

ILC 用 9cell TESLA 空洞の性能評価

PERFORMANCE EVALUATION OF 9 CELL TESLA CAVITY FOR ILC

井藤隼人^{#,A)}, 及川大基^{B)}, 佐伯学行^{C)}, 早野仁司^{C)}

Hayato Ito^{#,A)}, Hiroki Oikawa^{B)}, Takayuki Saeki^{C)}, Hitoshi Hayano^{C)}

^{A)} SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies)

^{B)} Utsunomiya University

^{C)} KEK

Abstract

The International Linear Collider Technical Design Report (ILC-TDR [1]) describes detail design for ILC and specifies to use TESLA 9 cell SRF cavity with ILC short beam pipe. At Superconducting RF Test Facility (STF) in KEK, the 9 cell TESLA-like cavities were developed and studied for the ILC. In 2015, four 9 cell TESLA cavities based on EuroXFEL design were fabricated. This is the first time of fabrication by the domestic companies. Since the cavities are the same design of ILC-TDR except for one of beam pipe length, to evaluate RF performance using STF facilities and process is important for ILC. The procedure of 9 cell TESLA cavity processing and handling using the ILC recipe and the result of performance evaluation of one of 9 cell TESLA cavity are introduced and discussed in this report.

1. はじめに

国際リニアコライダー計画(ILC)では主線形加速器の部分に約 16000 台の 9cell 超伝導加速空洞が使用される予定である。この超伝導加速空洞には TESLA 空洞が使用される計画であり、今回、国内メーカーにより初めての国産 9 cell TESLA 空洞を 4 台製造した。本研究ではこのうちの 1 台の TESLA 空洞について ILC で採用されている表面処理プロセス、空洞チューニング、内面検査及び局所研磨を適用し、温度 2 K において縦測定による加速電界性能試験を行った。また加速電界性能試験の結果として、29 MV/m の性能を達成したが ILC の目標値である 35 MV/m までは到達できなかったため、その原因を解明する研究を行った。具体的には、温度マップ装置により 29 MV/m のときに観測された発熱箇所と、内面検査の結果を比較することで原因を推定した。同時に X 線マップ装置により発生した X 線の分布も解析し、内面検査の結果と比較することでフィールドエミッターについての考察を行った。本文ではこれらの詳細について報告する。

2. TESLA 空洞

2.1 TESLA 空洞とは

TESLA 空洞は超伝導加速空洞を用いた TeV スケールの加速器を実現するために DESY (ハンブルク) により設計・開発されたものであり、現在ドイツで稼働している Euro-XFEL には TESLA 空洞が用いられている。ILC-TDR によると、ILC の主線形加速器にはビームパイプを 36 mm 短くした 9 cell TESLA 空洞が使用される計画である。STF では、これまで 9 cell TESLA-like 空洞を開発・研究されてきたが、2015 年に 4 つの 9 cell TESLA 空洞が国内メーカーにより製作され、その一つが STF で試験された。TESLA 空洞はビームパイプの長さ以外は ILC-

TDR と同じ設計であるため、STF の設備を使用して TESLA 空洞の RF 性能を評価することは ILC にとって重要なことである。TESLA 空洞の断面図及び外形図を Figure 1 に示す。ただし、中央の 3 セル分は省略してある。

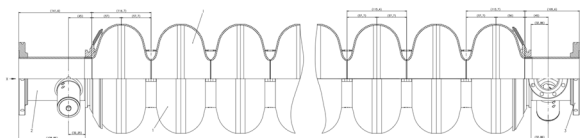


Figure 1: Drawing of 9 cell TESLA cavity. The center part of cavity is omitted.

