

DEVELOPMENT FOR INSPECTION SYSTEM OF THE SUPERCONDUCTING CAVITIES AT KYOTO UNIVERSITY

Hiromu Tongu^{#,A)}, Yoshihisa Iwashita^{A)}, Hitoshi Hayano^{B)}, Ken Watanabe^{B)}, Yasuchika Yamamoto^{B)}

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

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

Abstract

The X-ray and temperature mapping (XT-map), the eddy-current testing and other methods for inspection of the superconducting accelerator cavity interior surface is under development. XT-map system can find heat sources that may be caused by defects on the cavity surfaces. The main purpose of our studies on T-map is to realize a high spatial resolution and easy installation of the sensors. The production yield of such cavities would be improved by using these inspection systems. The sensor products and the preliminary tests for the XT-map inspection are reported.

京大における超伝導空洞の品質検査システム開発

1. はじめに

京都大学化学研究所では高エネルギー加速器研究機構との共同研究で超伝導加速空洞の欠陥検査についての研究を行っている。国際リニアコライダー(ILC)の第1期計画ではニオブ製9セル加速空洞の製作が行われる。35MV/mの加速電場と約15000台の製造個数から生産歩留まりの向上が課題となっており、日本、アメリカ、ヨーロッパで生産性向上のための研究が進められている。

加速勾配の上限は空洞内の表面またはそれに近い内部の状態に大きく依存していると考えられ、平均加速電場35MV/mを実現するために空洞開発、製作において非破壊欠陥検査による内表面管理が必要不可欠となっている。製作工程または性能試験工程における空洞内面の欠陥検知により加速空洞の性能低下の原因、欠陥場所を特定し、効率的に対処することが可能である。本研究では空洞内壁欠陥検査として温度上昇の検出とX線検出の技術開発において高分解能測定、極低温環境への負荷軽減など加速空洞の高精度マッピングシステム開発を行っている。

2. 欠陥検査

アイリス内径70mm、長さ約1mのILC加速空洞の内壁検査を行なう方法として高分解能小型カメラを用いた観察装置(図1)が京都大学とKEKで共同開発され空洞開発に利用されている[1]。超伝導空洞の開発現場では加速空洞に高周波電力を注入して行う縦測定試験(図2)を行い、到達加速勾配を測定して空洞の良否を判定している。図2の光学的観察と縦測定試験での空洞外壁の温度上昇測定により欠陥の存在が明らかになった。

縦測定においてゴミやキズなどの微小欠陥による局所的熱源によってクエンチが起こる。この熱源を温度センサーにて検出し、欠陥場所の特定を行なう検査手段が温度マッピング(T-map)である。温度センサーの高密度化による多点温度測定を用いて局所的表面温度上昇の高精度検出ができれば発熱場所の

光学的観察が容易に行なうことができ、欠陥の修復作業など効率的に対処することができる。また、電界放出電子によるX線放射量の測定(X-map)も欠陥検査の重要な情報となる。

さらに京都大学では加速空洞成形前のニオブ板の欠陥検査を行なうことができる過流探傷装置(図3)や中性子線イメージングによる精密非破壊検査についての研究も進めている[2]。

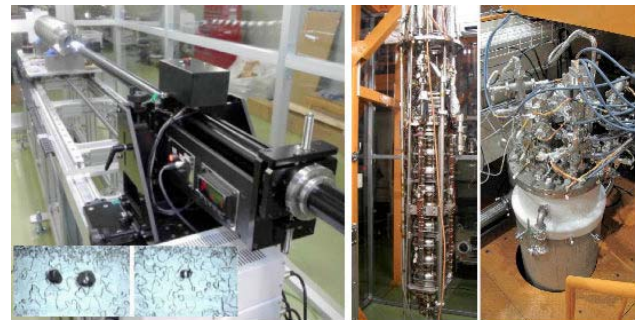


図1：高分解能観察装置と 図2：縦測定(KEK)撮影結果(φ400~600μmの欠陥)

