

## STF-CM2a クライオモジュール用 9 セル超伝導空洞の内面検査の結果 INSPECTION OF INNER SURFACE IN 9-CELL SC CAVITIES FOR STF2-CM2A CRYMODULE

浅野峰行<sup>#,A)</sup>, 今田信一<sup>A)</sup>, 植木竜一<sup>A)</sup>, 柳町太亮<sup>A)</sup>, 山田浩気<sup>A)</sup>, 岡田昭和<sup>B)</sup>, 宍戸寿郎<sup>C)</sup>, 山本康史<sup>C)</sup>,  
加古永治<sup>C)</sup>

Mineyuki Asano<sup>#,A)</sup>, Shin-ichi Imada<sup>A)</sup>, Ryuichi Ueki<sup>A)</sup>, Taisuke Yanagimachi<sup>A)</sup>, Hiroki Yamada<sup>A)</sup>,  
Terukazu Okada<sup>B)</sup>, Toshio Shishido<sup>C)</sup>, Yasuchika Yamamoto<sup>C)</sup>, Eiji Kako<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Nippon Advanced Technology (NAT), <sup>B)</sup> K-vac

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

### Abstract

STF2 accelerator has been constructing in the Superconducting RF Test Facility (STF) at High Energy Accelerator Research Organization (KEK). Inner surface of four 9-cell SC cavities for STF2-CM2a cryomodule was observed before vertical test by using an inspection system, so-called Kyoto Camera. In case that the cavity performance did not achieve the specification, inspection of the inner surface and local mechanical polishing at the locations that seemed to limit the cavity performance were carried out after the vertical tests. The results of the inspection of inner surface in four 9-cell SC cavities for STF2-CM2a cryomodule are described in this paper.

### 1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構(KEK)の STF 棟では、STF2 加速器の構築が行われている。STF2 加速器は、超伝導空洞を内蔵するクライオモジュール CM1、CM2a から構成される。STF 棟において、超伝導空洞の性能評価のために縦測定を行っている<sup>[1]</sup>。空洞性能の向上を目指すために、超伝導空洞は、内面検査用カメラを使用して、空洞内面の電子ビーム溶接のビード近傍の様子を調べる内面検査を行っている。また、縦測定では、温度マッピングや X 線マッピングを用いて、発熱位置や X 線の発生位置を観測している<sup>[2]</sup>。その結果から、空洞性能を制限する箇所を特定し、局所研磨機を使用して、問題の箇所の除去を行っている。本報告では、内面検査により分かったクライオモジュール CM2a に内蔵される超伝導空洞 4 台の内面の特徴と研磨方法について報告する。

### 2. 内面検査と局所研磨機

Figure 1 は、超伝導空洞の内面検査に使用する筒状のカメラと内面検査用台にセッティングされた超伝導空洞の写真である<sup>[3]</sup>。超伝導空洞を乗せた台が左右に移動する事で、カメラを空洞内部に挿入し、空洞下部のローラーにより、空洞を回転する事で内部の状態を調べることが出来る。筒の先端にカメラとミラーが納められており、ミラーの反射を利用して筒の先端の上方向の画像を取得する事ができる。使用しているカメラは、東芝テリー株式会社製の 150 万画素数の 3 層 CMOS カメラ(型番: CSF5M7C3L18NR)で、分解能として 1 画素あたり 7.5[ $\mu\text{m}$ ]である。取得する写真のサイズは、12.0[mm]×9.0[mm]である。超伝導空洞は、インプットカッ

プラーポートを基準の 0 度に設定し、空洞を時計回りに 1 周 360 度とする。内面検査として調べる領域は、主に溶接ビードとその周辺部分である。その部分に欠陥があるとクエンチやフィールドエミッション等の性能劣化の原因になりやすい事がわかっている。写真の枚数は、空洞 1 周分を撮るために、赤道は 80 枚、アイリスとビームパイプは 40 枚とする。ただし、縦測定時に発熱等があった場合は、ビードから大きく離れた部分を調べることがある。

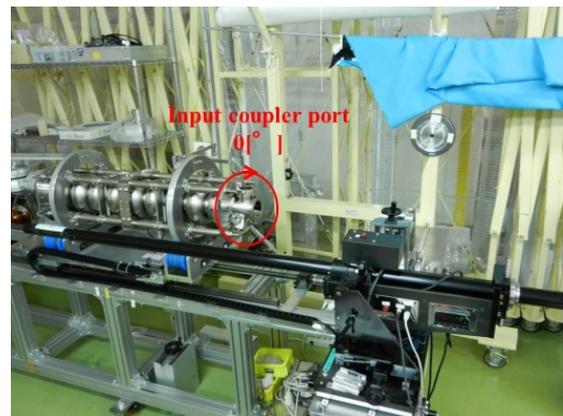


Figure 1: Inspection system by an optical camera.

