

# 超伝導薄膜研究用ニオブ製 3 GHz シングルセル空洞の基本特性測定 BASIC CHARACTERISTICS MEASUREMENT OF NIOBIUM 3 GHz SINGLE-CELL CAVITY FOR SUPERCONDUCTING THIN FILM RESEARCH

不破康裕 <sup>\*,A)</sup>, 服部綾佳 <sup>B)</sup>, 井藤隼人 <sup>C)</sup>, 岩下芳久 <sup>D)</sup>, 片山領 <sup>C)</sup>, 久保毅幸 <sup>C)</sup>, 佐伯学行 <sup>C)</sup>

Yasuhiro Fuwa <sup>\*,A)</sup>, Ayaka Hattori <sup>B)</sup>, Hayato Ito <sup>C)</sup>, Yoshihisa Iwashita <sup>D)</sup>,

Ryo Katayama <sup>C)</sup>, Takayuki Kubo <sup>C)</sup>, Takayuki Saeki <sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency

<sup>B)</sup> National Institute of Technology, Ibaraki College

<sup>C)</sup> High Energy Accelerator Research Organization

<sup>D)</sup> Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

## Abstract

Theoretical predictions of improved performance by introducing a thin-film structure into superconducting cavities require experimental verification. In this study, we are developing a relatively small and easy-to-handle 3 GHz single-cell cavity made of niobium to verify the effect of introducing a thin-film structure. The 3 GHz single-cell cavity was subjected to standard chemical and electropolishing treatments, and vertical measurements were performed as a high-frequency characteristic test in a liquid helium temperature environment to obtain basic data before the introduction of the thin-film structure. In this presentation, we will report the internal surface treatment method and the configuration of the longitudinal measurement test facility for the 3 GHz cavity, as well as the measurement results of the basic high-frequency characteristics of the 3 GHz cavity.

## 1. はじめに

超伝導加速空洞の加速勾配向上は次世代加速器のための技術として重要な課題となっている。これまでの超伝導加速空洞の材料にはニオブが用いられてきたが、近年の勢力的な研究開発によりニオブの超伝導臨界磁場に対応する電磁界強度に近い領域までマイクロ波を蓄積することがすでに達成されており、45 MV/m に及ぶ加速勾配の達成が報告されている。現状はこの値を上回るための手法が模索されており、近年の理論的な解析においてニオブ製超伝導空洞の内面に絶縁体及び Nb<sub>3</sub>Sn などの臨界磁場の高い超伝導層を持つ薄膜構造を適切な厚さで成膜することにより最大加速勾配が飛躍的に増加できることが予測されている [1]。この理論予測を実験的に検証することが喫緊の課題となっている。

## 2. ニオブ製 3 GHz シングルセル空洞

超伝導薄膜構造による空洞性能向上の検証における課題の 1 つとして、複雑な形状を有する空洞内面に均一な薄膜を形成することが挙げられる。成膜の手法としてはマグネトロンスパッタ法 [2] や原子層堆積法などを検討しているが、いずれの手法においても成膜条件の探索において試行回数を多く必要とすることが予測される。そのため、通常の楕円型加速空洞に用いられる 1.3 GHz と比較して高い周波数を用いる小型の 3 GHz シングルセル空洞を開発した。Figure 1 に薄膜構造の研究のために製作した 3 GHz シングルセル空洞の写真を示す。この空洞にはフランジ部の仕様が異なる 2 種類があり、それぞれフランジ部がニオブ製 (写真左側) とニオブチタン製 (写真右側) となっている。

本稿では、ニオブフランジを有する 3 GHz シングルセル空洞の基本特性を測定するための表面処理方法及び 2 K における縦測定の結果を報告する。



Figure 1: Photograph of 3 GHz single-cell cavities.

