

Lバンド超伝導加速空洞の内面検査システムの開発

田島 裕二郎*1・岩下 芳久*2・早野 仁司*3

Development of Optical Inspection System of L-band SRF Cavity

Yujiro TAJIMA*1, Yoshihisa IWASHITA*2 and Hitoshi HAYANO*3

Abstract

The International Linear Collider (ILC) will require about 15,000 1.3 GHz superconducting radio frequency (SRF) accelerating cavities with high accelerating gradient (>35 MV/m) in its main linac. The high yield (80%) of successful high gradient cavities is necessary. Both of the yield and the accelerating gradient of SRF cavities does not reach the required level at present. We think that the gradient of the SRF cavities is limited by irregularities on the interior surface of the cavities, for example, fine dusts ($1\ \mu\text{m}$), balls ($100\ \mu\text{m}$) and pits ($100\ \mu\text{m}$): electrons emitted from the fine dusts by the tunnel effect are accelerated in the electric field, and consume the stored energy of the cavities (Field Emission). The balls and pits cause a breakdown by a magnetic field enhancement or a thermal current concentration (Thermal Breakdown). To prevent these problems the interior surface are treated by polishing and rinsing. The relation between the surface states and the gradient limitations, however, is still not clarified. To study the relation, we are developing an optical inspection system of the interior surface.

1. 概 要

リニアコライダーではメインライナックに約15,000台の約35 MV/m以上の加速勾配を持つニオブ製のLバンド9セル超伝導(SRF)加速空洞が必要とされる。台数が多いので、空洞を歩留まりよく($>80\%$)生産する必要がある。そのための空洞の製造、特に研磨と洗浄に関するR&Dが世界中で行われている¹⁻⁴。しかし、歩留まり、加速勾配ともに上記の水準に達していないのが現状である。

空洞の加速勾配をリミットしているのは、主にThermal Breakdown (TB)とField Emission (FE)だと考えられている⁵。TBは磁場が強い空洞セルの赤道部において、局所的な凹凸あるいは付着物によって空洞内面が発熱し熱的に超伝導が破れる現象である。その凹凸あるいは付着物はdefectと呼ばれ、表面方向のサイズはLバンドSRF空洞で $100\ \mu\text{m}$ 程度と考えられている。FEは電場の強い空洞セルのアイリス部の付着物からトンネル効果によって電子が放出され、この電子が加速されてRF電力を奪うと同時に、この電子が空洞内面に衝突しその部分を発熱させて熱

的に超伝導を破壊する現象である。この付着物のサイズは $1\ \mu\text{m}$ 程度と考えられている。

このような空洞内面の問題を光学的に検査するために、これまでは空洞を切り取って電子走査型顕微鏡で観察する手法が主に採られてきた。しかしこの手法では、空洞内面の観察後に問題を除去した上で電力投入試験を行うことができない。空洞の内面状態と加速勾配の関係を詳しく研究するためには、非破壊的な検査手法^{6,7}が有効である。非破壊検査は、将来的にILCを建設する時に大量に生産される空洞を、その製造工程でスクリーニングするためにも必要である。

そこで我々はLバンド9セルSRF空洞内面をCMOSセンサカメラで光学的に検査する装置を開発している。主な成果として、FNAL/JLABの共同研究者が電力投入試験時のTB発熱箇所を空洞外壁に取り付けた温度センサによる測定で特定した空洞を、我々がこの装置で内面から検査し、その内壁の異常箇所の位置の同定と形状測定に成功した。Lバンド9セルSRF空洞でTB発熱箇所の非破壊的かつ光学的な観察に成功したのは世界初である。本稿ではこの装置の概要と、この装置を用いて行った数台のLバンド9

*1 京都大学化学研究所
(E-mail: tajima@kyticr.kuicr.kyoto-u.ac.jp)

*2 京都大学化学研究所

*3 高エネルギー加速器研究機構

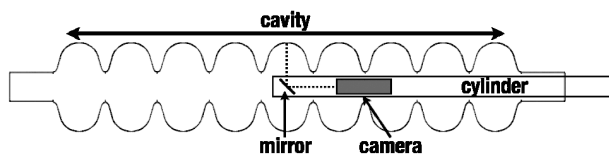


Fig. 1 Schematic diagram of our cavity inspection system. A cavity swallows the camera cylinder by moving longitudinally. The cylinder does not move. The interior surface reflected in a mirror is observed. The mirror is located in front of the camera.

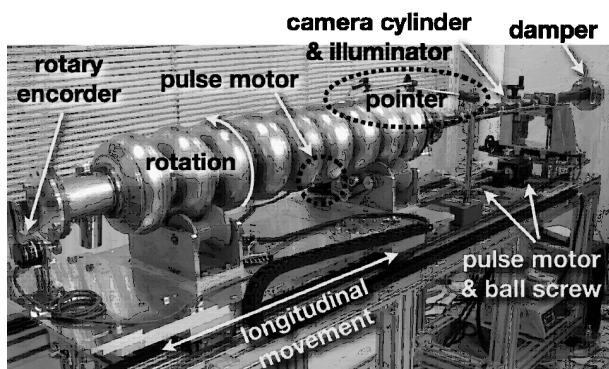


Fig. 2 Overview of our inspection system.