Figure 2 は、内面検査で発見した欠陥部分を研磨するための装置である。赤道部分やアイリスの一部のみを研磨する場合は、局所研磨機を使用する<sup>[4]</sup>。局所研磨機は、シリンダー内に格納されているパンタグラフが広がり、先端に取り付けた研磨シートをモーターで回転させることで空洞内面を研磨することが出来る。欠陥の深さにより研磨シートの目の細かさを調整し、研磨箇所が、鏡面になるように目の細かいシートで仕上げを行う。また、アイリスの全周研磨を行う場合、以前は、棒の先端に研磨シート

<sup>#</sup> nat-asa@post.kek.jp

を取り付け、空洞を回転させながら手動で研磨を行っていた<sup>[5]</sup>。そこで、研磨シートを取り付けたテフロンのパールをモーターで左右にスライドさせると同時に空洞を回転させ、アイリスの全周研磨を行うアイリス用研磨機を作製した。研磨シートを各アイリスの間隔に取り付けることで一度に複数のアイリスの研磨が出来る。

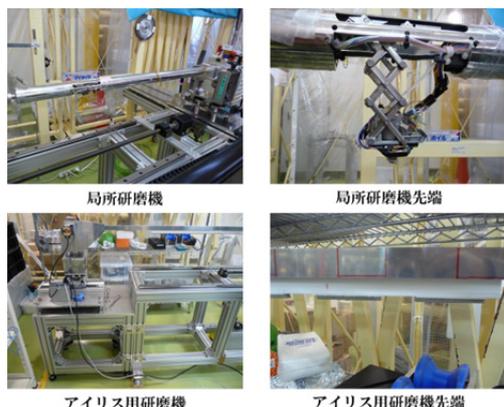


Figure 2: Local grinding machines.

### 3. 電子ビーム溶接の違いについて

CM1 と CM2a に使用している超伝導空洞は、電子ビーム溶接 (EBW : Electron Beam Welding) の装置が異なっている。また、空洞を製作する際に、赤道にあたるダンベルの溶接部分はダンベルの向きが、Figure 3 に示すように異なっている。右に示す CM2a では、量産化のためにダンベルを縦に 9 セル分重ねて、溶接できるようにしている<sup>[6]</sup>。左に示す CM1 の場合は、溶接時にダンベルの回転方向に重力がかかっている。それに比べて、CM2a の場合は、溶接時、下方向に重力がかかっている。アイリス部分の溶接とエンドセルとビームパイプの溶接は EBW の装置が異なるが、今までと同様の方法で EBW を行っている。

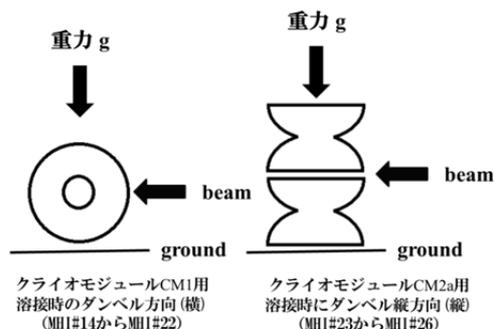


Figure 3: Difference of direction by EBW (Electron Beam Welding) in dumbbells.

