

Ninja カソードを用いたニオブ加速空洞の縦型電解研磨(VEP)における研磨量均一化と高空洞加速性能の達成

ACHIEVEMENT OF UNIFORM REMOVAL AND HIGH CAVITY ACCELERATING PERFORMANCE ON NIOBIUM ACCELERATING CAVITY VERTICAL ELECTROPOLISHING WITH NINJA CATHODE

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. started development of internal surface electropolishing technology for niobium cavities, making use of years of experience in electropolishing construction. Focusing on vertical electrolytic polishing (VEP) method, which is superior in cost and suitable for mass production, we have been developing technology and equipment jointly with KEK. We succeeded in greatly improving the uniformity of the removal thickness, which was a major problem of VEP, by developing our unique Ninja cathode and optimizing the VEP parameters. And, in the VEP of the niobium single cell cavity, an accelerating gradient of 32 MV/m ($Q_0=8.0E9$), comparable to that of the horizontal electrolytic polishing (HEP) was achieved. Also, in the niobium 9 cell cavity, in addition to the improvement of the Ninja cathode, the flow of the bubbles in the VEP is controlled to improve the distribution of removal thickness and the polishing state, and the accelerating gradient of 28 MV/m ($Q_0 = 6.7E9$) similar to HEP is achieved. In this presentation, we will report on the results of these VEP technology developments and future efforts.

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り製造コストの削減が課題となっている。これまでは、加速空洞の電解研磨には横型電解研磨(HEP)が用いられ、超伝導加速器の製造が行われてきた。HEP はこれまでに技術が確立され、量産実績が多数ある一方、設備の複雑さや処理コスト等に課題があるとされている。そこでマルイ鍍金工業では、まだ技術は確立されていないが、処理コスト低減を可能にすると言われる縦型電解研磨(VEP)に着目し、KEK と共同で設備、技術の開発をスタートした。

本論文では、これまでに開発した VEP 設備、クーボン空洞、Ninja カソードの紹介、これらを用いてニオブ単セル空洞、9セル空洞の VEP を行った結果とそれらの加速性能評価の結果を報告する。

2. VEP 設備とクーボン空洞の開発

2.1 VEP 設備の開発

これまでに、マルイ鍍金で開発、作製してきた VEP 設備の写真を図 1 に示す[1]。

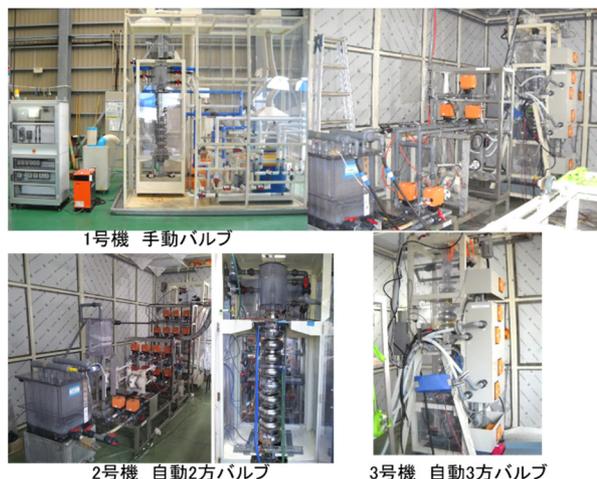


Figure 1: Photos of Marui's VEP facility ver. I-3.

1号機は配管、バルブとも塩ビ製で、バルブはすべて手動バルブである。流路の切り替えはすべて手動で、1つ1つのバルブを操作する必要があった。2号機は電気制御の自動バルブを用いて作製した。流路の切り替えはタッチパネルでバルブ操作できるほか、特定の状態のプログラムを作成しておき、そのプログラムを選択することにより、すべてのバルブを所定の状態にすることができる。さらに3号機では、電気制御の3方バルブを用いてバル