セル SRF 空胴の内面の観察結果について述べる。

2. 空胴内面検査システム

検査装置の概念図を **Fig. 1** に示す⁸⁾。撮影装置を取めたシリンダ（以下、カメラシリンダ）は固定しておき、空胴を前後動させることで撮影装置が空胴内を覗くことができるようになる。カメラシリンダ内部では、カメラは軸方向を向いており、その直前に置いたミラーに空胴内面を映して観察する。

空胴を動かすために **Fig. 2** のステージを用いた。このステージはパルスモータにより空胴を前後動および回転させることができ、カメラシリンダが空胴へ挿入される。空胴の回転角はフランジに取り付けたロータリーエンコーダとモータのパルス数でモニターする。空胴の前後動では、モータのパルス数をリミットスイッチで原点を設定してモニターする。

カメラシリンダはその固定具側に仰角と上下、左右の位置を手動で調整する機構がある。カメラシリンダは片持ちでたわみが問題になる可能性があったので、軽量なものにするために、アルミ製（肉厚 1t）とした。カメラの目標分解能は数ミクロンとした。これに応じてカメラシリンダの振動をこの程度以下に十分早く減衰させる必要がある。そこで、カメラシリンダの

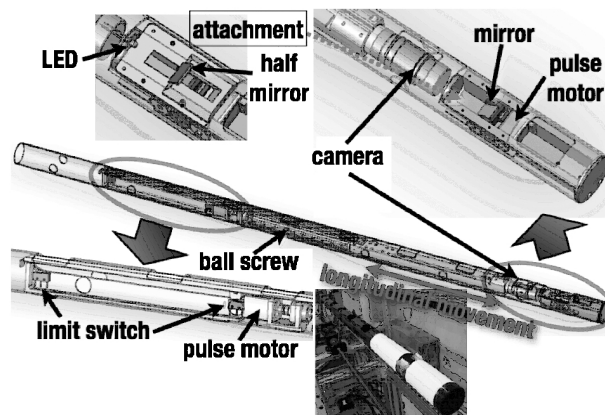


Fig. 3 Inside the camera cylinder. The inset shown in upper right corner shows the or the front illumination explained in Fig. 11.

カメラと反対側に衝撃吸収材を巻き付け、その上にカウンタバランスのためのステンレスのおもりを取り付けた。

カメラには、150 万画素 3 層 CMOS Color Camera (Toshiba Teli, CSF5M7C3L18NR) を用いた。レンズは倍率 0.15 × から 0.35 × の Distortion Lens (V.S. Technology Corp., VS-LD75) を用いた (**Fig. 3**)。倍率は Extension Tube の取り付けによって拡大させており、空胴セルの赤道部で最大 0.70 × である。照明としては、省スペースを念頭において、面発光体 (Electric Luminescence, EL) をカメラシリンダ外表面に貼付けることができる。またミラー周辺に LED を装着することができる。レンズと被写体との距離を調整するために、Linear Actuator (パルスモータとボールねじ) によりカメラをカメラシリンダの軸方向に動かすことができ、これもリミットスイッチとモータのパルス数でモニターする。CMOS センサとレンズの間の距離は Extension Tube を挿入することにより段階的に調節でき、これによりカメラの倍率を変えることができる。

カメラ前方のミラーは空胴内を見渡せるように、鉛直方向とミラー面がなす角度を変えることができる。その駆動機構はユニット内部に収められている。駆動にはパルスモータを用い、回転角度はリミットスイッチで原点を設定し、モータのパルス数でモニターする。

この検査システムは、基本的には、空胴が前後動および回転するだけである (**Fig. 4**)。ミラーやカメラはカメラシリンダ内部で動くだけで、空胴とは干渉しない。我々以外のグループでは撮影機構が空胴内で複雑に動いて、カメラを空胴内面に近づける方式を検討している^{6,7)}。我々のシステムの利点は、空胴内面に

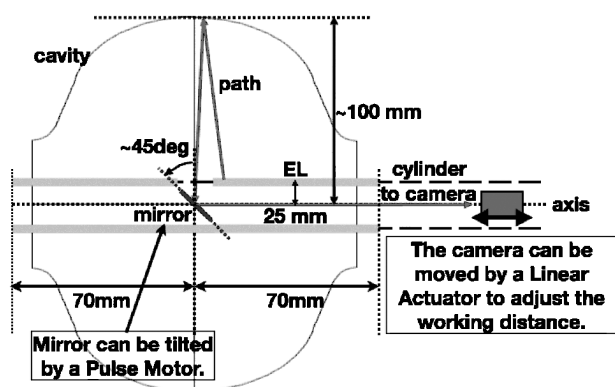


Fig. 4 Schematic description of the cavity inspection.

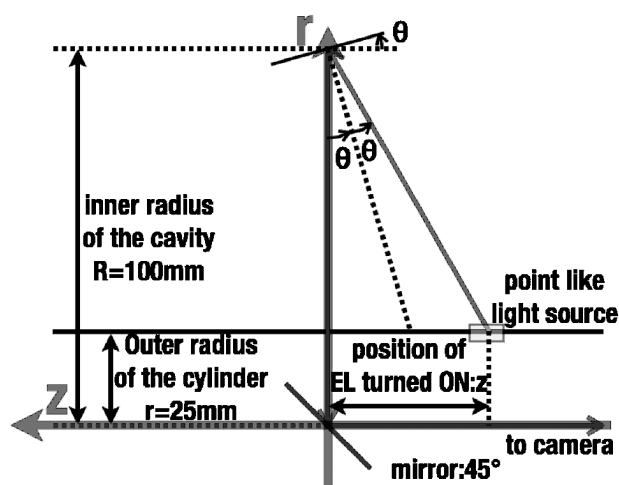


Fig. 6 Schematic drawing of the wall gradient measurement. The wall gradient, the incident angle and the reflection angle are all the same. The value θ can be calculated from the position z of the illuminator.

