

3GHz ニオブ単セル空洞の縦型電解研磨

VERTICAL ELECTRO-POLISHING OF A 3GHz NIOBIUM SINGLE-CELL CAVITY

仁井 啓介^{#,A)}, 上田 英貴^{A)}, 山口 隆宣^{A)}, 片山 領^{B)}, 佐伯 学行^{B)}, 不破 康裕^{C)}
Keisuke Nii^{#,A)}, Hideki Ueda^{A)}, Takanori Yamaguchi^{A)}, Ryo Katayama^{B)}, Takayuki Saeki^{B)}, Yasuhiro Fuwa^{C)}

^{A)} Marui Galvanizing Co., Ltd.

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

^{C)} Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

Abstract

In the manufacture of niobium superconducting cavities, electro-polishing (EP) is used as a surface treatment to improve performance. Marui Galvanizing Co., Ltd. has previously worked with KEK, CEA Saclay, and Cornell University to develop Ninja cathodes and EP equipment for vertical electro-polishing (VEP) of niobium accelerating cavities of 1.3 GHz single cell, 1.3 GHz 9 cell, and 704 MHz single cell, and has achieved good acceleration performance by identifying optimal conditions for VEP, implementing, and evaluating them. This time, in collaboration with KEK, we have carried out VEP on a 3 GHz single cell cavity. The 3 GHz single cell cavity is a small cavity with a total length and cell diameter that is about half that of the conventional 1.3 GHz single cell cavity. We have fabricated a Ninja cathode and VEP setup for this cavity and carried out VEP, and we report the results here.

1. はじめに

超伝導加速器に用いられるニオブ製加速空洞は性能向上のため内面に電解研磨 (EP) 処理が施される。国際リニアコライダー (ILC) では約 8000 本のニオブ製加速空洞が必要となるため、高効率かつ高品質な EP 法が求められている。これを実現する一つの方法として、縦型電解研磨 (VEP) が提唱されている。VEP は空洞を縦向きに配置して EP する方法で、空洞を横向きに配置する横型電解研磨 (HEP) に比べて設備が簡便、研磨速度が速い等の利点があると言われている[1]。

マルイ鍍金工業ではこれまでに VEP に適した電極であるニンジャカソードを開発し、KEK、CEA-Saclay、コーネル大学等と共同で 1.3 GHz 単セル空洞、1.3 GHz 9 セル空洞、704 MHz 単セル空洞の VEP と性能評価を実施してきた[1-5]。

今回、これまで VEP してきたものとは形状の異なる 3 GHz 単セル空洞のバルク VEP (VEP1) と仕上げ VEP (VEP2) を KEK、JAEA と共同で実施したのでその結果を報告する。

2. 3 GHz 単セル空洞

これまでに VEP を実施してきた 1.3 GHz 単セル空洞と今回新たに VEP を実施する 3 GHz 単セル空洞の外観写真を図 1 に、サイズ等の比較を表 1 に示す。3 GHz 単セル空洞は 1.3 GHz 単セル空洞に比べて最大径、最大長さが約 45% 程度、空洞内面の表面積が約 25% 程度、空洞重量が約 36% 程度、空洞内容量が約 12% 程度の小型となっている。EP 作業としては小型の空洞であるため運搬やセッティングが容易になる、EP 液の液量が少

量でよい等のメリットがある一方、電極挿入、取り出し時にスペースに余裕がなく空洞内面と電極が接触しやすくなるデメリットがあると考えられる。



Figure 1: Photo of a 3 GHz and a 1.3 GHz single-cell cavity.

Table 1: Comparison of 3 GHz and 1.3 GHz Single-Cell Cavity

	3 GHz 単セル	1.3 GHz 単セル
最大径 (外径)	95 mmΦ	210 mmΦ
最大長さ (長軸)	170 mm	380 mm
空洞内表面積	300 cm ²	1200 cm ²
空洞重量	2.2 kg	6.0 kg
空洞内容量	0.4 L	3.2 L

[#] keisuke_nii@e-marui.jp

3. 縦型電解研磨のセットアップと条件

3 GHz 単セル空洞用の VEP セットアップの基本構成は 1.3 GHz 単セル空洞 VEP のセットアップと同様であるが、空洞形状が変わることに対応してニンジャカソードや出入口ピースは 3 GHz 単セル空洞専用のものを新規に設計、作製した。さらに使用する配管、ホース類やダイヤモンドポンプも空洞が小型になることに対応して小径、小型の物を使用した。

