

9 セル超伝導空洞 (IHEP-04) の空洞性能試験

CAVITY PERFORMANCE OF IHEP-04 9-CELL CAVITY AT KEK

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

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

^{A)} Nippon Advanced Technology

^{B)} KEK, High Energy Accelerator Research Organization

^{C)} IHEP, Institute of High Energy Physics, Beijing

Abstract

A TESLA type 9-cell superconducting RF cavity (IHEP-04) was produced by IHEP. The vertical test was carried out after a series of the process like inspection of inner surface, electric field distribution measurement, anneal and electropolishing at KEK. The IHEP-04 achieved $E_{acc, max}$ of 23.9 MV/m with Q_0 value of 7.4×10^9 . The vertical test results of IHEP-04 are reported in this paper.

1. はじめに

Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences (IHEP)にて製造された TESLA 型 9 セル超伝導空洞 (IHEP-04)について、KEK-STF で内面検査、電界分布測定、アニール、電解研磨などの一連の表面処理工程を行ったのちに、たて測定を行った。本レポートでは、主に IHEP-04 空洞のたて測定結果について報告する。

2. たて測定の工程

たて測定を行うにあたり、KEK-STF で受け入れを実施、以下の工程[1]でたて測定[2]を行った。

- ①空洞受け入れ検査 (厚み測定・内面検査)
- ②Pre-EP, EP-1 (EP=電解研磨)
- ③一次洗浄、温水超音波洗浄 (50□, 15min.)
- ④超純水内面高圧洗浄 (HPR)
- ⑤アニール処理
- ⑥アニール後の内面検査
- ⑦内面局所研磨 (欠陥等が無ければ省略)
- ⑧プリチューニング (空洞の共振周波数調整)
- ⑨EP-2
- ⑩一次洗浄、温水超音波洗浄 (50□, 15min.)
- ⑪超純水内面高圧洗浄 (終了後は封止)
- ⑫クリーンルーム (class10 で測定用パーツ取付)
- ⑬class1000 へ移動し、排気系へ接続
- ⑭He リークチェック、ベーキング
- ⑮たて測定スタンドへ移動・空洞吊り下げ
- ⑯センサー類取付後、クライオ内へ移動
- ⑰液体 He による冷却、たて測定 (4K)
- ⑱液体 He の減圧後、たて測定 (1.6~2K)
- ⑲クライオ内の昇温後、移動・取外し

内面検査で空洞内部表面を観察したところ、赤道部およびアイリスで性能劣化の起因になる欠陥が多く見つかった。そこで、局所研磨機を用いて局所研磨を行った。日程の関係上、すべての欠陥を除去するまでには至らなかった[1]。②、⑤、⑨、⑭における処理条件を Table 1 に示す。

Table 1: Preparation Procedures for Vertical Tests: Anneal, Electric-polishing (EP) and Baking Conditions for IHEP-04 Cavity

Pre-EP	5μm
EP-1st	100μm
Anneal	750°C (~3hour)
EP-2nd	20μm
Baking	120°C (~44hour)

たて測定は、Signal generator より出力した高周波電力を最大出力 400W のドライバ・アンプを用いて空洞へ入射する。入射電力 (P_{in})、透過電力 (P_t)、反射電力 (P_{ref})、プローブ電力 (P_{probe}) を測定し、式(1)から(3)を用いて加速電界 (E_{acc}) および無負荷 Q 値 (Q_0) を算出し、空洞性能の評価をする。 P_0 : 空洞表面のエネルギー損失、 Z : 空洞形状から決まる定数である。

$$E_{acc} = Z\sqrt{P_t Q_t} \quad (1)$$

$$Q_0 = P_t Q_t / P_0 \quad (2)$$

$$P_0 = P_{in} - P_t - P_{ref} - P_{probe} \quad (3)$$

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

3. たて測定結果

3.1 IHEP-04 たて測定結果

IHEP-04 における共振周波数 1303MHz (π -mode) のたて測定結果を Table 2 と Figure 1 および Figure 2 に示す。低い加速電界から記録し、最大値まで測定をする (π initial)。時間をおいて同様に再度測定した (π final)。

Table 2: Vertical Test Results of IHEP-04 Cavity

	π initial	π final
Eacc [MV/m]	23.9	23.8
Q_0 @ Eacc max	$\sim 7.35 \times 10^9$	$\sim 8.03 \times 10^9$
X-ray @ Eacc max [$\mu\text{Sv/h}$]	0.4	0.5
X-ray on set [MV/m]	18	-
Limit	Quench	Quench