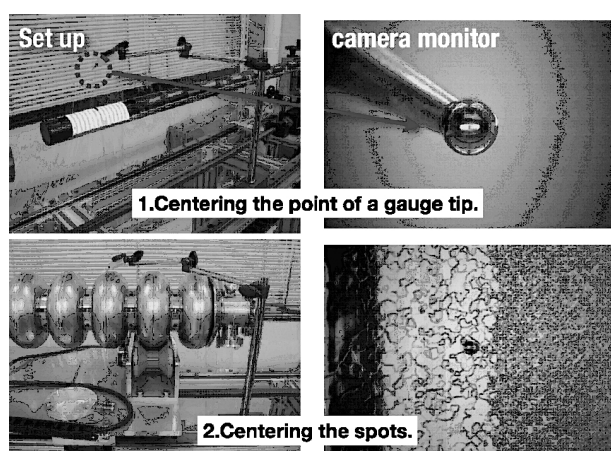


Fig. 5 Pointer to confirm the position monitored by the camera on the exterior wall of a cavity.

傷をつけるリスクが小さく、複雑な動作をするロボットを必要としないことである。加えて、カメラシリンダの外径が空洞の最小内径 60 mm に対応して外径 50 mm となっており、カメラシリンダの肉厚やその他配線などを考慮しても、カメラの設置に直径 40 mm 程度の空間がある。また同軸方向にはほとんど空間的な制約がない。従って、ピクセル数が多い大きい光学センサを装備できる。弱点は、ワーキングディスタンスを空洞の半径以下に小さくすることができないので、分解能がレンズによって決まることである。

Fig. 5 のポインタは、カメラ画像の中心と空洞外表面上の位置の対応を取るための装置である。空洞の温度測定では空洞外表面上に温度センサを取り付けて高周波電力を注入し、空洞外表面の温度を測定する。ポインタがあると、この温度測定のセンサ位置とカメラ画像の中心位置との対応が取りやすくなる。もちろん、空洞の前後動と空洞の回転角は上述の通りモニタしているの、そこからカメラ画像の中心と空洞上の

位置の対応を取ることも可能である。使い方は、最初にポインタ先端をカメラ画像の中心に合わせておき、この状態でミラー角度等を変化させずに空洞を移動してカメラで内壁を観察すれば、カメラ画像が空洞のどこを写しているかが空洞の外側から確認できるというものである。

3. 空洞内面傾きの測定

空洞内面に鏡面状の局所的な凹凸がある場合、照明位置とミラー角度から内面の傾きを測定することができる。この傾きを積分すれば空洞内面の高さが計算できる。

この傾き測定の原理は、空洞内面が鏡であることと、照明が指向性のない点光源であること、及び、ミラーの角度が鉛直方向に対して 45° であることを仮定すると、点光源から空洞への照明光の入射角(反射角)が空洞内面の傾きに等しいことにある (Fig. 6)。簡単のために、主な観察ターゲットは空洞セルの赤道部とアイリス部など空洞壁面が水平な領域とする。空洞の回転軸を z 軸とする円柱座標系上で、空洞は θ 方向に一様であるとし、 r - z 平面内で考える。空洞の内径を R 、ミラーの中心を原点とするときの点光源の位置を (z, r) とすると、空洞内面の傾き θ は以下のように求められる。

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \frac{z}{R-r}. \quad (1)$$

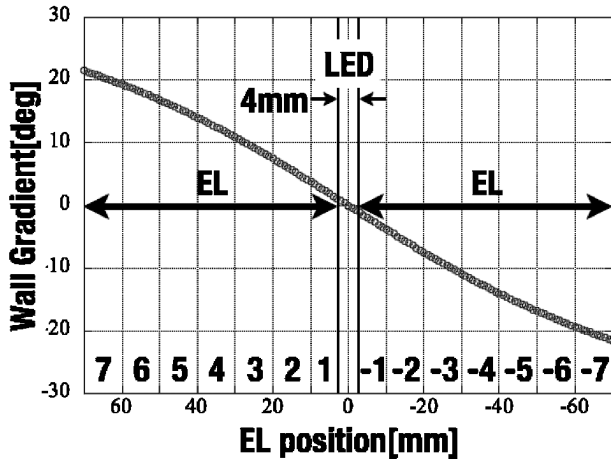


Fig. 7 Measurable wall gradient by the stripe illumination (denoted by EL) and the front illumination (denoted by LED). The numbers shown in the bottom of this figure correspond to the numbering of EL stripes shown in Fig. 8.

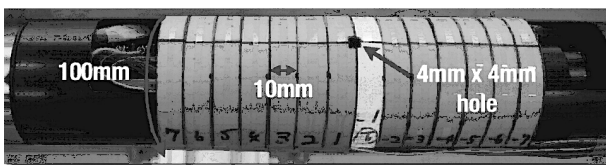


Fig. 8 Stripe illuminator. The mirror is located under the hole between the two stripes numbered #1 and #-1. These fourteen stripes can be independently turned ON/OFF.

