

IHEP-03 空洞の空洞性能測定

CAVITY PERFORMANCE TESTS OF IHEP-03 9-CELL CAVITY

浅野峰行^{#, A)}, 今田信一^{A)}, 柳町太亮^{A)}, 山田浩気^{A)}, 岡田昭和^{B)},
 戸寿郎^{C)}, 梅森健成^{C)}, 加古永治^{C)}, Zhao Tongxian^{D)}
 Mineyuki Asano^{#, A)}, Shin-ichi Imada^{A)}, Taisuke Yanagimachi^{A)}, Hiroki Yamada^{A)},
 Terukazu Okada^{B)}, Toshio Shishido^{C)}, Kensei Umemori^{C)}, Eiji Kako^{C)} and Zhao Tongxian^{D)}
 ^{A)} Nippon Advanced Technology (NAT), ^{B)} K-vac,
 ^{C)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK), ^{D)} IHEP-Beijing

Abstract

TESLA-like 9-cell superconducting cavity (IHEP -03) was fabricated in IHEP (Institute of High Energy Physics, Chinese academy of sciences). The vertical test of the IHEP-03 cavity was carried out at KEK. Barrel polishing of the IHEP-03 cavity was carried out before arrival at KEK, because a large number of defects were found. Electropolishing (EP), annealing, pre-tuning and inspection of inner surfaces were carried out, prior to the vertical tests. The results of vertical tests and the inspection of inner surface in the IHEP-03 cavity are described in this paper.

1. はじめに

IHEP は、1.3GHz 超伝導加速空洞の製造技術向上のために、Ningxia 製の Fine Grain のニオブ材を使用して、TESLA-like 型 9 セル空洞(IHEP-03)を製造した^[1]。空洞製造後に IHEP で空洞の内面検査を行ったところ、空洞内面に欠陥が発見された。そのため、80 μ m のバレル研磨を実施し、HPR を行い、空洞内を洗浄した。その後、KEK に空洞を送り、空洞の内面検査と表面処理、性能評価試験であるため測定を KEK で実施した。本論文では、主に、内面検査と測定の結果について報告する。

2. KEK での作業スケジュール

IHEP-03 空洞の内面検査、表面処理、ため測定は、空洞が KEK 到着後の 2016 年の 2 月下旬から 4 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。その主な作業工程を Fig.1 に示す。内面検査は、空洞内面の状況が変化するたびに実施された。今回は、全部で 3 回行われ、空洞が KEK に到着した直後の受入時、EP1 とアニール終了後、EP2 後のため測定を実施した後である。EP1 とアニールの間に内面検査を行わなかった理由は、アニール前に内面検査を行って、空洞内へのごみの混入を避けるためである。

作業期間	作業内容
2016.2.23 ~ 2016.2.24	内面検査 (KEK 受入時)
2016.2.26 ~ 2016.3.4	局所研磨
2016.3.8 ~ 2016.3.9	Pre-EP (5 μ m) + EP1 (100 μ m) + HPR (1hour)
2016.3.10 ~ 2016.3.14	アニール (750°C 3hour)
2016.3.15 ~ 2016.3.16	内面検査 (EP1, アニール後)
2016.3.17 ~ 2016.3.23	ブリチューニング
2016.4.4 ~ 2016.4.8	EP2 (20 μ m) + HPR (5hour) + 組立 + ペーキング (140°C, 48hour)
2016.4.11 ~ 2016.4.15	ため測定
2016.4.19 ~ 2016.4.20	内面検査 (EP2, 1st VT 後)

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

空洞の内面検査は、京都カメラ(筒状のカメラ)を空洞内に挿入し、インプットカップラーポートを基準の 0 度として、空洞を回転させ、空洞内の欠陥の有無や溶接ビードの状態を検査する事である^[2]。

Fig.2 と Fig.3 は、各表面処理後に行った内面検査の赤道部とアイリス部の溶接ビードの写真である。IHEP-03 の内面検査の写真と比較するために、以前に KEK で測定を行った MHI-27 の内面検査の写真を使用した。

Fig.2 は IHEP-03 と MHI-27 の 1 セル 0 度の赤道の溶接ビードである。MHI-27 は、受入時から溶接ビードを鮮明に見る事が出来る。IHEP-03 は、バレル研磨を行っているため、受入時の時点で溶接ビードの判別が不可能であった。そのため、空洞の外側に見られる溶接箇所を参考にして、空洞内面の溶接ビードの位置を推定した。IHEP-03 の EP1 後は、空洞内面が鏡面状態になり、うっすらと溶接ビードが判別できるようになった。

