

令和 3 年 6 月 23 日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H04839

研究課題名(和文) 次世代超伝導加速空洞のための超伝導積層薄膜構造の基礎的研究

研究課題名(英文) Superconducting multilayer-structure for next-generation superconducting-accelerators

研究代表者

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・加速器研究施設・助教

研究者番号：30712666

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,000,000円

研究成果の概要(和文)：超伝導空洞内面に最適膜厚を持つ超伝導薄膜を積層する事で加速性能を向上させられると考えられている。その原理実証及び理論の精緻化を行った。高純度ニオブ(Nb)材の上に絶縁層を挟んで窒化ニオブ(NbN)薄膜が積層された試験片を作成し、NbNの厚みが異なる複数の試料について磁束侵入磁場(Bv)測定を行ったところ、Bvを向上させられる最適膜厚の存在が確認された。Nb単体と比べて20%程度向上した。また、BCS理論を用いて不純物を多く含む積層薄膜構造の過熱磁場(Bsh)を計算し、Bshの膜厚依存を調べた。BshはBvの理論限界に対応する。BCS理論に基づく積層薄膜構造の非線形表面抵抗の理論も構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、超伝導積層薄膜構造の原理実証及び理論の精緻化を行ったものであり、積層薄膜構造の実機への応用に向けた最初の一步と言える。今後、更に研究・開発が進み、積層薄膜構造による次世代超伝導空洞が実現すれば、最大加速電場は大きく向上する。このことは超伝導加速器の小型化または高エネルギー化を促進し、医療用・産業用加速器、X線自由電子レーザー、エネルギー回収型ライナック、高レベル廃棄物処分としての加速器駆動核変換技術、国際リニアコライダー等の加速器計画の建設費軽減につながる。また、医療用・産業用加速器の小型化が進めば、それらの大規模な普及も期待される。

研究成果の概要(英文)：The optimized superconducting multilayer structure is a candidate technology to improve the accelerating field of superconducting particle accelerators. In the present project, we have succeeded in proof-of-concept experiments and made progress in the theory of the multilayer structure. We fabricated samples of multilayer structures by coating bulk pure-Nb substrate with a thin NbN layer separated by an insulator layer. We measured the first vortex penetration field (Bv) for samples with different NbN thicknesses and confirmed the optimum thickness. The maximum Bv is 20% higher than bulk Nb alone. Also, we calculated the superheating field (Bsh) of the multilayer structure in the diffusive limit using the BCS theory and studied the thickness dependence of Bsh. Here, Bsh corresponds to the theoretical limit of Bv. The nonlinear surface resistances of multilayer structures were also calculated using the BCS theory.

研究分野：超伝導共振器

キーワード：加速器 超伝導 超伝導加速空洞 薄膜 ニオブ 窒化ニオブ ニオブ3スズ

1. 研究開始当初の背景

超伝導加速空洞は、現代の粒子加速器の核となる構成要素であり、素粒子実験用の高エネルギー加速器、X線自由電子レーザー等の光源用加速器、更には医療用加速器においても使用される。大きさ数十 cm 程度の空洞内部には、共鳴周波数 (~1GHz) のマイクロ波が閉じ込められており、その電場成分(加速電場)が荷電粒子を加速させる。加速電場を大きくできれば粒子を短い距離で目標エネルギーに到達させられる。よって、最大加速電場は空洞性能を表す代表的パラメータである。

殆どの超伝導加速空洞は、バルクのニオブ(Nb)製である。Nb は比較的加工性が高く空洞の製作に適していることに加え、下部臨界磁場(H_{c1})が大きいため、量子化磁束(渦糸)の侵入によるエネルギー散逸を伴うことなく高い加速電場を実現できるからである。しかしながら、数十年に亘る研究・開発を経て、Nb 製空洞の加速電場は限界に達しつつある。近年製造・運転されている多くの Nb 製空洞では表面磁場の大きさが H_{c1} を超えており、今後、加速電場の大幅な向上は見込めない。Nb 製空洞に代わる次世代超伝導加速空洞開発は、研究者コミュニティが共有する最重要課題の一つである。

