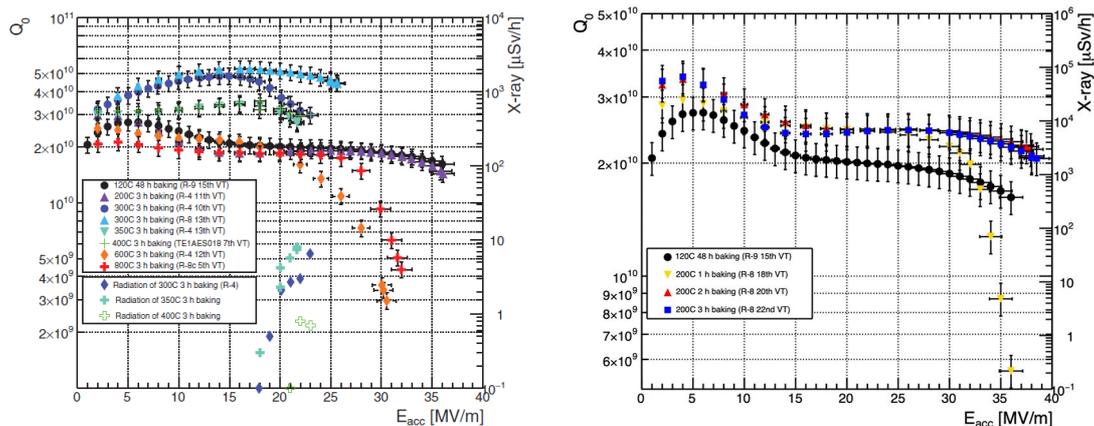


図 3 (左) 200 度から 800 度における真空炉ベーキングを施した空洞の性能測定結果。熱処理時間は全て 3 時間。(右) 200 度での真空炉ベーキングを施した空洞の結果。熱処理時間は 1 ~ 3 時間。それぞれ、120 度 48 時間の通常ベーキングのデータと比較してある。

図 4 に 200 度から 800 度における測定データから BCS 抵抗(左図)と残留抵抗(右図)をそれぞれ導いたものを示す。300 度から 400 度においては、BCS 抵抗が加速勾配とともに下がっていく、いわゆる anti Q-slope と呼ばれる現象が見えている。BCS 抵抗の低減が、高 Q 値の実現に結びついている。また残留抵抗はどの熱処理でも低い傾向にあり高 Q 値実現の要因の一つとなっている。特に 600 度熱処理においては、 $0.2 \sim 0.4 n$ という非常に小さな残留抵抗を示しており、熱処理温度と残留抵抗の相関として非常に興味深い結果を示している。

