

Nb 製半球形状超伝導空洞による臨界磁場測定法の検討

STUDY OF CRITICAL MAGNETIC FIELD MEASUREMENT METHOD USING HEMISPHERICAL SUPERCONDUCTING CAVITY

服部綾佳^{#, A)}, 早野仁司^{B)}
Ayaka Hattori^{#, A)}, Hitoshi Hayano^{B)}
^{A)} NIT (KOSEN), Ibaraki College
^{B)} KEK

Abstract

We are developing a hemispherical superconducting cavity for measuring the RF critical magnetic field of superconducting thin films exceeding 400 mT. This cavity is designed to resonate in the TE₀₁₃ mode, an electromagnetic field mode in which a magnetic field approximately twice that of the cavity wall is applied to the surface of the sample stage on which the thin film to be evaluated is deposited. We have performed electromagnetic field simulations and TE₀₁₃ mode resonance tests in an aluminum hemispherical cavity at room temperature, and have studied the shapes of cavity and antenna suitable for critical magnetic field measurements. We have then begun manufacturing a Nb hemispherical superconducting cavity for TE₀₁₃ mode resonance tests in the superconducting state and completed the design.

1. はじめに

超伝導薄膜の 400 mT までの RF 臨界磁場測定を可能とするために、半球形状の超伝導空洞の開発をすすめている[1-3]。その空洞は、評価対象薄膜を成膜するサンプル台表面に、空洞壁の約 2 倍の強度の磁場を印加する電磁場モードである TE₀₁₃ モードを共振させる構造となっている。RF 臨界磁場が約 200 mT のニオブ(Nb)空洞表面でクエンチが起きる前に、その約 2 倍となる 400 mT の磁場が印加されるサンプル面でクエンチを観測し、そのときのパワー収支からサンプル面に印加されていた磁場強度を見積もることで、RF 臨界磁場を測定する。

これまでに、電磁場シミュレーションおよび室温におけるアルミ製半球形状空洞での TE₀₁₃ モード共振試験を実施し、臨界磁場測定に適する空洞およびアンテナ形状を研究してきた。そして、超伝導状態での TE₀₁₃ モード共振試験に向けて、Nb 製半球形状超伝導空洞の製造に着手した。本発表では、Nb での空洞製造に向け、アルミ製空洞から設計を変更した点や、その形状での電磁場シミュレーションによる TE₀₁₃ モードの共振状態の評価、低温試験・臨界磁場測定法について議論する。

2. Nb 製半球形状超伝導空洞

2.1 外形

Figure 1 に Nb 製半球形状超伝導空洞の概略図を示す。空洞は半球の頂上に円柱を取り付けた形をしており、その半球底面の中心からずれた場所に真空引きのための真空ポートを取り付け、円柱部と真空ポートに対して垂直に取り付けられるのが、それぞれインプットアンテナ・ピックアップアンテナを取り付けるためのアンテナポートである。そして、サンプル台を取り付けるためのサンプルポートが半球底面から伸びる。各部分は電子ビーム溶接で取り付けられる。低温試験・臨界磁場測定時には、

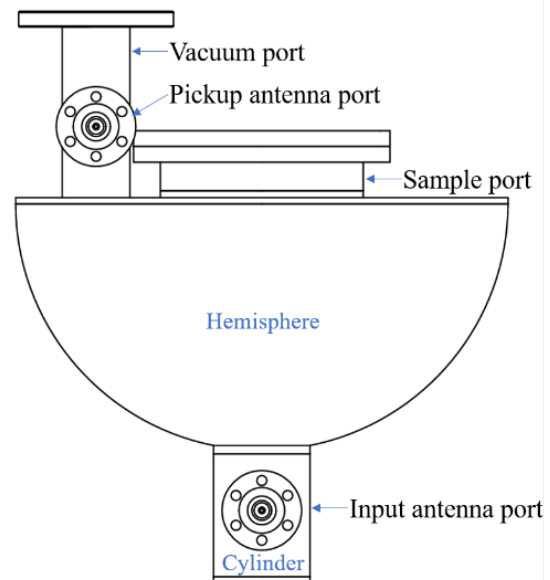


Figure 1: The Schematic Diagram of Hemispherical Superconducting Cavity.

