

KEKにおける9セル超伝導空洞 IHEP-04 の内面検査

INSPECTION OF INNER SURFACE IN IHEP-04 9-CELL CAVITY AT KEK

浅野峰行^{#, A)}, 今田信一^{A)}, 柳町太亮^{A)}, 山田浩気^{A)},
梅森健成^{B)}, 加古永治^{B)}, Zhai Jiyuan^{C)}

Mineyuki Asano^{#, A)}, Shin-ichi Imada^{A)}, Taisuke Yanagimachi^{A)}, Hiroki Yamada^{A)},
Kensei Umemori^{B)}, Eiji Kako^{B)} and Zhai Jiyuan^{C)}

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

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK), ^{C)} IHEP-Beijing

Abstract

TESLA-type 9-cell superconducting cavity (IHEP-04) was fabricated by IHEP (Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences). The vertical test of the IHEP-04 cavity was carried out at KEK. Electropolishing (EP), annealing, pre-tuning and inspection of inner surfaces were carried out, prior to the vertical tests. The results of inspection of inner surface, which is largely related to the high-gradient performance in the IHEP-04 cavity, are described in this paper.

1. はじめに

IHEP において、TESLA 型の 9 セル超伝導空洞 (IHEP-04)が製造された。IHEP-04 空洞は、性能評価試験としてのたて測定を実施するために KEK に送られた。KEK では、たて測定を実施する前に、空洞の内面検査や表面処理などの測定前準備作業を一通り実施した。本論文では、主に、内面検査の結果について報告する。

2. KEK での作業スケジュール

IHEP-04 空洞の内面検査、表面処理、たて測定は、空洞が KEK に到着した後の 2016 年の 10 月下旬から 12 月下旬までの約 2 か月間の作業スケジュールで行われた。その主な作業スケジュールを Figure 1 に示す。内面検査は、Figure 1 に赤字で記載され、空洞の内面状況が変化するたびに実施された。内面検査を実施したタイミングとしては、空洞が KEK に到着し、表面処理を何も実施していない受入時の検査、EP1 とアニール終了後の検査、EP2 とたて測定終了後の検査の合計 3 回である。EP1 とアニールの間に内面検査を行わなかった理由は、空洞内を清浄な状態に保つために、アニール前に内面検査を実施して、空洞内部へごみが混入する事を避けるためである。また、アニール後の内面検査で発見した空洞内表面の欠陥に対して局所研磨を実施した。

| 作業期間 | 作業内容 |
|-------------------------|--|
| 2016.10.25 ~ 2016.10.26 | 内面検査、周波数測定 |
| 2016.10.31 ~ 2016.11.4 | Pre-EP (5 μ m) + EP1 (100 μ m) + HPR (1hour) |
| 2016.11.07 ~ 2016.11.10 | アニール (750 $^{\circ}$ C 3hour) |
| 2016.11.10 ~ 2016.11.11 | 内面検査 |
| 2016.11.15 ~ 2016.11.18 | 局所研磨 |
| 2016.11.21 ~ 2016.11.22 | プリチューニング |
| 2016.11.28 ~ 2016.12.02 | EP2 (20 μ m) + HPR (5hour) + 組立 + ベーキング (120 $^{\circ}$ C, 48hour) |
| 2016.12.12 ~ 2016.12.16 | たて測定 |
| 2016.12.20 ~ 2016.12.21 | 内面検査 |

Figure 1: Schedule of surface preparation at KEK.

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

3. 内面検査

3.1 内面検査による溶接ビードの比較

内面検査は、京都カメラ(筒状のカメラ)を TOP 側のビームパイプから空洞内に挿入し、インプットカップラーポートを基準の 0 $^{\circ}$ として、検査台に取り付けたローラーによって空洞を回転させ、空洞内表面の欠陥の有無や溶接ビードの状態を検査する事である[1]。

Figure 2 と Figure 3 は、最初の表面処理である EP1 を実施し、内表面が鏡面状態になった時の赤道部とアイリス部の溶接ビードの内面検査の写真例である。IHEP-04 の内面検査結果と比較するために、以前に KEK でたて測定を実施した MHI-27 と IHEP-03 の内面検査結果を用いた[2,3]。ただし、MHI-27 と IHEP-03 は、TESLA-like 型の 9 セル超伝導空洞である。

