

STF2-CM2a クライオモジュール用 9 セル超伝導空洞のたて型性能測定の結果 VERTICAL TEST RESULT OF 9-CELL SC CAVITIES FOR STF-CM2A CRYOMODULE

植木 竜一^{#, A)}, 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)}, 宍戸 寿郎^{C)},
山本 康史^{C)}, 加古 永治^{C)}

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

^{A)} Nippon Advanced Technology Co. Ltd.

^{B)} K-vac

^{C)} High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

We have conducted research and development of 9-cell superconducting (SC) cavities for STF phase-2 project at KEK. In this paper, we report vertical test results of four 9-cell SC cavities (MHI#23-26), which incorporate into CM2a cryomodule. The maximum accelerating electric field ($E_{acc, max}$) of the cavities were limited due to quench by excessive heat generation at an equator or precipitous decrease of a Q_0 value by field emission at iris surface. Mechanical polishing at the quench location and the iris surface showed the effects of increasing the quench field and suppressing field emission. In the results, the $E_{acc, max}$ of the cavities increased. The MHI#23 cavity achieved the $E_{acc, max}$ of 35.9 MV/m. The MHI#25 and MHI#26 cavities showed 31.5 MV/m.

1. はじめに

KEK-STF では、2005 年以降 International Liner Collider (ILC)の実現に向け STF 計画が継続的に行われてきた。現在進行中の STF Phase-2 (STF-2)計画は、L バンド(1.3 GHz) 9 セル超伝導加速空洞 8 台を内蔵したクライオモジュール(CM1)および 4 台を内蔵したクライオモジュール(CM2a)を建設し、ILC で要求される加速勾配(31.5 MV/m)での長期間にわたる安定したビーム運転の実現を目指している^[1]。

これに先立ち STF 空洞グループでは、STF-2 で使用する超伝導加速空洞のたて型性能評価(縦測定)を行ってきた。2012 年までに CM1 用超伝導空洞 8 台(MHI#14-MHI#22)の縦測定を終え、いずれも 35.0 MV/m 以上の加速電場を達成した^[2]。このうち 8 空洞は、CM1 クライオモジュールに組み込まれ、STF 棟地下トンネルに設置されている。

さらに、2014 年 1 月までに CM2a クライオモジュールに組み込むための超伝導加速空洞 4 台(MHI#23-#26 空洞)の縦測定が行われた。本論文では、この 4 台の縦測定の結果を報告する。

今回測定された 4 台の超伝導空洞は、将来的なコストダウンおよび空洞作製時間短縮を目指し縦型電子ビーム溶接(EBW)装置を用いて赤道部の溶接が行われている^[3]。MHI23 号機および MHI24 号機は、縦型 EBW 装置を用いて空洞 1 台ずつ、MHI25 号機および MHI26 号機は、2 空洞同時に真空引きを行い、赤道部の溶接が行われた。

2. 空洞の表面処理と測定方法

超伝導空洞の性能は、空洞内表面の状態に大きく影響される。空洞性能を向上させるため、空洞受け入れから測定に至るまで多くの表面処理が行われる。主な処理工程として、

- 1) 初期多量電解研磨 (100 μm ~140 μm)
- 2) 真空アニール (750 $^{\circ}\text{C}$ 、4 時間)
- 3) 最終少量電解研磨 (5 μm ~20 μm)、高圧水洗浄
- 4) class10 クリーンルームにおける組み立て
- 5) 140 $^{\circ}\text{C}$ 、44 時間のベーキング

の順に作業を行った。特に空洞組み立て時のクリーンルーム内の清浄な環境整備は重要である。そのため、particle counter およびイオンガンを用いて空洞内に微粒子が入らないよう注意しながら作業を行う。ベーキング後、空洞表面に表面温度および放射線測定素子からなる観測システム^[4]を取付け測定に臨む。