最大加速電界は Table 2 の initial の時で、23.9MV/m ($Q_0 = \sim 7.4 \times 10^9$) であった。空洞性能の限界の原因は、空洞に取り付けたセンサーの反応から 2 セルの赤道 130~150 度付近で発熱が起こり、クエンチしたためである。

放射線モニターのセンサーは、クライオモジュールの中心軸上でクライオモジュール外部に設置している。センサー位置の概略図を Figure 3 に示す。X 線の検出は initial で 18MV/m から起こり、徐々に増加して $10\mu\text{Sv/h}$ まで計測したが、22MV/m 前後で改善された。final では、initial のように増加は見られず、最大加速電界付近で $0.5\mu\text{Sv/m}$ であった。

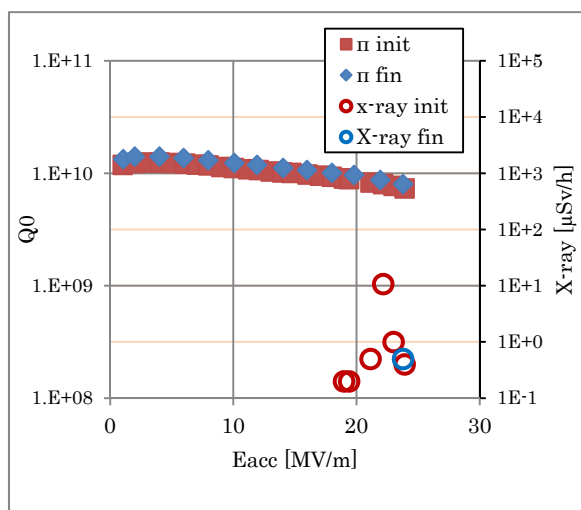


Figure 1: Q_0 -Eacc plots in vertical tests of the IHEP-04 cavity.

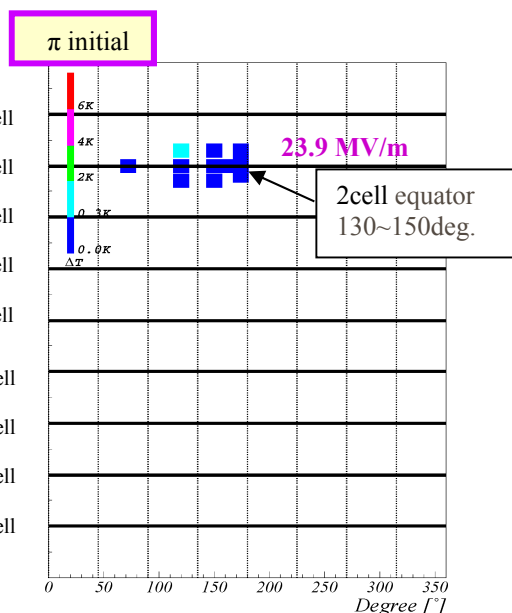


Figure 2: Heating locations of IHEP-04 cavity (π -mode) measured by T-mapping system.

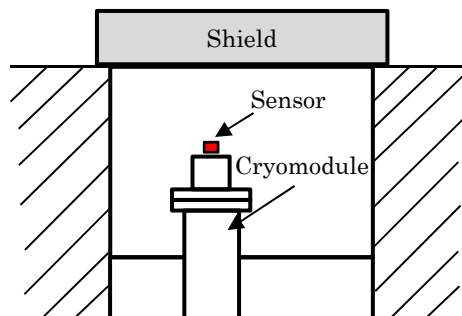


Figure 3: X-ray sensor position.

3.2 IHEP-04 と KEK で測定された空洞の比較

IHEP-04 のたて測定結果を、過去に KEK で測定した IHEP の空洞 (IHEP-03) [3] および KEK の空洞 (MHI-27) [4] と比較する。各たて測定の Q_0 -Eacc 曲線を Figure 4、Figure 5 に、各空洞における最大加速電界などの結果をまとめたもの Table 3 に示す。IHEP-03 と MHI-27 の空洞形状は TESLA-Like 型である。

Q_0 -Eacc 曲線の傾向は加速電界が高くなるにつれて Q_0 が徐々に上がり、3-4MV/m 付近で Q_0 が最大になる。それ以降は加速電界が高くなるにつれ Q_0 は直線的に減少し、発熱によりクエンチする同様の曲線になる。

IHEP-04 の最大加速電界は MHI-27 より低い、IHEP-03 より高い。しかし、Table 3 の表面抵抗 (R_s) の値をみると IHEP-04 が他の2つの空洞より高い値になっている。温度が 2K のときの加速電界 ($3.5 \pm 0.1\text{MV/m}$) で各空洞の Q_0 を比較してみると、IHEP-04 は