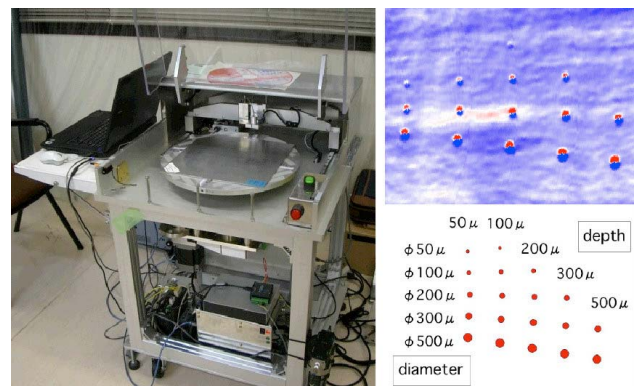


図3：過流探傷装置とニオブ板上の穿孔穴の測定結果
ニオブ板にドリルで穿孔した試験欠陥を用意し渦流探傷測定を行った結果を示す。直径100μm、深さ100μmのサイズまでは検知可能。

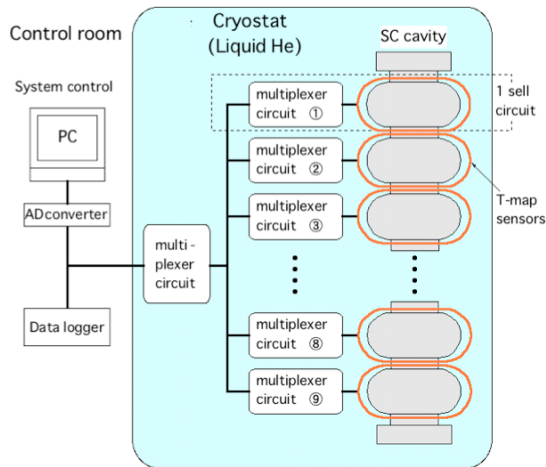


図4：XT-map システム図

3. XT-map

3.1 特徴

本研究の XT-map システム(図4)の特徴である超多点測定(センサー高密度化)と簡便実装を実現するために温度センサーに面実装チップ抵抗を使用し、短冊状フレキシブル基盤を用いて空胴外壁に接触させる方式を採用した。センサー高密度化により測温感度と測定位置精度の向上、さらに容易に装備できるデバイスにより空胴内表面の欠陥検査時間の短縮が期待できる。

T-map は縦測定において加速空胴の内面温度を外表面にて測定するため、温度センサーを液体ヘリウム環境に置かなければならない。空胴の壁厚、熱伝導等より1点/cm²程度のセンサー密度を想定すると9セルで約1万個(X-map は約5000個)のセンサーを使用することになる。この超多点測定によるセンサー配線によって極低温環境への熱流入や真空部品のコストアップが予想される。そのため図4に示すようにCMOSアナログマルチプレクサ及びシフトレジスタによるチャンネル切替え回路をクライオスタット内に設置した。これにより測定室と極低温環境との入出力ケーブルを劇的に減らし、熱リークを大幅に減らすことが可能となる。

極低温測定において市販のセンサーの測温性能は申し分ないが、非常に高価であり本研究の多点測定による温度分布計測に用いるのは難しい。現在、極低温を測定する安価な温度センサーとして実績のあるアーレンブラッドレー社の炭素抵抗が利用されている[3]。しかしながらこの炭素抵抗はすでに製造中止となり、多くの研究機関は流通在庫品を使用しているのが現状である。この炭素抵抗に代わる温度センサーとして我々は小型で入手容易な酸化ルテニウムのチップ抵抗を採用した。

3.2 温度センサー

センサー高密度化から1.6mm x 0.8mmサイズの酸化ルテニウム抵抗を採用した。初期調査で抵抗の温度特性は抵抗値が大きいが感度は良いが、大きな抵抗値では時定数が大きくなり立ち上がりの信号

出力応答速度が悪化することがあきらかとなった。これはセンサーの自己発熱の影響などを含めた電流電圧特性の非線形性が影響していると思われる。図5の抵抗値と入力電流の違いによる温度特性の測定結果から抵抗値は10kΩ採用した。入力電流については出力信号のSN比と抵抗の自己発熱の少なさから5~20μAが妥当と考えられる。また、我々のT-mapシステムの要となるセンサーチャンネル切替えについてはテスト用マルチプレクサ回路を用いた測定結果からチャンネル切替え周波数は1kHz(1msec/ch)が適当と判断した[4]。セル単位で信号取出しを行ない、全スキャンは1秒程度で終了する。この場合極低温環境への配線は9セル空胴の場合25本となる。

