

HIGH RESOLUTION INSPECTION CAMERA FOR SUPERCONDUCTING CAVITY

Y. Iwashita^{A)}, Y. Tajima^{*A)}, K. Watanabe^{B)}, H. Hayano^{B)}

^{A)} Kyoto University, Gokanosho, Uji, Kyoto, Japan 611-0011

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization(KEK), 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, Japan 305-0801

Abstract

High resolution camera system for inspection of cavity interior surface was developed. It enables an observation of almost all of interior surface of a superconducting cavity and is a useful tool for improving production yield of such cavities. It showed some defects on the cavity surface at the locations predicted by passband-mode and thermometry measurements previously performed by FNAL/JLAB. In addition to the high resolution, it can show a high/depth information of a defect by Stripe Illumination Method.

超伝導空洞の高分解能検査カメラ

1. はじめに

Wall lossが少ないために超伝導空洞は常伝導空洞と比較してCW運転や高電界加速に有利な点を持っている。L-BANDにおいては10年以上開発の歴史があり、加速勾配は徐々に向上して来ているが、XFELやILC等への適用を考えた場合、その歩留まりはまだ充分とは言い難い状態である[1,2,3,4]。

L-BANDの空洞では通常串団子型の構造を持っていて、板材をプレスでお椀状に加工し、それを2つを電子ビーム溶接(EBW)で接合し、ダンベル形状もしくはボール形状の部品をまず作る。次に、赤道部(腹)及びアイリス部(節)のEBWを行って全体を成型する。赤道部のEBWはその形状上、検査が困難な部位であるが、その溶接シームは全体が組み上がった後、内面の機械的、化学的研磨などの表面処理が行われるため、少々欠陥は修復されると思われる。これを検証するには実際に観察することが有効であろう[5,6]。高電界化への障害としては、いくつかの原因が考えられているが、まずthermal break down[7]の原因となりうる百マイクロオーダーのニオブ表面上の異常を見つけるべく可視光領域での高分解能カメラシステムの開発を行った[8,9]。

2. カメラ部

このカメラの概略構造を図1に示す。カメラ自身はレンズと共に直径40mmのシリンダーの中に置かれ、鏡を使って空洞内壁を見ることができるようになっている。このシリンダーは固定されていて、空洞の方が回転、前後運動をし、空洞全面を走査できるようになっている。鏡は遠隔操作で角度調整可能で、赤道部とアイリス部間の壁面の立ち上がり部分も正面近くから観察可能になっている(図2参照)。このレンズカメラ対はピクセル当たり7.5 μm 程度という高解像度のため高倍率であり、被写界深度が100 μm 程度となっているので、この角度調整機能は立ち上がり部の観察に重要となってくる。シリンダー内の空間が狭いため、レンズのみの遠隔操作は行わず、固定焦点とし、レンズカメラ対を遠隔操

作によるパルスモータ駆動で前後動かせることにより、焦点を合わせる。このため、ピクセル当たりの解像度は固定となる。使用したカメラは1.5Mピクセルの三層CMOSセンサーを使ったもので(東芝テリ-CSF5M7C3L18NR)、Cマウントである。レンズは低歪みレンズ(VS-LD75、VSテクノロジー)を拡大率0.7倍で使っている。この倍率はレンズ先端と被写体との距離(WD: Working Distance)で制限され、空洞赤道部の内半径+鏡とレンズ間のデッドスペースで決まる。リアコンバーターを使うことにより拡大率を上げる事はできるが、センサーへの光量が

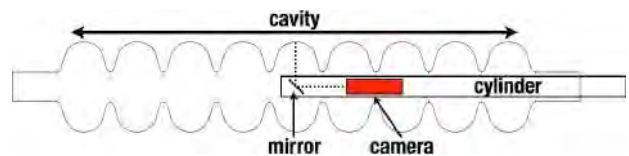


図1 Schematic diagram of our cavity inspection system. A cavity swallows the camera cylinder by moving longitudinally. The cylinder does not move. The interior surface reflected in a mirror is observed.

