

薄膜超伝導体の高周波臨界磁場評価のためのニオブ製 マッシュルーム型空洞の設計研究

DESIGN STUDY OF NIOBIUM MUSHROOM-SHAPED CAVITY FOR EVALUATING RF CRITICAL MAGNETIC FIELD OF THIN-FILM SUPERCONDUCTOR

及川大基^{#,A)}, 東口武史^{A)}, 岩下芳久^{B)}, 日野正裕^{B)}, 加藤茂樹^{C)}, 久保毅幸^{C)}, 佐伯学行^{C)}, 早野仁司^{C)}
Hiroki Oikawa^{#,A)}, Takeshi Higashiguchi^{A)}, Yoshihisa Iwashita^{B)}, Masahiro Hino^{B)}, Shigeki Kato^{C)}, Takayuki Kubo^{C)}
Takayuki Saeki^{C)}, Hitoshi Hayano^{C)}

^{A)} Utsunomiya University

^{B)} Kyoto University

^{C)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

According to the Technical Design Report (TDR) of International Linear Collider (ILC), the higher gradient of 45 MV/m is required in the second stage of ILC. One of such methods is coating multi-layer thin-film superconductor on the inner surface of RF superconducting cavity. The thin film improves the RF critical magnetic field on the inner surface of the cavity. To establish the RF performance of thin-film structure on a small coupon sample, we designed the RF mushroom-shaped cavity which could measure the RF critical magnetic field on a thin-film coupon sample set on the inner surface of the cavity. If the RF cavity is cooled down below the critical temperature of thin-film superconductor with supplying RF power, the heat dissipation might be measured on the coupon sample in the cavity. The shape of the cavity is necessary to produce a strong RF magnetic field parallel to the sample surface efficiently. The design, manufacturing and RF property of the mushroom-shaped cavity are described in this presentation.

1. はじめに

国際リニアコライダー:International Linear Collider (ILC)は、TESLA型超伝導加速空洞を使用する重心系衝突エネルギー500GeVの電子陽電子コライダーである。そこでは電界試験において35MV/m \pm 20%以上の性能の空洞をクライオモジュールに装着し、平均31.5MV/m \pm 20%の加速勾配で運転する計画である。使用する空洞数は、主リニアックだけで15000台近くとなる。

ILCの第二期計画である重心系衝突エネルギー1TeVへのアップグレードは、500GeV(250GeV電子リニアック+250GeV陽電子リニアック)の両外側へリニアックを追加延長して行う計画である。その時にはそれまでのリニアックはそのまま使用し、新たな追加するリニアックにおいて、より高い加速勾配の空洞が要求されており、現在、それに向けた開発が行われている。

超伝導薄膜を応用した高電界化は2006年にグレビッチにより提案された[1]。その超伝導薄膜の研究は現在Saclay, SLAC, ANL, Cornell大学, JLAB, FNALなどで行われている。日本では先行研究として光延らによる銅空洞へのMgB₂の成膜がある[2]。我々の研究グループでは、高い加速勾配を実現するために高い臨界磁場をもつNb₃Sn, NbN, MgB₂などの超伝導薄膜をNb単板サンプル上に成膜されたものを測定・評価する計画である。成膜方法はどのような曲面でも一様にnmオーダーで厚みを制御して成膜できるALD(原子層堆積法)を用いる。その後、多層薄膜サンプルを極低温ま

で冷却し小型コイルによる数kHzの周波数における下部臨界磁場、RF空洞を用いたRF周波数域のsuper heating臨界磁場を測定し、薄膜の製造方法や性能評価を行っていく。

グレビッチにより、適切な膜厚の超伝導薄膜・インシュレータ層をバルクの超伝導体に多層に成膜することで、全体としての見かけのRF臨界磁場(super heating磁場)を上げることができるという理論が示されている[1](図1)。薄膜の利点は、空洞に応用することで空洞内部の見かけ上の臨界磁場を上げることができる点である。それにより入力パワーを増やす事ができ、結果高加速勾配が達成できると考えられる。