測定は、信号発生器(Agilent N5181A)から出力された高周波電力(8.3 dBm)を 400W に増幅して空洞に入射し行われる。このときの入射電力(P_{in})、透過電力(P_t)、反射電力(P_r)およびプローブ電力(P_{probe})を測定し、式(1)から(3)を用いて加速電場(E_{acc})および無負荷 Q 値(Q_0)を算出し、空洞性能の評価を行う。

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

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

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

ここで、 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、 Q_L :負荷 Q 値である。なお、事前にケーブルコレクションおよび Q_L の校正を行い、より正確な値を算出している。

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

3. 超伝導空洞の縦測定の結果

MHI#23 空洞は、測定前の内面検査でアイリスに欠陥が見つかったため、機械研磨によりこれらの欠陥を取り除き測定に臨んだ⁵⁾。Fig. 1 に縦測定の結果を示す。1 回目の測定において、加速電場は 31.3 MV/m ($Q_0 = 9.35 \times 10^9$) に達し、放射線量も 10 μ Sv/h (@31.3 MV/m) と少なく性能の高い空洞であった。測定後、加速電場 35.0 MV/m を目指して測定中に発熱した 2、3、4、9 番目のセルに機械研磨を施し、2 回目の測定に臨んだ。その結果、35.9 MV/m ($Q_0 = 6.99 \times 10^9$) まで最大到達加速電場が向上した。放射線量も 1 mSv/h (@35.9 MV/m) 未満と少なく、非常に高い性能を示した。

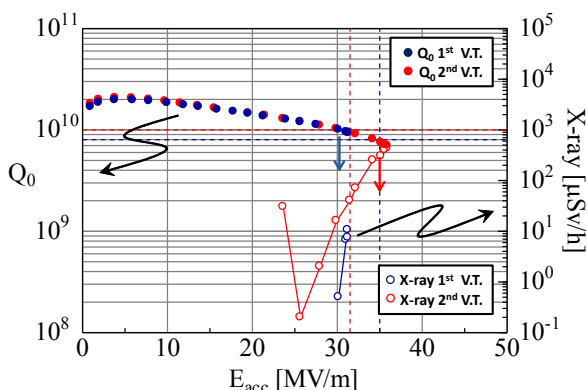


Figure 1: Q_0 - E_{acc} plots in vertical tests of MHI#23 cavity.

次に、MHI#24 空洞の縦測定の結果を Fig. 2 に示す。1 回目の測定では、9 番目のセルで生じたクエンチにより加速電場が 22.7 MV/m ($Q_0 = 1.15 \times 10^{10}$) に制限された。また、放射線量も 7 mSv/h (@22.7 MV/m) と非常に高い値であった。測定後の内面検査で発熱箇所が大きき数百ミクロンの欠陥が見つかった。また、アイリスにはビード端にくぼみ、表面に多くの荒れが見つかったため、これらを機械研磨により除去し 2 回目の測定に臨んだ。1 回目の測定でクエンチを起こした 9 番目のセルは、機械研磨の効果により発熱が消えフィールドが向上した。しかし、2 番目のセルで新しく発熱(クエンチ)が生じ、加速電場は 22.7 MV/m ($Q_0 = 1.21 \times 10^{10}$) に制限された。放射線量はほとんど観測されず、アイリス研磨の効果が現れた。再びアイリスの機械研磨を施し 3 回目の測定に臨んだ。加速電場が 10 MV/m を超えたあたりからフィールドエミッションが始まり、20.0 MV/m 付近で放射線量が 99.9 mSv/h を超えた。それに伴い Q 値が 4.17×10^9 (@23.2 MV/m) まで減少したため測定を終了した。3 回目の測定前、空洞の真空排気中にポンプが停止し、空洞内が一度大気に暴露されるトラブルが発生した。これが 3 回目の測定で放射線量が増加した原因と考え、少量電解研磨(EP2)および高

