

ニオブ製 9 セル加速空洞縦型電解研磨用の空洞温調システム開発

DEVELOPMENT OF CAVITY TEMPERATURE CONTROL SYSTEM FOR Nb 9-CELL CAVITY VERTICAL ELECTRO-POLISHING

仁井 啓介^{#,A)}, Chouhan Vijay^{A)}, 井田 義明^{A)}, 石見 清隆^{B)}, 山口 隆宣^{A)}, 早野 仁司^{C)}, 加藤 茂樹^{C)}
文珠四郎 秀昭^{C)}, 佐伯 学行^{C)} 沢辺 元明^{C)}

Keisuke Nii^{#,A)}, Vijay Chouhan^{A)}, Yoshiaki Ida^{A)}, Kiyotaka Ishimi^{B)}, Takanori Yamaguchi^{A)}, Hitoshi Hayano^{C)},
Shigeki Kato^{C)}, Hideaki Monjushiro^{C)}, Takayuki Saeki^{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

Marui Galvanizing Co., Ltd. has been developing vertical electro-polishing (VEP) technologies and facilities for Nb superconducting RF cavity of such as international linear collider (ILC) in collaboration with KEK. So far, we had been constructing VEP facility by ourselves for Nb 9-cell cavity and performing VEP experiment. In previous experiment, the 9-cell cavity temperature during VEP became over 30 degree C, this was cause of low quality inner surface of cavity. To solve this problem, we developed cavity water cooling system, checked cavity temperature distribution and performed VEP experiment using this. In consequence, 9-cell cavity temperature during VEP can be kept around 20 degree C (best temperature for Nb electro-polishing) successfully. Also we confirmed that the quality of inner surface was better.

1. はじめに

マルイ鍍金工業では、KEK と共同で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)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]-[8]}。

ニオブの電解研磨 (EP) では、研磨品質を安定、向上させるため、EP 中の温度を 20~25°C 程度に調整することが重要である。しかし、ニオブ製 9 セル加速空洞の VEP については、EP 中に大きな電流が流れる為、空洞の温度が上がり易く研磨品質が低下するという問題があった^[1]。対策としてこれまでに空洞空冷設備の導入 (クーラーの風にて冷却)、AI 熱交換器による EP 液冷却設備の導入を行ったが、EP 中の空洞温度が 30°C 近くになってしまい、十分ではなかった^{[4][7]}。

この問題を解決する為、今回空洞を直接水冷により温調するシステムを開発、作製した。このシステムを用いて空洞温度の評価と 9 セル空洞の VEP 実験を行ったので報告する。

2. 空洞水冷システムの作製と評価

2.1 空洞水冷システムの作製

今回実験に使用した 9 セル空洞 VEP 設備の写真を図 1 に、新規開発した空洞水冷システムの模式図と写真を図 2 に示す。



Figure 1: Photo of 9-cell cavity VEP facility.

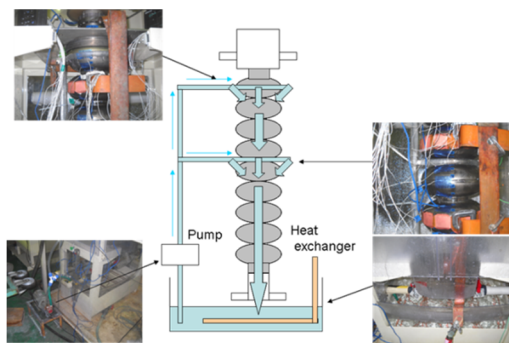


Figure 2: Photo and schematic view of water cooling system.

空洞の水冷については、空洞全体に均一に水がかかるようにするため、空洞の一番上のセル赤道部と中央のセル上アイリス部に複数の穴を開けたリング状のホースを設置し、そこから空洞へ水をかけるようにした。また、空

[#] keisuke_nii@e-marui.jp

洞下にドレインを設け、空洞にかかった水はドレインに回収し、ポンプを用いて循環させることで再び空洞へかかるようにした。さらに、ドレイン内に熱交換器を設置し、ドレイン内冷却水の温度をコントロールできるようにしている。このシステムを用いて、これが空洞の冷却にどれほどの効果があるかを確認した。

2.2 空洞水冷システムの評価

この空洞水冷システムの効果を検証する為、従来の空冷と今回の水冷の温度変化の違いと、場所による温度分布を確認した。試験は、空洞内に 50℃のお湯を入れ、冷却を開始した後温度がどのように推移するかを調べた。冷却水の流量は、空洞全体が等しく濡れるようにした結果、8L/min となった。それぞれ図 3、図 4 に結果を示す。

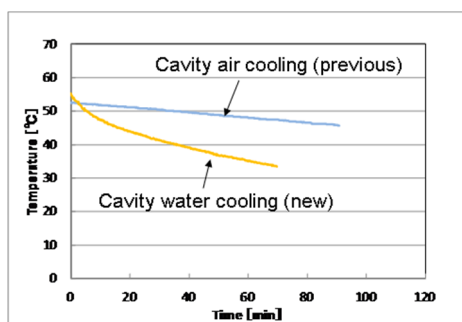


Figure 3: Cavity temperature with air cooling and water cooling.

