

## 薄膜超伝導体の高周波臨界磁場測定のためのマッシュルーム型空洞の設計研究

### DESIGN STUDY OF MUSHROOM SHAPED CAVITY FOR EVALUATION OF RF CRITICAL MAGNETIC FIELD OF THIN-FILM SUPERCONDUCTOR

及川大基<sup>#, A)</sup>, 東口武史<sup>B)</sup>, 早野仁司<sup>C)</sup>

Hiroki Oikawa<sup>#, A)</sup>, Takeshi Higashiguchi<sup>B)</sup>, Hitoshi Hayano<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Utsunomiya University

<sup>B)</sup> Center for Optical Research and Education, Utsunomiya University

<sup>C)</sup> KEK

#### Abstract

For more higher energy accelerator, superconducting RF cavity that has high gradient of 45 MV/m or more is demanded. To obtain such a higher 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 that has thickness close to the London penetration depth. By producing a multilayer film structure in cavity inner surface, it is believed to improve the RF critical magnetic field, and to connect directly to high gradient. To demonstrate a creation of a thin film on a surface of Nb samples, an RF cavity with a thin film coated Nb sample is needed to measure the RF critical field of the sample. To adapt it to the cavity, to cool to cryogenic temperature and to establish the sample to supply the RF power, 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 mushroom shaped cavity made of Nb and input coupler, and the resonant frequency is 5.2 GHz by calculation. We calculated the resonant frequency and the field distribution, compared with the measured values for the model cavity.

#### 1. はじめに

2006年、グレビッチにより薄膜超伝導体応用による加速空洞の高電界化が提案された [1]。その高加速勾配のための超伝導薄膜の研究は現在 Saclay、SLAC、ANL、Cornell 大学、JLAB、FNAL などの全世界の研究機関で行われている [2]。加速空洞への応用の前に、まずは高加速勾配につながる高い臨界磁場をもつ超伝導薄膜を、Nb 単板サンプル上に成膜し、そのサンプルを測定・評価する必要がある。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) が第1候補である。成膜された多層薄膜サンプルを極低温まで冷却し 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研究方法を計画している。

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 Nb<sub>3</sub>Sn、NbN、MgB<sub>2</sub> 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 KEK の久保らが示した [3]。それによれば Nb<sub>3</sub>Sn 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。これは 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。

本論文は、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

マッシュルーム型空洞は、半球部と平らな底面のサンプル部を持った空洞共振器である。この形状は、底板平面上に強い RF 磁場を励起するの適した形状である。一方で、底板以外の空洞内表面には、サンプル部と比較して弱い交流磁場が励起される。このため、多層薄膜超伝導体を底板部分に設置することで、強い RF 磁場を印加する事ができ、薄膜超伝導体サンプルのみをクエンチさせることができる。これを外部パーツごとの Q 値やサンプルの形状因子を事前に計算しておくことで、多層薄膜超伝導体サンプルの臨界磁場や表面抵抗を見積もる事ができる。

これまでの設計では、サンプル部が内部に突き出した構造を持っていたため、その部分の寸法の変化により、空洞内の電磁場が乱れやすいという欠点があった。また、これまでのパワー入力用アンテナの設計では、容易に内部電磁場の軸対称性がアンテナによって乱されることがわかった。更に、目的の電磁場を持つモードの共振周波数は、隣接モードの共振周波数に近い場合、モード分離が不十分であった。モードの次数を上げるによりモー

# oikawah@post.kek.jp

ド分離が改善する傾向にあることから、共振周波数をこれまでの設計の 3.9GHz から新たに次の高次の 5.2GHz に変更した。加えて、軸対称性を阻害しない特殊形状の入力アンテナを採用することにより、より安定した電磁界設計が可能となる。

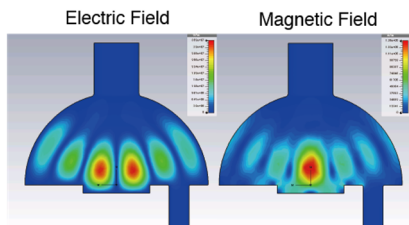


Figure 1 : Calculated electric and magnetic field in mushroom-shaped cavity.