CM1 と CM2a の溶接部分の比較の例を Figure 4 から Figure 6 に示す。Figure 4 は、赤道の溶接ビードの比較である。CM1 の場合は、重力がビードの両端に同じように働くため、ビードの両端が同じように写っている。CM2a の場合は、ビードの上流端の境

界部分が鮮明になっており、下流側の方は、CM1 と同じように写っている。これは、重力が下流側に働き、溶接が下流側に垂れているためだと思われる。

Figure 5 は、アイリスの溶接ビードの比較である。CM1 は、均等にカメラの光が当たっており、ビード表面が平らのように映っているが、CM2a は、ビード表面に写っている影が波打っているように見える。

Figure 6 は、エンドセルとビームパイプの溶接ビードの比較である。CM1 に比べて CM2a の方は、ビードの両端が一直線にそろっている。

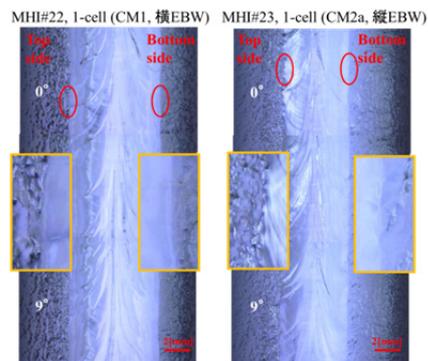


Figure 4: Bead characteristics on equator due to the EBW difference.

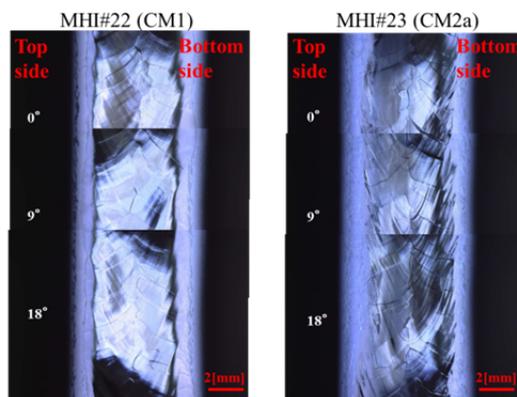


Figure 5: Bead characteristics on iris due to the EBW difference.

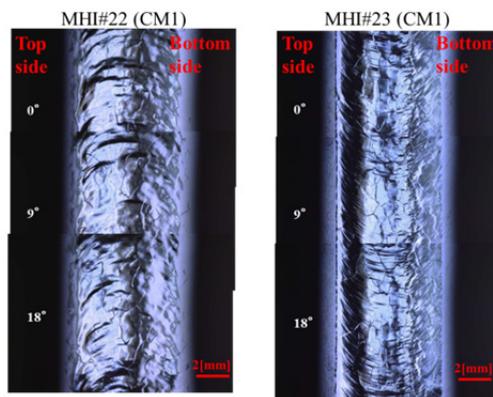


Figure 6: Bead characteristics between end-cell and beam pipe due to the EBW difference.

## 4. 内面検査結果と研磨

### 4.1 研磨について

CM2a の超伝導空洞は、MHI#23 から MHI#26 の 4 台である。内面検査後に行った研磨は、MHI#23 と MHI#26 は縦測定前から始め、MHI#24 と MHI#25 は縦測定後から始めた。赤道は、欠陥や怪しい箇所の研磨を行い、アイリスは欠陥がない箇所も含めて全周の研磨を行った。

### 4.2 赤道について

Figure 7 は、MHI#24 の 1 回目の縦測定時にクエンチした発熱箇所に見つかった欠陥と研磨後の写真である。赤道ビード端とビードより上流側に離れた箇所に欠陥があった。この欠陥を局所研磨機で除去したが、2 回目の縦測定では、加速電場は上昇していないが欠陥の除去により、別の箇所に発熱箇所が変化しており、研磨の効果があつたと思われる。

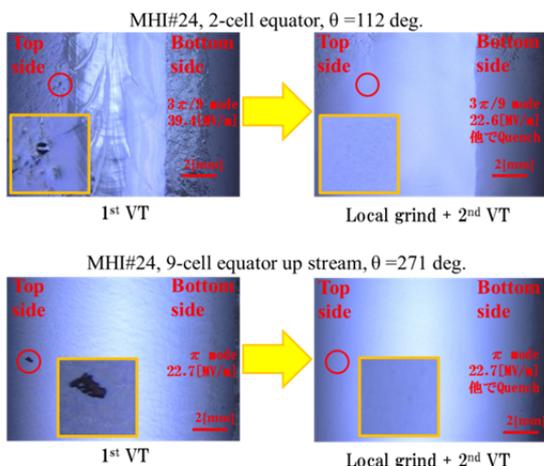


Figure 7: Polishing results of defects at the equator in the MHI#24 cavity.