クライオスタット内に Fig. 1 の通り、上側に真空ポートが伸びる形で吊り下げ、冷却する。

空洞の外形図を Fig. 2 に、その A-A 断面を Fig. 3(a)、B-B 断面を Fig. 3(b)に示す。半球内径は $\phi 217.2$ mm (R108.6 mm)、外径が $\phi 222.8$ mm、全長 258.5 mm で既存の内径 $\phi 390$ mm のクライオスタットに収まる寸法である。空洞は Nb で製造されるが、強度確保のため、フランジはニオブチタン (NbTi) とする。

2.2 サンプル台

次に、サンプル台について、Fig. 3(a)に示すように、 $\phi 86$ mm のサンプル台の表面を半球底面から上方に 5 mm 離れた位置に固定する。サンプル台とサンプルポートの間の電氣的接触の確保と真空封じのために、

[#] hattori@ibaraki-ct.ac.jp

Fig 3(a)拡大図のように、真空シールとしてインジウムワイヤを用いる。Figure 4に示すサンプル台設計図に示す通り、サンプル台の薄膜を製膜する表面から 2.8 mm までを Nb で、2.8 mm からフランジまでは強度をあげるために NbTi とする。サンプル台の $\phi 3$ mm の穴は Nb と NbTi の溶接時の気抜き穴であると同時に、低温試験時に温度センサーを取り付けるための穴である。その穴の位置については、シミュレーションで求めた磁場強度分布より決めしたが、詳細は 3.3.1 に後述する。

2.3 アンテナ

Figure 2(a), (b)はそれぞれ、インプットアンテナ・ピックアップアンテナの中心軸を通る断面を見ている。Figure 2(a)の通り、インプットアンテナは円柱部のアンテナポートに水平方向から挿入され、ピックアップアンテナは Fig. 2(b)の通り、真空ポートに水平方向から挿入される。アンテナ形状はインプットアンテナ・ピックアップアンテナともに $\phi 3$ mm の円柱形状(ダイポールアンテナ)である。アンテナの長さは Nb 製半球形状超伝導空洞の完成後にカップリング測定をして決めるが、Fig. 3 では、アルミ製空洞でのカップリング測定より推定される長さのアンテナを図示している。

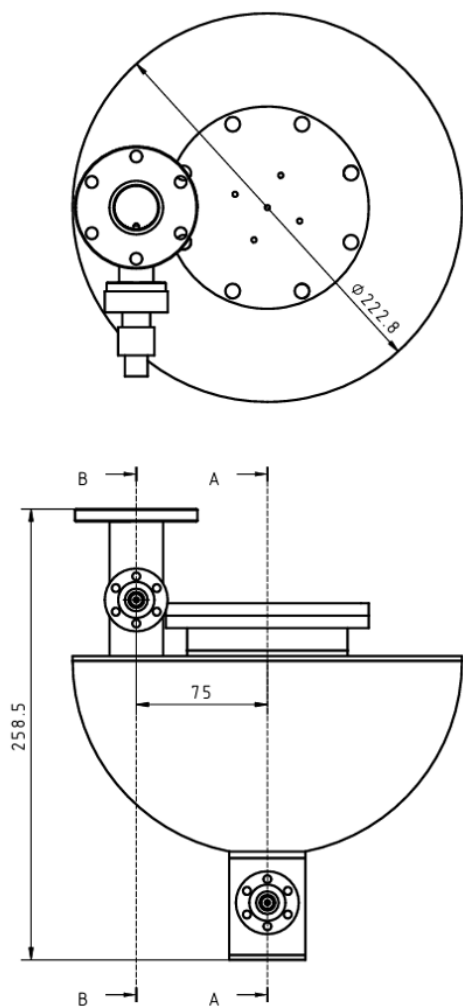


Figure 2: The External View of Hemispherical Superconducting Cavity.

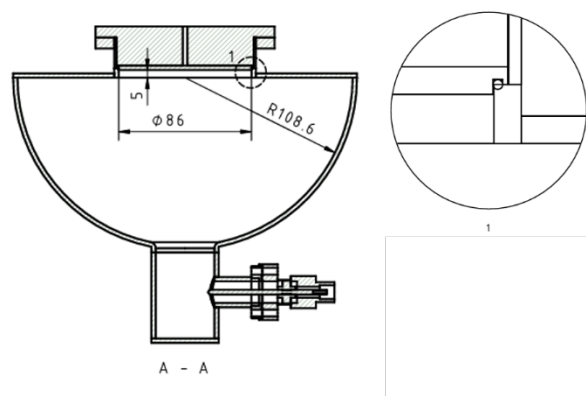


Figure 3(a): The Cross Section A – A of Hemispherical Superconducting Cavity.