共振周波数は、ILC の超伝導加速空洞の共振周波数である 1.3GHz の 4 次高調波に対応する。空洞の形状は、SLAC のマッシュルーム型空洞を出発点とした[4]。蓄積される RF パワーは、空洞を形成する Nb のクエンチによって制限される。底板表面に印加される磁場が内半球壁の磁場に対して 2 倍以上の値を保持できるように空洞形状の設計を進めた。また、電界放出を生じさせないために、空洞内壁に印加される電場を小さくするように設計されている。マッシュルーム型空洞の上部にある円筒形状のパイプは、RF パワーを空洞に入力するためアンテナ内導体のためのポートである。また、この円筒形状は、真空引き用のポートを横に設置するためにも使用される。このような電磁場を持つ空洞を設計するために CST MW STUDIO を使用した。

電磁場モデルの寸法は、目的の電磁場分布を保ちながら共振周波数 5.2GHz になるように最適化された。次に、底面板の形状を、半球部の内表面上の磁場に対して、底面板上が強い磁場を有するように修正した。図 1 は、最終的な空洞内空間形状の断面と、計算された電場と磁場を示す。

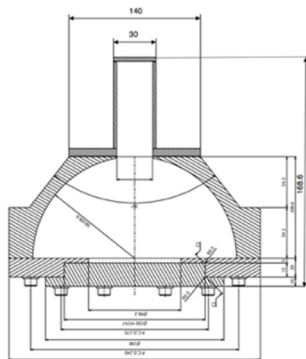


Figure 2 : Cross-sectional drawing of mushroom-shaped Aluminum test cavity.

計算から、目標モードの共振周波数は 5.252GHz である。隣接する共振モードとの周波数差は+ 37MHz と- 92MHz と計算された。前回問題であったモード分離が十分行える設計となった。一方、底面の最大励起磁場は 50810A / m であり、一方、半球の内面に沿っての最大励

起磁場は 30420A / m である。結果として、半球に対するサンプル磁界の比は 1.67 である。目標の 2 倍に到達することができなかったが、Nb よりも 1.67 倍の臨界磁場を測定することが可能となる設計となった。



Figure 3 : Mushroom-shaped Aluminum cavity.

## 2.2 試験空洞の設計と評価

電磁氣的に設計した内空間が実際にその電磁場を持つ事確かめるために、アルミニウム製の試験空洞を製作した。図 2 および図 3 は、試験空洞の設計図および実際に製作したものの写真である。空洞は 6 個のパーツに別れており、それぞれがボルトで接続される。入力アンテナポートとピックアップアンテナポートは、測定中アンテナの結合度を変える必要があるので、寸法を簡単に変更できるようにテープで固定する方式にした。また、ビードブル測定用の穴を開けた。

計算による目的のモードの共振周波数は 5.252GHz であるがそれがどの測定共振モードに相当するかを調べるため、計算と測定で得られたこの近傍の共振点を図 4 にまとめた。前後のモードとの周波数差から推定して 5.261GHz のモードが目標のモードであると考えた。これは計算より 9MHz 高いが、周波数の高い方のモード分離は計算と一致していた。周波数の低いほうのモード分離は計算とは一致せず、計算値の方が 3 つの近接モードの存在を計算しているが実測では検出できていない。それらはアンテナにカップルしないモードの可能性がある。

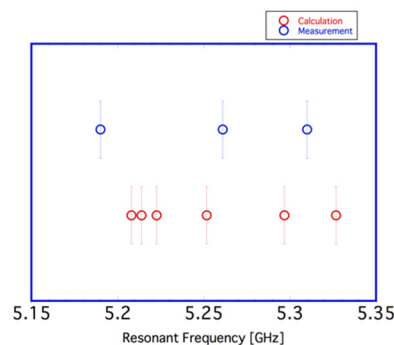


Figure 4 : Comparison of resonant mode separation frequencies between measurement (blue) and calculation (red).