作業手順も従来とほぼ同様で、EP 液循環、ニンジャカソード回転→電源 ON、EP 開始→電源 OFF、EP 終了→EP 液排出→洗浄水注入、排出（繰り返し）→セットアップ解体、空洞取り外し→空洞超音波洗浄、という手順で VEP を行った。

VEP 条件については、電圧 18 V 程度、ニンジャカソード回転数 20 rpm は従来と変更せず実施したが、EP 液流量は配管径や空洞が小さく、細くなったことを考慮して従来の~5 L/min から~2 L/min へと減少させた。今回の VEP セットアップと手順の模式図を図 2 に、セットアップの写真を図 3 に示す。

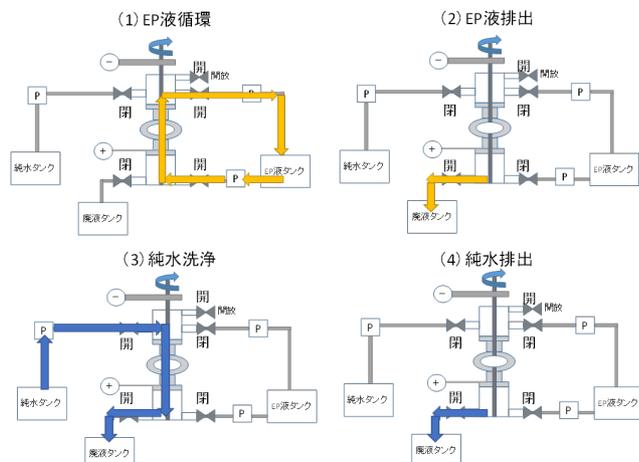


Figure 2: Schematics of the VEP setup and procedure.



Figure 3: Photos of the VEP setup.

4. 3 GHz ニオブ単セル空洞の縦型電解研磨

4.1 バルク VEP (VEP1)

3 GHz ニオブ単セル空洞のバルク VEP (VEP1) は目標研磨量を 100 μm とした。空洞温度は 50°C 以下に保つこととし、そのためにスポットクーラーの冷風による空洞空冷を行った。EP 実施中の写真を図 4 に示す。



Figure 4: The whole setup and the bubbles during VEP1.

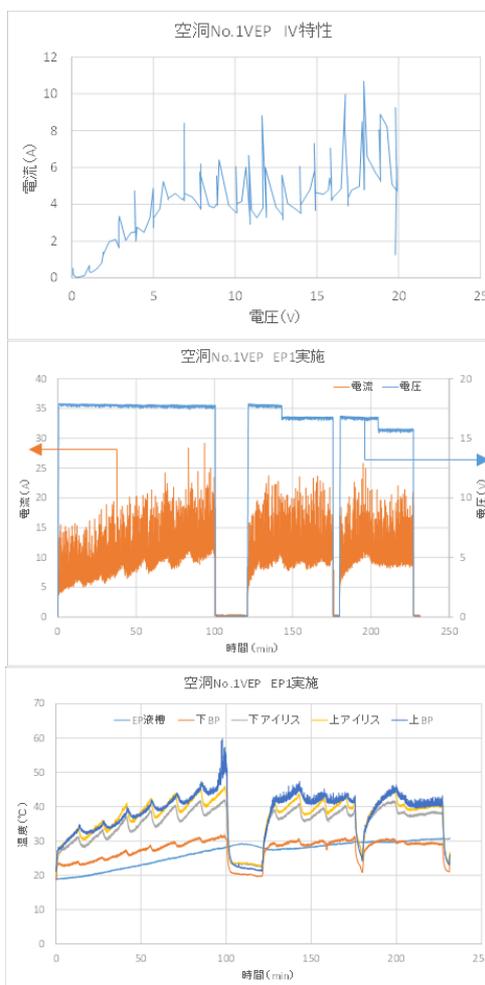


Figure 5: IV curve, voltage, current, temperature of VEP1.

