

超伝導加速空洞の検査システム開発のための試験装置構築

DEVICE CONSTRUCTION FOR THE DEVELOPMENT OF CS CAVITY INSPECTION SYSTEM

頓宮拓^{A)}, 岩下芳久^{A)}, 早野仁司^{B)}, 山本康史^{B)}, 楠田敏之^{A)}

Hiromu Tongu^{A)}, Yoshihisa Iwashita^{A)}, Hitoshi Hayano^{B)}, Yasuchika Yamamoto^{B)}, Toshiyuki Kusuda^{A)}

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

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

Abstract

Our XT-map system is the mixed system of X-map and T-map for the quench detection of superconducting cavities. And Stiffer X-map is able to be installed under the stiffener ring at narrow cavity iris zone using the same compact system as XT-map. The quench detection by our XT-map test circuit was measured in vertical test at KEK. A helium cryostat for component R&D of the mapping system installed in ICR for improvements on development efficiency.

1. はじめに

国際リニアコライダー計画(ILC)や各国で計画が進められている X 線 FEL、エネルギー回収型線形加速器(ERL)では超伝導加速空洞の採用が計画され、空洞の設計、開発、生産技術について研究が進められている。極低温下で運転する超伝導加速空洞は加速空洞の内壁表面に存在する微小欠陥(数十 μm)や汚染による発熱、電界放出電子などが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。具体的には溶接ビードの表面及び内部欠陥、表面処理時の残留汚染物であるが、高エネルギー加速器研究機構(KEK)の ILC 加速空洞の製作手順では 90%以上の歩留りを達成している。

現在、ILC 加速空洞の開発現場にお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(T-map)、X 線放射量の測定による電界放出場所の探索(X-map)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ができる。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欠陥場所の特定を行なっている。

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 XT-map の研究[2]を進めてきた。また、この XT-map と同様の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 Stiffer X-map の開発も進めている。

これまで低温環境での動作試験などは KEK の加速空洞縦測定スケジュールにあわせて測定を行ってきた。センサー感度測定や測定システムの動作実証など成果はあったが、KEK 縦測定は大型設備であるため週 1 回のスケジュールと限られ、また京都大学からは遠隔地であるため実験結果のフィードバックの遅れなど、XT-map の迅速なテストを行なうに

は時間効率の悪い状況にあった。そのため小型のクライオスタットを用いたコンポーネント開発を目的とした低温環境試験装置を準備した。

2. 多点測定システム

現在、京都大学では ILC の 9 セル加速空洞の非破壊検査を想定して研究開発を進めている。本研究の mapping 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および X 線センサーには高密度実装可能な面実装(SMD)の電子部品を使用し、Figure 1 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(PCB)にマウントし、空洞外壁に設置する方法を採用した。センサー高密度化により測定位置精度の向上、および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。

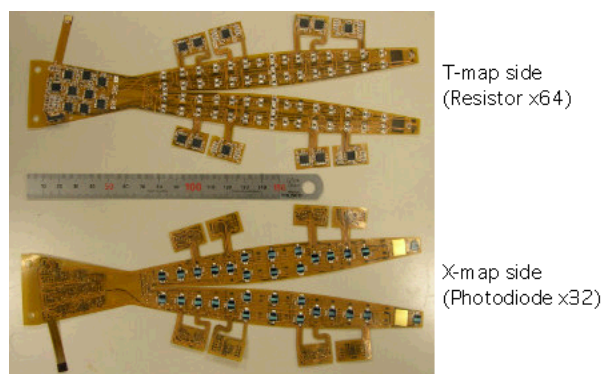


Figure 1: Flexible PCB for XT-map.

