

DEVELOPMENT OF INSPECTION SYSTEM OF SCRF CAVITY FOR ILC

Yujiro Tajima^{1,A)}, Yoshihisa Iwashita^{A)}, Masahiro Ichikawa^{A)}, Hitoshi Hayano^{B)}

^{A)} Institute for Chemical Research, Kyoto University
Gokanosho, Uji, Kyoto, 611-0011

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

Abstract

The International Linear Collider (ILC) will require about 17,000 superconducting radio frequency (SCRF) accelerating cavities in its main linac. From the view point of the cost, the ILC will require more than 80% yield of successful high gradient ($>35\text{MV/m}$) cavities. We think that the cavity's gradient is limited by field emission or quenching, which are caused by defects of the inner surface of the SCRF cavities, for example, fine dusts, unevenness and pits. These defects are treated with barrel polishing, chemical polishing, electro polishing (EP) and high pressure rinsing (HPR) and so on. The relation between the surface state and the gradient limitation, however, is still not clarified. To study the relation, we are developing an optical inspection system of the inner surface. This inspection system aims to automatically take pictures of the inner surface and find the defects with $1\mu\text{m}$ resolution. In this paper, we report the present situation of the system.

ILC用 超伝導加速空洞 内面検査装置の開発

1. はじめに

ILC計画では主ライナックに約17,000台の超伝導加速空洞を用いる^[1]。建設コストの観点から、加速電場勾配 35MV/m 以上の加速空洞を80%以上の歩留まりで生産する必要がある。加速電場勾配を制限する要因には、フィールドエミッションとクエンチとがあり、これらの主な原因として、空洞内面に付着したゴミや内面のキズのほか、特に空洞製作時にできる溶接痕の凹凸、ピットなどが考えられている。空洞内面のゴミはフィールドエMISSIONの源となり、一方、空洞内面の凹凸は磁場の集中化を招き、臨界磁場を超えるとクエンチが起こる。

こうした問題に対処し、歩留まりをよくするために、内面を滑らかかつ清浄にするための内面処理に工夫がなされている。例えば、バレル研磨、化学研磨電解研磨、高圧超純水洗浄などがある。しかし、これらの内面処理から得られる空洞の内面状態とクエンチとの関係に関するこれまでの研究^[2]では、そのはっきりとした関連を認める報告はない。これまでは空洞の内面検査に低分解能なカメラしか用いられていなかったことも研究が進んでいない理由である。そこで我々は空洞の内面状態を高精度に評価する方法を確立し、内面状態と最大電場勾配との間の関係を明らかにする研究を開始した。そして、その研究のために必要な、空洞の中にカメラを入れ、その内面を撮影する装置の開発を行っている。測定精度として、 $1\mu\text{m}$ を目標としている。また将来の空洞の大量生産に向けた自動検査システムの構築も視野に入れている。ここでは、我々の検査装置の概要と現状、問題点を紹介する。

2. 検査装置の概要

将来的な大量の空洞検査に対して、その全てを高分解能で検査するには、膨大な時間とコスト特に画像データのファイル容量が必要になるので、比較的分解能が低い全方位撮影によって内面をスキャンし、そこで問題が見つかった箇所を高分解能な局所撮影によって詳しく調べる、という二段階の検査システムを考えている。また撮影した画像に適当な画像処理を行い、欠陥を判別する。

我々の検査装置をFig.1に示す。空洞を前後動させて空洞内部に撮影装置を挿入する。撮影装置として、シリンダーの中に150万画素CCDカメラを内蔵し、

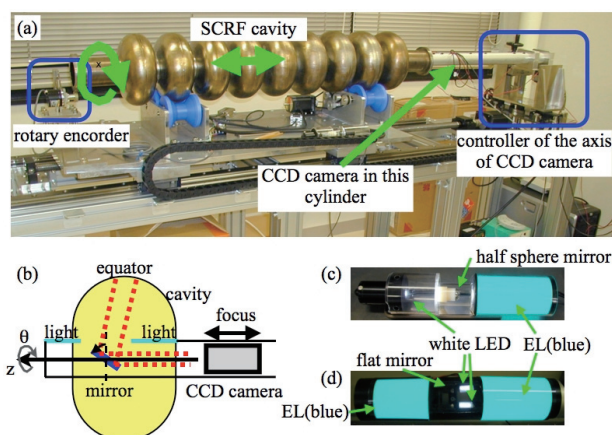


Fig.1: (a) Overview of our inspection system. (b) Drawing of the inside the SCRF cavity, cylinder and attachment. (c) Attachment for taking whole angle pictures of the cavities' inner surface. (d) Attachment for taking local pictures. EL: electro luminescence.

