

## 音響センサーデータ収集システムの開発

### DEVELOPMENT OF DATA ACQUISITION SYSTEM FOR ACOUSTIC SENSORS

牛本信二<sup>#,A)</sup>, 恵郷博文<sup>B)</sup>, 肥後壽泰<sup>B)</sup>, 由元崇<sup>B)</sup>

Shinji Ushimoto<sup>#,A)</sup>, Hiroyasu Ego<sup>B)</sup>, Toshiyasu Higo<sup>B)</sup>, Takashi Yoshimoto<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd.

<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

#### Abstract

At KEK electron/positron injector LINAC, we have been conducting research on arc discharge in S-band accelerating structures by using acoustic sensors. We have developed a high-speed and high-resolution data acquisition system on the PXI standard. The system consists of an oscilloscope to measure RF output signals and a high-resolution analog input module (ADC) to take the signals from the acoustic sensors. These modules are controlled by LabVIEW and the multi-channel data are processed at a rate of 50Hz. This system enables to capture minute changes in the sensor signals by pulse-to-pulse. As a result, we correctly identified the accelerating structure with discharge in the LINAC. In this report, we describe the details of this new data acquisition system and the results on discharge analysis.

#### 1. はじめに

KEK 電子陽電子入射器(LINAC)では 200 本以上の S-band 加速管が運転に使用されている。そのうち、半数以上は LINAC 建設初期から 40 年近く使用している PF タイプと呼ばれる加速管[1, 2]で、近年、冷却水の水漏れや、放電頻度の増加などの不具合が発生しており、加速器の安定運転に影響がみられるようになっている。[3]

複数の加速管で構成された加速ユニット内で、放電がみられる加速管を特定する試みとして、音響センサーを用いた研究が進められてきた[4, 5]。従来の計測ではオシロスコープを使用してきたため、データ収集から解析をリアルタイムでおこなうことは困難であった。そこで、今回、運転繰り返し 50 Hz に対応した新データ計測システムを開発した。データ収集の精度、安定性を向上させるとともに FFT を組み込んだ解析を組み込み、パルス毎に高精度放電現象の解析を自動でおこなうことができる。

本報告では、新たに開発した音響センサーのデータ収集システムと、実際の加速ユニットにおけるシステムの運用結果について紹介する。

#### 2. データ収集システム

##### 2.1 計測機器

これまでの音響センサー計測では主にオシロスコープを使用してきたが、測定の自動化と LINAC のパルス運転(50 Hz)に対応するために National Instruments 社の PXI システム[6]を中心に本システムを新たに構築した。Figure 1 に実際に使用した計測ユニット、Table 1 に使用した PXI 機器を記す。

データ収集プログラムを実行する PC と PXI システム内のリモートコントロールモジュール(PXIE-8301)は Thunderbolt ケーブルで接続し、PC から各モジュールの制御を行っている。オシロスコープ(PXIE-5114)にはクライストロン電源内にある RF 計測機器から、モニタ用の RF 出力信号(4  $\mu$ s)を接続し、RF 出力波形の観測をおこなう。

一方、音響センサーの信号は RF 出力波形に比べて時間領域が広く(数 ms)、信号のレベルも小さい。また複数設置したセンサーの信号を処理する必要があるため、多チャンネル高分解能のアナログ入力モジュール(PXIE-4309、以下 ADC)を使用して測定する。

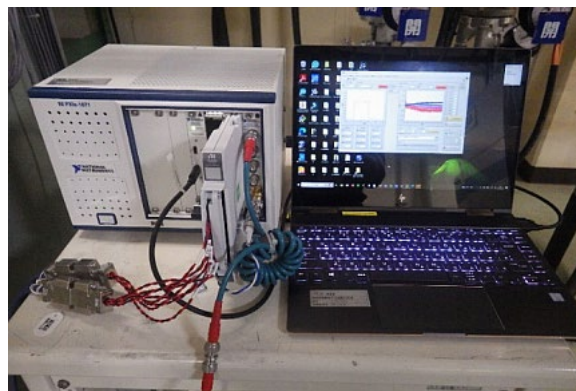


Figure 1: Data acquisition unit(PXI system and PC).