3.1 XT-map

T-map は縦測定において高分解能の発熱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 個のセンサーを使用する。センサーには温度特性、高密度実装、コスト、入手性、空洞外壁への接着性等を考慮し、1.6x0.8mm サイズの 10k Ω 酸化ルテニウムチップ抵抗を採用した[3]。また Figure 1 のように基板裏面に

は X-map センサーとしてフォトダイオード[4]を配置して T-map と並行した同時測定が可能となっている。

多点測定では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が、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することで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っている。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を計画している。加速空洞の1スキャンは約1secである。

KEK にて発熱箇所が特定された加速空洞を再度縦測定する機会があり、XT-map 基板4枚(1/4セルのエリア)を発熱が予測される場所に設置(Figure 2)し、クエンチ検出試験を行うことができた。Figure 3 にヒーターを用いた疑似発熱による動作テスト結果とともに測定結果を示す。センサーの空洞外壁への接着性など問題点も明らかになったが、発熱位置の探索に十分なアウトプットを得ることができ、クエンチ検出において T-map のシステムが有効であることを示すことができた。一方、X-map システムは初期の実験では起きなかった液体 He に浸かると出力信号が飽和するトラブルが発生した。X 線を受けていない状態でも発生するため回路に漏れ電流が流れていると考えられる。

3.2 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。小型にまとめられる XT-map の回路系をそのまま流用し、スティフナーの内側にセンサーを設置、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。

空洞アイリス部に設置するため Figure 4 の X-map 基板を試作し、アイリス部への設置確認(Figure 5)、および液体窒素環境での赤外 LED による動作テストでは良好な結果を得たが、KEK 縦測定での実験では上記 XT-map と同様のトラブルが発生した。

3. 低温環境試験装置

初期の XT-map のシステム実証実験では起きなかった信号飽和やセンサー破損[4]などが発生し、開発の遅延が明白になってきた。京都大学化学研究所にてコンポーネント単位で低温試験を行い、迅速なフィードバックができるよう市販の小型クライオスタット(16L)を用いた低温環境試験装置を製作した(Figure 6)。研究室にて測定準備を行ない、同じ宇治キャンパスにある低温物質科学研究センターにて

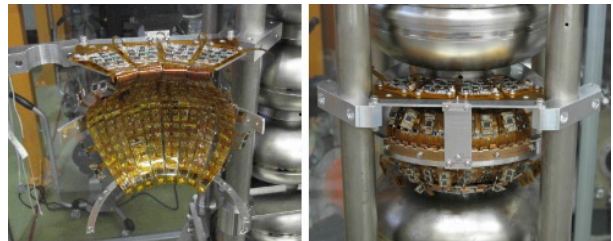


Figure 2: Installed XT-map PCB on a 1/4 cell. X-map sensors are mounted on outer side to the cavity.

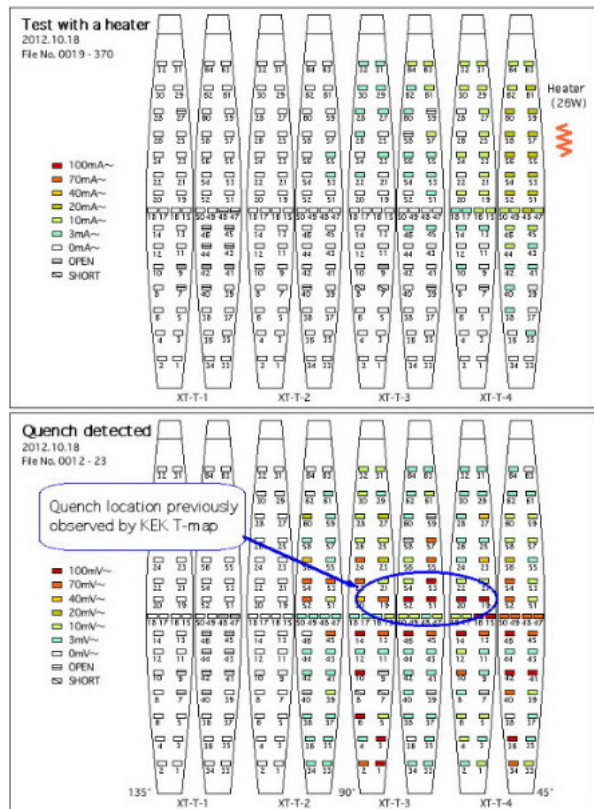


Figure 3: Detection test of T-map at KEK. Mounted sensors test with a heater on upper figure. And Quench detected at Previously observed by KEK T-map system.