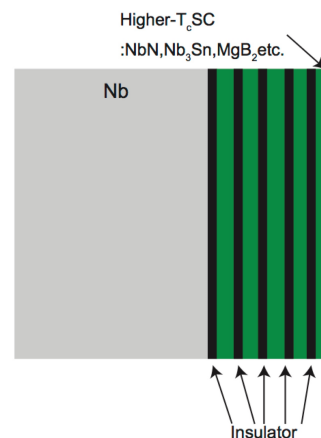


Figure 1: Concept of multi-layer thin-film superconductor on Nb cavity.

[#] oikawah@post.kek.jp

成膜する材質は Nb に比べ転移温度が高く、RF 臨界磁場が大きい素材を選ぶ必要がある。現時点での候補の材料は Nb₃Sn、NbN、MgB₂ であり、Nb より転移温度が高く、上部臨界磁場が高い。厳密には上部臨界磁場が Field limit を与えるわけではなく、あくまで super heating field が臨界磁場、つまり加速勾配限界を与える、と考えられている。また、成膜する膜厚にも最適な膜厚があることを高エネ研の久保らが示した[3]。それによれば Nb₃Sn を薄膜材料とした場合、超伝導薄膜を 100nm、絶縁膜を 10~100nm が最適と計算している。

超伝導薄膜の製造方法として ALD (Atomic Layer Deposition 原子層堆積法)を用いる事を計画している。CVD(Chemical Vapor Deposition 化学気相法)の一種である。プロセスを活性ガス、不活性ガスを交互に秒単位レベルでフロー制御することで基盤上への成膜を均一かつサブナノメートルの制御された成膜を行う方法である。

本文は、超伝導加速空洞用に開発する薄膜超伝導体の性能評価を行うために、RF 臨界磁場を測定する空洞の設計・製作及び薄膜超伝導体サンプルの残留抵抗比測定装置の構築について報告する。

2. Al 製マッシュルーム型空洞の設計及び製作

2.1 空洞内部電磁場計算

最終段階である Nb でマッシュルーム型空洞を作る際、できるだけコンパクトで強い磁場を発生するために空洞の共振周波数を 3.9 GHz とした。これは、ILC の超伝導加速空洞の共振周波数 1.3 GHz の 3 倍高調波の周波数に相当する。この周波数帯では、数十ワット出力の RF アンプが容易に入手できる。形状は、先行研究である SLAC のマッシュルーム型空洞をベースとした[4]。入力パワーは空洞内の Nb の熱的超伝導破壊によって制限されるので、できるだけ強い磁場がサンプル面に励振されるよう、内壁面の磁場に対しサンプル面の磁場が 2 倍以上の値を取るよう設計方針を立てた。また、電場については、空洞内壁に電場が印加されないよう設計した。これは、高い電場が空洞内壁に励起されたときに電界放出が起き、空洞内表面から電子が放出し、それを繰り返すことにより、局所的に熱が発生するため、熱的超伝導破壊が生じるためである。図 2 に CST MW STUDIO を用いた内部電磁場計算結果を示す。

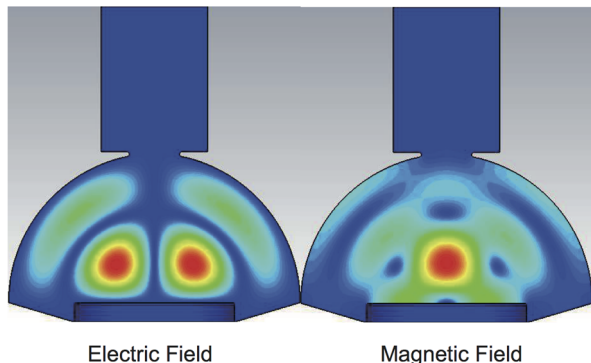


Figure 2: Electric and Magnetic field in mushroom-shaped Al cavity.

