

ニオブ 9 セルクーポン空洞を用いた上下反転 VEP における電流特性と研磨内面の改善

IMPROVEMENT OF CURRENT PROPERTY AND POLISHED SURFACE OF FLIPPING VEP WITH NB 9-CELL COUPON CAVITY

仁井 啓介^{#, A)}, Vijay Chouhan^{A)}, 井田 義明^{A)}, 山口 隆宣^{A)}, 早野 仁司^{B)}, 加藤 茂樹^{B)}, 文珠四郎 秀昭^{B)}, 佐伯 学行^{B)}

Keisuke Nii^{#, A)}, Vijay Chouhan^{A)}, Yoshiaki Ida^{A)}, Takanori Yamaguchi^{A)}, Hitoshi Hayano^{B)}, Shigeki Kato^{B)}, Hideaki Monjushiro^{B)}, Takayuki Saeki^{B)}

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

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

Abstract

Marui Galvanizing Co., Ltd. and KEK are conducting research and development to improve the removal thickness distribution and polishing inner surface of vertical electrolytic polishing (VEP) of a niobium 9-cell accelerating cavity. So far, as one method for improvement, we have proposed a flipping VEP in which the top and bottom of the cavities are periodically replaced in the VEP, and conducted VEP experiments, and reported that the removal thickness distribution was improved. This time, the cathode, equipment, and VEP conditions were reviewed to improve the current characteristics of VEP and the polishing inner surface, and a flipping VEP experiment was performed using a niobium 9-cell coupon cavity. As a result, the IV characteristics and VEP current characteristics were improved. Also, the surface condition after VEP was greatly improved.

1. はじめに

現在、International linear collider (ILC)の早期実現に向けて日米欧の協力にて様々なコストダウン開発が進められている。その中で大きなテーマの一つとなっているのがニオブ超伝導加速空洞製造のコストダウンである。空洞製造のコストダウンでは、材料、製法、プロセス数などコストダウンが必要な部分は多くあるが、その中で空洞の電解研磨 (EP) 等の表面処理コストのコストダウンも大きなテーマの一つに挙げられている[1]。マルイ鍍金工業では、表面処理のコストダウンを目指して、量産に適しているとされる縦型電解研磨 (VEP) に着目し、これまでに VEP 実験設備の作製、独自構造カソード”i-cathode Ninja”(Ninja カソード)の開発、作製を行い、条件最適化のための実験を KEK と共同で行ってきた。

ニオブ製 9 セル加速空洞の VEP については、研磨表面と研磨量分布の改善を目指して開発を行ってきた。そのための一つの方法として、VEP 中に定期的に空洞の上下を入れ替える上下反転 VEP 法を提案、設備の開発と効果検証実験を行ってきた。その結果、研磨量分布は上下反転をしない場合に比べて大きく改善したが、研磨表面に荒れが見られる、正位置と逆位置で電流値が異なるなどの問題点も見られた[2-4]。

これらの問題点を改善するため、実験条件の見直し、改善を行い、ニオブ 9 セルクーポン空洞を用いた上下反転 VEP 実験と、EP 電流、VEP 後のクーポン表面状態、空洞の研磨量分布評価を実施した。

2. 上下反転 VEP の実験条件改善

今回の実験で用いた VEP 設備の写真と空洞セット部の模式図を図 1 に示す。設備の概要は参考文献[4]と同様である。

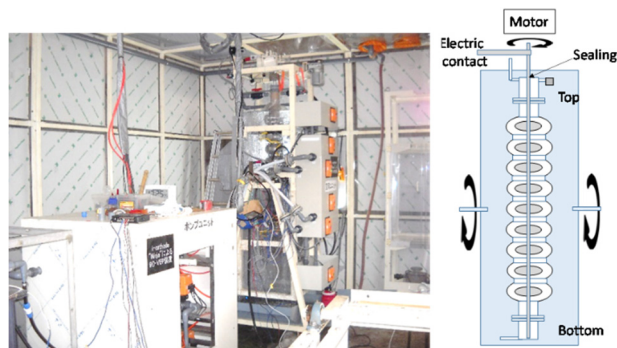


Figure 1: A photo and a schematic of the VEP equipment.