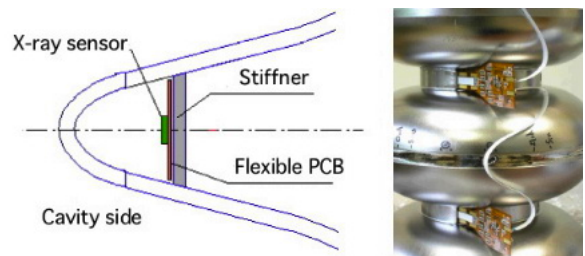


Figure 4: Stiffener X-map layout at ILC cavity iris.

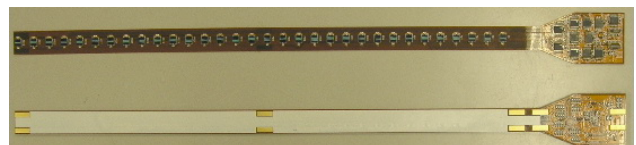


Figure 5: Stiffener X-map.



Figure 6: Liq. He experiment device.

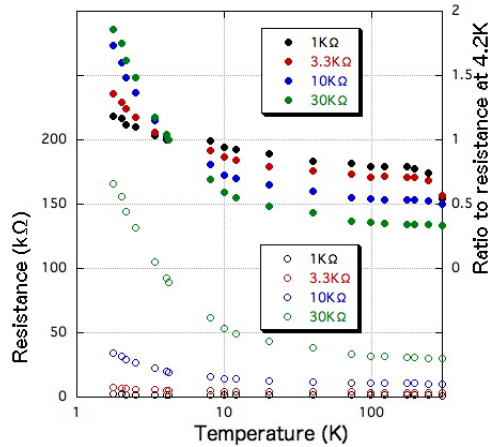


Figure 7: The sensitivity of resistances (KOA RK73B) on the temperature.

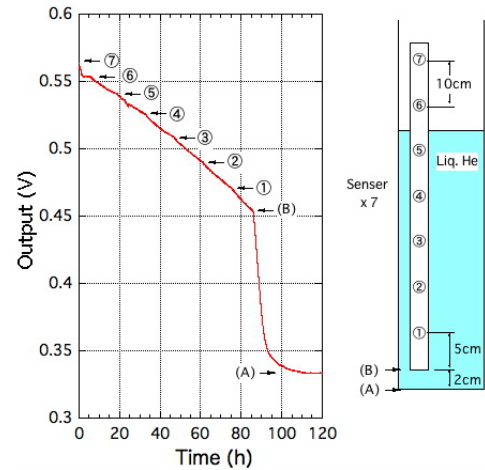


Figure 8: Plots of output of Liq. He level gauge.

He 供給から実験(He 回収)まで行なうことができ、3 日間ほどで定格容量は自然蒸発(約 0.15L/h)するので週 1 回のサイクルで実験のフィードバックを行なうことができる。He 充填時においてもトップフランジのクイックカップリングを利用すれば少ない蒸発量で直径 50mm 以内の装置の交換が可能である。

3.1 He 液面計

T-map センサーとして採用した酸化ルテニウムのチップ抵抗は Figure 7 に示すように 20K 以下では抵抗値が大きくなる。この温度特性を利用した簡易 He 液面計を設置した。市販の超伝導線センサーの液面計と比較し圧倒的に安価で製作できる。Figure 8 に試作した液面計の測定結果を示す。7 個のセンサー全てが液中にあるときとすべて液外にある状態の出力差は約 100mV、全てのセンサーが液外に出たら室温に戻るまでの出力差が約 140mV であり、我々の用途においては十分な出力を得た。また、この抵抗は 4K 以下でさらに抵抗値の変化が大きく、本装置ではまだ運用していないが 4.2K 以下の温度変化の測定も可能である。