2.2 空洞諸元

本研究で使用した 9 cell TESLA 空洞の仕様を Table 1 に示す。

Table 1: Specification of TESLA Cavity

Parameter	Value
Type of accelerating structure	Standing wave
Accelerating mode	TM ₀₁₀ , π -mode
Type of cavity-cell shape	Tesla (or Tesla-like)
Fundamental frequency	1.300 GHz
Operation:	
- Average gradient (range allowed)	31.5 MV/m ($\pm 20\%$)
- Quality factor (at 31.5 MV/m)	$\geq 1 \times 10^{10}$
Qualification:	
- Average gradient (range allowed)	35.0 MV/m ($\pm 20\%$)
- Quality factor (at 35 MV/m)	$\geq 0.8 \times 10^{10}$
- Field flatness	$\geq 95\%$
- Acceptable radiation (at 35 MV/m)	$\leq 10^{-2}$ mGy/min
Active length	1038.5 mm
Total length (beam flanges, face-to-face)	1283.4 mm
Input-coupler pitch distance, including inter-connection	1326.7 mm
Number of cells	9
Cell-to-cell coupling	1.87%
Iris aperture diameter (inner/end cell)	70/78 mm
Equator inner diameter	~ 210 mm
R/Q	1036 Ω
E_{peak}/E_{acc}	2.0
B_{peak}/E_{acc}	4.26 mT/(MV/m)
Tunable range	± 300 kHz
$\Delta f/\Delta L$	315 kHz/mm
Number of HOM couplers	2
Q_{est} for high-impedance HOM	$< 1.0 \times 10^5$
Nb material for cavity (incl. HOM coupler and beam pipe):	
- RRR	≥ 300
- Mechanical yield strength (annealed)	≥ 39 MPa
Material for helium tank	Nb-Ti Alloy
Max design pressure (high-pressure safety code)	0.2 MPa
Max hydraulic-test pressure	0.3 MPa

[#] hayatoi@post.kek.jp

2.3 空洞製造

Figure 2 は株式会社東芝製の 2 台の空洞である。本研究ではこの内 TB9-TSB01 を使用した。材料は東京電解株式会社製のニオブシート材(RRR=300)とヘルス株式会社製のパイプ材(RRR=300)、及び東京電解株式会社製のニオブチタン材であり、製造方法は Euro-XFEL の仕様に従ったものである。寸法検査と気密検査の後に納入され、それ以降の表面処理は STF において行われた。



Figure 2: Picture of 9 cell TESLA cavities (TB9-TSB01, TB9-TSB02). TB9-TSB01 (front) is used for this research.

2.4 表面処理

空洞は以下の手順で表面処理が行われる[2]。

- I. 内面検査カメラにより内面を検査する。
- II. 予備電解研磨 Pre-EP (5 μm)により内面表層の汚れを取った後、本電解研磨 EP- I (100 μm)を行う。
- III. 電解研磨終了後十分な水洗を行い、界面活性剤 (FM20)入超純水を封入して超音波洗浄を行った後、高圧(8MPa)超純水洗浄を行う。
- IV. 電解研磨時に表面に拡散した水素の脱離のため 750°Cで 4 時間の真空炉によるアニールを行う。
- V. 再度内面検査を行うことで大きな欠陥に対しての局所研磨を行う。
- VI. 共振周波数の調整と各セルの電場強度を一様にするためにプリチューニングを行う。
- VII. 縦測定の直前に内表面の汚れを取る目的で仕上げ電解研磨 EP- II (30 μm)を行い、十分な水洗と超音波洗浄、高圧超純水洗浄を行う。
- VIII. クリーンルーム内でアンテナを取り付け、真空封止を行って 120°C 48 時間ベーキングを行う。

2.5 プリチューニング

プリチューニングは空洞の共振周波数を加速器の運転周波数に一致させ、さらに各セルの電場の強度を一様にする目的で空洞に永久変形を施す工程である。本研究では TESLA 空洞用プリチューニング装置を用いて調整を行った。本装置は各セルとビームパイプフランジの外径を測定することで、その中心位置を計算し、空洞の真直度を評価することができる。各セルの共振周波数を揃える時に、6 つのジョーズ(調整する歯)を用いて各セルに永久変形を施し共振周波数と真直度を同時に調整する。電界平坦度はビーズ摂動法により測定する。これ