計算から、サンプル部最大磁場は 51460 A/m , その他の内壁では半球部で最大磁場 20409 A/m が励起され、結果として比が 2:52 となり、内壁半球部に対してサンプル部に 2 倍を超える磁場が励起されるように設計できた。この形状を高周波臨界磁場測定空洞の内空間とすることとした。

2.2 モデル空洞製作及び評価

電氣的に設計した空洞が実際に計算された電磁場をもつかどうかを調べるために、臨界磁場測定用空洞の試験器を製作することとした。また、試験器の内部の電磁場分布形状はビーズ摂動法を用いて測定することとした。試験空洞の設計図を図 3 に示す。試験空洞は 7 つの部品に分かれており、それぞれをボルト止で組み立ててある。接触部は電氣的接続を良くするために 2mm 程度の凸状段差をつけてある。また、ビーズ測定のために、直径 7mm の 13 対の貫通穴が開けてある。材質のアルミニウムは 5000 番台または 6000 番台のものを用いた。完成したモデル空洞の写真を図 4 に示す。

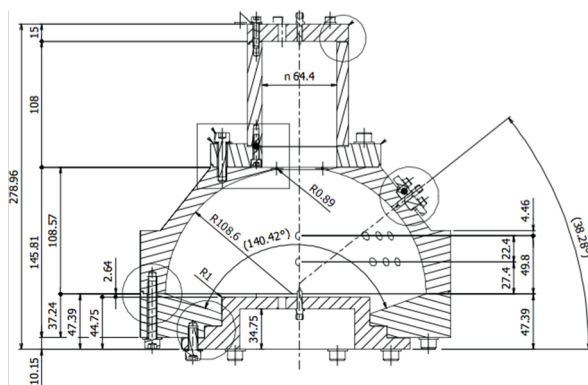


Figure 3: Cross-sectional drawing of mushroom-shaped Al cavity.

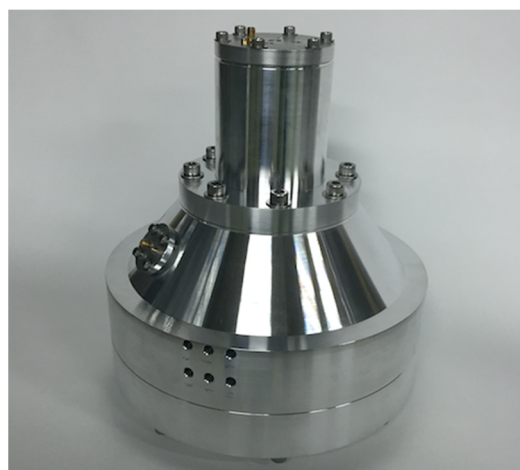


Figure 4: Picture of mushroom-shaped Al cavity.

モード形状の測定は、ビーズ測定により行われた。そのとき使用されたビーズ測定装置の構成図を図 5 に示す。ビーズ測定は、直径 5 mm のアルミ球ビーズを十分細いナイロン糸に取り付けて、空洞の中を通し、高精度にビーズの位置を変化させ、そのときの共振点周波数の移動を測定することで行った。

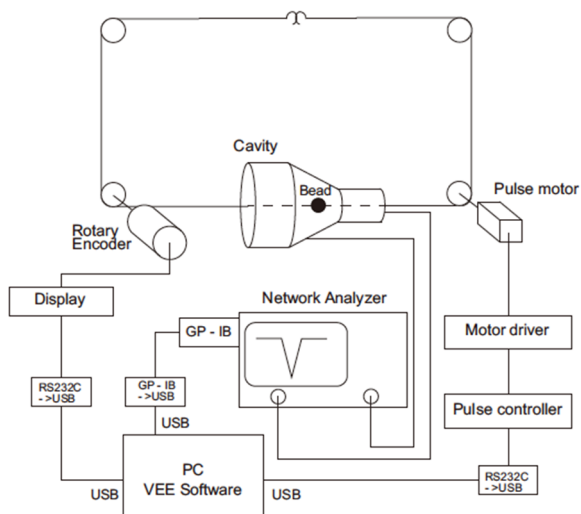


Figure 5: Set-up of bead-pull measurement.

