

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19H04395

研究課題名（和文）人工薄膜構造導入による次世代超伝導加速空洞開発の新展開

研究課題名（英文）New phase of the study for the next-generation SRF cavity by introducing the artificial thin-film structure

研究代表者

片山 領（Ryo, Katayama）

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：60806959

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,100,000 円

研究成果の概要（和文）：理論による磁束侵入開始磁場の計算結果と、実際に製作した様々な厚みの超伝導層を持つ積層薄膜試料の磁束侵入開始磁場測定の結果の比較を行い、理論の予言通り実験結果に最適膜厚が存在することを示し、その膜厚依存性が理論曲線と良い一致を示した。また、円盤ニオブの電解研磨処理技術の開発、空洞の成膜研究に使用するの 3 GHz 空洞とそのクーポン空洞の製作、スパイラルコイルによるロンドン長の測定装置、四つのコイルによる磁束侵入開始磁場の測定装置の開発を進めた。また、KEK-CO1 棟に 3 GHz 空洞の性能評価のためのたて型電界性能評価試験設備を構築し、表面抵抗の測定が実現された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

理論値と実験値の良い一致が得られたことは、積層薄膜構造の導入による性能向上を技術的に制御できる可能性を示す初の例であり、学術的意義は高い。3 GHz 空洞の表面抵抗の測定は、1.3 GHz と異なる周波数の楕円空洞の性能評価が行われた日本初の例である。クーポン空洞の製作と四つのコイルによる磁束侵入開始磁場の測定装置の開発は 3 GHz 空洞の内面状態を評価する上で有用であり、ロンドン長の測定装置は今後の理論検証をより精密に行う上で有用であり、円盤ニオブ電解研磨処理技術は平板の積層薄膜試料の性能評価に必須である。いずれも今後の研究を遂行する上で意義がある。

研究成果の概要（英文）：We compared the vortex penetration field (the effective H_{c1}) into the surface of NbN/SiO₂/Nb structure predicted by theory with that evaluated by the experiment using the third harmonic voltage method. Experiment results showed that the optimum film thickness existed as predicted by theory, and its thickness dependence was in good agreement with the theoretical curve. We also developed an electropolishing technique for niobium disks, fabricated a 3 GHz cavity and its coupon cavity for use in cavity deposition studies, developed a device for measuring the London penetration depth, and developed a device for measuring the vortex penetration field using four coils. In addition, the dedicated vertical test facility was constructed in the KEK-CO1 building to evaluate the performance of the 3 GHz cavity, and the measurement of the surface resistance of the 3 GHz cavity was performed.

研究分野：超伝導加速空洞

キーワード：積層薄膜 超伝導加速空洞

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現代の粒子加速器において使用される機器として超伝導加速空洞 (以下、SRF 空洞)がある。空洞内部に共鳴数波数の電磁波を蓄積し、その電場成分を用いて荷電粒子を加速する。空洞の性能は加速勾配と表面抵抗で指標される。SRF 空洞はほとんどがバルクのニオブ製であり、その表面抵抗の値は通常の銅製の常伝導空洞と比べて 100 万分の 1 程度まで低減される。また、SRF 空洞の最大加速勾配は、空洞内の表面磁場が物性で決まる上限に達した時点で発生する磁束の侵入に起因した超伝導破壊現象によって決まっており、ニオブ製空洞の場合の最大加速勾配は経験的に 35-45 MV/m である ($T = 2 \text{ K}$, $f=1.3 \text{ GHz}$ 、9 セル TESLA 空洞の場合)。以降、この表面磁場の強さを磁束侵入開始磁場と呼ぶ。このように、ニオブ製 SRF 空洞を用いることで荷電粒子を極めて効率よく加速できるが、その表面抵抗と最大加速勾配は主にニオブの物性で決まっており、これ以上の性能改善は大きくは望めない。ニオブ製超伝導加速空洞を超える次世代超伝導加速空洞の技術開発に対する期待が高まっている。