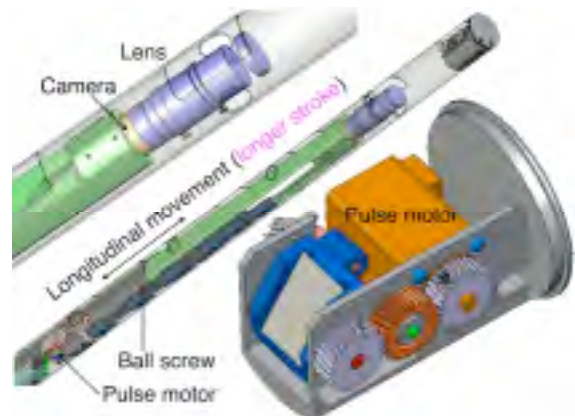


図2 Inside of the camera cylinder. The inset shown in upper right corner shows the mirror and its drive PM. The camera moves for focal adjustment. The EL sheets for the illumination are shown at the bottom.

* Present Address: (株)東芝 電力システム社

幅に減るため、現状のままでは現実的ではない。また、空洞内面の全面を合理的な画像情報量と時間で撮影しようとする、適度な解像度を持たせる必要があり、現在の解像度はほぼ適当な値となっている。

3. 照明

空洞内面は電解研磨(EP)等の表面処理が行われるため、結晶粒界以外での数ミクロン以下の凹凸はほぼ無くなるようである。このため、内面はマイクロにはほぼ鏡面であり、またマクロにも反射率が高いため、その表面を観察する際には照明が難しい。カメラに像が映るためには光がカメラセンサーに入る必要があるが、このためにはカメラの視線方向から光が来る必要があると言うことであり、被写体がほぼ鏡面であることを考えると、被写体の各点に対応する光源の位置に厳しい条件が付く。逆に言えば点光源では視野全体からの情報を得ることが難しい。このため、面発光体のELシートをシリンダー表面に貼り付ける構造を採った。これはELシートを映し込んだ空洞内の鏡面を観察していることになり、表面が光を反射しない状態になっているか、角度が大きすぎてELシートを映し込めない状況が観測できる。結晶粒界はローカルに比較的大きな勾配を持っているようで、コントラストを調整することにより観測することができる。これは、二回以上反射した光も強度が減っているとはいえカメラの視線に来得るので、コントラストを調整すれば目立たなくすることができると言うことである。

4. Z84空洞の観察

図3はDESYから借りたZ84空洞の観察時の様子である。この空洞に対しては、空洞セルの赤道部のEBW部近傍10mm程度の範囲を解像度約 $15\mu\text{m}/\text{pixel}$ で観察した。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)とされている。Pass band mode測定では、加速勾配 $27[\text{MV}/\text{m}]$ が記録されていて、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。

この空洞では図4に示すように猫の目のような形をしたスポットが見えた。小さいものは多数あったが、 $100\mu\text{m}$ 以上のサイズのスポットは35個あり、

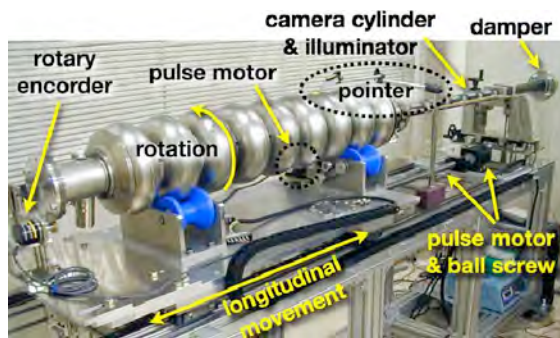


図3 Overview of the inspection system.

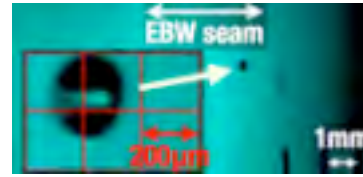


図4 Typical image obtained for Z84. Many cat's eye shaped spots were observed.

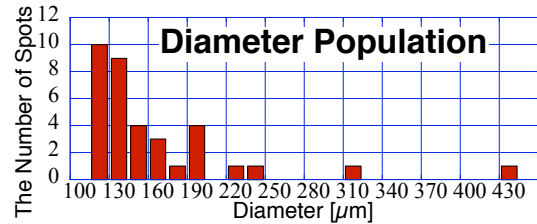


図5 Population of diameter from Z84 observation.

