

TESLA 型・STF 型 9 セル超伝導空洞の内面検査結果および性能測定 INNER SURFACE INSPECTIONS AND PERFORMANCES IN THE TESLA-TYPE AND STF-TYPE 9-CELL CAVITIES

石原将治^{#,A)}, 浅野峰行^{A)}, 今田信一^{A)}, 山田浩気^{A)}, 泰中俊介^{A)}, 菊池祐亮^{A)},
梅森健成^{B)}, 片山領^{B)}, 加古永治^{B)}

Shoji Ishihara^{#,A)}, Mineyuki Asano^{A)}, Shin-ichi Imada^{A)}, Hiroki Yamada^{A)}, Shunsuke Tainaka^{A)}, Yusuke Kikuchi^{A)},
Kensei Umemori^{B)}, Ryo Katayama^{B)}, and Eiji Kako^{B)}

^{A)} Nippon Advanced Technology

^{B)} KEK

Abstract

The inspection of inner surface in superconducting (SC) cavities and vertical tests have been carried out to confirm their cavity performances at a cryogenic temperature in the Superconducting RF Test Facility (STF) at High Energy Accelerator Research Organization (KEK). Six TESLA-type and a STF-type 9-cell SC cavities were fabricated in 2019. The results of vertical tests and the inspection of inner surface in seven 9-cell SC cavities are described in this paper.

1. はじめに

KEK の STF 棟では、超伝導加速空洞の内表面の検査や性能評価試験であるため測定を実施している。STF2 加速器に内蔵するための 9 セル空洞のたて測定が 2014 年に終了して以降は、高 Q 値・高加速電界達成のための R&D として、窒素ドープや窒素インフュージョン[1]の処理をした単セル空洞の測定を主に行っている。2019 年に 1 台の STF-type と 6 台の TESLA-type の合計 7 台の 9 セル空洞が製造された。STF-type の 9 セル空洞(MHI-31)は、STF2 加速器のクライオモジュールに内蔵されている性能が低い 9 セル空洞と入れ替える予定の空洞として製造された。TESLA-type の 9 セル空洞は、KEK の空洞製造技術の向上と中程度の RRR を使用して製造コスト削減を目的としたラージグレイン空洞(KEK-04, 05) 2 台、および、窒素インフュージョンによる高加速電界達成の R&D を目的とした 4 台の空洞(MT-03, 04, 05, 06)が製造された。今回の発表では、現時点で実施された 9 セル空洞の内面検査と測定の結果について報告する。

2. 内面検査

超伝導加速空洞の内表面の検査は、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をカメラで撮影して、欠陥や異常がないかを調べる[2]。Figure 1 は、空洞受入後に 100 μm の電界研磨を実施した 9 セル空洞の赤道の溶接ビードをシリーズ別に比較した。MHI-31 空洞と MT-03 空洞は、赤道溶接前に溶接開先部および周辺部の機械加工を実施している。機械加工の目的は、溶接時のシール面の板厚を均等にし、表面をきれいに処理する事で欠陥の発生を防ぐ事が期待できる。KEK-04 は、赤道溶接前にセルの湾曲部分を研磨して表面を滑らかに処理している。

Figure 2 は、アイリスの溶接ビードを比較した写真を示

す。アイリス部分に欠陥等は見つからなかったが、KEK-04 のアイリスは、赤道溶接前にアイリスを全周にわたって研磨を行っているために、アイリス部の溶接ビード表面の凹凸をなくしたフラットなアイリスが観測された。

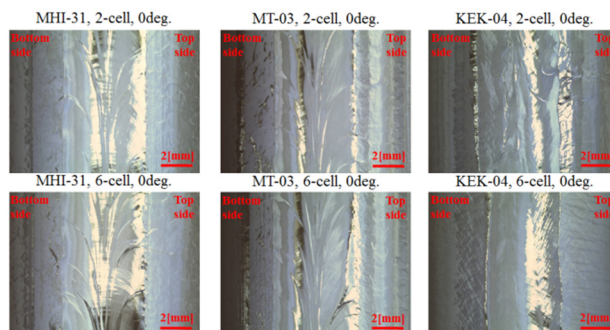


Figure 1: Comparison of bead characteristics on equator between three cavities; MHI-31, MT-03 and KEK-04.

