

KEKにおけるNb空洞の縦型電解研磨処理の進捗

PROGRESS OF VERTICAL ELECTROPOLISHING PROCESS FOR Nb CAVITY AT KEK

後藤剛喜[#], 早野仁司

Takeyoshi Goto[#], Hitoshi Hayano

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

This paper reports on the vertical electropolishing (VEP) facility installed in the COI building at KEK, the status of Nb cavity EP processing, and the progress of work safety measures. In terms of Nb cavity processing, no major issues have been found with the fine EP (EP2) process, which uses a lower applied voltage. However, the bulk EP (EP1) process, which uses a higher applied voltage, has encountered a problem where hydrogen gas bubbles generated from the cathode adhere to the treated surface, creating pit structures. To enhance work safety of VEP, we sought advice from external engineers and made hardware modifications, as well as established more detailed procedures for equipment and operational methods.

1. 緒言

国際リニアコライダー(ILC)などの超伝導加速器には、高効率で電子を加速させるための Nb 製の空洞が数千本もの規模で必要になる。Nb 空洞が高い超伝導高周波(SRF)共振性能を有するためには、電解研磨(EP)による空洞内面の平滑処理が必要となる[1]。これは、空洞が高純度の Nb 板からプレスで整形された部品を電子ビーム溶接によって組み立てられるため、その内面には傷、溶接痕、異物の吸着などによる無数の表面構造ができやすい。そうした構造は、マイクロ波照射によって field emission 源となってしまう。比較的大きな構造を取り除くために機械研磨(MP)がなされるが、MP 後の表面には削りカスや研磨剤が残留し、それらは洗浄で除去しきることは困難である。そのため MP がなされた Nb 空洞は、その表面を $\sim 100 \mu\text{m}$ は削らないと高い SRF 性能は期待できない[2]。非接触でカスが出ない研磨法としてかつてはフッ酸、硝酸、リン酸の混酸を用いた緩衝化学研磨(BCP)が用いられていた。しかし Nb の結晶面によって研磨液による溶解速度が微妙に異なるため、BCP 処理後の表面には結晶粒界面が浮き出てしまい[3]、十分な SRF 性能が得られない。そのため現在では、表面の最終研磨には結晶面が浮き出てきにくい EP 処理を行うことが一般的で、ILC 計画の空洞製造プロトコールにも EP 処理が含まれると思われる[4]。

高エネルギー加速器研究機構(KEK)の超伝導加速器利用促進化推進(COI)棟で進められていた縦型方式(VEP、空洞を垂直姿勢で設置)(Fig. 1)の EP 処理設備の設置工事が、2022 年末に完了した。KEK では既に超伝導リニアック試験施設(STF)棟で横型方式(HEP、水平姿勢で設置)の EP 処理設備が 15 年程度の稼働している[5]。今回、実績がある HEP 方式ではなく VEP 方式を採用した理由として、(1)HEP では必須な空洞軸方向の回転機構や水平-垂直姿勢変更機構が必要なくなり、設備が大幅に簡略化による低コスト化、(2)EP 処理後の空洞の取り外しにおいて、作業者は手だけを EP ベッドカ

バーに入れて作業できること等の作業安全性の向上、(3)HEP では必要なフッ酸含有強酸電解液を入れた状態での空洞の姿勢変更や電解液を流した状態でロータリースリーブ等が必要なく、事故要因が減ること、(4)VEP では空洞内面全てが電解液に浸るため、反応面積が 1.9 倍となることで EP 処理時間が短くなることなどがある。本論文では VEP 設備の 9 セル Nb 空洞の EP 処理の進捗状況、bulk EP(EP1)処理で起こった処理面の問題、そして設備と運用面での作業安全の向上への取り組み



Figure 1: Picture of Nb cavity set in VEP facility at COI building.