[#] keisuke_nii@e-marui.jp

ブ数を削減している。また、3号機では一部テフロン製のフレキシブルチューブを使用している。

2.2 クーポン空洞の開発

VEP技術の開発やパラメータの最適化を行うにあたり、評価用のクーポン空洞を作製した[2]。クーポン空洞の構成、写真を図2に示す。

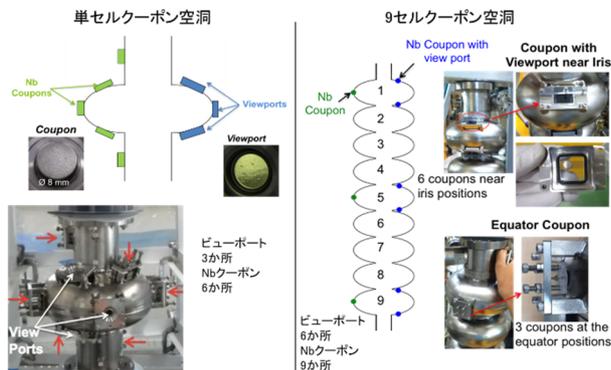


Figure 2: Photos and schematics of coupon cavity (left) single-cell coupon cavity, (right) 9-cell coupon cavity.

クーポン空洞は、空洞に穴をあけて直径 8mm のニオブ薄片(クーポン)と内部観察用のビューポートを取り付けた構造となっている。クーポンは空洞本体とは絶縁されており、個別に電圧印可、電流測定を行うことができる。これにより、クーポンを取り付けた各部分(赤道、上下アイリス部等)の電流分布の評価が可能となる。また、クーポンは各種表面分析装置にセットすることができ、研磨後の表面状態を詳細に調べることができる。ビューポートからは、EP中の空洞内部の様子を見ることができ、カソードから発生する気泡の量や流れ方を検証することができる。

クーポン空洞は、研磨量の均一化や研磨内面の改善実験で多くのデータが取れるために大変有用であった。

3. Ninja カソードの開発

VEPにおいてはこれまで、研磨内面の平坦性や研磨量の均一性に課題があった。この課題を解決するために、独自構造の陰極「Ninja カソード」を開発、作製改良を続けてきた。これまでに開発した Ninja カソードの模式図を図3に示す。Ninja カソードは1つのセルに対して複数の羽根状の部材があり、空洞にセットするときはこれをカバー内部に収納し、EPを行うときはこれをカバーより出して使用する。また EP 時にはこれを回転して内部の攪拌を行う。

Ninja カソードの羽根は Ver1 では金属で作製していた。これにより赤道付近までよく EP できるという利点があったが、気泡が多く発生して空洞内部に滞留するため、表面の気泡跡や研磨量の不均一発生の原因となった[3]。

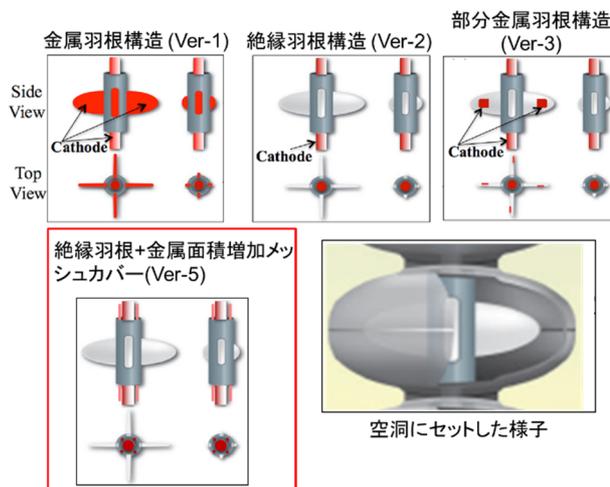


Figure 3: Schematics of Ninja cathode ver.1-5.

Ver2にて絶縁物の羽根としたところ、気泡は減少したが赤道付近によく EP がかからず表面が荒れる問題があった。Ver3ではこれらを両立するため絶縁物羽根の先端に金属の薄片を配置した構造とした。これは気泡が少なくなかつ赤道までよく EP できていたが、少量の気泡の影響が見られた[4]。Ver5では、羽根は絶縁物とし、カバー内の電極面積を大幅に増やすとともに、カバーにスリットとメッシュカバーを配置し、EP効果の増大と気泡拡散の防止を狙った[5]。

