

局所表面仕上げシステムを用いた L-band 超伝導加速空洞補修技術の開発

DEVELOPMENT OF THE REPAIR TECHNIQUE USING BY THE LOCAL POLISHING SYSTEM WITH HIGH QUALITY OPTICAL INSPECTION CAMERA FOR THE L-BAND SUPERCONDUCTING RF CAVITY

渡邊謙^{#, A)}, 早野仁司^{A)}, 岩下芳久^{B)}

Ken Watanabe^{#, A)}, Hitoshi Hayano^{A)}, Yoshihisa Iwashita^{B)}

^{A)} KEK

^{B)} Kyoto-university, ICR

Abstract

To develop cavity repair techniques is important for quality control of the superconducting rf cavity to get more better yield for high accelerating gradient. A high-quality optical inspection system with a high-resolution camera was developed as a tool of inspection of the cavities in 2008. It enables 2-D surface analysis on a defect of cavity inner surface by using striped illumination and image processing. For more detailed surface analysis, a replica technique was applied to cavity surface. By connecting defect information with quench location information, the cause of the performance limitation can be categorized by a geometrical defect or by issue of surface treatment and assembly work. By applying optical inspection at each step of the treatment, we can also obtain an information of defect appearance and its development. The cavities that quenched at low field by one or few geometrical defects can be improved by removing the defects at quench location. A local polishing system with a small grinding machine was developed for this purpose. This repair method was applied on the 9-cell cavities, and we succeeded to improve the cavity performance by the combination of local polishing and light electro-polish (EP). The method and results of the cavity inspection including the replica techniques and local polishing are presented in this paper.

は補修技術の実用化に至るまでの過程と現状について報告する。

1. はじめに

L-band 超伝導加速空洞の到達加速電界はここ 10 年で徐々に上がってきているが、その歩留まりはいっこうに改善される気配がなかった。プロジェクト規模の大小にかかわらず、この歩留まりの悪さは実用化にとって致命的である。

本研究では加速空洞内表面の観察と局所的補修の重要性に早くから着目し、観測装置の必要性能、見極めるべき欠陥に焦点をあてた研究を行った。歩留まり改善の技術開発では、空洞内面の鏡面を高分解能で観察するための特殊照明を用いたカメラシステム、次いで、発見した欠陥に対する機械的補修を行うための研磨システムの開発を行い、その有用性の検証をここ 10 年間継続的に実施してきた[1], [2], [3]。

本システムを用いた方法が有効であることを実証するため、DESY、FNAL、JLAB、KEK など製造された超伝導加速空洞のうち、特に性能の悪いものについて内表面の欠陥の有無を検査し、見つかった欠陥に応じた補修を実行し、性能試験を行ってきた。結果、ほぼ確実に空洞性能を改善できる事が実証された。また、本研究開発から得られた知見・ノウハウは、今日の空洞製造および各種表面処理工程へ反映され、ILC-TDR にも採用されている[4]。

現在、改良を重ねた高分解能内面検査カメラと研磨装置を DESY、FNAL、JLAB、CERN でも利用可能にするべくその供給にも貢献している。本発表で



Figure 1: Example of a geometrical defect in L-band SC cavity and the layout of STF accelerator in KEK.

[#]kenw@post.kek.jp

2. 局所表面仕上げシステム

ILC や cERL などで使用される L-band 超伝導加速空洞の高電界性能は、数 m におよぶ溶接シーム（電子ビーム溶接）およびその近傍に対し、サブ mm サイズの溶接欠陥又は傷がひとつでもあると要求される性能に達しないことが多い。図 1 に超伝導加速器の構成例および超伝導加速空洞セル赤道部に検出された欠陥の例を示す。

局所表面仕上げシステムは各工程後に行われる光学検査にて発見された空洞性能に悪影響を与える幾何学的欠陥をピンポイントで機械的に除去し、かつその表面を滑らかに仕上げることで、その後行われる電解研磨の量を最小にしつつ空洞性能を改善させるものである[3]。これにより、幾何学的欠陥が原因の低電界強度におけるクエンチリミットの改善、また、フィールドエミッションの抑制が定量的に行えるようになった。

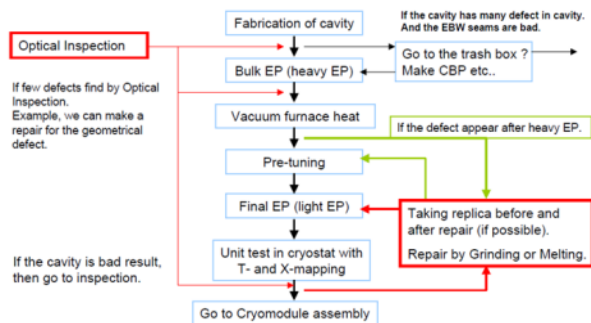


Figure 2: Repair process implementation for the cavity treatment flow.

