

ILC 超伝導加速管のための X-map 非破壊検査の開発

DEVELOPMENT OF X-MAP NONDESTRUCTIVE INSPECTIONS FOR ILC CAVITY

頓宮 拓^{#,A)}, 岩下 芳久^{A)}, 銚之原 久雄^{A)}, 久保 毅幸^{B)},
佐伯 学行^{B)}, 早野 仁司^{B)}, 山本 康史^{B)}, 及川 大基^{C)}
Hiromu Tongu^{#,A)}, Yoshihisa Iwashita^{A)}, Hisao Hokonohara^{A)},
Yoshiyuki Kubo^{B)}, Takayuki Saeki^{B)}, Hitoshi Hayano^{B)}, Yasuckika Yamamoto^{B)}, Hiroki Oikawa^{C)}
^{A)} ICR, Kyoto University, ^{B)} KEK/SOKENDAI, ^{C)} Utsunomiya University

Abstract

We developed an X-ray mapping system sX-map for superconducting cavities. The sensors are inserted under the stiffener rings between cavity cells, whose locations are close to the iris areas. The whole circuits are immersed in liquid He and the multiplexed signals reduces the number of cables to the room temperature region. sX-map has the advantages in its compact size, low cost and simple setup for nondestructive inspections. The sX-map system detected X-rays from field emissions in vertical RF tests of ILC 9-cell cavities at Jefferson Lab (JLab) and KEK. sX-map showed an excellent performance in the measurement test at JLab, it exhibited a high sensitivity compared with an the fixed diode rings colocated at irises and ion chamber located outside of the vertical test cryostat.

1. はじめに

超伝導空洞の性能劣化の主な原因は空洞内面に存在する局所的な欠陥などで生じる温度上昇による超伝導状態の破壊(クエンチ)、内面の突起や微小ダストから生じるフィールドエミッション(電界放出)による Q 値劣化またそれによる温度上昇である。100 μm から 1 μm の微小サイズの傷や突起などの局所的な欠陥は高分解能カメラによる欠陥場所の特定、局所研磨と電解研磨等によるトリートメントによって性能の回復を図ることが可能である。一方、超伝導下の RF 入力による加速空洞性能試験(縦測定)における発熱箇所の検出、及び、フィールドエミッションにより発生した X 線検出による局所的欠陥の探索も有効な非破壊検査方法である。数 10 μm 程度のダストは空洞組立時に空洞内に入りうるため、混入の危険性が最終組立まで存在し、完全な除去は困難である。特にフィールドエミッションは欠陥による局所的な温度上昇が起こるよりも低い電界でも発生し性能を低下させるため、ダスト混入によるフィールドエミッションの結果として発生する X 線を確認することが加速空洞の性能検査において重要となる。

京都大学と高エネルギー加速器研究機構(KEK)は共同研究で国際リニアコライダー計画(ILC)の9セル空洞の非破壊検査を目的に空洞外表面の温度センサーによる発熱位置探索(T-map)、X 線放射量の測定による電界放出位置の探索(X-map)による欠陥探索装置の開発を行ってきた[1]。KEKにて欠陥位置などを測定済みの伝導空洞を使用した試作マッピング基板による運用テストにおいて T-map はクエンチの原因となる局所的な温度上昇について検出することに成功し、センサーの感度や応答時間、位置分解能において良い結果を得ることができた[2]。Jefferson Lab(JLab)にてこのマッピングシステムを用いて電界放出位置の探索のための X 線測定を行った[3]。JLabでのX-map実験結果、およびマッピングシステムの開発状況について報告する。

2. マッピングシステム

マッピングシステムは ILC9セル加速空洞の非破壊検査を想定してデザインされており、以下のモチベーションで開発を進めてきた。

- ・ 安価な製作費(汎用の低価格電子部品の使用)
- ・ 高位置分解能(多点測定)
- ・ 低運用コスト(極低温側への熱侵入低減)
- ・ 高運用効率(被測定物への容易な実装)

T-map システムと X-map システムは同じセンサー基板上に実装することが可能であり、Figure 1 に示すようにこのマッピングシステムは 2 系統の測定回路基板を備えている。XT-map は T-map と X-map の複合回路基板で、加速空洞外壁の赤道部中心に設置される。stiffener-X-map(sX-map)は X 線検出に特化した形状のセンサー基板を使用し、アイリス部のスティフナーリング内側に設置する。Figure 2 に最新の試作センサー基板(XT-map ver.4 と sX-map ver.2)と中継基板を示す。XT-map と sX-map は独立したアウトプットラインをもっているため、個々の運用も可能である。

