

1/4 波長型超伝導空洞の内面電解研磨の実施報告(2)

REPORTS OF ELECTRO-POLISHING IMPLEMENTATION FOR QUARTER-WAVE RESONATORS (2)

仁井 啓介^{#,A)}, 井田 義明^{A)}, 上田 英貴^{A)}, 山口 隆宣^{A)}, 株本 裕史^{B)}, 神谷 潤一郎^{B)}, 近藤 恭弘^{B)},
田村 潤^{B)}, 原田 寛之^{B)}, 松井 泰^{B)}, 松田 誠^{B)}

Keisuke Nii^{#,A)}, Yoshiaki Ida^{A)}, Hideki Ueda^{A)}, Takanori Yamaguchi^{A)}, Hiroshi Kabumoto^{B)}, Junichiro Kamiya^{B)},
Yasuhiro Kondo^{B)}, Jun Tamura^{B)}, Hiroyuki Harada^{B)}, Yutaka Matsui^{B)}, Makoto Matsuda^{B)}

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

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

Abstract

Marui Galvanizing Co., Ltd. and JAEA are jointly studying resurface treatment of quarter-wave resonator (QWR) for superconducting booster of Tokai Tandem Accelerator. This cavity is made of niobium-copper clad plate and has a large opening at the bottom, so it has a structure that allows re-electro-polishing. In the resurface treatment, the goal is to reduce the surface roughness by applying electro-polishing (EP) to the inner surface niobium so that a high accelerating electric field (5 MV/m or more) can be generated. In 2020, EP was applied to the spare cavity using various EP parameters that obtained from the experience of Niobium 9 cell cavity EP at Marui and electrodes, jigs, etc. that are owned by JAEA. The niobium surface after EP became glossy but the surface roughness was not good. The accelerating electric field was better than before EP but it didn't reach the target value. In 2021, to improve niobium surface roughness and accelerating electric field of cavities, EP experiments with improved parameters (electrode area, voltage, flow rate and agitation) were performed and equipment, conditions, surface roughness etc. were evaluated. In addition, we also widely observed the inner surface of the drift tube part of the center conductor, which we had not observed so far. We will report these results.

1. はじめに

原子力機構の東海タンデム加速器では、重イオンビームを用いた核物理・核化学・材料照射などの研究が行われている[1]。タンデム後段にはビームのエネルギーを2~3倍に増加させるための超伝導ブースターが設置されている。この超伝導ブースターの仕様は型式:同軸1/4波長型共振器(QWR)、最適ビーム速度:光速の10%、加速電界:5 MV/m@4 Wである。超伝導ブースターは現在休止中で、再稼働に向けた取り組みが行われている。

このQWR空洞は底部に大きな開口があるため、組立後の表面再処理が可能である。これまでに性能の向上、安定などを目的として電解研磨(EP)、陽極酸化、プラズマスパッタリング等をはじめとする表面処理が研究、適用されてきた[2-4]。

マルイ鍍金工業ではこれまでに、原子力機構(JAEA)と共同でQWR空洞の予備機を用いて内面ニオブEP実験に取り組んできた。2020年度の実験では、EP後に表面の光沢は増すが表面粗さの数値はあまり改善しない、空洞性能もEP前に比べて改善するが、標準値には達していない結果となった[5]。今回(2021年度)はさらなる表面状態の改善を目指して、いくつかのパラメータを変えてのEP実験と表面状態の評価を行った。

2. 電解研磨実験

今回、パラメータとして、①陰極面積増加、②電圧増加、③液流量増加+空洞揺動、の三つに着目してEP実験を行った。EPセットアップは基本的には前回と同様である[5]。EPセットアップの模式図とEP時の空洞写真をFig.1に示す。

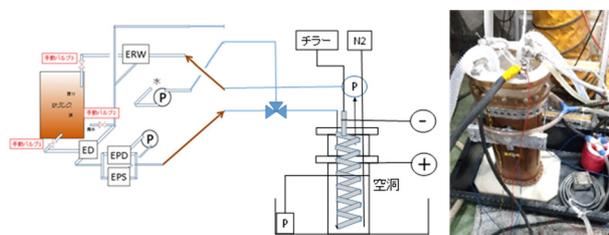


Figure 1: A schematic and a photo of QWR cavity EP setup.

