

ILC 用ニオブ製 9 セル加速空洞の縦型電解研磨設備の作製と研磨実施 FABRICATION OF VERTICAL ELECTRO-POLISHING FACILITY FOR NB 9-CELL CAVITY FOR ILC AND RESULTS OF POLISHING

仁井 啓介^{#, A)}, Chouhan Vijay^{A)}, 山口 隆宣^{A)}, 石見 清隆^{B)}, 井田 義明^{A)}, 早野 仁司^{C)}, 加藤 茂樹^{C)}
佐伯 学行^{C)}, 文珠四郎 秀昭^{C)} 沢辺 元明^{C)}
Keisuke Nii^{#, A)}, Vijay Chouhan^{A)}, Takanori Yamaguchi^{A)}, Kiyotaka Ishimi^{B)}, Yoshiaki Ida^{A)}, Hitoshi Hayano^{C)},
Shigeki Kato^{C)}, Takayuki Saeki^{C)}, Hideaki Monjushiro^{C)}, Motoaki Sawabe^{C)}
^{A)} Marui Galvanizing Co., Ltd. Himeji factory
^{B)} Marui Galvanizing Co., Ltd. Kashiwa factory
^{C)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

International linear collider (ILC) will require around 16000 niobium 9-cell cavities. In order to meet such requirement mass production of cavities with higher efficiency and lower cost is desired. Electropolishing (EP) is considered as a final surface treatment of these cavities to improve the surface quality for their high performance. For cost reduction of the final surface treatment, Marui Galvanizing Co, Ltd in collaboration with KEK has been developing a low cost vertical EP (VEP) facility, a special cathode called Ninja cathode and optimization of the VEP parameters. In this article we report about fabrication of VEP facility made of PVC material, Ninja cathode, and preliminary results of VEP of a 9-cell cavity performed with this facility.

1. はじめに

現在建設計画が進んでいる ILC (国際リニアコライダー) では、約 16000 本のニオブ製 9 セル加速空洞が必要になると言われている。量産に向けて各工程の量産性向上 (高効率化、低コスト化) が望まれており、各機関で量産に向けた技術開発が行われている^[1]。空洞の最終表面処理となる電解研磨 (EP) においても高性能と高量産性を両立できる方法や設備が求められている。

マルイ鍍金工業では、過去様々な形状、材質の部材の EP を手掛けた経験を生かし、ニオブ製加速空洞 EP の開発を KEK と共同で約 3 年前にスタートした。共同研究では、従来法に比べて量産に適していると考えられる縦型電解研磨法 (VEP) に着目し、コストを抑え、かつ温度コントロール等が可能で高い研磨品質を出すことが出来る ILC 用ニオブ製 9 セル加速空洞用の VEP 設備の作製と VEP 実施、内面の研磨状態の評価を行っている。

今回、塩ビ部材を用いて低コスト化した VEP 設備、可変翼状部を備えた独自構造陰極、EP 時の温度をコントロールする機構を自社開発し、それらを用いた VEP を行って研磨状態を評価したので、結果を報告する。

2. 独自構造陰極“i-cathode Ninja”の開発

VEP の研磨品質向上ため、新たに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) ^[2]。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。9 セルの場合は、9 個のセル全てに翼状部材を配置している。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。

[#] keisuke_nii@e-marui.jp

3. 9セル空洞 VEP 実験設備の作製

9セル空洞の VEP 実験を行うため、VEP 設備を自社で新たに作製した。作製した設備の写真と模式図を図2に示す。

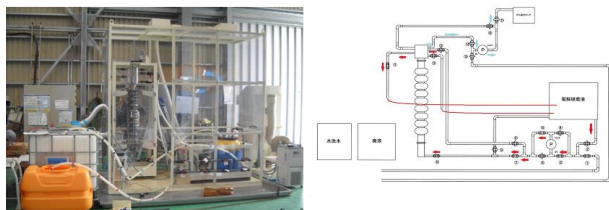


Figure 2: Photo and schematic view of 9-cell cavity VEP facility.