Figure 2 は、各空洞における EP1 後の赤道の溶接ビード比較である。MHI-27 は、ビードの幅が一周にわたって一定であり、一直線に溶接されている。IHEP-03 は、KEK に空洞を送る前に IHEP において実施した内面検査により、大きな欠陥が発見され、80 μ m のパレル研磨を実施したため、溶接ビードの大部分が判別困難であった。そのため、溶接ビードの幅や直線性については、不明であった。IHEP-04 は、MHI-27 と比較すると、溶接ビードの幅が一周する間に細くなったり、太くなったりと一定ではなく、溶接ビードの直線性に対しても、曲がっている箇所がある。

Figure 3 は、各空洞における EP1 後のアイリスの溶接ビード比較である。MHI-27 は、アイリスの溶接ビード幅が他の空洞と比較して一番広く写っている。これは、内面検査用カメラのフォーカス性能のためである。赤道部に比べてアイリス部は焦点距離が短いため、溶接ビードの高低差が大きいと焦点が合わず、ピントがずれて写る範囲が狭くなってしまふ。そのため、MHI-27 の溶接ビードは、同じの高さでの幅が広いと言える。IHEP-03 は、溶接ビードの凹凸具合で見られる影模様が一直線になっており、パレル研磨によって溶接ビードの表面が滑らかになっている事が分かる。また、ビードの幅が細く写って

いることから、溶接ビードは高く盛り上がっていると思われる。IHEP-04 の溶接ビードは、IHEP-03 と同様に細く写っているために、溶接ビードが高く盛り上がり、写っている影模様が直線的でなく、ゆらめいて見えることから、溶接ビードの高さは一定ではないと思われる。

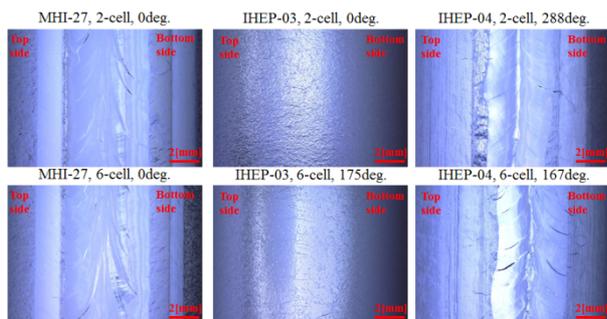


Figure 2: Comparison of bead characteristics on equator between three cavities; MHI-27, IHEP-03 and IHEP-04.

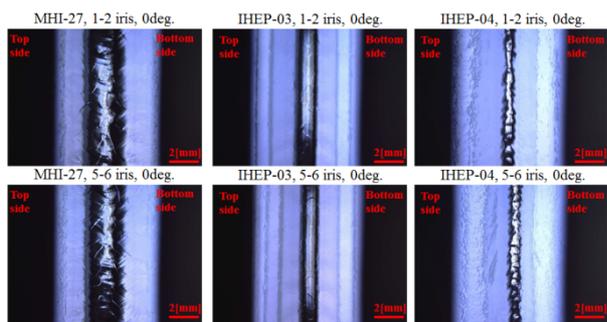


Figure 3: Comparison of bead characteristics on iris between three cavities; MHI-27, IHEP-03 and IHEP-04.

3.2 内面検査で発見した欠陥の例

空洞受入時の内面検査では、たて測定でクエンチを引き起こす可能性がある欠陥を発見できなかった。しかし、EP1 で空洞内表面を 100 μ m 研磨すると、空洞内部から複数の欠陥が発見された。欠陥の状態によって、3 種類に分類した例を Figure 4 から Figure 6 に示す。

Figure 4 は、EP1 後に溶接ビード上に出現した深い欠陥の例を示している。このタイプの欠陥は、たて測定においてクエンチを引き起こす可能性が非常に高い。また、EP2 後には、欠陥のサイズが大きくなっていることから、空洞内部では、さらに大きいピット状になっている可能性がある。

Figure 5 は、EP1 後に溶接ビード脇の機械加工した場所にたてに並んでいるように出現した複数の小さな欠陥の例である。この欠陥の集団は、IHEP-03 も同様に、バレル研磨後の受入時内面検査では見られなかったが、EP1 後に空洞内部より出現した。

