

## ニオブ製 1 セル加速空洞縦型電解研磨の研磨内面均一化

### HOMOGENEOUS INNER SURFACE POLISHING OF Nb 1-CELL CAVITY VERTICAL ELECTRO-POLISHING

仁井 啓介<sup>#, A)</sup>, Chouhan Vijay<sup>A)</sup>, 山口 隆宣<sup>A)</sup>, 石見 清隆<sup>B)</sup>, 井田 義明<sup>A)</sup>, 早野 仁司<sup>C)</sup>, 加藤 茂樹<sup>C)</sup>

佐伯 学行<sup>C)</sup>, 文珠四郎 秀昭<sup>C)</sup> 沢辺 元明<sup>C)</sup>

Keisuke Nii<sup>#, A)</sup>, Vijay Chouhan<sup>A)</sup>, Takanori Yamaguchi<sup>A)</sup>, Kiyotaka Ishimi<sup>B)</sup>, Yoshiaki Ida<sup>A)</sup>, Hitoshi Hayano<sup>C)</sup>,  
Shigeki Kato<sup>C)</sup>, Takayuki Saeki<sup>C)</sup>, Hideaki Monjushiro<sup>C)</sup>, Motoaki Sawabe<sup>C)</sup>

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

<sup>B)</sup> Marui Galvanizing Co., Ltd. Kashiwa factory

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

#### Abstract

In order to improve accelerating gradient of niobium (Nb) superconducting RF cavities, electropolishing (EP) is generally used for final surface treatment. Horizontal EP (HEP) system, which provides uniform polishing of Nb cavities, is being used for the surface treatment of Nb cavities. However, HEP might not be considered for mass production due to complicated and expensive system. In order to reduce cost of an EP system and surface treatment vertical EP (VEP), which usually results in non-uniform removal of Nb, is proposed. Marui Galvanizing Co., Ltd. in collaboration with KEK has been developing VEP system and optimizing VEP parameters so as to improve polishing uniformity. A Nb coupon cavity which contains 6 Nb coupons was vertically electropolished using our unique “Ninja” cathode of variable-geometry wings for optimization of VEP parameters. As a result of the VEP performed with these parameters significant improvement in inner surface uniformity was obtained.

#### 1. はじめに

ILC (国際リニアコライダ)用を始めとした加速器に用いられるニオブ製加速空洞は、加速性能の向上のために最終表面処理に電解研磨 (EP) が用いられている<sup>[1]</sup>。現在は空洞を横向きに配置する横型電解研磨法 (HEP) が主流であり<sup>[2]</sup>、実際の加速器製造にも用いられている。この HEP は内面の研磨均一性は良好であるが、コストや研磨時間など、量産性の面で課題を残している。電解研磨の方法として、空洞を縦向きに配置する縦型電解研磨法 (VEP) も提案されている。これは、量産性で有利な点が多い一方、内面の研磨均一性に課題を残している。

マルイ鍍金工業では、今後の空洞量産化を見据えて VEP に着目し、内面の研磨均一性を向上させる取り組みを約 3 年前から KEK と共同で行ってきた。具体的には、VEP 実験用設備の作製、評価に適した Nb クーポンを備えたクーポン空洞の作製、陰極の作製、パラメータ最適化のための VEP 実験とクーポン表面分析などである<sup>[3]-[5]</sup>。

今回、研磨均一性向上のために開発した独自構造陰極と、これを用いて VEP を行い、クーポン分析等により研磨均一性を評価した結果を報告する。

#### 2. 独自構造陰極“i-cathode Ninja”の開発

VEP の研磨内面均一化を達成するため、新たに

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

独自構造陰極を開発した (“i-cathode Ninja”と命名、以下 Ninja と記述する場合あり)<sup>[3]</sup>。Ninja の構造と空洞にセットした状態の模式図を図 1 に示す。



Figure 1: Schematic view of Ninja.