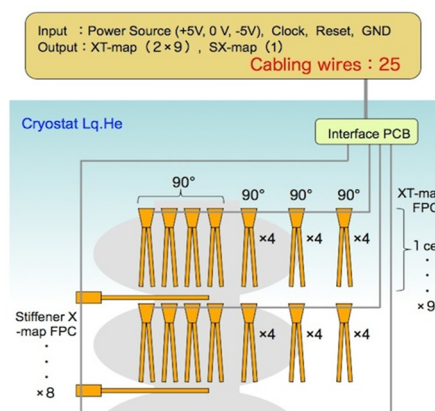


Figure 1: The inter-connection for the XT-map system and Stiffener-X-map in the schematic design.

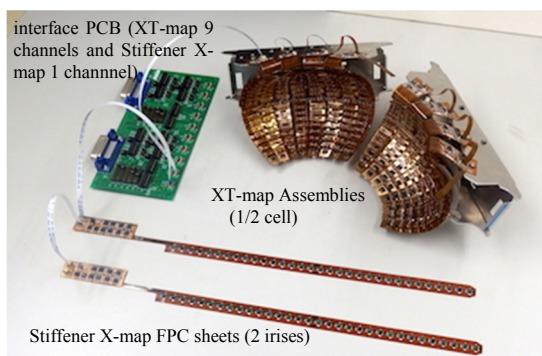


Figure 2: New FPC assemblies for Ver.4 XT-map (1/4 cell) and the Ver.2 Stiffer-X-map (2 iris). These have sensors, amplifiers and multiplexers on FPC sheets (polyimide film with several layers).

測定回路はポリイミドフィルムベースのフレキシブルプリント基板 (FPC) 上に各センサー、アンプ回路、マルチプレクサ回路で構成される。センサーの選定は性能やコスト、パッケージサイズ等を考慮し、T-map センサーには酸化ルテニウムチップ抵抗 (ROHM KTR03)、X-map センサーは PIN フォトダイオード (OSRAM BPW34FS R18R) を採用した[4]。他研究所で採用されているセンサー (カーボン抵抗やサイズの大きいフォトダイオードなど) と比較すると感度では劣るが同基板上のアンプにより十分なパフォーマンスを実現している。また、高分解能探索を可能とするため、T-map FPC は空洞の壁厚、熱伝導等を考慮し、程度 1024 個/1セル (1点/cm²)、X-map FPC は 256 個/cell (XT-map), 32 個/iris の実装を行い、小型センサーによる高密度設置を実現している。

クライオスタット内に入るケーブルの数の削減は、極低温環境への熱侵入を減少させ、液体 He の運用コスト削減の有効な手段である。Figure 1 に示す各センサーFPC のデジチェーン接続とマルチプレクサ回路による信号多重化で高速スキャンングを実現し、ケーブルの数の削減を可能にした。現状では T-map 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-map は 500Hz) である。アウトプット信号ラインは1セル単位で設置しているので ILC 加速空洞の 1 スキャンは約 1sec で設計しているが、アンプ回路の最適化により、さらに速いスキャンングを計画している。

2.1 XT-map

XT-map はセルの赤道付近の曲面を沿うように2枚葉形状 FPC を採用し、デジチェーン接続された基板 16 枚で1セルを覆う設計となっている (Figure 2)。基板上に設置しているリン青銅バネにより各温度センサーと空洞外壁の熱的コンタクトを確保している。

KEK にて発熱箇所が特定された ILC 加速空洞の縦測定において XT-map FPC (Ver.3) を4枚 (1セルの 1/4 エリアを覆う) を用いた温度上昇の検出試験を行い、クエンチ時の発熱位置の探索において有用なデータを得ることができた[5]。この実験で XT-map システムの有用性を示すことができた。

2.2 stiffener-X-map

ILC 加速空洞はアイリス部に構造補強のためのスティ

フナーリングが溶接されているため、X線センサーをその外側に設置すると、アイリス部で発生したX線は検出器到達までに、空洞とスティフナーリングの2枚のニオブ板を通過するため大きく減衰し、空洞内壁の欠陥位置探索が不正確になる。sX-map はX線センサーとして小型の赤外線フォトダイオードの採用および、リボン形状 FPC (Figure 2) への実装によるセンサーFPC 形状の最適化で、Figure 3 で示すように空洞とスティフナーリングの間へのX線センサー設置を可能とした。また、XT-map と同様に信号多重化によるスキャンング、および、各基板のデジチェーン接続による信号線の激減、実装の簡略化に成功している。

sX-map システムはセンサーFPC をアイリス部に巻いて設置するようデザインされているが、Figure 4 のように 8 箇所アイリスに加えてトップフランジとボトムフランジ傍に設置し 10 枚のセンサーFPC で運用している。各 sX-map FPC には 32 個の X 線センサーを実装しており、各チャンネルに積分回路を設け、アンプ回路を通すことで小型フォトダイオードの感度不足を十分補うことができている。sX-map システムは Figure 5 のような機器で構成され、測定結果を PC モニターで確認出来る。