[#] gotota@post.kek.jp

について報告する。

2. VEP 設備の概要

2022 年末に設置された VEP 設備は COI 棟内南西部のエリア(~130 m²)に位置している。設備は中 2 階建て構造となっており、2 階は空洞の様々な処理を行う作業場、1 階にはタンクやポンプ、配管などが設置されている。2 階には EP 処理を行う空洞を設置する EP ベッド、空洞の粗洗浄を行うリンスハット、空洞の超純水高圧洗浄(HPR)を行う HPR 設備、そしてフランジの化学研磨などを行うドラフトが設置されている。空洞に関する作業を行うエリアであるので、簡易的なクリーンルームとして 2 階フロア全体が樹脂製のカバーで覆われ、空気清浄機で空気を清浄化している。また 2 階エリアは HPR 設備を介して隣接するクリーンルームと繋がっている。HPR 処理された空洞はクリーンルーム側で受け取り、そのまま空洞の組立が行われる。1 階には電解液(硫酸:フッ酸(46wt%) = 9:1, v/v)のリザーブタンク(~500 L)、超純水製造機(製造能力: 500 L/h)と純水用のタンク(1000 L、2 個)、洗浄廃水の一時的貯蔵槽、EP 処理用の直流電源(Max 35 V、1 KA)、電解液を冷やす熱交換塔、空洞冷却用の冷水循環システム等が設置されている。COI 棟屋外には EP 処理で発生する酸性ガスを処理するためのスクラバー装置、洗浄廃液を貯蔵する 2 つの大型タンク(各~5000 L)、電解液を熱交換で冷やすためのチラーと冷却水循環ラインが設置されている。

3. VEP 処理の R&D の状況

過去 15 年間、STF 棟で稼働してきた Nb 空洞の HEP 処理に比べ、VEP 処理はまだ R&D の段階である。現時点で VEP 処理は EP1 と fine EP (EP2)が行われている。研磨量が少なく(通常: 20 μm)、印加電圧が低い

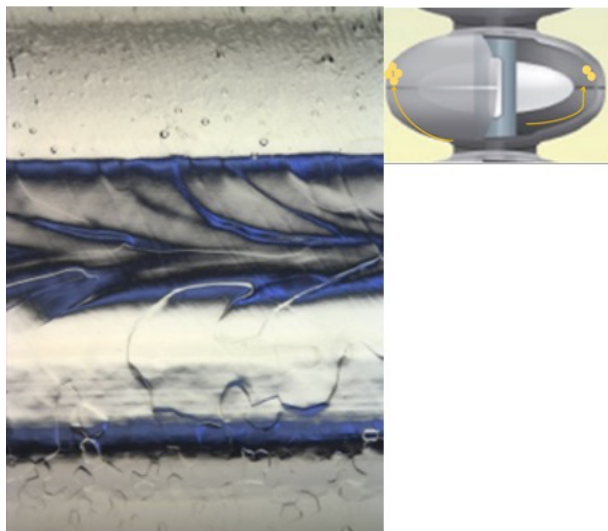


Figure 2: Picture of inner surface of cell#1 after EP1 treatment (left). The red arrows correspond to the pit structures. Schematic picture of the gas bubbles movement (right).

(10~15 V)EP2 処理では大きな問題は見つかっていない。今後は EP2 処理の回数を重ね、さらなる問題出しを進めていくことになる。一方で研磨量が多く(通常: 100 μm)、印加電圧が高い(30~35 V)EP1 処理では、処理後の空洞の内面検査で空洞上部のセル(#1~#3)の赤道部の上部にサイズ数十 μm のピット構造が多数見つまっている(Fig. 2)。このピット構造は通電中に Al カソードから電解液中の水分子の電気分解で発生した水素ガス気泡が Nb 表面に吸着したことが原因と考えられる。電圧が高く、電流値が高い EP1 処理は EP2 よりも水素ガス生成量が多くなっている。またピット構造が表れた赤道部の上部は、空洞の構造的に気泡が留まりやすい箇所である。こうした表面構造は空洞の SRF 性能を落とすため、その対策を進めている。一つは VEP は HEP に比べて反応面積が広いので、同じ研磨速度であれば処理時間が短くなる。つまり処理時間を長くできる余地があるので、EP1 時の電圧を低くして水素ガス気泡の発生量をできる限り少なくする。もう一つは、カソードに用いている電解液攪拌用のニンジャカソードの羽を現状の PTFE からより剛性のある PP へ変更し、液の攪拌力を上げ、空洞表面への気泡の吸着と固定化を防ぐというものである。

4. VEP 処理の作業安全の向上

VEP 処理の作業を実際に開始すると、設置計画時には見落とされていた設備や運用に不備があり、その作業の安全性に向上の余地が多くあることが分かった。ここではその取り組みのいくつか報告する。一つ目は設備の部分的な改修である。具体的に、1階天井部に設置されている電解液配管は、処理中のみ電解液が流れるのであるが、そのフランジ接続部から液滴の垂れが起る可能性は零ではなく、その液滴が作業員にかかる危険性があった。そこで頭の位置より高い箇所にある全てのフランジ接続部に、pH 試験紙を含めた塩ビフィルムのカバーを設置した(Fig. 3)。また、電解液の循環中にリザーブ槽の PVC カバー囲い(Fig. 4)の中に作業員が入る作業を無くすため、リザーブ槽の吸気と排気弁を手動弁から電磁弁に変更し、その弁操作をビニール囲いの外の操作盤で行えるように改修した。



Figure 3: PVC film cover installed on the electrolyte piping flange connection.