抵抗体メーカーでは極低温域での性能検査をしていない、またはデータを公表しておらず、スペックシートは220K程度までの性能保証のみである。極低温環境では酸化ルテニウムに混ざる微量原料により特性が大きく違うため抵抗体メーカーの違いによる温度特性を測定した(図6)。メーカー及び用途の異なるチップ抵抗でも上記の温度特性は同じ傾向の測定結果を得た。図6より温度センサーにロームKTR18を採用した。KTR18の4Kから2Kでの温度感度はアーレンブラッドレー社の炭素抵抗(100Ω)と比べて約1/3であるが、温度センサーとして使用は十分可能である。炭素抵抗に比べ酸化ルテニウム抵抗の温度感度は良くないが熱に対する反応速度はほぼ同等である[5]。

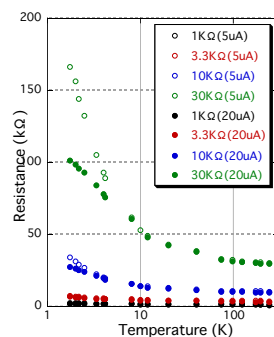


図5：センサー感度 (抵抗値・入力電流)

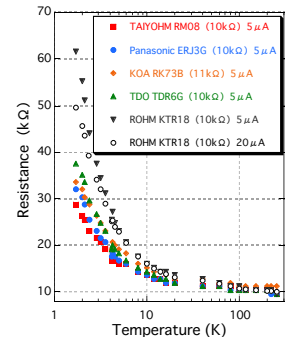


図6：センサー感度 (メーカー)

3.3 クエンチ検出試験

縦測定にてクエンチの検出試験を行なった結果を図7及び図8に示す。TDO TDR6G 10kΩをクエンチが予測される数カ所に配置、X線センサーとして数種類のフォトダイオードを加速空胴の上部フランジにまとめて設置した。

今回検知したクエンチによる温度上昇の典型的な測定結果を図7に示した。measurement1では温度上昇はなく、measurement2ではそれぞれch4, ch5, ch7で温度上昇が確認された。ch5で約100mVの出力があり、図5のグラフから約4Kまで温度上昇したことがわかる。ch6はch5から5mm離れた位置に設置されているが温度上昇を検知していない。これはch6センサーがキャビティ表面から浮いている状態にあると考えられる。

X-map 用のセンサーはこれまでフォトダイオードを主に 10 種類以上の素子を試してきた。X 線による起電力の大きい 4 個の素子の測定結果を図 8 に示す。起電力測定結果とサイズ、コストの面から OSRAM BPW34FS R18R を X-map センサーに採用した。

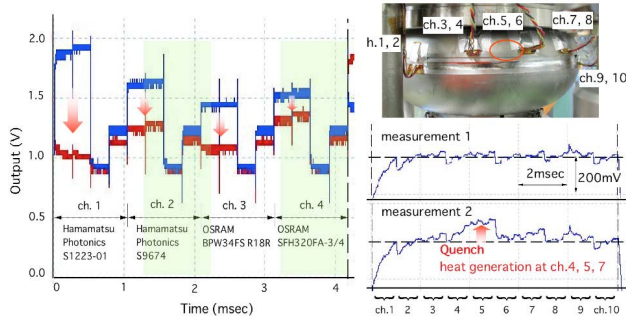


図 7 : X-map センサー感度 図 8 : T-map クエンチ検知

4. 基板製作

これまでポリイミドシートベースのフレキシブル基板の製作と実装設計を進めてきた。今回、上記で採用したセンサーを用いて製作した Var. 3 センサー基板(図 9)ではアンプも極低温側に置くことで出力信号のノイズ軽減、応答速度の改善を実現することができた。空胴外壁に接触する面には T-map センサー(64 個)、その裏面に X-map センサー(32 個)を配置した。アンプやマルチプレクサは別スペースに配置し、図 10 のように両隣の基板と接続し、基板 16 枚で 1 セルを覆う設計となっている。空胴赤道部で基板固定し、アイリス部でテンションをかけることにより、T-map センサーが空胴外壁に常に接触する状態を実現できた。

