

超伝導加速管の欠陥探索システム開発

DEVELOPMENT OF DEFECT SCANNING SYSTEM OF SC CAVITY

頓宮 拓^{#,A)}, 岩下 芳久^{A)}, 銚之原 久雄^{A)}, 早野 仁司^{B)}, 山本 康史^{B)}, 真直太郎^{A)}, 粒子加速^{B)}
Hiromu Tongu^{#,A)}, Yoshihisa Iwashita^{A)}, Hisao Hokonohara^{A)}, Hitoshi Hayano^{B)}, Yasuchika Yamamoto^{B)}

^{A)} Institute for Chemical Research Kyoto University (ICR)

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

XT-map system is a combined system of T-map and X-map. In the vertical test at KEK STF, XT-map system succeeded in the quench detection and the temperature rises survey by the Ver.3 circuits. Now the Ver.4 circuits that improved troubles of the Ver.3 are producing. T-map sensors of Ver.4 circuit have realized the state of always contacting the cavity exterior surface under moderate stress.

1. はじめに

京都大学化学研究所(ICR)で開発を行なっている XT-map は国際リニアコライダー計画(ILC)で使用される超伝導加速空洞の製作現場において空洞性能に影響を及ぼす欠陥の探索を目的としている。

超伝導加速空洞の性能低下の要因の1つとして内壁表面および表層付近に存在する数十 μm の微小欠陥や汚染による発熱や電界放電がある。これによりクエンチ、加速効率の低下が発生する。技術設計報告書における ILC 超伝導加速空洞生産では欠陥対策として電界研磨以外に光学的観察[1]と局所研磨[2]による欠陥除去を行なうことになっている。ICR では高エネルギー加速器研究機構(KEK)と共同研究でより効率的に欠陥対策を可能とする XT-map の開発を行なっている。

XT-map は超伝導下での 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(T-map)、X 線放射量の測定による電界放出場所の探索(X-map) を同じ測定回路、同じ基板上にセンサー配置した欠陥探索 Mapping システムであり、従来の T-map、X-map と比較し、以下の特徴がある。

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

XT-map の T-map センサーは空洞の壁厚、熱伝導等を考慮し、1点/cm² 程度 (1024 個/1セル) の密度で配置している(Figure 1)。センサーの高密度化を実現するため T-map センサーに面実装タイプの酸化ルテニウムのチップ抵抗を採用している。極低温度測定において市販の温度センサーや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 (AB 社) の炭素抵抗[3]と比較し、我々の採用した 1.6x0.8mm サイズの 10k Ω 酸化ルテニウムチップ抵抗 (ROHM KTR03) は小サイズ (高密度実装)、コスト、入手性において非常に優れて

いる。T-map センサーとしての 2K~4K での温度感度は AB 社の炭素抵抗(100 Ω)と比べて 1/3 程度ではあるが、T-map での使用において十分な温度特性を有しており、反応速度はほぼ同等である。これらの特徴については X-map センサーも同様で、我々の使用している小型フォトダイオード (OSRAM BPW34FS R18R) は小型、低コストの面で優れているが、センサー感度は KEK で採用され実績のある浜松ホトニクス社の S1223-01 に比べ約 1/4 である[5]。しかしながら XT-map ではアンプ回路をセンサー近くに配置することでクリアな出力を得ることを実現している。特に小型フォトダイオード (X-map センサー) は積分回路アンプにより大幅なゲインを得ている。

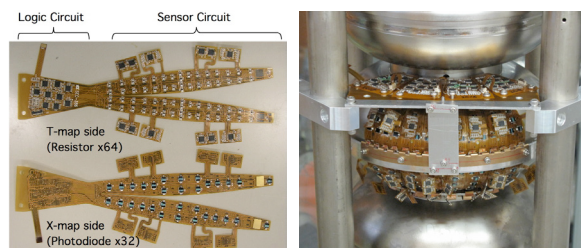


Figure 1: The Ver.3 double-leaf-shaped Flexible Printed Circuits films (polyimide film with several layers) for XT-map. And installation of test of XT-map assemblies (1/4 cell) for the quench detection at KEK.