らは計算機による制御と測定が行われ、短時間で調整ができるようなものである。本研究に使用した空洞の電界平坦度は Figure 3 に示すように 96%であった。

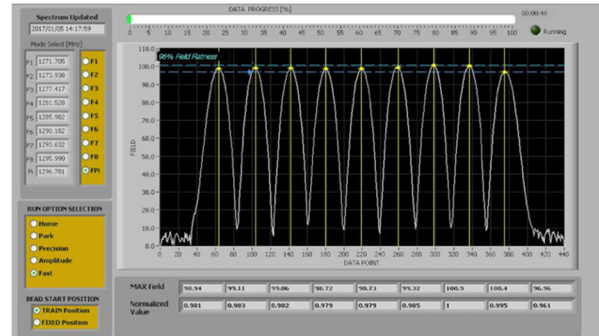


Figure 3: Field flatness of the pi-mode after tuning. The result was 96%.

3. 縦測定プロシージャー

3.1 アンテナの決め方

縦測定用に入力アンテナを入力カップラーポートに使用することにし、ピックアップアンテナをビームパイプに設置されているピックアップアンテナポートに使用する。空洞の Q_0 が 1×10^{10} 程度であるので、これらの設計結合度を入力アンテナは $Q_{ext_input} = 1 \times 10^{10}$ 、ピックアップアンテナは入力アンテナの $1/100$ 程度の結合度を目標とし $Q_{ext_pickup} = 1 \times 10^{12}$ とした。測定では Network Analyzer を用いた 2 ポート測定を行うことで、アンテナの長さを変えながら目標の設計結合度となる長さを探した。この内、入力ポートは常温時の空洞を励振するための強い結合度を持つアンテナを使用した。この時、指標となる一般的な計算方法について以下に記す。

2 ポート空洞において、結合定数 β は以下のように定義できる。

$$\beta_1 = \frac{Q_0}{Q_{ext1}}, \quad \beta_2 = \frac{Q_0}{Q_{ext2}} \quad (1)$$

ここで Q_{ext1}, Q_{ext2} はそれぞれポート 1、ポート 2 の Q 値であり、 Q_0 は空洞の Q 値である。

実際に測定される結合定数はお互いのポートの影響が含まれた状態であるため、ポート 1 から見た見かけ上の空洞の Q 値を Q_{01} とおくと実際に測定されるポート 1 の結合定数 β_{01} は以下のように記述できる。

$$\beta_{01} = \frac{Q_{01}}{Q_{ext1}} \quad (2)$$

Q_{01} は Q_0, Q_{ext2} と以下の関係があるため、

$$\frac{1}{Q_{01}} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_{ext2}} = \frac{1 + \beta_2}{Q_0} \quad (3)$$

(2), (3)式を用いて、 β_{01} について以下のように書き直すことができ、 β_{02} についても同様である。

$$\beta_{01} = \frac{\beta_1}{1 + \beta_2}, \quad \beta_{02} = \frac{\beta_2}{1 + \beta_1} \quad (4)$$

(4)式から真の結合定数 β_1, β_2 は以下のように記述することができる。

$$\beta_1 = \frac{\beta_{01}(1 + \beta_{02})}{1 - \beta_{01}\beta_{02}}, \quad \beta_2 = \frac{\beta_{02}(1 + \beta_{01})}{1 - \beta_{01}\beta_{02}} \quad (5)$$

実際に測定されるアンテナの結合定数 β_{01}, β_{02} は反射法により S_{11}, S_{22} の値を求めることで計算することができ、その計算には以下の式を用いる。

$$\beta_{01} = \frac{1 - 10^{\frac{S_{11}}{20}}}{1 + 10^{\frac{S_{11}}{20}}}, \quad \beta_{02} = \frac{1 - 10^{\frac{S_{22}}{20}}}{1 + 10^{\frac{S_{22}}{20}}} \quad (6)$$