近年の理論研究の成果は、数 10-100 nm の超伝導層と数 1-10 nm の絶縁層からなる積層薄膜構造の導入によって SRF 空洞の性能を大幅に向上できる可能性を示唆している [1]。以降、この理論的枠組みを積層薄膜理論と呼ぶ。2013 年、申請者のメンバーである久保、岩下、佐伯は、純バルク Nb 上に絶縁膜と超伝導膜を 1 枚ずつ積層した系を仮定した理論計算を行い、各層の厚みに超伝導性能を最大化できる最適値が存在することを示した [2]。理論は、空洞内面に高い臨界温度を持つ Nb_3Sn を実装した場合、100 MV/m 以上の最大加速勾配の実現と表面抵抗の大幅な低減を予言する。また、より実装が容易と考えられる $\text{NbN}/\text{SiO}_2/\text{Nb}$ の膜構造について、久保の理論は、バルクニオブと比較して磁束侵入開始磁場を 22 % 向上できると予言していた。このような中、2018 年、我々のグループは DC マグネトロンスパッタ法を用いて生成した $\text{NbN}/\text{SiO}_2/\text{Nb}$ 構造を持つ積層薄膜試料の超伝導特性を第三高調波電圧誘導法を用いて評価することにより、磁束侵入開始磁場が実際に 17 % 向上していることを確認し、世界に先駆けてその実現可能性を実証することに成功していた [3]。

2. 研究の目的

本研究では、生成した薄膜試料を理論予想と比較する新しい研究手法を用い、最終的に空洞内部に最適な薄膜構造を実装することを目指した実験的研究を推進することにより、次世代超伝導加速空洞開発の基礎を構築することを目指す。本研究で検証の対象とする理論としては、“積層薄膜理論”に加えて、理論 [4] も対象とする。

3. 研究の方法

[ロンドン長の測定と積層薄膜理論の検証]

図 1 に積層薄膜理論が予言する膜厚依存性を示す。横軸が絶縁層の膜厚、縦軸が超伝導層の膜厚、図中の数字が磁束侵入開始磁場の値である。この膜厚依存性を実測値と比べることで積層薄膜理論を検証できる。申請者らは、上層の超伝導膜と下層のニオブ基板を流れる遮蔽電流が量子化磁束に及ぼす影響を考慮した厳密な理論計算を行い、磁束侵入開始磁場に膜厚依存性があることを示している。一般に、超伝導体を流れる遮蔽電流はロンドン長程度の広がりを持つ。上層と下層の超伝導層を流れる遮蔽電流は の値に応じて混合するため、理論計算の結果は の影響を受ける。そこで、本研究において人工膜の を実測してこの不定性を排除したより精密な理論検証を実現する。ロンドン長 を評価するため論文 [5] もしくは論文 [6] に基づく手法を用いる。本研究では磁束侵入開始磁場の評価方法として、(1) 研究代表者が得意とする第三高調波電圧誘導法による kHz 磁場による評価 (2) スタンフォード線形加速器センター (SLAC) 等の研究所が保有する半球形空洞による RF 磁場による評価、の二つを想定している。いずれも平板サンプルを用いての測定が可能である。ここで、半球形空洞は実際の空洞と同じ GHz 帯の磁場を用いたサンプルの超伝導特性の評価を可能とし、従来の kHz 帯の磁場の第三高調波実験と将来の空洞実験との中間に位置づけられる。ただし、その測定