2006 年、グレビッチ氏[1]は、超伝導薄膜と絶縁層を交互に積層することで空洞壁の Nb を空洞内の大きな高周波磁場から遮蔽し、保護することを提案した(図 1)。絶縁層が渦糸の侵入を遮り、エネルギー散逸を大幅に低減するため、 H_{c1} よりも高い磁場に到達できる。Nb₃Sn を用いた積層薄膜構造を空洞内面に実装した場合、加速電場 100MV/m が実現可能と見積もられている。これはバルク Nb 製空洞を遥かに上回る性能である。また、表面抵抗の原因は有限温度で存在する励起準粒子によるマイクロ波吸収であるが、Nb₃Sn は比較的高い臨界温度を持つため、同じ温度で比較した場合には Nb よりも遥かに少ない数の準粒子しか励起されておらず、表面抵抗の大幅な低減も期待できる。この提案直後から、各国の研究所は実証実験に乗り出し、開発競争が始まった。

2013 年、研究代表者らは超伝導積層薄膜構造の理論的な理解を大きく前進させた[2]。系に平面波が入射した際の電磁場分布と磁束侵入開始磁場の解析を行い、各層の最適な厚みの評価方法を明らかにした(Young Scientists Best Poster Award, SRF2013, Paris, France)。2015 年、我々の成果を踏まえ、グレビッチ氏は、絶縁層が薄い極限において、理論を $T_c \ll T_c$ (T_c は超伝導転移温度)に適用可能な、より精緻な理論へと改良した[3]。2016 年、研究代表者は、グレビッチ氏の仕事[3]を元に、有限の絶縁層厚さを持つ場合に一般化した上で、試料表面の凹凸の効果を取り込めるよう理論を拡張した[4](Highlights of 2017, Superconductor Science and Technology, United Kingdom)。これまで手探りで行われていた実験に対し、これら一連の研究が理論的な指針を示したと言える。

研究開始当初、日本は、積層薄膜構造を始めとする非 Nb 空洞の研究において、世界から大きく遅れをとっていた。研究代表者らが理論的研究により得た優位性が、世界に追いつくための足掛かりとなると思われた。そこで、本計画「次世代超伝導加速空洞のための超伝導積層薄膜構造の基礎的研究」を提案するに至った。

2. 研究の目的

理論によると、膜内磁場の減衰は各層の厚みに依存する。その結果、磁束侵入開始磁場は、超伝導層の厚みと絶縁層の厚みの組み合わせで決定される。従って、加速電場の最大化には、各層に対して最適な膜厚の選択が重要である。各層の厚みが異なる試験片および小型空洞を用いて多数回の実験を行い、この理論を直接検証することが本研究の目的である。

最適膜厚を有する空洞の実験において、磁束侵入開始磁場の大幅な向上が確認されれば、超伝導積層薄膜の技術を実機(1.3GHz 空洞)に応用する基礎が確立する。超伝導積層薄膜構造による次世代超伝導空洞が実現すれば、最大加速電場は大幅に向上する。また、表面抵抗の低減も期待できる。このことは超伝導加速空洞の小型化または高エネルギー化、そして省エネルギー化を促進し、医療用・産業用加速器、X線自由電子レーザー、エネルギー回収型ライナック、高レベル廃棄物処分としての加速器駆動核変換技術、国際リニアコライダー等の加速器計画の建設費及び維持費の大幅な軽減につながる。より具体的には、超伝導層に Nb₃Sn を用い、各層の膜厚を最適な値に取った場合、磁束侵入開始磁場は 400mT を超え、最大加速電場は 100MV/m 以上となる(Nb 空洞の 2 倍以上)。これは半分以下の長さの加速空洞で同じエネルギーにまで加速できることを示しており、医療用加速器・産業用加速器の小型化、更にはこの結果としての大規模な普及が期待される。また、国際リニアコライダー(ILC)は同じ長さ、同じ建設費で 2 倍以上のエネルギーに到達できる可能性がある。

3. 研究の方法

本研究は、既存の技術を大きく変革させることを目標とする課題であり、広大なパラメータ空間を細かく実験で探索する必要がある。また、限られた予算で成果を上げることが期待されている。実機(1.3GHz TESLA 型単セル空洞や多セル空洞)を用いた実験を繰り返し、広大なパラ

メータ空間を探索することはコスト的に非現実的である。取り得る手法の一つは、実機ではなく、小さな試験片を用いた実験である。超伝導試料の臨界温度測定や RRR 測定による純度の評価が簡単に出来ることに加え、コイル磁場を印加することで磁束侵入開始磁場の測定も可能である。更に、試験片での実験と実機での実験の間を埋める第三の手法として、安価な小型単セル空洞で試験を繰り返す手法がある[5]。具体的には、安価な 3GHz 小型単セル空洞を用いて多数回の実験を繰り返し、広大なパラメータ空間を探索する。これらの方法により、限られた予算をパラメータ探索のために最大限有効に使うことができる。