4. 単セル空洞の VEP と加速性能評価

4.1 クーポン空洞を用いた研磨量分布の改善実験

Ninja カソードによる VEP 研磨量均一化と研磨表面改善を目指して、単セルクーポン空洞と Ninja-ver5 を用いて VEP 実験を行った[5]。

まず、VEP 中の上アイリスと下アイリスのクーポン電流を図4に示す。

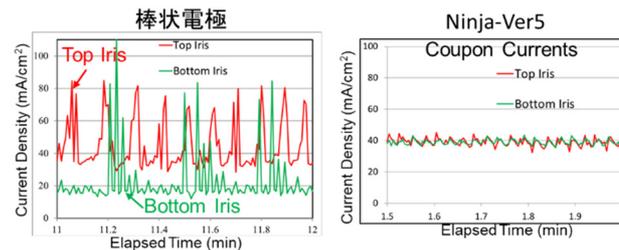


Figure 4: Coupon current of top iris and bottom iris (left) with a rod cathode, (right) with a Ninja cathode ver5.

棒状電極での VEP では上アイリスと下アイリスの電流に大きな差があり、上アイリスが下アイリスの2倍程度の電流が流れている。対して Ninja-ver5 では、両者の電流はほぼ同じとなっている。これは、Ninja-ver5により、空洞全体の電流分布が均一化されていることを示唆している。次に、VEP後の研磨量分布の結果を図5に示す。

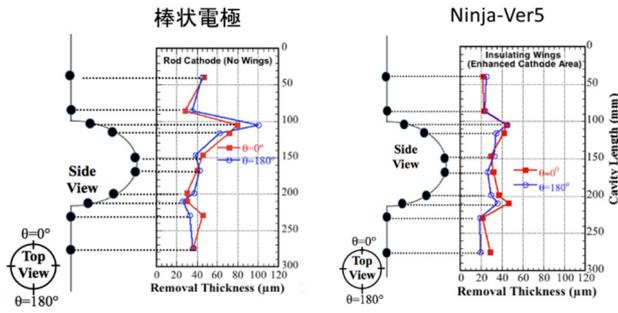


Figure 5: Removal thickness distribution after VEP (left) with a rod cathode, (right) with a Ninja cathode ver5.

棒状電極では、上アイリス部の研磨量が突出して大きく、他の部分の2~3倍となっていたが、Ninja-Ver5では2倍以内となっていた。また、研磨量の上下の対称性も改善していることが分かった。研磨後の表面状態を図6に示す。

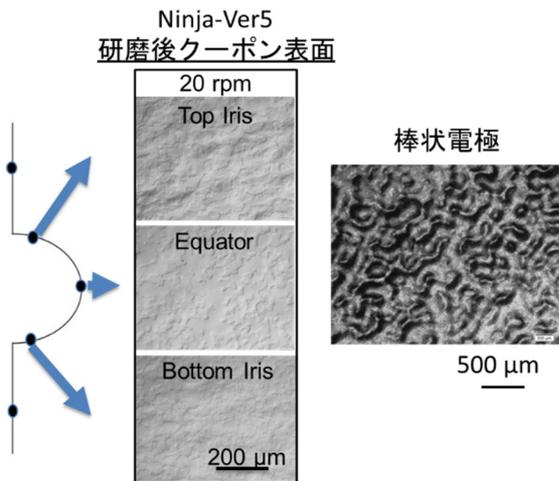


Figure 6: Surface status after VEP with a Ninja cathode ver5 and a rod cathode.

棒状電極の場合は、気泡の跡のようなものがあって表面が荒れているのに対し、Ninja-Ver5の場合は赤道、両アイリスとも泡の跡がなく平坦な研磨面となっていた。これらから、Ninja-ver5を用いたVEPは非常に良好であった。

4.2 単セル空洞 VEP と加速性能評価

Ninja-ver5を用いて1.3GHzニオブ単セル空洞(TB1-TSB02)のVEPを行い、縦測定による加速性能評価を行った[6]。手順はVEP1(36μm)→HPR、ベーキング→アニール→VEP2(10μm)→HPR、ベーキング→縦測定である。VEP1後に研磨量分布と研磨内面の確認を行ったので結果を図7に示す。研磨量分布は良好であり、研磨内面も光沢があり平坦であった。