空洞のセルの部分に対応した形状の翼状部材を有する事がこの陰極の特徴である。この部材により、VEP 時に以下のような効果が期待できる。

- VEP 時に Ninja を回転させることにより、内部の攪拌効果が向上する。これによって空洞内部の隅々まで新鮮な EP 液がいきわたるため、研磨品質と均一性が向上する。
- 翼状部分を電極材料で作製すれば、Ninja を回転して使用することにより空洞内の極間距離を等しくすることができ、電界分布が均一になって研磨品質と均一性が向上する

また、単純に翼状部分を取り付けただけでは陰極を脱着するときに空洞内面に翼状部分が当たってしまうため、挿入時には翼を閉じ、EP 時には翼を

開くことのできる構造とした。

### 3. VEP 実験設備とクーポン空洞の作製

#### 3.1 VEP 実験設備の作製

1セル空洞の VEP 実験を行うため、実験設備を自社で新たに作製した。作製した実験設備の外観写真と模式図を図 2 に示す。

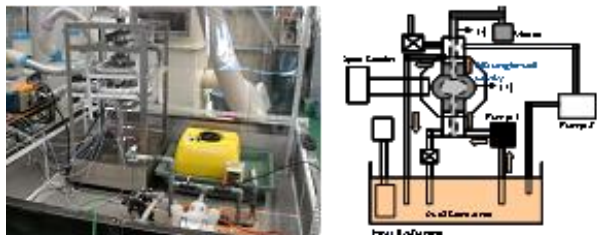


Figure 2: Photo and schematic view of 1-cell cavity VEP facility.

VEP 設備には、EP 液流動用のダイヤフラムポンプ、EP 液の入口と出口用治具、陰極回転用のモーター、空洞冷却用のクーラーと風を空洞全体に均一に当てるための穴のあいたダクト、EP 液冷却用のウォーターバスとチラー、排気用のスクラバーなどを備えている。架台の中央部に入出口治具と陰極を取り付けた 1セル空洞を縦向きにセットし、上記の部材や配管を接続する。安価に設備を作製するため、配管は市販の PVC 配管や耐薬品性ホース、EP 液タンクは市販のポリタンクを用いた。

#### 3.2 1セルクーポン空洞の作製

これまで通常の 1セル空洞では、EP 後の研磨内面の評価は出来る事が非常に限られており、十分な評価が出来なかった。そこで、空洞に穴を開けてその部分に取り外し可能な Nb のクーポンを装着できる 1セル空洞を作製した。この空洞とクーポンの写真を図 3 に示す。



Figure 3: Photo of 1-cell coupon cavity(left) and φ 8mm coupon(Right).

クーポンは直径 8mm で、各種分析装置にかけられる大きさとし、上下のビームパイプ部、上下のアイリス部、赤道部 2ヶ所の合計 6ヶ所に装着している。このクーポンは空洞本体とは絶縁して配

置されており、空洞本体と共通の電圧をかけた場合でもクーポンのみの EP 電流を測定できるようにしている。また、EP 中の空洞内部の様子を観察できるように、4ヶ所のビューポートも作製した。これにより、VEP 後の研磨内面の均一性をはじめとする各種詳細評価が可能となった。

### 4. Ninja とクーポン空洞を用いた 1セル空洞 VEP 実験

#### 4.1 Ninja (Al 羽根) と棒状(Rod)電極の比較<sup>[4]</sup>

3章で紹介した設備と部材を用いて、Ninja (Al 羽根) と棒状(Rod)電極での VEP の比較実験を行った。各々の VEP 条件を表 1 に示す。

Table 1: VEP Conditions for the Ninja (Al Wing) and Rod Cathode

パラメータ	条件 (Ninja)	条件 (Rod)
EP 液 (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> :HF)	9:1	9:1
EP 液流動方向	下→上	下→上
EP 液流量	5 l/min	5 l/min
陰極回転数	1 rpm	回転なし
陰極材質	Al 棒+Al 羽根	Al 棒
電圧	9-11 V	9 V
電流密度	25 mA/cm <sup>2</sup>	25-30 mA/cm <sup>2</sup>
EP 時間	2.5 時間	2.5 時間
空洞表面温度	17.5-23 °C	24.5-27 °C