目的の共振モードを探すために計算値と実測値を対応させる必要がある。最低次のモードである TM_{010} モードの周波数が、測定では 1.1516GHz であるのに対し、計算では 1.1381GHz と製作モデルのほうが 13.5MHz 高かった。また、励振したいモードの周波数が 3.919GHz と計算されたため、これも周波数が高い方にずれるとして 3.927GHz、または 3.941GHz の共振点が励振したいモードであると考えた。この2つの共振点において、ビーズ測定により得られた周波数変移(赤プロット)と、CST MW STUDIO から得られたビーズ軌道上での電磁場から求めた周波数変移(青プロット)を図 6 及び図 7 に示す。

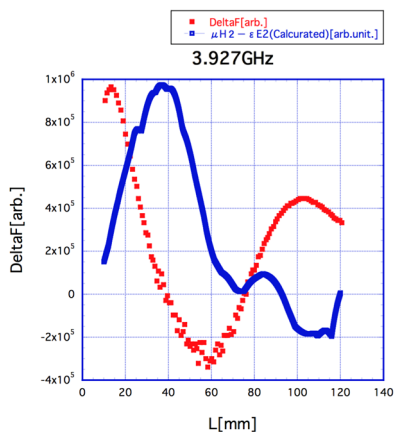


Figure 6: Comparison of bead-pull frequency shift between bead-pull measurement and CST calculation, at 3.927GHz mode. (Red plot is measurement, blue plot is calculation.)

目的のモードにおいては空洞の底板に相当するサンプル部では強く磁場が印加されるため、まず青プロットのように最初に強い正の周波数変移が見られるはずである。

3.927GHz モードでは底板付近では強い磁場であるが、半球空洞内部で電場が優勢となっている。また、3.941GHz モードでは半球空洞内部に強い磁場を持つが、底板には磁場がかからないかもしくは電場と拮抗しキャンセルしている。そのためこれらのモードは励振したいモードとは異なる可能性がある。だが 3.4GHz から 4GHz までを周波数掃引して見つかった各モードでビーズ測定したが、そのようなモード分布は検出できなかった。これらからアンテナ形状に問題があり、目標のモードが励振できていないとも考えられ、アンテナ改良の必要性がある可能性がある。また、ビーズ測定において電場と磁場とを分離して測定する必要がある。また、測定した 3.941GHz モードにおいてはモードが近接しており、もしこれが目的のモードであるとするモード分離のための摂動を空洞設計の中にさらに組み込む必要がある事もわかった。

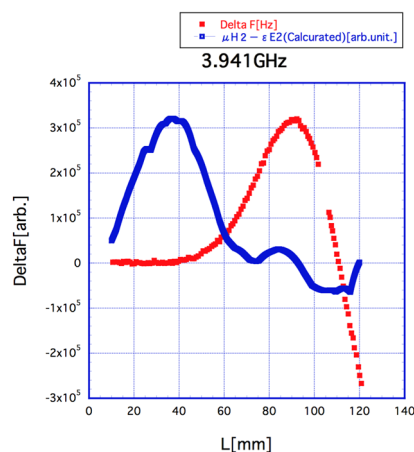


Figure 7: Comparison of Bead-pull Frequency shift between bead-pull measurement and CST calculation, at 3.941GHz mode. (Red plot is measurement, blue plot is calculation.)