Figure 8 は、MHI#23 の 1 回目の縦測定時に発熱した 2 セルの赤道ビードと研磨後の写真である。縦測定の結果から、2 セルの 30 度付近で発熱が一番大きく反応していたが、内面検査の際に、赤道から離れた箇所も調べたが、該当する欠陥を発見できなかった。そのため、発熱箇所周辺の 0 度から 90 度の研磨を行った。同様に、3 セル、4 セル、9 セルでも発熱の原因を特定できなかったため、発熱箇所周辺の研磨を行った。発熱箇所周辺の研磨を行う事で、加速電場が上昇し、研磨の効果が認められたセルもあるが、変化がないセルもあった。そのため、発熱原因が特定できないときは、その周辺を研磨する事で一定の効果が得られる可能性があるが、確実に発熱原因を除去出来るかは分からない。MHI#25 も発熱箇所を特定できなかった。研磨後の縦測定で、同じ箇所、同じ加速電場で発熱している。ことから、写真では分からないくらいの大きさの欠陥、もしくは、内面検査を行っている領域以外に原因があると思われる。

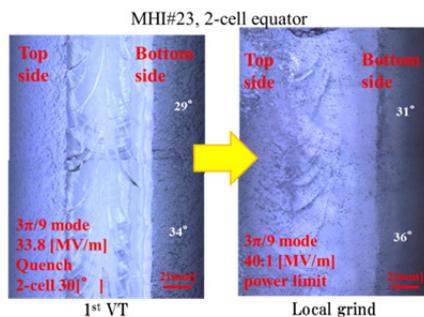


Figure 8: Polishing of equator in the MHI#23 cavity, (when the defect was not found clearly)..

Figure 9 は、MHI#26 の 7 セルの赤道ビードの下流側に現れた無数のくぼみの例である。初めて見るビードのくぼみのため、EBW の装置の違い、または、溶接のダンベルの方向の違いにより発生したのかは原因不明である。Figure 10 に各空洞のくぼみの分布図を示す。このくぼみは、下流側のセルに発生し、ビードも下流側に発生しているため、溶接時の重力に影響を受けた可能性がある。この現象が多く見られた MHI#25 と MHI#26 は、2 空洞同時に溶接を行ったため、両空洞に同様に出現したと思われる。また、欠陥との判別が難しい形状のくぼみも多数見られた。MHI#25 は、研磨を行わずに縦測定を行ったが、この多数のくぼみが原因の発熱はなかった。このくぼみは、10 分程度の研磨で消えたため、浅いくぼみであった。

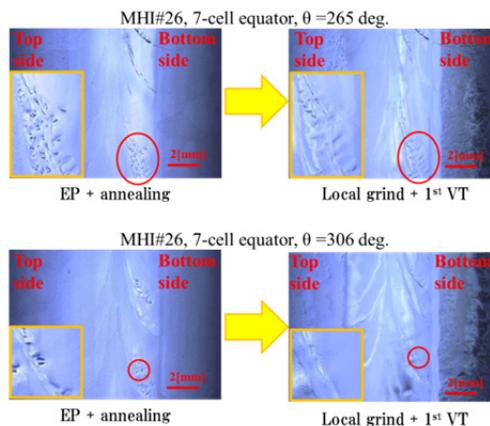


Figure 9: Roughness at the equator beads.

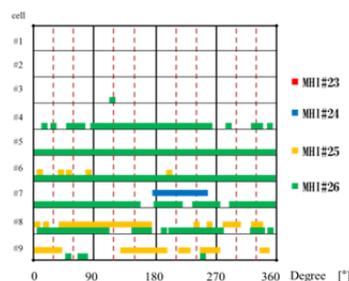


Figure 10: Distribution map of roughness at the equator beads.

#### 4.3 アイリスについて

Figure 11 は、MHI#23 の 5-6 アイリスの 0 度で見つかった欠陥と研磨後の写真である。この種類の欠陥は、過去の空洞でも発見しており、性能劣化の原因になりうるため、縦測定の前に除去している。

Figure 12 は、MHI#24 で見つかった大きなくぼみと研磨後の写真である。一度の研磨で除去しきれなかったため、再度研磨を行った。研磨前には、アイリスのビードに現れる波目模様と似ているために判別が難しい特徴がある。