まず、積層薄膜構造を備えた試験片を作成する。KEK、京都大学、株式会社 ULVAC は、超伝導薄膜形成の共同研究を開始しており、研究代表者も共同研究に参加している。よって、ULVAC にスパッタ による薄膜の形成を依頼することが可能である。KEK と京都大学において試験片の評価を行う。試料実験用の臨界温度・RRR 測定装置を立ち上げているので、これを使って試料を評価する。また、第三高調波法による磁束侵入磁場測定も行う。得られた測定結果を試料作製にフィードバックしながら試料の質の向上に繋げる。

並行して、小型空洞を製作する。空洞形状は実機(1.3GHz TESLA 型空洞)を 3GHz にスケールダウンしたものとす。長年に亘り KEK と共同研究を進めている米国 Thomas Jefferson National Accelerator Facility (Jlab)が、この形状の空洞を製作した経験があり、空洞のプレス金型を所有しているため、これを借りることにする。電子ビーム溶接については KEK での内作及び外注が可能であり、問題なく製作可能である。

完成した小型空洞内面に積層薄膜構造を形成する。このプロセスは KEK と共同研究を行っている ULVAC または Jlab に依頼する。小型空洞内面への薄膜形成は試験片とは異なるため、何度も失敗することが予想される。この場合には化学研磨により、積層された薄膜層を簡単に除去できる。薄膜の積層と化学研磨を繰り返しながら、小型空洞内面へ薄膜構造を形成するための技術を向上させる。その後、絶縁層厚さと超伝導層厚さの組み合わせが異なる複数の小型空洞を用意し、それぞれの性能を測定する。ここで言う性能測定とは、超伝導空洞研究で日常的に行われている標準的なもので、一般に「縦測定」と呼ばれるものである。ただし、本研究では 3GHz の RF システムが必要であるため、実験は Jlab に持ち込み実施することを想定している。

積層薄膜構造の理論の精緻化も引き続き進める。空洞内電磁場強度を増していった際の表面抵抗の振る舞い、及び、耐えられる最大の表面磁場(すなわち到達可能な加速電場)を BCS 理論を用いて計算する。

4. 研究成果

我々は、バルク Nb 上に絶縁層を挟んで窒化ニオブ(NbN)層を積層した構造(NbN-I-Nb 構造)を持つ試験片を作成し、積層薄膜による性能向上の原理実証に取り組んだ。まず ULVAC において、窒素ガス反応性スパタリングを用いた Si ウェーハ 上への NbN の成膜(厚み 200nm) XRD、SEM、AFM、膜応力、転移温度測定の繰り返しにより最適な成膜条件が明らかにされた[6,7]。転移温度が 14K を超えるものが得られるようになった。この結果に基づき、空洞グレードの高純度 Nb 基板(RRR>300)上に絶縁層として SiO₂ を持つ積層薄膜構造(NbN-SiO₂-Nb 構造)の作成が可能となった[6,7]。また、スパタリング法による Nb₃Sn の成膜条件の最適化も進められた[7,8]。これと並行して、第 3 高調波法による磁束侵入磁場測定装置を立ち上げを進めた。装置は京都大学において先行して立ち上げが進んでいたが[9,10]、京都大学の共同研究者の助言を得つつ KEK においてもこれと同様のものを立ち上げた[11,12]。京都大学と KEK の 2 つの装置を用いて、NbN-SiO₂-Nb 試験片の磁束侵入磁場(B_v)を測定した。NbN の厚み(d)が異なる複数の試験片について測定し、B_v の d 依存性を調べた。その結果、膜厚の増加とともに B_v が増大し、膜厚が 200nm 程度のところで最大値をとることが分かった。これは理論の予言と定性的に一致する。また、B_v の最大値は Nb 単体の場合の値よりも 20%以上大きな値が得られた[13-17]。Nb₃Sn-I-Nb 試験片を用いた同様の実験でも B_v の向上が確認された。これらは、試験片を用いた積層薄膜の原理実証の成功を意味しており、残された課題は、空洞を用いた実験で理論を確かめることである。