ここで、(6)式はアンテナが **under coupling** である場合であり、**over coupling** の場合は分母分子の加減の符号が逆転する。(5), (6)式を用いることで S_{11}, S_{22} の値から真の結合定数 β_1, β_2 を求めることができる。しかし実際には常温時の超伝導空洞の Q 値は非常に低いので、低温時に設計結合定数となるようなアンテナでは結合が非常に小さくなり S_{11}, S_{22} は測定できない。そこで以下に記す方法で、設計の $Q_{\text{ext_input}}$ 及び $Q_{\text{ext_pickup}}$ を決定する。

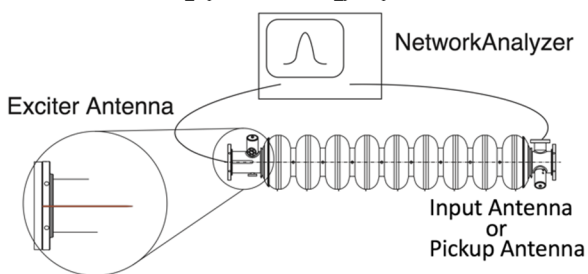


Figure 4: Setup of coupling constant measurement at room temperature.

Figure 4 は実際の 2 ポート測定でのセットアップである。空洞の入力カップラーポートには空洞を常温時に励振するためのアンテナを用い、測定したい入力アンテナやピックアップアンテナはピックアップアンテナポートに個々に設置して測定する。入力カップラーポートをポート 1、ピックアップアンテナポートをポート 2 とすると、励振用アンテナの結合定数 β_{01} は S_{11} の値を用いて(6)式から求めることができる。ポート 2 側ではアンテナの結合が非常に小さく、 S_{22} の値から結合定数を求めることはできないため、全体のパワー収支の関係を用いて結合定数を求める。ここで、ポート 1 から入力したエネルギー P_1 とポート 2 で消費されるエネルギー P_2 には S_{21} を用いて以下の関係が成立する。

$$P_2 = P_1 \times 10^{\frac{S_{21}}{10}} \quad (7)$$

また、空洞内で消費されるエネルギー P_0 は以下のように記述することができる。

$$P_0 = P_1(1 - 10^{\frac{S_{21}}{10}} - 10^{\frac{S_{11}}{10}}) \quad (8)$$

(7), (8)式を用いてポート 2 の真の結合定数 β_2 を以下のように求めることができる。

$$\beta_2 = \frac{P_2}{P_0} = \frac{10^{\frac{S_{21}}{10}}}{1 - 10^{\frac{S_{21}}{10}} - 10^{\frac{S_{11}}{10}}} \quad (9)$$

ポート 1 の真の結合定数 β_1 は(4)式に β_{01}, β_2 を代入することで求めることができる。これで、透過法を用いて真の結合定数 β_1, β_2 を求めることができた。

次に空洞の Q_L (Loaded Q)を求める。 Q_0 が空洞のエネルギー損失 P_0 に対する Q 値であるのに対して、 Q_L はアンテナでのエネルギー損失なども加味した全体のエネルギー損失 P_{total} に対する Q 値である。 S_{21} の共振周波数 f_0 での電圧透過係数の 3dB 落ちの周波数幅 Δf の値を求

め、以下の式から Q_L を計算する。

$$Q_L = \frac{f_0}{\Delta f} \quad (10)$$

そして、計算した Q_L と Q_0 の関係は以下のように記述できるので、

$$Q_0 = (1 + \beta_1 + \beta_2)Q_L \quad (11)$$

この(11)式を用いることで、 Q_L から Q_0 を求めることができ、ポート 2 の Q 値である $Q_{\text{ext}2}$ は(1)式から与えられるので、入力アンテナとピックアップアンテナのそれぞれの長さを変えながら目的の $Q_{\text{ext_input}}, Q_{\text{ext_pickup}}$ を決定する。

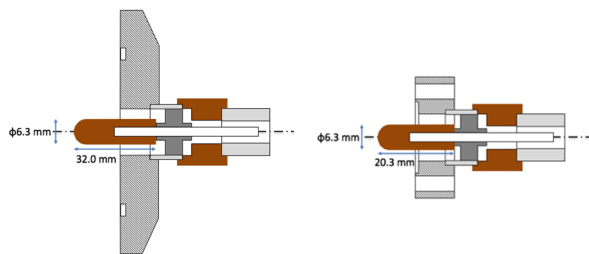


Figure 5: Cross-sectional drawings of input port (left) and pickup port (right).

