

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

IMPROVEMENT OF REMOVAL UNIFORMITY OF 9-CELL CAVITY USING VERTICAL ELECTROPOLISHING WITH CAVITY FLIPPING METHOD

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. has been working with KEK on the development of Niobium accelerating cavity Vertical Electropolishing (VEP) technology. Up to now, the asymmetry of the removal thickness has been a major problem in the VEP of the niobium 9-cell accelerating cavity. As a method to solve this problem, we devised a method of cavity flipping during VEP, made VEP equipment and conducted experiments. As a result, it was confirmed that the removal thickness distribution of cavity flipping method was significantly improved as compared with the case of no flipping. In the future, we plan to advance development and improvement of equipment to further improve the distribution of removal thickness and the polished surface. In this article, we will report on the improvements and results of these new technologies.

1. はじめに

International linear collider (ILC)や X 線自由電子レーザー (XFEL) 等、超電導加速器建設計画が世界各国で進められている。これらの加速器には、ニオブ製加速空洞が数百～数千本使用されるため、量産に向けた技術開発が進められている。加速空洞の高性能化に不可欠な電解研磨においても量産に向けた開発が精力的に進められている。マルイ鍍金工業では、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、これまで研磨量分布の均一性に問題があり、セル間、セル内とも下側に比べて上側の方が研磨量が大きくなるという問題点があった[1]。これは、VEP 時にカソードから発生する水素の気泡が空洞内に拡散し空洞の上側、上アイリス部に当たって研磨を促進し、その結果上側の研磨量が大きくなって不均一が生じることがこれまでの実験で分かっている[2]。

この問題を改善するため、我々は次の2つの方法を提案し、確認実験を行っている。(1) 2 フロー VEP 法と(2) 上下反転 VEP 法である。(1) の 2 フロー VEP 法については参考文献[3-5]を参照いただくこととし、本論文では(2) の上下反転 VEP 法について VEP 設備の作製、9 セルクーポン空洞でのクーポン分析、9 セル空洞 VEP 実験結果を報告する。

2. 上下反転 VEP 設備の作製

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。

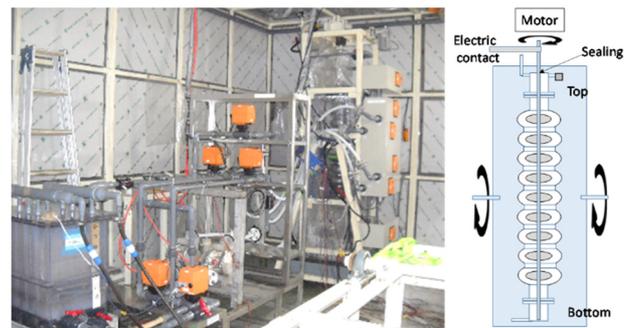


Figure 1: A photo and a schematic of the VEP equipment.

EP 液流路には自動弁 3 方バルブを用いており、タッチパネルの遠隔操作でバルブの開閉やポンプの動作をプログラム制御できる設備となっている。空洞の配置については、モーターと電極接点がある側を「トップ」とし、トップ側が上にある状態を「正位置(F)」、下にある状態を「逆位置(R)」と定義する。EP 液流動は、常に下→上になるように各状態で切り替えている。EP 時の温度制御は空洞に水をシャワーする水冷にて行った。

空洞の上下反転の様子を図 2 に示す。

[#] keisuke_nii@e-marui.jp

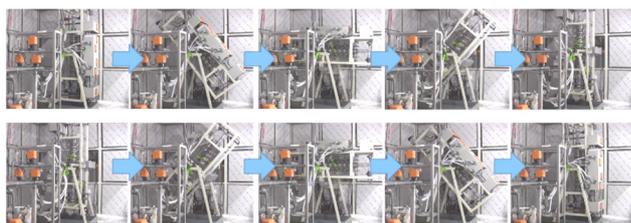


Figure 2: A continuous photo of the state of flipping (Upper: F to R, lower: R to F).