Fig.3 は、IHEP-03 と MHI-27 の 1-2 アイリス 0 度の溶接ビードである。MHI-27 は、アイリスにキズがついていることが判明し、EP1 後にアイリスの全周研磨を行い、キズの除去を行った^[3]。そのため、EP1 後に見られている溶接ビードの影になっている波模様が、EP2 後には、見られなくなり、一様な影模様になっている。IHEP-03 はバレル研磨を行っているために、受入時の時点では、溶接ビードが若干判別できるような状態であった。EP1 後の溶接ビードは、MHI-27 のアイリス研磨後のように影模様が一樣になっている。このことから、アイリス部分の溶接ビードの研磨が行われたことが写真からも判断できる。

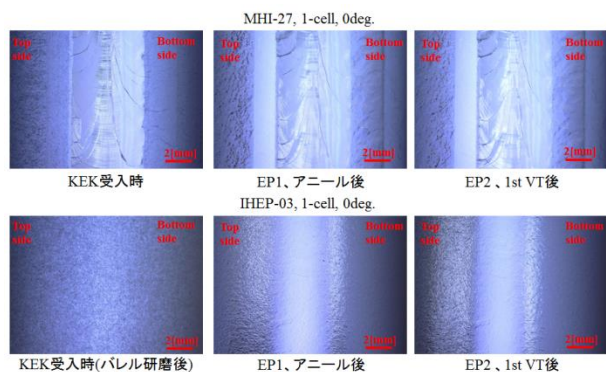


Figure 2: Bead characteristics on equator in two cavities between MHI-27 and IHEP-03.

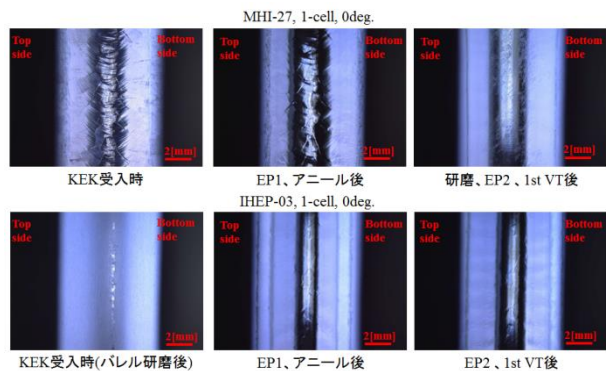


Figure 3: Bead characteristics on iris in two cavities between MHI-27 and IHEP-03.

3.2 局所研磨

局所研磨は、空洞内に欠陥が確認されたときに、研磨機先端にあるモーターヘッドに研磨シートを取り付け、空洞内の一部分だけを研磨し、欠陥を除去する作業である^[4]。

パレル研磨の後に IHEP で行われた内面検査の結果、9セルの 315 度付近に欠陥が残っていることが判明した。IHEP の内面検査と KEK の内面検査の欠陥箇所の写真の比較を Fig.4 に示す。9セル 315 度の欠陥は、KEK の内面検査の写真のスケールから約 4.6mm の亀裂のような形状をしている。9セル 320 度付近にも数か所の穴のような欠陥が見つかった。これらの欠陥は、たて測定の際にクエンチの原因になり、空洞性能を制限する要因になる。そのため、EP1 の前に局所研磨を行い、除去する事にした。9セル 315 度の局所研磨における欠陥の変化を Fig.5 に示す。研磨過程より、305 分後の研磨写真は、欠陥の横幅、縦幅共に大きくなっていることから空洞内に空間が広がっていることが推測できる。そのため、欠陥の深さも大きく、欠陥が完全に消失するまでに、1225 分の時間を必要とした。欠陥除去のために目の粗い研磨シートを使用しているために、研磨箇所の表面が荒れた状態となった。そのため、表面をきれいに仕上げるために、目の細かい研磨シートを使用して研磨を行った。その後、EP1 を行い、表面を綺麗な鏡面状態にしても欠陥が残っていないことを確認した。

Fig.6 は、9セル 320 度の局所研磨における欠陥の変化である。複数の穴の欠陥は、研磨していくとニオブ内部で繋がっており、315 度と同じような亀裂のような形状になった。320 度の研磨は、次の作業である EP 処理の予定が決まっていたため、170 分研磨した時点で、時間的制約により欠陥が残った状態で研磨を中断した。320 度の仕上げ研磨後に残った欠陥は、EP1 後にサイズが大きくなっている。このことから、空洞内部では、さらに空間が広がっており、局所研磨で完全に除去するには、315 度の欠陥と同様に、多くの時間が必要になると思われる。

