

多層薄膜超伝導体評価用 Nb 製マッシュルーム型空洞の開発

DEVELOPMENT OF NB MUSHROOM-SHAPED CAVITY FOR EVALUATION OF MULTI-LAYER THIN-FILM SUPERCONDUCTOR

及川大基^{#, A)}, 東口武史^{A)}, 早野仁司^{B)}, 井上均^{B)}, 江並和宏^{B)}

Hiroki Oikawa^{#, A)}, Takeshi Higashiguchi^{A)}, Hitoshi Hayano^{B)}, Hitoshi Inoue^{B)}, Kazuhiro Enami^{B)}

^{A)}Utsunomiya University

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

Abstract

The accelerating gradient of the Nb superconducting RF cavity is reaching the limit due to the intrinsic properties of the Nb material. To obtain more higher accelerating gradient, there has been proposed a method of increasing an RF critical magnetic field of the cavity inner surface by coating of multi-layer thin-film superconductor. In order to develop multi-layer thin-film, we are conducting thin-film process development on Nb sample. An RF cavity with a thin-film coated Nb sample is needed to evaluate an improvement of RF critical magnetic field. It is necessary to design a cavity to produce a strong RF magnetic field parallel to the surface of the thin-film sample. We designed a Nb mushroom-shaped cavity, which has a resonant frequency of 5.2 GHz. Before the Nb-based cavity, we observed the field distribution by use of an Al-based model cavity instead of Nb-based cavity. In this paper, we compare the observation of measured field distribution with the calculation, together with the design of Nb-based mushroom-shaped cavity under fabrication.

1. はじめに

ニオブ (Niobium : Nb) 製超伝導加速空洞の加速性能は、真空焼鈍時に窒素を微量添加することで空洞の Q 値や加速電界を向上させる手法や、空洞内表面にナノメートルオーダーの絶縁層と超伝導層を積み重ねることで高加速電界につながる臨界磁場を向上させる手法などを用いて、高周波損失・加速電界ともに大幅な向上がなされている[1, 2]。このような高い性能を持つ空洞を製作するにあたり、表面処理の各パラメータ及び薄膜を最適化するため、複数回の評価が必要である。しかし、空洞評価は大掛かりなものが多いため、同様な処理を施した試験片を評価する装置が求められている。特に多層薄膜構造を用いる手法は、空洞の複雑な形状とその大きさから均一な成膜が困難である。また、成膜プロセスの最適化のために多数回成膜を行う必要がある。そのため、空洞よりも小さく成膜が容易で、かつ多数回の成膜も容易なように試験片での評価が望まれている。本報告は、超伝導加速空洞用に開発する多層薄膜超伝導体の試験片性能評価を行うために、極低温での RF 臨界磁場などを測定する空洞の設計・製作について報告する。

2. 試験空洞の設計・製作と評価

2.1 空洞共振器の設計と製作

超伝導加速空洞のための多層薄膜超伝導体进行评估するにあたり、以下の物理量の評価が必要と考えた。

- 多層薄膜超伝導体の超伝導転移温度 (T_c)。
- 多層薄膜超伝導体の高周波表面抵抗 (R_s)。

- 多層薄膜超伝導体が、印加される高周波磁場によって超伝導状態が壊されるとき磁場強度の

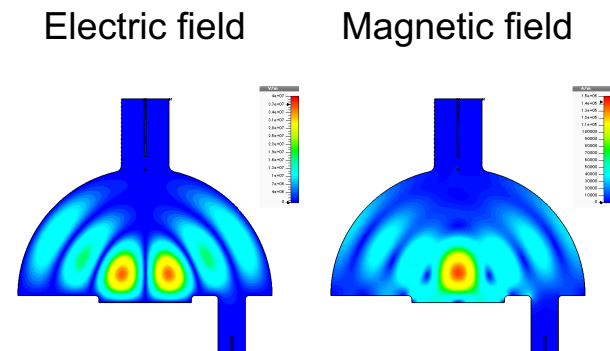


Figure 1: Calculated electromagnetic field in the mushroom-shaped cavity.

