

STF2-CM2b 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-CM2B CRYMODULE

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

Mineyuki Asano^{#,A)}, Shin-ichi Imada^{A)}, Ryuichi Ueki^{A)}, Taisuke Yanagimachi^{A)}, Hiroki Yamada^{A)},
Terukazu Okada^{B)}, Toshio Shishido^{C)}, Yasuchika Yamamoto^{C)} and Eiji Kako^{C)}

^{A)} Nippon Advanced Technology (NAT), ^{B)} K-vac

^{C)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

The STF2 accelerator was constructed in the Superconducting RF Test Facility (STF) at High Energy Accelerator Research Organization (KEK). Four 9-cell SC cavities for STF2-CM2b cryomodule were newly fabricated to replace with four 9-cell SC cavities of STF2-CM2a cryomodule. Inner surfaces of four 9-cell SC cavities for the STF2-CM2b cryomodule were observed before vertical tests by using an inspection system, so-called Kyoto Camera. Local mechanical polishing at the locations that seemed to limit the cavity performance were carried out after inspection of the inner surface. The results of the inspection of inner surface in four 9-cell SC cavities for STF2-CM2b 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 加速器の建設が行われた。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 から構成されている。クライオモジュール CM2b 用の超伝導空洞 4 台は、今後、クライオモジュール CM2a に格納されている超伝導空洞 4 台と交換予定である。STF 棟では、超伝導空洞の空洞性能向上を目指し、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(EBW : Electron Beam Welding)のビードとビード近傍部分を調べる内面検査を行っている。また、超伝導空洞の性能評価試験として縦測定を行っている^[1]。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^[2]。内面検査と縦測定の結果から、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 CM2b 用超伝導空洞 4 台の空洞内面の特徴と空洞内面研磨について報告する。

2. 内面検査と局所研磨機

Figure 1 は、内面検査に使用した筒状のカメラ(京都カメラ)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^[3]。使用しているカメラは、東芝テレー株式会社製の 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[μm]である。取得する写真の空洞内面のサイズは、12.0[mm] \times 9.0[mm]である。内面検査用台を移動させて空洞内にカメラを挿入し、空洞のイ

ンพุットカップラーポートを基準の 0 度に設定し、空洞を回転させて空洞内面の写真を撮る事で、内面検査を行っている。検査領域は、赤道とアイリス、ビームパイプの溶接ビードとその近傍部分である。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となる事が多い。

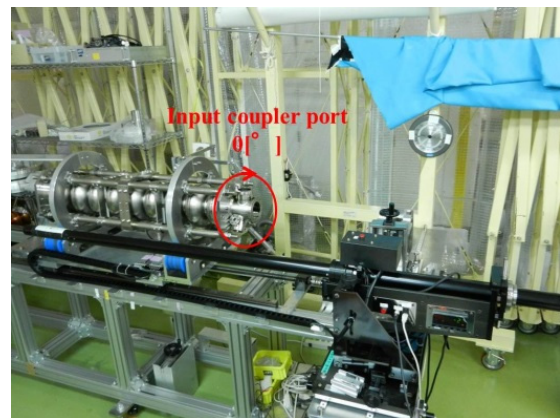


Figure 1: Inspection system with an optical camera.

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^[4]。局所研磨機は、欠陥の大きさに合わせて研磨シートの目の細かさを調整することが出来る。欠陥除去後には、研磨箇所が鏡面になるように目の細かい研磨シートを使用して仕上げの研磨を行う。アイリスの全周研磨を行う場合は、アイリス用研磨機を使用する。テフロンバーにアイリスの間隔をあけて研磨シートを貼り付け、バーを左右にスライドさせながら空洞を回転させる事で全周研磨を行う。

[#] nat-asa@post.kek.jp

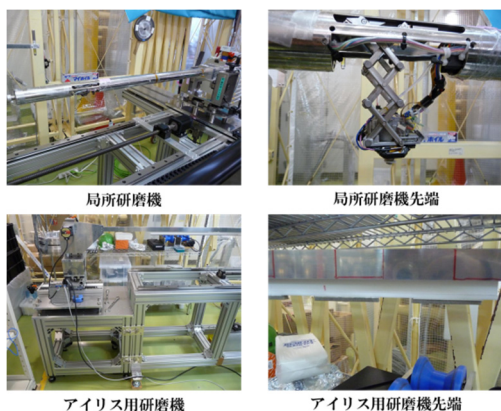


Figure 2: Local grinding machines.