試験片の実験と並行して、3GHz 小型空洞の製作を進めた[18]。空洞形状は Jlab で設計されたものを使うことにし、プレス金型とトリム治具は Jlab から借りることで計画を迅速かつ低予算で進められるようにした。9 つの銅空洞と 9 つの Nb 空洞を製作した。Nb 空洞のうち 7 つはフランジ部が NbTi であり、残り 2 つはフランジ部が低 RRR の Nb で作られている。2 つの銅空洞と 3 つの NbTi フランジ型 Nb 空洞を Jlab に送り、銅空洞は内面処理として機械研磨を行い、Nb 空洞は内面処理として電解研磨を行った。また、CEA Paris-Saclay が Atomic Layer Deposition(ALD)法による成膜の研究を行っているため、共同研究を行うこととし、銅空洞と Nb 空洞を各 1 つずつ送った。また銅空洞の 1 つは ULVAC で成膜試験を行った。残る 5 つ銅空洞の内の 2 つはクーボン空洞を製作し、クーボン装着して成膜実験を行った。最後の 3 つの銅空洞は、実際に Nb 膜を成膜して性能測定を行う予定である。また NbTi フランジ型 Nb 空洞のうちの 1 つは溶接に失敗したため、治具設計等に利用することにした。残る 2 つの NbTi フランジ型 Nb 空洞は、KEK で構築中の性能測定用セットアップのフィティングに使用しており、やがて KEK にて内面処理と性能測定を行い、さらに成膜と性能測定も行う予定である。そして残る 2 つの Nb フランジ型 Nb 空洞は内面に Nb₃Sn を成膜するためのものであり、Nb₃Sn を空洞内面に成膜するためのパラメータ探索の後に Nb₃Sn 膜を成膜して性能測定を行う予定である。

これらの実験研究と並行して理論研究も進めることが出来た。1 つは表面抵抗の研究である

[19,20,21]. 表面抵抗は一般に電磁場強度の関数である（非線形表面抵抗）。我々はBCS理論に基づき非線形表面抵抗の理論を構築した。もしも電磁場強度とともに急激に表面抵抗が悪化するようであれば、大きな加速電場への到達は難しくなるが、幸い、積層薄膜構造では背後にあるバルクNbの存在により最表面の超伝導層を流れる電流密度が抑えられることで、電磁場強度が増した際の表面抵抗の悪化が抑えられることが明らかになった[20]。もう一つは、過熱磁場 B_{sh} の研究である[22,23]。既存の積層薄膜理論[3,4]は、不純物が少ない場合（clean limit）に正確であるが、不純物の増加とともに理論は正確さを失っていく。しかし、現実の積層薄膜ではむしろ不純物が多く、そのため多くの不純物を含む場合（dirty limit）に適用可能な積層薄膜理論が必要とされていた。そこで、BCS理論に基づき、dirty limitの積層薄膜の B_{sh} を計算し、最適膜厚を求めた。その結果、dirty limitであっても、既存の理論を外挿して用いた場合と10%程度の違いしかなく、定性的には既存の理論で最適膜厚が求まることが明らかになった[23]。

試験片を用いた原理実証の成功、マイクロな理論に基づく理論の精緻化など、本計画により実験・理論ともに非常に大きな進展があった。しかしながら、2020年、COVID-19のパンデミックの影響で、国内外における多くの実験が止まってしまった。特に、米国Jlabでの空洞内面への成膜及び3GHz空洞の性能測定は実施の目途が立たなくなった。その結果、最終年度(2020年度)中の空洞を用いた原理実証という当初の目標は達成出来なかった。