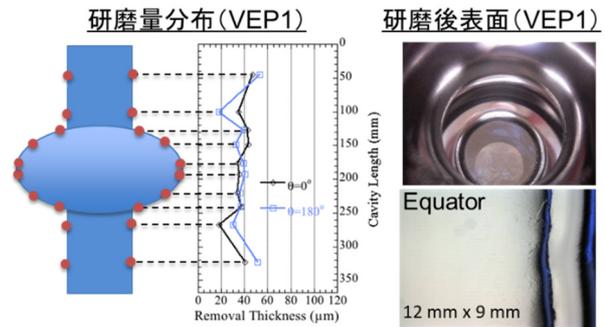
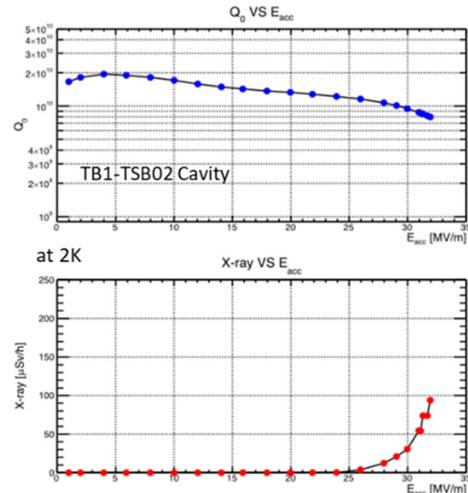


Figure 7: Removal thickness distribution and surface inspection after VEP1.

この空洞のVEP後の縦測定の結果を図8に示す。32MV/m($Q_0=8.0E9$)の加速性能を達成した。これは、同空洞のHEP後の結果と同程度である。これにより、VEPにおいてもHEPと同様の加速性能をだすことが可能であることが示された。

VEP後の加速性能評価



HEPとVEPの加速性能の比較

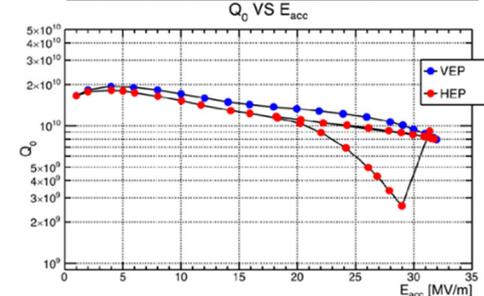


Figure 8: The results of cavity vertical test after VEP and comparison with after HEP.

5. 9セル空洞のVEPと加速性能評価

5.1 クーポン空洞を用いた研磨量分布の改善実験

Ninja-Ver5を用いて9セル空洞のVEPを行い、研磨量分布と研磨内面観察を行ったが、問題が発生した[7]。これらの結果を図9に示す。

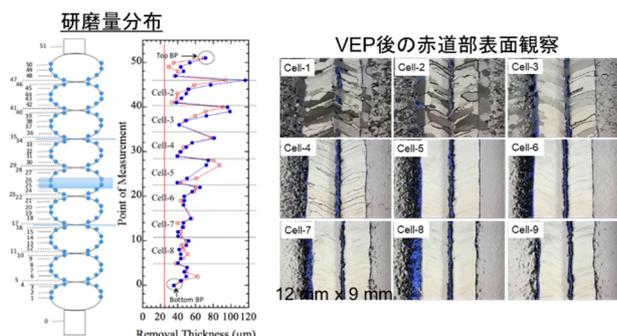


Figure 9: Removal thickness distribution and surface inspection results after VEP with a Ninja cathode ver5.

研磨量分布は下のほうのセルでは良好であるが、上のセルになるほど分布が悪化していた。研磨表面も同様に上のセル程悪化する傾向が見られた。これは、下の方のセルは Ninja-ver5 の効果により気泡の発生が抑制されているものの、上へ行くほど気泡が蓄積され、その影響で研磨量分布や研磨表面が悪化しているものと考えられる。9セル空洞 VEP においては、さらなる気泡対策が必要となった。

そこで、気泡を滞留、蓄積させずに素早く排出するため、Ninja カソードのカバー内部と外部で EP 液流路を分けて、流量を別制御する方法を考案した(2 フロー法)[8]。カバー内部は素早く気泡を排出するために流量を多く、カバー外部(空洞内部)では空洞内面に気泡跡がつくことを避けるために流量を少なくする。2 フローの模式図とクーポン電流、内部の気泡状態のカバー内流量依存性確認結果を図 10 に示す。