また、超多点測定によるセンサー配線による極低温環境への熱流入の対策として Figure 2 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高速チャンネル切替え回路を基板上に設置している。さらに XT-map システムの運用においてセンサー基板の着脱を容易にするため、Figure 1 のようにポリイミドフィルムベースの短冊状フレキシブル基盤(PCB)にセンサー等をマウントし、空洞外壁に設置する方法を採用している。また、同じ基板上に T-map、X-map センサーを配置して同時測定が可能であり、両隣の基板とのチェーン接続により基

板 16 枚で 1 セルを覆う設計となっている。結果、XT-map と同じ測定システムを採用する StiffenerX-map (ILC 加速空洞のアイリス部スティフナーリングによる X 線の減衰の影響を避けるためスティフナーリング内側に設置する X-map) (Figure 3) [5] を含め、XT-map システムは 25 本のケーブルで運用することを実現している (Figure 2)。

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 センサーは 2msec、500Hz)で 1 セル単位のアウトプットで運用しており、加速空洞の 1 スキャンは約 1sec である。

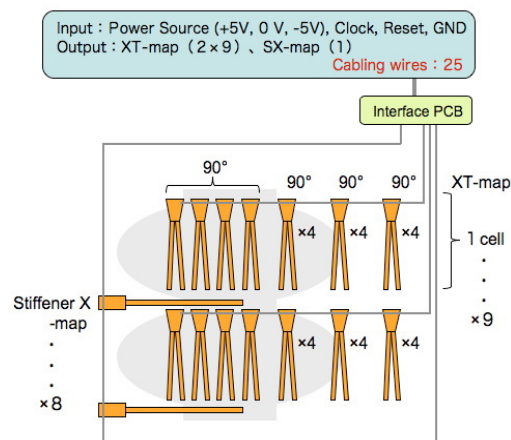


Figure 2: Block diagram of T-map system.

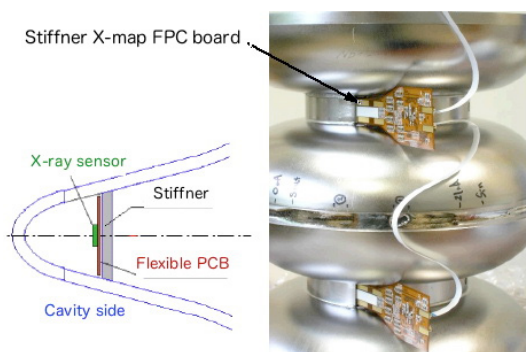


Figure 3: Stiffener X-map test circuits and its installation. The ribbon shaped FPC boards are installed under the stiffener ring.

2. XT-map 基板の測定結果

センサーの温度特性や耐久試験、縦測定におけるシステムの運用テストは KEK STF にて行なっている。発熱箇所が特定された加速空洞を用いた縦測定での XT-map のクエンチ検出結果 (T-map) を Figure 4 に示す。4 枚(XT-T-1~4)の XT-map 基板 (Ver.3) を使用し発熱箇所付近に設置しクエンチ検出試験を行った結果である。事前の疑似発熱による測定でセンサーのハンダ割れによる不良チャンネルや、空洞外壁への接触 (熱的コンタクト) 不足によ

る感度不良センサーが多数存在したが、発熱位置の探索に十分な結果である。Figure 6 にクエンチ検出後のセンサー出力の変化を示す。今回得た結果からクエンチによる温度上昇時間は 0.5sec 程度、発熱箇所で 100mV 以上の出力を検出している。これは 10K 程度まで温度上昇があったことを示しており[4]、Figure 5 の結果とあわせて、現状 1GHz (Figure 6 において 0.216sec/1scan) で運用している T-map を 2kHz (9 セル XT-map で 0.5sec/1scan) での運用が期待できる。