Table 1: List of PXI Systems

PXIE-1083	5-Slot (5 Hybrid Slots), Up to 2 GB/s PXI Chassis
PXIE-8301	Thunderbolt™ 3 PXI Remote Control Module
PXIE-5160	500 MHz, 2.5 GS/s, 10-Bit PXI Oscilloscope
PXIE-4309	Up to 28-Bit, 32-Channel, Up to 2 MS/s, $\pm 15$ V Flexible Resolution PXI Analog Input Module

<sup>#</sup> ushimoto@post.kek.jp

## 2.2 データ収集プログラム

PXI の制御およびデータ収集は LabVIEW[7]を用いてプログラムを作成した。Figure 2 に作成したプログラム、Fig. 3 にデータ収集の概要を記す。

プログラムのフロントパネルには、オシロスコープおよび ADC の各種設定 GUI とモニタしている RF 出力波形および音響センサーのデータを表示する。

データ収集の流れを以下に記す。

1. オシロスコープで RF 出力波形検知(RF ON)
2. データ収集用トリガ信号を ADC へ送出
3. ADC データ収集開始
4. データ収集完了後、プログラムがデータ受信
5. プログラム上のリングバッファ(各チャンネル 10 パルス分)にデータ格納  
※以降、インターロック発生まで 1~5 の繰り返し<インターロック発生後>
6. RF 出力停止。オシロスコープタイムアウト発生 (RF OFF の検知)
7. リングバッファのデータを csv 形式で保存

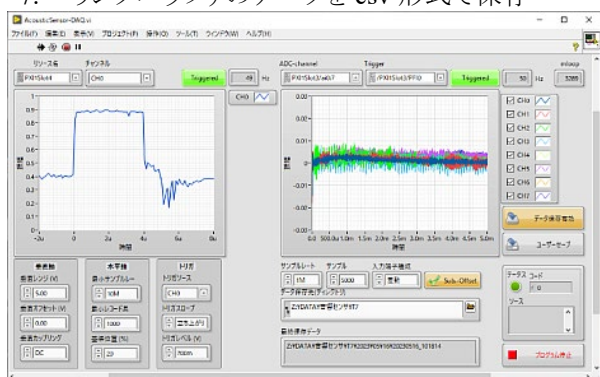


Figure 2: Data acquisition program.

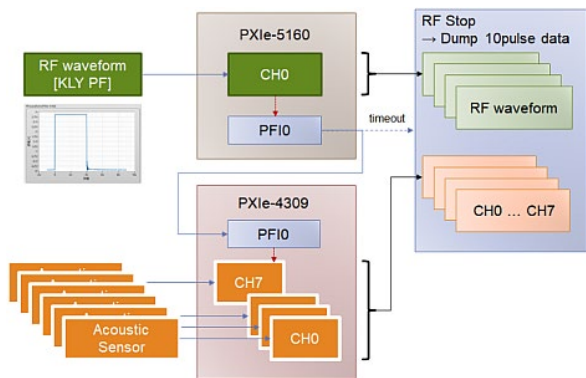


Figure 3: Data acquisition overview.

## 3. 動作試験

本システムの開発および動作試験は、新型 S-band 加速器[8]のコンディショニングを進めていた LINAC 内の加速器試験施設でおこなった。

動作試験時の音響センサー設置状況を Fig. 4 に記す。新型の加速器は、PF タイプの加速器と異なり、本体に直接センサーが設置できる。各部におけるセンサーの応答を比較する目的で加速器の入出力導波管部に各 2 か所、加速空洞表面 4 か所、計 8 個のセンサーを設置した。