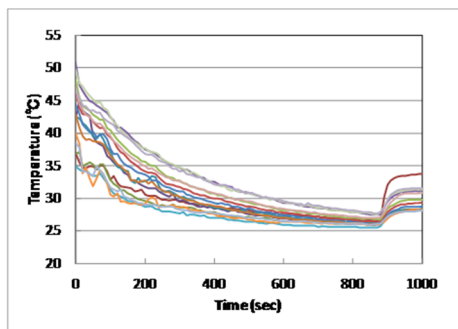


Figure 4: Cavity temperature with water cooling (15 point measurement).

図 3 より、従来の空冷に比べて今回の水冷の方が早く温度が低下する事が解る。これは、水冷の方が空洞冷却効果が高いことを示している。また図 4 より、冷却が進むとともに空洞温度のばらつきが少なくなり、冷却水の温度に集束されていく事が解った。次にこの水冷システムを使用して実際に 9 セル空洞の VEP を行った。

3. 水冷システムを用いた 9 セル空洞 VEP

3.1 9 セル空洞 VEP 実験

今回の 9 セル空洞 VEP 実験条件を表 1 に示す。また、VEP 中の電圧、電流密度、空洞表面温度のログデータを図 5 に示す。

| 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 |
| カソード回転数 | 50 rpm |
| カソード | Ninja (Al 羽根) |
| 電圧 | ~11 V |
| 電流密度 (狙い) | ~30 mA/cm ² |
| EP 時間 | 2 時間 |
| 冷却方式 | 空洞水冷 +EP 液冷却 |
| チラー温度 | 5℃ |
| 冷却水流量 | ~8 L/min |

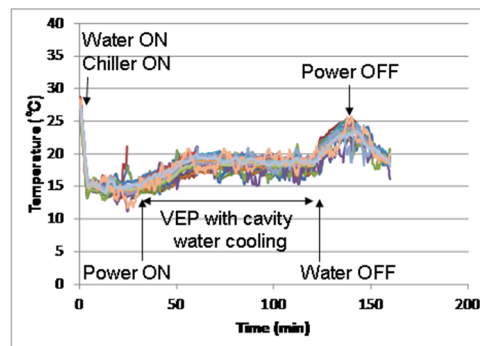
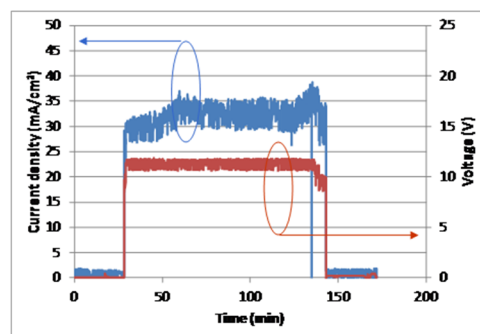


Figure 5: Logged data during VEP, (Upper) Current density and voltage, (Lower) Cavity surface temperature (25point).

VEP 中の電圧は約 11V、電流密度は 30~35mA/cm² となり、概ね良好な研磨出来る狙い通りの条件となった。また、VEP 中の空洞表面温度は水冷によりおよそ 15~20℃の間でキープできていた。これは目標値である 20℃にかなり近い値であり、VEP においても水冷は有効であった。

VEP の出来栄評価として、空洞の内面観察と研磨量分布測定を行った。その結果をそれぞれ図 6、図 7 に示す。

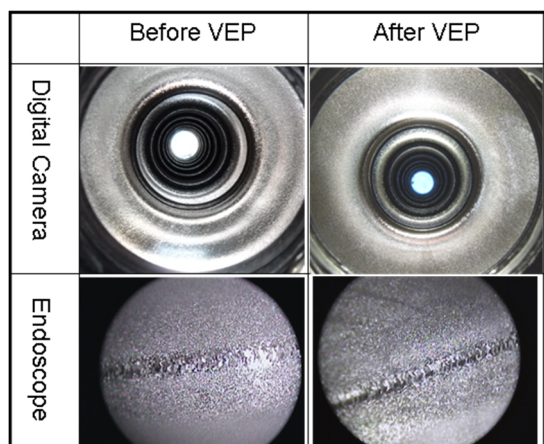


Figure 6: Images of inner surface observed with a digital camera and an endoscope.