VEP 時の各クーポンの電流密度のログデータ (抜粋) を図 4 に示す。どちらのカソードにおいても、下アイリス→赤道→上アイリスの順に電流が大きくなっている事が解る。

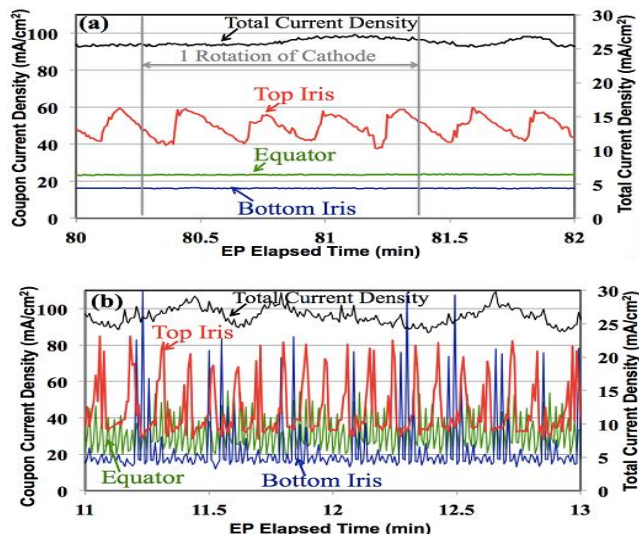


Figure 4: Coupon current during VEP. (a)Ninja cathode, (b)Rod cathode.

VEP 後の空洞の研磨量を超音波厚さ計を用いて測定した。その結果を図 5 に示す。

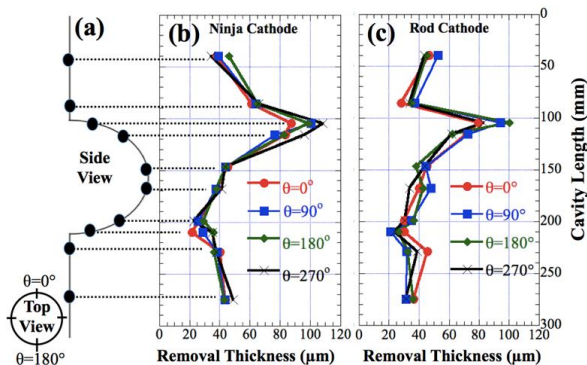


Figure 5: Removal thickness after VEP. (a) Measurement position (b) Ninja cathode (c) Rod cathode.

Ninja、棒状電極とも上アイリスの部分の研磨量が大きくなっている事が解る。これは、クーポン電流に置いて、上アイリスが一番大きいこととも一致している。これは、棒状陰極や Al 羽根から発生した気泡が上アイリス部分に当たり、研磨を促進している事が原因と考えられる<sup>[6]</sup>。

さらに、クーポンの表面顕微鏡観察と表面粗さを測定した結果を図 6 に示す。

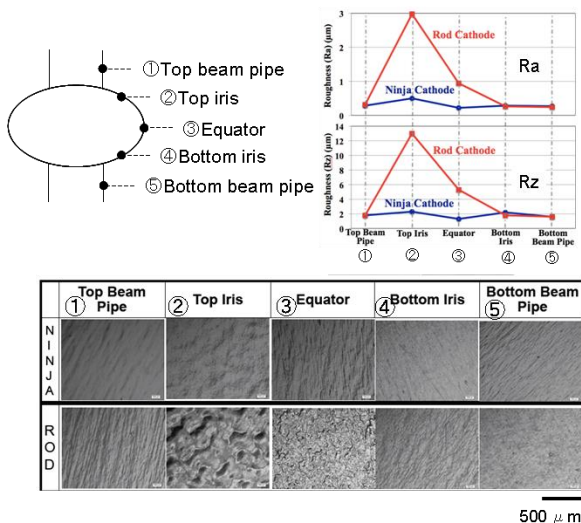


Figure 6: Surface inspection and surface roughness.