図 2 に空洞製作からクライオモジュールインストールまでの工程および空洞補修の実施の流れについて示す。光学検査は製造後、バルク EP 後、アニール後、性能が出なかった場合の縦測定後に行われ、どの段階で欠陥・傷が発生したのかを把握できる工程を取っている。システムの立ち上げ当初、空洞補修の実施は縦測定後のみであったが、補修後の測定データの蓄積により、最近ではプリチューニング前にも行われるようになった。

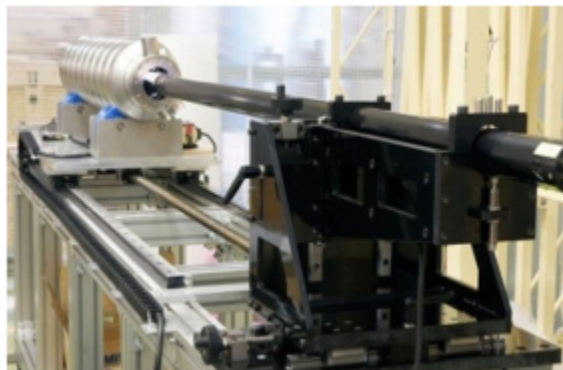


Figure 3: High quality inspection system with high resolution camera.

本システムに用いられるツールを図 3~5 に示す。

図 3 は光学検査に用いられる特殊照明を装備した高分解能カメラシステムである。特殊照明を利用し撮影した画像に対し画像解析を行うことで 2 次元の形状解析が行える[1]。図 4 は空洞内に発見された幾何学的欠陥のレプリカである。特殊ツールとシリコンゴムを用いて空洞内で作製・採取される。シリコンゴムのレプリカを樹脂系のモールド材に転写することで、欠陥およびその周辺の実形状が非破壊で得られる。これは空洞製作時における品質検査の指針を可視化、定量化することにも繋がっている。また、このサンプルをモックアップとして利用することで、表面仕上げシステムのベンチテストが行える。なお、空洞実機に対し、レプリカ採取による性能低下は今のところ見られていない[3], [5]。

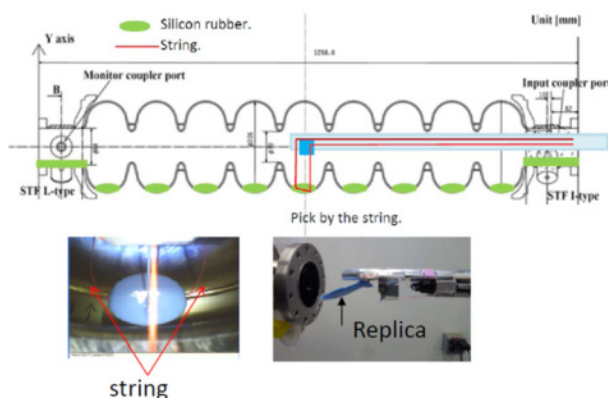


Figure 4: Taking replica of inner cavity surface using special tool.

図 5 は局所研磨機である。左図が赤道部、アイリス周辺に用いる#1 号機、右図がテーパ部に用いる#3 号機である。光学検査およびレプリカから欠陥位置の詳細情報が得られるようになり、セル形状を模したプラスチック製モックアップと組み合わせることで研磨機および研磨ツールのフィッティングチェックが行える。研磨機ヘッドは DC モーターを採用しており、回転数は無負荷で 3000 rpm (12 V) である。研磨速度は純水を媒質とした湿式環境下において#400 研磨紙で 5 $\mu\text{m}/10 \text{ min}$ 、#1000 研磨紙で 3 $\mu\text{m}/10 \text{ min}$ 程度である。仕上げ加工は#800-1000 研磨紙で行い、その結果、加工面はほぼ鏡面に仕上がる。



Figure 5: Grinder machines and grinding area. Grinder #1 is applied to red area, and #3 is applied to green area.