圧水洗浄により空洞内表面の処理を行い 4 回目の測定に臨んだ。4 回目の測定では、加速電場が一時 26 MV/m まで向上したが、放射線量が急激に上昇した後、空洞性能が著しく低下した。最終的に 12.0 MV/m における Q 値が 3.18×10^9 と ILC の基準を大幅に下回ったため測定を終了した。

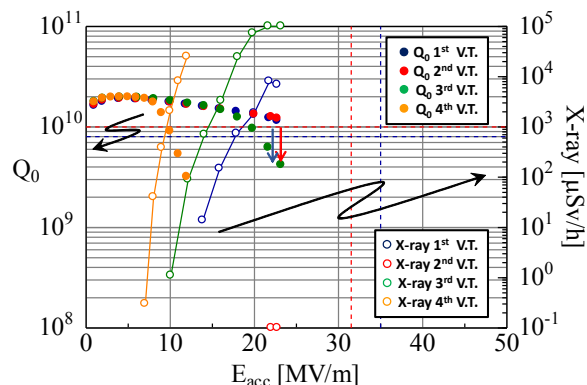


Figure 2: Q_0 - E_{acc} plots in vertical tests of MHI#24 cavity.

MHI#25 空洞の縦測定の結果を Fig. 3 に示す。1 回目の測定で、1 番目のセル($0^\circ \sim 90^\circ$)からの発熱によるクエンチが生じたものの、32.6 MV/m ($Q_0 = 8.23 \times 10^9$) と非常に高い加速電場を示した。測定後、更なる性能向上を目指し発熱箇所に機械研磨を施し、2 回目の測定に望んだ。しかし、研磨の効果はなく 32.5 MV/m ($Q_0 = 8.00 \times 10^9$) と 1 回目の測定とほぼ同等の加速電場であった。

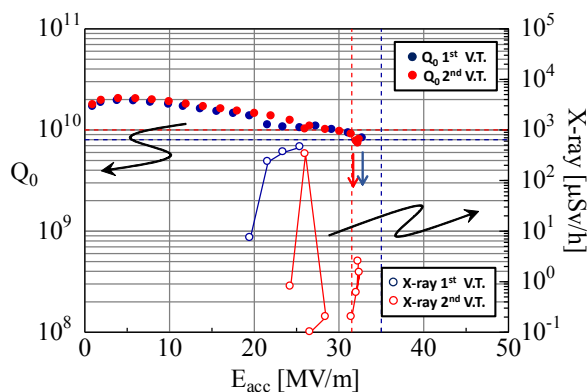


Figure 3: Q_0 - E_{acc} plots in vertical tests of MHI#25 cavity.

MHI#26 空洞は、測定前の内面検査で 5、6 番目のセルに欠陥が見つかったため、事前に機械研磨でこれらを除去した。また、アイリスのビード端にくぼみ、表面に荒れが多く見られたため、全アイリスを全周に渡って研磨し測定に臨んだ。

Fig. 4 に縦測定の結果を示す。1 回目の測定では 13 MV/m を超えたところでフィールドエミッションが

始まり、放射線量が増加した。加速電場が 20 MV/m を超えると放射線の増加とともに Q 値が急激に減少した。26.1 MV/m のとき Q 値が 3.46×10^9 まで減少し、ILC の仕様である 1.0×10^{10} (@31.5 MV/m) を大幅に下回ったため測定を終了した。測定後の内面検査でアイリスのビード端のくぼみや表面の荒れが見つかり、これらが強いフィールドエミッションの原因であると考え、再度アイリスの全周研磨を行い 2 回目の測定に望んだ。その結果、放射線量が減少し 1 回目の測定に比べ空洞の性能が向上した。最終的な到達加速電場は、31.6 MV/m ($Q_0 = 7.70 \times 10^9$) となり高い性能を示した。しかし、31.5 MV/m における放射線量が約 5 mSv/h と高い値を示した。