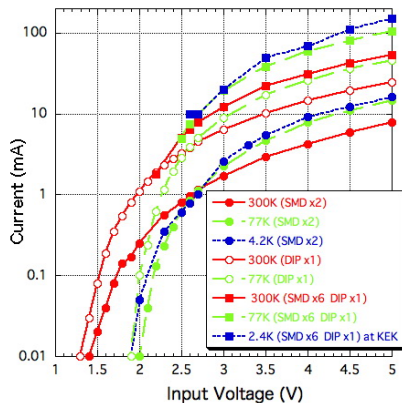


Figure 9: Circuit current of measurement device as a function of various power supply voltage and various temperature. () is the kind of mount type and the used number of CD4069.

3.2 アンプ回路の動作試験

He 液中での X-map システムの信号飽和トラブルはトラブル発生時のシステムの電流値が大きくなっていることから CD4069 CMOS インバータを用いたアンプ回路に問題があると考えた。本低温環境試験装置で CD4069 アンプ回路の動作試験を行った結果を Figure 9 に示す。Figure 9 での測定は XT-map 基板などを用いた測定でシステム使用電流を測定しているが、アンプ回路によって大半の電力は消費されている。CD4069UBE(DIP)、CD4069UBPW(SMD)ともに実用入力電圧においては低温ほど使用電流が大きくなる(液体 He では室温比で約 2 倍)傾向にある。

低温域では CD4069 のゲート電圧の低下と同様の状態にあると考えられ、Stiffener X-map 基板 2 枚 (SMD 1 個/枚)を用いた測定(Figure 9 の③)で電源電圧を下げて信号飽和を回避可能であることを確かめることができた(Figure 10)。本測定で我々の XT-map 等のシステムが低温域での使用において電源電圧の調整を行なうことで問題なく動作できることが確認できた。

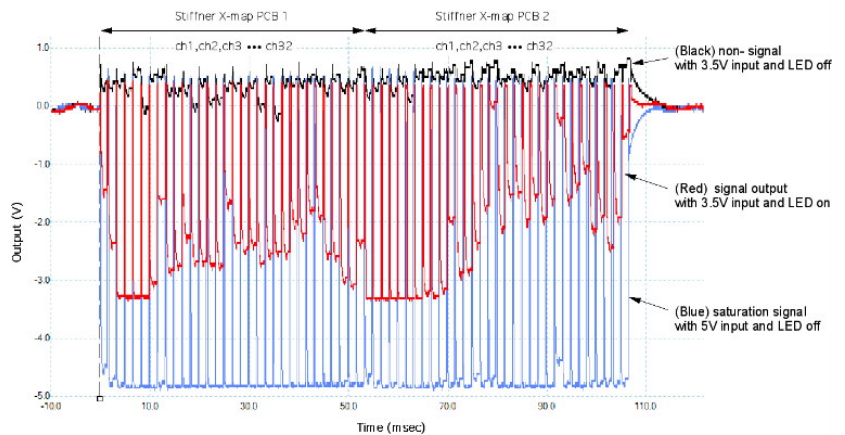


Figure 10: Output signals of two Stiffener X-map PCBs by an oscilloscope. Power supply voltage of the measurement device are 5V or 3.5 V. In the case of 5 V, the output signals are saturated without X-ray (LED light).

4. まとめ

作業効率向上、開発の迅速化のため製作した低温環境試験装置を使用したアンプ回路の動作試験で XT-map の動作不安定の要因であった信号飽和について解決することができた。KEK 縦測定のスケジュールに合わせた測定では困難であった低温環境によるセンサー破損の原因追及やセンサー選定のための測定も効率的に行なえることが期待できる。また、製作した簡易 He 液面計は抵抗の選択、センサー数、測定回路の再検討による最適化でユーザビリティの良い液面計に改善する計画を進めている。

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., “EFFORTS ON NONDESTRUCTIVE INSPECTIONS FOR SC CAVITIES”, Proc. IPAC13, 2352-2354, 2013
- [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
- [4] 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