機械加工により空洞内面を鏡面化した場合、縦測定前に実施する電解研磨量は 20 μm (light EP) 程度で問題ないことが本試験および FNAL らの実験によ

り確かめられている[3], [6]。また、採用したパンタグラフ式可動部による研磨ヘッドの押しつけ圧は~800 kPa であり、研磨加工に対し、十分な強さを持っている。

超伝導加速空洞に対して行われる電解研磨は、空洞内面全体を電気化学的に研磨するため、結果、形状変化に伴う共振周波数の変化が生じる。特に多セル空洞の場合、電解研磨量が多いと研磨量の不均一性から各セルの共振周波数にばらつきが生じ、結果、電界平坦度が劣化してしまう。このため、多くの工程を要するプリチューニングを再度行う必要が出てくる。開発した局所表面仕上げ法では、電界平坦度をほとんど損なうことなく性能改善が達成できるため、各セルの周波数調整ができないジャケット付きの加速空洞に対しても適用できることが特徴の一つである。

3. 空洞補修の実例

空洞補修の実例について、本システムを用いて初めて補修を実施した MHI-08 空洞を例にとり説明する[7]。

3.1 MHI-08

MHI-08 は STF-Phase1.5 project のために 2009 年に製造された空洞内の一台である。この製造ロットの空洞は光学検査のフィードバックを受け、溶接条件を改善した結果、滑らかな溶接シームが得られたものである。受け入れ検査およびバルク電解研磨後に実施した光学検査では、溶接シーム周辺に異常は見られなかった。このため、最終電解研磨、1 回目の縦測定と通常の手順で進めた。1 回目の測定結果は 16 MV/m であり、2 セル赤道部のクエンチにより制限された。測定後の光学検査では、クエンチ箇所にはピット状の欠陥が出現しており、元々溶接シーム端部内に存在していた溶接欠陥が、電解研磨により表層に現れたのが検出された (図 6)。このときの研磨量は合計で 125 μm であった。これ以降のロットでも 100-150 μm の研磨で赤道部の溶接シーム内から同様の欠陥が現れるケースが見られている[8]。

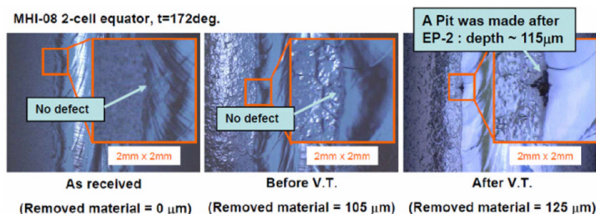


Figure 6: Pit-type defect appeared after EP in MHI-08.

このような欠陥の場合、これまではバレル研磨を採用し空洞全体を研磨していた。その後はバルク電解研磨から処理をやり直すことになり、多くの工程 (4~5 週間) をこなす必要があった。しかしながら、バレル研磨を行った MHI-01~04 の空洞内面には溶接欠陥が残っており、溶接の条件次第ではバレル研磨も有効ではないことが、後日実施した光学検査の結果から分かっている[9]。局所表面仕上げ法では、ピ

ンポイントで欠陥除去が可能であり、欠陥のタイプおよび数に依存するが最短 1 日で補修を実施、最終電解研磨工程へ進めることが可能である。今回 MHI-08 で検出された欠陥のタイプは深さ 115 μm のピットであったため、除去にはピット周辺部も満遍に研磨する必要があった (図 7、8)。このため、研磨の加工には 300 min、140 min の計 440 min を要した。荒研磨には#400、研磨には#1000 のダイヤモンドシート (研磨紙) を用い、今回の補修でシートを交換した回数は 20 回である。交換時に合わせて、研磨箇所のワイピングおよび光学検査を行い、加工の進捗状況を逐次確認しながら作業を進めた。これら一連の作業時間は 1 回あたり 30 分程度かかり、結果、補修に要した日数は 2 日であった。

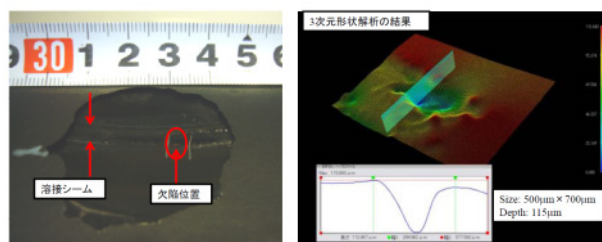


Figure 7: Mock-up made of molding material (left) and the result of 3D-analysis of pit-type defect in MHI-08 (right).