まず試験施設でのパルス運転の設定を LINAC と同じ 50 Hz とし、この条件で安定して測定できる ADC のパラ

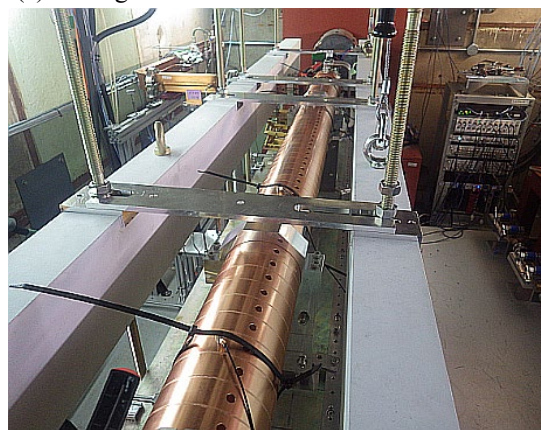
メータを調査した結果、サンプリングレート 1 MS/s、5000 点(8 ch)のデータ収集が可能であった。

その後、実際にシステムを稼働し、データの収集試験を実施した。連続動作試験では上記パラメータで 1 週間以上にわたる安定動作を確認し、実測定において問題がないことが確認された。



(a) Waveguide

(b) Surface of accelerator tube



(c) New s-band accelerator tube at test facility

Figure 4: Installation status of acoustic sensors in the test facility.

## 4. データ解析

動作試験においてデータ収集システムで記録した ADC データはイベント毎に 8 ch×5000 点の信号データが 10 パルス分 1 つのフォルダに保存されている。このデータを可視化するプログラムを LabVIEW で作成した。Figure 5 に作成したプログラムを記す。

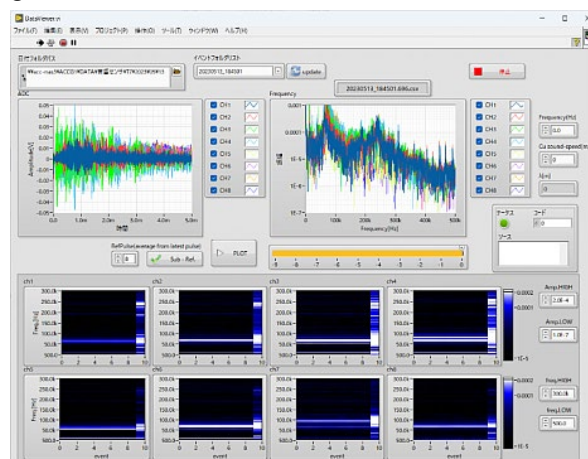


Figure 5: Data analysis program.

このプログラムではデータが保存されたフォルダを選

択すると、10 パルス分のデータを読み込み自動で各グラフの描画をおこなう。パネル上部の 2 つのグラフは指定したパルスにおける各センサーの電圧波形データ(左)とそれを FFT で周波数分布に変換したデータ(右)である。下部の 8 つの強度グラフは、各チャンネルのパルス毎の周波数分布を記したものである(横軸:パルス番号、縦軸:周波数、濃淡:周波数毎の強度)。

Figure 5 は実際に加速管で放電が発生したときのデータであるが、各チャンネルの強度グラフ(横軸は右端が最終パルス)を確認すると、すべてのセンサーにおいて明瞭な変化が生じている。特に 70 kHz および 250 kHz 付近において大きな信号が観測されたが、これは放電により誘起された加速管本体の振動を示していると推定される。動作試験では加速管への入力ピークパワーが 10 MW から 70 MW まで変化させて加速管放電時の信号を収集したが、いずれも同様の結果が得られた。

この結果から、これまで信号が微小で観測が難しいとされてきた加速管の導波管部においても、高分解能 ADC を使用した本システムにより加速管内部で発生した放電を検知できることが確認された。

## 5. 放電加速管の同定試験

良好な動作試験結果をふまえて、実際に LINAC の加速ユニット(#4-6 ユニット)に計測システムを移設し、放電加速管の同定試験をおこなった。この#4-6 ユニットは PF タイプの加速管が 4 本設置されており、これまで加速管の放電と思われる VSWR インターロック(反射波過大)の多発が原因で、クライストロンの印加電圧を下げた運用している。

計測機器はユニットの地上部(クライストロンギャラリ)に配置した。信号用中継ケーブル(15 m)を 2 か所の導波管用貫通孔を経由して加速ユニットまで敷設し、各ケーブルにはセンサー 4 ch 分を中継ボックス経由で接続した(Fig. 6)。音響センサーは加速管の導波管部(入出力部 2 か所)に Fig. 7 のように直接クランプで固定し、加速管 4 本分で 8 個のセンサーを設置した。



Figure 6: State of cable connection in the tunnel.