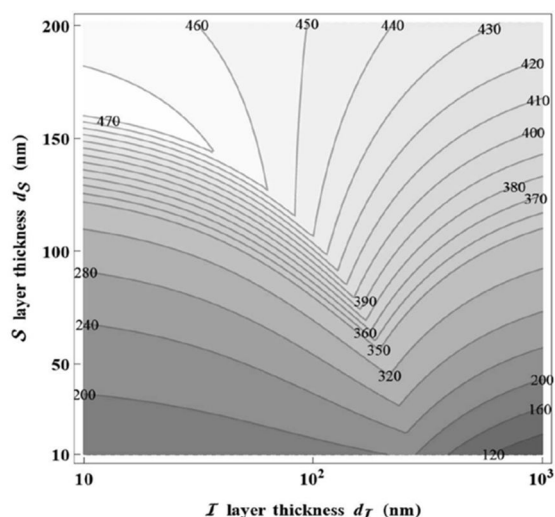


図 1: Nb_3Sn を用いた場合の磁束侵入開始磁場

する第三高調波電圧誘導法による kHz 磁場による評価 (2) スタンフォード線形加速器センター (SLAC) 等の研究所が保有する半球形空洞による RF 磁場による評価、の二つを想定している。いずれも平板サンプルを用いての測定が可能である。ここで、半球形空洞は実際の空洞と同じ GHz 帯の磁場を用いたサンプルの超伝導特性の評価を可能とし、従来の kHz 帯の磁場の第三高調波実験と将来の空洞実験との中間に位置づけられる。ただし、その測定

には 50.8 mm のニオブ円盤の用意が必要であり、そのようなニオブサンプルの表面処理方法の開発が必要となる。

[表面抵抗の測定] 長い SRF 空洞の研究の歴史において、表面抵抗の加速電場依存性（以下 Q-E 曲線）がどのように生じるかは謎であったが、最近提唱された理論によってこれを量的に説明できる可能性が示されている [4]。本理論は、これまで謎だった Q-E 曲線の物理を説明する枠組みとなり得る。理論的によく理解された人工薄膜サンプルや薄膜空洞によって実験的に検証できれば、理論に基づき表面物性を最適化して表面抵抗を有効に低減する事が可能となる。更に、本理論の検証は、最近発見された表面抵抗の周波数依存性の異常 [7] を理解するための基礎を築く。RF 電流で準粒子状態密度が激しく振動しているも、周期が準粒子の平衡状態への緩和時間より十分に長ければ準粒子は Fermi-Dirac 分布に従う。本理論ではこの状況を想定しているが、周波数が大きくなるにつれて準粒子分布は DOS の振動に追従できず、Fermi-Dirac 分布からずれ始めると考えられる（非平衡効果）。実験 [7] は、高い周波数ほど加速電場依存性が強く現れる傾向を示しており、非平衡効果との関係が疑われている。しかし DOS が激しく振動する状況下での非平衡効果は理論的扱いが分からない難題であり、現状、実験 [7] の結果を理論から直接理解する術は無い。そこで、この問題を理解する第一歩として、本研究では、人工薄膜を用いることで、様々な周波数の RF 電流下の薄膜構造が示す表面抵抗を実測し、本理論を検証する。具体的には、形状が 1 セルで共鳴周波数が 1.3 GHz 以上の SRF 空洞を用い、その表面抵抗を系統的に評価する。なお、我々は 2019 年の時点で既に 3 GHz の空洞の金型設計を保有していた。

4. 研究成果

[積層薄膜理論の実験的な検証]

本研究では、まず、久保が発案した解析手法 [8] を用いて の膜厚依存をも含めて計算した積層薄膜試料の磁束侵入開始磁場の理論計算を行った。実験手順として、まず、アルバックにおいて DC マグネトロンスパッタリングを用いて上層の NbN として 50 - 800 nm、中間層の SiO₂ として 30 nm を Nb 基板上に実装した積層薄膜試料 NbN/SiO₂/Nb を製作し、その磁束侵入開始磁場を片山が第三高調波電圧誘導法を用いて評価することにより、膜厚依存性のプロットを作成した。本解析では、様々な温度点で評価された磁束侵入開始磁場の温度依存性を Hc1 曲線でフィッティングすることにより、0 K における磁束侵入開始磁場を求めて理論値との比較が行われている（図 2）。理論曲線と実験結果の膜厚依存性の比較プロットを図 3 に示す。横軸が超伝導層の膜厚 ds、縦軸が磁束侵入開始磁場である。ここで、理論計算の値は、文献 [9] に基づき超伝導層の Hsh: Superheating Field を用いた数値計算によって求められる。はこの Hsh が表面荒さや表面欠陥の影響で 0 - 1 まで変化する比率を表している。理論は最適膜厚の存在を予言するが、実験結果は理論と同様、ds = 250 nm で最高値 223 mT が存在することを示した。そして、ds = 270 nm までは = 0.8 の理論曲線とよく一致しており、それ以降は = 0.8→1 の理論曲線に次第にシフトしていき、ds = 800 nm で理論曲線上に一致している。これは、膜厚の増大による膜質の変化と関わっていると考えられており、今後の性能向上を達成する上で重要な知見である。研究成果は SRF2019 の招待講演および第 16 回日本加速器学会年会で発表されている [10, 11]。

