

Development of X-ray detector system at irises of the superconducting cavities

Hiromu Tongu^{#A)}, Yoshihisa Iwashita^{A)}, Hitoshi Hayano^{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, Japan 305-0801

Abstract

The various inspection methods for the interior surfaces of the superconducting accelerator cavity are under development by many laboratories. The production yield of such cavities would be improved by using these inspection systems. The X-map is an inspection method to detect X-ray generated by field-emission electron at cavity outside. Our X-map system has super-multipoint measurement (high-density sensor packaging) using tiny sensors, flexible circuit boards and hi-speed channel scan by multiplexer-circuit. We try the X-map inspection (StiffenerX-map) inner stiffeners of iris in ILC superconducting accelerator cavity. Our X-map system is available for the narrow space of inner stiffener. The StiffenerX-map circuit board products and the preliminary tests for X-ray inspection are reported.

超伝導空洞アイリス部における X 線検出システムの開発

1. はじめに

大電流ビーム加速器において超伝導加速器は DC 加速に適しているため各研究施設で鋭意開発が進められている。各国の X 線 FEL 計画やエネルギー回収型線形加速器 (ERL) 計画、国際リニアコライダー (ILC) 計画などでも採用される。超伝導加速の最大の特徴はその加速効率の高さであり、DC 運転では常伝導加速に比べ小型化を実現できる。超伝導空洞ではマイクロ波電力の損失を削減しつつ高い加速電場が得られる。超伝導加速管は極低温下で運転するが、加速空洞の内壁表面に存在する微小欠陥 (数 $10\mu\text{m}$) での発熱、電界放出電子などの原因でクエンチや加速効率の低下が起きることで最大加速電圧勾配が制限される。現在、ILC 加速空洞の開発現場に置いて常温での高解像度カメラによる加速管内表面の光学的観察[1]が欠陥観察の主流となっている。また、超伝導下での RF 入力による加速空洞性能試験 (縦測定) において空洞外表面の温度センサーによる発熱箇所探索、X 線放射量の測定による電界放出場所の探索が欠陥観察の予備検査として行なわれ、光学的欠陥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できる。

高エネルギー加速器研究機構(KEK)においても ILC 加速空洞の欠陥試験を上記の観察及び探索手段を採用し、縦測定において空洞外壁の温度測定(T-map)、X 線検出(X-map)による欠陥場所の特定を行っている。京都大学では KEK との共同研究でより効率的な加速空洞の開発、製作を目的として高分解能の欠陥位置検出を可能とする超多点測定 X-map,T-map の研究[2] [3]を進めてきた。現在、この X-map システムを用いて加速空洞のアイリス部で X 線測定するシステム開発を行っている。

ILC 加速空洞はアイリス部に構造補強のためのスティフナーが溶接されており、アイリス部では空洞外壁の直近に X 線センサーを設置することが困難である。そのため空洞内部で発生した X 線は空洞壁、スティフナーを通過し検出される場合がある。ス

ティフナー通過でさらに強度が減衰した X 線は欠陥位置探索において不適なデータとなる。本研究ではスティフナーの内側にセンサーを設置しスティフナーを通過していない X 線を検出するシステム開発を進めてきた。小型センサーの選定とそのためのセンサー回路基板(StiffenerX)の開発について報告する。

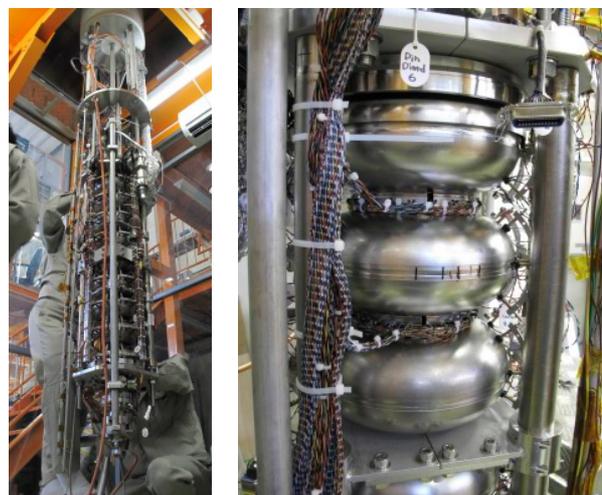


図 1 (左) : ILC 加速空洞の縦測定準備(KEK)

図 2 (右) : アイリス部の X 線センサー(KEK)

2. XT-map

2.1 超多点測定システム

京都大学の XT-map システム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高密度実装可能な面実装チップ抵抗 (酸化ルテニウム) を使用し、図 3 に示すポリイミドフィルムベースの短冊状フレキシブル基盤を用いて空洞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洞内表面

