

[P 30–28]

Inspection System with a CCD Camera for L-band Superconducting RF Cavities

Kenji SAITO, Takeo FUJINO, Hitoshi INOUE, Shuichi NOGUCHI, Masaaki ONO,
Eiji KAKO and Toshio SHISHIDO

KEK : National Laboratory for High Energy Physics
1-1, Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305, Japan

Abstract

Surface inspection is a very important process to make superconducting RF cavities with excellent performance, however, it had been done by human eye inspection with a mirror. The documents of the inspection were hardly left by this method. For the future, we have to collect information of surface defects and transfer to the automatic inspection system. We have fabricated a new inspection system with a small CCD camera. In this paper, we describe the system and show some photographs of surface defects.

CCDカメラを用いたL-バンド超伝導空洞用内面検査装置

1. はじめに

超伝導空洞は、これまで何度も強調されているように、空洞の表面抵抗が著しく小さいことから空洞内表面の欠陥を非常に厳しくコントロールする必要がある。機械研磨、化学研磨や電解研磨を用いた表面処理が行われるが、それでも尚、空洞製作工程で発生する表面欠陥、電子ビーム溶接部の溶接欠陥などでしばしばクエンチが起こる。上記の表面処理では限界があるので、処理前に予め表面検査を行い、大きな欠陥を除去する内面検査工程が大切である。その方法としてこれまでつばら鏡を使った目視検査を行って来た。しかし、それでは、1) 表面欠陥の記録が残らない、2) 欠陥の素性がはっきりしない、3) 検査領域が限られ表面欠陥を見落としやすい、4) 欠陥部の位置がはっきりしない等の問題がある。そこで、これらの問題を解決すると同時に今後、表面欠陥と空洞性能の相関性を蓄積し、最終的にコンピューターによる自動検査システムの構築を目指すべく、小型CCDカメラを使った新しい検査システムを試作した。ここでは、そのシステムとそれを使った表面欠陥観察例を紹介する。

また、さらに高倍率の表面欠陥装置の開発について触れる。

2. システム設計

内面検査システムを設計するに当たって、1) 空洞内のあらゆる場所が等倍率で観察できる、2) 観測位置が認識できる、3) 欠陥画像が数十倍に拡大できる、4) 欠陥の凹凸が容易に判断できる、5) 画像がその場で出力できること等を柱とした。すべての場所を鮮明に観察するために、空洞内で小型カメラを操作し、その出力をCRTモニターに映像表示する方法を採用した。図1にシステムの構成を示す。

小型CCDカメラ：図1に示すようにL-バンド空洞は、ビームパイプ径が76-80mm、赤道部の径が205-210mm、セル長が115mm程度であり、空洞内にカメラを持ち込む場合、非常に空間的制約を受ける。このスペース条件を満たすには、長さ50mm、径が20mm程度で軽重量の通称、親指カメラと呼ばれる超小型CCDカメラの選択しか許されなかった。ここでは、解像度に優れ、低ノイズの池上