2.1 陰極面積増加

EPでは一般に、被研磨物(陽極)の表面積に比べて対向電極(陰極)の表面積が小さくなりすぎる場合は、電流密度が下がってしまい良好なEPがかからない場合があり、できるだけ陰極の表面積が大きいほうが望ましいとされる。そこで表面改善の手法の1つとして陰極面積を増加させた場合の影響を確認した。陰極面積増加はこれまでに使用していたコイル状の陰極に新たに補助電極を追加することにより実施した。この補助電極追加により陰極面積は約30%増加した。補助電極追加の模式図

[#] keisuke_nii@e-marui.jp

を Fig. 2 の左上に示す。また、EP 時の電流電圧、空洞温度、EP 液流量をそれぞれ Fig. 2 の右上、左上、右下に示す。電圧は $\sim 20\text{V}$ (連続印加)、電流は $50\sim 70\text{A}$ 、空洞温度は $\sim 11^\circ\text{C}$ 、EP 液流量は $12\sim 14\text{L/min}$ 、EP 時間は連続で $\sim 220\text{min}$ であった。

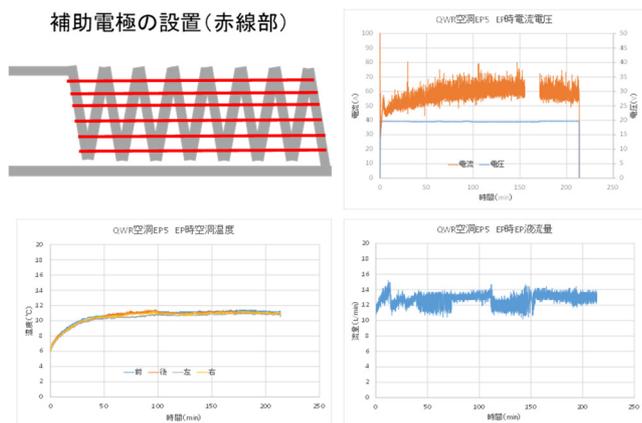


Figure 2: A schematic of auxiliary electrode and trend graphs of EP current, voltage, cavity temperature, flow rate.

EP 中の ON 時平均電流をこれまでの実験[5]と比較した結果を Table 1 に示す。比較的溫度などの条件が近い第 2 回と比較すると ON 時平均電流は約 20%増加していた。ただし、電流は EP 液の溫度や状態、空洞溫度などの影響も受けやすいため、一概に陰極面積増加の効果が出たかどうかは断言できない。EP 後に内面の外観や表面粗さを評価した結果(詳細は第 3 章にて)、顕著な改善は見られなかったため、次回以降の EP は補助電極を取り除いた元の状態の陰極を使用した。

Table 1: Average Current and EP Condition of Each EP Experiments

	ON時 平均電流	平均 空洞温度	平均 EP液温度	電圧	電圧印加	EP液
第1回	125.4A	34.9°C	19.6°C	18V	半連続	USED
第2回	47.4A	10.1°C	9.2°C	20V	間欠	NEW
第3回	61.0A	12.1°C	11.1°C	20V	連続	USED
第4回	66.4A	11.5°C	8.6°C	20V	間欠	NEW
第5回 (今回)	57.3A	10.6°C	9.8°C	20V	連続	NEW

2.2 電圧増加

EP 時の電圧はこれまで使用できる電源の関係で、 $0\sim 20\text{V}$ で行ってきた。この範囲で IV 特性を確認すると、 20V はプラトー領域に入っていた。IV 特性では電圧を上げて行くとプラトー領域から過不働態領域に入り電流が増加するが、この領域が何 V から発生するかわかっていなかった。また、プラトー領域の範囲では高い電圧で EP するほど表面が改善する傾向があった。そこで、電圧を 30V まで増加し、IV 特性よりプラトー領域、過不働態領域を確認するとともにプラトー領域上限の電圧で EP を行うことにより表面状態の改善を試みた。

$0\sim 30\text{V}$ の範囲で IV 特性を測定した結果を Fig. 3 に

示す。電流は 25V あたりから急激に増加していた。これよりプラトー領域と過不働態領域の境目は 25V と考え、 25V で EP を実施した。EP 中の電流電圧、空洞温度、EP 液流量をそれぞれ Fig. 4 の上段、中段、下段に示す。電圧は $\sim 25\text{V}$ (間欠印加、 $1\text{min-ON}/1\text{min-OFF}$)、電流は $40\sim 100\text{A}$ 、空洞温度は $\sim 10^\circ\text{C}$ 、EP 液流量は $\sim 10\text{L/min}$ 、EP 時間は間欠で $\sim 330\text{min}$ であった。