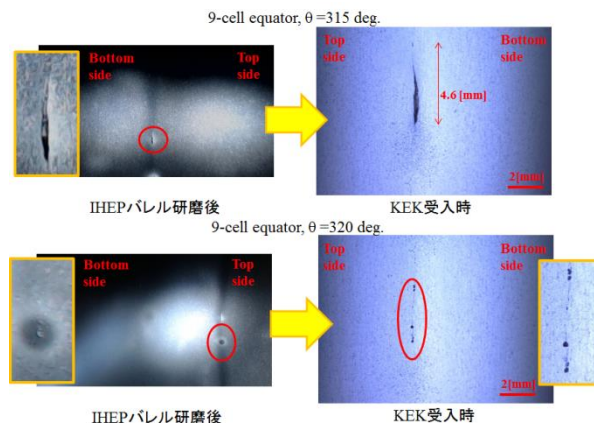


Figure 4: Comparison of defects found by inspection with IHEP-camera and Kyoto-camera.

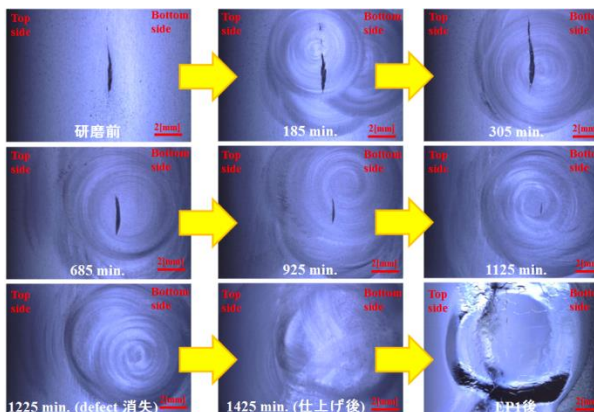


Figure 5: Polishing of pits at equator (9th -cell 315 degree of IHEP-03 cavity).

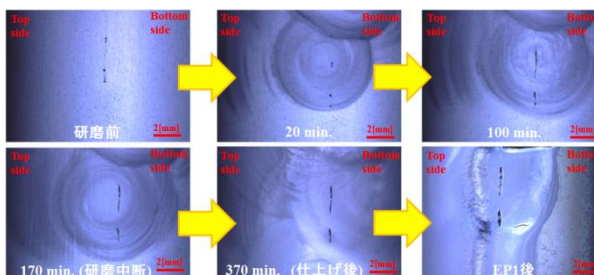


Figure 6: Polishing of pits at equator (9th -cell 320 degree of IHEP-03 cavity).

3.3 EP 後の欠陥について

IHEP-03 空洞が KEK 到着後に行った内面検査では、発見した欠陥が全部で数か所であったが、EP1 後の内面検査では、約 1800 個の欠陥を発見した。EP2 後には、欠陥の数が約 2200 個に増加した。そのため、全ての欠陥を局所研磨で除去する事は難しいために、9 セル 320 度の中断した研磨箇所を含めて局所研磨を行わないことにした。EP 後に発見した欠陥の分布を Fig.7 にまとめた。ほとんどの欠陥は、サイズが $100\mu\text{m}$ 以下の欠陥であった。欠陥の分布としては、ほとんどのセルにおいて溶接ビードの上流側に偏っていた。8 セルは欠陥の数が少なかったが、9 セルは逆に溶接ビードの下流側に分布が偏っている。これは、全赤道の溶接ビードの模様の向きを比較すると 9 セルの溶接ビードの模様の向きだけが逆であり、空洞を逆向きに溶接したと思われる。

EP で出現した小さな欠陥の例として、5 セル 216 度の処理毎の欠陥の変化を Fig.8 に示す。空洞受入時の時点では、欠陥を発見する事が出来なかったが、EP1 後に多くの欠陥が、一列になって出現した。他の赤道でも同様に欠陥が一列に出現した。EP2 後には、サイズが大きくなった欠陥や、新規で空洞内に埋まっていた欠陥が出現している。この一列に並んでいる欠陥は、局所研磨を行った 9 セル 320 度の欠陥と同様に空洞内部で繋がっている可能性があると思われる。

Fig.9 は、1 セル 130 度で見つかったサイズの大きい欠陥の例である。他にも、同様のサイズの欠陥は、1 セル 288 度に見られ、全部で 2 箇所発見した。受入時の時点で、前兆として影のような黒い点に見え、EP 処理をすることで、明らかな欠陥となった。