この式が意味するのは、ミラーに写った空洞内面をカメラから見るとき、 (z, r) の位置にだけ照明があると、式(1)で与えられる θ の傾きを持つ空洞内面のみが光って見えるということである。従って照明位置 z をスイープすることによって空洞内面の傾き θ の測定ができる (Fig. 7)。ここでは、空洞内面上におけるカメラの有効視野が数 mm と狭く、かつまた、スポットサイズが小さいので (1 mm 以下)、内面上の位置の違いによる角度の違いは無視し、エラーに含める。

実際の測定において照明位置のスイープは、Fig. 8 の様に幅 10 mm の 14 個の短冊状 EL をカメラシリンダ外周に取り付け、個々の EL を独立に ON/OFF することで実現した。このとき、ある一つの短冊状 EL だけを ON にした状態で空洞内面を見たときに、ある場所が光っているとす。式(1)の z に、今 ON にしている短冊状 EL の中心位置を代入すれば、空洞内径 R (赤道部で約 100 mm, アイリス部で約 70 mm) とシリンダ外径 $r=25$ mm はわかっているの、その

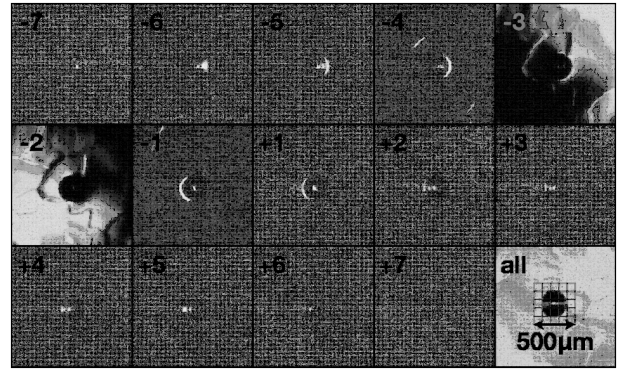


Fig. 9 Pictures taken by the stripe illuminator. The number in the upper left corner of each picture shows the illuminator turned ON shown in Fig. 8. The shift of the illuminated region from right to left can be seen.

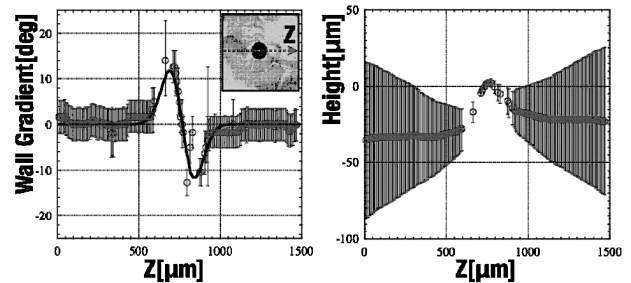


Fig. 10 Wall gradient (left) and the relative height (right) of the spot shown in Fig. 9, on the broken line in the inset of the left figure. The curve in the left figure is the fitted differential gaussian.

光っている場所の傾きが短冊状 EL の幅 10 mm に対応する精度で測定できる。

この短冊状 EL を用いて撮影した空洞内面のピットのサンプル画像を Fig. 9 に示す。以下、カメラ画像上に見つけた異常一般をスポットと呼ぶ。この例では、照明位置のスイープによってスポット中心の光っている領域が右から左へ動いていく。この様子を、式(1)を用いて z 軸に平行な直線上の傾きとしてプロットすると Fig. 10(左)のようになり、またこのデータを画像中心 $z=735$ [μm] から両側へ積分すると Fig. 10(右)のようになる。これらから、このスポットがピットであることがわかる。このデータからスポットの高さ/深さをガウシアン型のバンプを仮定して計算する。Fig. 10(左)の傾きのデータをガウシアンの微分でフィットすると、このスポットの場合の深さは 26 [μm] となる。

Fig. 8 を見るとわかるように、短冊状 EL の中心の

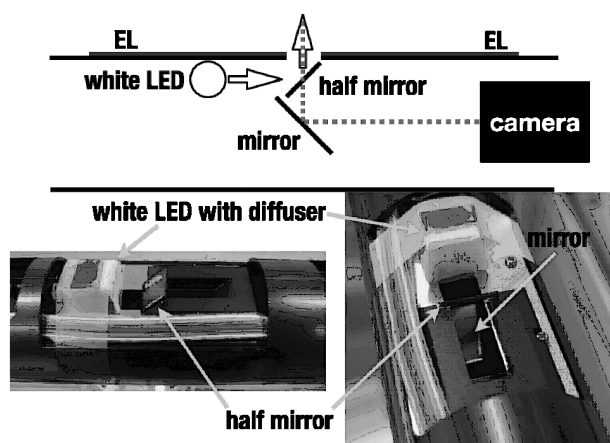


Fig. 11 Schematic layout and pictures of the front illumination.

覗き穴 (4 mm×4 mm) の部分には照明がない. このことは, $-2 \text{ mm} < z < 2 \text{ mm}$ に対応した範囲の傾き θ が測定できないことを意味する. この問題を回避するために, Fig. 11 の様な機構を用いた. これはミラーの上部にハーフミラーを取り付け, そこにカメラシリンダの軸と水平な方向から LED によって光を入射するものである. これによって空洞内面の傾き 0 度近傍の測定が可能になる.

4. 空洞内面の観察

4.1 ZANON #84

Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY) から L バンド 9 セル SRF 空洞 (TESLA 空洞) を借りて, 空洞セルの赤道部の電子ビーム溶接 (Electron Beam Welding, EBW) 部近傍 10 mm 程度の範囲内の内面検査を行った. この空洞は DESY での CW 電力投入試験において, Q 値が上がらなかったと報告されており, その原因は空洞内表面への水素吸蔵による表面抵抗の増加 (Q-disease)⁹⁾ とされている. Pass band mode 測定では, 加速勾配 27 [MV/m] を記録しており, 9 つあるセルの内, いくつかの内面状態は欠陥の少ないものであることが予想される. Pass band mode 測定とは, 空洞全体が 9 つの結合共振器から構成されていることから, モードの違いによる電磁場分布の違いを利用して, 欠陥のあるセルを同定する方法である.