補修後、研磨かすを除去するために高圧水洗浄器を用いて、空洞内面に高圧水洗浄を実施した。その後、レプリカ採取を行い、研磨部周辺の形状 (エッジが立っていないかなど) を確認したのち、電解研磨工程へ進んだ。また、その他にも 2 セルの赤道部から 40 mm 離れたテーパ部にバンプ状の欠陥が 1 つ検出されたが、電解研磨における欠陥除去 (バンプに対する形状変化) の能力および空洞性能への影響を確認するため、特に補修は行わなかった。

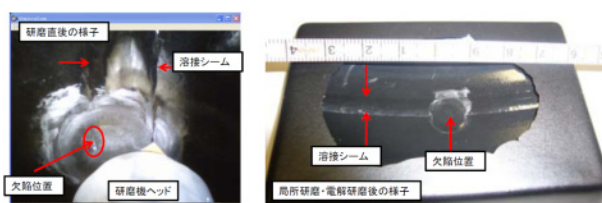


Figure 8: Image was taken by USB camera on the grinder head after grinding (left) and the mock-up was made after polish to check a shape around edge (right).

補修後、3 回の電解研磨を経て、縦測定を行った。1 回目の電解研磨は 20 μm とし、電解研磨後に光学検査およびレプリカによる表面および補修部周辺の形状の確認を行った。周辺部に対しエッジが立っていたため、研磨機を用いて面取り加工を行った後、30 μm の電解研磨、同様に形状チェック後、20 μm の電解研磨を行い、当時行われていた通常のシーケンスに則った洗浄・組立工程を経て、2 回目の縦測定を実施した。

2 回目の縦測定では、空洞性能が 27 MV/m まで改

善した。性能制限の原因は 2 セルで検出されていたバンプ状の欠陥によるクエンチであった。3 回目の縦測定では 2 セル赤道部の欠陥が存在しない箇所までクエンチが起こり結果、18MV/m で制限された。4 回目の縦測定では、空洞性能が 38MV/m を達成し、国内製造の空洞にて初めて 35MV/m を超えた。性能制限の原因はフィールドエミッションによる Q 値の低下、それに起因する測定系のパワーリミットであった。パスバンド測定から各セルの到達電界強度を測定した結果、いずれのセルも 40MV/m を超えたことが確認された。縦測定の結果を図 9 に示す。また、2 セルで検出されたバンプ状の欠陥は電解研磨の効果により形状が変化し、滑らかなものとなったことが光学検査より確かめられた (図 10)。

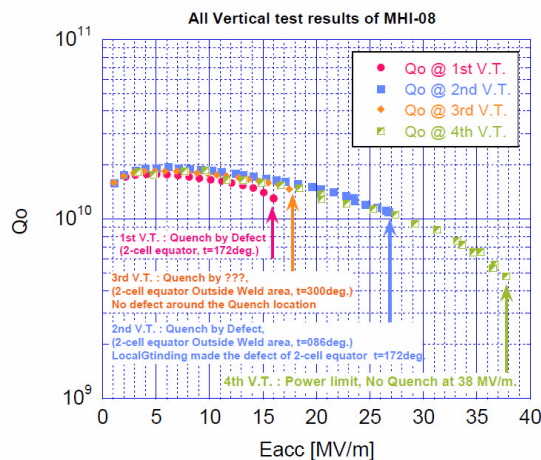


Figure 9: Result of the Vertical tests (MHI-08).

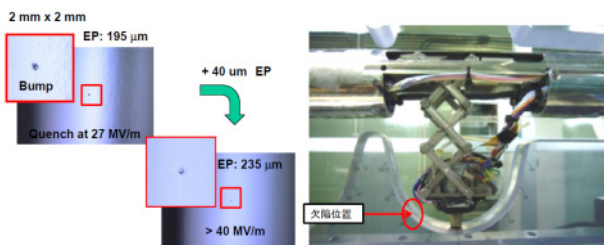


Figure 10: A Bump deform by EP (MHI-08).