赤道	EP1(5+100[μm])後			EP2(20[μm]) + 1st VT後		
	ビード上流[個]	ビード下流[個]	合計[個]	ビード上流[個]	ビード下流[個]	合計[個]
1-cell	233 (82%)	50 (18%)	283	238 (76%)	74 (24%)	312
2-cell	74 (86%)	12 (14%)	86	88 (83%)	18 (17%)	106
3-cell	103 (73%)	38 (27%)	141	153 (77%)	47 (23%)	200
4-cell	197 (98%)	5 (2%)	202	238 (97%)	7 (3%)	245
5-cell	237 (96%)	10 (4%)	247	330 (95%)	17 (5%)	347
6-cell	333 (99%)	1 (1%)	334	412 (99%)	2 (1%)	414
7-cell	180 (94%)	11 (6%)	191	210 (95%)	12 (5%)	222
8-cell	12 (50%)	12 (50%)	24	12 (46%)	14 (54%)	26
9-cell	87 (29%)	216 (71%)	303	93 (27%)	257 (73%)	350
total	1456 (80%)	355 (20%)	1811	1774 (80%)	448 (20%)	2222

Figure 7: Number of defects in each cell appeared after EP treatment.

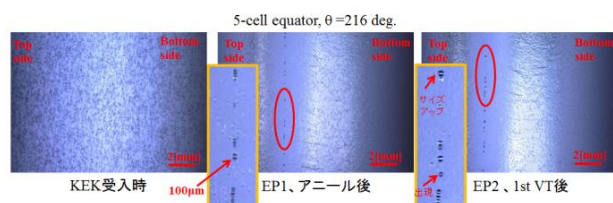


Figure 8: Examples of many small pits appeared after EP treatment.

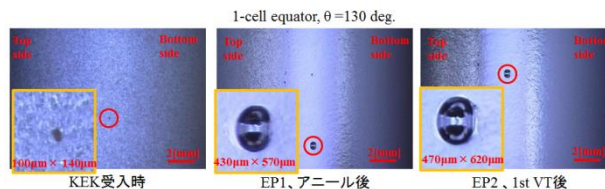


Figure 9: Examples of a deep pit appeared after EP treatment.

4. プリチューニング

プリチューニングは、超伝導空洞の共振周波数を加速器の運転周波数に合わせ、ビームを効率よく加速するために各セルの電場強度を一樣にする作業である^[5]。作業内容としては、フィールドフラットネスおよび共振周波数を変化させるために、セルの両側のアイリス部分にパッドをセットし、アイリス部を伸ばしたり、縮めたりすることで、セルを永久変形させる。セルの変形は伸ばして終わりにする。これは、空洞を冷却し、周波数が変化したときに、各セルに力が均等に加わり変形量を同じようにするためである。また、加速器運転時の周波数調整チューナーは、空洞を伸ばす方向に動くために、セルを縮めて終わりにしていると各セルに均等に力が加わらず、電場強度を一樣に保てなくなり、フィールドフラットネスが低くなってしまふ。

今回は、たて測定のみを行い、ビームを使用した加速器運転を考慮していないために、共振周波数を考慮せずにプリチューニングを行った。プリチューニング前後のフィールドフラットネスの変化を Fig.10 に示す。プリチューニング前の 64.9%のフィールドフラットネスが、プリチューニング後に、各セルの電場強度が一樣になり、93.0%となった。

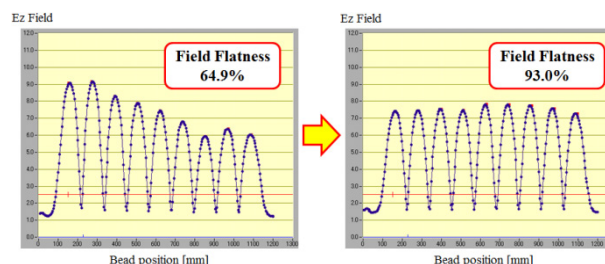


Figure 10: Changes of field flatness by pre-tuning.

