

# マルイ鍍金-KEK-CEA サクレーで実施した Ninja カソードを用いた 1.3GHz ニオブ 単セル空洞の縦型電解研磨と加速性能評価

## 1.3GHz Nb SINGLE CELL CAVITY VERTICAL ELECTROPOLISHING WITH NINJA CATHODE AND EVALUATION OF ACCELERATING GRADIENT PERFORMED BY MARUI GALVANIZING-KEK-CEA SACLAY

仁井 啓介<sup>#,A)</sup>, Vijay Chouhan<sup>A)</sup>, 井田 義明<sup>A)</sup>, 山口 隆宣<sup>A)</sup>, 早野 仁司<sup>B)</sup>, 加藤 茂樹<sup>B)</sup>, 文珠四郎 秀昭<sup>B)</sup>,  
佐伯 学行<sup>B)</sup>, 沢辺 元明<sup>B)</sup>, 井藤 隼人<sup>C)</sup>, 及川 大基<sup>D)</sup>, Fabien Eozenou<sup>E)</sup>, Luc Maurice<sup>E)</sup>, Pol Carbonnier<sup>F)</sup>,  
Catherine Madec<sup>F)</sup>, Thomas Proslie<sup>F)</sup>, Christophe Servouin<sup>F)</sup>

Keisuke Nii<sup>#,A)</sup>, Vijay Chouhan<sup>A)</sup>, Yoshiaki Ida<sup>A)</sup>, Takanori Yamaguchi<sup>A)</sup>, Hitoshi Hayano<sup>B)</sup>, Shigeki Kato<sup>B)</sup>, Hideaki  
Monjushiro<sup>B)</sup>, Takayuki Saeki<sup>B)</sup>, Motoaki Sawabe<sup>B)</sup>, Hayato Ito<sup>C)</sup>, Hiroki Oikawa<sup>D)</sup>, Fabien Eozenou<sup>E)</sup>, Luc Maurice<sup>E)</sup>,  
Pol Carbonnier<sup>F)</sup>, Catherine Madec<sup>F)</sup>, Thomas Proslie<sup>F)</sup>, Christophe Servouin<sup>F)</sup>

<sup>A)</sup> Marui Galvanizing Co., Ltd.

<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

<sup>C)</sup> Sokendai

<sup>D)</sup> Utsunomiya University

<sup>E)</sup> CEA/DSM/IRFU

<sup>F)</sup> CEA/DRF/IRFU

### Abstract

Marui Galvanizing Co., Ltd. has been developing Nb cavity vertical electropolishing (VEP) technologies in collaboration with KEK. And till now, using our unique cathode named “Ninja” and single-cell coupon cavity, various parameter and cathode structure optimization experiments were performed. Through these experiments, we achieved surface state and removal uniformity improvement. In order to confirm the contribution of these results to the effect of cavity performance improvement, KEK’s 1.3GHz Nb single-cell cavity (TB1-TSB02) was VEPed using Marui’s VEP facility and Ninja cathode, performed vertical test at KEK. In addition, in collaboration with CEA Saclay, Ninja cathode was installed into CEA Saclay’s VEP facility and CEA Saclay’s 1.3GHz single-cell cavity (TP02) was VEPed using this system and vertical test was performed. In both case, accelerating gradient of over 30 MV/m was achieved. It is proved that our Ninja cathode is effective to improve accelerating gradient of Nb single-cell cavity.

### 1. はじめに

マルイ鍍金工業では、来るべき International linear collider (ILC) の建設開始に向けて、KEK と共同で建設コスト低減を可能にするニオブ製超伝導加速空洞の縦型電解研磨 (VEP) 技術開発に取り組んでいる。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]。

ニオブ製単セル加速空洞の VEP については、これまでに表面分析用のニオブクーポンを装着できる単セルクーポン空洞を用いて、Ninja カソードの構造改善と VEP パラメータの最適化、VEP 後の研磨状態評価を行ってきた。そしてこれらにより、VEP 後の研磨量分布や表面粗さが改善することを報告してきた[4-7]。また加速性能の評価については、マルイ-KEK-コーネル大学で Ninja カソードを用いた 1.3GHz ニオブ単セル空洞 VEP 実験を行い、35MV/m ( $Q_0=9E9@2K$ ) が得られたことを報告した[8-10]。