ZANON#84 の空洞セルの赤道部 EBW 部近傍の内面観察によって得られた, 空洞内面の欠陥らしきスポットの代表的な画像を Fig. 12 に示す. 分解能は 15 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ で短冊状 EL での傾き測定は行わなかった. 空洞内には図に示した猫の目を 90 度回転したよ

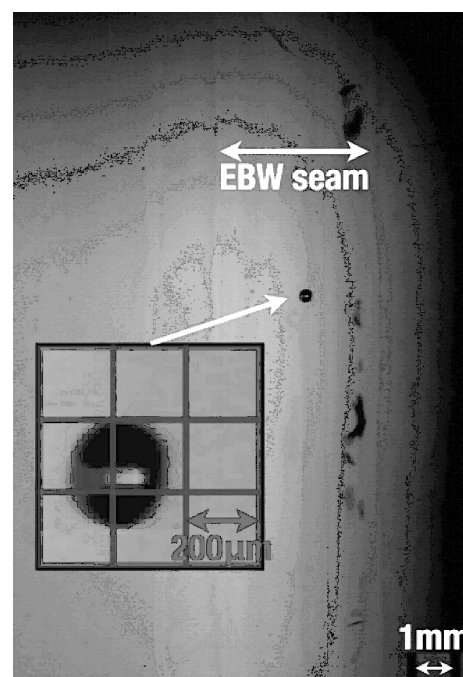


Fig. 12 Example of the cat's eye spot found on the equator region of ZANON#84.

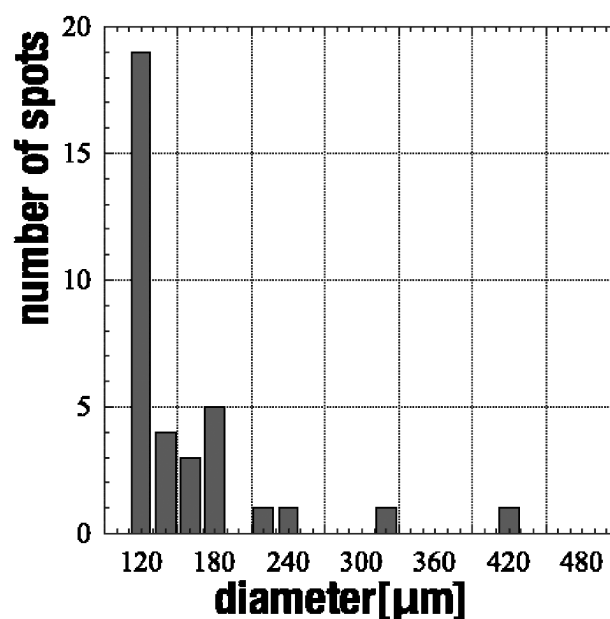


Fig. 13 Diameter histogram of the cat's eye spots of ZANON#84. The total number of the spots ($> 100 [\mu\text{m}]$) is 35.

うな形状のスポットが数多く見つかった. 直径で 100 μm 以上の 35 個について統計を取ったところ Fig. 13 のようになった. この結果からさらにサイズの小さい同様の形状のスポットが数多く存在することが予想される. このスポットも, 空洞内面同様, 鏡面であ

ると仮定すると, 上部と下部の黒く写っている部分は, EL光源から出て反射した光がミラー方向に行かないような傾きがついていると考えられる. 中心部分が帯状に光っていることから, Fig. 9, 10 で見たような凹凸であることが予想されるが, 凹か凸かは判断できない. またモデル計算によれば, 直径で 100 [μm] 程度以上のものは TB の原因となる defect である可能性がある.

4.2 AES #001

Fermi National Accelerator Laboratory (FNAL) から Lバンド 9セル SRF 空胴 AES#001 を借りて, 内面検査を行った. この空胴は Jefferson Lab (JLAB) で製作され, FNAL で CW テストが行われた空胴で, TESLA 空胴と同じ形状である. 内面処理の方法も TESLA 空胴に近いが, バレル研磨という方法による 1 mm-0.1 mm 程度の凹凸の除去が行われていないのが特徴である. CW テストでは, FE が観測されることなく, 加速勾配 15 [MV/m] で TB によるクエンチが起こったと報告されている¹⁰⁾. Pass band mode 測定も行われ, クエンチに参与しているセルが, #3 と #7 セルに特定されている. また温度センサを用いた測定により, CW テスト時の #3 セルの赤道部の発熱が測定された (Fig. 14 (左)). 図中で, 4, 5 とナンバリングされた温度センサだけが特に高温になることが観測され (Fig. 15), その発熱場所が ±5 [mm] (温度センサの幅) 程度の範囲で特定された. この結果を受け, 温度上昇が観測された #3 と #7 セルを中心に, 全セルの赤道部とアイリス部の EBW 部を内面観察した. 画像の分解能は 7.35 [μm/pixel] である.

まず FNAL で見つかった #3 セル赤道部近傍の局所的な発熱場所を調べたところ, Fig. 16 と Fig. 17 に

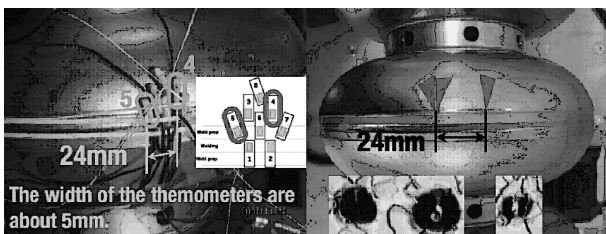


Fig. 14 Positions of the two hot spots found at FNAL (left) and positions of spots found at Kyoto (right). The inset of left figure shows the location of the thermometers. The two thermometers (#4 and #5) that showed abnormal temperature rise are marked. (Courtesy of FNAL/JLAB.)