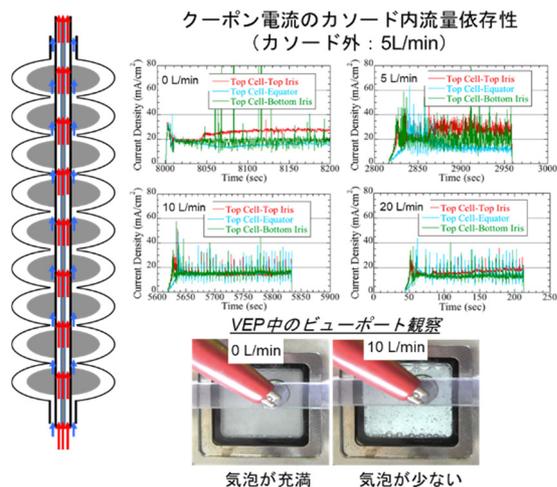


Figure 10: (Left) a schematic of 2-flow system, (upper right) logged data of coupon current, (lower right) viewport inspection during VEP.

カバー内の流量が 0~5L/min の場合は上下アイリスでクーポン電流の差が見られたが、10L/min では差がなく均一になっていた。また、内部の気泡も 10L/min がもっとも少なくなっていることが分かった。

2 フロー法に加えて、EP 中に電源 OFF 時間を入れること(電源カットオフ)により発生した気泡を消滅させること

を考案した。確認実験の結果、3min-ON+3min-OFF で気泡消滅効果が得られることが分かった。この 2 つ(2 フロー+電源カットオフ)を用いた VEP 後の研磨量分布評価結果を図 11 に示す。

2つの改善法により、特に上側のセルの研磨量分布が大きく改善していることがわかる。

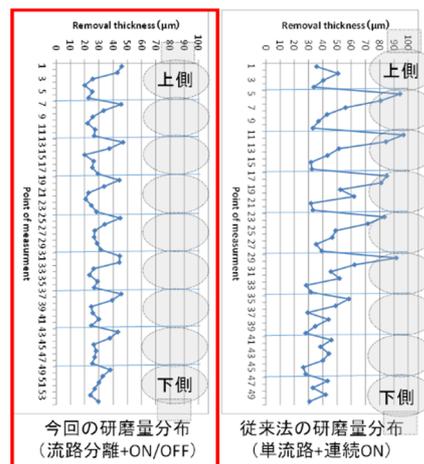


Figure 11: Removal thickness distribution of (left) VEP with 2-flow and cut-off and (right) conventional VEP.

5.2 9セル空洞 VEP と加速性能評価

これらの方法を用いて 1.3GHz ニオブ 9セル空洞 (TB9-TSB01) の VEP と加速性能の評価を行った[9]。手順は VEP1 (100μm) →HPR+アニール→VEP2 (20μm) →HPR+アニール→チューニング→VEP3 (10μm) →HPR+ベーク→縦測定、である。VEP1,2 後の研磨量分布測定結果を図 12 に、VEP1 後の研磨内面観察結果を図 13 に示す。

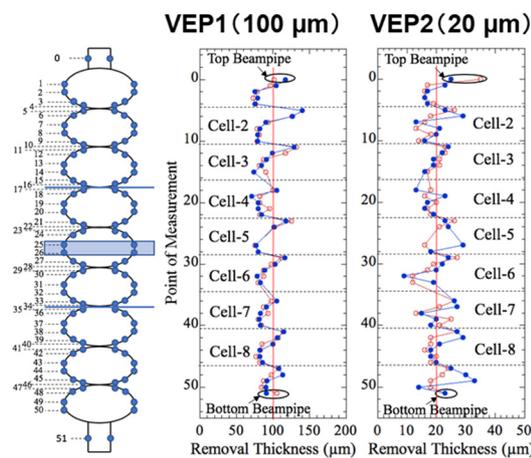


Figure 12: Removal thickness distribution after VEP1 and VEP2.

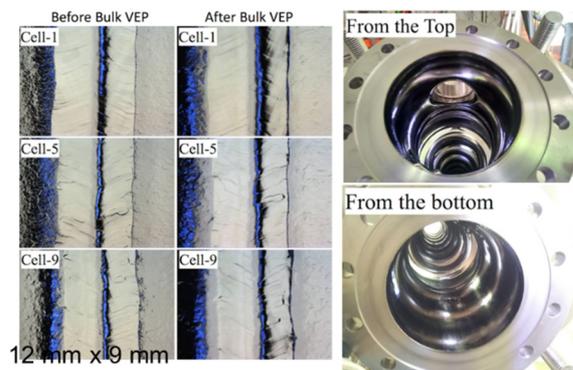


Figure 13: Surface inspection results after VEP1.