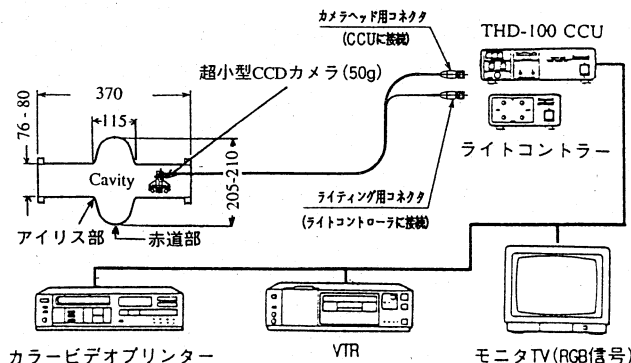


図1. 内面検査システムの構成。

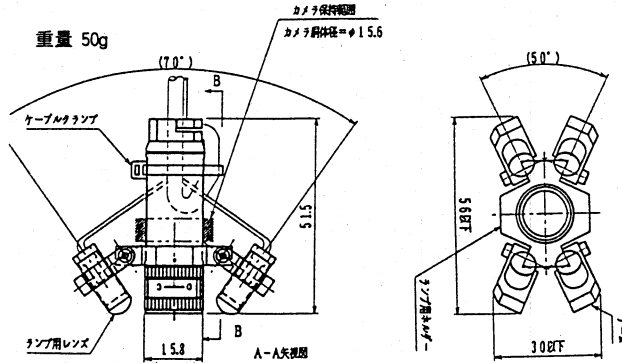


図2. CCDカメラの形状。

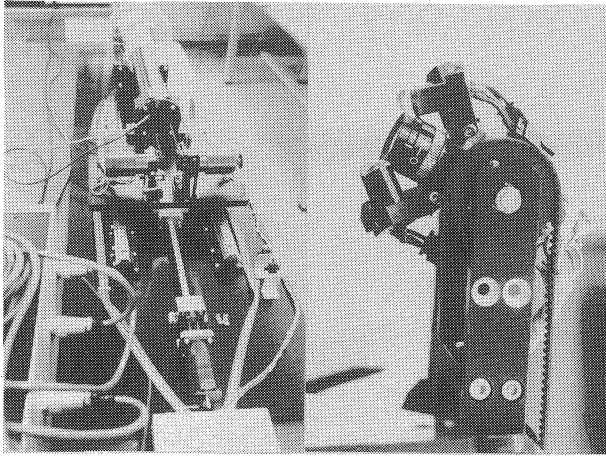


図3. 駆動システム (左:ステージ、右:カメラアーム) . 通信機 (株) のTHD-100を選定した。ただし、カメラのレンズ先端部と空洞内表面までの間隔が13mmしか許されないので、近点撮影用高性能レンズを特注した。図2にこのカメラの形状を示す。

照明機構: カメラ・ヘッドに4個の高輝度ランプを取り付け (図2、3参照)、それぞれ独立に光量を調節することで光の照射方向を変え、陰のつき方で欠陥の凹凸が判断できるようにしている。

駆動機構: カメラの駆動システムの写真を図3に示す。検査位置は、カメラの回転 (θ)、それを取り付けたアームの回転 (α)、それらに乗せたステージを空洞内に出し入れする並進運動 (z)、さらに空洞自体の回転 (ϕ) の四つの座標 (z, α, θ, ϕ) で与えられる。アームとカメラの回転は、ターンベルトを介して空洞の外に付けたパルス・モーターで動かされる。ステージは、ギヤシャフトをパルス・モーターで回転させることで駆動される。空洞の形状が決まれば、検査位置は四つのパラメータで決まり、パルス・モーターを計算機制御することで将来の自動検査システムに対処できるようになっている。

画像出力: 表面映像はCRTモニターに、CRT表示倍率で50倍 (固定) に拡大されて出力される。この出力画像は、

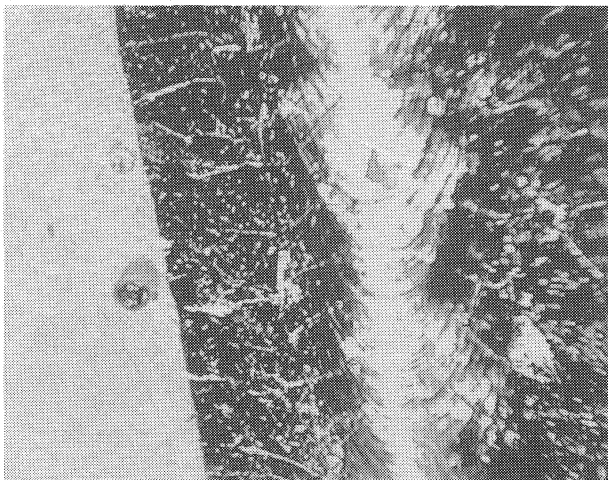


図4. 赤道部溶接付近のスパッターボール。



図5. 観察しにくい位置でのスパッター痕の観察。

ビデオテープ、カラープリンターに取り込まれる。記録保持で最も重宝しているのはこのカラープリンターであるが、写真倍率は10倍に落ちる。それでも驚くほど鮮明な画像が得られる。