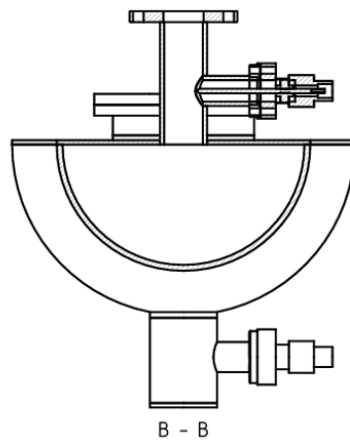


Figure 3(b): The Cross Section B – B of Hemispherical Superconducting Cavity.

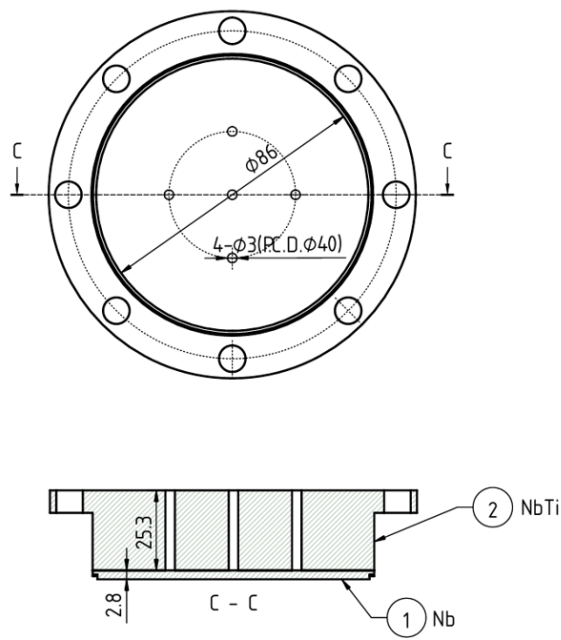


Figure 4: The Design of the Sample Plate.

3. Nb 製半球形状超伝導空洞の電磁場シミュレーション

3.1 シミュレーション条件・シミュレーションモデル

Nb 空洞の設計時に、室温での TE₀₁₃ モードの共振試験に使用したアルミ製空洞から以下の 3 点を変更した。

- ・変更①サンプル面の直径 $\phi 98$ を $\phi 86$ に変更
- ・変更②アンテナポートの内径 $\phi 16$ から $\phi 14$ に変更
- ・変更③半球と円柱の接合部を R4 とした

変更①・②は 2.8 mm 厚のニオブ材で製造する際に生じてしまう干渉を回避するための変更であり、変更③については、引出し加工で製造するための変更である。その変更後の TE₀₁₃ モードの共振状況を確認するため、電磁場シミュレーションを行った。

電磁場シミュレーションは CST Studio Suite により、Problem type 「3D Simulation High Frequency」で空洞モデルを作成し、Frequency Domain Solver で、5.0 GHz から 5.4 GHz の範囲でのシミュレーションを実施した。空洞モデルについて、Fig. 5 に示すように、空洞内は「Vacuum」、アンテナおよび Background (空洞壁に相当) は「PEC (完全導体)」を指定した。インプットアンテナをポート 1、ピックアップアンテナをポート 2 に指定した。そして、境界条件については真空ポート端面では「open」、その他では「conducting wall」とした。

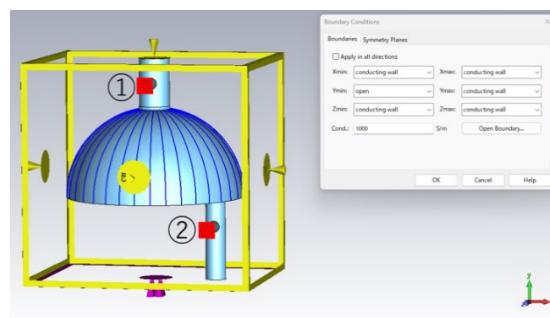


Figure 5: The Simulation Model.

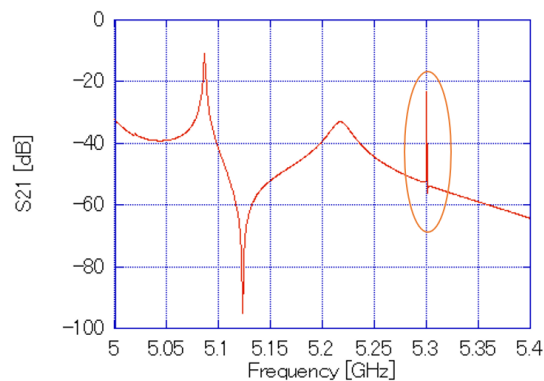


Figure 6(a): The Simulated S21 from 5.000 to 5.400 GHz.