の欠陥検査時間の短縮が期待できる。

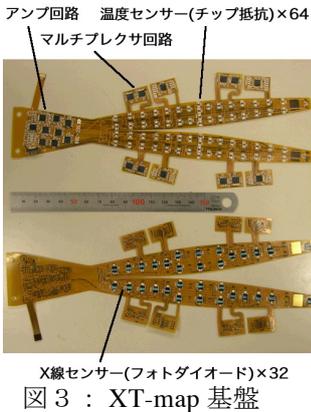


図 3 : XT-map 基盤



図 4 : XT-map 実装

XT-map は縦測定において高分解能の位置探索を可能とするため、1 点/cm² 程度のセンサー密度を考慮し ILC 9セルで約 9000 個(X-map センサーは T-map の半数)のセンサーを使用する。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ため図 5 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。現計画では T センサー 1ch のサンプリング時間は約 1msec、サンプリングレートは 1kHz (X センサーは 2msec、500Hz) で 1 セル単位のアウトプットとなるため加速空洞の 1 スキャンは約 1sec である。

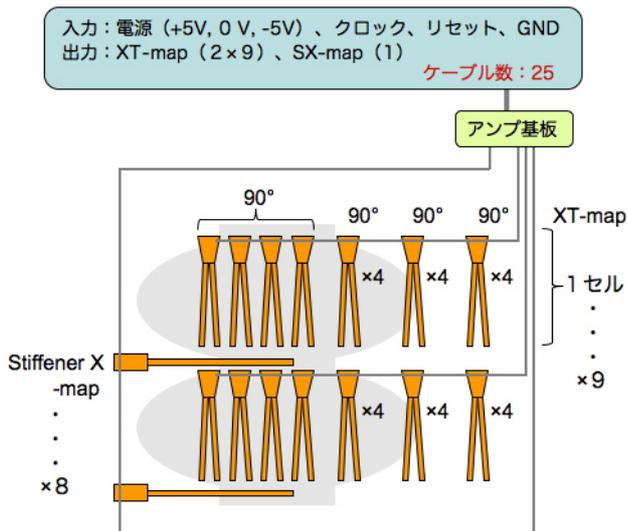


図 5 : XT-map システム

2.2 X 線センサー

本研究の StiffenerX-map にも採用される X 線検出用センサーは多数のフォトダイオードを縦測定で測定試験を行い選定した。KEK で採用され実績のある

浜松ホトニクス の S1223-01 は調査したセンサーの中では最も感度が良いがパッケージサイズが大きく面実装には向かない。表 1 に縦測定で X 線検出試験を行なった高密度面実装できる代表的な小型ダイオードの測定結果を記載する。表 1 に示す測定出力データは各測定で計測器、X 線強度などが異なるため絶対値測定は難しい。超多点実装の点から相対的な実測値性能とコスト、入手性を考慮し、OSRAM BPW34FS R18R を採用した。

表 1 : X 線センサー測定結果

メーカー 型番	受光面 (mm ²)	測定 1 出力(V)	測定 2 出力(V)	測定 3 出力(V)
浜松ホトニクス S1223-01	13	2.4	0.8	5 (over)
浜松ホトニクス S9674	4	0.4	0.3	
Vishay Siliconix BP104	7.5	0.2		
京セミ KPD30S	6.7	0.25		
KODENSHI HP601	-	0.25		
OSRAM BPW34FS R18R	7		0.25	3.0
OSRAM SFH320FA-3/4	0.45		0.15	0.1
ROHM 1SS355	-			0.3
東芝 1SV147	--			0.1

2.3 X-map システム

X 線センサーはフォトダイオードを採用しているためマルチプレクサでチャンネルセレクトされていない時間帯も感度を得られるので各チャンネルに積分回路を設けることで小型センサーの感度不足を補うことができた。

3. StiffenerX-map

3.1 StiffenerX 基板製作

上記の X-map システムの利点であるフレキシブル基盤、小型センサーを生かし、ILC 加速空洞のスティフナー内側に X 線センサーを図 6 のように設置する。下記の仕様で図 7 の StiffenerX 基板を 2 個製作した。

- 測定回路は実績のある XT-map を採用する。
- センサー等の実装部品も XT-map で使用しているものを採用する。
- センサー基板は XT-map と同じカプトンベースの FPC。章や図表を参照する番号は正しいか。
- FPC は 4 層構造。裏面に補強層を設け XT-map にくらべ厚みを増やす。
- 各アイリスに 3 2 個のセンサー、8 箇所アイリスを同一測定系に設置。

図8のようにアイリス部に2箇所あるスティフナーの隙間から内面に沿ってフレキシブル基板を挿入し、アイリスを覆うように設置する。製作した基盤の弾性(厚み)は良好で、スムーズに挿入できスティフナーにそって設置、固定可能である。