空洞の反転には専用の空洞ホルダーとモーター動力を用い、専用のコントローラーで遠隔操作している。また、停止位置の検出には近接センサーを用いている。これにより反転の作業性や位置再現性のよいセットアップとなっている。

3. 9 セルクーポン空洞を用いた Nb クーポンの評価

この上下反転 VEP の効果を検証するため、9セルクーポン空洞を用いて、VEP 中のクーポン電流と VEP 後のクーポン表面の評価を行った。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
電圧	~14 V
電流密度	20~30 mA/cm ²
空洞表面温度	20~25 °C
カソード回転速度	20 rpm (正位置) 0 rpm (逆位置)
EP 液流量	5~10 L/min
目標研磨量	~30 μm
EP 時間	5min(正-逆)+15min(正-逆)+20min (正-逆)
カソード	Ninja カソード v6 (金属羽根+メッシュカバー)

5min 正位置-5min 逆位置の VEP の各平均クーポン電流と、それらの 2 つを平均したクーポン電流を図 3 に示す。正位置の VEP では、上になる側(グラフ左側)の電流が大きく、逆位置の VEP では、上になる側(グラフ右側)の電流が大きい傾向にある(ただし、逆位置のボトムセルのみこの傾向から外れている)。そしてこれらを平均すると、クーポン電流がほぼ一定になっている。これにより、上下反転によって上下の EP 電流、ひいては研磨量が均一化されることが期待できる。今回の VEP 全体でのクーポン電流のログデータと平均電流値のグラフを図 4 に示す。

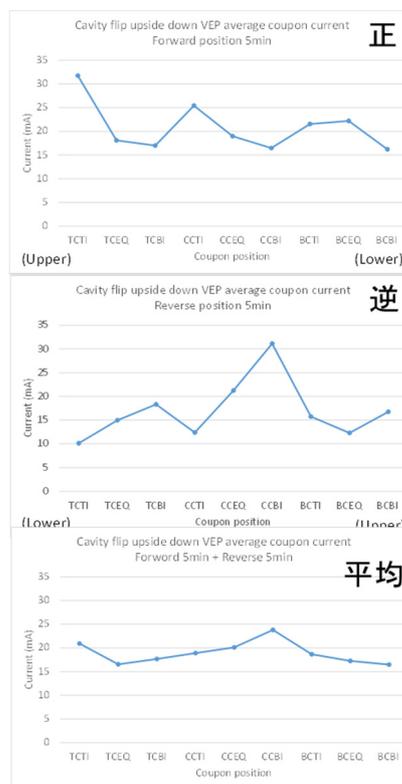


Figure 3: Average coupon current of 5min forward position VEP (upper), 5min reverse position VEP (middle) and the average of that two (lower).

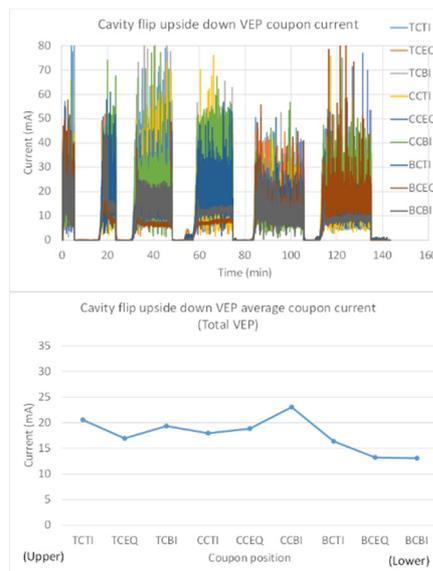


Figure 4: Logged data of each coupon current (upper) and total average coupon current of this VEP (lower).