さらに Ninja カソードを用いた単セル空洞 VEP の評価

を進めるため、マルイ鍍金-KEK が共同でマルイ鍍金の Ninja カソードと VEP 設備を用いた 1.3GHz ニオブ単セル空洞 VEP とその加速性能評価を行った[11]。また、マルイ鍍金-KEK-CEA Saclay が共同で、マルイ鍍金にて準備した Ninja カソードを CEA Saclay の VEP 設備にセットして VEP を行い、研磨表面や研磨量分布の確認、加速性能評価を行った[12]。

### 2. マルイ-KEK で実施した VEP とその評価

#### 2.1 VEP セットアップと実験手順

今回の実験で用いた単セル空洞、VEP 設備、空洞セットアップの写真を図 1 に示す。単セル空洞は KEK 所有の TB1-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用いた設備を使用した。カソードは絶縁物羽根+電極面積を増加した Ninja-3 タイプを使用した[7]。

空洞処理は VEP1 (180 分、36  $\mu$ m) → HPR、ベーキング (120°C、48 時間) → アニール (750°C、3 時間) → VEP2 (50 分、10  $\mu$ m) → HPR、ベーキング (120°C、48 時間) → 縦測定の手順で行った。VEP1,2 はマルイ鍍金にて、

<sup>#</sup> keisuke\_nii@e-marui.jp

HPR、ベーキング、アニール、縦測定はKEKにて行った。

VEP1 後の内面観察、研磨量分布測定結果をそれぞれ図3、図4に示す。



Figure 1: Photos of single cell cavity TB1-TSB02 (upper left), VEP facility (lower left), cavity setup (right).

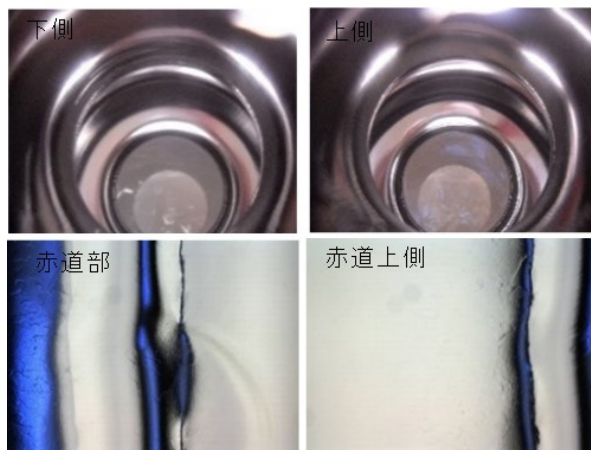


Figure 3: Photos of inner surface after VEP1 (upper) with a digital camera (lower) with Kyoto camera.

## 2.2 VEP と加速性能評価

VEP1、VEP2 の条件を表 1 に示す。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。その他はこれまでの VEP 実験で良好な研磨面が得られたパラメータを用いた。

Table 1: Conditions of This VEP

パラメータ	VEP 1	VEP 2
EP 液	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (98%):HF(55%)=9:1	
電圧	~16 V	~17 V
電流密度	20 – 30 mA/cm <sup>2</sup>	
空洞表面温度	~20 °C	
カソード回転速度	20 rpm	
EP 液流量	~5 L/min	
EP 時間	~180 min	~50 min
平均研磨量	~36 μm	~10 μm

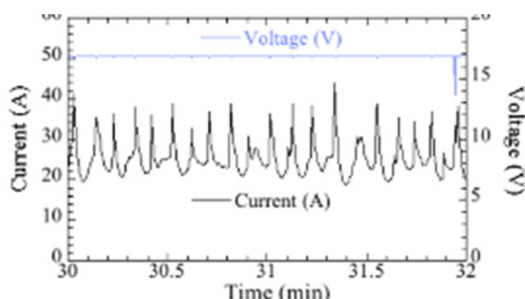


Figure 2: EP current and voltage during VEP2 (excerpt).

VEP2 中の電流電圧(抜粋)を図 2 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。VEP1 中の電流電圧も同様であった。

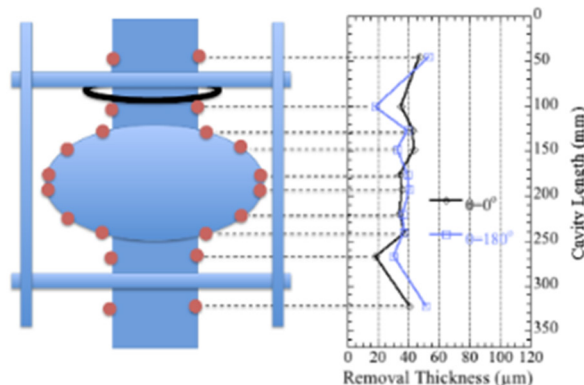


Figure 4: Removal thickness distribution after VEP1.