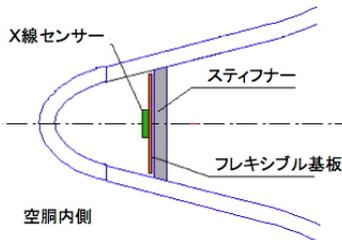


図6: StiffenerX センサー配置

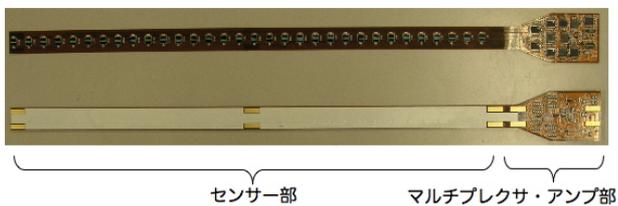


図7: StiffenerX 基盤

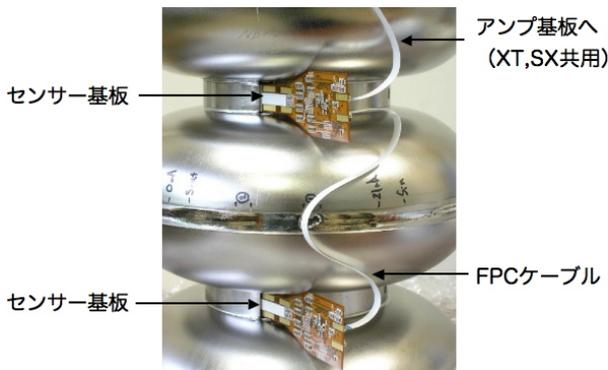


図8: StiffenerX 基盤の実装

3.2 測定結果

縦測定(KEK)で StiffenerX 基盤の動作試験を行った。X線の測定はできたと思われるが下記の問題により現状の測定結果は信頼性は高くない。

X線センサーOSRAM BPW34FS R18Rの極低温環境による破損が問題となった。正確な温度は不明であるが現状で液体窒素温度でも破損が起こることが確認された。2010年度より行なって来たセンサー選定のための実験では1度もこのような現象は見られなかったため、ロットによる特性とも考えられる。

また、図10のように室温では問題なく測定できていたが4K環境ではX線センサーの全チャンネル(全センサー)に信号飽和がみられた。この件についても今までの同じ計測回路を採用した基板を使用してきたが問題は起きなかったためICチップのロットの問題か、使用部品の見直しによる小改良が原因かは不明であり、2つの問題とも調査中である。

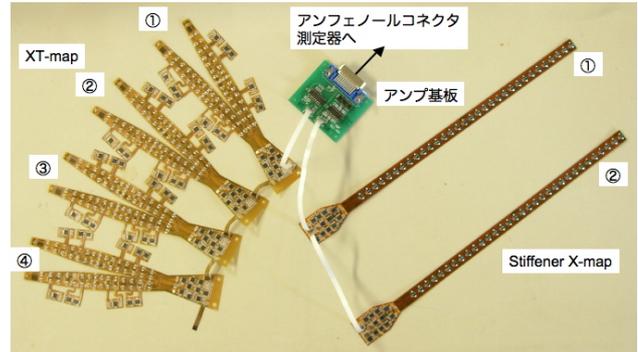


図9: KEK 縦測定でのセットアップ

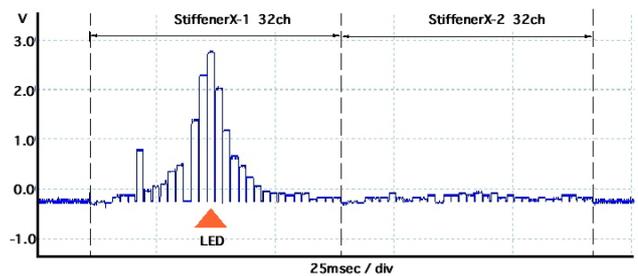


図10: StiffenerXによるLED光の検出 (クライオスタット内設置、室温)

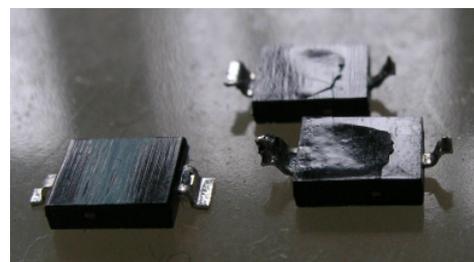


図11: 破損したセンサー

4. 課題と今後の予定

上記の問題点の調査を行ないつつ、X線センサーについては別のダイオードの低温環境での耐久試験を進めている。また、StiffenerX基板の形状修正を行い、ILC加速空洞縦測定(KEK)では固定治具のためスティフナー外側にもセンサーの取付けができないアイリス部にも基板設置を可能にする。10月には全てのアイリスの測定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] H. Tongu, et al., "UPDATE ON SC CAVITY INSPECTION", Proc. LINAC10, 2010
- [3] H. Tongu, et al., "Development for inspection system of the superconducting cavities at Kyoto University", Proc. of the 8th Annual Meeting of PARTICLE ACCELERATOR SOCIETY of JAPAN, 1307-1309, 2011.