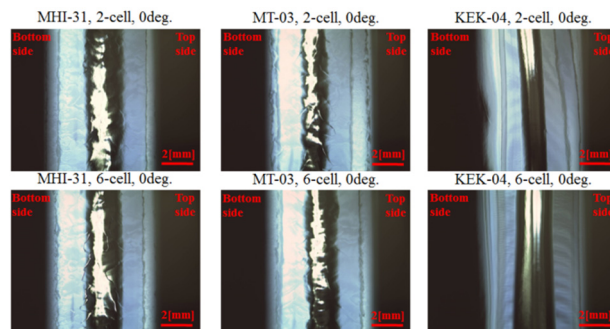


Figure 2: Comparison of bead characteristics on iris between three cavities; MHI-31, MT-03 and KEK-04.

MHI-31 空洞は、受け入れ後に 100 μm の電界研磨を実施し、その後の内面検査で、いくつかの欠陥を発見した。たて測定実施前に発見した欠陥の中から、4 箇所欠陥に対して局所研磨器[3]と手による研磨を実施した。

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

Figure 3 は、局所研磨を行った箇所経過別の様子を示す。粗い目の研磨シートで 60 分間研磨を実施し、欠陥を除去した後に、細かい目の研磨シートで 390 分磨くことで空洞内表面のざらつきをおさえ、表面を滑らかに仕上げています。Figure 3 の左下図の研磨直後の写真では、研磨時に十分に洗浄が出来なかったため、黒い部分に研磨シートの砥粒が残っている。電解研磨 20 μm を行った 1 回目のたて測定後の写真では、表面が滑らかになっており、欠陥も完全に除去出来ている。

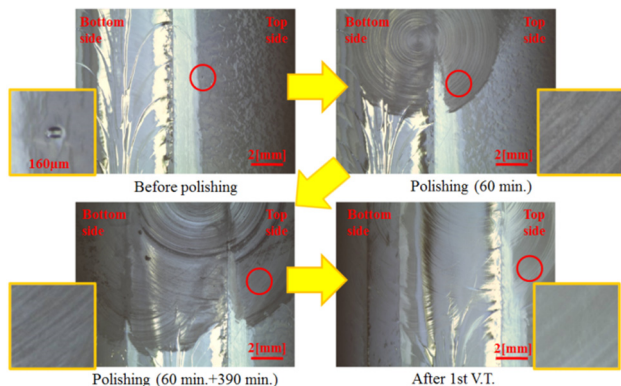


Figure 3: Mechanical polishing of pits at equator (7th-cell 139 degree) in MHI-31.

3. たて測定結果

実施した 9 セル空洞のたて測定結果を、Table 1 に示す。STF-type 空洞 (MHI-31) のたて測定が 3 回と TESLA-type 空洞 (KEK-04) のたて測定を 1 回実施した。

Table 1: Result of Vertical Tests at 2K

cavity	type	times	$E_{\text{acc,max}}$ [MV/m]	limiting cause
MHI-31	STF-type	1	21.3	Quench (F.E.)
MHI-31	STF-type	2	-	Input Cable broken
MHI-31	STF-type	3	30.3	Quench
KEK-04	TESLA-type	1	31.5	Quench

3.1 MHI-31 空洞のたて測定結果

MHI-31 空洞のたて測定の結果として、1 回目は、最大加速勾配が 21.3 MV/m となった。たて測定後の内面検査では、クエンチ箇所の欠陥を発見できず、フィールドエミッションによるクエンチによって空洞性能が制限された。1 回目のたて測定の後に、20 μm の電解研磨を行った。それによって、空洞内表面を除去する事で、フィールドエミッションの発生源を取り除き、2 回目のたて測定を実施したが、冷却作業中にインプットケーブルが損傷したために、正常な値での測定ができなかった。その後、インプットケーブルのみを新しいケーブルに変更して、3 回目のたて測定を実施した。Figure 4 に MHI-31 空洞の 3 回目のたて測定の Q_0 -Eacc 曲線を示す。初回測定時の最大加速勾配は 22.0 MV/m であり、放射線が