高周波臨界磁場 (H_c)。

これらの物理量を評価するような装置として、試験片を交換可能でかつ従来の加速空洞よりも小さい空洞共振器を用いることを考えた。これは RF 領域で強電磁場の励振が可能で、上記の物理量を一度に測定でき、さらに試験片のみを交換することで多数の試験片評価が簡便になると考えたからである。

まず SLAC の 11.4GHz の試験片評価空洞を出発点として設計を開始した[3]。共振周波数は 5.2GHz で共振モードは TE_{013} とした。

図 1 に計算コード CST 社の MW STUDIO で計算した設計空洞内空間に励振される電磁場を示す[4]。この内空間を持つような試験空洞をアルミで製作した。図 2 にアルミ製試験空洞共振器の概要を示す。製作した試験空洞を用いてビーズ測定を行い、設計

[#]oikawah@post.kek.jp

した空洞内空間に励振される電磁場の評価を行った。

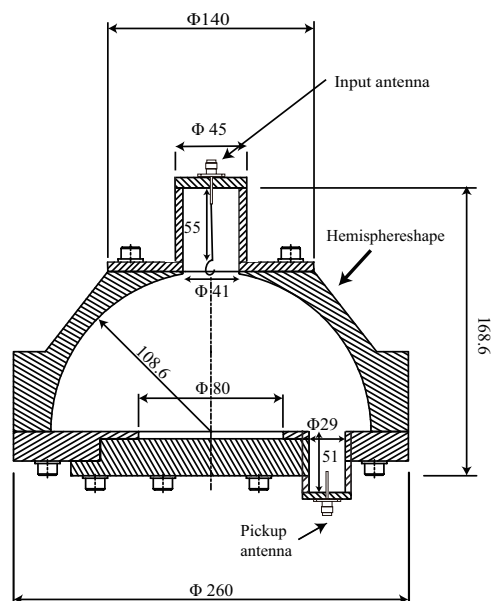


Figure 2: Cross-sectional drawing and picture of the Al test mushroom-shaped cavity.

2.2 空洞共振器の評価

図 3 に試験空洞内に微小金属円筒体を挿入し、走査させた際の周波数変位と MW STUDIO で完全導体円筒体を挿入した際の周波数偏移を示す。空洞損失とアンテナの coupling により微小体の動く方向に沿った周波数偏移に差があるが、形状が相似なため、励振されている電磁場分布は計算された電磁場と等しいと評価できる。これらの結果から内空間の設計を終了し実機空洞の機械的設計に移ることにした。

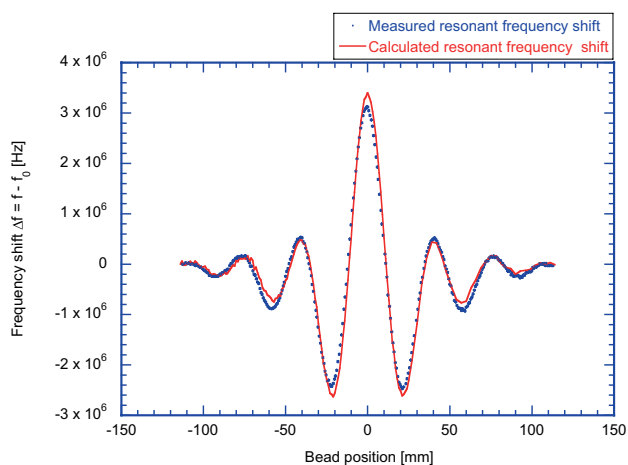


Figure 3: Comparison of bead-pull frequency shift between bead-pull measurement (orange) and CST calculation (blue), at 5.261GHz mode.

3. 多層薄膜超伝導体評価用 Nb 製空洞の設計

3.1 機械的設計

図 4 は Nb 製マッシュルーム型空洞の設計案である。高い Q 値を達成するために、空洞全体が超伝導状態に転移する必要がある。そのため空洞は Nb で、接続フランジは NbTi で製作する。空洞の半球部分はプレス方式で製作するため、TESLA 型超伝導加速空洞と同様に厚さ 2.8mm で製作する設計とした。底板のサンプル部は Nb ガasket またはインジウムシールで真空封止する計画である。アンテナポートフランジ部、および真空排気ポートフランジ部は TESLA 型超伝導加速空洞と同様にアルミメタルシールを用いる。空洞励振用の入力アンテナはフックのような形状をしており、内部の磁場とカップルするように設計した。底板部に引き込んだ形状のピックアップアンテナを配置し、内部の電磁場の軸対称をできる限り崩さないように、そして 2 ポート測定が可能な設計とした。