<引用文献>

- [1] A. Gurevich, Enhancement of rf breakdown field of superconductors by multilayer coating, *Applied Physics Letters* **88**, 012511 (2006).
- [2] T. Kubo, Y. Iwashita, and T. Saeki, Radio-frequency electromagnetic field and vortex penetration in multilayered superconductors, *Applied Physics Letters* **104**, 032603 (2014).
- [3] A. Gurevich, Maximum screening fields of superconducting multilayer structures, *AIP Advances* **5**, 017112 (2015).
- [4] T. Kubo, Multilayer coating for higher accelerating fields in superconducting radio-frequency cavities: a review of theoretical aspects, *Superconductor Science and Technology*, **30**, 023001 (2017).
- [5] V. Palmieri et al., Atmospheric surface treatments for improving the Q-value of 6GHz niobium cavities, in *Proceedings of SRF2011, Chicago, IL USA (2011)*, TU10A01.
- [6] R. Ito et al., Development of coating technique for superconducting multilayered structure, in *proceedings of IPAC2018, Vancouver, BC, Canada (2018)*, p. 4954.
- [7] R. Ito et al., Construction of thin-film coating system toward the realization of superconducting multilayered structure, in *proceedings of LINAC2018, Beijing, China (2018)*, p. 445.
- [8] R. Ito et al., Nb₃Sn Thin film coating method for superconducting multilayered structure, in *proceedings of SRF2019, Dresden, Germany (2019)*, p. 628.
- [9] Y. Iwashita et al., Measurement of thin film coating on superconductors, in *proceedings of IPAC2017, Copenhagen, Denmark (2017)*, p. 1043.
- [10] Y. Iwashita et al., R&D of thin film coating on superconductors, in *proceedings of SRF2017, Lanzhou, China (2017)*, p. 877.
- [11] H. Ito et al. Lower critical field measurement system of thin film superconductor in *proceedings of IPAC2018, Vancouver, BC, Canada (2018)*, p. 3882.
- [12] H. Ito, H. Hayano, T. Kubo, and T. Saeki, Vortex penetration field measurement system based on third-harmonic method for superconducting RF materials, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **955**, 163284 (2020).
- [13] R. Katayama et al., Evaluation of superconducting characteristics on the thin-film structure by NbN and insulator coating on pure Nb substrate, in *proceedings of IPAC2018, Vancouver, BC, Canada (2018)*, p. 3653.
- [14] R. Katayama et al., Precise evaluation of characteristic of the multilayer thin-film superconductor consisting of NbN and insulator on pure Nb substrate, in *proceedings of LINAC2018, Beijing, China (2018)*, p. 391.
- [15] R. Katayama et al., Evaluation of the superconducting characteristics of multi-layer thin-film structures of NbN and SiO₂ on pure Nb substrate, in *proceedings of SRF2019, Dresden, Germany (2019)*, p. 807.
- [16] H. Ito et al., Lower critical field measurement of thin film superconductor, in *proceedings of LINAC2018, Beijing, China (2018)*, p. 484.
- [17] H. Ito et al., Lower critical field measurement of NbN multilayer thin film superconductor at KEK, in *proceedings of SRF2019, Dresden, Germany (2019)*, p. 632.

- [18] T. Saeki et al., Fabrication of 3.0-ghz single-cell cavities for thin-film study, in proceedings of SRF2019, Dresden, Germany (2019), p. 177.
- [19] A. Gurevich and T. Kubo, Surface impedance and optimum surface resistance of a superconductor with an imperfect surface, *Physical Review B* **96**, 184515 (2017).
- [20] T. Kubo and A. Gurevich, Field-dependent nonlinear surface resistance and its optimization by surface nanostructuring in superconductors, *Physical Review B* **100**, 064522 (2019).
- [21] T. Kubo, Weak-field dissipative conductivity of a dirty superconductor with Dynes subgap states under a dc bias current up to the depairing current density, *Physical Review Research* **2**, 013302 (2020).
- [22] T. Kubo, Superfluid flow in disordered superconductors with Dynes pair-breaking scattering: Depairing current, kinetic inductance, and superheating field, *Physical Review Research* **2**, 033203 (2020).
- [23] T. Kubo, Superheating fields of semi-infinite superconductors and layered superconductors in the diffusive limit: structural optimization based on the microscopic theory, *Superconductor Science and Technology* **34**, 045006 (2021).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計18件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 10件 / うちオープンアクセス 15件）

1. 著者名 Takayuki Kubo and Alex Gurevich	4. 巻 100
2. 論文標題 Field-dependent nonlinear surface resistance and its optimization by surfacenanstructuring in superconductors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 64522
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.064522	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 該当する
1. 著者名 Takayuki Kubo	4. 巻 58
2. 論文標題 Optimum multilayer coating of superconducting particle accelerator cavities and effects of thickness dependent material properties of thin films	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 88001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab2f0a	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 Takayuki Kubo	4. 巻 2
2. 論文標題 Weak-field dissipative conductivity of a dirty superconductor with Dynes subgap states under a dc bias current up to the depairing current density	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 13302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.013302	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 Hayato Ito, Hitoshi Hayano, Takayuki Kubo, and Takayuki Saeki	4. 巻 955
2. 論文標題 Vortex penetration field measurement system based on third-harmonic method for superconducting RF materials	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 163284
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2019.163284	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 H. Ito, H. Hayano, T. Kubo, T. Saeki, R. Katayama, Y. Iwashita, H. Tongu, R. Ito, T. Nagata, C. Z. Antoine	4. 巻 -
2. 論文標題 Lower Critical Field Measurement of NbN Multilayer Thin Film Superconductor at KEK	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of SRF2019	6. 最初と最後の頁 634, 638
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18429/JACoW-SRF2019-TUP078	査読の有無 無
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 該当する