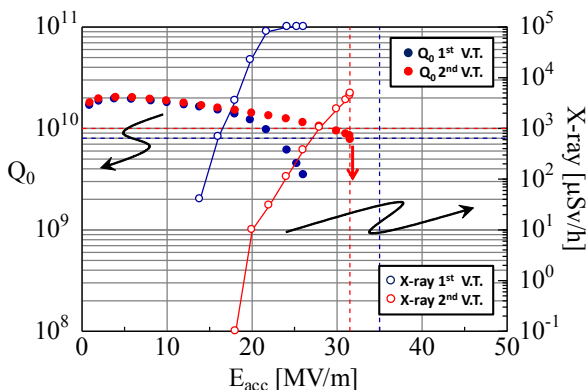


Figure 4: Q_0 - E_{acc} plots in vertical tests of MHI#26 cavity.

今回測定を行った 4 空洞の最終的な Q_0 - E_{acc} 曲線と放射線測定量を Fig. 5 にまとめた。最終的な到達加速電場は MHI#23 空洞が 35.9 MV/m ($Q_0 = 6.99 \times 10^9$)、MHI#24 空洞が 12.0 MV/m ($Q_0 = 3.18 \times 10^9$)、MHI#25 空洞が 32.5 MV/m ($Q_0 = 8.00 \times 10^9$)、MHI#26 空洞が 31.6 MV/m ($Q_0 = 7.70 \times 10^9$) となった。また、原因不明の発熱と強いフィールドエミッションが 4 台の空洞性能を制限する要因となっていることが明らかとなった。しかし、これらに対して機械研磨を施すことで一部空洞性能の向上が見られた。

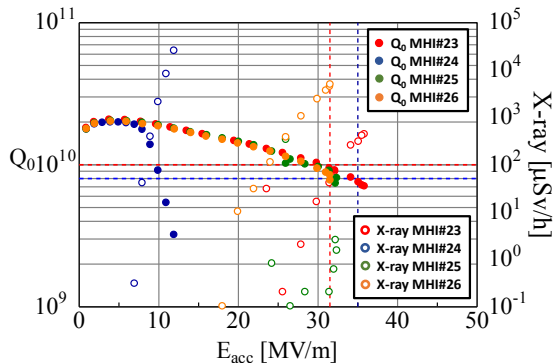


Figure 5: The Q_0 - E_{acc} plots and radiation level in vertical tests of four cavities for CM2a.

4. 発熱箇所に対する機械研磨の効果

一般的に表面磁場強度の強い赤道部に欠陥が存在すると、発熱によるクエンチを誘発し加速電場が制限される。そこで、空洞表面に温度マッピング装置を取付け、測定中に生じた発熱の詳細な発生場所の特定を行っている。さらに、機械研磨を施しその原因を取り除くことで空洞性能の向上を図っている。しかし、今回測定された 4 空洞は、欠陥による発熱以外に原因不明の発熱が多く見られた。ここでは、欠陥による発熱および原因不明の発熱に対して施した機械研磨の効果について説明する。

Fig. 6 (a) は、MHI#24 空洞の 1 回目の測定の温度マッピング図である。2 番目のセル ($45^\circ \sim 180^\circ$) と 9 番目のセル ($225^\circ \sim 315^\circ$) に発熱が見られた。特に 9 番目のセルの発熱はクエンチを引き起こし加速電場が 22.7 MV/m に制限された。その後の内面検査でそれぞれの発熱箇所に Fig. 6 (b) および (c) に見られるような大きさ数百 μm 、深さ数 μm の凹型欠陥が見つかったため、局所的な機械研磨を施しこれらを取り除いた。内面検査用のカメラを確認しながら研磨を行うことで、Fig. 6 (b') および (c') のように確実に欠陥を取り除くことが出来る。2 回目の測定では、Fig. 6 (d) に見られるように 9 番目のセルの発熱が消えた。またパスバンド測定の結果、9 番目のセルの加速電場が 23 MV/m から 40 MV/m まで向上したことが分かった (Fig. 6 (e))。2 番目のセルに関しては、研磨を行った場所とは別の場所で発熱が生じたため、研磨の効果を確かめることが出来なかった。