VEP 設備には、EP 液流動用のダイヤフラムポンプ、EP 液出入り口用の治具、陰極回転用のモーター、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9セル空洞（出入り口治具と Ninja 装着済）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。

4. 9セル空洞 VEP 実験の実施

4.1 VEP 実験 (I) の実施³⁾

Ninja 電極と3章で紹介した設備を用いて、9セル空洞の VEP 実験を行った。実験条件を表1に示す。

Table 1: Conditions of This VEP(I)

パラメータ	条件
EP 液 (H ₂ SO ₄ :HF)	9:1
EP 液流動方向	下→上
EP 液流量	5-10 l/min
陰極回転数	1 rpm
陰極材質	Al 棒+Al 羽根
電圧	7-9 V
電流密度	~30 mA/cm ²
EP 時間	1.5 時間

図3に VEP 中の空洞表面の温度 (25ヶ所測定) と電圧、電流密度のログデータを示す。電流密度は約 20~25mA/cm² と目標よりやや低めであったが、空洞温度が全体的に 40℃を超えており、最大 50℃に達していた。

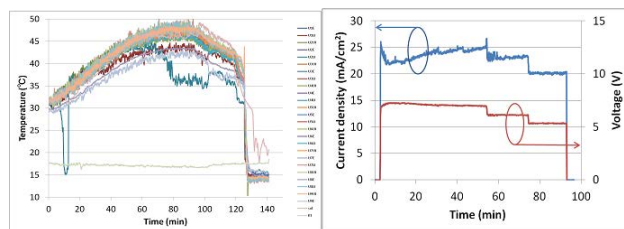


Figure 3: Logged data of cavity temperature(left), current density and voltage(Right) during VEP(I).

通常 Nb の EP は、温度を 20~30℃に保つ必要があり、これを超えると表面荒れ等の現象が起こるといわれている。VEP 後の内面をデジタルカメラと内視鏡で得観察した結果を図4に示す。

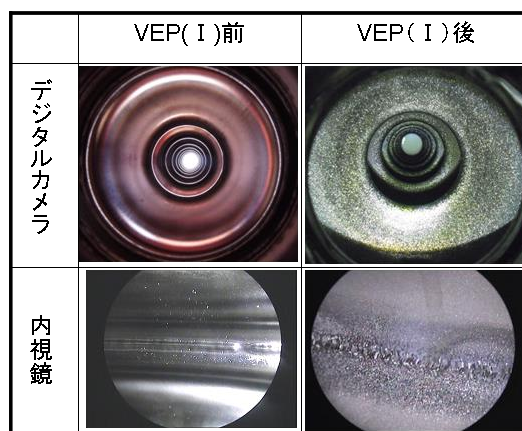


Figure 4: Inner surface of cavity before and after VEP(I).

VEP 前に比べて明らかに表面が荒れている事がわかる。

また今回、空洞の各部分の研磨量の測定を行った。測定は超音波厚さ計 (CL-5) を用いて、研磨前と研磨後に同じ場所を各3回ずつ測定し、その平均値の差を研磨量とした。研磨量の各部分の分布を図5に示す。測定は $\theta = 0^\circ$ と 180° の縦の2ラインで行い、セルごとの平均値も算出した。尚、全体の平均研磨量は $18.2 \mu\text{m}$ であった。

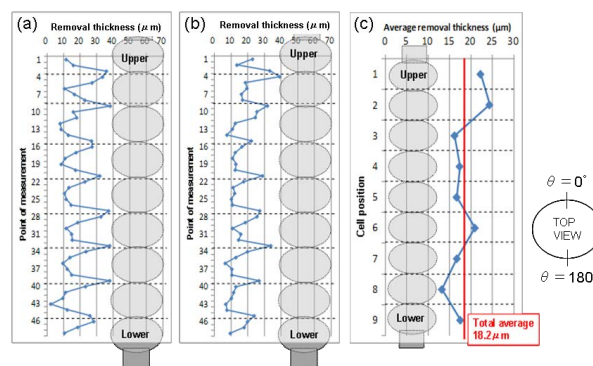


Figure 5: Removal thickness of cavity after VEP(I). (a) $\theta = 0^\circ$ (b) $\theta = 180^\circ$ (c) Average of each cell.