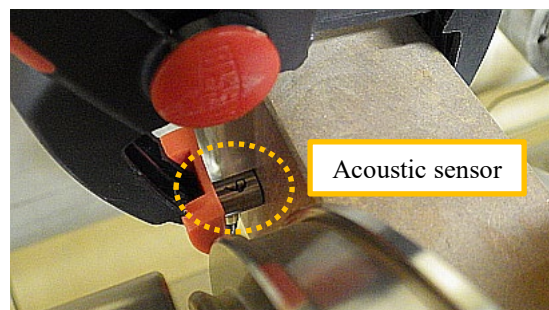


Figure 7: An acoustic sensor attached on a waveguide.

データ収集試験は夏季シャットダウン直前の LINAC 単独運転期間におこなった。放電によるダウンを発生させるため、本来の設定パワーまでクライストロンの印加電圧を上げ、8 時間程度観測をおこなったところ、7 回の VSWR インターロックによるダウンが発生した。本システムでは、このすべてのイベントでデータ取得を成功した。Fig. 8 に測定結果の一例を記す。

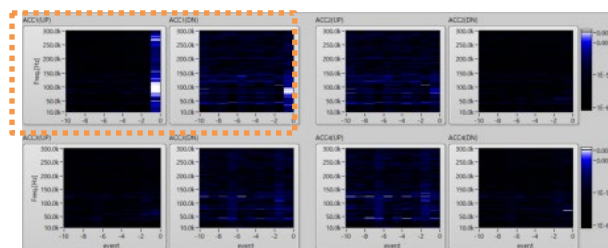


Figure 8: Example of acoustic sensor measurement results at #4-6 unit.

Figure 8 で明らかな反応がみられる左上 2 つのグラフは、ユニット最上流の加速管に設置したセンサーのデータである。今回測定した全データで同様の結果が得られており、#4-6 ユニットでは最上流の加速管が放電していると推定される。

## 6. まとめ

LINAC の加速ユニット内で放電がみられる加速管を同定する目的で、PXI システムを使用した音響センサーデータ収集システムの開発をおこなった。このシステムは高分解能の ADC を用いることで、加速管の導波管部につけたセンサーの信号からでも微細な変化を観測することで、放電現象を捉えることが可能となった。またデータ収集速度も最大 50 Hz に向上し、パルス毎の変化も観測することができる。実際の加速ユニットにおける測定結果からも、高い信頼性が確認された。

今後は加速管だけでなく、導波管やダミーロードなどの RF コンポーネントに関しても使用できるよう開発を進めていく予定である。

## 参考文献

- [1] I. Sato *et al.*, “Design report on PF Injector Linac Upgrade for KEKB”, KEK Report 95-18, in Japanese.
- [2] Y. Iino *et al.*, “PF 2.5 GeV Linac Accelerator Tube Fabrication”, Proceedings of the 7th Meeting on Linear Accelerators, KEK, Japan, Aug. 24-26, 1982, pp. 52-55.

PASJ2023 THOA10

- [3] T. Higo *et al.*, “30 年以上用いられてきた KEK 電子陽電子入射器 S バンド加速管の内面検査”, WEP055, p455, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 9-12, Nagaoka, Japan, 2018.
- [4] Y. Arakida *et al.*, “音響センサによる加速管の放電検出”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 1-3, Sapporo, Japan, 2017.
- [5] T. Yoshimoto *et al.*, “放電をともなう S バンド加速管における音響スペクトル解析”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 18-21, Online, Japan, 2022.
- [6] <https://www.ni.com/ja-jp/shop/pxi.html>
- [7] <https://www.ni.com/ja-jp/shop/labview.html>
- [8] H. Ego *et al.*, “KEK 電子陽電子入射器用 S バンド加速管の開発”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 9-12, Online, Japan, 2021.