3. 電子ビーム溶接の違い

STF2 加速器に使用されている超伝導空洞は、CM1 と CM2a に内蔵されており、CM2b 用の超伝導空洞は、CM2a の超伝導空洞と交換予定である。各クライオモジュールに内蔵されている超伝導空洞は製造段階における EBW 方法が異なっている。また、EBW 装置は CM1 の空洞溶接後に変更している。

Figure 3 は、アイリス部分を溶接して、ダンベルの状態にするときの電子ビームの向きを示している。CM1 と CM2a は、アイリスの外側から溶接を行い、CM2b は、アイリスの内側からの溶接を行った。

Figure 4 は、ダンベル状の部材の溶接方法であり、この溶接部分が赤道になる。CM1 では、ダンベル方向を横向きにして溶接している。この方法では、溶接を行う際に、チャンバー内を真空状態にして溶接後に大気状態に戻すため、1 台の空洞を溶接するために複数回繰り返し、作業工程が多くなってしまふ。CM2a、CM2b では、空洞製造の量産化を視野に入れ、ダンベルを縦に積み上げて、チャンバー内を一度の真空引きで 9 セル分の溶接を行う事が出来ようになった^[5]。この溶接方法で、4 台同時の超伝導空洞の溶接が可能になり、CM2a 用の超伝導空洞は、1 台溶接を 2 回、2 台同時溶接を 1 回行い、計 4 台の超伝導空洞を製造した。CM2b 用の超伝導空洞は、4 台同時に溶接し、空洞製造を行った。

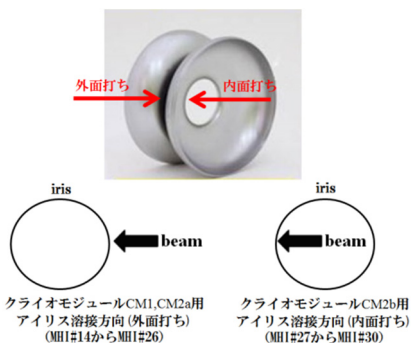


Figure 3: Difference of direction by EBW in dumb-bell fabrication.

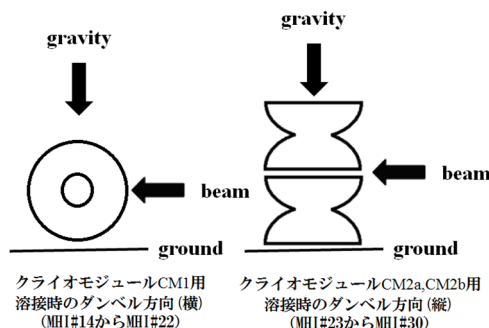


Figure 4: Difference of direction by EBW (Electron Beam Welding) for joining of two dumbbells.

STF2 加速器に使用される CM1、CM2a、CM2b 用の超伝導空洞の溶接ビードの写真を比較した例を Figure 5 から Figure 7 に示す。

Figure 5 は、赤道の溶接ビードの比較である。CM1 は、ビード両端のフォーカスがずれている。これは、重力が溶接の回転方向に働くため、ビードの両端に均等に重力がかかり、溶接ビードの両端が垂れているように見えるからである。CM2a は、ビード上流端のフォーカスが合っており、境界面が鮮明に写っているが、ビード下流端は、CM1 と同様にフォーカスがずれて写っている。これは、溶接時に重力が下流方向に向かって働いているために、ビードが下流側に垂れているためだと思われる。CM2b も CM2a と同様に溶接ビードは下流側に垂れている。CM2a との違いは、溶接前に断面の機械加工を行っている事である。機械加工の目的は、溶接時のシール面の板厚を均等にし、断面をきれいに処理する事で欠陥の発生を防ぐ事である。