3. Nb 製マッシュルーム型空洞の設計

Nb 製マッシュルーム型空洞の設計案を図 8 に示す。空洞は全体が超伝導状態に移る必要があるため、本体を Nb、フランジを NbTi で作成する。本体の基本的な厚みは加速空洞と同じ 2.8mm を考えている。底板サンプルの固定方法は Nb 製のヘキサゴンシールでの固定を考えている。一部の固定面は Nb 同士での締め付けになるため、シール・フランジ面に凹みができる。そのため測定ごとに空洞下部の部品交換に対応する。入力アンテナは空洞の半球部壁面から励振し、ピックアップアンテナは排気ポートのある上部のフランジに取り付ける予定である。

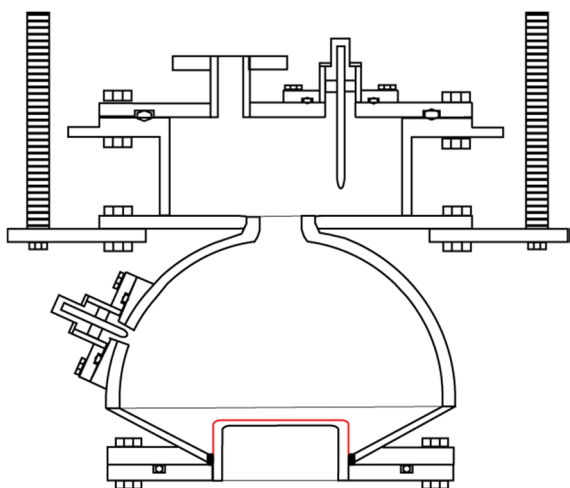


Figure 8: Cross-sectional drawing of mushroom-shaped Nb cavity.

4. 残留抵抗比測定装置の構築と測定

4.1 残留抵抗比 (Residual Resistance Ratio : RRR)

多層薄膜超伝導体の純度を推定することは、多層薄膜超伝導体の生成評価のため非常に重要である。材料の純度は熱伝導率で置き換えることができる。不純物が少ないとき熱伝導率は物質固有の熱伝導率に近づく。しかしながら、超伝導状態の熱伝導率を測定することは極低温のため測定が非常に難しい。一方、極低温での熱伝導率と電気伝導率は極めて似た値をとる。また、電気伝導率は極低温でも測定が比較的容易である。これらから、電気伝導率、すなわち極低温での抵抗率と室温時の抵抗率との比 RRR を測定し、不純物の割合を RRR で推定することができる。

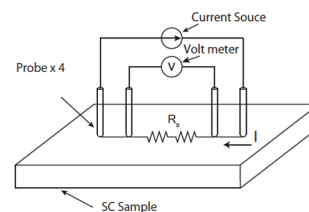


Figure 10: 4-probe measurement.

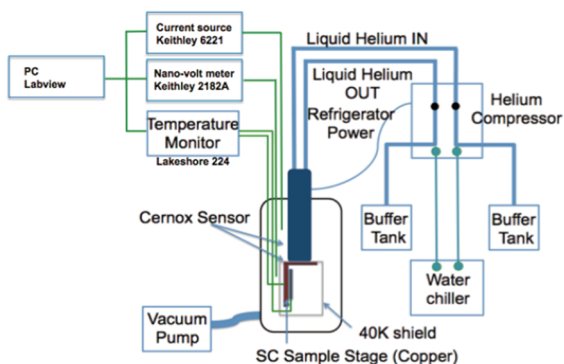


Figure 9: Set-up of RRR measurement.

装置の概要図を図 9 に示す。真空槽は高さ 660 mm、内径 345.6 mm の円筒状であり、材質は SUS 304 が用いられている。真空槽の側面には、KF40 の真空ポートが 2 つついており、排気やフィードスルー用のポートに使用している。また、上部には同じく SUS 304 の蓋がつき、この蓋には冷凍機をマウントする穴が開いており、この他にフィードスルー用の KF 40 の真空ポートが 2 つ付いている。冷凍機はアルバッククライオ UR4K 1060T 冷凍機