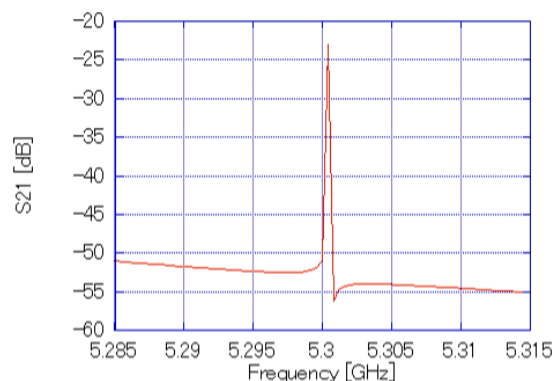


Figure 6(b): The S21 peak of TE₀₁₃ (enlarged view).

3.2 S21

Figure 6 にシミュレーションによる求めた S21 を示す。Figure 6(a) 図中の朱色の丸で囲んだ 5.300 GHz のピークが TE₀₁₃ モードのものである。そのピークを拡大した図を Fig. 6(b)に示す。室温での TE₀₁₃ モード共振試験に使用したアルミ製空洞から 3 点の空洞形状変更後も、TE₀₁₃ モードが共振されることを確認できた。ただし、サンプル面サイズの変更①により、TE₀₁₃ モードの共振周波数が 12 MHz だけ高周波側にシフトしている。

3.3 最大磁場強度

サンプル面と空洞壁内面での最大磁場強度の比を維持できているかを確認する。

3.3.1 サンプル面

まず、サンプル面での磁場分布を Fig. 7(a)に示す。磁場はサンプル面で放射状に分布することが分かる。次に、サンプル面上の横軸 (Fig. 7(b)中の青線)に沿って求めた磁場強度を Fig. 7(c)に示す。磁場強度分布は 2 山を示し、中心から 17 mm 離れた点で最大値 131.9 A/m を示した。そこで、磁場強度がサンプル面上で最大となる点を探すために、Fig. 8(a)に示した半径 17 mm の円周と、半径 17 mm の近傍で、Fig. 7(c)の通り、半径 17 mm の点と同程度の磁場強度を示していた半径 20、23 mm の円周上での磁場強度分布を求め、Fig. 8(b)に図示した。磁場強度は同一円周上でほぼ一定の値をとることが分かり、サンプル面での最大磁場は半径 17 mm の円周上での 136.7 A/m であった。ただし、半径 17 mm・20 mm・23 mm の間の磁場強度の差はわずかであったため、クエンチをモニターする温度センサーを取り付けるための $\phi 3$ mm の穴 (非貫通) を半径 20 mm の円周上に設けることとした。

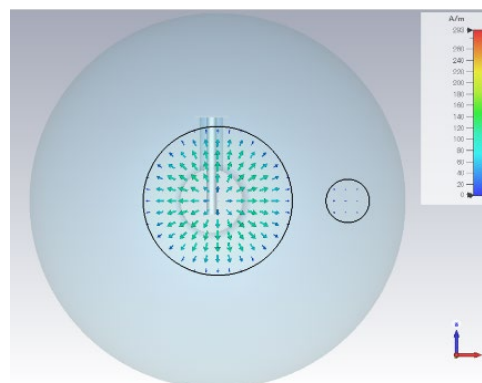


Figure 7(a): The Magnetic Field on the Sample Plate.

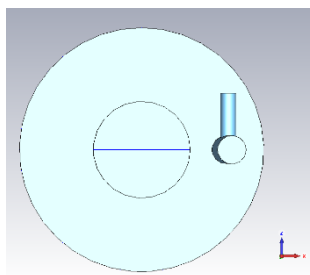


Figure 7(b): The Horizontal Line on the Sample Plate where the Magnetic Field Strength was Simulated.