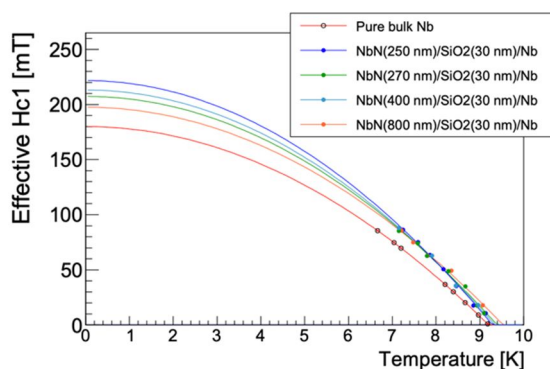


図 2: 磁束侵入開始磁場の温度依存性の Hc1 曲線によるフィッティング

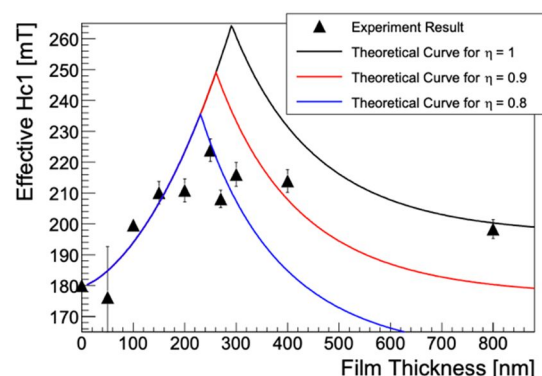


図 3: 磁束侵入開始磁場 (T=0 K) の膜厚依存性の実験値と理論曲線の比較プロット

また、2020 年には、米国のジェファーソンラボとの共同研究により、片山が第三高調波電圧誘導法を用いて先方で製作した NbTiN/AlN/Nb 試料の磁束侵入開始磁場の評価を行った。その結果、良好な超伝導特性を発揮できる部材であることを確認している。この結果は佐伯

が Thin-film workshop にて発表している[12]。

また、2019 年ごろ、SLAC の 11.4 GHz の半球形 cavity で我々の積層薄膜サンプルを評価する共同研究の可能性が検討されていた。前述の通り、SLAC の装置で測定するには 50.8 mm の円盤形状のサンプルを用意する必要がある。そこで、2019 年度から 2021 年度にかけて研究代表者の片山によって円盤形状のニオブサンプルの電解研磨処理を行える技術が開発されている。なお、2020 年中ごろにアルバックとの共同研究が終了した影響で成膜サンプルを用意できる段階まで至っておらず、RF 測定はまだ行われていない。関連する研究成果が第 18 回日本加速器学会年会で発表されている[13]。

また、研究分担者の岩下によって文献 [6] に基づく手法で を評価する測定装置の開発も進められた。本実験では試料の直上に設置する小型コイルの開発が極めて重要となる。そこで、プリント基盤に小型スパイラルコイルを内蔵した実験ユニットを開発した。現在、ネットワークアナライザを用いて実際に信号を検出できた段階まで来ている。ただし、信号から を求めるためにはコイル形状で決まる較正係数の導出が必要であるが、そのために必要な数値計算がまだ完了しておらず、この点は今後の課題となる。