ユニット及びヘリウムコンプレッサーユニットを用いている。冷凍機は GM 冷凍機であり、冷凍機とコンプレッサーユニットはフレキホースで接続され、コンプレッサーの冷却にチラーを用いる。冷凍機は真空槽の上部蓋に取り付けてあり、下を向いて取り付けられている。冷凍機には 2 段の冷却ヘッドがあり、1 段目が結線等のサーマルアンカー用コールドステージで、40 K まで冷却され、冷却能力は、下向きに設置し 2 段目にも熱負荷同時に与えた場合に 40 W となる。40K ステージにアルミ製箱型サーマルシールドを 4 K ステージを囲むように取り付けられている。また、この箱型アンカーに計測用の結線を貼り付け、フィードスルーからの熱流入に対してサーマルアンカーをとっている。下段は 2 段目のステージの 4 K 冷却ヘッドがある。この 4 K ステージは 1 段目と同様に、1 段目と 2 段目に同時に熱負荷を与えた状態で 60 分で 4.2 K まで到達する。到達温度は無負荷時に 3 K である。このヘッドにサンプル冷却の L 字型銅板ステージが固定される。測定は測定用結線やフィードスルーの接触抵抗が測定に影響しないようにするために、4 端子計測法を用いている。4 端子計測の概念図を図 10 に示す。4 端子計測は、端子が 4 本直線上に並んでおり、外側の 2 本が測定電流を流す端子で、内側の 2 本が端子間電圧をピックアップしている。この方法によって被測定物のみの電圧を測定することができる。

構築した RRR 測定装置を用いて、まず基準となる Nb 薄膜の転移温度や低温での抵抗値を測定した。測定は、まず、室温から超伝導状態になるまで冷却し、超伝導状態であることを抵抗値測定で確認した後、冷凍機を停止し測定電流によるジュール熱を利用して、昇温しながら転移温度付近の温度と抵抗値のデータを取得した。測定電流の値を 1uA, 5 uA, 10 uA, 20uA, 50uA, 100uA として測定した。Nb 薄膜は、京都大学で製作されたものを用いた。測定電流を 20 uA 流した際の温度と抵抗値の関係を図 11 に示す。この時の転移温度は 4.43 K であり、抵抗値は $2.54 \times 10^{-6}[\text{ohm}]$ であった。このサンプルの転移温度直上の抵抗率 $3.57 \times 10^{-8}[\text{ohm / cm}]$ であり、300K に外挿した抵抗率が $5.61 \times 10^{-8}[\text{ohm / cm}]$ であった。そのためこのサンプルの RRR が 1.57 と測定できた。この値は空洞に使われるバルクの Nb の RRR の基準値である 250~300 より小さいが、一般に薄膜サンプルにおいては RRR が 1~10 程度になるため、この値は妥当である。測定から薄膜サンプルが超伝導転移し、転移温度を測定できる事を確認した。典型的な Nb の転移温度が 9.2K であるのに対して低く測定されたのは薄膜の製膜精度や不純物の存在が原因と考えられる。このように

して完成が確認された RRR 測定装置を多層薄膜サンプルに応用した。

次に、仏・Saclay 研究所で製作された NbN 薄膜の転移温度測定を行った。電流値は Nb 薄膜と同様に 1uA, 5 uA, 10 uA, 20uA, 50uA, 100uA として測定した。測定電流を 20 uA 流した際の温度と抵抗値の関係を図 12 に示す。この時の転移温度は 13.29 K であり、抵抗値は 1.50×10^{-1} [ohm]であった。窒化ニオブの転移温度は 15.72K であるため、比較的良好な精度の製膜だと考えられる。

次に、米・フェルミ国立加速器研究所で製作された Nb₃Sn 薄膜の転移温度測定を行った。電流値は 1uA, 5uA, 10uA, 100uA として測定した。測定電流を 100uA 流した際の温度と抵抗値の関係を図 13 に示す。この時の転移温度は 14.52 K であり、抵抗値は 4.30×10^{-4} [ohm]であった。Nb₃Sn の転移温度は 18K とされており、このサンプルに関しても Nb₃Sn が製膜されていて、比較的良好な精度であると考えられる。