今回の VEP 全体においても、クーポン電流が平均化されていることがわかる。VEP 後の各クーポンの表面状態観察と表面粗さ測定結果を図 5 に示す。

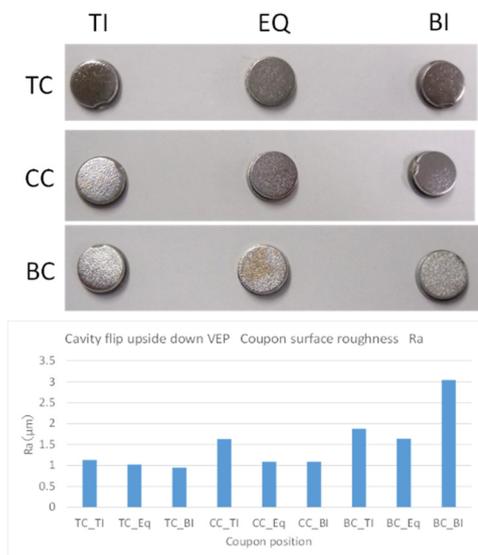


Figure 5: Photos of coupon surface after VEP (upper) and surface roughness of each coupon (lower).

トップセル、センターセルのクーポンは概ね光沢があり、表面粗さも良好で安定していた。ボトムセルのクーポンはそれらに比べてやや荒れていた。これは、ボトムセルのクーポン電流が他のセルに比べて小さくなっていることに関係していると思われる、設備の対称性不備による気泡の滞留が原因の1つであると考えている。今後、設備の正位置と逆位置での対称性向上が必要であると思われる。

4. 9セル空洞の上下反転 VEP

さらに、1.3GHz のニオブ 9 セル空洞にて上下反転 VEP を行い、研磨量分布や研磨後の内面観察を行った。VEP 条件を表 2 に示す。

Table 2: Conditions of This VEP

パラメータ	上下反転 VEP (9 セル空洞)
EP 液	H ₂ SO ₄ (98%):HF(55%)=9:1
電圧	17~18 V
電流密度	20~30 mA/cm ²
空洞表面温度	20~25 °C
カソード回転速度	20 rpm (正位置、逆位置とも)
EP 液流量	5~10 L/min
目標研磨量	~30 μm
EP 時間	3min ON (正位置) -OFF、反転-3min ON (逆位置) -OFF、反転の繰り返し
カソード	Ninja カソード v6 (金属羽根+メッシュカバー)

VEP 中の電流電圧、空洞表面温度、EP 液温度のログデータを図 6 に示す。

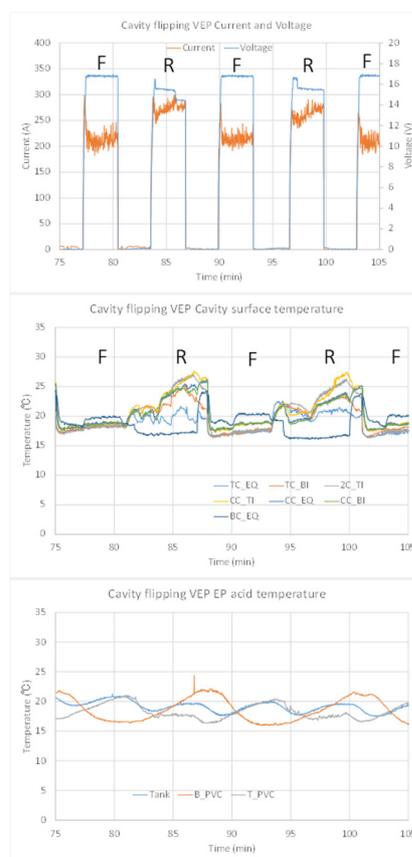


Figure 6: Logged data of current and voltage (upper), cavity surface temperature (middle) and EP acid temperature (lower).

電流、温度などはおおむね狙いの範囲内ではあるが、正位置と逆位置で電流値が違っており、それに伴って空洞表面温度も違いが出てしまっている。これはカソードの接点や空洞水冷時の水の流れやぬれ方が正位置と逆位置で差があり、電流や温度の差となってしまっていることが考えられる。これらは、その他の正位置と逆位置の違いを含めて検討、改善していく必要がある。

VEP 後の内面観察(デジカメ、内視鏡)の結果を図 7 に示す。内面の観察では光沢が見られたが、内視鏡観察ではやや荒れが見られ、気泡の跡なども見られた。今後はカソードからの気泡拡散対策を進める必要があると思われる。

