

1/4 波長型超伝導空洞の内面電解研磨の実施報告

REPORTS OF ELECTROPOLISHING IMPLEMENTATION FOR QUARTER-WAVE RESONATORS

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

At the Tokai Tandem Accelerator of JAEA, researches on nuclear physics, nuclear chemistry, material irradiation, etc. using heavy ion beams are conducted. A superconducting booster has been installed in the latter part of the tandem to increase the beam energy by 2 - 3 times, but it has been out of service for a long time. The specifications of this superconducting booster are model = coaxial quarter wave resonator (QWR), optimum beam speed = 10% of the speed of light, and acceleration electric field = 5.0MV / m @ 4W. Currently, we are working on restarting this facility, and we are considering electro-polishing of the preliminary superconducting cavity in preparation for conducting various tests. This cavity is made of a niobium-copper clad plate and has a large opening at the bottom, which allows it to be electro-polished again. This time, Marui Galvanizing Co., Ltd. and Japan Atomic Energy Agency jointly examined the equipment and conditions for QWR type superconducting cavity inner surface electro-polishing, conducted electro-polishing, and evaluated the surface and cavity performance after polishing. In this article we will report the result.

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]。

今回、超伝導ブースターの再稼働に向けて、マルイ鍍金工業株式会社と日本原子力研究開発機構(JAEA)が共同でQWR空洞の予備機を用いて内面ニオブ電解研磨の設備や条件の検討、電解研磨の実施、研磨後表面や電界性能の評価を行った。本論文ではその1回目のテスト結果を報告する。

2. 電解研磨のセットアップ

今回の実験で用いたQWR空洞の模式図と写真を図1に示す。空洞はニオブ-銅のクラッド板で製作されてい

る(ニオブが内面で銅が外面)。底部に開口があるためこの部分より電極を挿入しての電解研磨が可能であるが、中央に中心導体があるため、電極の形状には工夫が必要である。図1右上の写真は開口部より空洞内を映した写真であり、中央に中心導体が見える(図1左側のイラストでは下から見たことに相当する)。また、空洞の両側にはビーム通過用の開口部があり、電解研磨時はこれを治具等で閉止する必要がある。

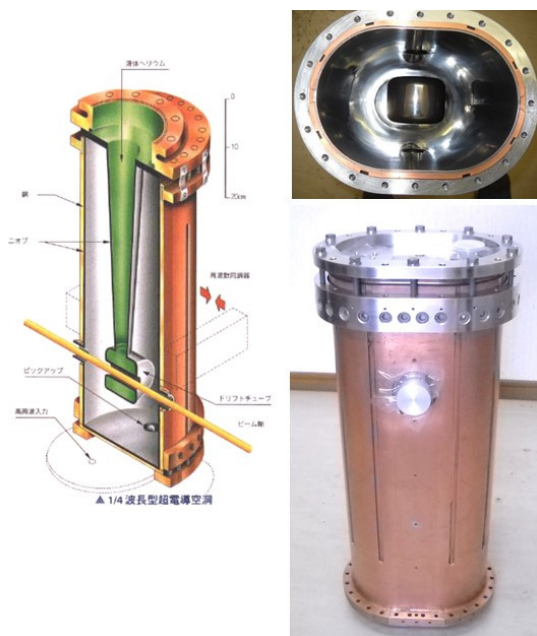


Figure 1: A schematic and photos of QWR cavity.

