

ニオブ 9 セル空洞 VEP の研磨量分布改善法の開発と空洞性能の評価

DEVELOPMENT OF REMOVAL THICKNESS DISTRIBUTION IMPROVEMENT METHOD FOR Nb 9-CELL CAVITY VERTICAL ELECTROPOLISHING AND EVALUATION OF CAVITY PERFORMANCE

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)}, 沢辺 元明^{B)}, 井藤 隼人^{C)}, 及川 大基^{D)}
Keisuke Nii^{#, A)}, Vijay Chouhan^{A)}, Yoshiaki Ida^{A)}, Takanori Yamaguchi^{A)}, Hitoshi Hayano^{B)}, Shigeki Kato^{B)}, Hideaki Monjushiro^{B)}, Takayuki Saeki^{B)}, Motoaki Sawabe^{B)}, Hayato Ito^{C)}, Hiroki Oikawa^{D)}

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

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

^{C)} Sokendai

^{D)} Utsunomiya University

Abstract

Marui Galvanizing Co., Ltd. has been developing Nb cavity vertical electropolishing (VEP) technologies in collaboration with KEK. In case of 9cell cavity VEP, it is serious problem that removal thickness of upper side is larger than that of lower side on both in-cell and inter-cell. It is thought that this is caused by bubbles occurring in the cavity during EP striking the upper surface of a cavity. In order to solve this problem, we developed a mechanism to confine bubbles generated from the cathode during VEP inside the PVC cylinder of Ninja cathode and rapidly sweep it and performed VEP experiment using this system and 9cell coupon cavity. As a result, it is confirmed that polished surface is smooth and removal uniformity is greatly improved compared to conventional VEP. And using this system, 1.3GHz Nb 9cell cavity (TB9-TSB02) VEP and vertical test were performed. We will report the results.

1. はじめに

近年、International linear collider (ILC) を始めとした、超伝導加速器の建設計画が進んでいる。ILC ではニオブ加速空洞を約 8000 台製造する必要がある製造コストの削減が課題となっている。マルイ鍍金工業では、空洞の製造コスト低減を可能にする縦型電解研磨 (VEP) 技術開発に KEK と共同で取り組んでいる。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行ってきた[1-7]。

ニオブ製 9 セル加速空洞の VEP については、これまでで研磨量分布の均一性に問題があり、空洞間、空洞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[2,3]。このメカニズムとして、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て空洞の上側、上アイリス部に当たって研磨を促進するため、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[5,6]。

これを改善するため、EP 中にカソードから発生する気泡の空洞内への拡散を抑制する機構を考案した。この機構と Ninja カソード、9 セルクーポン空洞を用いて VEP 実験を行い、研磨量分布の改善効果を確認した。また、1.3GHz ニオブ 9 セル空洞の VEP を行い、加速性能の評価を行った。

2. 研磨量分布改善法の開発と 9 セルクーポン空洞を用いた VEP

2.1 9 セルクーポン空洞と研磨量分布改善法

今回の実験で用いた 9 セルクーポン空洞の写真を図 1 に示す[8,9]。9 セルクーポン空洞は第 1、第 5、第 9 セルの上下アイリス部にビューポート+ニオブクーポン (8mm φ)、赤道部にニオブクーポンを配置している。これにより、VEP 中の内部の気泡観察や VEP 後の表面の各種分析が可能となった。また、各クーポンは電氣的に空洞と絶縁されており、EP 中のクーポン電流も測定できる。カソードは絶縁物羽根+電極面積を増加した Ninja-3 タイプを使用した[7]。

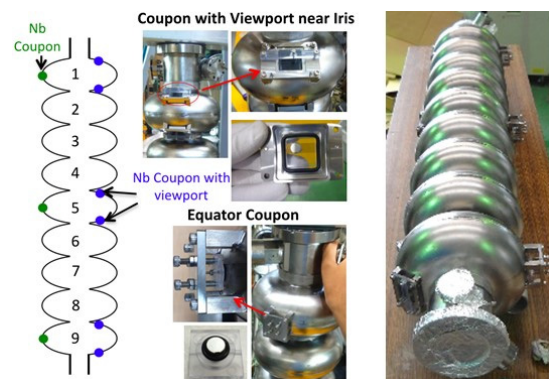


Figure 1: Photos of Nb coupon and viewport of 9-cell coupon cavity (left), overall view of 9-cell coupon cavity (right).