その統計をとったのが図5である。これからも小さなスポットが数多く存在することが示唆される。これらはすべてEBWシームの中心からずれ、かつインプットコプラサイドに偏在していた。EBW時の姿勢やビームの角度、強度などの条件が適当でない可能性がある。

5. AES001空洞の観察

AES001はFNALから借りたJLABで製作された空洞で、FNALでCWテストが行われた際にはFE(Field Emission)が観測されることなく、 $15[\text{MV}/\text{m}]$ でクエンチが起こっている。この空洞ではバレル研磨が行われていない。Pass band mode測定により、クエンチに関与しているセルが、#3と#7セルに特定されている。さらに温度分布測定(T-map)においてRF入力時の#3セルでの局所的な温度上昇により、温度センサーの大きさの分解能で発熱場所が特定されている(図6参照)。図中#4と#5がそれであるが、その間の#3と#6が反応しないのが当初不思議であった。この空洞の内面をこのカメラで観察したところ、図7右に示すような $400\sim 600\mu\text{m}$ の

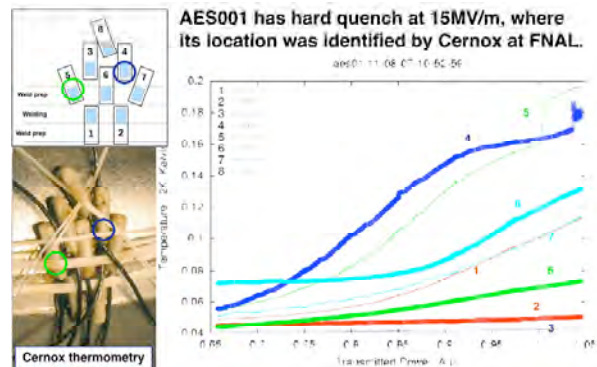


図6 Positions of the thermo-sensors used at FNAL (left) and the temperature rise (right). The two thermometers (#4 and #5) that showed abnormal temperature rise are marked. (Courtesy of FNAL/JLAB.)

サイズの三つのスポットが見つかった。これらのうち大きい方は約1mm程度の距離を持つ双子で、T-mapの分解能では一つに見える。これらもあまりはっきりしないが、猫の目形状を示す。また、三つともほぼ一直線上に並んでいて、かつEBWシームの中心上ではなく約1cmずれている。更に#7セルにも同様な特徴を持つスポットが一つあった。図8に#3セルの小さい方のスポット廻りの写真を示す。図中左側がシーム中心で結晶粒界が大きく、右側に結晶粒界の細かい領域が見えるのが元のNb表面である。これらのスポットはこれら2つの部分の遷移領域に位置している。

6. 高さ測定

これら単なるカメラで観察しただけの情報では出ているのか、凹んでいるのかの情報がない。しかし、空洞内面がほぼ鏡面である事を利用すれば光源の大きさを制限し、その場所を変えながら観察することにより対応する角度を持つ場所を見つけることができる(図9参照)[8]。これは、ELシートを図10のように分割して発光させることにより実現でき、これにより測定した傾きが図11左である。このように傾きデータが稠密であれば積分することにより表面の形状が推測でき、この場合、 $42\mu\text{m}$ が得られる(図11右)。高さは空洞中心からの距離で表現されているのでこの場合、凸形状であることが判る。

スポットによってはどのELストリップ位置から光も反射しない場所があり、傾きのデータが歯抜けになるが、その場合でも断面形状を例えばガウシアンだと仮定すればその微分で傾きデータをフィッティングすれば高さの推定は可能である。

現在、量産機的设计を終えたところで、関連機関に供給できる体制を整えているところである。

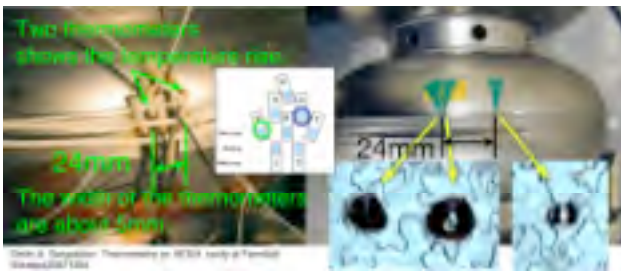


図7 Positions of the two hot spots found at FNAL (left) and spots optically found at Kyoto (right). The locations coincide with each other.