3. 空洞表面欠陥の観察例

本研究会でもこの内面検査装置を実際の研究に使った結果が二三報告されるが [1, 2, 3]、ここで、この装置を使って得られた特徴的な表面欠陥画像を示す。

スパッターボール: ニオブは酸化性が強く高融点材料であるので、空洞の溶接は全て電子ビーム溶接で行われている。この時、電子ビームを収束させ過ぎてビームパワーを一箇所に集中し過ぎると、小さな熔融ニオブ塊が飛散して、ボール状のニオブ粒 (スパッターボール) が空洞内面上に溶着する。これは、機械的にグラインドしないと取れず、しばしば空洞のクエンチの原因となっている。図4は、ビーム条件の設定ミスによって、赤道部の溶接で発生したスパッターボールの写真である。写真右手半分に見えるのは、赤道部の溶接シームである。そのすぐ左脇に2個のスパッターボールと小さなスパッター痕が見える。最も大きなスパッターボールの径は500 μm

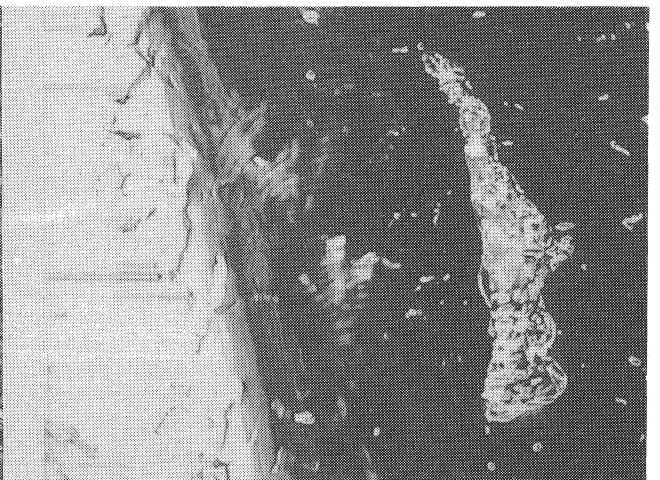


図6. アイリス溶接部のボイド (クエンチ場所) .

である。光の陰影によりボール状になっていることが明瞭である。

観察しにくい位置での欠陥観察：従来の鏡による目視内面観察では、図1に示すようなアイリスよりすぐ内側の部分が最も観察しづらい（特に多連空洞の場合）。スパッターボールが発生した上記の空洞では、赤道部付近のみならず、そのように観察しにくい場所にもスパッター痕が発生した。図5はその場所でのスパッター痕の観察写真である。欠陥の大きさは、1.5mmもある。バレル研磨でわずかに研磨された後の写真であり、欠陥部とその回りの凸部が削れているのが観察される。この欠陥は、出っ張っていることがわかる。

アイリス部の溶接欠陥：図6は、温度マッピングから実際にその場所で発熱し、空洞がクエンチ（ $E_{acc} = 12 \text{ MV/m}$ ）した[3]場所で検出された表面欠陥である。これは、空洞のセルとビームパイプの溶接部である。溶接シーム付近に発生したボイドと考えられる。5mmもある大きな欠陥である。この表面観察後、ミニグラインダーで除去したがボイドは $500\mu\text{m}$ 以上の深さに渡って存在した。