各セルとも上下のアイリス部分の研磨量が多く、赤道部分の研磨量が少ない結果となった。多い部分と少ない部分の研磨量の差は約 3~4 倍であった。これは、陰極で発生した気泡や循環中の EP 液に含まれる気泡が空洞の上下アイリス部分に多くあたり滞留することが原因であると考えられる。初めての 9 セル空洞 VEP では、空洞内面、研磨量分布とも良好ではなく、課題が浮き彫りになった。

4.2 設備の改善と VEP 実験 (II) の実施

VEP 実験 (I) で明らかとなった課題と設備の操作性を改善する為に、VEP 設備や VEP 条件を見直し、以下の改善を行った。

①空洞温度低減のための見直し

- ・ EP 液タンク内に AI 熱交換器を直接投入し、チラーにて EP 液を冷却
- ・ 空洞の回りをアクリル板で覆い、クーラーの風を送り込んで空洞を冷却

②気泡滞留防止のための見直し

- ・ Ninja の回転数を上げ、空洞内部の攪拌効果を上げて、気泡滞留を防止する。
- ・ EP 液循環の際、空洞から EP 液タンクへ戻る EP 液から気泡を除去するためのフィルターをとりつける。

③設備の操作性改善

- ・ ポンプ、電源、モーター、スクラバーの操作系を 1ヶ所に集めた制御盤を作製
- ・ 排液用の配管をホースから PVC に変更し、排液先の切替はバルブで行うようにした。

これらの改善を行った設備の外観と、使用した部材の写真を図 6 に示す。また、これらを使用した VEP の条件を表 2 に示す。9 セル空洞は VEP (I) を行ったものと同じ空洞を用いた。

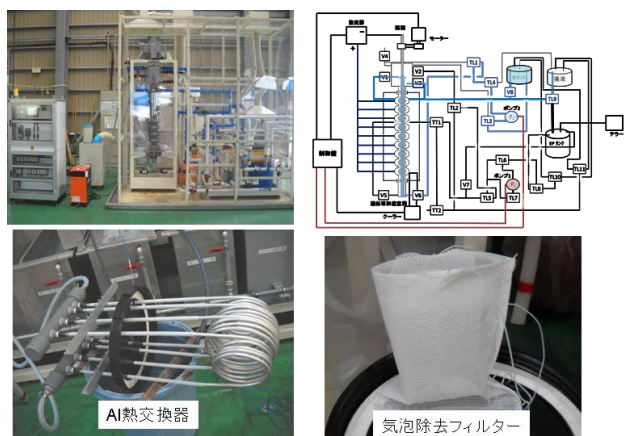


Figure 6: Improved VEP facility and parts.

Table 2: Condition of This VEP (II)

パラメータ	条件
EP 液 (H ₂ SO ₄ :HF)	9:1
EP 液流動方向	下→上
EP 液流量	5-10 l/min
陰極回転数	50 rpm
陰極材質	Al 棒+Al 羽根
電圧	7-9 V
電流密度	~30 mA/cm ²
EP 時間	2 時間

図 7 に VEP 中の空洞表面の温度 (25ヶ所測定、VEP (I) と同様の場所) と電圧、電流密度のログデータを示す。

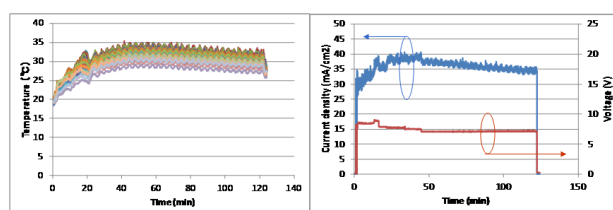


Figure 7: Logged data of cavity temperature(left), current density and voltage(Right) during VEP(II).

空洞表面温度全体に、30~35°Cとなっている事が解る。目標である 30°C以下まではまだ到達していないが、VEP (I) が 40~50°Cであった事から比べれば、改善が進んでいる事が解る。また、電流密度は 30~40 mA/cm²で、VEP (I) に比べて目標の 30mA/cm²に近い値がでていた。

VEP (II) 後の空洞内面をデジタルカメラと内視鏡で観察した結果を図 8 に示す

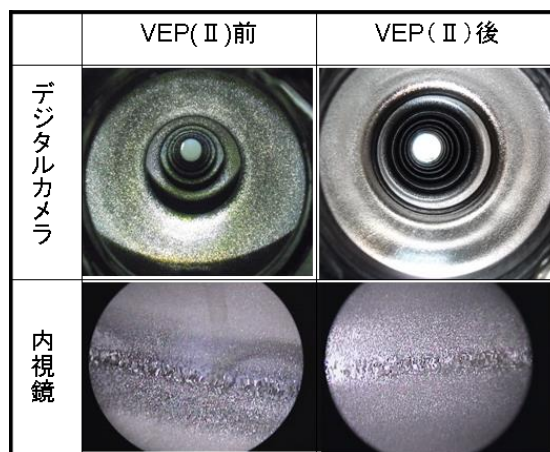


Figure 8: Inner surface of cavity before and after VEP(II).