上下反転 VEP 後の研磨表面状態向上に向けて大きく 2 つの実験条件の改善を行った。1 つ目は EP 時に循環している EP 液内に溜まる気泡を除去することである。空洞内で EP 時に陰極より発生した気泡は EP 液循環で空洞外に排出されるが、気泡をうまく除去できないと循環して空洞内に戻ってしまい研磨品質を劣化させる原因となる。これを防止するために、EP 液タンクの容量を増量するとともに気泡除去フィルタも枚数を増やした。改良した EP 液タンクの写真を図 2 に示す。また、これに伴い EP 液の量を従来の 70L から 120L に増量して VEP を行った。

[#] keisuke_nii@e-marui.jp



Figure 2: A photo of improved EP acid tank.

2つ目は VEP 時の空洞表面温度を下げることである。これまでは 20~25℃程度で上下反転 VEP を行ったが、過去の実験より 15℃程度で VEP を行うと表面状態が改善するという結果が得られていたため[5]、今回の上下反転 VEP は空洞表面温度 15℃程度で行うこととした。また、Ninja カソードの羽根部分の陰極が全てにおいて均等に導通しているか、気泡拡散を防止するメッシュカバーが正常かどうかの確認も行った。

3. 9 セルクーポン空洞を用いた上下反転 VEP と研磨状態の評価

これらの改善を行って、9 セルクーポン空洞を用いて上下反転 VEP を行い、VEP 中のクーポン電流、VEP 後のクーポン表面と空洞研磨量分布の評価を行った。VEP の条件を表 1 に示す。

Table 1: Conditions of This VEP

パラメータ	上下反転 VEP (9 セルクーポン)
EP 液	H ₂ SO ₄ (98%):HF(55%)=9:1 120L
電圧	17~18 V
電流密度	~20 mA/cm ²
空洞表面温度	~15 °C
カソード回転速度	20 rpm (正、逆とも)
EP 液流量	5~10 L/min
目標研磨量	~30 μm
EP 時間	3minON (正) -OFF、反転- 3minON (逆) -OFF、反転- 上記を 13 回繰り返す
カソード	Ninja カソード v6 (金属羽根+メッシュカバー)

VEP を行う前に正位置と逆位置での空洞の IV 特性を確認した。結果を図 3 に示す。正逆とも 8~10V より高い電圧でプラトー領域が確認できた。また、プラトー領域での電流値は今回は正逆で差があったが、今回は正逆の差は小さくなっており、改善が見られた。

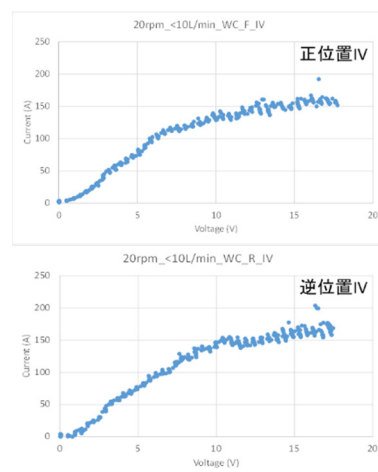


Figure 3: Cavity IV curves of this VEP at forward position (upper) and at reverse position (lower).

上下反転 VEP 中の空洞の電流、電圧、各クーポンの電流、空洞表面温度のログデータを図 4 に示す。EP 液温度と空洞冷却水温度を 13℃程度に保持したことにより、VEP 中の空洞表面温度を 15℃以下にすることができた。VEP 時の空洞電流は、今回は正位置と逆位置で差がでていたが、今回は IV 特性と同様に正逆での電流値の差がなくなっており、電流特性の改善が確認された。

正逆 1 サイクルのクーポン電流の平均値(正の平均、逆の平均、両方の平均)を図 5 に示す。正位置、逆位置の平均電流は上となる部分が大きくなる傾向があるが、平均化すると電流値が平準化されることが確認された。