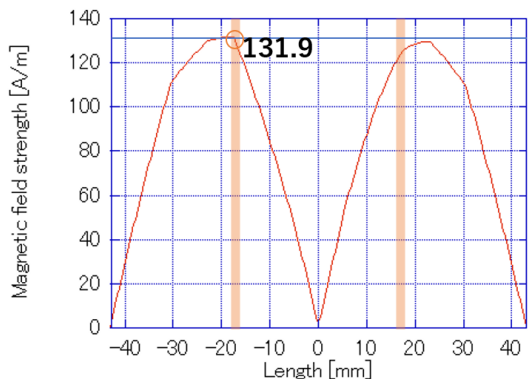


Figure 7(c): The Magnetic Field Strength along the Horizontal Line on the Sample Plate.

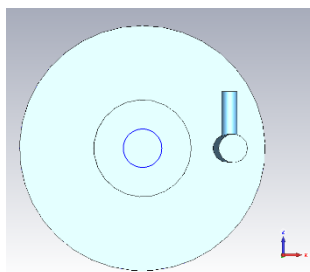


Figure 8(a): The Circle Line (R 17) on Sample Plate where the Magnetic Field Strength was Simulated.

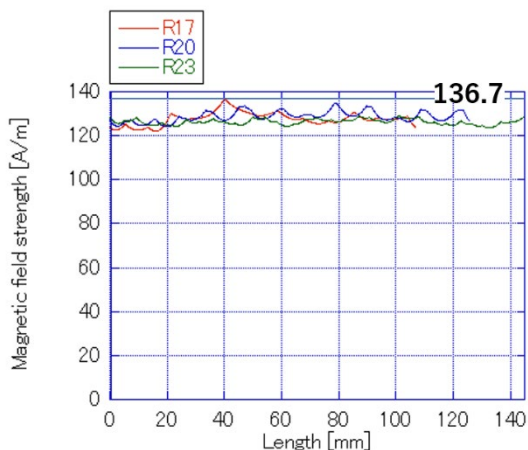


Figure 8(b): The Magnetic Field Strength along the Circle Line on the Sample Plate.

3.3.2 空洞壁内面

Figure 9(a)の通り、半球の球面に沿った線を 10° 毎に引き、その線上での磁場強度をプロットしたものが Fig. 9(b)である。空洞壁内面での最大磁場は 65.3 A/m であった。

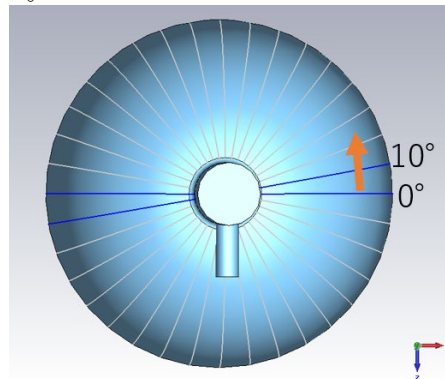


Figure 9(a): The Curves on the Hemisphere where the Magnetic Field Strength was Simulated.

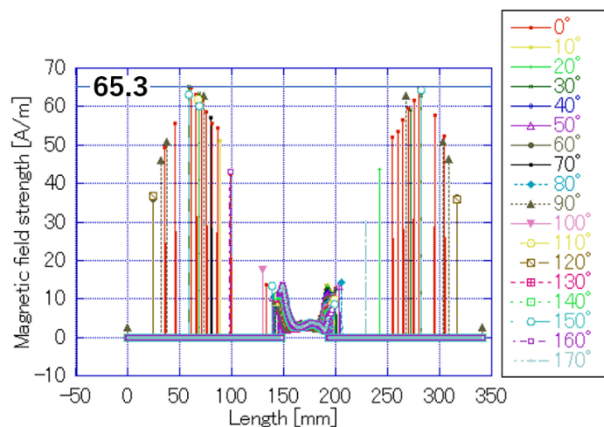


Figure 9(b): The Magnetic Field Strength along the Curves on the Hemisphere.

3.3.3 最大磁場強度の比

サンプル面での最大磁場強度が 136.7 A/m であり、空洞壁内面での最大磁場強度が 65.3 A/m であることより、2.09 倍の最大磁場強度の比を得られることを確認できた。

4. 低温試験・臨界磁場測定について

4.1 低温試験

Nb 製半球形状空洞の完成後は、まず、室温でアンテナ結合の測定を行い、アンテナ長を決める。その後、空洞の洗浄・組み立てを行い、低温試験を行う。低温試験では、真空を維持できるかの確認、4 K 程度でのネットワークアナライザによる TE_{013} の共振周波数および Q 値の測定を行う。電磁場シミュレーションより TE_{013} モードのジオメトリカルファクター G は 1397 と求められたので、5.3 GHz、4 K 時の BCS 抵抗推定計算値を使って、 $Q \sim 2 \times 10^8$ になると推定される。