示すように, 1 [mm] 程度に隣接した直径 600 [μm] 程度の 2 つのスポットと離れた場所にさらにもう 1 つ直径 400 [μm] 程度のスポット, 合計 3 つのスポットが見つかった. 3 つとも ZANON#84 に見つかった cat's eye に似て見えるが, Fig. 16 の 2 つのスポットは, 光らない部分が局所的にあった. このスポットの位置を, ポインタを用いて空胴外壁面上にマークすると Fig. 14 (右) の様になった. これを FNAL での温度測定 (Fig. 14 (左)) と比較したところ, 一致した.

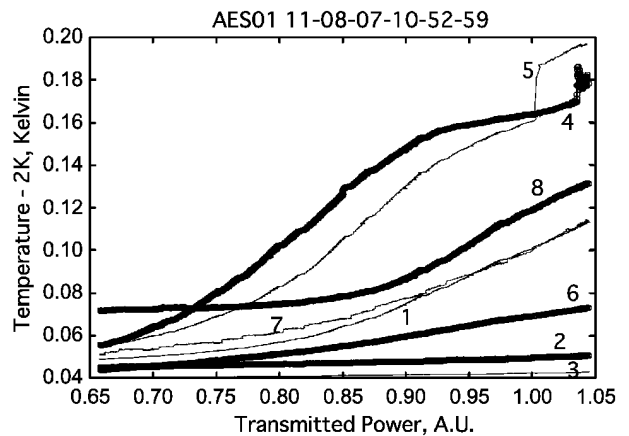


Fig. 15 Temperature of the exterior wall of AES#001 in the CW test, measured by the thermometers shown in Fig. 14 (left). (Courtesy of FNAL/JLAB.)

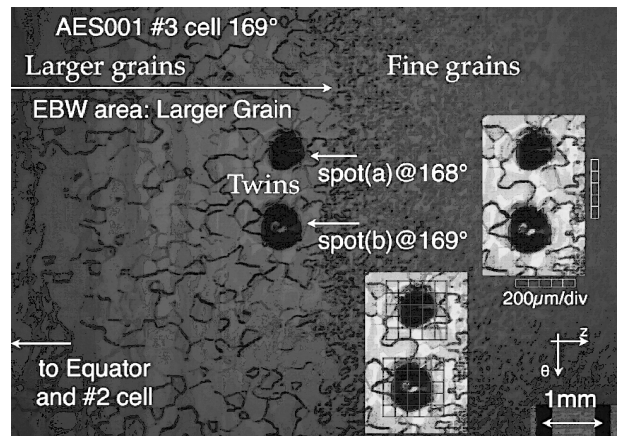


Fig. 16 Two spots found at the equator region of #3 cell. The azimuthal position of the spot (a) is 168 deg and the spot (b) is 169 deg. The diameter of both of the two spots is about 600 [μm]. The larger grain size of the left half of the picture indicates an area of the EBW seam. Insets show the same locations with enhanced brightness. Both of the two spots look like the cat's eye spots found in ZANON#84, but these spots are locally dark.

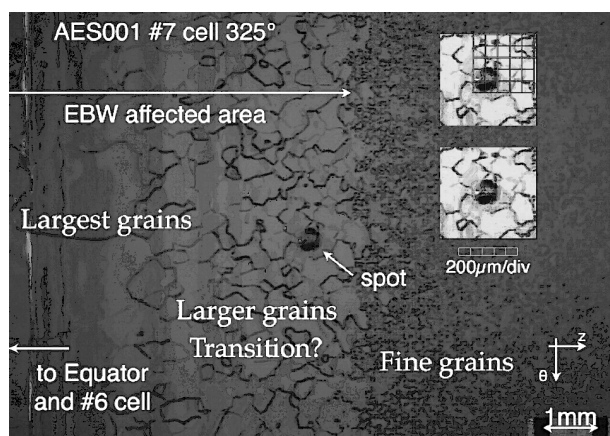


Fig. 17 Cat's eye spot found at the equator region of #3 cell, 181 deg. The diameter of the spot is about $400 [\mu\text{m}]$.

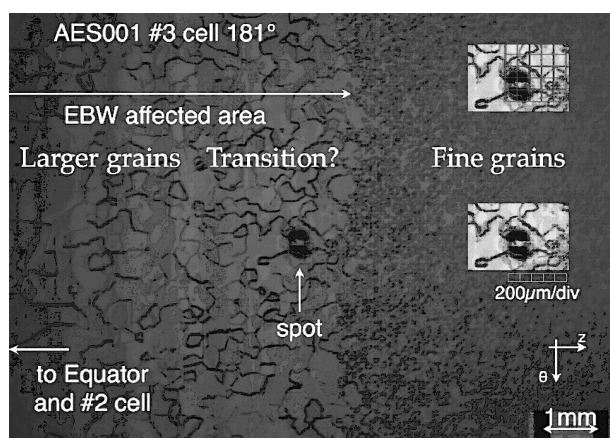


Fig. 18 Cat's eye spot found at the equator region of #7 cell, 325 deg. The diameter of the spot is about $400 [\mu\text{m}]$.