$Q_0 = 1.17 \times 10^{10}$, IHEP-03 は $Q_0 = 1.42 \times 10^{10}$, MHI-27 は $Q_0 = 1.44 \times 10^{10}$ という結果である。IHEP-04 の加速電界は IHEP-03 より高い値を得られるたが、 Q_0 は他の空洞より性能が低いということがわかった。

放射線の値をみてみると、3 台とも initial では放射線量が多いが、徐々に改善されていき、IHEP-04 と IHEP-03 はモニターで検出できない値に、MHI-27 は $50 \mu\text{Sv/h}$ 程度に減少した。

Table 3: Vertical Test Results

	IHEP-04	IHEP-03	MHI-27
Eacc [MV/m]	23.8	16.6	25.8
Q_0 @ Eacc max	$\sim 8.03 \times 10^9$	$\sim 1.33 \times 10^{10}$	$\sim 6 \times 10^9$
X-ray @ Eacc max [$\mu\text{Sv/h}$]	0.5	0	48
Limit	Quench	Quench	Quench
R_s [n Ω] @2K	25.2	19.8	20.5

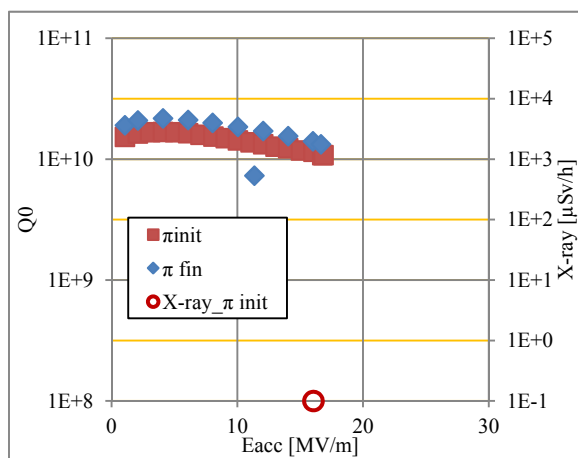


Figure 4: Q_0 -Eacc plots in vertical tests of the IHEP-03.

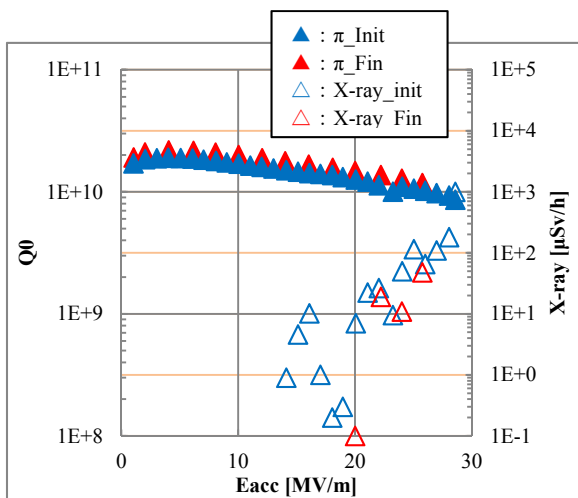


Figure 5: Q_0 -Eacc plots in vertical tests of the MHI-27.

4. まとめ

IHEP にて製造された TESLA 型 9 セル超伝導空洞 (IHEP-04) について、たて測定を行った。達成された最大加速電界として、 23.9 MV/m ($Q_0=7.4 \times 10^9$) の結果が得られた。空洞セル部分に取り付けたセンサーより 2 セル赤道に発熱がみられたため、それが原因となりクエンチしてフィールドリミットとなっていると考えられる。

IHEP-04 は Q_0 が低かったものの、 Q_0 -Eacc 曲線はこれまでに製造された IHEP の空洞や KEK の空洞と類似する傾向の Q_0 -Eacc 曲線を得られた。

今後再測定を行う場合は、内面検査を実施し発熱箇所の詳細とその部分で発熱原因になりそうな欠陥がないかを調査し、局所研磨による処理などをほどこして、たて測定を行う必要があると思われる。

参考文献

- [1] M.Asano *et al.*, “Inspection of inner surface in IHEP-04 9-cell cavity at KEK” Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 1-3, (2017), WEP043.
- [2] T.Shishido, “超伝導空洞の性能評価”, OHO’14 program no.6 in KEK.
- [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), TUP021 .
- [4] T.Yanagimachi *et al.*, “Vertical test results of 9-cell SC cavities for STF2-CM2B”, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 5-7, (2015), THP051.
- [5] E.Kako, “超伝導空洞の基礎”, OHO’14 program no.5 in KEK.