1. 著者名 T. Saeki, H. Hayano, T. Kubo, H. Inoue, R. Katayama, F. E. Hannon, R. Rimmer, A.-M. Valente-Feliciano, Y. Iwashita, H. Tongu, H. Ito	4. 巻 -
2. 論文標題 Fabrication of 3.0-GHz Single-cell Cavities for Thin-film Study	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of SRF2019	6. 最初と最後の頁 177, 181
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18429/JACoW-SRF2019-MOP054	査読の有無 無
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 該当する

1. 著者名 R. Ito, T. Nagata, H. Hayano, R. Katayama, T. Kubo, T. Saeki, Y. Iwashita, H. Ito	4. 巻 -
2. 論文標題 Nb3Sn Thin Film Coating Method for Superconducting Multilayered Structure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of SRF2019	6. 最初と最後の頁 630, 633
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18429/JACoW-SRF2019-TUP077	査読の有無 無
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 該当する

1. 著者名 R. Katayama, H. Hayano, T. Kubo, T. Saeki, C.Z. Antoine, H. Ito, R. Ito, Y. Iwashita, H. Tongu, T. Nagata	4. 巻 -
2. 論文標題 Evaluation of the Superconducting Characteristics of Multi-Layer Thin-Film Structures of NbN and SiO ₂ on Pure Nb Substrate	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of SRF2019	6. 最初と最後の頁 809, 811
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18429/JACoW-SRF2019-THFUA2	査読の有無 無
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 該当する

1. 著者名 R. Katayama, Y. Iwashita, H. Tongu, C.Z. Antoine, A. Four, H. Hayano, T. Kubo, T. Saeki, H. Ito, R. Ito, T. Nagata, H. Oikawa	4. 巻 -
2. 論文標題 Evaluation of superconducting characteristics on the thin-film structure by NbN and Insulator coatings on pure Nb substrate	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of 9th International Particle Accelerator Conference	6. 最初と最後の頁 3653, 3655
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18429/JACoW-IPAC2018-THPAL015	査読の有無 無
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 該当する

1. 著者名 H. Ito, C. Z. Antoine, A. Four, H. Hayano, T. Kubo, T. Saeki, R. Ito, T. Nagata, Y. Iwashita, R. Katayama, H. Tongu, H. Oikawa	4. 巻 -
2. 論文標題 Lower Critical Field Measurement System of Thin Film Superconductor	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of 9th International Particle Accelerator Conference	6. 最初と最後の頁 3882, 3884
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18429/JACoW-IPAC2018-THPAL105	査読の有無 無
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 該当する

1. 著者名 R. Ito, T. Nagata, H. Hayano, T. Kubo, T. Saeki, H. Ito, Y. Iwashita, R. Katayama, H. Oikawa	4. 巻 -
2. 論文標題 Development of Coating Technique for Superconducting Multilayered Structure	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of 9th International Particle Accelerator Conference	6. 最初と最後の頁 4954, 4956
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18429/JACoW-IPAC2018-THPML120	査読の有無 無
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 R. Katayama, Y. Iwashita, H. Tongu, C. Z. Antoine, A. Four, H. Hayano, T. Kubo, T. Saeki, H. Ito, R. Ito, T. Nagata, H. Oikawa	4. 巻 -
2. 論文標題 Precise Evaluation of Characteristic of the Multi-layer Thin-film Superconductor Consisting of NbN and Insulator on Pure Nb Substrate	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of 29th Linear Accelerator Conference	6. 最初と最後の頁 391, 394
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18429/JACoW-LINAC2018-TUP0030	査読の有無 無
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 該当する