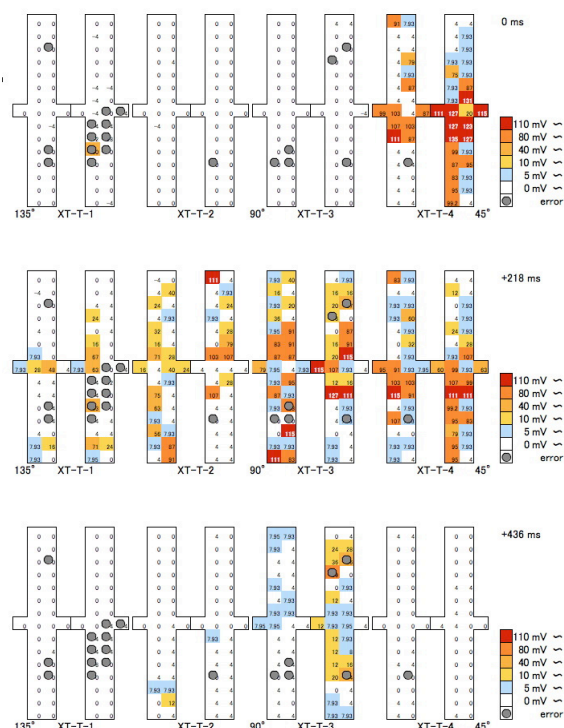


Figure 4: Typical measurement results of the quench detection test of XT-map during the vertical test. The circles are quench location previously observed by KEK T-map. The temperature rise time is estimated about 0.5sec, because the scan cycle is about 0.216sec.

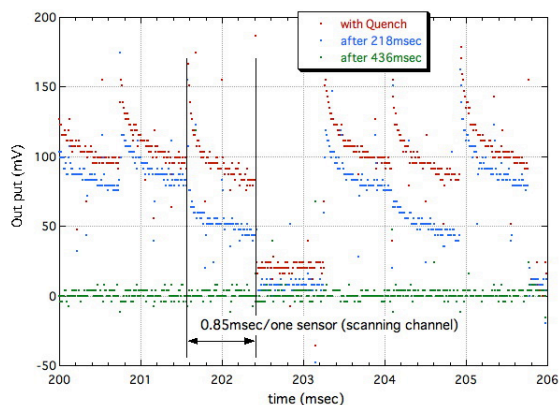


Figure 5: Raw output signals of T-map during quench. Signals from several T-map sensors around a quench event can be seen.

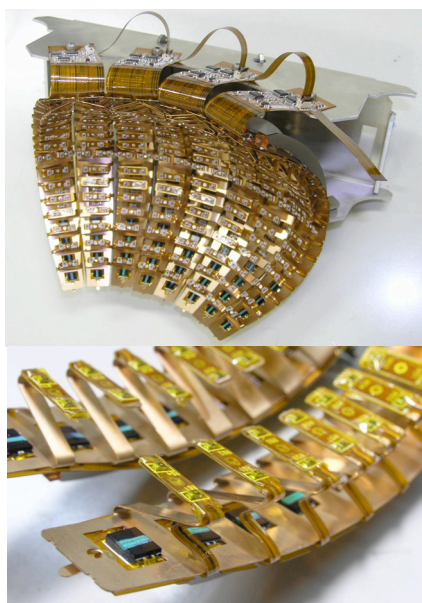


Figure 6: The Ver.4 XT-map assemblies (1/4 cell). It is comprised of the double-leaf-shaped Flexible Printed Circuits films (polyimide film with several layers), the phosphor bronze sheets with spring functions and a fixing device for SC-cavity.

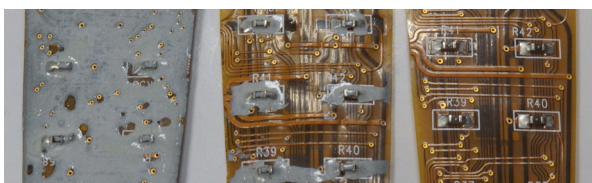


Figure 7: T-map sensors with fluorine resin coating. This coating peels off easily. Left: entire surface. Center: around sensor. Right: without coating.