CM2a 用の超伝導空洞で初めて見つかったアイリスのビードのくぼみが Figure 13 と Figure 14 である。Figure 13 は、アイリスのビード両端に見つかったくぼみと研磨後の写真である。Figure 14 は、アイリスのビード上に見られた細かな多数のくぼみの例と研磨後の写真である。このようなくぼみが、主に MHI#24, MHI#25, MHI#26 のアイリスに広範囲にわたって見つかった。これは、CM1 以前の超伝導空洞には、見られなかった特徴のため、EBW の装置が変わった事により生じた特徴であると思われる。

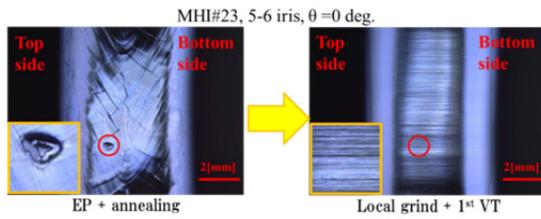


Figure 11: Polishing of the defect at iris in the MHI#23 cavity.

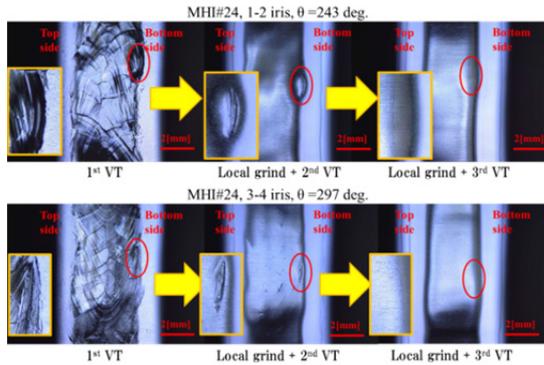


Figure 12: Polishing of deep depressions at iris in the MHI#24 cavity.

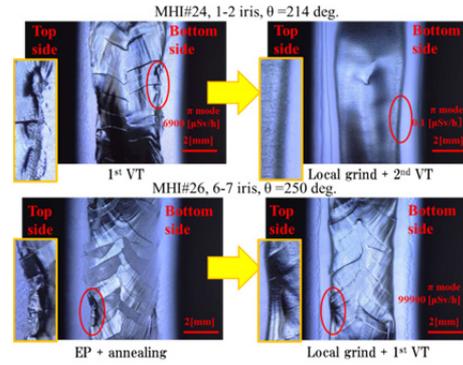


Figure 13: Polishing of depressions at iris.

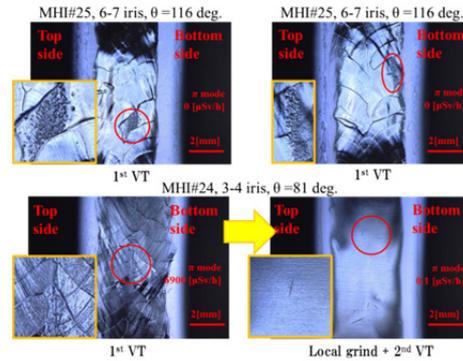


Figure 14: Roughness on the iris beads.

## 5. まとめ

CM2a の超伝導空洞の内面検査の結果は、EBW の装置と溶接時のダンベルの方向が変わった事で、ビードに新しい特徴が見られた。空洞性能向上のために、欠陥や発熱箇所の研磨、アイリスの全周研磨を行った。縦測定の結果により、ビードの欠陥やくぼみが一番少なかった MHI#23 が、4 空洞の中で一番性能が良かった。つまり、ビードのくぼみ等がない空洞製造が、空洞性能向上に必要なと思われる。

## 参考文献

- [1] Y.Yamamoto et al., "Summary of vertical tests of superconducting cavity for the ILC at KEK-STF" Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Aug. 3-5, 2013
- [2] R.Ueki et al., "Vertical Test Result of 9-cell SC Cavity for STF2-CM2a Cryomodule" 本学会
- [3] Y. Iwashita et al., "High resolution inspection camera for superconducting cavity" Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Higashihiroshima, Aug. 6-8, 2008
- [4] K. Watanabe et al., "Repair techniques of superconducting cavity for improvement cavity performance at KEK-STF" Proceedings of the IPAC'10, Kyoto
- [5] Y.Yamamoto et al., "Recent results of performance tests for L-band 9-cell cavity at KEK-STF" Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka, Aug. 8-11, 2012
- [6] T. Yanagisawa et al., "Status of the superconducting cavity development for ILC" Proceedings of SRF2013, Paris