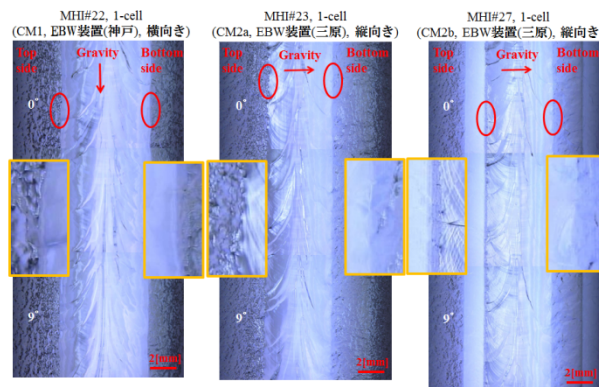


Figure 5: Bead characteristics on equator due to the different EBW direction.

Figure 6 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、ビード幅が多少不均一に見える。EBW 装置が変更された CM2a は、ビード表面に写っている影が波打っており、ビード幅も CM1 と同様に不均一に見える。溶接のビーム方向が外側から内側に変更された CM2b は、ビード幅が均一になり一直線にそろって見える。

Figure 7 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 EBW 溶接の装置が変更になった CM2a、CM2b の方は、ビードの両端が一直線にそろっているように見える。

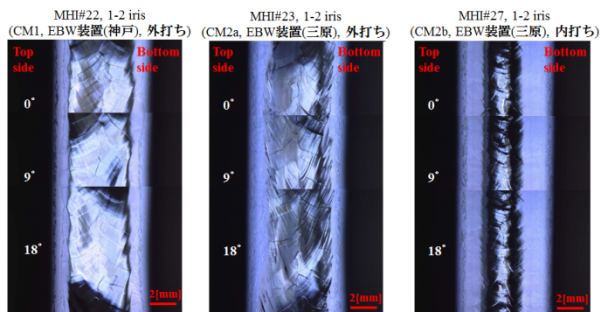


Figure 6: Bead characteristics on iris due to the different EBW direction.

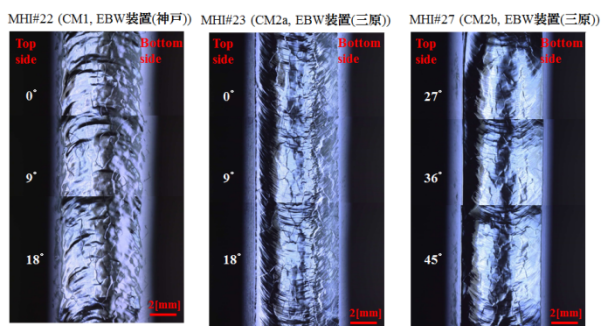


Figure 7: Bead characteristics between end-cell and beam pipe due to the EBW difference.

4. 空洞内研磨

4.1 CM2b 用の超伝導空洞の研磨について

CM2b 用の超伝導空洞は、MHI#27 から MHI#30 の 4 台である。空洞の受入時に全ての超伝導空洞に見つかったアイリス部分の傷痕が電解研磨(EP: Electro Polishing)で $100[\mu\text{m}]$ 削っても、傷痕が残っていた。そのため、縦測定の前に、4 台全ての空洞のアイリスの全周研磨を行った。MHI#27 は、1-2 アイリスの 333 度に大きなピットが発見されたので、全周研磨後にこのピットの研磨を行った。研磨後は、縦測定を行い、クライオモジュールに内蔵するためのジャケット溶接を行った。MHI#27 は、空洞性能向上のために 2 回目の縦測定を行ったので、1 回目の縦測定時の発熱箇所周辺を詳しく調べ、原因と思われる箇所の研磨を行った。

4.2 アイリスの傷痕について

Figure 8 は、超伝導空洞の受入時内面検査で見つかったアイリスの傷痕の分布図である。傷痕は、0 度、90 度、180 度、270 度の同じ角度付近の全アイリスに分布している。