欠陥によって引き起こされる発熱は、場所の特定が容易であり発熱原因を確実に取り除くことが出来るため、研磨の効果が顕著に現れる。

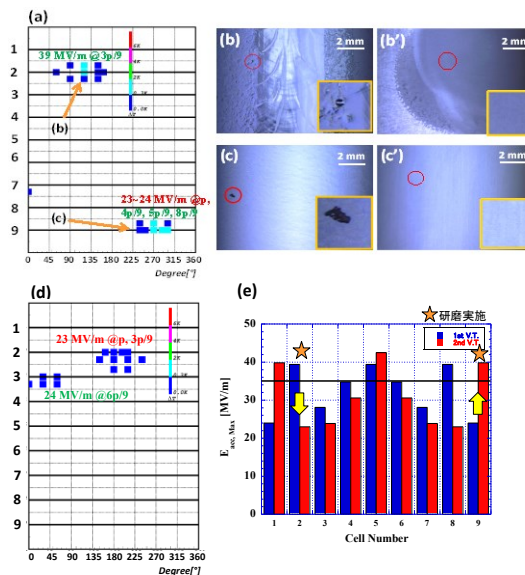


Figure 6: (a) Temperature mapping at 1st V.T. (b, c) Images of defect at heat generation. (d) Temperature mapping at 2nd V.T. (e) Potential $E_{acc, \max}$ of each cell.

一方、今回の測定で多く見られた原因不明の発熱に対する機械研磨は、発熱箇所の特定が難しくその効果が常に現れるとは限らない。

機械研磨の効果が見られた例を示す。MHI#23 空洞の1回目の縦測定では、2、3、4、9番目のセルに発熱が生じた(Fig. 7 (a))。特に、3番目のセルでクエンチが引き起こされ、加速電場 31.3 MV/m に制限された。しかし、測定後の内面検査では発熱箇所にMHI#24 空洞で見られたような欠陥は見つからず、発熱の原因を特定することができなかった。そこで、発熱箇所周辺に対して機械研磨を施し2回目の測定に臨んだ。その結果、1回目の測定で発熱した2、4、9番目のセルにおける発熱が消えた(Fig. 7 (b))。最終的に3番目のセルでクエンチが生じたものの、到達最大加速電場は 35.9 MV/m となり、1回目の測定に比べ大幅に性能が向上した。機械研磨を施したセルのうち、2、3番目のセルでそれぞれ加速電場が上がり、両セルとも 35 MV/m を超える結果となった。

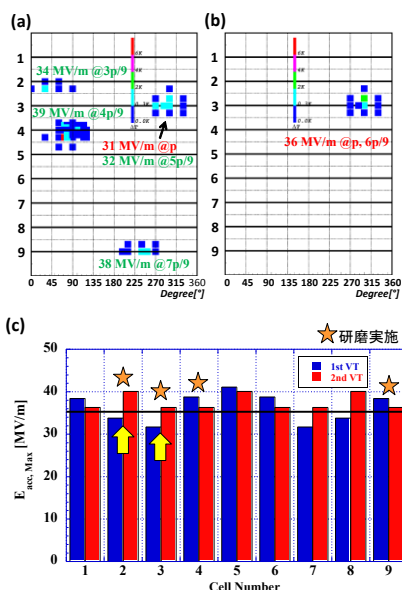


Figure 7: Temperature mapping of (a) 1st V.T. and (b) 2nd V.T., and (c) potential $E_{acc,max}$ of each cell.