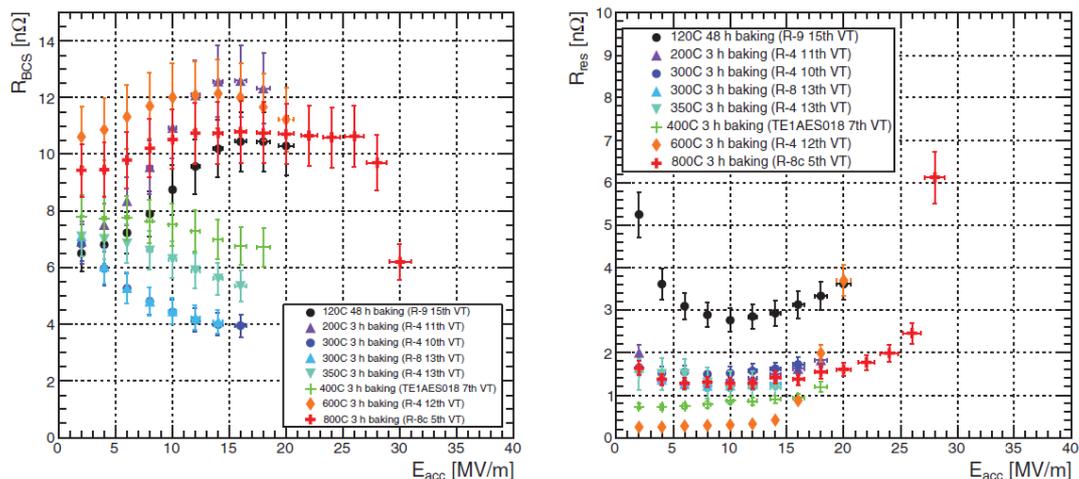


図 4 : 200 度から 800 度までの熱処理を施した場合の (左) BCS 抵抗、(右) 残留抵抗。

ニオブサンプルの SIMS データから、酸素の深さ方向への拡散も評価されている。熱処理温度が高くなるにつれ、深い領域まで酸素が拡散しているのが観測される。現在、この深さ方向の分布を用いて、理論的に空洞の測定結果を再現するべく議論も始められている。理論的にある程度説明できるようになれば、空洞表面での酸素の拡散をコントロールすることで、最適な条件を探ることができると期待されている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Ooi S., Tachiki M., Konomi T., Kubo T., Kikuchi A., Arisawa S., Ito H., Umemori K.	4. 巻 104
2. 論文標題 Observation of intermediate mixed state in high-purity cavity-grade Nb by magneto-optical imaging	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 1, 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.064504	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 Ito H, Araki H, Takahashi K, Umemori K	4. 巻 071G01
2. 論文標題 Influence of Furnace Baking on Q-E Behavior of Superconducting Accelerating Cavities	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 1, 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptab056	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 He Dongfeng, Umemori Kensei, Ueki Ryuichi, Dohmae Takeshi, Okada Takafumi, Tachiki Minoru, Ooi Shuuichi, Watanabe Makoto	4. 巻 20
2. 論文標題 Low-Temperature Properties of the Magnetic Sensor with Amorphous Wire	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 6986 ~ 6986
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s20236986	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 Okada T., Kako E., Konomi T., Masuzawa M., Sakai H., Tsuchiya K., Ueki R., Umemori K., Pizzol P., Poudel A., Tajima T.	4. 巻 92
2. 論文標題 Systematic evaluation of magnetic sensitivities of anisotropic magnetoresistive sensors at liquid helium temperature for superconducting cavities	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 035003 ~ 035003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0038805	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 植木 竜一	4. 巻 30
2. 論文標題 Study on Magneto-Resistance Sensors for Low Magnetic Field Measurements	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2020.2976994	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 -