Figure 9 は、空洞製造時に行われたビードの厚み測定で使用した探触子によってついた傷痕の写真である。厚み測定は、90 度間隔で行い、傷痕の分布と

も符合しているため、アイリスの傷痕は、この時に付いたと考えられる。

受入時の内面検査後に行った $100[\mu\text{m}]$ の電界研磨によって目立たなくなった傷痕もあるが、深い傷痕は残っていたために、アイリス用研磨機を使用してアイリスの全周研磨を行い、傷痕を除去した。Figure 10 は、MHI#27 のアイリスの傷痕の経過別写真の例である。経過としては、空洞受入時、電解研磨とアニール処理後、研磨と縦測定後の 3 段階である。電解研磨後も目立っていた傷痕が、研磨によって除去出来ていることが確認できる。

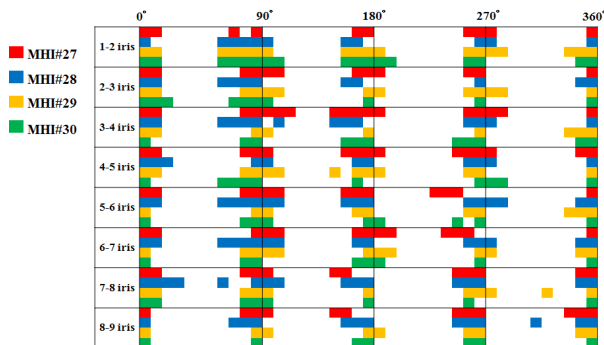


Figure 8: Distribution map of scratches at the iris beads.

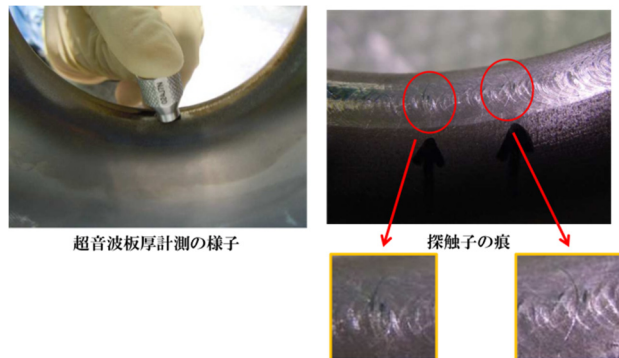


Figure 9: Observed bead scratches on iris during thickness measurements.

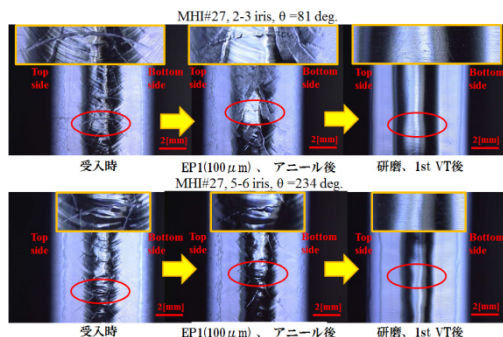


Figure 10: Polishing results of scratches at the iris bead in the MHI#27 cavity.

4.3 アイリスの大きなピットについて

MHI#27 は、100[μm]の電解研磨後の内面検査で1-2アイリス333度に大きなピット見つかった。全周研磨後に、ピットがより顕著に目立つようになった。このような大きなピットがアイリスに有ると縦測定時に放射線発生の原因になる^[6]。そのため、アイリス用研磨機を使用してピットの研磨を行った。Figure 11 は、ピットの研磨過程の写真例である。ピットの横幅が約 650[μm]と非常に大きなピットであり、研磨シートを荒目に変更しても、研磨に多くの時間を費やした。ピットが消失するまでに 6 時間40 分かかり、研磨シートを細目に変更し鏡面になるまで仕上げの研磨を行った。研磨終了までに合計 13 時間かかった。その後、縦測定後の内面検査により、ピットがなくなっていることが再確認できた。