同様のケースにおいて、機械研磨の効果が見られない場合もあった。MHI#25 空洞の1回目の測定では、1、2、4番目のセルに発熱が見られた(Fig. 8 (a))。特に、1番目のセルで生じたクエンチにより加速電場が 32.8MV/m に制限された。測定後の内面検査でその原因が特定できなかったため、35 MV/m を下回った1番目のセルの発熱箇所周辺に機械研磨を施し、2回目の測定に臨んだ。しかし、Fig. 8 (b)に見られるように1回目の測定と同じ場所で発熱が生じ、クエンチを引き起こした。また、Fig. 8 (c)に見られるように研磨を行った1番目のセルの加速電場に変化は見られず、空洞の到達最大加速電場は1回目とほぼ同等の 32.5 MV/m であった。

このように、原因不明の発熱に対する機械研磨は、必ずしも効果があるとはいえない。この理由として、内面検査で使用されるカメラでは捕らえられない極小レベルの欠陥、もしくは検査カメラの範囲外に存在する欠陥が発熱の原因になっているためと考えられる。確実に空洞の性能を向上させるためにも、早急に原因を明らかにする必要がある。

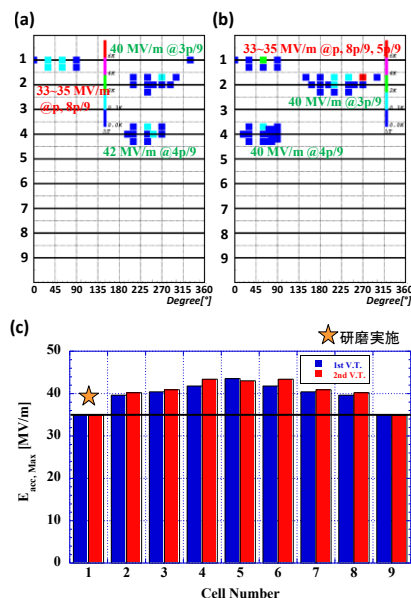


Figure 8: Temperature mapping at (a) 1st V.T. and (b) 2nd V.T., and (c) potential $E_{acc,max}$ of each cell.

Fig. 9 は、全 10 回の縦測定において生じたクエンチの回数と発生箇所の分布を示したグラフである。CM1 クライオモジュール用の超伝導空洞(~MHI#22 空洞)と同様にエンドセルにおいてクエンチが発生する傾向にある。この原因はまだ明らかになっておらず、早急に原因究明を行う必要がある。

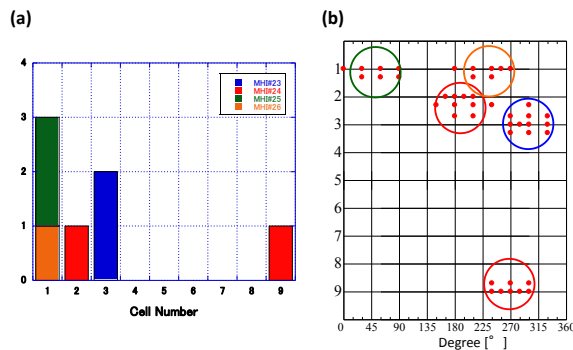


Figure 9: The number and distribution of the quench location in each cell.

5. アイリス全周研磨の効果

空洞の性能を制限するもうひとつの要因として大量に発生した放射線が挙げられる。今回測定された4空洞は、MHI#22 空洞までに比べ、測定中に観測される放射線量が高い傾向にあった。MHI#26 空洞1回目の測定結果に見られるように、放射線の発生は空洞の Q 値を急激に減少させることが分かっている。そこで、空洞の各アイリスを取り巻くようにピンダイオードを取り付け、各場所における放射線量を測定し、その発生原因の特定を行っている。

縦測定中、特に放射線量の多かった空洞のアイリス部分を調べると、Fig. 10 (a) に示すようなくぼみや Fig. 10 (b) に示すような表面の荒れといった特徴的な構造が多く見られた。電場強度が最大になるアイリス部分にこのようなマイクロスケールの凹凸が存在すると、その先端に電界集中が起こりフィールドエミッションを引き起こす。これが大量の放射線の発生原因となり、空洞の Q 値の低下を招いたと考えられる。MHI#26 空洞では、4 番目のセル以降のアイリスのほぼ全周にかけてくぼみや表面の荒れが見られた。そのため、Fig. 10 (c)に見られるようにマッピング図全体に放射線が観測されたと推測される。