## 3. 3 GHz 空洞の表面処理工程

3 GHz 空洞の基本的な特性を測定するにあたり、表面処理工程を確立する必要があった。ニオブ製超伝導加速空洞の表面処理については、ILC (International Linear Collider) 用空洞の表面処理のために多くの研究が重ねられたために、ILC レシピと呼ばれる標準的な処理工程が確立されている。そこで本研究ではこの ILC レシピに準ずる処理工程として、以下のステップを用いることとした。

\* yfuwa@post.j-parc.jp

- 化学研磨; BCP (厚さ: 30  $\mu\text{m}$ )
- 電解研磨 1; EP1 (厚さ: 100  $\mu\text{m}$ 、温度: 50  $^{\circ}\text{C}$  以下)
- アニール (温度: 900  $^{\circ}\text{C}$ 、3 時間)
- 電解研磨 2; EP2 (厚さ: 30  $\mu\text{m}$ 、温度: 20  $^{\circ}\text{C}$  以下)
- HPR; High Pressure Rinsing
- ベーキング (温度: 120  $^{\circ}\text{C}$ 、48 時間)

電解研磨においては、Fig. 2 に示すような縦型電解研磨設備を新たに構築した。3 GHz 空洞の電解研磨に関する詳細は参考文献 [3] に記述されている。

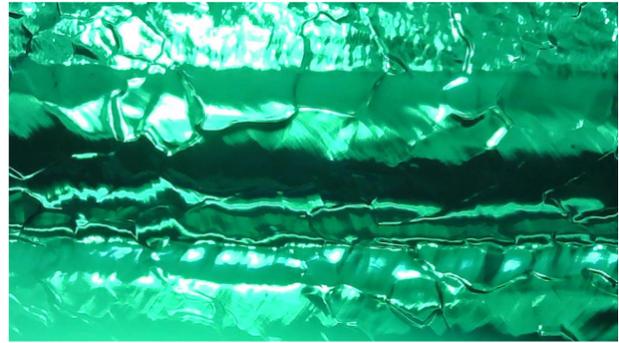


Figure 3: Photograph of equator-region inner surface after EP.



Figure 2: Photograph of vertical EP setup for the 3 GHz cavity.

Figure 3 は、電解研磨処理後の赤道部内面の写真である。気泡の跡などが残ることなく清浄に研磨が進行したことがわかる。

なお、1 段階目の電解研磨の後に内面を観察したところ、アイリス部に欠陥が見つかった。この欠陥は局所的に機械研磨することにより除去することができた。

## 4. 縦測定

### 4.1 測定の概要

前節に記述した表面処理を施した空洞の高周波特性を計測するために、縦測定を実施した。この測定は KEK STF 施設の縦測定ピットを使用し、減圧により 2K まで冷却した液体ヘリウム温度において実施した。測定に使用した機材のブロックダイアグラムを Fig. 4 に示す。

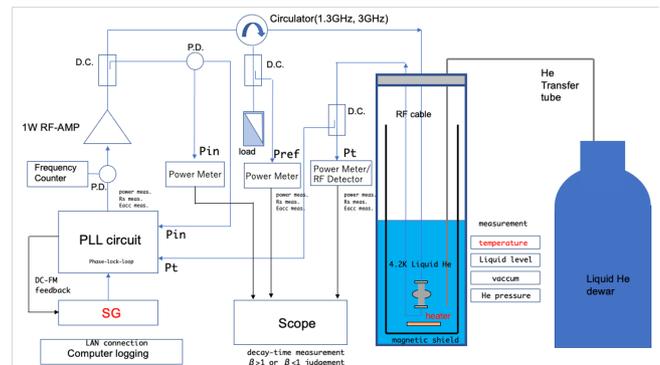


Figure 4: Block diagram for vertical test.