Figure 6 は、溶接ビード脇の機械加工した部分に欠陥同士が同じ一定間隔で存在し、規則性のある欠陥の例である。受入時の内面検査ですでに見られていることから、溶接前、または、溶接中にできたものと思われる。EP をするごとに穴の影になっている黒い部分が小さくなっていることから、穴自体は、浅い穴であったと思われる。

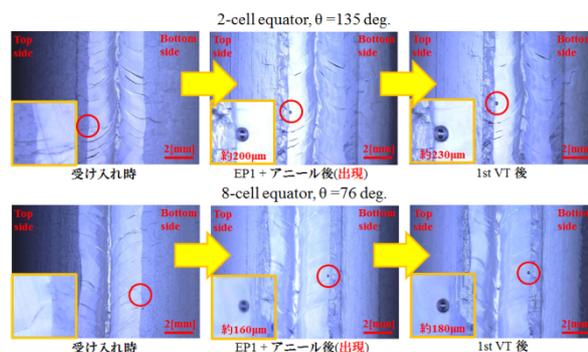


Figure 4: Examples of a deep pit appeared after EP treatment.

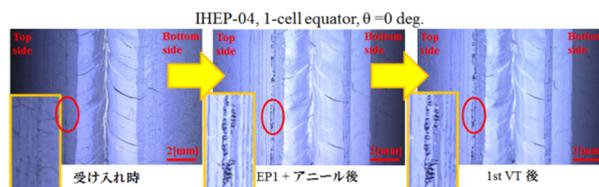


Figure 5: Examples of many small pits appeared after EP treatment.

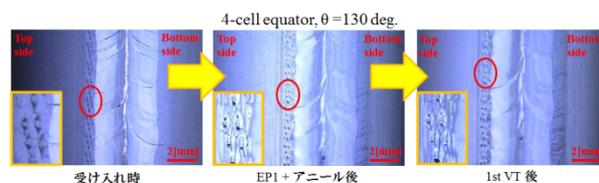


Figure 6: Examples of many small pits appeared before EP treatment.

3.3 局所研磨の例

空洞の内表面に発見された欠陥を除去する方法として、局所研磨機を使用して取り除く方法がある[4]。局所研磨機は、欠陥の状態によって研磨機先端の回転するヘッド部分に取り付けた研磨シートの粗さを変更し、欠陥部分を直接研磨して欠陥を除去できる。欠陥除去後には、研磨によって荒れた内表面を目の細かい研磨シートを使用して滑らかになるように研磨する。

Figure 7 は、今回実施した局所研磨の例として、8セル 252 度と 9セル 148 度の研磨前、研磨後、たて測定後の 3 段階を示している。8セル 252 度の溶接ビード両端の欠陥は、200 分の局所研磨によって、2箇所ある欠陥のうち、上流側の欠陥は除去できたが、下流側の欠陥は、完全に除去する事が出来なかった。たて測定後の内面検査では、下流側の欠陥のサイズがより大きくなっていることから、欠陥の表面部分を軽く研磨しただけで、欠陥自体は、内部でさらに大きく広がっていると思われる。欠陥を完全に取り除けなかった理由としては、クエンチの原因になりそうな溶接ビードに現れた欠陥の数とスケジュールによる時間的制約によるところが大きい。9セル 148 度の溶接ビード脇に横に広がっている欠陥は、短時間で除去することが出来た。

Figure 8 は、EP1 後の内面検査より、溶接ビード近傍

に確認されたクエンチを引き起こす可能性が高い欠陥の位置と局所研磨を実施した箇所を示している。欠陥を完全に除去する事が出来た箇所は、Figure 7 で示した 8 セル 252 度にある 1 箇所の欠陥と 9 セルの 148 度の欠陥のみであった。それ以外の研磨を実施した欠陥は、完全に除去せずに欠陥の内表面部分にあるエッジ部分を軽く研磨した程度に留めている。また、1 セル 175 度の欠陥は、サイズが大きかったために研磨を行おうとしたが、欠陥位置が溶接ビードの端から上流側に約 9mm 離れていたために、局所研磨機本体が空洞のセル湾曲部分に接触して空洞内表面を傷つけてしまう恐れがあるために、人の手によって研磨を行った。この場所も、他の欠陥同様に表面を軽く研磨した程度に留めている。