アイリスのくぼみや表面の荒れを取り除くため、アイリス全周に渡る機械研磨を施した(アイリス全周研磨)。約 8 時間機械研磨を施し、さらに EP2 処理を行い 2 回目の測定を行った。その結果、1 回目の測定で 99.9 mSv/h を超えた放射線量が、4.38 mSv/h まで減少した。また、MHI#24 空洞においてもアイリス全周研磨により放射線量が 7 mSv/h (1st V.T.)から 0.1 μ Sv/h 未満(2nd V.T.)に減少する結果が得られた。

このようにアイリス全周研磨は、フィールドエミッションを抑制し、放射線量の減少に効果的である。しかし、アイリスにわずかでも研磨不足があると研磨の効果が現れず、放射線量が減少しない例も見られた。より確実に放射線量を減らすためには、機械研磨以外の工程も含め、さらに高い精度でアイリス表面を平坦化する必要がある。

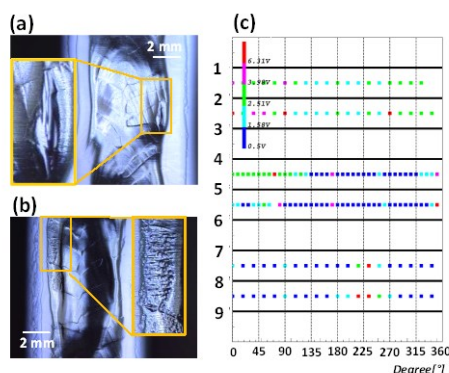


Figure 10: (a), (b) Images of depression and roughness at iris surface. (c) X-ray mapping data in the 1st V.T.

6. まとめ

CM2a クライオモジュールに使用する超伝導空洞 4 台の縦測定を行った。MHI#23 空洞は、35.9 MV/m に到達し、ILC の仕様要求を満たした。MHI#25 空洞および MHI#26 空洞は、35.0 MV/m に届かなかったものの 31.5 MV/m を超える高い性能を示した。MHI#24 空洞は、測定の際に空洞内でトラブルが起こり、著しく性能が劣化し、加速電場は 12.0 MV/m にとどまった。

本測定で生じた発熱の多くは、原因を特定することが出来ず、効果的な機械研磨を行うことが困難であった。アイリスのくぼみや表面の荒れなどが原因で引き起こされたフィールドエミッションは、アイリスの全周研磨を行うことでその発生を抑制し、空洞の性能向上につながった。

今回測定された 4 台の空洞は、2014 年 7 月までに CM2a クライオモジュールに組み込まれ、現在 STF 棟地下トンネルに設置が完了している^[6]。さらに、2014 年 10 月に空洞冷却を開始し、空洞低電力試験を行う予定である。

参考文献

- [1] T. Shishido et al., “Construction of STF2 Cryomodule consisting of Twelve 1.3 GHz 9-cell SC Cavities”, in these proceedings, MOOL12.
- [2] Y. Yamamoto et al., “Summary of vertical tests of superconducting cavity for ILC”, Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Japan (2013) 553-557.
- [3] H. Hara et al., “Superconducting Cavity R&D for ILC at MHI”, in these proceedings, SUP047.
- [4] Y. Yamamoto et al., “Summary of Results and Development of Online Monitor for T-mapping/x-ray-mapping in KEK-STF”, Proceedings of IPAC’10, Kyoto, Japan (2010) 3371-3373.
- [5] M. Asano et al., “Inspection of inner surface in 9-cell SC cavities for STF2-CM2a cryomodule”, in these proceedings, SAP042.
- [6] T. Okada et al., “String Assembly of 9-cell SC cavities for STF2 CM1 and CM2a cryomodules”, in these proceedings, SUP046.