EP 液を循環後、EP 前に IV 特性の測定を行い、プラトー領域と電流の振動を確認した。その後、電圧 18 V を印加し EP をスタートした。IV 特性、EP 中の電流電圧、空洞と EP 液温度のログデータを図 5 に示す。

18 V 印加で電流は 5~20 A 程度であった。空洞温度は途中冷却のための EP 休止もあったが、概ね 50°C 以下でコントロール出来ていた。EP 中の研磨量は積算電流によって確認しており、上記電流での 100 μm 研磨で研磨時間は約 3 時間 50 分程度であった。

空洞 EP、水洗後に研磨量の確認と内面観察を行った。研磨量は超音波厚さ計にて研磨前後の厚さの差し引きで算出した。内面観察は目視と内視鏡カメラにて行った。研磨量分布を図 6 に、内面観察結果を図 7、8 に示す。

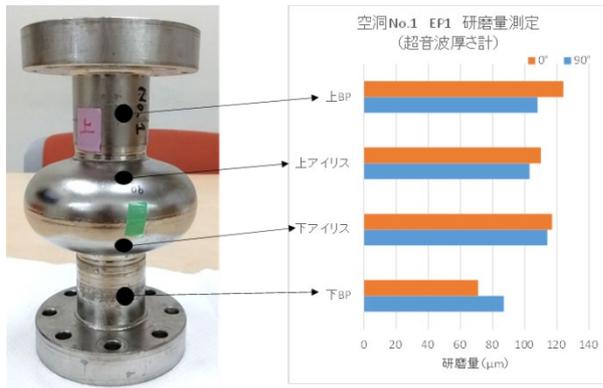


Figure 6: Removal thickness distribution of VEP1.

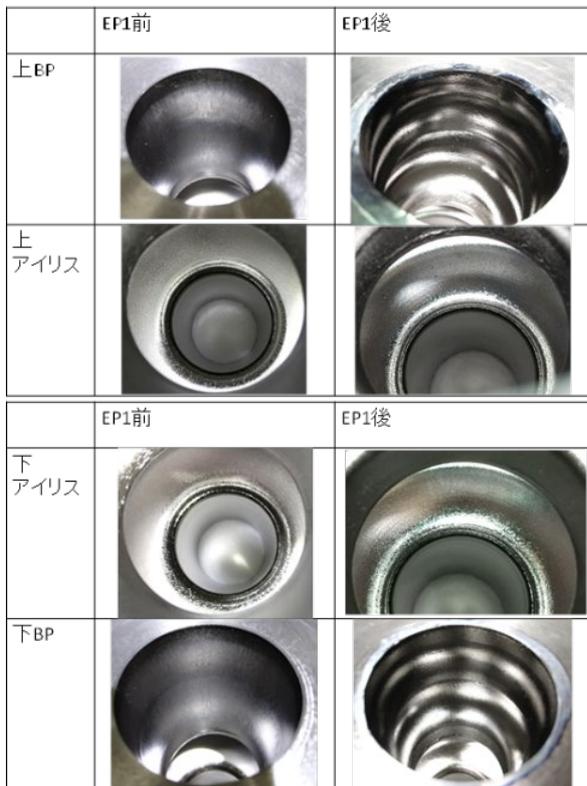


Figure 7: Observation of the inside of the cavity (VEP1).

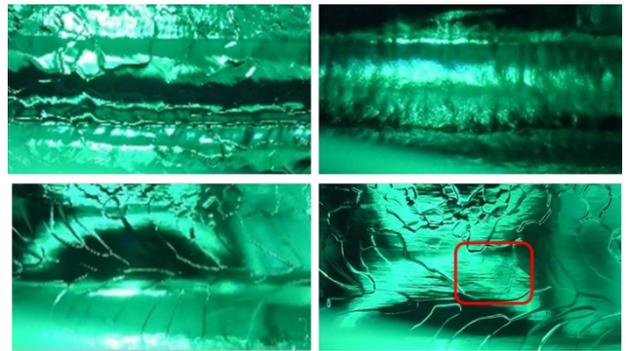


Figure 8: Endoscopic observation of the inside of the cavity (VEP1).