Figure 5 は入力アンテナポートとピックアップアンテナポートの断面図の概要図である。アンテナの材料は無酸素銅であり、 $Q_{\text{ext_input}}, Q_{\text{ext_pickup}}$ の測定結果から入力アンテナの長さは 32.0 mm、ピックアップアンテナの長さは 20.3 mm とした。

3.2 測定セットアップ

STF の縦測定装置を用いて空洞の加速電界性能試験を行った。超伝導空洞を縦にし、クライオスタット天板に吊るした状態で、縦測定に必要な温度マッピング装置と X 線マッピング装置の取り付けを行った。入力アンテナケーブルとピックアップアンテナケーブルも接続した後、クライオスタットに挿入、設置した。液体ヘリウムは 1000 L のデューワーを 2 台使用した。1 台目の 1000 L の液体ヘリウムを使って空洞を 4.2 K まで冷却し、デューワーを 2 台目に切り替えて排気しヘリウム液面圧力を下げることで 2 K まで冷却した。加速電界性能試験は 2 K の温度で行った。この時のセットアップブロック図と写真を Figure 6 に示す。

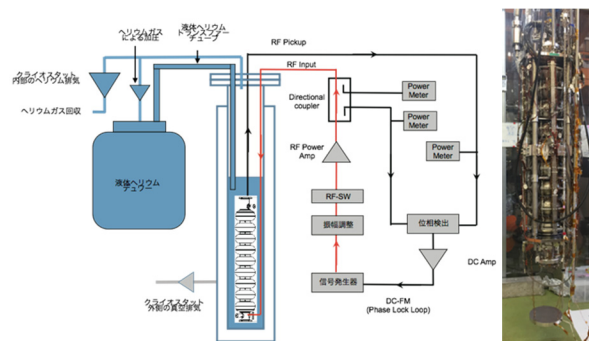


Figure 6: Setup of the vertical test (left). Picture of cavity setup for vertical test (right).

信号発生器からの 1.3GHz の RF 信号は RF アンプにより増幅され、空洞の入力アンテナから空洞内へ入力され

る。空洞の Q 値が非常に高いので、共振のバンド幅が狭く共振を維持するのが困難であるため位相フィードバック回路を用いて共振を維持するようになっている。空洞内の電界はピックアップポートからの RF 信号強度から計測される。加速電界性能試験は入力 RF のパワーを等間隔で増加させていき、その各点で電界強度と Q 値及び外部放射線強度を順次記録していく方式である。

3.3 測定結果

Figure 7 に π モードでの加速電界性能試験の結果を示す。E_{acc} が 29 MV/m のところでクエンチが起き、ILC の目標値である 35 MV/m までは到達できなかった。また、25MV/m を超えたあたりから X 線が発生したことが分かる。

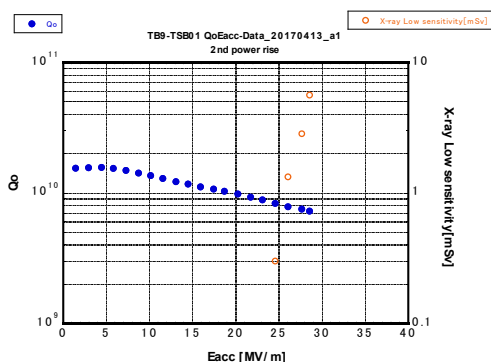


Figure 7: Result of vertical test. Blue solid circles show Q₀ vs E_{acc}. Red open circles show X-ray dose vs E_{acc}.