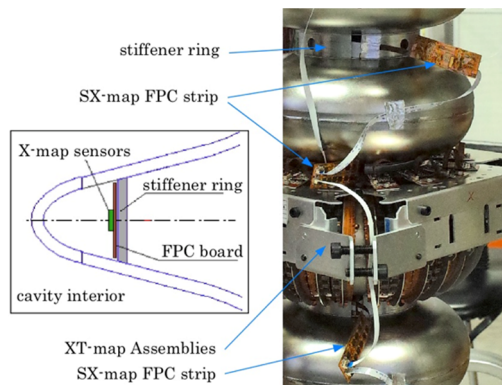


Figure 3: Stiffener-X-map FPC strips are installed under the stiffener rings.

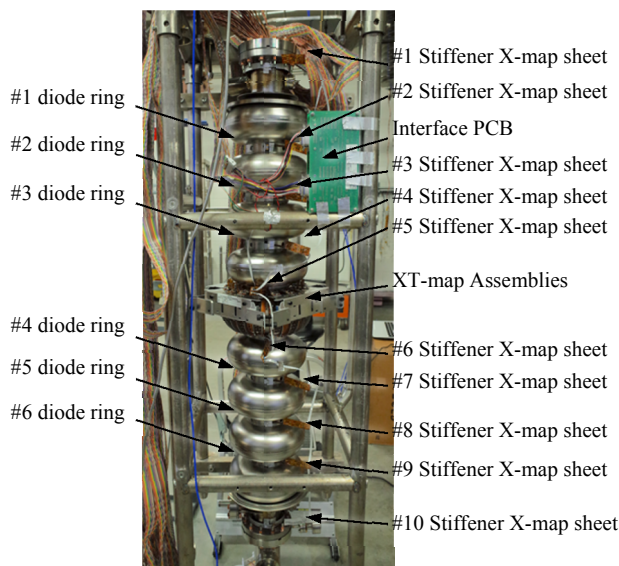


Figure 4: XT-map (1 cell) and Stiffener-X-map (10 strips) test circuits and its installation with vertical test at JLab.

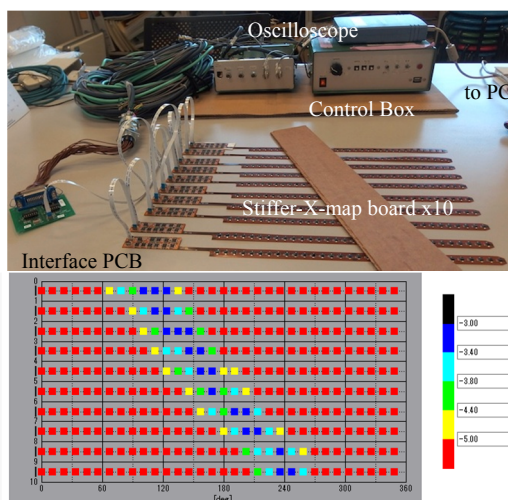


Figure 5: The data acquisition system for SX-map (Ver.2 FPC board). A USB connected PC oscilloscope converts the multiplexed sensor voltage train transmitted through a pair of signal lines together with a clock signal. The acquired data is processed in a notebook-PC. A screen shot of the measurement software is shown in the bottom, where sX-map detects the infrared light from fluorescent room lamps as shown in the photo above. A shade bar was placed on SX-map. The red dots indicate detection of infrared light from fluorescent room lamps.

3. 測定結果

JLabにて行われた縦測定で Figure 4 の XT-map sX-map を使用して X 線検出実験を行った。フィールドエミッションを多発させるため、加速空洞を 10^{-3} mber 程度の真空中で 4K まで冷却し、縦測定を行った。