[#] keisuke_nii@e-marui.jp

カソードから空洞内に拡散する気泡を抑制して研磨量分布を改善するため、EP 液を空洞内に流動させる際に入りを Ninja カソードの内部と外部(空洞内部)の 2 つに分けてそれぞれ独立に流量を制御するシステムを開発した(流路分離法) [10]。Ninja カソード内部の流量を多くすることにより気泡の上部への排出を促し、空洞内部への気泡拡散を防止する。また、空洞内部の流量を少なくすることにより研磨時に気泡跡ができるのを防止する。このシステムの模式図を図 2 に示す。

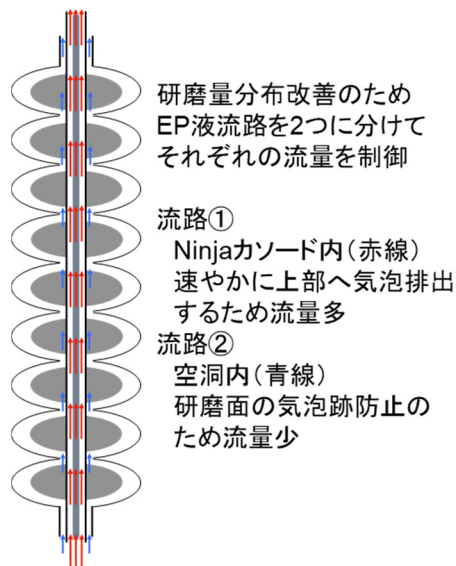


Figure 2: Schematics and explanation of separate flow system.

2.2 流路分離 VEP と研磨状態の評価

研磨量分布改善の効果を確認するため、9 セルクーポン空洞にて流路分離法を用いた VEP 実験を行った。各パラメータを表 1 に示す。気泡の抑制効果をさらに高めるために VEP 中に電圧 OFF 時間を入れて気泡を消す方法を行った。

Table 1: Conditions of Separate Flow VEP

パラメータ	流路分離 VEP
EP 液	H ₂ SO ₄ (98%):HF(55%)=9:1
電圧	~17.5 V (3minON/3minOFF)
電流密度	~15 mA/cm ²
空洞表面温度	~15 °C
カソード回転速度	20 rpm
EP 液流量 (Ninja 内部)	~10 L/min
EP 液流量 (空洞内部)	~5 L/min
EP 時間	~120 min (ON 時間)

流量のパラメータを決定するにあたって空洞内流量を従来の 5L/min に固定し、Ninja 内流量を変えて VEP 中の気泡と上セルのクーポン電流の様子を確認した。その結果を図 3 に示す。気泡については 0L/min のときは空洞内に白い気泡が多数見られたが 10L/min にすると気泡はほとんど見られなかった。また、クーポン電流は 0~5L/min のときは上アイリス部の電流が多く不均一になっていたが、10L/min とすると各クーポン電流が均一になっていた。

この結果より、今回のパラメータを Ninja 内流量 10L/min、空洞内流量 5L/min とした。

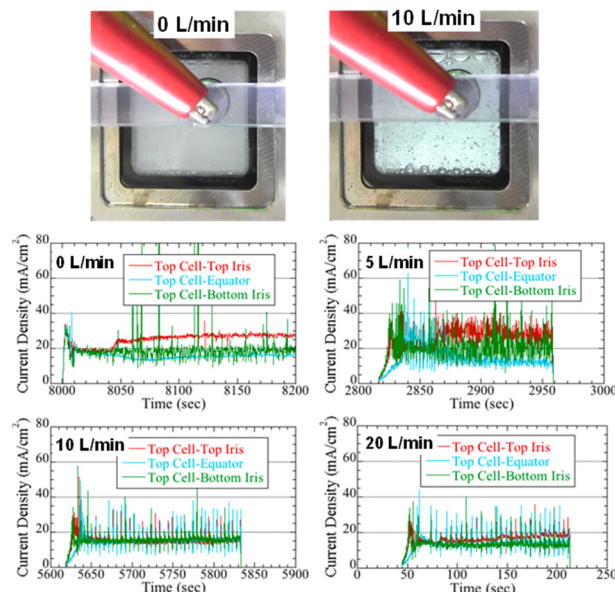


Figure 3: Flow rate of inside Ninja cathode dependence of bubbles inside the cavity (upper) and top cell coupon current (lower).