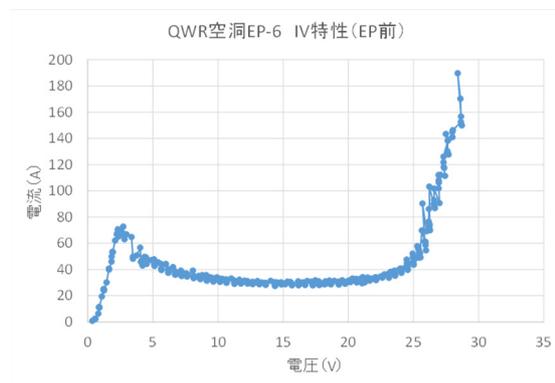


Figure 3: I-V curve of this EP.

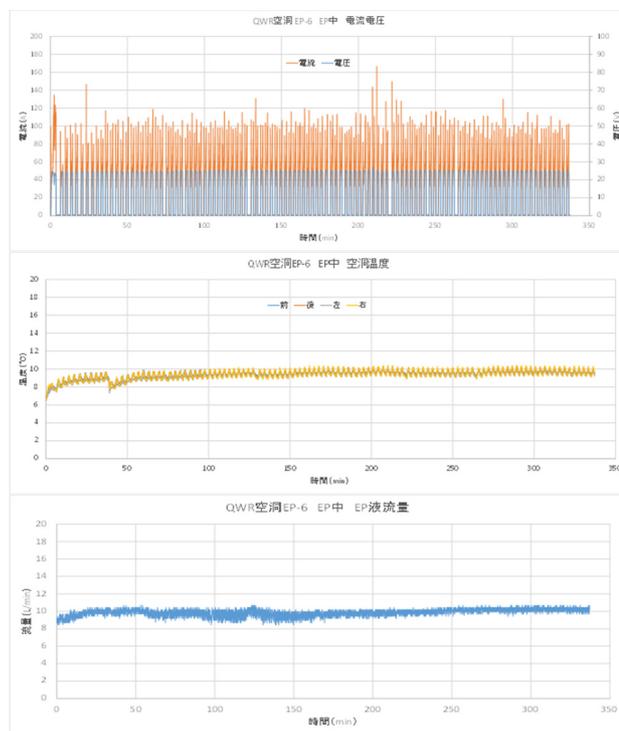


Figure 4: Trend graphs of EP current, voltage, cavity temperature, and flow rate.

EP 後に内面の外観や表面粗さを評価した結果(詳細は第 3 章にて)、顕著な改善は見られなかった。また、 25V での EP は空洞、EP 液の溫度が上がりやすく現在の冷却機構では長時間連続で電圧印加できないという問題があった。そのため、今回は従来の 20V で EP を行うこととした。

2.3 流量増加+空洞揺動

EP においては、被研磨物を EP 中に揺動することがよく行われている。これは、揺動することにより被研磨物表面の EP 液が揺れて表面に付着した水素の気泡を除去する、粘性層が EP 液に溶解しやすくなるなど、表面状態が改善すると言われているためである。また、EP 液の流量を増加すると EP 液の揺れが増加し同様の効果が得られると考えた(ただし、流量が大きすぎると EP 後の表面に液が流れたような跡がつくことがある)。空洞の揺動は EP 中に空洞を手で揺らすことにより行った。その様子を Fig. 5 左上に示す。また、EP 時の電流電圧、空洞温度、EP 液流量をそれぞれ Fig. 5 の右上、左上、右下に示す。電圧は ~ 20 V(間欠印加、3 min-ON/3 min-OFF)、電流は $40\sim 70$ A、空洞温度は $10\sim 12^\circ\text{C}$ 、EP 液流量は $15\sim 25$ L/min であった。

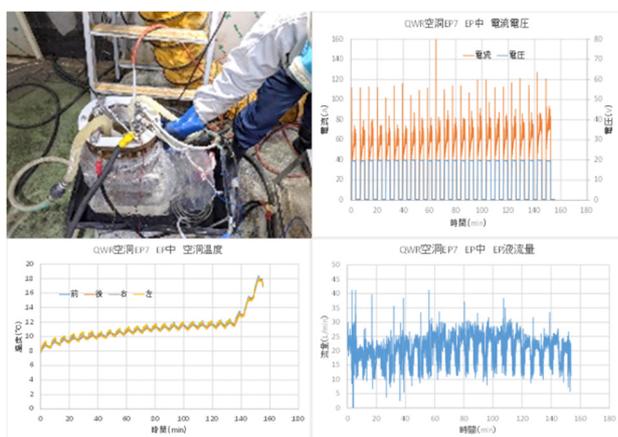


Figure 5: A photo of cavity swing and trend graphs of EP current, voltage, cavity temperature, flow rate.