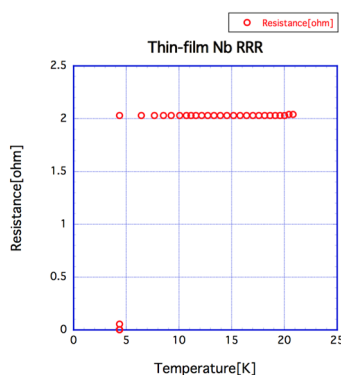


Figure 11: Resistance measurement of thin-film Nb sample with temperature increment. (Current is 20uA. Tc = 4.43 K is seen.)

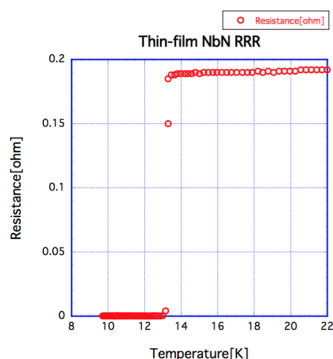


Figure 12: Resistance measurement of thin-film NbN sample with temperature increment. (Current is 20uA. Tc = 13.29 K is seen.)

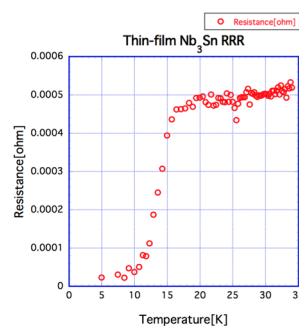


Figure 13: Resistance measurement of thin-film Nb₃Sn sample with temperature increment. (Current is 100uA. Tc = 14.52 K is seen.)

5. まとめ

薄膜超伝導体の RF 臨界磁場を測定するニオブ製空洞の設計・製作のため、まず、アルミモデル空洞の設計・製作を行った。共振周波数 3.9 GHz における空洞内空間の電磁場分布を電磁場シミュレーションコード CST MW STUDIO で計算しながら、サンプル部に高い高周波磁場が励起されるように設計した。また機械的な設計も同時に行い、アルミニウム製のプロトタイプモデルを機械的かつ電氣的に設計・製作した。実際に完成した試験空洞の電磁場分布を測定し、電磁場シミュレーションコードにより計算された値と比較検討した。現在計算モデルのモードを再現する実測モードの同定を行っている最中である。

更に、薄膜超伝導体の純度評価及び転移温度測定のための残留抵抗比測定装置を製作した。また、残留抵抗比測定装置では、基準となる Nb 薄膜、NbN 及び Nb₃Sn 薄膜で試運転及び薄膜の性能確認を行った。

謝辞

本研究は、光・量子融合連携研究開発プログラムのサポートにより行われております。プロジェクトリーダーの照沼教授ほか、関係各位に感謝致します。また、株式会社ケーバックの飯竹氏、関東情報サービス株式会社の寺嶋氏には残留抵抗比測定装置の立ち上げに協力、尽力くださり感謝いたします。

参考文献

- [1] A. Gurevich, "Enhancement of rf breakdown field of superconductors by multilayer coating" Appl. Phys. Lett. 88, 012511 (2006).
- [2] S. Mitsunobu *et al.*, "MgB2 THIN FILMS ON COPPER, TITANIUM, AND NIOBIUM BY PULSED LASER DEPOSITION IN KEK" Proceedings of SRF2009, Berlin, Germany.
- [3] T. Kubo *et al.*, "Radio-frequency electromagnetic field and vortex penetration in multi-layered superconductors", Appl. Phys. Lett 104, 032603 (2014).
- [4] J. Guo, S. Tantawi, D. Martin, C. Yoneda, "CRYOGENIC RF MATERIAL TESTING AT SLAC" Proceedings of 2011 Particle Accelerator Conference, New York, NY, USA.