VEP 中の電流電圧を図 4 に示す。ON 時間中ではニオブの電解研磨に特有な電流の振動(オシレーション)が見られ、良好な EP が進んでいることが確認された。

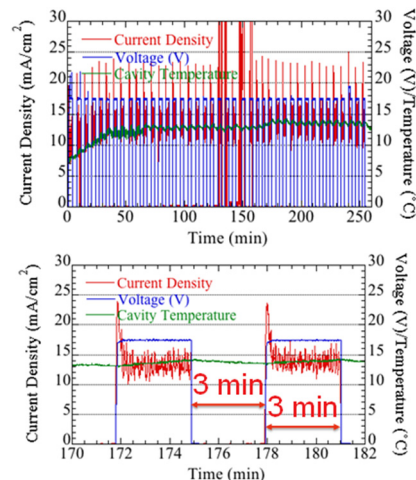


Figure 4: Current density, voltage and cavity surface temperature during this VEP.

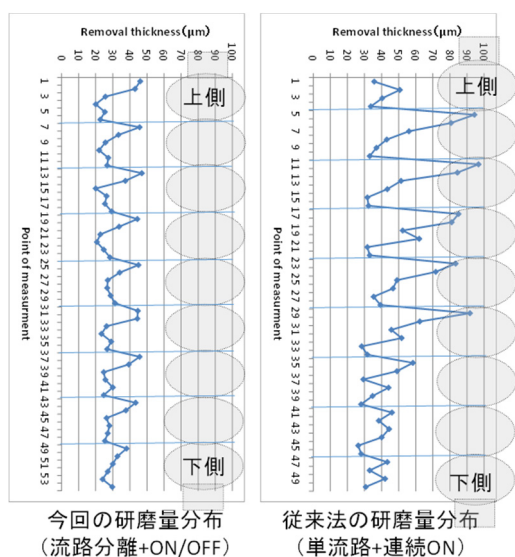


Figure 5: Removal thickness distribution after this VEP (separate flow and voltage ON/OFF) (left) and conventional VEP (one flow and continuous voltage) (right).

流路分離 VEP 後の研磨量分布を測定し、従来の単流路 VEP と比較した結果を図 5 に示す。従来法では、上セルの上アイリス部の研磨量が極端に大きくなり(下アイリス 30 μ m に対して 3 倍以上の 95 μ m)、不均一となっていたが、流路分離 VEP では上アイリス部でも極端に研磨量が大きくなり(下アイリス 25 μ m に対して約 1.8 倍の 45 μ m)、研磨量の均一性が改善していることが分かった。

流路分離 VEP 後の各クーポンの表面状態と表面粗さ測定結果を図 6 に示す。すべてのクーポンで表面の光沢が見られ、表面粗さも良好であった。これより、流路分離 VEP においても従来の EP と同様の良好な研磨表面が得られていることが分かった。

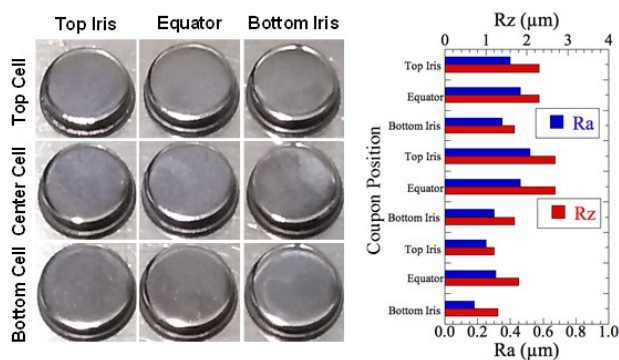


Figure 6: Photos of each coupon surface after this VEP (left) and surface roughness results (right).

3. 1.3GHz9 セル空洞の VEP と加速性能評価

3.1 VEP セットアップ

9 セル空洞 VEP 後の加速性能を評価するため、1.3GHz ニオブ 9 セル空洞の VEP と縦測定を行った。9 セル空洞は KEK 所有の TB9-TSB02、VEP 設備は岩手コラボ(マルイ鍍金、東日本機電開発、WING)で共同開発した自動制御バルブを持つ VEP 設備を使用した。カソードは絶縁物羽根+電極面積を増加した Ninja-3 タイプを用いた。設備、空洞の写真を図 7 に示す。



Figure 7: Photos of VEP facility (upper left), cavity setup (right), 9-cell cavity TB9-TSB02 (lower left).