目標モードの電磁界分布を確認するために、図 5 に示すビーズパス 1 上で、金属ビーズを用いた摂動法により電磁場分布を測定した。それにより得られた周波数変移を、計算によるパス 1 上での電磁場分布から求められた

周波数変移と比較した。そのグラフを図 6 に示す。

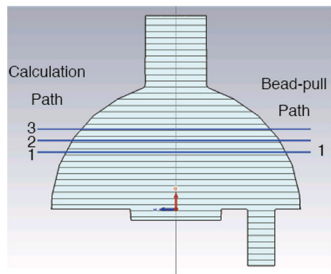


Figure 5 : Bead-pull paths of mushroom-shaped Aluminum cavity.

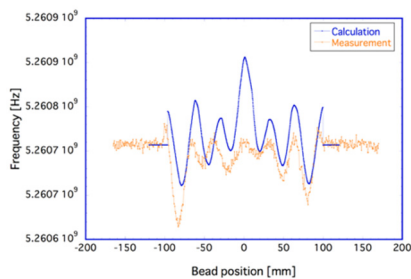


Figure 6 : Comparison of bead-pull frequency shift between bead-pull measurement (orange) and CST calculation (blue), at 5.261GHz mode.

目的のモードにおいては、空洞の中心に強い磁場があるため、空洞の中心部では強い正の周波数シフトが起こる。しかし、計算と比較して比較的弱い正の周波数シフトが観察された。パス 1 上の磁場は計算よりも弱いと思われる。そこで、中心の磁場がパス1より弱くなるパス 2 と 3 の周波数シフト計算を行った。これらのパスは、パス 1 の 10mm と 20mm 上に位置する。これらの 3 つのパス上で計算された周波数シフトを図 7 に示す。パス 1 とパス 2 上での周波数シフトの計算結果より、測定による目標モードの電磁場分布はこのパス 1 と 2 の間にあると考えられる。これらの不一致は、計算されたモデルと、実験アンテナ形状と挿入長から電磁場の歪みが生じたと考えられる。そのため、アンテナの形状と挿入長さのモデルを改善する必要がある。

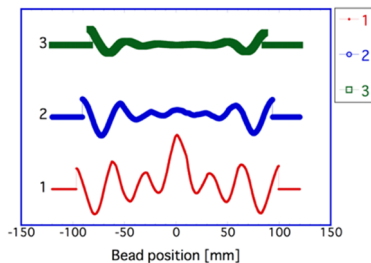


Figure 7 : Comparison of calculated frequency shift on the three paths at 5.261GHz mode. (Path 1 is bead-pull position, path 2 is 10 mm above the path 1, path 3 is 10 mm above the path 2.)

### 3. Nb 製マッシュルーム型空洞の設計

図 8 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インジウムシールで真空封止する計画である。底板フランジ部、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。

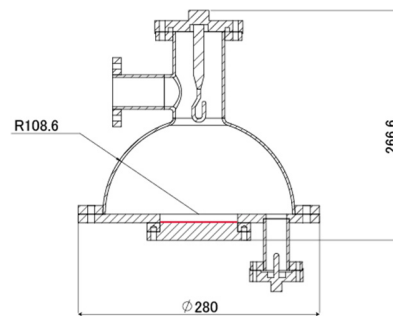


Figure 8 : Cross-sectional drawing of mushroom-shaped Nb cavity. (Red line shows sample surface.)

### 4. まとめ

多層薄膜超電導体の RF 臨界磁場を測定するための空洞の設計変更を行った。アルミニウム試験キャビティを設計し、製造した。試験空洞の電磁界分布はビードプル法で評価し、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設計を行った。

### 参考文献

- [1] A. Gurevich, "Enhancement of rf breakdown field of superconductors by multilayer coating" Appl. Phys. Lett. 88, 012511 (2006).
- [2] A. Valente-Feliciano, "Superconducting RF materials other than bulk niobium" Superconductor Science and Technology Supercond. Sci. Technol. 29 (2016)113002 (32pp).
- [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.