Ninja (Al 羽根) を使用した VEP では、全てのクーポンで滑らかな表面が得られ、表面粗さも安定して低い状態であったが、棒状電極を使用した VEP では、上アイリスと赤道部で凹凸が見られ、表面粗さも悪化するという結果になった。これは、棒状電極を使用すると、攪拌効果が少ないため上アイリス部に気泡が滞留しやすいこと<sup>[6]</sup>、赤道部と陰極の極間距離がその他に比べて大きくなる事が原因と考えられる。

まとめると、Ninja (Al 羽根) を使用した VEP で

は、研磨表面の粗さの均一化は達成できるが、研磨量は上アイリス部が突出して大きく、均一化が出来ていない事が解った。この研磨量均一化の問題を解決する為、Ninja と VEP 条件の改良を行った。

#### 4.2 Ninja (テフロン羽根) と高速回転の VEP<sup>[7][8]</sup>

研磨量均一性と研磨表面均一性の両方を向上させるには、VEP 中に空洞内で発生する気泡が空洞内壁にできるだけ当たらない、滞留しない事が必要になると考えられる。これを実現する為、以下の改善を行った。

- Ninja の羽根を Al 製からテフロン製にし、羽根の部分から出る気泡をなくす。
- Ninja の回転数を上げて攪拌効果を増し、気泡の滞留を防ぐ。

これらを用いて Ninja (テフロン羽根) の VEP 実験を行った。その条件を表 2 に示す。

Table 2: VEP Conditions for the Ninja (Teflon Wing)

パラメータ	条件
EP 液 (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> :HF)	9:1
EP 液流動方向	下→上
EP 液流量	5 l/min
陰極回転数	50 rpm
陰極材質	Al 棒+テフロン羽根
電圧	14-20 V
電流密度	~30 mA/cm <sup>2</sup>
EP 時間	2.5 時間
空洞表面温度	23-27.5 °C

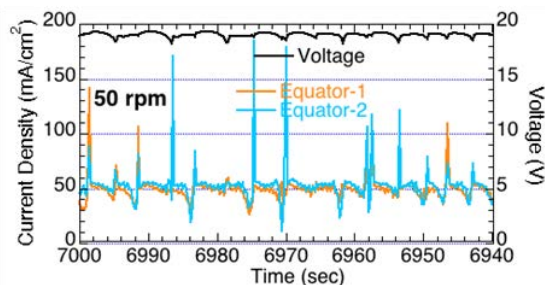
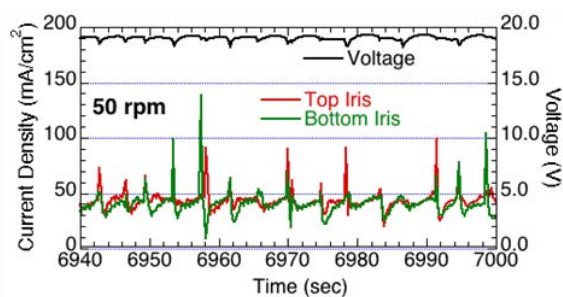


Figure 7: Coupon current during VEP.

VEP 中の各クーポンの電流密度のログデータ (攪拌) を図 7 に示す。上下アイリスと赤道部はほぼ

同等の値になっている事が解る。

VEP 後の空洞の研磨量を超音波厚さ計を用いて測定した結果を図 8 に示す。

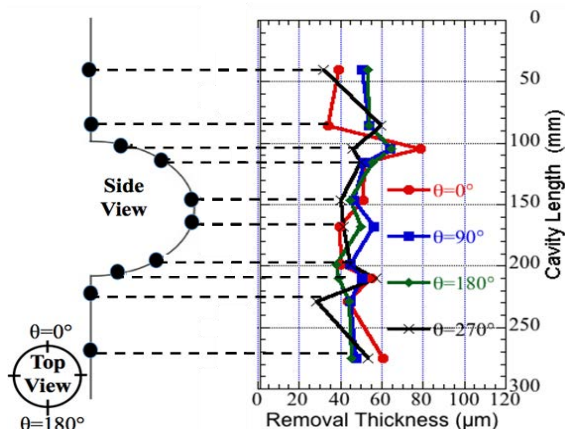


Figure 8: Removal thickness after VEP.