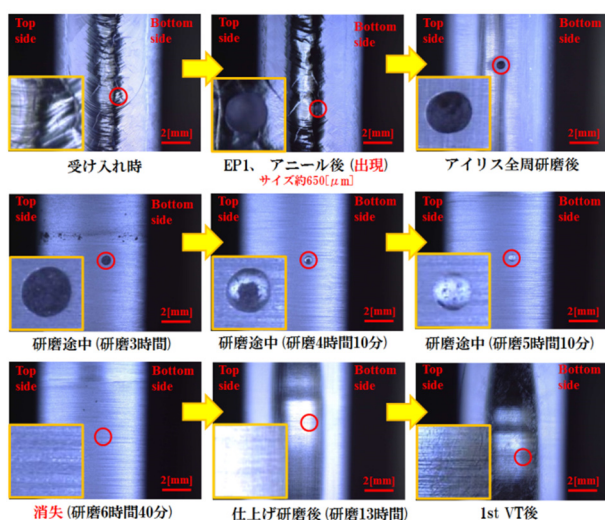


Figure 11: Polishing of deep pit at iris in the MHI#27 cavity.

4.4 発熱箇所周辺の研磨について

CM2b 用の超伝導空洞 4 台の内、再測定を行ったのは MHI#27 だけである。縦測定前の内面検査では、赤道のビード近傍に空洞性能を制限するような欠陥は見発できなかった。そのため、縦測定時の発熱と X 線のマッピングデータからクエンチやフィールドエミッション等の空洞性能を制限する問題の箇所について、縦測定後の内面検査で重点的に調べた。縦測定時に 4 セルと 5 セルで発熱が確認できたため、内面検査で発熱箇所周辺に欠陥があると思われたが、発熱原因を特定することが出来なかった。そこで、カメラの位置を変更し、空洞内の光の当たり具合を変更する事で、再度、発熱箇所周辺を調べたところ、小さなくぼみを複数発見することが出来た。発熱箇所周辺にだけ小さなくぼみを発見できたため、局所研磨機を使用して、くぼみの除去を行った。このくぼみは、仕上げ用に使用する細目の研磨シートを使用して短時間で除去ができたため、極めて小さいくぼみであった。Figure 12 は、発見した小さなくぼみの内面検査の通常写真とカメラ位置変更後の写真、

研磨後の写真の例である。研磨後に小さなくぼみを除去出来ていることが確認できる。また、研磨後の写真には、研磨シートの砥粒や削りかすの汚れが残っている。2 回目の縦測定では、発熱箇所が移動し、加速電場も上昇したことから、局所研磨の効果があり、発熱の原因を除去できたと考えられる。

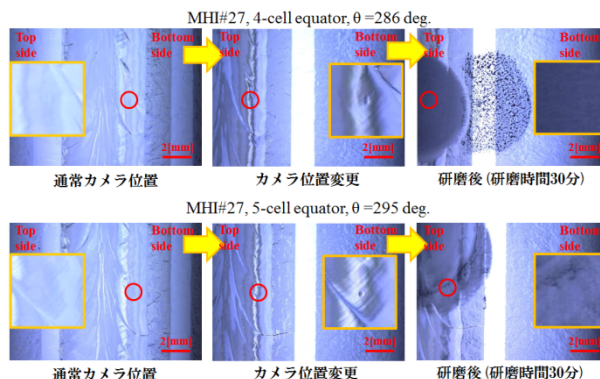


Figure 12: Polishing of equator in the MHI#27 cavity.

5. まとめ

CM2b 用の超伝導空洞は、アイリスの溶接時のビーム方向が外側から内側に変更された。内面検査の結果により、ビード表面がよりフラットになり、一直線のきれいなビード端であった。ビードの厚み測定時についた傷痕のため、縦測定前に全空洞のアイリスの全周研磨を行った。MHI#27 の 1-2 アイリス 333 度に大きなピットが出現したが、他には大きな欠陥は見つからず、4 台同時に溶接したため、4 台とも同様な溶接ビードであり、品質の良い空洞であったと思われる。

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] T.Yanagimachi et al., "Vertical Test Result of 9-cell SC Cavity for STF2-CM2b 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] T. Yanagisawa et al., "Status of the superconducting cavity development for ILC" Proceedings of SRF2013, Paris.
- [6] Hiroshi Hara et al., "Superconducting Cavity R&D for ILC at MHI" Proceedings of 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Aug. 9-11, 2014.