本来であれば EP を ~ 350 min 程度まで行う予定であったが、140 min を過ぎたところに EP 液のリークが見られたため EP を中止した。リークの原因を調査した結果、中心導体リング部に穴が開いており、そこから EP 液がリークしていたことが分かった。穴の開いた部分の外観写真を Fig. 6 に示す。



Figure 6: A photo of a hole in the center conductor.

3. 電解研磨後の内面評価

各電解研磨後に空洞内面の外観観察、表面粗さ測定、研磨量測定を行った。開口部より見た内面の外観観察の結果を Fig. 7 に示す。

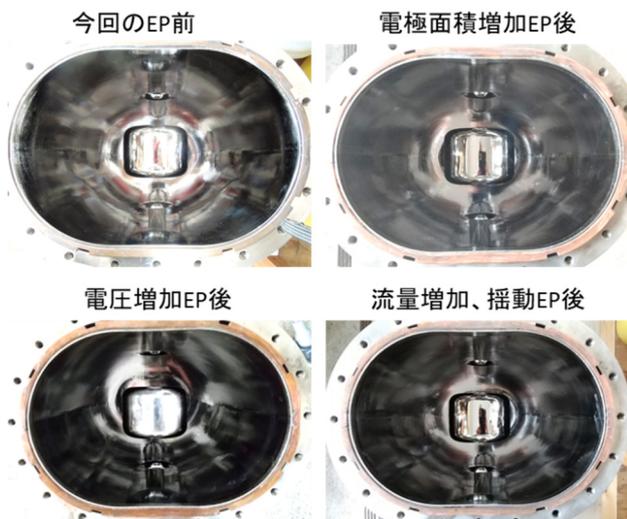


Figure 7: Observation of the inner surface of the cavity after each EP.

光沢の度合いなどはあまり大きく変わっているようには見えなかった。電圧増加 EP 後では中心導体の部分がやや白く曇っているように見えた。これは電圧が高すぎるにより表面荒れが発生してしまったことが考えられる。内面の胴体部分の表面粗さ(Ra、Rz)を測定した結果を Fig. 8 に示す。測定は空洞胴体の 2 つの穴それぞれの横付近 2 か所、上付近 2 か所の計 8 点で行った。

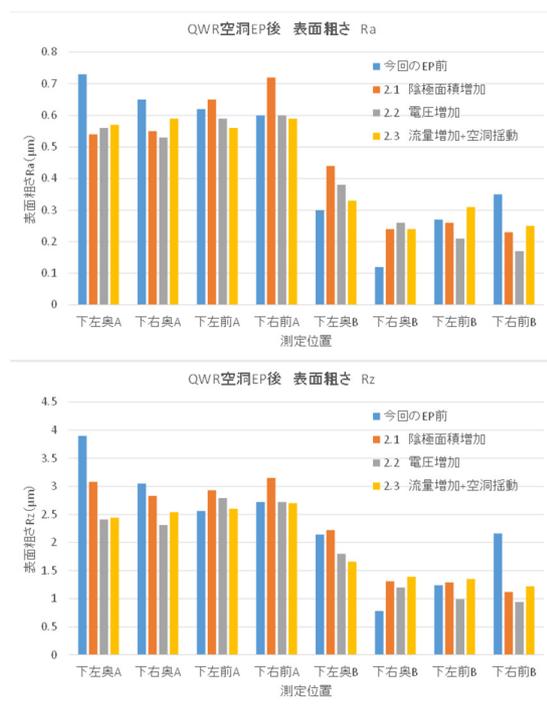


Figure 8: Surface roughness of the cavity inner surface after each EP.

測定場所ごとに差はあるものの、各 EP 後において統一的な傾向は見られなかった。また、表面粗さの数値自体も大きな変化は見られなかった。これより今回の EP では胴体部分の表面粗さの改善効果は小さい結果となった。

次に、各 EP 後の研磨量を Fig. 9 に示す。研磨量測定は表面粗さ測定場所の 8 点+中心導体上部の計 9 点で行った。



Figure 9: Removal thickness of the cavity after each EP.