目視(デジタルカメラ)による外観観察では、光沢があり良好な内面であった。また京都カメラでの観察においても欠陥等はなく、平坦で良好な研磨面が観察された。研磨量分布はセル内では 0°、180°とも概ね均一で上下対称な分布となっていた。

VEP2 後の縦測定の結果を図 5 に、同空洞の横型電解研磨(HEP)後の加速性能との比較を図 6 に示す。加速性能は 32MV/m ( $Q_0=8.0E9@2K$ )を達成した。これは HEP 後の加速性能と比較しても、同等以上の性能となっている。

これより、マルイ鍍金の Ninja カソードや VEP 設備(岩手コラボ共同開発)を用いた VEP 処理においても従来の HEP と同等の性能が得られることがわかった。ILC 等の空洞製造へ VEP が適用できる可能性が開かれたと考える。

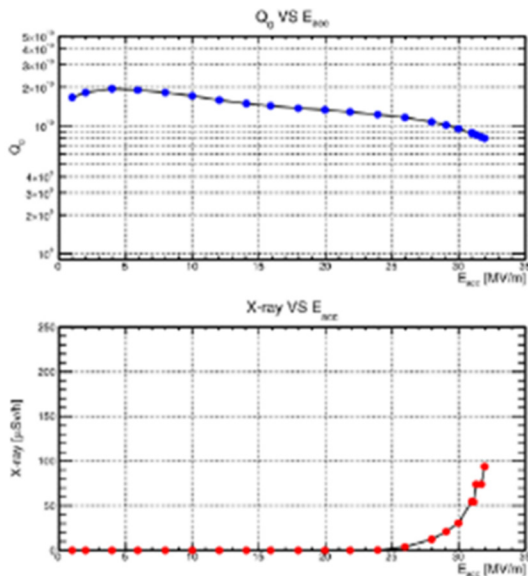


Figure 5: Vertical test results after VEP2 (upper) Q<sub>0</sub> vs E<sub>acc</sub>. (lower) X-ray vs E<sub>acc</sub>.

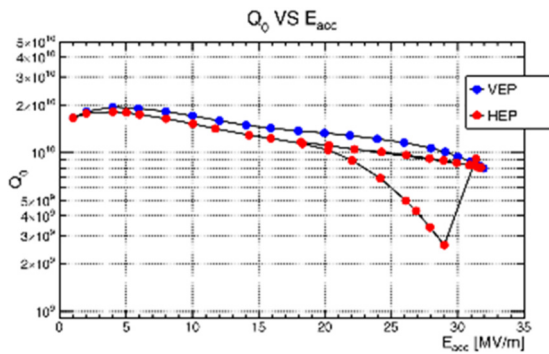


Figure 6: Accelerating gradient comparison of VEP and HEP using the same cavity.

### 3. マルイ-KEK-CEA Saclay で実施した VEP とその評価

#### 3.1 VEP セットアップと実験手順

今回の実験で用いた単セル空洞、VEP 設備、空洞セットアップの写真を図 7 に示す。

単セル空洞は CEA Saclay 所有の TP02、VEP 設備は CEA Saclay の 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 CEA Saclay の設備に適合するサイズ、形状でマルイ鍍金にて新規製作したものを使用した。

空洞処理は VEP を 2 回に分けて行い(VEP1、VEP2)、それぞれ空洞の上下を入れ替えて実施した。VEP2 後に CEA Saclay にて縦測定を行い、ベーキング(120℃、48 時間)を行った後再度縦測定を行った。



Figure 7: Photos of VEP facility (left), cavity setup (upper right), single cell cavity TP02 (lower right).

#### 3.2 VEP と加速性能評価

VEP1、VEP2 の条件を表 2 に示す。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
EP 液	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (96%):HF(40%)=9:1	
電圧	17.3 V	
空洞表面温度	~18 □	
カソード回転速度	20 rpm	
EP 液流量	~10 L/min	
EP 時間	546 min	665 min
目標研磨量	150 μm	

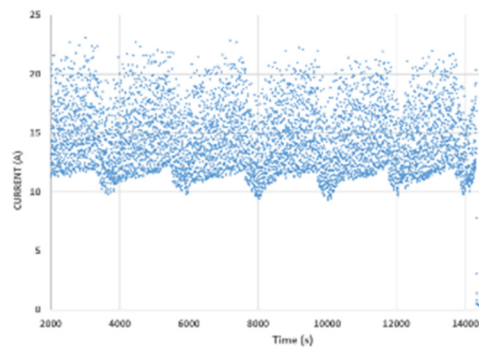


Figure 8: EP current during VEP1 (excerpt).