縦測定において空洞には入力ポート及びピックアップポートとなる 2 つのアンテナをセットした。それぞれのアンテナのカップリングは、その長さを変数とする電磁場解析から  $Q_{in} \sim 10^{10}$ 、 $Q_{pick} \sim 10^{11}$  程度と見積もっている。

また、組み立て後の空洞には縦測定時に温度計測のためのセルノックス抵抗を赤道部に 4 箇所とビームパイプ部に設置した。また、捕捉磁場計測用のフラックスゲートセンサーを赤道部に設置した。各種センサー設置後の空洞の写真 Fig. 5 に示す。



Figure 5: Assembled 3 GHz cavity for a vertical test.

#### 4.2 試験結果

2 K 冷却時において、周波数 2.983 952 GHz において空洞の共振を検出した。その後、空洞への投入電力を徐々に増加させて、高周波入力停止時のピックアップ検出電力の減衰を計測することで Q 値を推定した。測定結果となる Q-E 曲線を Fig. 6 に示す。今回用いたセットアップでは、PPL フィードバックを用いて励振周波数を変調することで共振を追従することを予定していたが、PPL フィードバック部の不具合によりフィードバックを確立することができず安定した共振状態でデータを取得することができなかった。したがって計測精度には改善の余地を有するが  $Q_0 \sim 10^9$  程度の結果が得られ、推定加速勾配  $E_{acc} \sim 22$  MV/m が得られた。 $E_{acc} \sim 20$  MV/m 以上の領域では、縦測定ピットに設置した X 線センサーに信号が検出され電界放出が起こっていたことが確認された。また、 $E_{acc} \sim 22$  MV/m の領域では、赤道部に設置した温度センサーが温度上昇を検出し、クエンチと見られる現象が確認された。

今後 PPL フィードバック回路の改修や、温度及び X 線などの検出データのマッピングシステムを確立し、より正確にデータを取得することでデータの信頼性向上と電界放出やクエンチの詳細分析を実施することとしている。

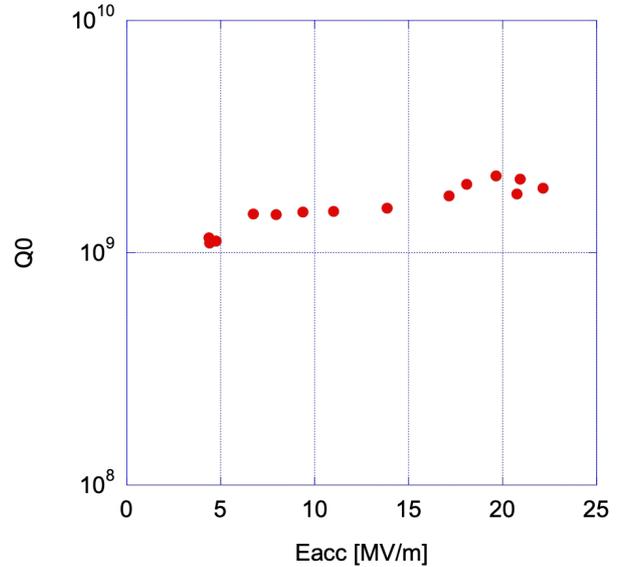


Figure 6: Preliminary data of measured Q-E curve.

#### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JSPS 22K03652, 23H00125, 25K03398 の助成及び、東レ科学技術研究助成を受けたものです。また、研究の遂行にあたり助力をいただいた KEK iCASA 超伝導空洞グループの皆様、京都大学化学研究所 頓宮拓氏、株式会社 TRST 飯竹真之氏、関東情報サービス株式会社 早川厚氏、株式会社 NovAccel 早野仁司氏らに感謝いたします。

#### 参考文献

- [1] T. Kubo *et al.*, “Radio-frequency electromagnetic field and vortex penetration in multilayered superconductors”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 104, 032603, 2014.
- [2] T. Sasaki *et al.*, “超伝導加速空洞における積層薄膜構造の研究”, *Proceedings of the 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, FRP050, 2024.
- [3] K. Nii *et al.*, “3 GHz ニオブ単セル空洞の縦型電解研磨”, *The 22nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, WEP054, 2025, this meeting.