Figure 4 に示す6箇所のアイリス部のスティフナーリング外側に設置された JLab の X-map システムと比較して sX-map は明らかに高感度の結果を得ることができた。Figure 6 にパイモードで加速勾配を変化させた X 線の選出結果を示す。前述のように sX-map は 1s/scan で運用するよう設計されているが、センサー信号が飽和してしまったため、Figure 6-A のようにスキャニングレートを約 0.2s/scan に上げ、積分回路によるアンプ時間を約 20% に落として測定を行った。Figure 6 の結果からフィールドエミッション発生において最も影響する欠陥は 5-6 アイリスもしくは 6 セル目の 210 度位置に存在すると考えられる。また、スキャニングレートを約 2.5s/scan (積分回路によるアンプ時間は約 250%) に下げた高感度設定ではクライオスタートのそばで、X 線シールドの内側に置いた電離箱式サーベイメータでは検出不可だった低レベル X 線 (パイ・モードでの加速勾配 10MV/m) を検出することができた (Figure 6-H)。

4. まとめ

JLab での測定結果から sX-map システムは超伝導加速空洞のフィールドエミッションに起因する X 線の検出において非常に優れたパフォーマンスを持つことが実証された。sX-map システムはダウンサイジングと低コストを目標としたデザインでありながら、非破壊検査として十分な高速スキャンと高感度、高位置分解能を実現した。

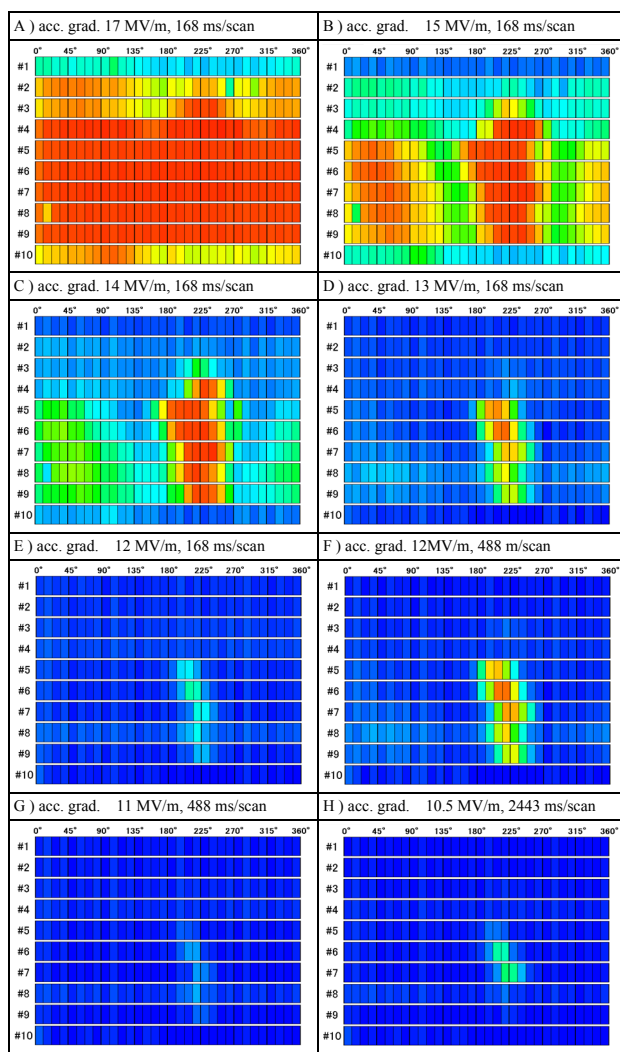


Figure 6: The screen shots of measurement results with Stiffer-X-map. For example, #6 SX-map board is installed at an iris between 5th and 6th-cell from the cavity top. The horizontal axis is an angle of sensor position on each iris. The signal display becomes close to red when an output signal is strong.

謝辞

本研究の一部は文部科学省委託事業 光・量子融合連携研究開発プログラム、日米科学技術協力事業、京都大学化学研究所 共同利用・共同研究拠点 課題 (2016-8)により実施されました。

参考文献

- [1] H. Tongu, M. Ichikawa, Y. Iwashita, H. Hayano, K. Watanabe, Y. Yamamoto, Proc. LINAC10, 836-838, 2010.
- [2] H. Tongu, Y. Iwashita, H. Fujisawa, H. Hayano, K. Watanabe, Y. Yamamoto, Proc. IPAC10, 2971-2973, 2010.
- [3] H. Tongu, H. Hokonohara, Y. Iwashita, H. Hayano, T. Kubo, T. Saeki, Y. Yamamoto, H. Oikawa, R. L. Geng, A. Palczewski, Proc. IPAC2016, 1040-1042, 2017.
- [4] H. Tongu, Y. Iwashita, H. Hayano, Y. Yamamoto, Proc. The 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 1146-1148, 2012.
- [5] H. Tongu, Y. Iwashita, H. Hayano, Y. Yamamoto, Proc. SRF2013, 747-750, (2013).