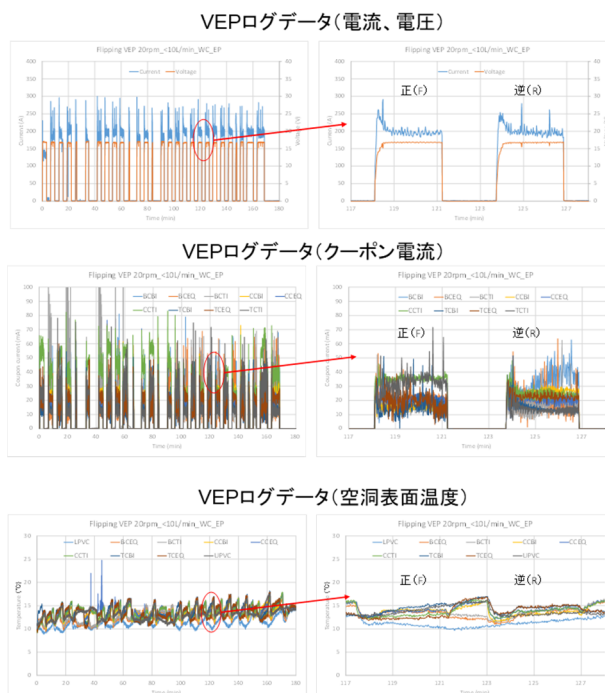


Figure 4: Logged data of cavity voltage and current (upper), each coupon current (middle), and cavity surface temperature (lower) of this VEP.



Figure 5: Average coupon current of one forward position VEP (upper left), one reverse position VEP (upper right), and one F-R cycle (lower).

上下反転 VEP 後の各クーポンの外観観察、表面 SEM 観察 (×500)、表面粗さ (Ra) 測定結果を図 6~図 8 にそれぞれ示す。クーポン表面は前回に比べて良好な光沢が見られ、SEM 観察にて良好な結晶粒も確認された。表面粗さ (Ra) も前回の 1~2 μm から今回は 0.2~0.4 μm となっており、今回の条件にて改善効果が見られた。ただ、上セル上アイリス (TCTI)、中セル上アイリス (CCTI)、中セル下アイリス (CCBI) の 3 か所の表面にやや荒れが見られ、Ra もやや大きな値となっていた。SEM 観察ではこれらのクーポンの表面には気泡跡のような荒れが見られた。この原因は現在不明だが、Ninja カソードからの気泡拡散防止について検討を進めている。

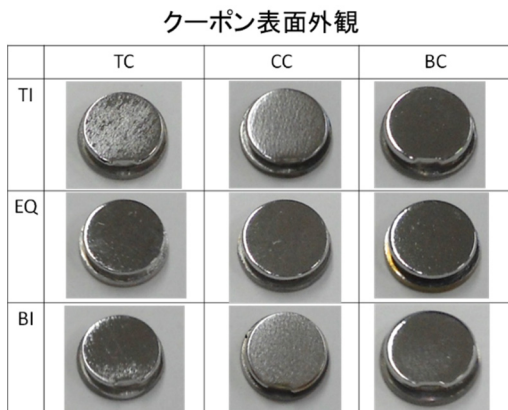


Figure 6: Digital camera photos of each coupon after VEP.

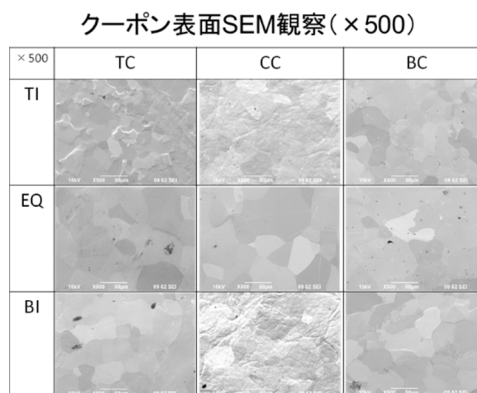


Figure 7: SEM images of each coupon.

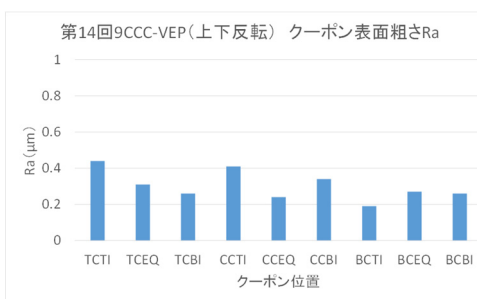


Figure 8: The result of surface roughness Ra measurement.