次に、pass band mode 測定において #3 セルとともに TB に関与していると判断された #7 セルの赤道部内面を調べたところ、**Fig. 18** に示すようなスポットが見つかった。これも ZANON#84 に見つかった cat's eye に似ている。最後に、他に残った赤道部及びアイリス部の EBW 部近傍を観察したところ、赤道部近傍にはシミのようなものが見つかった。アイリス部には FE か放電の痕跡らしきものや、何らかのしずくが乾いたような痕跡、引っ掻き傷のようなもの、また EBW 時に空洞がしっかり溶けていなかったことを示していると思われるクラックなどが見つかった。

Fig. 16-18 のスポットに対して、短冊状 EL による傾き測定を試みた。結果を **Fig. 19-21** に示す。**Fig. 16** の 2 つのスポットはスポット中心部分に光ら

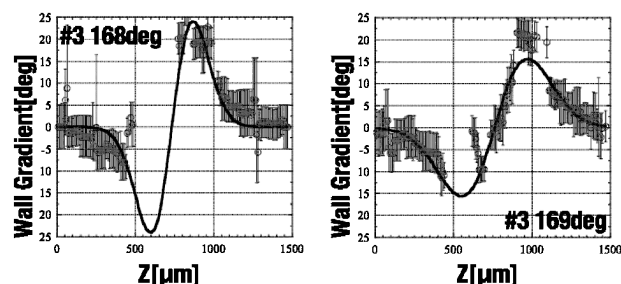


Fig. 19 Wall gradients of the spot (a) (left) and (b) (right) shown in Fig. 16. These data show that both of the spot (a) and (b) is a convex (ball). The black curves are the fitted differential gaussians. From the fitted differential gaussians, the height of the spot (a) is $1.0 \times 10^2 [\mu\text{m}]$ and that of the spot (b) is $97 [\mu\text{m}]$.

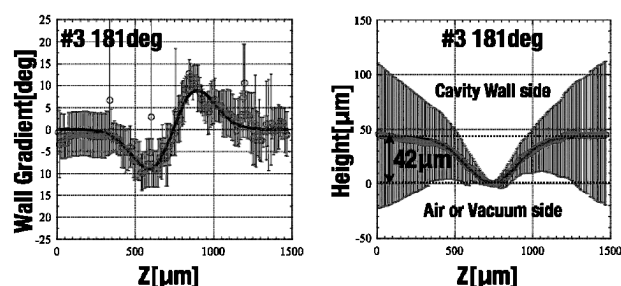


Fig. 20 Wall gradient and height of the spot shown in Fig. 17. These data show that the spot is a convex (ball). The black curve in the left figure is the fitted differential gaussian again, from which the height of the spot is $40 [\mu\text{m}]$. The black curve in the right figure is the fitted gaussian, from which the height of the spot is $42 [\mu\text{m}]$.

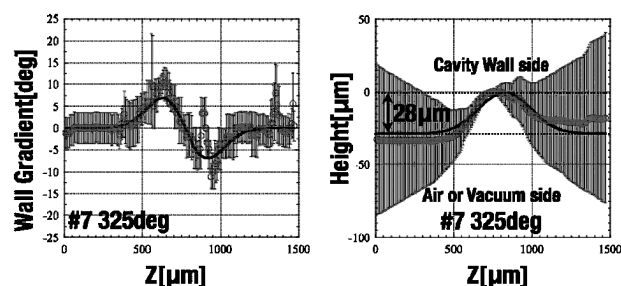


Fig. 21 Wall gradient and height of the spot shown in Fig. 18. These data show that the spot is a concave (pit). Again, the black curve in the left figure is the fitted differential gaussian, from which the height of the spot is $29 [\mu\text{m}]$. The black curve in the right figure is the fitted gaussian, from which the height of the spot is $28 [\mu\text{m}]$.

ない部分があり、この部分のデータが得られなかった。このことは傾きのデータが不連続になることを意味している。このような不連続な傾きのデータはそのまま積分しても、もっともらしい形状を示さない。そこでガウシアン型のバンプを仮定して、その微分で傾きデータをフィットして高さを算出した。もちろんこのような形状である確証はない。残りの2つのスポットは中心部分が帯状に全域にわたって光り、連続なデータが得られたので、ガウシアンフィットの他に、傾きデータの積分結果も同時に示してある。

5. 結 論

Lバンド9セルSRF空胴において加速電場勾配を制限する要因を調べるために、CMOSカメラによる空胴内面検査システムを開発し、最高で7.35 [$\mu\text{m}/\text{pixel}$]の分解能での空胴内面の観察を可能にした。この検査装置を用いてZANON#84とAES#001の2台のTESLA型空胴について、その赤道部およびアイリス部のEBW部近傍の空胴内面を観察した。その結果、空胴内にTBのdefectらしいスポットが複数個見つかった。特に4つのスポットが見つかったAES#001では、pass band mode測定との発熱セルに関する相関が取れたことに加え、温度測定によるさらに詳しい発熱位置の調査結果と我々の検査システムで見出したスポット位置が一致した。またこれら4つのスポットの高さを短冊状ELによって測定した結果、100 [μm]程度の凸形状2つと40 [μm]程度の凸形状1つ、100 [μm]程度の凹形状1つであることがわかった。特に凸状のバンプについては、バレル研磨の必要性を示唆する結果となった。その他、空胴の最大加

速勾配と関係があるかはわからないが、これまで知られていなかった空胴内面に関する情報を提供できた。

cat's eyeのスポットサイズと平均加速勾配の関係について、TBに関するモデル計算¹¹⁻¹³と実験結果の比較をFig. 22に示す(横軸はdefectの半径)。ZANON#84, AES#001とも内面検査前の最後のCWテストでのField Limitの原因が、今回見つかったdefectらしいスポット(径が最大のもの)であると仮定している。データ数が少ないが、モデルと実験結果は矛盾しない。