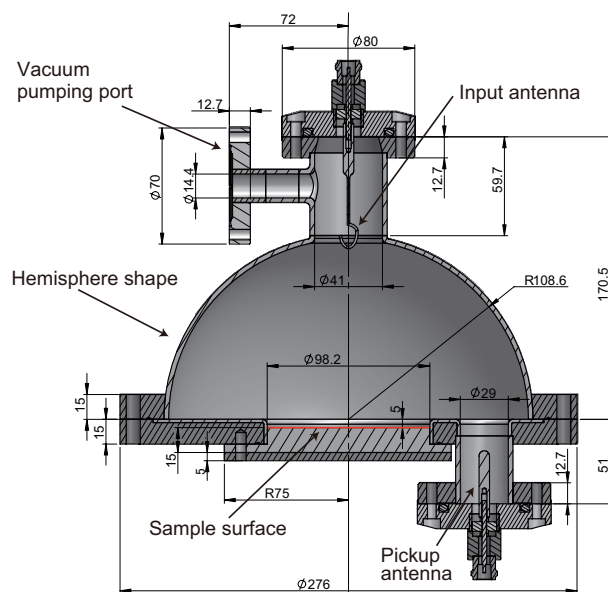


Figure 4: Cross sectional drawing of Nb-based mushroom-shaped cavity.

3.2 Nb 製ガasket 試験

試験片交換のために試験片付近にフランジを用いた設計であるが、このときフランジとシール材での高周波損失が大きいと空洞全体の超伝導破壊の原因となる。そのため試験片と空洞を接続するフランジのシール材には Nb ガasket またはインジウムシールを用いる予定である。そこで Nb 材で ICF70 フランジ用ガasket と、エッジのない面タッチでの真空フランジを製作し、真空封止試験を行った。

図 5 に試験概要を示す。試験は以下に示す二通りの方法で行った。

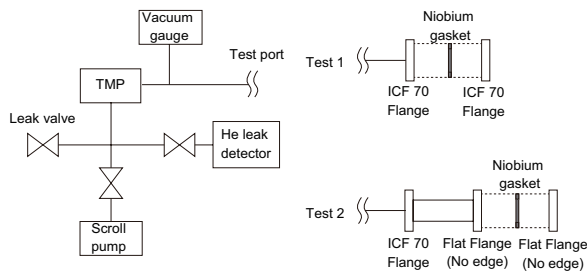


Figure 5: Leak test setup of Nb gasket and flat flange.

- ICF70 フランジに Nb ガasketを使用してベーキング後に液体窒素浸漬の後、ヘリウムリークディテクタを用いてリーク試験。
- 面タッチフランジと Nb ガasketを使用してベーキング後に液体窒素浸漬の後、ヘリウムリークディテクタを用いてリーク試験。

Test 1 では室温での試験ではリークがなかったが、液体窒素浸漬の後にリークが発生してしまった。また、Test 2 においては、室温でのリークが確認された。そのため、真空焼鈍処理を行った Nb ガasketを用いて、さらにエッジのあるフランジを用いて

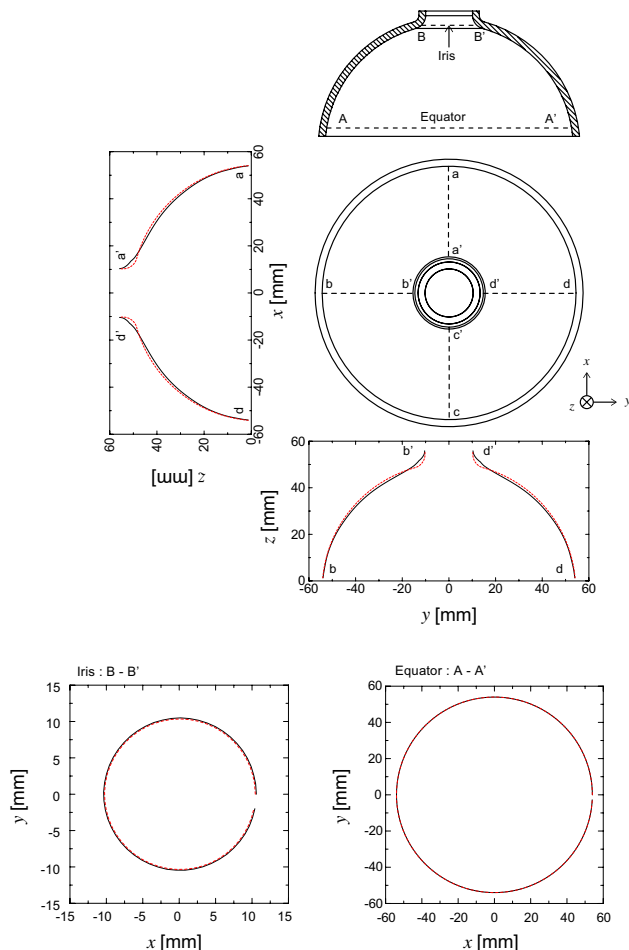


Figure 6: Comparison of press forming shape between design and 3D measurement. Red line is design, black line is 3D measurement.