3.4 温度マップ解析・X 線マップ解析

加速電界性能試験の際に取り付けていた 352 個の抵抗の値を解析することで、クエンチした時の空洞の発熱箇所を温度マップに起こした(Figure 8 left)。この結果から、クエンチした際に 2 cell の 150 度から 210 度の付近で発熱があることを確認した。同様に X 線マップ装置の情報を解析することで、クエンチした際の X 線の発生分布を作成した(Figure 8 right)。

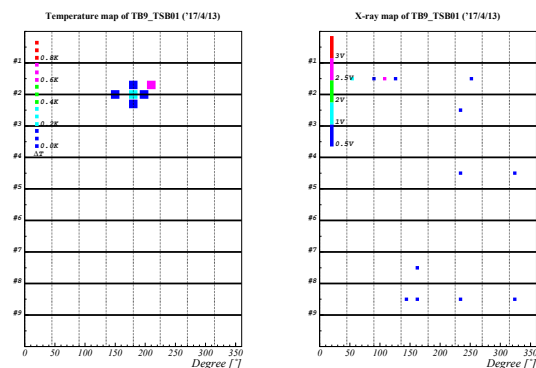


Figure 8: Result of temperature map at around quench field (left). 2 cell equator 210 degrees is a hot spot. Result of X-ray map (right). Strong X-ray is detected at iris between cell 1 and cell 2 120 degrees.

発熱原因が放出電子である場合は、X 線が発熱箇所と同じ角度で検出されるが、本研究の結果では発熱箇所と X 線検出箇所に 90 度のずれがあるため、放出電子により空洞が温められたということは考えづらく、空洞内壁の欠陥により発熱した可能性が高いと考えられる。

3.5 内面検査

発熱が確認された 2 cell に対して内面検査を行った。検査の結果、幾つかのスプッターボールと 2 つの欠陥、が確認された。また、発熱箇所の中に 1 つの局所研磨跡も確認された。

Figure 9 には特に発熱原因の候補と考えられる 2 つの欠陥と 1 つの局所研磨跡を示す。

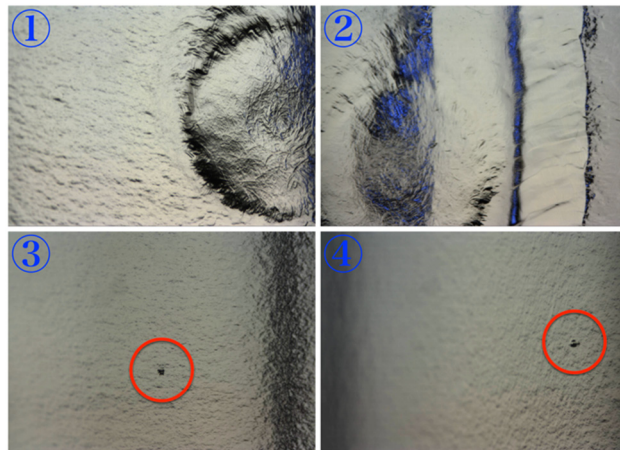


Figure 9: Picture of local grinding mark at 2 cell equator 163 degrees longitude (No. 1 & No.2). Pictures of defect at 2 cell equator 178 degrees longitude (No. 3) and 2 cell equator 77 degrees longitude (No. 4) on inner surface.

4. 測定結果の考察

超伝導加速空洞では、空洞内壁にかかる磁場が Nb の臨界磁場 (200 mT 程度) を越えたときに Nb の超伝導状態が破れ、常伝導状態へと転移 (クエンチ) してしまう。この時、超伝導状態が破れた箇所では RF によるジュール熱が発生するため、クエンチした箇所では発熱が観測される。ピットやバンプのような局所的に内面の角度が急激に変わる場所では、空洞内の磁場が強くなるのが計算から知られているため、そのような部分でクエンチが起ると考えられている[3]。

そこで、Figure 9 の 3 つの候補に対してシリコンを用いて欠陥の型取りを行い、スタイキャストに転写することで欠陥の模型を作成した。そして、作成した模型に対してレーザー顕微鏡を用いて詳細な観察を行った。