4.2 臨界磁場測定

低温試験で問題がないことを確認できた後、薄膜の成

膜なしで、RF パワーを投入し、サンプル面でのクエンチを観測し、クエンチ時にサンプル面にニオブの RF 臨界磁場相当の 200 mT 程度が印加されていることを確認する。サンプル面に印加されている最大磁場強度 $H_{mea,max}$ は、電磁場シミュレーションで求めたサンプル面での最大磁場強度 $H_{sim,max} = 0.17$ [mT] (=136.7 [A/m]) とその最大磁場強度計算時の蓄積エネルギー $U_{sim} = 4.4 \times 10^{-6}$ [J] から算出した比例係数 $\alpha \equiv \frac{H_{sim,max}}{\sqrt{U_{sim}}}$ と、測定時の U_{mea} から(1)式より導出される。

$$\begin{aligned} H_{mea,max} &= H_{sim,max} \cdot \frac{\sqrt{U_{mea}}}{\sqrt{U_{sim}}} \\ &= \frac{H_{sim,max}}{\sqrt{U_{sim}}} \cdot \sqrt{U_{mea}} \\ &= \alpha \cdot \sqrt{U_{mea}} \\ &= 82 \cdot \sqrt{U_{mea}} \text{ [mT]} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 U_{mea} について、 $P = \omega U / Q$ より、

$$U_{mea} = \frac{P_{cav} Q_0}{\omega} = \frac{(P_{in} - P_{ref} - P_{pick}) \cdot Q_0}{2\pi f} \quad (2)$$

と表され、さらに、 Q_0 は空洞負荷 Q 値 Q_L 、インプットアンテナとピックアップアンテナの結合定数 β_{in} , β_{pick} を使って、(3)式と書ける。

$$Q_0 = Q_L \cdot (1 + \beta_{in} + \beta_{pick}) \quad (3)$$

Q_L は減衰時間 τ の測定より、

$$Q_L = 2\pi f \tau \quad (4)$$

で求めることができ、インプットアンテナの結合はアンダーカップリング ($\beta_{in} < 1$) のとき、

$$\beta_{in} = \frac{1 - \sqrt{\frac{P_{ref}}{P_{in}}}}{1 + \sqrt{\frac{P_{ref}}{P_{in}}}} (1 + \beta_{pick}) \quad (5)$$

であり、ピックアップアンテナの結合定数 β_{pick} は

$$\beta_{pick} = \frac{P_{pick}}{P_{cav}} = \frac{P_{pick}}{P_{in} - P_{ref} - P_{pick}} \quad (6)$$

のため、

$$\begin{aligned} Q_0 &= 2\pi f \tau \left(1 + \frac{1 - \sqrt{\frac{P_{ref}}{P_{in}}}}{1 + \sqrt{\frac{P_{ref}}{P_{in}}}} (1 + \beta_{pick}) + \beta_{pick} \right) \\ &= \frac{4\pi f \tau}{1 + \sqrt{\frac{P_{ref}}{P_{in}}}} (1 + \beta_{pick}) \\ &= \frac{4\pi f \tau}{1 + \sqrt{\frac{P_{ref}}{P_{in}}}} \left(1 + \frac{P_{pick}}{P_{in} - P_{ref} - P_{pick}} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

となり、ここで、 f , τ , P_{in} , P_{ref} , P_{pick} は測定できる値であるので、 Q_0 , U_{mea} 、そして、 $H_{mea,max}$ を算出できる。

5. 結論・今後の展望

Nb 製半球形状空洞の設計を完了した。Nb 製半球形状空洞の製造完了後、アンテナの長さを決め、低温試験を行う。そのために、低温試験に向けて、必要となる治具・センサー類の準備を進めていく。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 22K18128 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] A. Hattori *et al.*, “臨界磁場測定用半球形状空洞のアルミ製モデルでの TE013 モード励振試験”, Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Funabashi, Aug. 29- Sep. 1, 2023, pp. 636-639.
- [2] A. Hattori and H. Hayano, “臨界磁場測定用半球形状空洞のアンテナ設計”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, online (Kyusyu University), Oct. 18-21, 2022, pp. 456-460.
- [3] H. Oikawa *et al.*, “Note: Design and resonant condition measurement of the mushroom-shaped Al test cavity for critical magnetic field evaluation of superconducting thin-film sample”, Review of Scientific Instruments 89, 076102, 2018.