研磨量分布は、下のビームパイプの研磨量がやや少ないものの、セル部分は上下でほとんど差がなく、均一に研磨できていた。重量減少から算出した平均研磨量は約 105 μm でほぼ狙い通りの研磨量となっていた。内面は研磨前に比べてややざらつき感が出て光沢が大きく向上していた。内視鏡観察では、概ねきれいな表面となっていたが、一部に気泡跡やシミのようなものが見られた(図 8 右下)。

4.2 仕上げ VEP (VEP2)

KEK にてアニール、気泡跡やシミの除去を行った後、仕上げ VEP (VEP2) を実施した。VEP2 は目標研磨量 30 μm とした。空洞温度は 20°C 以下に保つこととし、冷却水シャワーによる空洞の水冷を行った。EP 実施中の写真を図 9 に示す。



Figure 9: The whole setup and the bubbles during VEP2.

VEP1 と同様に IV 特性を確認した後、電圧を 18 V に設定して EP をスタートした。EP 前の IV 特性、EP 中の電流電圧、空洞と EP 温度を図 10 に示す。

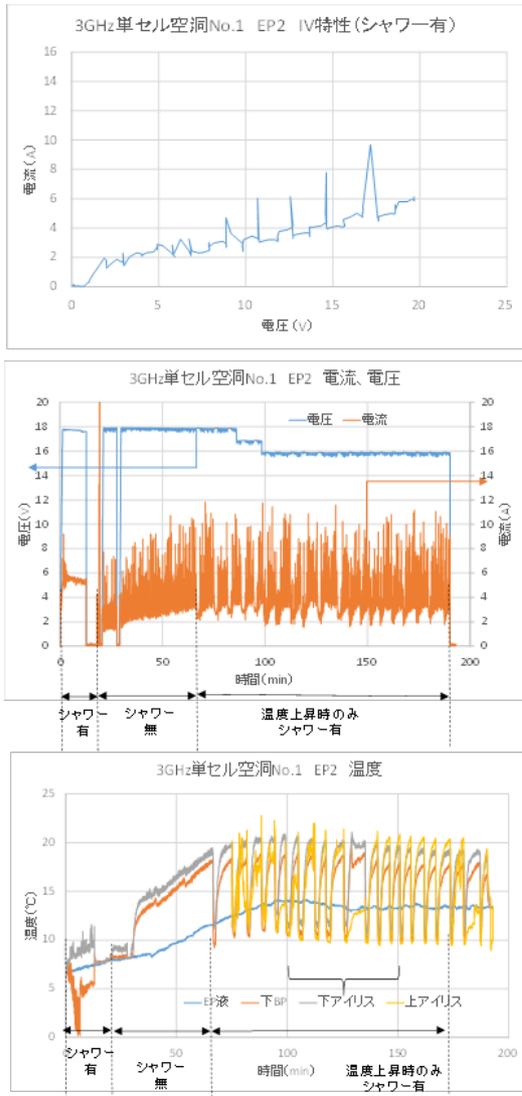


Figure 10: IV curve, voltage, current, temperature of VEP2.

空洞水冷については、開始直後は連続的にシャワーしていたが、途中から温度が上昇したときのみのシャワーに変更した。EP 中の電流は 2~10 A 程度、空洞温度は概ね 10~20°C であった。30 μm の研磨で研磨時間は約 3 時間 10 分程度であった。

VEP1 と同様に研磨後に研磨量測定と内面観察を行った。VEP2 では仕上げ EP のため内面をできるだけ触らないようにし、観察は目視観察のみとした。研磨量測定結果を図 11 に、内面観察結果を図 12 に示す。研磨量測定法等は VEP1 と同様である。結果研磨量に上下の差はあまりなく、均一に研磨出来ていた。重量減少から算出した平均研磨量は約 31 μm でほぼ狙い通りであった。内面は光沢感が増加し、きれいな表面となっていた。

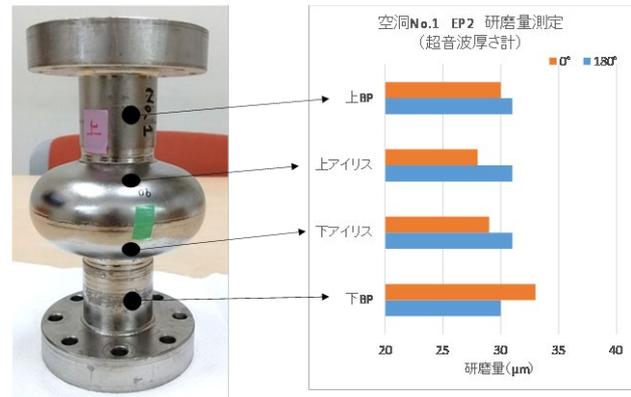


Figure 11: Removal thickness distribution of VEP2.