空洞の研磨量分布測定の結果を図 8 に示す。

セル内の研磨量分布については、上下反転なしの場合は 3~4 倍程度あったものが 1.5 倍程度まで改善している。セル間の分布については、上、下、真ん中のセルがその他のセルに比べて研磨量が小さくなる傾向があった。原因は不明であるが、VEP 中の空洞内の気泡の流れや滞留状態がかかわっていると考えられる。気泡の拡散防止や速やかな排出を行うといった対策を検討中である。

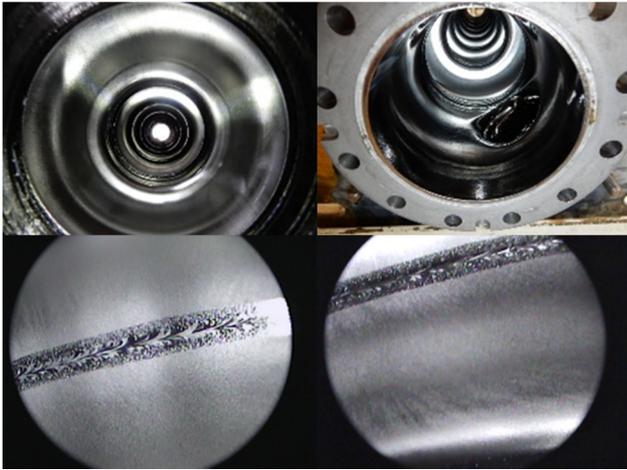


Figure 7: Inner surface observation photos after VEP (upper: with a digital camera, lower: with an endoscope).

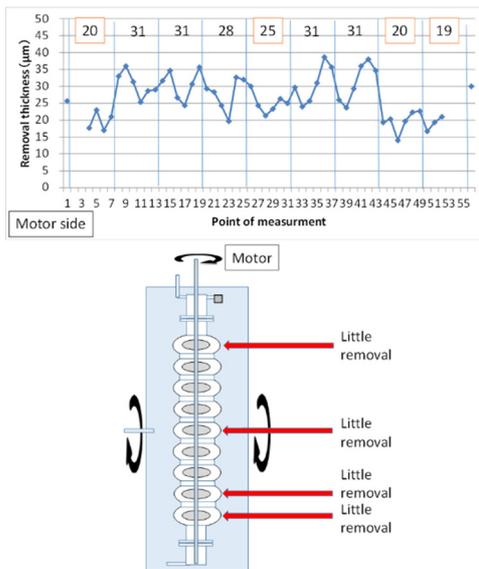


Figure 8: Removal thickness distribution after VEP.

今後はこれらの改善を行って研磨量分布、研磨内面のさらなる改善を行った後に、空洞の加速性能測定を行いたいと考えている。

5. まとめ

ニオブ 9 セル空洞 VEP の研磨量分布改善のため空洞上下反転 VEP 法を提案し、設備の作製、クーボン空洞によるクーボン電流等の評価、9 セル空洞 VEP と研磨量分布等の評価を行った。

クーボン電流の評価では、上下反転を行うことにより、平均のクーボン電流が均一化されていることが分かった。

また、9 セル空洞の VEP では、研磨量分布が大きく改善されていることが分かった。

しかしながら現状、研磨後表面がやや荒れていることと上、下、真ん中のセルの研磨量がやや少ないという問

題がある。設備の対称性や気泡拡散対策などの改善を計画、取組中である。

今後はこれらを改善した後に、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

マルイ鍍金での自動バルブ制御 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、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] V.Chouhan *et al.*, SRF2017, Lanzhou, China 2017, TUPB091.
- [2] V.Chouhan *et al.*, SRF2015, Whistler, Canada 2015, MOPB105.
- [3] 仁井啓介他 第 15 回日本加速器学会年会、長岡市 2018 THP046.
- [4] V.Chouhan *et al.*, IPAC18, Vancouver, Canada 2018, THPAL030.
- [5] V.Chouhan *et al.*, LINAC18, Beijing, China 2018, TUPO068.