[表面抵抗の測定]

本研究において、分担者の佐伯の手により成膜研究を進めるための 3 GHz 空洞およびそのクーポン空洞が製作されている。研究成果が 20th International Conference on RF Superconductivity (SRF2021) で発表されている[14]。

本研究では、はじめにこのように製作した手持ちの 3 GHz 空洞の表面抵抗を測定することを目指し、KEK-C01 棟にたて型電界性能評価試験設備を整備する作業を行いつつ、分担者の岩下によって測定中に発生する発熱と放射線をモニターするために必要な X-T Mapping System が開発された。そして、それを用いて研究分担者の不破の手により 3 GHz の純バルクニオブ製空洞の表面抵抗の測定が実現されている。研究成果は 31st International Linear Accelerator Conference 2022 (LINAC 2022)で発表されている[15]。その後、3 GHz 空洞のたて型電界性能評価試験設備をより高電界での試験が可能な KEK STF 棟に移設している。なお、研究当初目指していた成膜した空洞の高電界での試験はまだ行われておらず、この点は今後の課題となる。

また、2019 年、我々はアルバックとの共同研究を通じて DC マグネトロンスパッタリングを用いて 3 GHz 空洞の内部にニオブ薄膜を成膜できる装置を開発した。この装置は主に 3 GHz 空洞に対する DC スパッタを行う「成膜チャンバー」とアルゴンガスの流量を制御する「排気チャンバー」から構成される。アルバックは成膜チャンバーを開発し、それを系列企業の商用機と組み合わせて成膜試験を実施していた。その後、2020 年中頃にアルバックとの共同研究が終了したことにより、空洞内部の成膜が実施できない状況となった。そこで、研究計画の最終年度において、KEK 側がアルバックが保有していた成膜チャンバーを取得するとともに、KEK 機械工学センターと共同で排気チャンバーの設計・製作を行なっている。これにより、成膜装置における最も重要なコンポーネントが揃うこととなり、KEK で空洞内部への成膜試験を実施できる態勢を整えることができた。

また、本研究において複数の成膜サンプルの超伝導特性を同時に評価できる実験装置の開発を進めることができた[14]。一般に、成膜条件の最適化においては、様々な条件で成膜した超伝導薄膜サンプルの性能を比較する地道な作業が必要となる。本装置を開発できれば、一度に四つの超伝導薄膜サンプルの磁束侵入開始磁場と転移温度を第三高調波電圧誘導法を用いて評価できるようになり、成膜条件の最適化の工程に要する時間効率を飛躍的に向上できる。本研究では、まず 2021 年初旬までに分担者の岩下の手によって四つのコイルへの通電と第三高調波電圧信号の取得を行うことのできる制御用の電子ボードの開発、および、コイルに対する入力電圧を増幅するためのアンプの開発が行われている。2021 年 3 月には、京都大学化学研究所において実際に液体ヘリウムとニオブサンプルを用いた試験が行われ、動作確認に成功している。その後、研究代表者の片山の手により 2021 年 4 月から KEK C01 棟に実験系の再立ち上げが行われ、クライオスタットの調達やヘリウム回収ラインの設置などの準備が進められた。2022 年 6 月には実際にこのクライオスタットに対して液体ヘリウムを注入する冷却試験が実施され、結果が第 19 回日本加速器学会年會において報告されている[16]。

[理論研究の進展]

関連する課題において理論研究において以下の 3 つの面で進展があった。(1)膜厚に応じて超伝導薄膜の特性が変わる効果を考慮した場合の最適膜厚の再評価を行った[8] (2) BCS 理論に基づく計算により、非線形マイスナー効果の影響も含む最適膜厚の再評価も行った[17] (3) また、準粒子の状態密度の時間変化を考慮することで、積層薄膜構造における RF

強度に依存する表面抵抗の理論も得られた [4]。(1)に関しては、積層薄膜構造の磁束侵入開始磁場の依存性を計算する際に組み入れられている。本研究成果は論文や招待公演などで発表されている。