Figure 11: Pictures with the Toshiba Teli camera(left) and ARTRAY camera(right).

2009~2010 年当時、セルごとの電界性能は 35 MV/m を超えていたが、低い電界強度から発生する

フィールドエミッションによる Q 値の低下が問題であった。これらの問題は電解研磨中の温度制御、電解研磨後の洗浄シーケンスの改善、作業・組立環境の改善およびアイリス部の欠陥の除去などにより、加速空洞の単体試験 (縦測定) までという制限はあるが 2011~2012 年の段階で問題はほぼ解決している。

3.2 その他の空洞の補修実績

2011 年度までに行った空洞補修の結果を表 1 にまとめる[3]。

Table 1: Result of Vertical Tests after Repair

Cavity	Before	After
AC71	26 MV/m	30 MV/m at DESY [10]
MHI-08	16 MV/m	38 MV/m at KEK [7]
AES-03	20 MV/m	34.6 MV/m at FNAL [11]
cERL 9-cell #1	18 MV/m with F.E.	25 MV/m without F.E.[12]
cERL 2-cell #4	20 MV/m with heavy F.E.	25 MV/m without F.E.[13]
JLAB LG#1	30 MV/m	Cell #5 performance improved to 43 MV/m at JLAB [14]
TB9RI -026	After quench at 30 MV/m, then F.E. stated from low field. 20 MV/m	36.6 MV/m without F.E. [11]
AES-01	22 MV/m	Waiting VT at FNAL [11]

4. 最近の状況

各システムの最近の開発状況について述べる。光学検査用カメラは開発当初から Toshiba Teli 製 CMOS カメラ (CSF5M7C3L18NR、1/1.8" 1400 × 1000、7.35μm/pixel、3 layer CMOS) を常時使用しているが、画質の高分解能化を目的として ARTRAY 製 CMOS カメラ (ARTCAM-900MI、1/2.3" 3488 × 2616、1.75μm/pixel、CMOS Bayer) を搭載したカメラシステムも製作した[15]。図 11 に MHI-08 の 2 セルに検出された欠陥を撮影した画像を示す。ARTRAY 製 CMOS カメラの方が、画像が鮮明であることが分かる。しかしながら、両者の応答速度を比較すると、Toshiba Teli 製 CMOS カメラの方が優れており、光学検査に掛かる時間が短くて済むことから、Toshiba Teli 製が現在も主として使用されている。最大画質における応答速度が遅い ARTRAY 製 CMOS カメラは検出された欠陥部分の撮影や短セル空洞といった用途に特化して使用している。

光学検査を行ううえでは照明の輝度が重要となる。

開発当初は無機 EL シートを採用し、カメラシステムを内包したシリンダーにフィットさせ使用していたが、輝度が小さいこと、寿命が短いことおよび電極部の故障が多いことなど取扱いに難があった(図 12 a)。この問題を解決するために、白色 LED と V 溝を設けたプラスチック板を組み合わせた光源を開発した(図 12 b)。これにより輝度および寿命の問題は解決した。最新では LED をマトリクス状に配置し、より鮮明な画像を得るための光源が開発されている(図 12c) [1], [2], [16]。

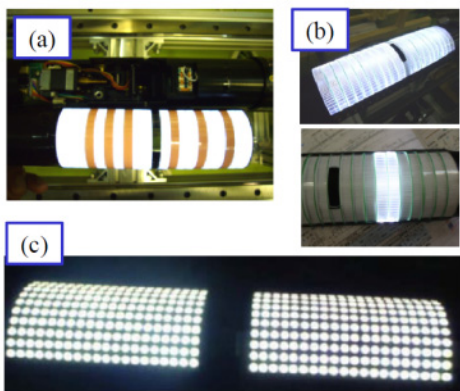


Figure 12: (a) Electro-luminescence (EL) sheet for lighting, (b) LED light with strip-line plastic plane and (c) Enhanced illumination by LED matrix.