Figure 4: PVC film enclosure for the electrolyte reserve tank.

二つ目は外部の化学工学の専門家、具体的にはメッキ処理など行う会社の技術者に VEP 設備とその作業安全に関する助言を受けた。実際に技術者に VEP 設備を調査してもらい、設備の細かな不備などを指摘してもらった。上記の電解液配管のフランジ接続部にカバーを設置することもそれに含まれる。また天災によりリザーブ槽が破損などにより、大量に電解液が漏れた場合の対処法を、メッキ会社のものを参考に立案した。電解液は濃硫酸であるため、水で薄めようとすると発熱してよりフッ酸ガスが発生するために安易に水で希釈できず、大量に漏れた電解液の処理は困難であった。そこでメッキ会社の技術者に相談したところ、乾燥した珪藻土で漏れた電解液を完全に覆うことが非常に効果的であると分かった。珪藻土はガラスの砂であるので、フッ酸とよく反応をする。実際に化学実験用ドラフト内に広げた電解液を珪藻土に吸わせたと、フッ酸ガスはほとんど発生しなくなることが確認された。また反応熱もほとんど無かった。よって、あとは揮発性が無い硫酸を含んだ砂として珪藻土を回収できる。また珪藻土で漏れた液を囲うことで、それ以上に液だまりが広がることも防ぐことが出来る。

三つ目は安全面の観点から設備と作業の運用方法をより詳細に定めた。具体的には、危険源である電解液に関する全ての作業に関しては一つ一つの作業にリスクアセスメント表の準備し、作業前に作業責任者と作業者がそれを確認するようにした。また重大事故につながるヒューマンエラーを防ぐため、電解液配管の手動弁の開閉

作業には弁ごとのチェックリストを作成し、開閉作業を記録するようにした。またその弁操作には、指さし呼称の実施を徹底することにした。

5. 結語

本論文では KEK の COI 棟に設置された VEP 設備とその Nb 空洞の処理状況、そして安全対策の進捗状況について報告した。Nb 空洞の処理としては、印加電圧が低い EP2 処理には大きな問題は見つかっていない。しかし印加電圧が高い EP1 処理ではカソードから発生する水素ガス気泡の吸着で処理面の一部にピット構造ができる問題があり、その対策を進めている。また設置計画時には見落とされていた設備や運用の不備を改善し、その作業安全性の向上に務めた。VEP は HEP に比べて設備の機構が簡略化されて作業安全性も高いことから、ILC プロジェクトなどで Nb 空洞を大量に処理することに適している。今後は EP1 時の問題の解決と、作業安全性や効率性を向上させ、作業実績を積んでいきたいと考える。

謝辞

本件の VEP 設備を KEK の COI 棟に導入するにあたり、マルイ鍍金工業、東日本機電開発、WING、岩手県工業技術センター、いわて産業振興センターから様々な技術的な助力を受けました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] K. Saito *et al.*, “R and D of superconducting cavities at KEK”, Proc. 4th Work. RF Supercond., Tsukuba, Japan, 1989, Vol. 2, pp. 635-694.
- [2] K. Saito *et al.*, “Superiority of Electropolishing over Chemical Polishing on High Gradients”, Proc. 1997 Work. RF Supercond., 1997, Abano Terme, Italy.
- [3] J. Mammosser, “Types of Chemical and Mechanical Surface Processing for SRF Cavities”, USPAS Course, Jan. 2015.
- [4] T. Saeki *et al.*, “Studies of Fabrication Procedure of 9-Cell SRF Cavity for ILC Mass-Production at KEK”, IPAC 2014 Proc. 5th Int. Part. Accel. Conf. 2014, pp. 2528-2530.
- [5] K. Ueno *et al.*, “Development of Electro-Polishing (EP) Facility in KEK”, Proc. 5th Annu. Mtg. Ptcl. cc. Soc. Jpn., 2008, pp. 628-630.