研磨量分布は VEP1、VEP2 とも良好であり、研磨後表面も光沢があり、平坦であった。また VEP2 前後のフィールドフラットネスは 97%→98%とほとんど変化しなかった。本プロセス後の縦測定の結果を図 14 に示す。

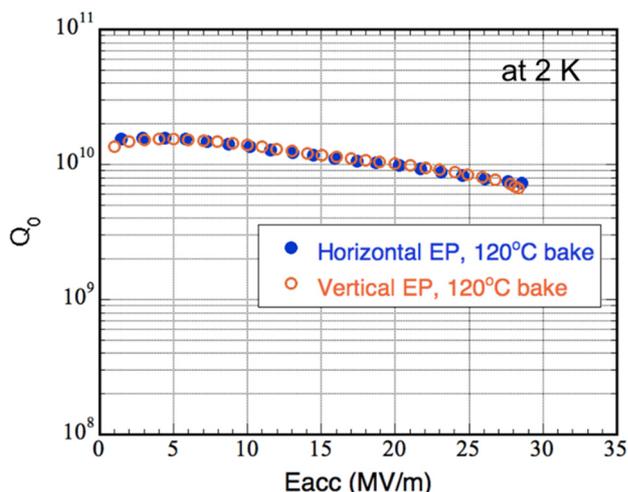


Figure 14: Vertical test results after this VEP.

28MV/m ($Q_0=6.7E9$) の加速性能を達成した。これは、同空洞の HEP 後の結果と同程度である。これにより、9セル空洞の VEP においても HEP と同様の加速性能をだすことが可能であることが示された。

6. まとめと今後の取り組み

マルイ鍍金工業では、まだ技術は確立されていないが、空洞の製造コスト低減を可能にする縦型電解研磨 (VEP) に着目し、KEK と共同で設備、技術の開発をスタートした。VEP 用の設備と実験用のクーボン空洞、独自構造陰極「Ninja カソード」を開発、作製し、VEP の課題である研磨量分布の均一化と研磨内面の改善のため実験を行った。

Ninja カソードは、絶縁羽根+金属面積増加の Ver5 を作製し、単セル空洞の VEP 実験を行った。結果、気泡の影響を抑えることに成功し、研磨量分布、研磨内面とも良好であることを確認した。縦測定の結果、32MV/m ($Q_0=8.0E9$) の加速性能を達成した。

9セル空洞の VEP においては、さらに気泡対策が必要となり、2フロー法と電源 OFF 時間の挿入を考案した。これらを実施した結果、9セル空洞においても研磨量分布と研磨内面の改善が可能となった。縦測定の結果、28MV/m ($Q_0=6.7E9$) の加速性能を達成した。縦測定の結果は単セル、9セル空洞とも同空洞を HEP したときと同程度であり、VEP においても従来の HEP と同様の性能を出すことが可能であることを実証した。

今後は、ILC 規格である 35MV/m ($Q_0=8.0E9$) 以上を目指して VEP 実験を続けるとともに、コストの検証やコスト削減に向けた取り組みを行いたいと考えている。コスト削減については特にタクトタイムの減少 (OFF 時間をなくすなど) と歩留まりの確認、向上に取り組むと考えている。

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] Y. Ida *et al.*, SRF2019, Dresden, Germany 2019, TUP028.
- [2] S. Kato *et al.*, LINAC16, East Lansing, MI USA 2016, MOPLR038.
- [3] V. Chouhan *et al.*, LINAC14, Geneva, Switzerland 2014, THPP098.
- [4] V. Chouhan *et al.*, SRF2015, Whistler, Canada 2015, THBA02.
- [5] V. Chouhan *et al.*, LINAC16, East Lansing, MI USA 2016, MOPLR037.
- [6] K. Nii *et al.*, IPAC18, Vancouver, Canada 2018, THPAL032.
- [7] V. Chouhan *et al.*, SRF2017, Lanzhou, China 2017, TUPB091.
- [8] V. Chouhan *et al.*, IPAC18, Vancouver, Canada 2018, THPAL030.
- [9] V. Chouhan *et al.*, LINAC18, Beijing, China 2018, TUPO068.