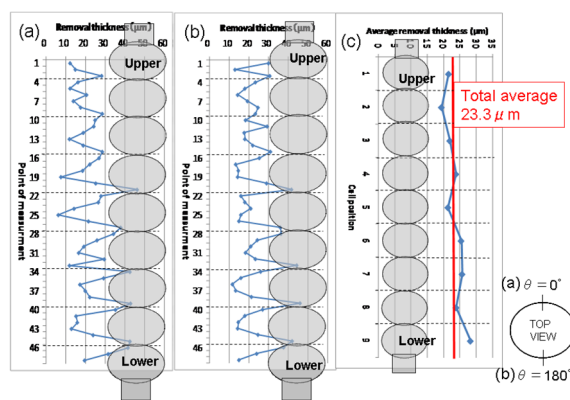


Figure 7: (a) Removal thickness of each part ($\theta=0^\circ$) (b) Removal thickness of each part ($\theta=180^\circ$) (c) Average removal thickness of each cell.

VEP 後の空洞内面は光沢が確認された。比較的良好的な研磨が出来ているものと思われる。また、全体の平均研磨量は $23.3 \mu\text{m}$ であった。研磨量の分布については、上下アイリス部の研磨量が赤道部の研磨量に比べて 2~3 倍となっており、前回からの改善は見られなかった。また、上側のセルに比べて下側のセルがやや研磨量が多くなる傾向が見られた。

3.2 今後の課題

空洞水冷に関しては、今回の実験では VEP 中の空洞温度を 20°C 付近に保つことに成功したが、今後は自由にさまざまな温度を設定し調整できるようにすることが重要になると思われる。例えば VEP 中の空洞表面温度をフィードバックして、冷却水量や冷却水温度などを自動的に調整し、常に一定の空洞表面温度を保つシステムが望まれる。現在、これらをはじめとしたシステムの改善に向けて検討を開始している。

9 セル空洞 VEP 全体の課題としては、研磨量分布の改善が必要となる。これに向けては現在、1 セル空洞 VEP にて開発中の新しい Ninja カソード^{[5][6][8]}を 9 セル空洞用に修正し、実験を行う事を計画中である。また、研磨状態を詳細に評価する為、1 セル空洞と同様のクー

ポン空洞を 9 セル空洞でも作製している。さらに、VEP 実験でこれらの改善を確認した後、9 セル空洞 VEP 後の加速性能評価を行う予定である。

これらの課題に取り組み、これからも 9 セル VEP 設備、研磨状態の改良を続ける予定である。

4. まとめ

今回、9 セル空洞 VEP 時の空洞表面温度を 20°C 付近に保つため、空洞に冷却水をかけて直接水冷するシステムを開発した。水冷システムの冷却能力を確認した結果、空冷に比べて効果が高いことが解った。この水冷システムを用いて 9 セル空洞 VEP を実施したところ、 $\sim 11\text{V}$ 、 $30\sim 35\text{mA}/\text{cm}^2$ と 9 セル空洞の標準的な VEP 条件にて空洞温度を $15\sim 20^\circ\text{C}$ に保つことができた。空洞内面の光沢はあったが、研磨量分布については改善されていなかった。

今後は、空洞表面温度をフィードバックして自動的に温度を調整するシステムの検討を行う。また研磨量分布改善に向けて Ninja カソードの改良や 9 セルクーポン空洞の作製と VEP 実験に取り組む予定である。また、VEP 後 9 セル空洞の加速性能評価も進めていく予定である。

謝辞

9 セル空洞 VEP 設備の冷却機構を開発するにあたりまして、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、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] K. Nii *et al.*, LINAC14, Geneva, Switzerland 2014 MOPP108.
- [2] V. Chouhan *et al.*, LINAC14, Geneva, Switzerland 2014 THPP098.
- [3] 仁井啓介他 第 12 回日本加速器学会年会、敦賀市 2015 WEP048.
- [4] 仁井啓介他 第 12 回日本加速器学会年会、敦賀市 2015 WEP049.
- [5] V. Chouhan *et al.*, SRF2015, Whistler, Canada 2015 THBA02.
- [6] V. Chouhan *et al.*, SRF2015, Whistler, Canada 2015 MOPB105.
- [7] K. Nii *et al.*, SRF2015, Whistler, Canada 2015 MOPB098.
- [8] 仁井啓介他 第 13 回日本加速器学会年会、千葉市 2016 TUP027.