計算では熱源として常伝導状態のニオブを仮定しているが、ニオブ以外の付着物が熱源になっている可能性もある。特にAES#001の測定ではFig. 16の2つのスポットにおいて、ガウシアン形状のバンプを仮定した傾きのガウシアンフィットによれば、短冊状ELでの傾きの測定が可能はずなのに、部分的に反射光の強度が足りずデータが取れなかった部分がある(Fig. 19)。この部分にはなんらかの付着物がついていて、その乱反射によって暗く写った可能性がある。付着物の候補として研磨に用いられるチタンやアルミが考えられる。洗浄が不十分だと、これらが空胴内面に付着している可能性がある。電気伝導率は常温でニオブの 6.93×10^6 [S/m]に対して、チタンが 2.34×10^6 [S/m]で電気抵抗にするとニオブの2.96倍、アルミは 3.37×10^7 [S/m]で電気抵抗にするとニオブの0.205倍である。そこでこれらを熱源と考えて、それぞれ表面抵抗を単純に3倍、0.2倍としたときの計算結果もFig. 22に示した。この結果からは、これら異種金属も熱源の候補として考えられる結果となった。この結果をはっきりさせるためには質量分析などの別の手段が必要だろう。

空胴内に見つかったcat's eyeスポットがどのように発生するかについては諸説ある。一つは、空胴内に含有不純物があって、EBW時などの空胴が高温になって柔らかくなっているときに、その不純物が気化してニオブが風船状に膨らむという説であり、この風船が弾ければピットができ、あるいは風船が弾けなければボール状になる。特にQ-diseaseだと言われているZANON#84については、空胴内に凝集した水素が風船を作ったということが考えられる。また、ボール状のものについては、EBW時に飛び散ったスパッタボールだと言う説もある。まだ他にも仮説はあるだろうが、AES#001については今回の検査結果を踏まえて空胴内面をバレル研磨した後に、再び内面検査を行えばボールの中身がはっきりするかもしれない。ZANON#84については、同様にQ-diseaseが報告さ

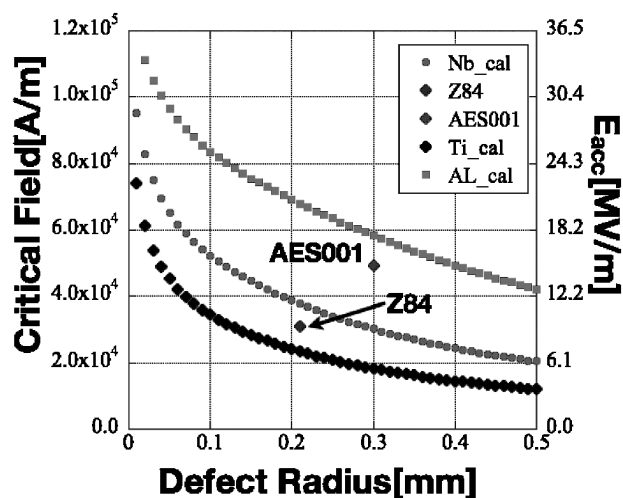


Fig. 22 Critical field as a function of defect radius.

れている他の空洞の検査が必要だと考える。これに限らずいろいろな内面処理の前後での内面検査により、その処理の結果を評価することができそうである。

今回測定した空洞は2台とも問題を抱えている空洞であったが、安定して高い加速勾配が出せる空洞も検査して、今回の結果と比較することが必要である。また温度測定や質量分析など他の検査システムとの併用は必須である。我々の検査システムを生かして、さらに高い加速勾配が歩留まりよく出せる空洞製作のレシピ作りが進むことを期待する¹⁴⁾。

謝辞

検査装置及び空洞に関する情報を提供して下さったSTFグループの方々(KEK)に感謝します。ZANON # 84 空洞を貸していただいたLutz Lilje氏(DESY), AES#001を貸していただいたFNALとJLABの方々に感謝します。

参考文献

- 1) H. Padamsee, *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, **15**, p. 2432 (2005).
- 2) H. Hayano, Proc. of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan, p. 218 (2007).
- 3) L. Lilje, Proc. of LINAC2002, Gyeongju, Korea, p. 219.
- 4) J. Knobloch, *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, **9**, p. 1016 (1999).
- 5) H. Padamsee, J. Knobloch and T. Hays, "RF Superconductivity for Accelerators". John Wiley, New York, 1998.
- 6) K. Saito, Proc. of the 21st Linear Accelerator Meeting in Japan, p. 219.
- 7) T. Harden, M. Borden, A. Canabal, P. Pittman and T. Tajima, Proc. of PAC07, Albuquerque, New Mexico, USA, p.2.
- 8) Y. Tajima, Y. Iwashita, M. Ichikawa and H. Hayano, Proc. of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan, p. 460 (2007).
- 9) T. Higuchi, Ph.D. thesis, The Graduate University for Advanced Studies (2002).
- 10) C. M. Ginzburg, R. L. Geng, J. Ozelis and D. A. Serfaty, private communication.
- 11) H. Padamsee, D. Proch, P. Knisel and J. Mioduszewski, *IEEE Trans. MAG-17*, p. 947 (1981).
- 12) H. Padamsee, T. Tuckmantel and W. Weingarten, *IEEE Trans. MAG-19*, p. 1308 (1983).
- 13) H. Padamsee, *IEEE Trans. MAG-19*, p. 1322 (1983).
- 14) H. Weise, Report from the TTC Technical Board Meeting, Tesla Technology Collaboration, DESY, (2008).