[#] keisuke_nii@e-marui.jp

今回実験に用いた空洞は表面処理実験用の予備機として 1994 年頃に作製され、各種表面処理実験に使用した後、ニオブ表面のリセットのため機械研磨をして 10 年程度保管していたものである。

電解研磨セットアップの模式図を図 2、写真を図 3 に示す。電解研磨はマルイ鍍金にて行った。電解液はポンプにて空洞内へ注入し、空洞上部へあふれてくる分をポンプで回収する形で循環させた。電極は Al パイプを用いて、内部にチラー冷却水を循環している。これをコイル状にして保持治具を介して空洞内に挿入する。電極の周囲は気泡拡散防止のためメッシュカバーを取り付けている。空洞冷却については、空洞をバット内に設置し、バット内の冷却水を水中ポンプを用いて空洞へ浴びせることにより行った。電解液の冷却は前述の空洞内 Al コイルの熱交換にて行った。また、電解研磨中のニオブへの水素吸蔵対策として、窒素ガス(N₂)バブリングを行った。電解研磨後はポンプにて電解液を回収後、流路を切り替えて純水を注入、回収を繰り返して水洗を行った。

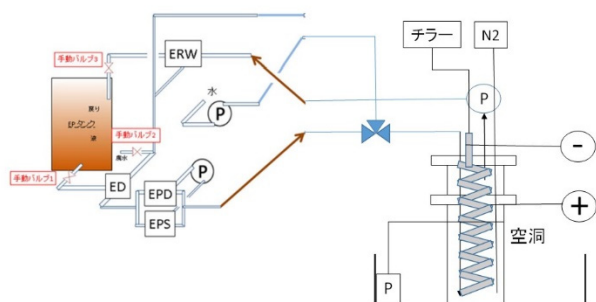


Figure 2: A schematic of EP setup.



Figure 3: Photos of EP setup.

3. 電解研磨の実施と評価

電解研磨は 4 回に分けて合計約 100 μm の研磨を行った。各回の主な電解研磨条件を表 1 に示す。

Table 1: Conditions of Each Electro-polishing

	第1回	第2回	第3回	第4回
電解液	USED	NEW	USED	NEW
電圧	~18V	~20V	~20V	~20V
電圧印加法	連続	3min-ON/ 3min-OFF	連続	3min-ON/ 3min-OFF
空洞水冷	なし	あり	あり	あり
N ₂ バブリング	なし	あり	あり	あり
目標研磨量	30 μm	20 μm	25 μm	25 μm

電解液は全ての回で H₂SO₄ (98%) : HF (55%) = 9 : 1 (体積比) を用いた。また、電解液循環の流量は約 10 L/min であった。研磨量は積算電流値(電流×時間)と表面積より算出した。電圧は第 1 回が約 18 V、第 2~4 回は約 20 V とした。電圧印加法は第 1、3 回が連続印加、第 2、4 回は間欠印加(3min-ON/3min-OFF)を行った。この間欠印加は OFF 時間での気泡の除去と温度の低下を期待して導入した。空洞水冷は第 1 回では行わなかったが、電解研磨中の温度が想定より上昇したため、第 2~4 回では実施した。同様に N₂ バブリングも第 2 回より実施した。

電解研磨パラメータの一例として第 4 回の IV 特性、電圧、電流、空洞表面温度、空洞内電解液温度を図 4 に示す。IV 特性では、約 5 V 以上でプラトー領域が見られており良好な形状であった。電圧は約 20 V で電流値は 60~100 A 程度であった(第 4 回では他に比べてばらつきが大きくなっていた)。空洞表面温度は約 12 $^{\circ}\text{C}$ 、空洞内電解液温度は約 9 $^{\circ}\text{C}$ 程度に保持出来ており、良好なニオブ電解研磨ができる温度となっていた

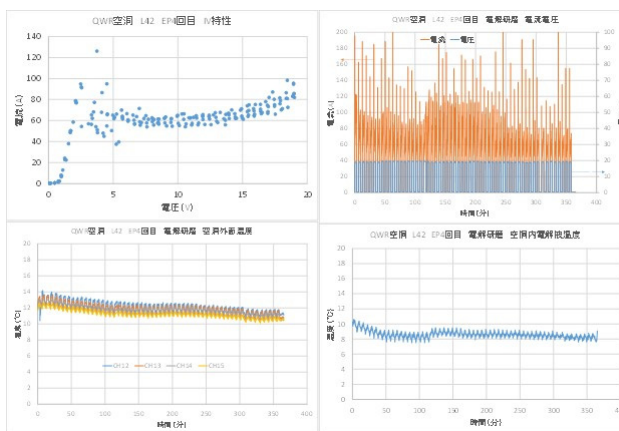


Figure 4: Logged data during EP. Upper left: IV curve, Upper right: current and voltage, lower left: cavity surface temperature, lower right: EP acid temperature.