10 MV/m から発生した。その後、各パスバンド測定を実施しており、その際にフィールドエミッションがプロセスされた。最終測定時には、放射線のオンセットが 10 MV/m から 17 MV/m に向上し、最大加速勾配も 30.3 MV/m に増加している。

Figure 5 は、空洞外面に取り付けた温度センサによる各パスバンド測定におけるクエンチした時の発熱分布と最大加速勾配を示す。発熱箇所周辺を内面検査時に詳細に調べたが、発熱箇所を特定することができなかった。過去に実施してきた内面検査においても、クエンチ時の加速勾配が 30 MV/m を超えた場合、空洞性能を制限する欠陥が見つからないことが多かった。

各パスバンド測定の結果から、確認できたセル毎の到達加速電界を Table 2 に示す。全てのセルで 30 MV/m を超えている事を確認した。

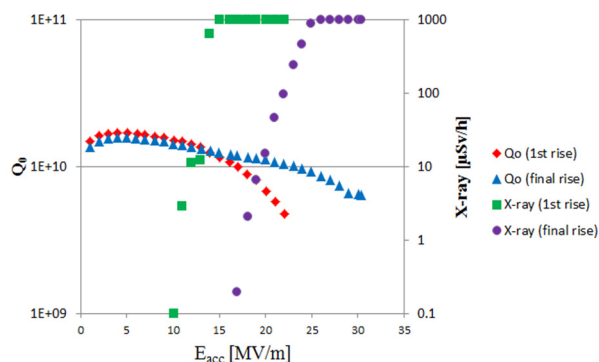


Figure 4: Q_0 -E Curve (MHI-31, 3rd V.T.).

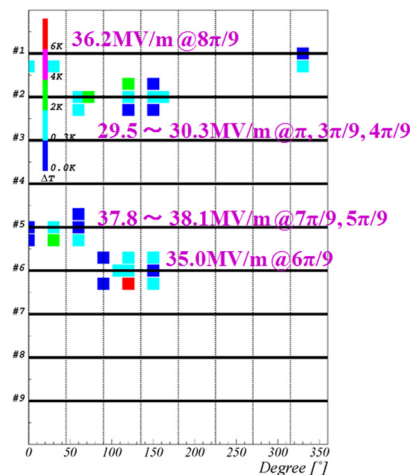


Figure 5: Heating locations detected by T-mapping system (MHI-31).

Table 2: Achieved Eacc of Each Cell in MHI-31

	1-cell & 9-cell	2-cell & 8-cell	3-cell & 7-cell	4-cell & 6-cell	5-cell
$E_{\text{acc,max}}$ [MV/m]	36.2	30.3	35.4	35.0	38.1

3.2 KEK-04 空洞のたて測定結果

KEK-04 空洞のたて測定における Q_0 -Eacc 曲線を、

Fig. 6 に示す。初回測定では、12 MV/m を過ぎた後に発生したクエンチによって、 Q_0 値が回復し、放射線の値も減少したことが分かる。最終的に最大加速勾配は 29.0 MV/m になった。その後、各パスバンド測定を実施した時に、さらにプロセスが進み、最終測定では、最大加速勾配が、31.5 MV/m まで増加した。ただし、この時クライオスタット内の He 液の残量が少なくなったことから、途中の取得データを制限し、クエンチによる最大加速勾配を確認する事を優先した。