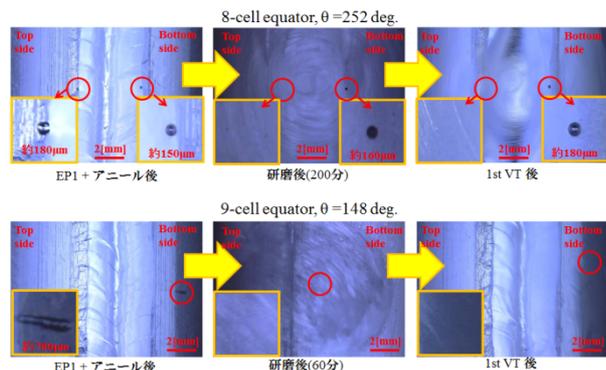


Figure 7: Mechanical polishing of pits at equator (8th-cell 252 degree and 9th-cell 148 degree).

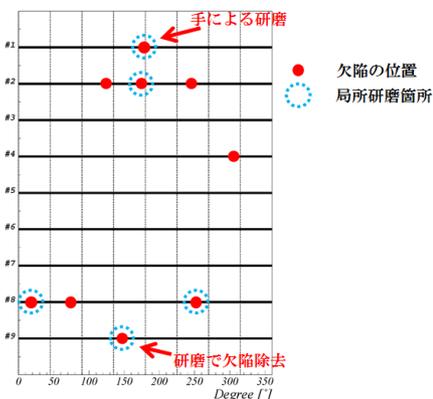


Figure 8: Position of the pits and the polishing points in IHEP-04 cavity.

3.4 たて測定時の発熱箇所

Figure 9 は、たて測定の際の各パスバンドモードにおいてクエンチした時の発熱箇所を色の分布で温度上昇度合いを示し[5]、たて測定後の内面検査の結果からクエンチの原因と思われる欠陥の写真を合わせて示している。人の手で軽く研磨した 1 セル 175 度は、 $7\pi/9$ モードでクエンチしたが、局所研磨機を使用して、欠陥の表面部分を軽く研磨した箇所では、クエンチせずに、局所研磨を実施していない別の欠陥でクエンチしている。ただし、研磨を行った欠陥は、完全に取り除いたわけではないため、今回のたて測定で発熱した箇所の欠陥を完全に除去し

た場合、完全に除去せずに欠陥表面を軽く研磨しただけの欠陥でクエンチする可能性がある。

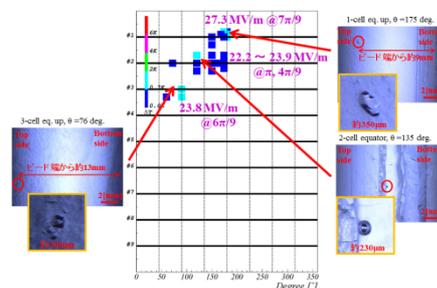


Figure 9: Heating locations detected by T-mapping system and photos of the inner surface.

4. まとめ

IHEP-04 空洞は、KEK で表面処理とたて測定を実施した。EP1 後の内面検査により、赤道のビード周辺に複数の欠陥が確認された。たて測定の前に、4 箇所のクエンチを引き起こす可能性が高い欠陥は、局所研磨機を使用して研磨を行った。時間的制約により、全ての欠陥を処理できず、また、個別の欠陥に対しても完全に除去するまで処理が出来なかったが、局所研磨機を使用した研磨箇所は、クエンチが発生していない事を確認した。

参考文献

- [1] 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)
- [2] M. Asano *et al.*, “Inspection of inner surface in 9-cell SC cavities for STF2-CM2b Cryomodule” Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Aug. 5-7, (2015)
- [3] M. Asano *et al.*, “Cavity performance tests of IHEP-03 9-cell cavity” Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Aug. 8-10, (2016)
- [4] K. Watanabe *et al.*, “Repair techniques of superconducting cavity for improvement cavity performance at KEK-STF” Proceedings of the IPAC’10, Kyoto, (2010)
- [5] T. Yanagimachi *et al.*, “Cavity performance of IHEP-04 9-cell cavity at KEK” 本学会