1. 著者名 H. Ito, C.Z. Antoine, A. Four, H. Hayano, T. Kubo, T. Saeki, R. Ito, T. Nagata, Y. Iwashita, R. Katayama, H. Tongu, H. Oikawa	4. 巻 -
2. 論文標題 Lower Critical Field Measurement of Thin Film Superconductor	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of 29th Linear Accelerator Conference	6. 最初と最後の頁 484, 487
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18429/JACoW-LINAC2018-TUP0066	査読の有無 無
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 該当する

1. 著者名 R. Ito, T. Nagata, H. Hayano, T. Kubo, T. Saeki, H. Ito, Y. Iwashita, R. Katayama, H. Oikawa	4. 巻 -
2. 論文標題 Construction of Thin-film Coating System Toward the Realization of Superconducting Multilayered Structure	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of 29th Linear Accelerator Conference	6. 最初と最後の頁 445, 447
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18429/JACoW-LINAC2018-TUP0050	査読の有無 無
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 KUBO Takayuki	4. 巻 54
2. 論文標題 Physics and Challenges of Superconducting Cavities for Particle Accelerators and Theoretical Implication towards Higher Performance:	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 TEION KOGAKU (Journal of Cryogenics and Superconductivity Society of Japan)	6. 最初と最後の頁 275 ~ 282
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2221/jcsj.54.275	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 Alex Gurevich and Takayuki Kubo	4. 巻 96
2. 論文標題 Surface impedance and optimum surface resistance of a superconductor with an imperfect surface	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 184515
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.96.184515	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 該当する

1. 著者名 Kubo Takayuki	4. 巻 2
2. 論文標題 Superfluid flow in disordered superconductors with Dynes pair-breaking scattering: Depairing current, kinetic inductance, and superheating field	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 33203
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevresearch.2.033203	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 Kubo Takayuki	4. 巻 34
2. 論文標題 Superheating fields of semi-infinite superconductors and layered superconductors in the diffusive limit: structural optimization based on the microscopic theory	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Superconductor Science and Technology	6. 最初と最後の頁 45006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6668/abdedd	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25件 (うち招待講演 11件 / うち国際学会 18件)