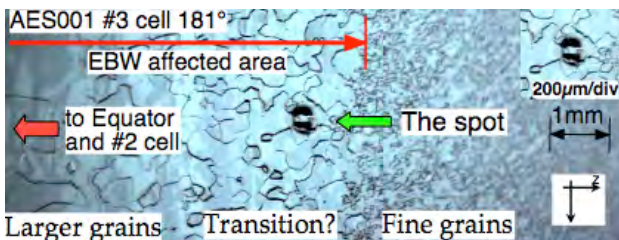


図8 Cat's eye spot found at the equator region of #3 cell, 181deg. The diameter is about $400[\mu\text{m}]$.

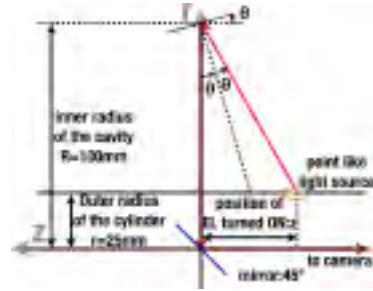


図9 Schematic drawing of the wall gradient measurement. The wall gradient, the incident angle and the reflection angle are all the same. The value θ can be calculated from the position z of the illuminator.

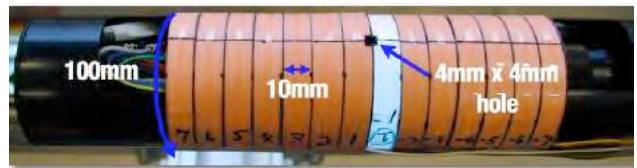


図10 Stripe illuminator. The mirror is located under the hole between the two stripes numbered #1 and #-1. These fourteen stripes can be independently turned ON/OFF.

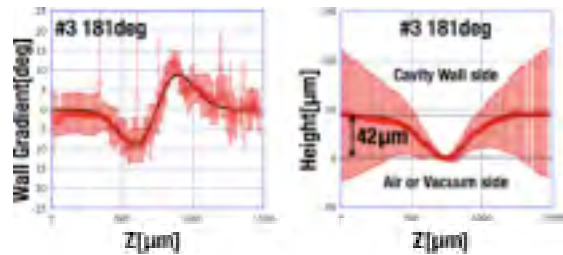


図11 Gradient and height of the spot shown in Fig.8. The spot is a convex. The height is expressed by a relative value of the distance from the cavity axis.

参考文献

- [1] H. Padamsee: IEEE Trans. Applied Superconductivity, 15, 2005, p.2432.
- [2] H. Hayano: Proc. 4th PASJ and 32nd LAM in Japan, 2007, p.218. [http://www.pasj.jp/web_publish/pasj4_lam32/PASJ4-LAM32%20\(D\)/contents/PDF/WP/WP02.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj4_lam32/PASJ4-LAM32%20(D)/contents/PDF/WP/WP02.pdf)
- [3] L. Lilje: Proc. LINAC 2002, Gyeongju, Korea, p.219.
- [4] J. Knobloch: IEEE Trans. Applied Superconductivity, 9, 1999, p.1016.
- [5] K. Saito: Proc. of the 21st Linear Accelerator Meeting in Japan, 1996, p.219.
- [6] T. Harden, M. Borden, A. Canabal, P. Pittman, T. Tajima: Proc. of PAC07, Albuquerque, New Mexico, USA, p.2409.
- [7] H. Padamsee, J. Knobloch and T. Hays: RF Superconductivity for Accelerators. New York: John Wiley, 1998.
- [8] 田島裕二郎, 岩下芳久, 早野仁司: Lバンド超伝導加速空洞の内面検査システムの開発、加速器学会誌 Vol.5, No.1,
- [9] Y.Iwashita, H.Hayano, Y.Tajima: Development of a High Resolution Camera and Observations of Superconducting Cavities, Proc. EPAC'08, June 23-27, 2008 Genoa, Italy