¹ E-mail: tajima@kyticr.kuicr.kyoto-u.ac.jp

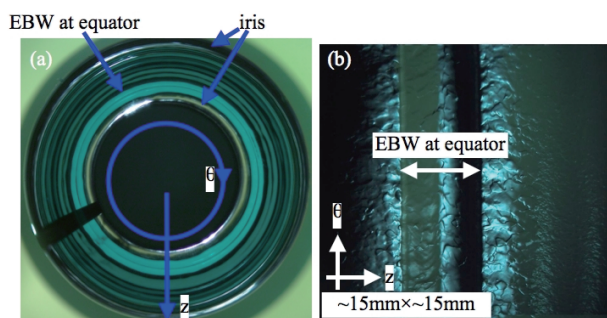


Fig.2: (a) Picture of a cavity's inner surface taken with omnidirectional camera. (b) Local picture of a part of electron beam welding (EBW) on the cavity's inner surface at its equator region.

その先端部に反射鏡と照明を組み込んだヘッドを取り付けたものを用いている。カメラにはリニアアクチュエータが接続されており、前後動によって焦点を合わせることができる。ヘッドには、半球状の曲面ミラーと同軸照明を備えた全方位撮影用と、平面ミラーと照明を備えた局所撮影用の2種類を用意した。局所撮影用の平面ミラーは空洞の楕円状の形状に対応するために、モーターによって仰角を調節することができる。照明には主に白色LEDと面発光体を用いている。空洞の前後動と回転、反射鏡の角度だけを制御し、シリンダーとヘッドを動かさない。そのため、カメラと被写体である空洞内面との距離が撮影する位置によって変わるため、空洞の全内面を同じ分解能で測定することができない。しかし一方で、空洞内面に余計なキズをつけるリスクが低い。シリンダーの外径は、空洞の最小内径 $\phi 60\text{mm}$ に対して、 $\phi 50\text{mm}$ あり、また 2mm の厚みがある。よってその中に収納されるカメラのサイズに対する余裕は径が $\phi 40\text{mm}$ 程度以下で、また同軸方向には 2m 程度に十分あるので、比較的サイズが大きく分解能が高いカメラを用いることができる。

3. 全方位画像と局所画像

全方位画像と局所画像をFig.2に示す。空洞は内面処理により非常に滑らかで鏡面状であるために、照明と反射鏡との位置関係によって明るく写る場所が限られる。つまり照明の空洞内面に対する入射角と空洞内面の傾きによって、反射光の角度が決まる。従ってその反射光の方向に反射鏡を置いて光をカメラに写し込まないと、空洞内面を見ることができない。特に全方位撮影ではこの影響が顕著で、空洞内面上で照明によって明るく照らされる部分とそうでない部分とができてしまい、画像が縞状になって内面全体を一様に評価することが難しく、画像処理を行うときに、この縞が空間的な高さの違いにみえてしまう。全方位撮影ではパラメータが空洞の前後動だけなので、どのようにしてもカメラに写しこめない空洞内面の場所が存在する。現状ではアイリス部

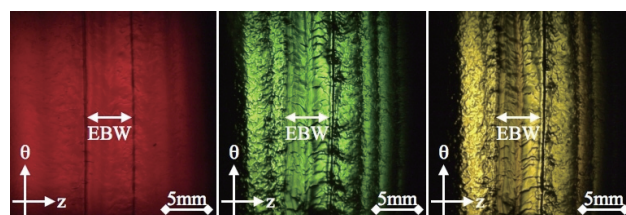


Fig.3: Three pictures of a same part of EBW taken under different LED conditions. Left: red LED with diffuser, center: green LED without diffuser and right: yellow LED without diffuser.