参考文献

- [1] A. Gurevich, “Enhancement of rf breakdown field of superconductors by multilayer coating”, *Appl. Phys. Lett.* 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] 片山領、岩下芳久 他, “第三高調波電圧誘導法を用いた多層膜試料の超伝導特性の評価”, *Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, WEOL04*
- [4] T. Kubo and A. Gurevich, “Field-dependent nonlinear surface resistance and its optimization by surface nanostructuring in superconductors”, *Physical Review B* **100**, 064522 (2019).
- [5] Yachin Ivry, Chung-Soo Kim, Andrew E. Dane, et al., “Universal scaling of the critical temperature for thin films near the superconducting-to-insulating transition”, *Phys. Rev. B* **90**, 214515
- [6] A. Gauzzi, et al., “Very high resolution measurement of the penetration depth of superconductors by a novel single-coil inductance technique”, *Review of Scientific Instruments* 71, 2147 (2000).
- [7] M. Martinello, S. Aderhold et al., “Field-Enhanced Superconductivity in High-Frequency Niobium Accelerating Cavities”, *Phys. Rev. Lett.* 121, 224801
- [8] Takayuki Kubo, “Optimum multilayer coating of superconducting particle accelerator cavities and effects of thickness dependent material properties of thin films”, *J. Appl. Phys.* 58 088001 (2019)
- [9] T.Kubo, “Multilayer coating for higher accelerating fields in superconducting radio-frequency cavities: a review of theoretical aspects”, *Supercond. Sci. Tech-nol.* 30, 023001 (2017)
- [10] Ryo.Katayama, T. Saeki, T.kubo, et al., “Evaluation of the Superconducting Characteristics of Multi-Layer Thin-Film Structures of NbN and SiO₂ on Pure Nb Substrate”, *SRF2019, Dresden, Germany* (2019), THFUA2, (招待講演)
- [11] 片山領 他, “第三高調波電圧誘導法を用いた多層薄膜試料の超伝導特性の膜厚依存性の評価”、第16回日本加速器学会年会, WEOL04
- [12] Takayuki Saeki, “Overview of thin-film studies at KEK and Kyoto University”, *9th International Workshop on Thin Films and New Ideas for Pushing the Limits of RF Superconductivity* (2021)
- [13] 片山領、佐伯学行, “円板ニオブサンプルに対する電解研磨処理のための基礎研究”、第18回日本加速器学会年会、THP036
- [14] Y. Iwashita, Y. Kuriyama, H. Tongu, Y. Fuwa, H. Hayano, H. Ito, R. Katayama, T. Kubo, T. Saeki, “Instrumentation R&D at KEK and Kyoto University”, *SRF2021, TUPFDV008*
- [15] Yasuhiro Fuwa, et al., “3 GHz SRF Cavity for Thin Film Superconducting Structure Test”, *LINAC2022*
- [16] 片山 領、佐伯 学行、早野 仁司 他, “KEK における超伝導特性評価のための第三高調波測定システムの開発”、第19回日本加速器学会年会、FPR037
- [17] 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9件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 Yasuhiro Fuwa, Hitoshi Hayano, Hayato Ito, Yoshihisa Iwashita, Ryo Katayama	4. 巻 1
2. 論文標題 Instrumentation R&D for the Studies of SRF Thin-Film Structures at KEK and Kyoto University	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 20th International Conference on RF Superconductivity	6. 最初と最後の頁 421-425
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18429/JACoW-SRF2021-TUPFDV008	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 Takayuki Kubo	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 34, 045006 (2021)	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 -