3.2 VEP と加速性能評価

VEP は同じ空洞で 2 回行った。VEP1、VEP2 の条件を表 2 に示す。VEP1 は従来の単流路で、VEP2 は流路分離法で実施した。EP 電圧は、VEP 前に IV 特性の確認を行い、十分に研磨領域内となる電圧を選んで設定した。

Table 2: Conditions of This VEP

パラメータ	VEP 1	VEP 2
VEP 法	単流路	流路分離
EP 液	H ₂ SO ₄ (96%):HF(40%)=9:1	
電圧	~15 V (連続)	~18V (3minON/3minOFF)
空洞表面温度	~20 °C	~18 °C
カソード回転速度	20 rpm	
EP 液流量	~5 L/min	~5L/min (空洞) ~10L/min (Ninja)
平均研磨量	52 μ m	18 μ m

VEP1、2 中の電流密度、電圧、空洞表面温度を図 8 に示すニオブの電解研磨に特有な電流の振動(オシレーション)が見られており、良い条件で電解研磨が進んでいることがわかる。

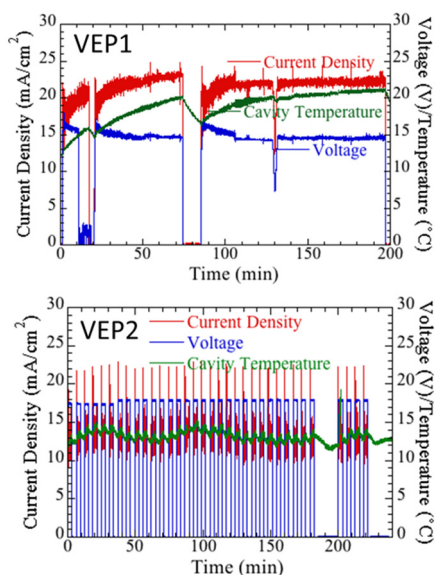


Figure 8: Current density, voltage and cavity surface temperature during VEP1 (upper) and VEP2 (lower).

各 VEP 後の京都カメラによる内面観察結果を図 9 に示す。VEP1 後に上の 3 セルの内部で表面荒れが見られた。VEP2 後にこれらの荒れは改善しているが、他のセルに比べるとまだ荒い状態となっていた。それ以外の 6 セルは VEP1、VEP2 後とも荒れは見られず良好であった。

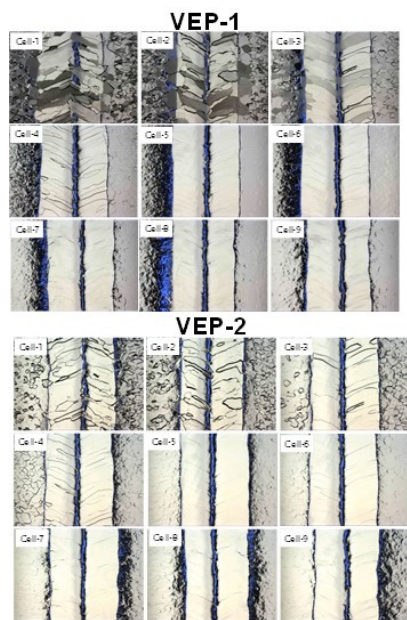


Figure 9: Photos of Kyoto camera inspection of VEP1 (upper) and VEP2 (lower).

各 VEP 後の研磨量分布の測定結果と空洞のフィールドフラットネスの測定結果をそれぞれ図 10、図 11 に示す。VEP1 では、上セルの上アイリス部の研磨量が極端に大きくなり(下アイリス $40\mu\text{m}$ に対して約 3 倍の $120\mu\text{m}$)、不均一となっていた。これに伴いフィールドフラットネスも VEP 前の 90% から 67% へと大幅に悪化していた。一方、VEP2 では上アイリス部でも極端に研磨量が大きくなり

(下アイリス $15\mu\text{m}$ に対して約 1.7 倍の $25\mu\text{m}$)、比較的均一な研磨量分布であった。フィールドフラットネスも VEP 前の 97% と比べて 98% となっており悪化していないことが分かった。