4. 高分解能の内面検査システム

これまで示した表面欠陥は、 $500\mu\text{m}$ 以上の大きな物であったが、空洞がより高性能化するにつれてより小さな欠陥を鮮明に捕える必要がある。そのためにはさらに倍率を上げなければならない。最近市販されているマイクロスコプ（例えば、ハイロックス社マイクロハイスコープDH-2200、KEYENCE社 デジタルマイクロスコプVH-6200）は、最大2000倍（マイクロハイスコープ）までの倍率が得られ、SEM像のように真空中で扱う必要がなく、操作性が非常に良い。それらの装置をL-バンド空洞の中に持ち込むにはまだ大き過ぎ、今後の小型化が期待される。しかし、現サイズでも溶接前のハーフセル段階での検査や、L-バンド空洞よりずっと大きな500-600MHzの空洞（KEK-B用加速空洞、クラブ空洞、原研中性子科学研究用陽子リニアック用空洞）への適用には問題ないであろう。図7は、マイクロハイスコープを使って、深絞り成型したL-バンド・ハーフセルの成型直後のアイリス付近の表面観察例（CRT表示倍率250、写真倍率75）である。成型で発生した粒界すべりや粒界割れが鮮明に捕えられている。これらの装置では、多種の工学レンズユニットが用意されているのでCRT倍率50倍から2000倍まで必要に応じたシステムが構築できる。また、画像システムも我々のものと殆ど同じものが用意されている。

5. まとめ

超小型CCDカメラを使ったL-バンド空洞用内面検査システムを試作してみて、これが現場で大変役に立つこ

とを実感している。表面欠陥の画像がその場で手に入ることは、現場の立場として最も魅力的である。このシステムを使って、今後、空洞表面欠陥と空洞性能の相関性のデータが蓄積されることを期待している。

この試作機の倍率は、CRT表示で50倍であるが、今後、 $1\text{-}10\mu\text{m}$ 程度のさらに小さい表面欠陥の検出のためには、倍率を上げる必要がある。この目的に適ったマイクロスコプは既に市販され始めている。これは、L-バンド空洞内に挿入するには、さらに小形化する必要があるが、周波数の低い500-600MHz空洞には使えそうである。そうした装置を用いたより高分解能の検査システムの構築が期待される。

謝辞

この内面検査装置の試作のうち、カメラ駆動システムの製作に対して、本研究所の平成6年度所長留め置きによるサポートを頂きました。菅原所長に深く感謝いたします。CCDカメラについては、池上通信機株式会社の関真生氏に大変お世話になりました。また、第百通信工業株式会社の金沢 皓至氏には、マイクロハイスコープのデモンストレーションをして頂きました。深く感謝致します。

参考文献

- [1] T.HIGUCHI et. al. " Finished Niobium Cavity Surface with Barrel Polishing", in this meeting.
- [2] T.Ota et. al. " First Measurement of L-band Superconducting Cavity Fabricated in TOSHIBA ", in this meeting.
- [3] M.Matsuoka et. al. " Development of the L-band Single-cell Superconducting Cavity with an Input Port ", in this meeting.

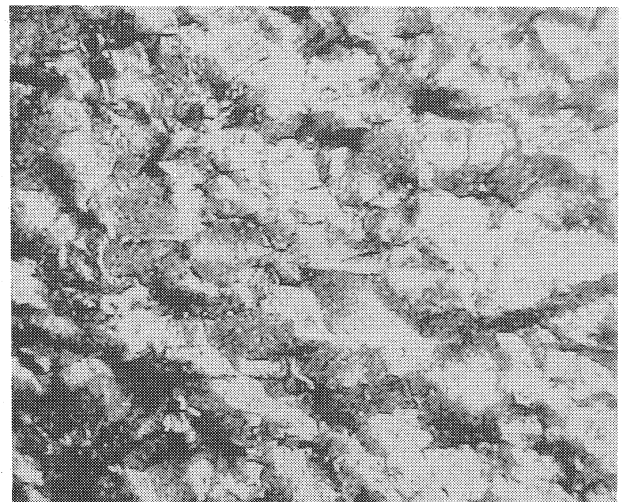


図7. 高倍率のマイクロスコプによって観察される成型時に発生する表面欠陥の観察（75倍）。