1. 著者名 Takayuki Kubo	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 2, 033203 (2020)	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 井藤 隼人, 早野 仁司, 久保 毅幸, 佐伯 学行, 片山 領, 岩下 芳久, 頓宮 拓, 伊藤 亮平, 永田 智啓	4. 巻 -
2. 論文標題 NbN積層薄膜構造に対する磁束侵入磁場測定	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan	6. 最初と最後の頁 541, 544
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 永田 智啓, 伊藤 亮平, 井藤 隼人, 早野 仁司, 久保 毅幸, 佐伯 学行, 片山 領, 岩下 芳久	4. 巻 -
2. 論文標題 S' IS構造による加速空洞の高性能化に向けたNb3Sn薄膜の成膜プロセス最適化	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan	6. 最初と最後の頁 747, 751
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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, 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/SiO2 on Pure Nb Substrate	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JACoW Publishing	6. 最初と最後の頁 807-809
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 Takayuki Kubo, Alex Gurevich	4. 巻 100
2. 論文標題 Field-dependent nonlinear surface resistance and its optimization by surface nanostructuring in superconductors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Rev. 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 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 R. Ito, T. Nagata, H. Hayano, R. Katayama, T. Kubo, T. Saeki, H. Ito, Y. Iwashita	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 JACoW Publishing	6. 最初と最後の頁 628-631
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 -

[学会発表] 計16件(うち招待講演 4件/うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Yasuhiro Fuwa
2. 発表標題 3 GHz SRF Cavity for Thin Film Superconducting Structure Test
3. 学会等名 31st International Linear Accelerator Conference 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 片山領
2. 発表標題 KEK における超伝導特性評価のための第三高調波測定システムの開発
3. 学会等名 第19回日本加速器学会年会 (PASJ2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoshihisa Iwashita
2. 発表標題 Instrumentation R&D for the Studies of SRF Thin-Film Structures at KEK and Kyoto University
3. 学会等名 2021 International Conference on RF Superconductivity (SRF'21) (国際学会)
4. 発表年 2021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 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井藤 隼人
2. 発表標題 NbN積層薄膜構造に対する磁束侵入磁場測定
3. 学会等名 第17回日本加速器学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐伯 学行
2. 発表標題 薄膜研究のための3.0-GHz Nb 単セル空洞の製造
3. 学会等名 第17回日本加速器学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 永田 智啓
2. 発表標題 S' IS構造による加速空洞の高性能化に向けたNb3Sn薄膜の成膜プロセス最適化
3. 学会等名 第17回日本加速器学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 久保 毅幸
2. 発表標題 超伝導加速空洞の理論研究
3. 学会等名 第15回 日本物理学会 若手奨励賞 (March 13, 2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 久保 毅幸
2. 発表標題 超伝導加速空洞の高加 速勾配・高Q値化に繋がる理論的基礎の構築
3. 学会等名 第16回 日本加速器学会 奨励賞 (June 24, 2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 久保 毅幸
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 (Sep. 15, 2020) (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 久保 毅幸
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 (Nov. 25, 2020) (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 片山 領
2. 発表標題 Evaluation of the Superconducting Characteristics of Multi Layer Thin Film Structures of NbN/SiO ₂ on Pure Nb Substrate
3. 学会等名 The 19th International Conference on RF Superconductivity (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久保 毅幸
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 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤 亮平
2. 発表標題 Nb ₃ Sn Thin Film Coating Method for Superconducting Multilayered Structure
3. 学会等名 The 19th International Conference on RF Superconductivity (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐伯 学行
2. 発表標題 Fabrication of 3.0-GHz Single-cell Cavities for Thin-film Study
3. 学会等名 The 19th International Conference on RF Superconductivity (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 片山領
2. 発表標題 第三高調波電圧誘導法を用いた多層薄膜試料の超伝導特性の膜厚依存性の評価
3. 学会等名 第16回日本加速器学会
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	岩下 芳久 (Iwashita Yoshihisa) (00144387)	京都大学・複合原子力科学研究所・特任准教授 (14301)	
研究分担者	不破 康裕 (Fuwa Yasuhiro) (00817356)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 J-PARCセンター・研究職 (82110)	
研究分担者	佐伯 学行 (Saeki Takayuki) (70282506)	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・准教授 (82118)	
研究分担者	久保 毅幸 (Kubo Takayuki) (30712666)	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)	

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
---------	---------