Ninja (Al 羽根) に比べて、特に研磨量が突出した部分が無く全体的に均一に研磨されている事が解った。

次に各クーポンの表面顕微鏡観察と表面粗さを測定した結果を図 9 に示す。

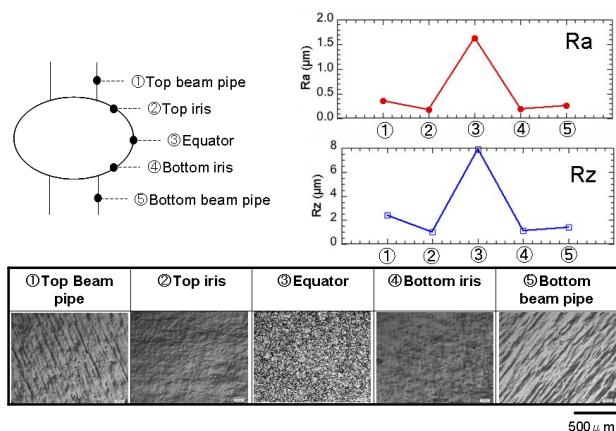


Figure 9: Surface inspection and surface roughness.

赤道部のクーポン表面のみ荒れが発生し、表面粗さが悪くなっている事が解る。これは、テフロン羽根+高速回転では、気泡の影響は取り除けたものの、赤道部は極間距離が遠いという問題がまだ残ったため、発生したものであると思われる。

この問題の改善に向けて、次のようなことを考えている。

#### 4.3 今後の改善に向けた取り組み

これまでに得られた知見より、研磨量と研磨表面の均一化については、気泡の発生量が極力少なく、かつ電極が赤道付近まで伸びる羽根を備える事が必要になると考えられる。これを実現する為に、テフロン羽根に、必要最小限の Al を取りつ

けた Ninja の羽根を現在考案中である。いかに余分な気泡を空洞内面に発生させないかがポイントとなると考えている。

この新しい Ninja を用いて、VEP 実験を行い、研磨量と研磨表面の均一化を達成して行きたいと考えている。

## 5. まとめ

1 セル空洞 VEP の研磨均一性向上のため、独自構造陰極 Ninja と VEP 設備、1 セルクーポン空洞を作製し、実験を行った。

Ninja (Al 羽根) を用いた実験では、研磨表面は棒状陰極に比べて均一性、表面粗さとも改善していたが、研磨量の均一性が悪く、上アイリス部分の研磨量が他の部分に比べて大きくなっていった。

研磨量の均一性を改善する為、Ninja (テフロン羽根) +高速回転を用いて実験を行った。結果、研磨量の均一性は向上したが、研磨表面については、赤道部分の表面の荒れが大きくなる結果となった。

これを改善するため、新たにテフロン羽根に Al の部材を取りつける新たな Ninja の構造を検討、作製中である。

今後、この新たな Ninja を用いて VEP 実験を行い、研磨表面と研磨量の均一性を向上させていきたい。

## 参考文献

- [1] 斎藤健治 「加速器」 Vol.2, No.4, 2005 (479-493).
- [2] ILC Technical Design Report, Vol.3, Part1, 2.3.2.2 (20-21).
- [3] Y.Ida et al., SRF2013, Paris, France 2013, TUP052.
- [4] V.Chouhan et al., LINAC14, Geneva, Switzerland 2014, THPP098.
- [5] K.Nii et al., LINAC14, Geneva, Switzerland 2014, TUPP101.
- [6] S.Kato et al., TTCM2014, Tsukuba, Japan 2014, WG4.
- [7] V.Chouhan et al., TTCM2014, Tsukuba, Japan 2014, WG4.
- [8] V.Chouhan et al., ALCW2015, Tsukuba, Japan 2015, SRF2.