〔学会発表〕 計20件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 大井 修一, 立木 実, 菊池 章弘, 有沢 俊一, 許斐太郎, 井藤隼人, 久保毅幸, 加古永治, 阪井寛志, 梅森健成
2. 発表標題 磁気光学イメージング法による超高純度ニオブの磁束状態観測
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Ooi, M. Tachiki, A. Kikuchi, S. Arisawa, T. Konomi, T. Kubo, H. Ito, E. Kako, H. Sakai, K. Umemori
2. 発表標題 Observation of intermediate mixed state in high-purity cavity grade Nb by MO imaging and its implication to flux trapping mechanism
3. 学会等名 TESLA Technology Collaboration (TTC) 2022 meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Ooi, M. Tachiki, A. Kikuchi, S. Arisawa, T. Konomi, T. Kubo, H. Ito, E. Kako, H. Sakai, K. Umemori
2. 発表標題 Magneto-optical imaging of vortex bundles in high purity Nb
3. 学会等名 34th International Symposium on Superconductivity (ISS2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 有沢 俊一, 田中 康資, 山森 弘毅, 柳澤 孝, 常盤和靖, 石津寛, 西尾 太一郎, 立木 実, 大井 修一, 菊池 章弘, 許斐太郎, 久保毅幸, 井藤隼人, 加古永治, 阪井寛志, 梅森健成, 林 忠之, 遠藤 和弘, Petre Badica
2. 発表標題 走査SQUID顕微鏡を利用した物性評価と材料開発
3. 学会等名 NIMS先端計測シンポジウム2022
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井藤隼人, 荒木隼人, 高橋光太郎, 梅森健成
2. 発表標題 ファナスピーキングによる高Q値超伝導加速空洞の探索
3. 学会等名 第18回日本加速器学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Ito, H. Araki, K. Takahashi, K. Umemori
2. 発表標題 Systematic investigation of mid-T furnace baking for high-Q performance
3. 学会等名 2021 International conference on RF superconductivity (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大井 修一
2. 発表標題 Observation of Vortex Bundles in Type-II/1 Superconductor Niobium by Magneto-optical Imaging
3. 学会等名 The 33rd International Symposium on Superconductivity (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 片山 領
2. 発表標題 High-Q/High-G R&D of SRF cavities by applying 2-step baking at KEK
3. 学会等名 Americas Workshop on Linear Colliders 2020 (AWLC2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井藤 隼人
2. 発表標題 High-Q performance of SRF cavities by mid-T furnace baking at KEK
3. 学会等名 TESLA Technology Collaboration meeting (TTC meeting) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 片山 領
2. 発表標題 900 deg Annealing / Cold EP / 2-step baking at KEK
3. 学会等名 International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大井 修一
2. 発表標題 高純度ニオブにおける vortex bundle の磁気光学観察
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡田 貴文
2. 発表標題 Development of the temperature and magnetic field mapping system for superconducting cavities
3. 学会等名 第17回加速器学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 片山 領
2. 発表標題 Vertical test results of TESLA 9-cell superconducting cavities at KEK-STF
3. 学会等名 第17回加速器学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 久保 毅幸
2. 発表標題 Theoretical foundation for high acceleration gradient and high Q value of superconducting cavities
3. 学会等名 第17回加速器学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 梅森 健成
2. 発表標題 New results of KEK N-infusion and mid-T baking
3. 学会等名 TESLA Technology Collaboration meeting (TTC meeting) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大井 修一
2. 発表標題 Magneto-optical imaging of field profile on niobium surface with microstructures of niobium hydrides and a single grain boundary
3. 学会等名 32nd International Symposium on Superconductivity (ISS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 梅森 健成
2. 発表標題 Study on Nitrogen Infusion using KEK new furnace
3. 学会等名 19th International Conference on RF Superconductivity(SRF19) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡田 貴文
2. 発表標題 Development of Temperature and Magnetic field mapping system for superconducting cavities at KEK
3. 学会等名 19th International Conference on RF Superconductivity(SRF19) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡田 貴文
2. 発表標題 KEKにおける超伝導空洞のための温度・磁場マッピング装置の開発
3. 学会等名 第16回加速器学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 植木 竜一
2. 発表標題 Study of magneto-resistance for low magnetic field measurements
3. 学会等名 MT26 (International Conference on Magnet Technology) (国際学会)
4. 発表年 2019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	有沢 俊一 (Arisawa Shunichi) (00354340)	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・上席研究員 (82108)	
研究分担者	許斐 太郎 (Konomi Taro) (20634158)	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	井藤 隼人 (Ito Hayato) (30881552)	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	阪井 寛志 (Sakai Hiroshi) (50345229)	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)	

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
研究協力者	大井 修一 (Ooi Shuichi)	国立研究開発法人物質・材料研究機構 (82108)	
研究協力者	立木 実 (Tachiki Minoru)	国立研究開発法人物質・材料研究機構 (82108)	
研究協力者	菊池 章弘 (Kikuchi Akihiro)	国立研究開発法人物質・材料研究機構 (82108)	
研究協力者	増澤 美佳 (Masuzawa Mika)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構 (82118)	
研究協力者	土屋 清澄 (Tuchiya Kiyosumi)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構 (82118)	
研究協力者	植木 竜一 (Ueki Ryuichi)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構 (82118)	
研究協力者	久保 毅幸 (Kubo Takayuki)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構 (82118)	
研究協力者	片山 領 (Katayama Ryo)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構 (82118)	

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
研究協力者	岡田 貴文 (Okada Takafumi)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構 (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