各 EP とも胴体部分の 8 点は概ね良好な研磨量分布であったが、中心導体の部分だけが突出して研磨量が多くなっていた。原因は不明であるが、現在の空洞の構造、電極の構造が中心導体に電界が集中しやすい状態になっていることが考えられる。さらに中心導体のなかでも特にエッジ部や溶接部の研磨量が大きくなっているとすると、その部分が薄くなりすぎて穴が開いてしまったことも考えられる。

今回の全ての EP が終了した後、空洞内面の特に開口部からの目視観察では確認しにくい部分を中心に内視鏡観察を行った。観察結果を Fig. 10 に示す。

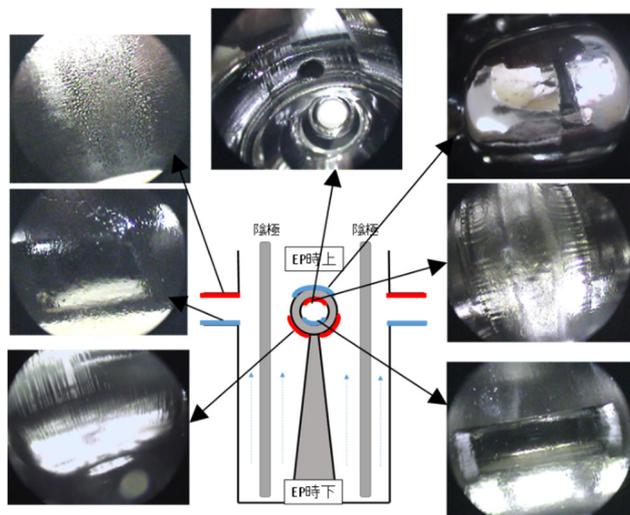


Figure 10: Endoscopic observation of the cavity inner surface after all EP.

EP 中に下から上に上がってくる気泡が当たりやすい下向き部分 (Fig. 10 イラストの赤線部分) は気泡の滞留跡、流動跡のようなものも多く見られた。逆に気泡が当たりにくい上向き部分 (Fig. 10 イラストの青線部分) はそれらの跡は見られず、光沢のあるきれいな表面となってい

た。陰極から発生する気泡については陰極にメッシュカバーを取り付ける対策を行っているが、隙間から漏れ出した気泡があること、流動中の EP 液に混ざった気泡が影響していることなどが考えられる。

EP の改善に向けては、空洞内の気泡対策、電極形状、配置、カバーの見直し、EP 液流動方法の見直し、攪拌揺動の導入と効果確認などを検討する必要があると思われる。そのために全体のセットアップの見直しも検討する必要がある。

4. まとめ

2020 年度に引き続き、東海タンデム加速器の超伝導ブースターに用いられている QWR 空洞の予備機を用いて内面ニオブの電解研磨実験を行った。

今回は EP パラメータとして①陰極面積増加、②電圧増加、③EP 液流量増加+空洞揺動、の三つに着目して EP 実験と研磨面の外観、表面粗さ、研磨量分布の評価を行った。結果、いずれの EP 後においても研磨内面の光沢は見られたが、表面粗さの値は大きく変化しなかった。研磨量分布については胴体部分は比較的均一であったが中心導体部分は突出して研磨量が多くなっていた。内部の内視鏡観察では下から上へ上がってくる気泡が当たりやすい下向き部分には気泡跡、流動跡等が見られ、当たりにくい上向き部分はきれいな表面となっていた。

これらの改善として空洞内の気泡対策や電極形状の見直し、EP 液流動方法の見直し、攪拌揺動の導入と効果確認、全体のセットアップの見直しなどを検討する必要がある。

参考文献

- [1] <https://ttandem.jaea.go.jp/index.html>
- [2] H. Kabumoto *et al.*, "Development of Superconducting Twin Quarter Wave Resonator for Acceleration of Low Velocity Heavy Ions" Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sendai, Japan, Aug. 2-4, 2006, pp. 819-821.
- [3] H. Kabumoto *et al.*, "Recovery of Acceleration Field Gradients of Superconducting Booster Resonators by High Pressure Water Jet Rinsing", Proceedings of the 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tokai, Ibaraki, Japan, Aug. 5-7, 2009, pp. 1120-1122.
- [4] S. M. Gerbick *et al.*, "A New Electropolishing System at ANL for Superconducting Quarter-Wave Resonators", Proc. SRF2007, Beijing, China, 2007, pp. 213-215.
- [5] K. Nii *et al.*, "Reports of electropolishing implementation for quarter-wave resonators", Proceedings of the 18th Annual Meeting of the Particle Accelerator Society of Japan, QST-Takasaki, Online, Japan, Aug. 9-12, 2021, pp. 334-337.