と赤道部の電子ビーム溶接(EBW)部分がかろうじて見える程度である。この点で空洞内面のスキャンにはまだ向かない。この縞の原因は、全方位撮影用のヘッドにおいて、反射鏡が外部を覗く部分の周りには照明を取り付けることができないことであると考えられる。局所撮影においては空洞の前後動に加え、平面ミラーの角度のパラメータが増えるので、空洞とヘッドの間の位置関係と、平面ミラーの角度を適当に決めることによって、少なくとも赤道部の電子ビーム溶接部(EBW)においてはこの問題を避けることができる。空洞内面が鏡面上であるので、空洞内部に乱反射を起こす異物がある場合は、その部分に暗く影ができるので、そのサイズや形から画像処理によって検出できる可能性がある。

分解能に関しては、全方位画像は $500\mu\text{m}/\text{px}$ 程度しかなく空洞の電子ビーム溶接近傍にできると考えられている数 $10\mu\text{m}$ 程度のピットを見つけることも現状では困難である。画像全体に占めるミラーの中心部とミラーの外側の無駄な領域の面積が大きいことによって分解能が下がっている。局所撮影の分解能は、空洞の回転軸からの距離が最も近い空洞のアイリス部において最もよく、 $10\mu\text{m}/\text{px}$ 程度ある。

4. 画像の照明色に対する依存性

空洞の内面を撮影するために最適な照明色を選ぶために、白色LEDと青色面発光体に加え、赤と緑、黄色の三色のLEDを照明に用いて、空洞内面の同じ赤道部EBW部分について、最適な照明位置を探しながら局所撮影し、それらの画像を比較した。また同時にLEDを照明に用いたときにディフューザーの有無による画像の変化も調べた(Fig.3)。

赤と緑、黄色の三色のLEDの中では、赤色LEDを照明に用いたときに著しくハレーションやサチュレーションが起こりやすく、最も明るい画像が得られた。また白色LEDの画像も、条件が若干違うので単純には比較できないが、明るいことがわかった。緑色LEDと黄色LEDの画像の間にはほとんど差がなかった。明るさ以外の違いは全ての照明で見られなかった。明るさの違いはCCDカメラの感度が長波長側で上がることに起因するものと考えられる。ディフューザーの有無に関しては、これをつけると

明るさは低下するが、撮影可能な面積が大きくなる
ことがわかった。これはLEDの強い指向性が弱めら
れて、空胴内面への光の入射角の範囲が広がった
ことによるものだと考えられる。これらの結果によ
ると、照明には長波長の光を含んだ照明でディフ
ューザーを付けたものが適している。照明の強さはハ
レーションやサチュレーションが起こらない程度に
強い方がよい。これらを守る理由は、撮影した画
像データを画像処理するためである。画像処理では
二次元画像データに適切な演算を行うが、ハレ
ーションやサチュレーションが起こると、その位置の
色が持っている情報がなくなったり少なくなったり
するからである。

5. 照明位置と画像の関係

照明位置によって照明からの光の空胴内面への入
射角を様々に変化させた画像を比較すれば、内面の
凹凸の様子がわかる。この方法を検討するために、
局所撮影用ヘッドで光の指向性の弱い面発光体の発
光領域を制御して、空胴の赤道部EBWを撮影し、そ
れらと比較した(Fig.4)。

全発光領域を使って、撮影領域全体が照らされる
ようにすると、ゴミやピット状のものが暗く際立っ
て見える。ゴミの場合は乱反射によって光が拡散さ
れ反射鏡の方向への強度が弱められ、一方、ピット
のような激しい凹凸はその奥まで光が届かないから
であろう。発光領域を図のように同軸方向と回転方
向にそれぞれ二分した組で画像を比較すると、陰の
でき方の違いから、内面の傾きが概ねわかる。例え
ば、(c)と(d)において青く照らされている空胴内面
部分はある範囲の中で同じ傾きを持っていると考え
られるから、EBWの中央部分は盛り上がっているこ
とがわかる。このように検出した欠陥や凹凸に関する
情報を数値化できるかを現在検討中である。