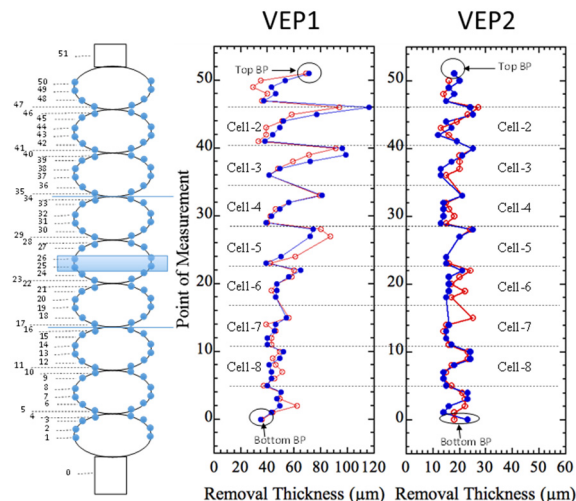


Figure 10: Removal thickness distribution after VEP1 (left) and VEP2 (right).

	VEP1	VEP2
VEP 前	90%	97%
VEP 後	67%	98%

Figure 11: Field flatness change before and after VEP1 and VEP2.

VEP2 後に KEK にて縦測定を実施した。結果を図 12 に示す。加速勾配 19MV/m ($Q_0=1.2\text{E}10@1.6\text{K}$) でクエンチが発生した。これは、上の 3 セルの研磨後表面がやや荒れていること、表面欠陥が存在していることによると思われるが、現状詳細はわかっていない。

今後、さらに VEP 条件、カソード、設備の改善と 1.3GHz 9 セル空洞の VEP、評価実験を行い、ILC 仕様 ($35\text{MV/m}@1.0\text{E}10$) を満たす空洞製造への VEP 適用を目指す。

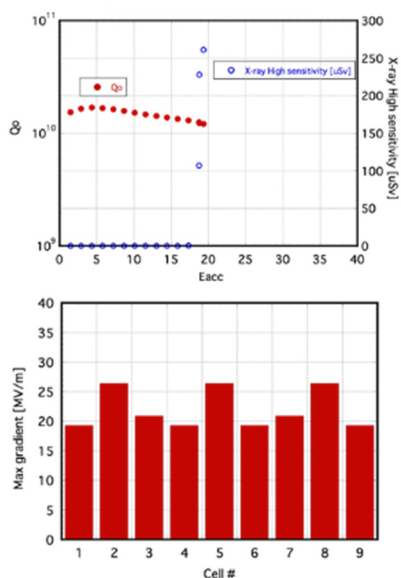


Figure 12: Vertical test results of total cavity (upper) and each cavity (lower).

4. まとめ

ニオブ9セル空洞 VEP の研磨量分布改善のため、カソードからの気泡拡散を抑制する流路分離法を考案し、9セルクーポン空洞を用いて VEP 実験を行った。各流路の流速を最適化した結果、従来法に比べて研磨量分布が改善することが確認された(従来法 Max3 倍→流路分離法 Max1.8 倍)。

また、1.3GHzニオブ9セル空洞の VEP を行い、加速性能評価を行った。流路分離法での VEP では研磨量分布の改善とともに、フィールドフラットネスが悪化しないことも確認された。加速性能は 19MV/m ($Q_0 = 1.2E10@1.6K$) でクエンチが発生した。これは内面の荒れや欠陥が原因と考えられるが、現状詳細は不明である。

今後、さらに VEP 条件、カソード、設備の改善と 1.3GHz9 セル空洞の VEP、評価実験を行い、ILC 仕様を満たす空洞製造への VEP 適用を目指す。

謝辞

マルイ鍍金での自動バルブ制御の 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] 仁井啓介他 第 12 回日本加速器学会年会、敦賀市 2015 WEP048.
- [2] 仁井啓介他 第 12 回日本加速器学会年会、敦賀市 2015 WEP049.

- [3] 仁井啓介他 第 13 回日本加速器学会年会、千葉市 2016 TUP026.
- [4] 仁井啓介他 第 13 回日本加速器学会年会、千葉市 2016 TUP027.
- [5] V.Chouhan *et al.*, SRF2015, Whistler, Canada 2015, THBA02.
- [6] V.Chouhan *et al.*, SRF2015, Whistler, Canada 2015, MOPB105.
- [7] V.Chouhan *et al.*, LINAC16, East Lansing, MI USA 2016, MOPLR037.
- [8] K.Nii *et al.*, LINAC16, East Lansing, MI USA 2016, MOPLR039.
- [9] V.Chouhan *et al.*, SRF2017, Lanzhou, China 2017, TUPB091.
- [10] V.Chouhan *et al.*, IPAC18, Vancouver, Canada 2018, THPAL030.