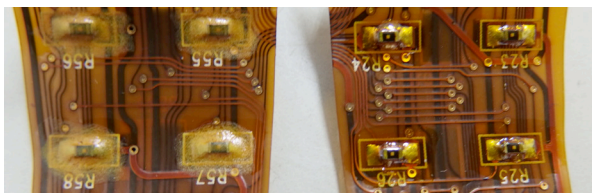


Figure 8: Left: T-map sensors with polyimide coating mixed fluorine resin. Right: T-map sensors with polyimide coating.

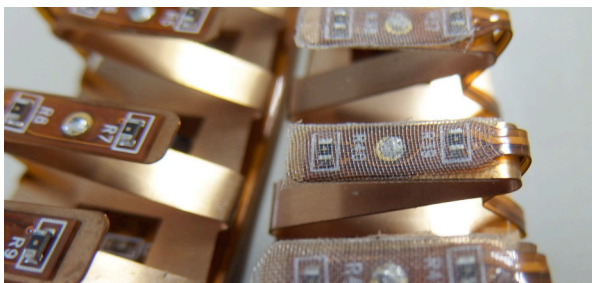


Figure 9: T-map sensor covered by nylon mesh.

3. 現状と改善

XT-map 基板 Ver.3 の運用試験で明確になった大きな問題点は「T-map センサーと空洞外壁の熱的コンタクト不良または不足」である。Figure 4 の実験では空洞のアイリス位置で基板を押え、張力により T-map センサーを空洞外壁に接触させていたが、Figure 6 に示す基板 Ver.4 では各 T-map センサーを独立したバネ上に設置し、空洞外壁への接触圧を一様に確保できるよう設計している。

XT-map 基板 Ver.4 への設計変更により、空洞との電気絶縁に現在使用しているカプトンテープについて作業効率、熱伝導性を考慮したより良い代用素材を再検討している。極低温での熱伝導材として実績のあるスタイキャスト 2850 FT (1.47 W/m.K) とカプトンフィルム (0.16 W/m.K 粘着材なし) 7.5 μ m 厚の比較実験結果から、基板 Ver.3 では空洞との電気絶縁に強度と作業性、熱伝導のバランスを考慮しカプトンテープ (寺岡製作所 650S#12 厚み 35 μ m : カプトン 12 μ m、粘着材 23 μ m) の採用している。しかしながら Ver.4 のセンサー独立支持にともない製作作業性、熱伝導性について再検討を行なっている。

樹脂コーティング (厚み 40 μ m 程度) を試したがフッ素樹脂コーティングはチップ抵抗への接着が悪く、室温においても剥がれが生じた (Figure 7)。ポリイミドコーティング、フッ素樹脂ポリイミド混合コーティング (Figure 8) は低温耐性 (液体窒素)、機械強度も問題ないがコーティングの性質上、チップ抵抗の角で膜厚が薄くなりコーティング不良が多数発生し問題となっている。今後、超伝導温度での温度測定実験で熱伝導性の調査を極薄 FEPT 脂収縮チューブ、ナイロンメッシュ等 (Figure 9) も合わせて行ない、縦測定での対放射線、運用試験を行なう予定である。

謝辞

本研究の一部は文部科学省受託研究:光・量子融合連携研究開発プログラムの成果である。

参考文献

- [1] Y. Iwashita, Y. Tajima, H. Hayano, ., “Development of High Resolution Camera for Observations of Superconducting Cavities”, Phys. Rev. ST Accel. Beams, 11, [093501-1]-[093501-6], 2008.
- [2] K. Watanabe, H. Hayano Y. Iwashita., “CAVITY INSPECTION AND REPAIR TECHNIQUES”, Proc. SRF2011, 598-602, 2011.
- [3] Balle, Ch., Casas-Cubillos, J. et al, “Influence of Thermal Cycling on Cryogenics Thermometers” Advances in Cryogenic Engineering 45B, Plenum,1999, pp. 1817.
- [4] H. Tongu, et al., “UPDATE ON SC CAVITY INSPECTION”, Proc. LINAC10, 836-838, 2010.
- [5] H. Tongu, et al., “Development of X-ray detector system at irises of the superconducting cavities”, Proc. of the 9th Annual Meeting of PARTICLE ACCELERATOR SOCIETY of JAPAN, 1146-1148, 2012.