電解研磨前(機械研磨の表面)と各回の電解研磨後の表面観察結果(デジカメとマイクロスコープ($\times 200$))と表面粗さ測定結果(4点測定、開口部付近を触針式表面粗さ計にて測定)を図5に示す。第1回後では表面の荒れが見られ、表面粗さ R_a 、 R_z も数値が悪化していた。これは、空洞水冷をしなかったことにより電解研磨中の温度が上昇して適正値をはずれ、良好な電解研磨がかからなかったためと思われる。また、一部に電解液循環に起因すると思われる白色のシミも見られていた。第2回以降は空洞水冷により温度が最適化され、荒れの状態が低減し、表面粗さも改善する傾向が見られた。白色のシミについても改善していた。外観の光沢についても改善の傾向にあると思われる。ただし表面粗さの数値については第4回後においても電解研磨前よりも大きい状態となった。また、第4回後に中心導体部の一部に表面荒れが見られた。これは電解研磨中に電極に取り付けたメッシュカバーの一部が中心導体部に接触したために発生したものと思われる。

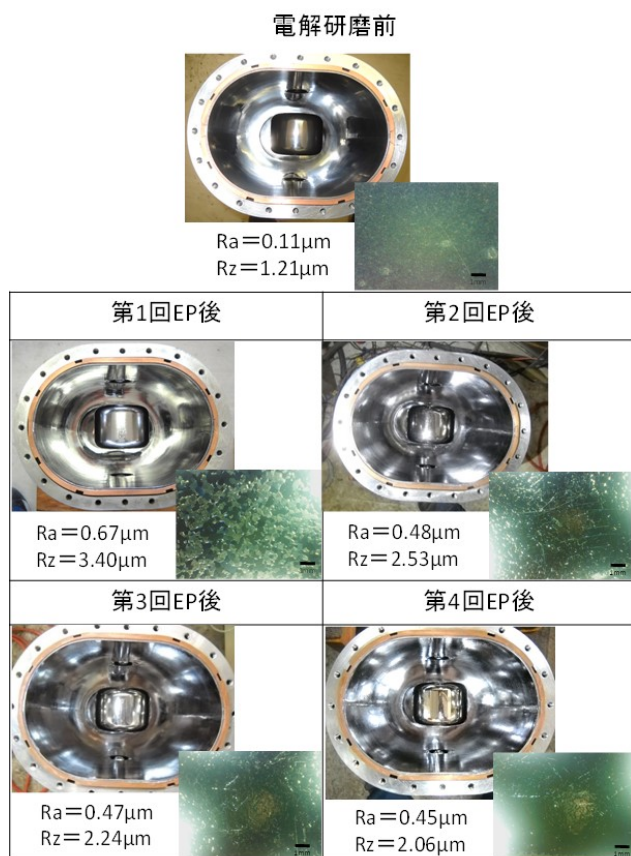


Figure 5: The results of polished surface inspection and surface roughness measurements.

マルイ鍍金にて電解研磨、水洗、内面観察を行った後、JAEAにて高圧洗浄、周波数測定、電界性能測定(4.2K)を行った。電解研磨後の共振周波数は標準値と比べて約 456 kHz 高くなっていた。これは研磨量の不均一に起因すると思われるが、詳細な分析は今後の検討課題である。電界性能測定時の写真と測定結果を図6に示す。電界性能は低い電界での Q_0 値: 2.7E8、加速電

界: 4.2 MV/m@4 W であった。この値は本空洞での本実験前最後の表面処理実験時よりは良かったが、JAEAの空洞の標準値 5.0 MV/m@4 W に達していなかった。