5. たて測定

空洞性能測定として行うたて測定は、縦型クライオスタットに空洞を入れ、クライオスタット内を 4.2K 液体ヘリウムで満たし、減圧する事で超流動ヘリウム状態に変化させ、2K 以下の温度で測定を行う。たて測定の結果を Fig.11 に示す。 π モードの測定は、最初と最後に 2 回行った。1 セル 120 度付近で発熱し、16.9 MV/m でクエンチすることを確認した。この発熱箇所は、内面検査で判明していた大きな欠陥があるため、この欠陥がクエンチの原因であると思われる。2 回目の π モードの測定は、1 回目

より温度が低いために、 Q_0 値が 1 回目の測定より高くなった。また、途中のプロセス時に微量の X 線が検出されたが、最終的に、X 線は検出されなかった。これは、加速電界が、低い所でクエンチしたために X 線が発生しなかったと思われる。

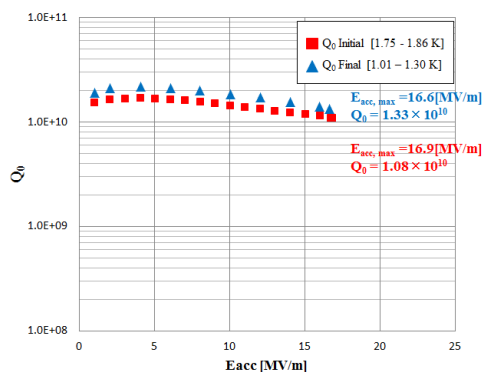


Figure 11: Q_0 vs. Eacc plots in the 1st vertical test.

パスバンド測定の結果を Fig.12 に示す。各セルともに最大で 18 MV/m から 24 MV/m の性能を示している。全てのパスバンド測定で、クエンチが原因で性能を制限されており、X 線は検出されなかった。

各パスバンド測定のカエンチ時の発熱分布図と内面検査の結果から、発熱の原因と思われる箇所を Fig.13 に示す。 π モードのカエンチ原因は、1 セル 130 度の大きな欠陥で間違いないと思われるが、他のモードでのクエンチ原因は、発熱箇所に小さな欠陥が複数あるために、発熱原因を一つに特定する事が難しい。

unit : [MV/m]

cell	π	8 π /9	7 π /9	6 π /9	5 π /9	4 π /9	3 π /9	2 π /9	E _{acc,max}
1 & 9	16.9	—	—	—	18.9	13.0	12.3	8.1	18.9
2 & 8	16.9	—	—	—	12.9	17.0	24.6	19.4	24.6
3 & 7	16.9	—	—	—	22.3	7.4	12.3	22.3	22.3
4 & 6	16.9	—	—	—	3.8	18.9	12.3	14.9	18.9
5	16.9	—	—	—	24.0	0	24.6	0	24.6
終わり方	self-pulse	—	—	—	self-pulse	self-pulse	self-pulse	self-pulse	
Limiting cause	Cell #1 heating				Cell #1 heating	Cell #6 heating	Cell #2 heating	Cell #3 heating Cell #7 heating Cell #9 heating	

Figure 12: Achieved Eacc in pass-band measurement.

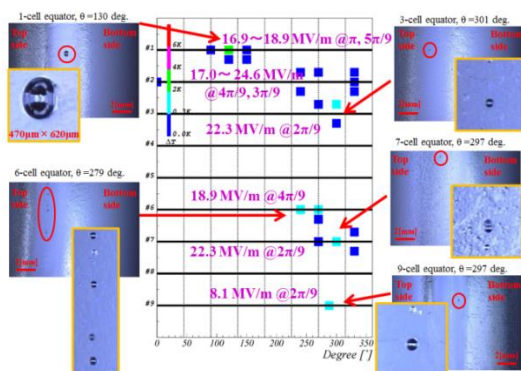


Figure 13: Heating locations detected by T-mapping system and photos of the inner surface.

6. まとめ

IHEP-03 空洞は、空洞製造後に欠陥が見つかったため、バレル研磨を行い、KEK で表面処理と測定を行った。その結果 16.9 MV/m でクエンチする事を確認した。EP1 前に局所研磨を行い、9 セル 315 度の欠陥を除去したが、9 セル 320 度の欠陥は時間的制約により除去しきれなかった。EP1 後の内面検査でたくさんの欠陥が確認され、EP2 後に、さらに欠陥の数が増加し、サイズも大きくなった。そのため、空洞内部には、さらに欠陥が埋まっている可能性がある。この IHEP-03 空洞は、測定後に IHEP へ返送された。今後は、IHEP でバレル研磨を再度実施し、各セルに現れた欠陥の除去を行う予定である。

参考文献

- [1] T.X.Zhao *et al.*, “Fabrication and testing status of IHEP03” Proceedings of IPAC2016, Busan, South-Korea (2016) WEPMB032.
- [2] 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).
- [3] 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).
- [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. Shishido *et al.*, “Frequency tuning of an accelerating mode in STF baseline SC cavities” Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sendai, Aug. 2-4, (2006).