Figure 7 は、KEK-04 空洞の各パスバンド測定のクエンチ時の発熱分布と最大加速勾配、内面検査で発見した空洞性能を制限したと思われる欠陥を示す。MHI-31 空洞では、空洞性能を制限した欠陥を特定できなかったが、KEK-04 空洞では、発熱箇所と思われる欠陥を見つけることができた。6 セルの 58 度に見つかった欠陥は、 π モードと $6\pi/9$ モードで発熱があった箇所であり、約 31 MV/m でクエンチしている。赤道部ビードから約 13 mm ずれた位置にあるが、その大きさが約 180 μm で形のはっきりした欠陥であるために、空洞性能を制限している欠陥であると考えられる。7 セルの 262 度に見つかった欠陥は、 $5\pi/9$ モードで発熱があった箇所であり、約 30 MV/m でクエンチしている。そのサイズが 6 セルの欠陥と比べて小さく、約 40 μm であるが、溶接ビードの直近に存在しているために、クエンチの原因になったと思われる。他のパスバンド測定での発熱箇所は、加速勾配が約 40 MV/m と高く、特定する事が出来なかった。これらの空洞性能を制限する欠陥を研磨して取り除ければ、さらなる空洞性能の向上に繋がっていくと思われる。

各パスバンド測定の結果から、確認できたセル毎の到達加速電界を Table 3 に示す。到達加速電界は、欠陥のために 31.5 MV/m のセルがあるが、欠陥の影響がないセルでは、40 MV/m を超えている事が確認できた。

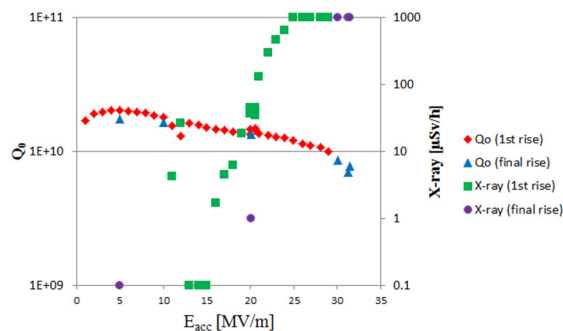


Figure 6: Q_0 -Eacc Curve (KEK-04, 1st V.T.).

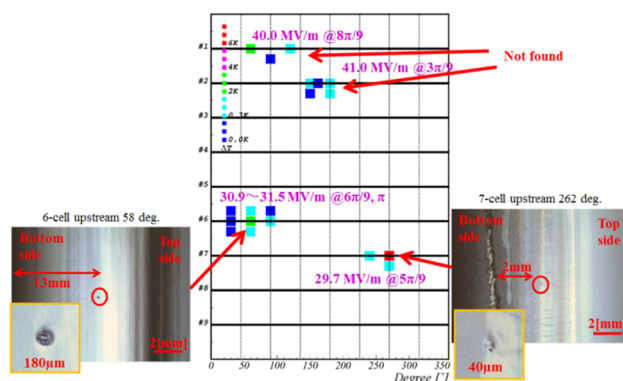


Figure 7: Heating locations detected by T-mapping system and photos of the inner surface (KEK-04).

Table 3: Achieved Eacc of Each Cell in KEK-04

	1-cell & 9-cell	2-cell & 8-cell	3-cell & 7-cell	4-cell & 6-cell	5-cell
Eacc,max [MV/m]	40.0	41.0	31.5	31.5	41.0

4. まとめ

新しく製造した STF-type と TESLA-type の 9 セル空洞の内面検査とたて測定を実施した。たて測定は、STF-type の MHI-31 空洞が 3 回と TESLA-type の KEK-04 空洞を 1 回実施した。たて測定時に、空洞外面に取り付けた温度センサによる発熱分布と内面検査により、KEK-04 空洞の空洞性能を制限する欠陥を特定することができた。たて測定を実施していない残りの 9 セル空洞は、秋以降にたて測定を実施する予定である。

参考文献

- [1] T. Kubo, "Physics of superconducting cavity: towards realizations of high-Q and high gradient cavities" Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Aug. 1-3, (2017).
- [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] K. Watanabe *et al.*, "Repair techniques of superconducting cavity for improvement cavity performance at KEK-STF" Proceedings of the IPAC'10, Kyoto, (2010).