VEP (I) 後に比べて、荒れの度合いの改善が見られた。また、目視確認ではあるが光沢も向上している事を確認した。ただし、表面荒れが完全には解消されておらず、今後とも改善が必要である。

VEP (II) 後の研磨量の測定を行った。測定の場合、測定器、方法は VEP (I) のときと同様である。研磨量の各部分の分布を図 9 に示す。

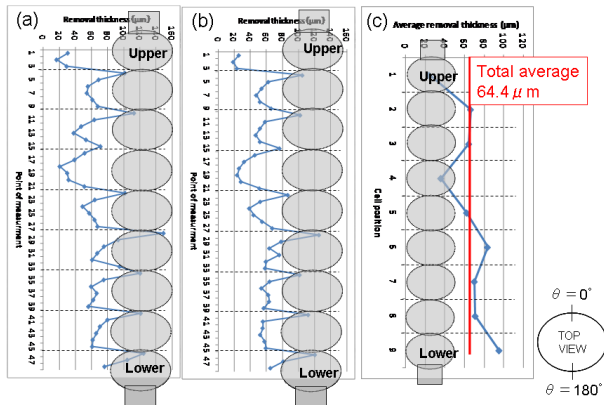


Figure 9: Removal thickness of cavity after VEP(II).
(a) $\theta=0^\circ$ (b) $\theta=180^\circ$ (c) Average of each cell.

上アイリスの部分の研磨量が突出して大きく、他の部分の 2~2.5 倍程度の研磨量であった。これに対しても今後の改善が必要である。

4.3 今後の改善について

4.2 章の結果を受けて、以下のような改善の検討、準備を進めている。

- VEP 中の空洞温度をさらにさげるため、空洞に直接水をかけて冷却するシステムを検討、考案中。
- VEP 中の気泡の発生、影響を少なくするために、現在 1 セル空洞 VEP で検討しているような Ninja の羽根の改造を 9 セルにも適用する^[4]。
- 研磨内面の分布をさらに詳細に評価するため、1 セルで作製したもの^[4]と同様の評価用 Nb クーポンを備えた 9 セルクーボン空洞作製の検討、考案中。

これらの改善を進めていき、さらに 9 セル空洞 VEP の研磨内面の品質向上を進めていく。

5. まとめ

ニオブ製 9 セル加速空洞の量産に向けて、独自構造陰極 Ninja や VEP 用の設備を自社開発し、VEP 実験 (I) を行った。結果、VEP 中の温度が 50°C 近くまで上昇してしまい、結果内面荒れが発生してしまった。また、研磨量の場所による差も 3~4 倍と大きく、気泡の影響を多く受けてしまっていることもわかった。

これらを改善するために、EP 液タンクの AI 熱交換器と空洞空冷用クーラーの準備、Ninja の回転数増加と気泡除去フィルターを準備して、VEP 実験 (II) を行った。結果、VEP 中の空洞温度は 35°C 程度まで下がり、研磨内面には改善が見られ光沢も向上していたが、まだ粗さは残る状態となった。また、研磨量の場所による差については相変わらず大きく、大きな改善は見られなかった。

VEP(II)の結果を受けて、現在、空洞水冷システムの検討、Ninja の羽根の改造、9 セルクーボン空洞作製の検討を行っている。これらのうち、できるものから適用して行き、さらに 9 セル空洞 VEP の研磨内面品質の向上と研磨量の均一化に取り組む予定である。

参考文献

- [1] 佐伯学行 「加速器」 Vol.11, No.3, 2014 (161-171).
- [2] Y.Ida et al., SRF2013, Paris, France 2013, TUP052.
- [3] K.Nii et al., LINAC14, Geneva, Switzerland 2014 MOPP108.
- [4] 仁井啓介他 第 12 回日本加速器学会年会 WEP048.