VEP1 中の電流電圧(抜粋)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。VEP2 中の電流電圧も同様であった。

VEP2 後の内面観察、研磨量分布測定結果をそれぞれ



れ図9、図10に示す。



Figure 9: Photos of inner surface after VEP2 with a digital camera.

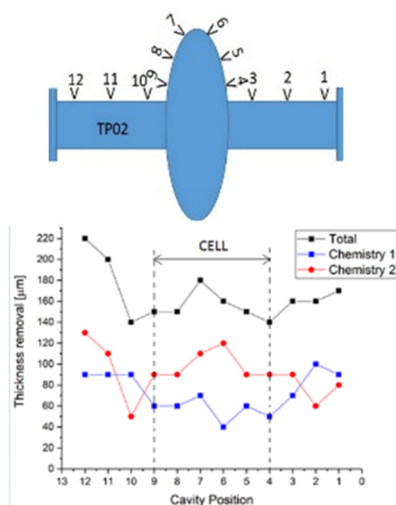


Figure 10: Removal thickness distribution after each VEP and total.

目視(デジタルカメラ)による外観観察では、光沢があり良好な内面であった。また研磨量分布はセル内ではVEP1、VEP2とも概ね均一で上下対称な分布となっていた。これは従来のCEA Saclayで行われたVEPと比べても改善がみられていた。

CEA Saclayで行われた縦測定の結果を図11に示す。

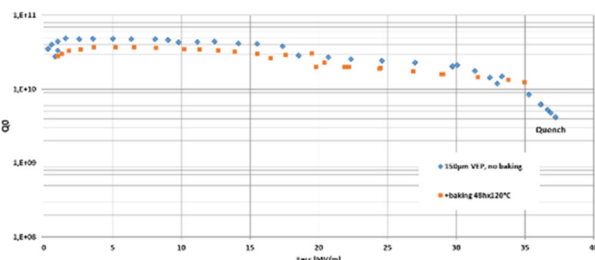


Figure 11: Vertical test result after this VEP (before and after baking).

加速勾配 35MV/m ( $Q_0=1.2E10@1.6K$ ) (ベーキング後)と良好な特性が得られた。これより、マルイ鍍金以外のVEP設備においても、それに合ったNinjaカソードを作製して使用すれば、良好な結果が得られることがわかった。

#### 4. まとめ

今回、マルイ鍍金-KEK-CEA Saclayが共同で1.3GHzニオブ単セル空洞のVEP実験と加速性能評価を行った。マルイ鍍金-KEK共同実験では、マルイのNinjaカソードとVEP設備(岩手コラボ共同開発)を用いてVEPを行いKEKにて縦測定を実施した。結果、研磨後表面や研磨量分布は良好であり、加速勾配 32MV/m ( $Q_0=8.0E9@2K$ )と良好な特性が得られた。

また、マルイ鍍金-KEK-CEA Saclay共同実験では、マルイのNinjaカソードとCEA SaclayのVEP設備を用いてVEPを行い、CEA Saclayにて縦測定を実施した。結果、研磨後表面や研磨量分布は良好であり、加速勾配 35MV/m ( $Q_0=1.2E10@1.6K$ )と良好な特性が得られた。

これらの結果から、Ninjaカソードを用いたVEPをニオブ空洞製造に適用しても、従来のHEPと同程度の性能が得られることがわかった。

今後は、1.3GHzニオブ9セル空洞についてもNinjaカソードを用いたVEPと加速性能評価を、KEKを始めとした研究機関と共同で進め、ILC規格を満たす空洞製造への適用とコスト低減への貢献を目指す。

#### 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] F.Furuta *et al.*, IPAC16, Busan, Korea 2016, WEPMR016.
- [9] F.Furuta *et al.*, SRF2017, Lanzhou, China 2017, TUPB073.
- [10] 仁井啓介他 第14回日本加速器学会年会、札幌市2017 TUP039.
- [11] K.Nii *et al.*, IPAC18, Vancouver, Canada 2018, THPAL032.
- [12] F.Eozenou *et al.*, IPAC18, Vancouver, Canada 2018, WEPMK015.