空洞の研磨量分布測定の結果を図 9 に示す。グラフ中の縦線はセルの区切りを表し、左側が正位置の上部にあたる。2 ラインの測定を行ったが、どちらの測定においても研磨量 30 μm 狙いに対して 20~40 μm の範囲に収まっており、突出して研磨量が多い、もしくは小さいところもなく、大変良好であった。また、セルごとの平均値 (グラフ上部に記載の数値、μm) についても測定ポイント数の少ない第 1、第 9 セルを除けば 27~30 μm に収まっていた。突出して研磨量が多い、小さいセルはなく、均一性は非常に良好であった。尚、測定ポイント全体の平均研磨量は 27.8 μm であった。

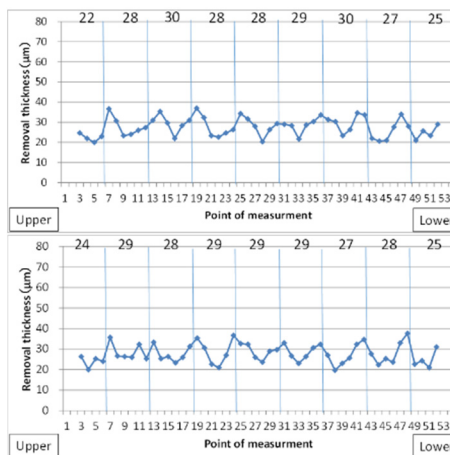


Figure 9: The result of cavity removal thickness distribution measurement (two different lines).

4. まとめ

上下反転 VEP の電流特性と研磨表面改善のため、EP 液タンクの大容量化と EP 液の増量、EP 時空洞表面温度を低温化(～15℃)しての VEP 実験を行った。

IV 特性は、正逆とも 8～10V より高い領域でプラトー領域が見られるとともに、プラトー領域の電流値の正逆の差が小さくなっていた。同様に VEP 時の電流も正逆の差が小さくなっており、電流特性に改善が見られた。

クーポン電流の評価では、前回と同様に上下反転を行うことにより、各クーポンの平均電流が均一化されていることを確認した。

VEP 後のニオブクーポン表面の評価においては前回に比べて全体的に光沢が増し、表面粗さ Ra の改善も見られた。ただ、TCTI、CCTI、CCBI のクーポン表面がやや荒れており、SEM 観察では気泡跡のようなものが見られた。

空洞の研磨量分布はセル内、セル間とも大変均一で良好であった。

現在、空洞内面全体での研磨表面改善を目指して Ninja カソードの気泡拡散防止などを検討している。そして全面良好な表面を実現し、9 セル空洞の上下反転 VEP と加速性能評価を行いたいと考えている。

謝辞

マルイ鍍金での上下反転 VEP 設備の開発、立ち上げ、調整にあたりまして、東日本機電開発株式会社(岩手県盛岡市)の水戸谷様、赤堀様、宮野様、佐々木様、株式会社 WING(岩手県北上市)の高橋様、姉帯様に多大なご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構, “国際大型加速器計画のコスト削減に調査研究調査報告書”, 平成 30 年 2 月.
- [2] K.Nii *et al.*, “Study on New Removal Thickness Distribution Improvement Methods for Niobium 9-cell Cavity Vertical Electropolishing with Ninja Cathode” LINAC18, Beijing, China 2018, TUPO067.
- [3] K.Nii *et al.*, “Vertical Electropolishing of Niobium Nine-cell with a Cavity Flipping System for Uniform Removal” SRF2019, Dresden, Germany 2019, TUP027.
- [4] 仁井啓介他, “空洞上下反転法を用いたニオブ 9 セル加速空洞縦型電解研磨(VEP)における研磨量分布の改善” 第 16 回日本加速器学会年会, 京都市 2019 WEPI006.
- [5] V.Chouhan *et al.*, “Study on Vertical Electropolishing of Nine-cell Niobium Coupon Cavity” SRF2017, Lanzhou, China 2017, TUB091.