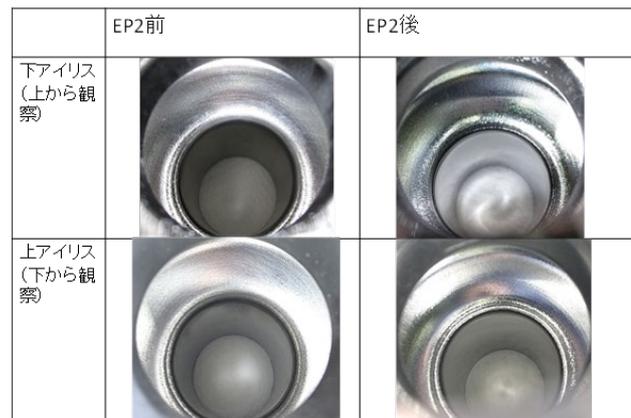


Figure 12: Observation of the inside of the cavity (VEP2).

5. まとめ

これまでに VEP してきた空洞と形状の異なる 3 GHz 単セル空洞の VEP を KEK, JAEA と共同で実施した。3 GHz 単セル空洞専用の VEP セットアップ、ニンジャカソード等を作製し、1.3 GHz 単セル空洞の EP 条件をベースにバルク VEP (VEP1) と仕上げ VEP (VEP2) を実施した。

バルク VEP は目標研磨量 100 μm とし、空洞を空冷して実施した。IV 特性でプラトー領域と電流の振動を確認した。電圧 18 V で電流 5~20 A 程度であった。研磨量分布は均一で平均研磨量もほぼ狙い通りであった。内面は光沢感が大きく向上し、ややざらつき感があった。

仕上げ VEP は目標研磨量 30 μm とし、空洞を水冷して実施した。電圧 18 V で電流 2~10 A 程度であった。研磨量分布は均一で平均研磨量もほぼ狙い通りであった。内面は光沢感が増加していた。

今回の VEP1, VEP2 は概ね良好な結果であったと考えているが、各パラメータはまだ最適化されたものではない可能性がある。そのため、今後引き続き VEP を行う場合はパラメータ最適化の検討が必要である (特にカソード回転数と EP 液流量)。さらに今後 9 セル等のマルチセル VEP の要求があった場合は専用セットアップ、カソードの作製やパラメータ最適化が必要となる。

参考文献

- [1] K. Nii *et al.*, “Achievement of uniform removal and high cavity accelerating performance on Niobium accelerating cavity vertical electro-polishing with Ninja cathode” Proceedings of PASJ2019, Kyoto, Japan, Aug., 2019, pp. 27-31 (WEOH05).
- [2] K. Nii *et al.*, “1.3GHz Nb single cell cavity vertical electro-polishing with Ninja cathode and evaluation of accelerating gradient performed by Marui Galvanizing-KEK-CEA Saclay” Proceedings of PASJ2018, Nagaoka, Japan, Aug., 2018, pp. 447-450 (WEP053).
- [3] K. Nii *et al.*, “Nb single cell cavity vertical electro-polishing and evaluation of accelerating gradient in collaboration with Marui Galvanizing-KEK-Cornell University” Proceedings of PASJ2017, Sapporo, Japan, Aug., 2017, pp. 408-410 (TUP039).
- [4] F. Eozenou *et al.*, “Vertical electro-polishing of 704 MHz resonators using Ninja cathode: first results” Proceedings of SRF2021, East Lansing, MI, USA, June, 2021, pp. 431-434 (TUPCAV001).
- [5] F. Eozenou *et al.*, “Vertical electro-polishing of 704 MHz resonators using Ninja cathode: Gradient over 40 MV/m achieved on single-cell ESS cavity” Proceedings of LINAC2022, Liverpool, UK, Aug., 2022, pp. 853-856 (THPOGE23).