再試験を行う予定である。

3.3 ハーフサイズ空洞共振器の半球部プレス加工テスト

実際の空洞共振器を製作する前に、プレス成形では最も形状加工が容易ではない半球部をハーフサイズで製作した。プレスする材質は厚さ 3mm の無酸素銅板を、金型にはアルミ合金を用いた。プレスした半球部を、三次元測定機を用いて設計と実機の形状比較を行った。図 6 にプレス加工した半球部と、その形状計測の結果を示す。赤色の破線が設計値であり、黒の実線がプレス加工後の形状である。

成型誤差は半球面鉛直方向に対して最大 1 mm, 赤道部及びアイリス部の円周誤差は最大 20 μm であり、概ね設計通りのプレス加工ができていると評価した。ただし、上部のくびれ部分は切断する予定であるため、誤差の評価からは除外している。

4. 多層薄膜超伝導体評価用 Nb 製空洞の極低温評価計画

3 章で設計について述べた Nb 製空洞は、極低温まで冷却し試験片を評価する必要がある。この章では Nb 製空洞の極低温試験方法について述べる。

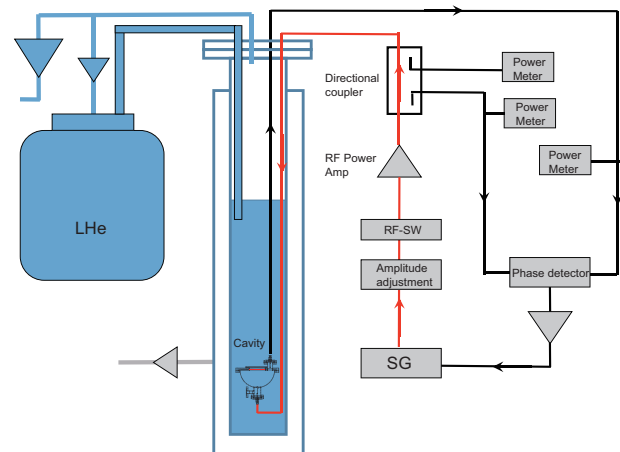


Figure 7: Vertical test setup of mushroom-shaped cavity.

4.1 縦測定装置への組み込み方法

高エネルギー加速器研究機構超伝導リニアック試験棟では、超伝導加速空洞を縦型クライオスタットに配置し、液体ヘリウムに浸漬させ冷却を行い、2 K 近傍での加速性能測定を行っている。この測定は、空洞を縦に配置することから縦測定と呼ばれている。この既存の測定系に多層薄膜超伝導体評価用 Nb 製マッシュルーム型空洞を配置し、極低温試験を行う計画である。図 7 にその概要を示す。測定空洞はクライオスタット天板から吊り下げられ、クライオスタット下部で液体ヘリウムに浸漬する。また、天板に配置されるイオンポンプで真空排気され、測定中は 10^{-8} Pa 程度の高真空が保たれる。

4.2 電力試験

極低温まで冷却された空洞の高周波特性を評価するために、ネットワークアナライザを用いて 1 W 程度の高周波電力を入力する。これにより空洞の Q 値および各アンテナのカップリングを評価し、設計値と比較する。

また、多層薄膜超伝導体の超伝導破壊または磁束侵入を実現するために、最大 50 W 程度の電力を入力することを計画している。

5. まとめ

多層薄膜超伝導体の RF 臨界磁場を測定するための試験空洞の評価と実際の空洞製作のためのシール試験・プレス試験を行った。アルミニウム製の試験空洞を設計し、製造した。試験空洞の電磁界分布は摂動法で評価し、入力アンテナ形状と挿入長さによる電磁界歪みを考慮した計算と概略一致し、設計に問題がないことがわかった。これに基づいて、実際の測定に用いる Nb 製マッシュルーム空洞の機械的な設計を行った。空洞製造にはプレス成形を用いるため、もっとも加工が容易ではない半球部をハーフサイズで成形試験した。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 17J09072 の助成を受けて行われました。

参考文献

- [1] A. Gurevich, Appl. Phys. Lett. **88**, 012511 (2006).
- [2] A. Grassellino *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **26**, 102001 (2013).
- [3] S. G. Tantawi *et al.*, “SUPERCONDUCTING MATERIALS TESTING WITH A HIGH-Q COPPER RF CAVITY”;
<http://www.slac.stanford.edu/cgiwrap/getdoc/slac-pub-12957.pdf>
- [4] <https://www.cst.com/Products/CSTMWS>