原因としては表面状態や水素吸蔵、汚れの付着などが考えられる。また、電解研磨前の機械研磨処理が適切ではなかったことや、電極形状が適切でなかったこと、過去のプラズマスパッタリングで不純物がニオブに混入したことなども考えられる。現在は表面が荒れていることにより表面抵抗が大きくなったことが大きな要因の一つであると考えており、今後は表面荒れの改善に向けて電解研磨の手法、電極形状や電極カバー、電解液の循環条件などの見直しを行い、表面粗さと電界性能の改善に取り組んでいく。マルイ鍍金工業でこれまでに施工した楕円型ニオブ空洞の電解研磨の表面粗さの実績は $R_a = 0.2\mu\text{m}$ 程度、 $R_z = 1.3\mu\text{m}$ 程度[5]であるので、QWR 空洞でのこの値の実現を目指す。

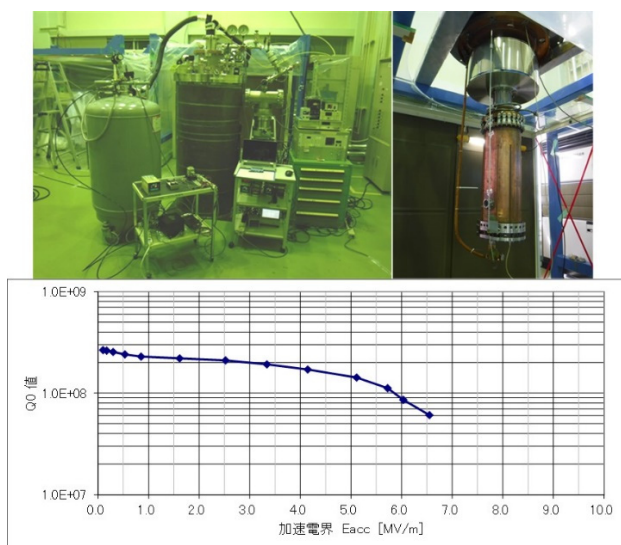


Figure 6: Upper: photos of acceleration field gradient measurement setup, lower: the acceleration field gradient.

4. まとめ

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テストを行った。

電解研磨は4回に分けて合計約 100 μm を研磨した。ポンプを用いて電解液を循環するとともに2回目以降は温度最適化のため空洞水冷を行った。また、温度低下と気泡除去を目的として電圧間欠印加のテストも行った。

電解研磨後の内面観察の結果、1回目では温度上昇により表面荒れが発生したが、2回目以降は空洞水冷で温度を低下させたため表面荒れは改善の傾向が見られた。ただし、電解研磨前より表面粗さは悪化していた。

電界性能測定の結果、低い電界での Q_0 値: 2.7E8、加速電界: 4.2 MV/m@4 W が得られた。これは JAEA の空洞の標準値 5.0 MV/m@4 W に達していなかった。原因としては表面荒れによる表面抵抗の上昇が考えられる。

今後は電解研磨条件や電極形状等の見直しにより表

面粗さと電界性能の改善を目指す。

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” 第3回日本加速器学会年会・第31回リニアック技術研究会、仙台市 2006 FP26, P. 819-821.
- [3] H. Kabumoto *et al.*, “Recovery of Acceleration Field Gradients of Superconducting Booster Resonators by High Pressure Water Jet Rinsing” 第6回日本加速器学会年会、東海村 2009 FPACA65, P. 1120-1122.
- [4] S. M. Gerbick *et al.*, “A New Electropolishing System at ANL for Superconducting Quarter-Wave Resonators” SRF2007, Beijing, China 2007, TUP36, P. 213-215.
- [5] V. Chouhan *et al.*, “Vertical Electropolishing for 1.3 GHz single- and nine-Cell superconducting niobium cavities: A parametric optimization and rf performance” Phys. Rev. ST Accel. Beams 22, 103101 (2019).