6. まとめ

局所撮影においては、内面が鏡面状であることに
よる照明角度の問題によって、現在はEBW部分を中
心とした主要な部分しか撮影できていないが、これ
までの研究よりも高い数 $10\mu\text{m}$ の分解能で撮影する
ことに成功しており、これまで知られていなかった内
面状態に関する情報を得られる可能性がある。全方
位撮影は、局所撮影と同様の照明の問題を抱えてい
ることに加え、その分解能($500\mu\text{m}/\text{px}$ 程度)に決定的
な問題があるが、数 mm サイズの大きな空胴内面欠
陥の検出には用いることができる。しかし空胴全体
のスキャンのためには $100\mu\text{m}$ 程度の分解能が必要だ
と考えており、カメラの分解能をよくする方法と、
全方位撮影に替わる短時間かつ低データ量の検査方
法を検討中である。カメラの分解能の向上のために、
我々の検査装置がカメラサイズに対して同軸方向に
空間的余裕があることを生かして、レンズとカメラ
の間にスパーサーを入れることを検討している。全
方位撮影に替わる手段としては、様々な非破壊検査
の手法を検討中であるが、空胴径からの要請で、検

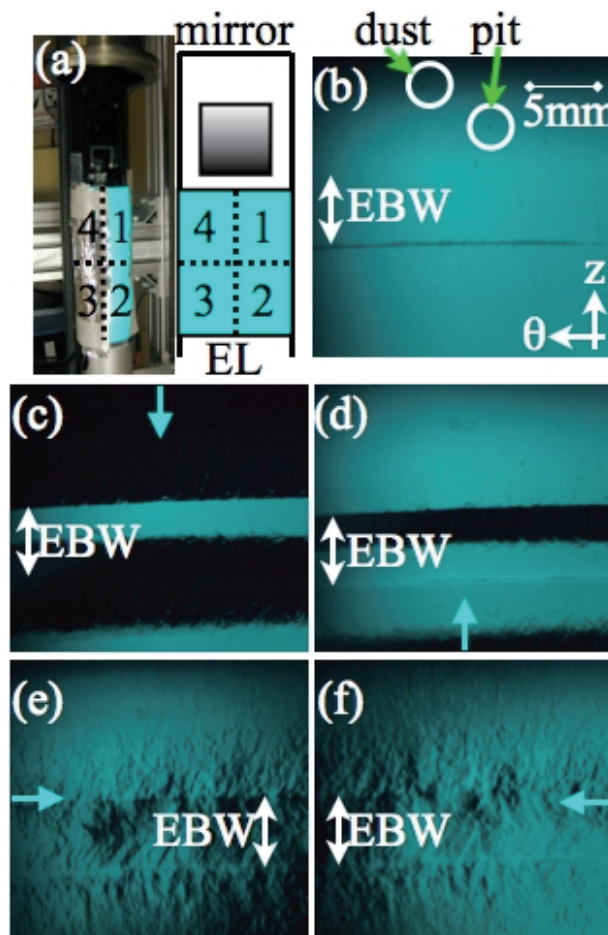


Fig.4: (a) Picture (left) and drawing (right) of method
to control illuminating region on EL. We divide the
region into 4. From (b) to (f) all are the same part of
EBW on the cavity's inner surface at its equator
region, and all have the same z- θ axis and the same
scale, which are presented in (b). Blue arrows show
the directions of light incident from the EL onto the
cavity's inner surface. Its corresponding illuminating
regions are all in (b), [4, 1] in (c), [2, 3] in (d), [1, 2]
in (e) and [3, 4] in (f).

出器のサイズを $\phi 50\text{mm}$ 程度に抑えなければならない。

内面の欠陥を自動で判別し検出するための画像解
析も局所撮影画像を用いて開発を始めている。微分
操作を中心とした画像処理によって、画像データの
空胴の内面状態を数値化できるかを検討中である。

参考文献

- [1] The ILC Reference Design Report summary, [Http://www.linearcollider.org/pdf/RDR_Machine_Overview_v5-1.pdf](http://www.linearcollider.org/pdf/RDR_Machine_Overview_v5-1.pdf)
- [2] K. Saito et al., "Inspection System with a CCD camera for L-band Superconducting RF cavities," proc. 21st Linear Accelerator Meeting in Japan (1996), pp. 219-221.