Figure 9 No. 3 の欠陥の大きさは長さ方向に約 340 μm であり、高さ約 30 μm の 2 つの山の周りに深さ約 30 μm の谷が出来ているような形状をしていた。Figure 9 No. 4 の欠陥は長さ方向の大きさが約 460 μm であり、大小 2 つのくぼみで形成されており、深さは大きいくぼみで約 35 μm 、小さいくぼみは約 15 μm であった。Figure 9 No. 1, No.2 の局所研磨跡では、中心位置の観察(Figure 10 No. 2)と端の観察(Figure 10 No. 3)を行った。中心位置では研磨による無数の溝が観測でき、溝の深さは約 140

μm であった。局所研磨の端では研磨による段差ができており、その深さは約 $150 \mu\text{m}$ であった。これらの観察結果と温度マップの結果を受けて、欠陥の面積や溝の深さが最も大きい局所研磨跡が発熱原因である可能性が高いと結論づけた。

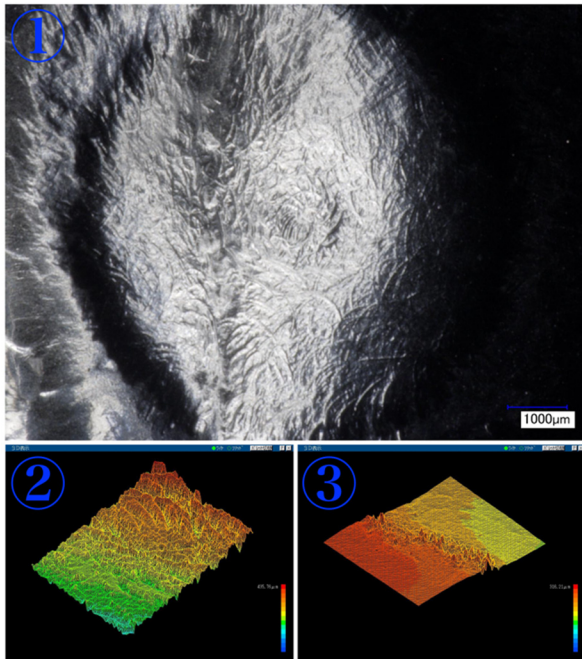


Figure 10: CCD microphotograph of local grinding mark (No.1). 3D scanning image of center of local grinding mark (No.2) and edge of local grinding mark (No.3) using laser microscope.

5. まとめ

本文では、2015年に初めて国内メーカーにより製作された4つの9 cell TESLA 空洞の1つに対して、ILCで採用されている表面処理プロセス、空洞チューニング、内面検査及び局所研磨を紹介しながら、空洞の試験方法とその結果、考察について述べた。試験結果は E_{acc} が 29 MV/m となり、ILCの目標値である 35 MV/m までは達成することができなかったため、その原因究明として温度マップと照らし合わせながら空洞内面の欠陥を探し、発見した欠陥に対してレーザー顕微鏡を用いた詳細な観察を行った。そして、欠陥の大きさや溝の深さから局所研磨跡が発熱原因である可能性が高いと結論づけた。

今後は局所研磨方法について見直しを行い、欠陥を再度研磨し再測定することで、欠陥が発熱原因であったことを確認するとともに、ILCで要求されている性能を達成する必要がある。

謝辞

本研究を行うにあたり、全面的にサポートしていただきました STF の皆様、株式会社ケーバック、日本アドバンステクノロジー株式会社、株式会社ディエム・オリジン、関東情報サービス株式会社の皆様にお礼申し上げます。

また、空洞を製作していただきました株式会社東芝の

関係者の皆様に感謝いたします。

参考文献

- [1] ILC Technical Design Report volume 3 part II ; <https://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>
- [2] 穴戸寿郎, “超伝導空洞の性能評価”, OHO'14 テキスト.
- [3] T. Kubo, “Magnetic field enhancement at a pit on the surface of a superconducting accelerating cavity”, PTEP 2015 No.7, 073G01, DOI:10.1093/ptep/ptv088.