1. 発表者名 Takayuki Kubo
2. 発表標題 Theory of field-dependent dissipative nonlinear conductivity in superconducting resonators
3. 学会等名 10th ACASC / 2nd Asian-ICMC / CSSJ Joint Conference, Okinawa Convention Center (Okinawa) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takayuki Kubo and Alex Gurevich
2. 発表標題 Field-Dependent Nonlinear Surface Resistance and Its Optimization by Surface Nano-Structuring of the SRF Cavities
3. 学会等名 SRF2019, Dresden (Germany) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 H. Ito, H. Hayano, T. Kubo, T. Saeki, R. Katayama, Y. Iwashita, H. Tongu, R. Ito, T. Nagata, C. Z. Antoine
2 . 発表標題 Lower Critical Field Measurement of NbN Multilayer Thin Film Superconductor at KEK
3 . 学会等名 SRF2019, Dresden (Germany) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Saeki, H. Hayano, T. Kubo, H. Inoue, R. Katayama, F. E. Hannon, R. Rimmer, A.-M. Valente-Feliciano, Y. Iwashita, H. Tongu, H. Ito
2 . 発表標題 Fabrication of 3.0-GHz Single-cell Cavities for Thin-film Study
3 . 学会等名 SRF2019, Dresden (Germany) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 R. Ito, T. Nagata, H. Hayano, R. Katayama, T. Kubo, T. Saeki, Y. Iwashita, H. Ito
2 . 発表標題 Nb3Sn Thin Film Coating Method for Superconducting Multilayered Structure
3 . 学会等名 SRF2019, Dresden (Germany) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 R. Katayama, H. Hayano, T. Kubo, T. Saeki, C.Z. Antoine, H. Ito, R. Ito, Y. Iwashita, H. Tongu, T. Nagata
2 . 発表標題 Evaluation of the Superconducting Characteristics of Multi-Layer Thin-Film Structures of NbN and SiO ₂ on Pure Nb Substrate
3 . 学会等名 SRF2019, Dresden (Germany) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Katayama
2. 発表標題 Evaluation of superconducting characteristics on the thin-film structure by NbN and Insulator coatings on pure Nb substrate
3. 学会等名 The 9th International Particle Accelerator Conference, Vancouver (Canada) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Ito
2. 発表標題 Lower Critical Field Measurement System of Thin Film Superconductor
3. 学会等名 The 9th International Particle Accelerator Conference, Vancouver (Canada) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 R. Ito
2. 発表標題 Development of Coating Technique for Superconducting Multilayered Structure
3. 学会等名 The 9th International Particle Accelerator Conference, Vancouver (Canada) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 R. Katayama
2. 発表標題 Precise Evaluation of Characteristic of the Multi-layer Thin-film Superconductor Consisting of NbN and Insulator on Pure Nb Substrate
3. 学会等名 The 29th Linear Accelerator Conference, Beijing (China) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Ito
2. 発表標題 Lower Critical Field Measurement of Thin Film Superconductor
3. 学会等名 The 29th Linear Accelerator Conference, Beijing (China) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 R. Ito
2. 発表標題 Construction of Thin-film Coating System Toward the Realization of Superconducting Multilayered Structure
3. 学会等名 The 29th Linear Accelerator Conference, Beijing (China) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Kubo
2. 発表標題 A theory of field-dependent surface resistance and possibilities of engineering optimal SN and SIS surface nano-structuring of the SRF cavities
3. 学会等名 The 8th International Workshop on Thin Films and New Ideas for Pushing the Limits of RF Superconductivity, the Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Padova (Italy) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Kubo
2. 発表標題 Field-dependent nonlinear surface resistance and its optimization by surface nano-structuring of the SRF cavities
3. 学会等名 The 19th International Conference on RF Superconductivity, Dresden (Germany) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takayuki Kubo
2. 発表標題 A unified theory of surface resistance and the residual resistance of SRF cavities at low temperatures
3. 学会等名 the 18th International Conference on RF Superconductivity, SRF2017, Lanzhou (China) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takayuki Kubo
2. 発表標題 Surface impedance and optimum surface resistance of a superconductor with an imperfect surface
3. 学会等名 TESLA Technology Collaboration (TTC) Topical Workshop, Batavia, Illinois (USA) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takayuki Kubo
2. 発表標題 Physics of superconducting cavity: towards realization of high-Q and high gradient
3. 学会等名 第14回日本加速器学会年会, 北海道大学クラーク会館 (北海道・札幌) (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takayuki Kubo
2. 発表標題 超伝導加速空洞の理論研究
3. 学会等名 第76回日本物理学会年次大会 (オンライン) (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takayuki Kubo
2. 発表標題 超伝導加速空洞の高加速勾配・高Q値化のための理論的基礎
3. 学会等名 第17回加速器学会年会（オンライン）（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takayuki Kubo
2. 発表標題 粒子加速器のための超伝導共振空洞の高Q値化:空洞表面処理技術と理論研究の現状
3. 学会等名 超伝導エレクトロニクス研究会（オンライン）（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takayuki Kubo
2. 発表標題 ILCが切り拓く加速器新技術
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会（オンライン）（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takayuki Kubo
2. 発表標題 BCS超伝導体の非線形表面抵抗のミクロな理論
3. 学会等名 第99回低温工学・超電導学会研究発表会（オンライン）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takayuki Kubo
2. 発表標題 超伝導体の複素伝導率・対破壊電流・非線形力学インダクタンスのミクロな理論及びサブギャップ状態密度の影響
3. 学会等名 第100回低温工学・超電導学会研究発表会（オンライン）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takayuki Saeki
2. 発表標題 Overview of thin-film studies at KEK and Kyoto University.
3. 学会等名 9th International Workshop on Thin Films and New Ideas for Pushing the Limits of RF superconductivity (Virtual) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takayuki Saeki
2. 発表標題 Development of 3 Ghz cavities at KEK
3. 学会等名 9th International Workshop on Thin Films and New Ideas for Pushing the Limits of RF superconductivity (Virtual) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

researchmap https://researchmap.jp/kubotaka/
--

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
研究協力者	井藤 隼人 (Ito Hayato)		
研究協力者	伊藤 亮平 (Ito Ryohei)		
研究協力者	片山 領 (Katayama Ryo)		
研究協力者	岩下 芳久 (Iwashita Yoshihisa)		
研究協力者	佐伯 学行 (Saeki Takayuki)		
研究協力者	早野 仁司 (Hayano Hitoshi)		
研究協力者	頓宮 拓 (Tongu Hiromu)		
研究協力者	永田 智啓 (Nagata Tomohiro)		

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			
フランス	CEA Paris-Saclay	CEA irfu		
米国	Old Dominion University	Jefferson Lab		