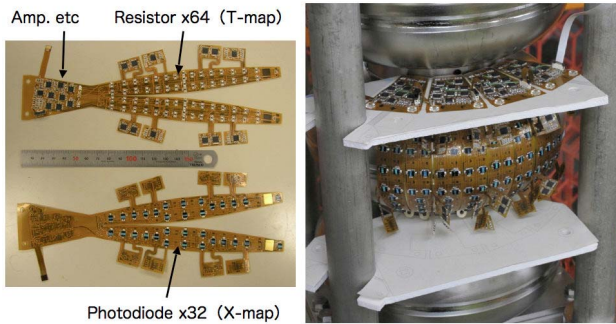


図 9 : XT-map センサー基板 図 10 : センサー基板設置

図 9 の基板を 4 枚使用し、極低温での運用試験を行った。図 11 に示すようにアンプ部を上にして液体ヘリウムに浸した状態から蒸発させ液面を下げて測定を行なった。測定結果(図 12)からアンプの個体差によるオフセットが大きく現れるが温度上昇の検知は確認できた。液体ヘリウムの液面から上にあるセンサーは約 200mV の出力があり 4K まで温度が上昇していると思われる。また、HOM-coupler 付近に設置したセンサーでクエンチを検知することができた。局所的に約 20K まで温度が上昇していることがわかる。今回の測定ではアンプの不具合により予定していた T-map 入力電流 5 μ A ではなく出力 SN 比で

有利である 100 μ A で行なっている。入力電流 100 μ A は 5 μ A に比べ自己発熱による温度感度、出力応答速度の悪化はあるが、クエンチ検知することができた。

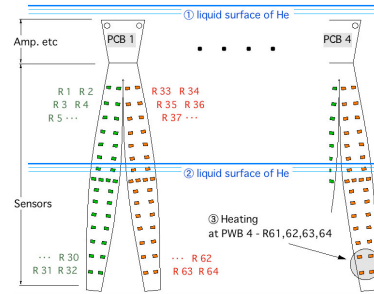


図 11 : センサー基板 4 枚を用いた感度測定

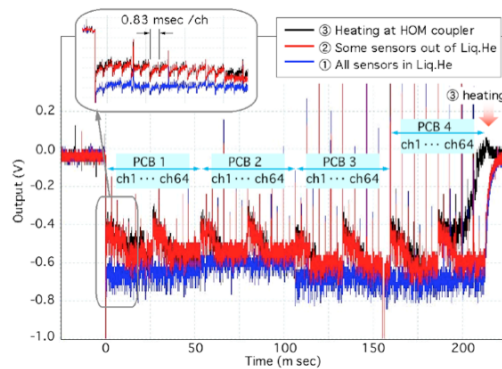


図 12 : 図 11 の測定結果

5. まとめ

センサー基板 4 枚 (1/4 セル) の試験結果から T-map について十分な温度感度、高分解能を有しながら 9 セル空胴スキャンを 1 秒サイクルで運用できる確証を得た。X-map については検出できるほどの X 線発生がなかったが既存回路を採用しているため問題はないと思われる。今回製作したセンサー基板の極低温での耐久性は問題なく、加速空胴への実装も簡易に行なったのみだが大きな不具合はない。今後はアンプ回路の調整、1 セル用の実装設計及び製作、XT-map 測定用のソフトウェアの開発を行なう予定である。

参考文献

- [1] Y. Iwashita, et al., "Development of high resolution camera for observations of superconducting cavities", Phys. Rev. ST Accel. Beams 11, 093501 (2008).
- [2] Y. Iwashita, et al., "Updates on R&D of Nondestructive Inspection Systems for SRF Cavities" 15th International Conference on RF Superconductivity, Chicago, 2011.
- [3] Balle, Ch., Casas-Cubillos, J. et al, "Influence of Thermal Cycling on Cryogenics Thermometers" Advances in Cryogenic Engineering 45B, Plenum, New York, 1999, pp. 1817.
- [4] H. Tongu, et al., "Multipoint T-map System for Vertical Test of the Superconducting Accelerator Cavities", Proc. IPAC10 2971 - 2973 (2010).
- [5] H. Tongu, et al., "Study for inspections of the superconducting cavities in Kyoto University", Proc. of the 7th Annual Meeting of PARTICLE ACCELERATOR SOCIETY OF JAPAN, 524-526 (2010).