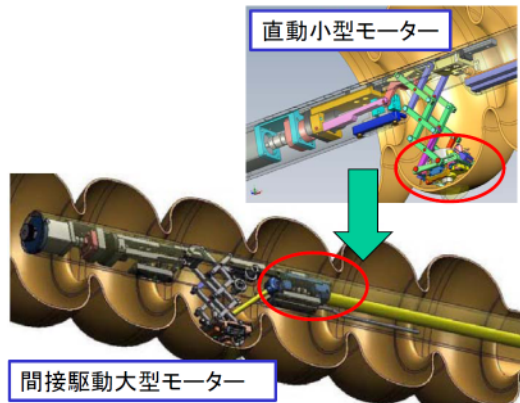


Figure 13: Motivity for grinding was changed from the direct acting type to the indirect type with high-power motor for a powerful grinding.

一方、局所研磨機では開発当初から小型 DC モーター自体に研磨ヘッドを装着し直動式で研磨を行っていた。このため研磨時のモーターにかかる負荷は大きく、かつ冷却効率の問題からモーターの発熱が起こり、結果、連続研磨時間に制限があった。この問題を解決するために動力伝達方式を直動式から間接式に変更、また、設置スペースが確保されたことによりモーターの大型化が可能となった。図 13 に研

磨ヘッドの駆動方式およびモーター位置の違いを示す。間接駆動型は現在試験中であり、補修時における研磨時間の大幅な短縮が期待される[17]。

5. まとめ

- 本研究では、L-band 超伝導加速空洞の高性能化および歩留り向上を目的として、光学検査システム、レプリカ採取から非破壊の 2 次元ないし 3 次元の形状解析を行い、局所表面仕上げ法によりピンポイントで欠陥の除去を行った結果、高電界性能を達成し、空洞補修方法を確立した。
- また、海外製加速空洞に応用し、高電界性能の達成を実証した。
- 特に国内のプロジェクト (STF、cERL) では、予備機がほとんどもしくは全くない状態でクライオモジュール化まで行う必要があり、これら空洞の性能達成は、超伝導加速器への応用に大きく貢献している。

6. 謝辞

本システムの研究開発にあたり、各種検査・補修装置の設計に尽力した ND ラボの銚之原氏、STF、cERL、空洞製造および表面処理の関係者の皆様のご協力にあらためて感謝の意を表します。

参考文献

- [1] Y. Iwashita, Y. Tajima, H. Hayano, Development of high resolution camera for observations of superconducting cavities, Phys. Rev. ST Accel. Beams 11,093501 (2008).
- [2] K. Watanabe: Review of Optical Inspection Methods and Results, Proc. SRF2009, Berlin, pp.123-8.
- [3] K. Watanabe, H. Hayano, Y. Iwashita: Cavity Inspection and Repair Techniques, SRF2011, Chicago, pp. 592-602.
- [4] TDR-ILC.
- [5] M. Ge, et al., Routine characterization of 3D profiles of SRF cavity defects using replica techniques, IOP science, Supercond. Sci. Technol. 24 (2011) 035002, (2010).
- [6] C. Cooper, et al., Centrifugal barrel polishing of cavities worldwide, Proc. SRF2011, Chicago, pp. 571-575.
- [7] K. Watanabe, et al., Repair techniques of superconducting cavity for improvement cavity performance at KEK-STF, Proc. IPAC10, Japan, pp.2965-2967.
- [8] K. Watanabe, HOT topics at SRF2011.
- [9] K. Watanabe, et al., Surface inspection on MHI-01~09 cavities, Proc. IPAC10, Japan, WEPEC032.
- [10] Cavity database at DESY.
- [11] Cavity database at FNAL.
- [12] K. Umemori, et al., Results of vertical tests for KEK-ERL 9-cell superconducting cavity, Proc. IPAC10, Japan.
- [13] K. Watanabe, et al., Development of the superconducting rf 2-cell cavity for cERL injector at KEK, NIMA 714 (2013) pp. 67-82.
- [14] R.L. Geng, et al., Gradient improvement by removal of identified local defects, Proc. SRF2011, Chicago.
- [15] Y. Iwashita, et al., R&D of non-destructive inspection systems for SRF cavities, Proc. SRF2009, Berlin, pp.297-299.
- [16] Y. Iwashita, et al., Non-destructive inspection systems for SC cavities, Proc. LINAC12, Tel-Aviv, pp.294-296.
- [17] Y. Iwashita, et al., Efforts on non-destructive inspections for SC cavities, Proc. IPAC13, Shanghai, pp.2352-2354.