

音響センサーデータ収集システムの開発

牛本 信二(三菱電機システムサービス株式会社)
惠郷博文, 肥後 壽泰, 由元 崇(KEK)

目次

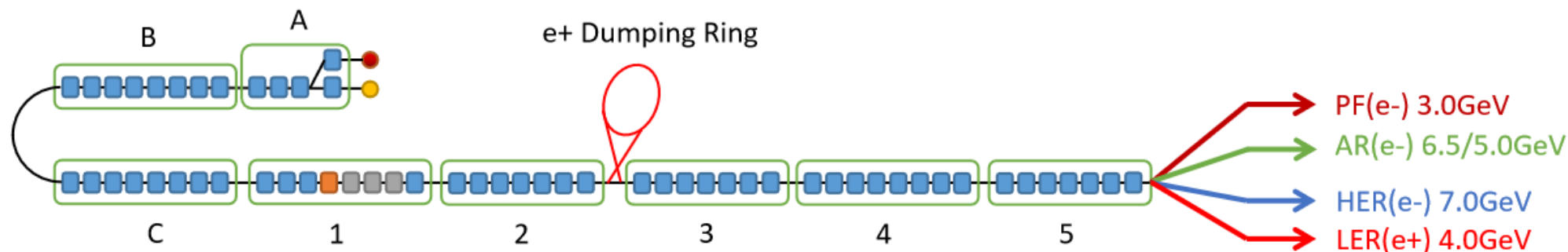
1. 背景
2. 開発目標
3. システム概要
4. PXIシステム
5. 動作試験
6. 放電加速管特定試験
7. まとめと今後の課題



1. 背景

- KEK 電子陽電子入射器 (e^-/e^+ LINAC)
 - 全長 600m (180度偏向部含む)
 - 8つのセクター(各セクターに4~8つの加速ユニット) で構成
 - 4つの蓄積リングと e^+ Dumping Ring へエネルギーの異なる e^-/e^+ ビームを最大 50Hz のパルス毎に切り替えて入射 (同時入射)

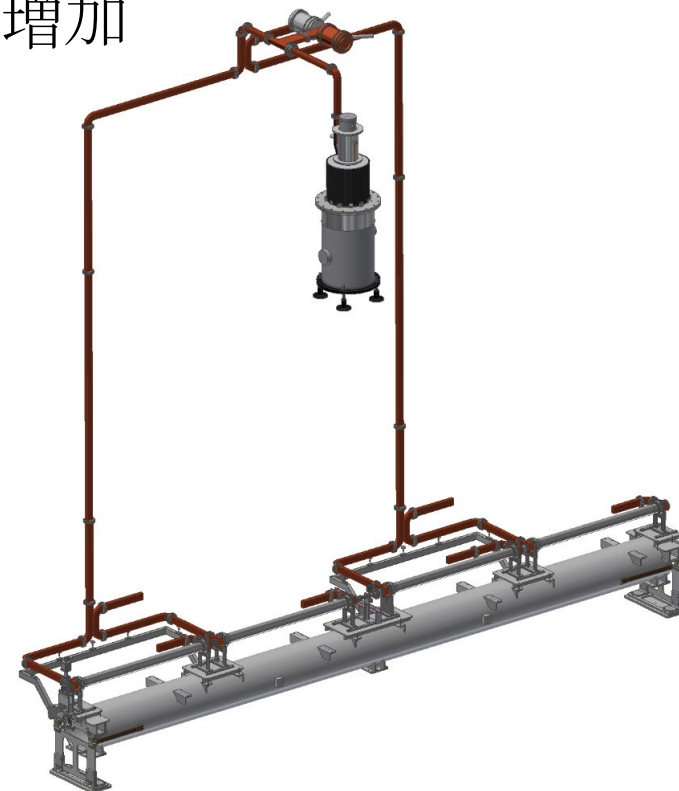
長期間にわたり高水準での安定運転が求められる



1. 背景

- e⁻/e⁺ LINACでは200本以上のS-band加速管を使用中
 - 通常クライストロン1台あたり4本の加速管へRFを供給するユニット構造
 - PFタイプは40年近く使用中。近年、不具合の発生が増加

Type	使用開始時期	使用数
PFタイプ	1980年代(建設初期)	125
KEKBタイプ	1990年代(KEKB運転)	74
LAS(Large Aperture S-band)	2010年代(SuperKEKB運転)	10
新型加速管	2020年代	16



1. 背景

- e⁻/e⁺ LINACでは200本以上のS-band加速管を使用
 - 通常クライストロン1台あたり4本の加速管へRFを供給するユニット構造
 - PFタイプは40年近く使用中。近年、不具合の発生が増加

ユニットの使用中止、パワーを下げた運転

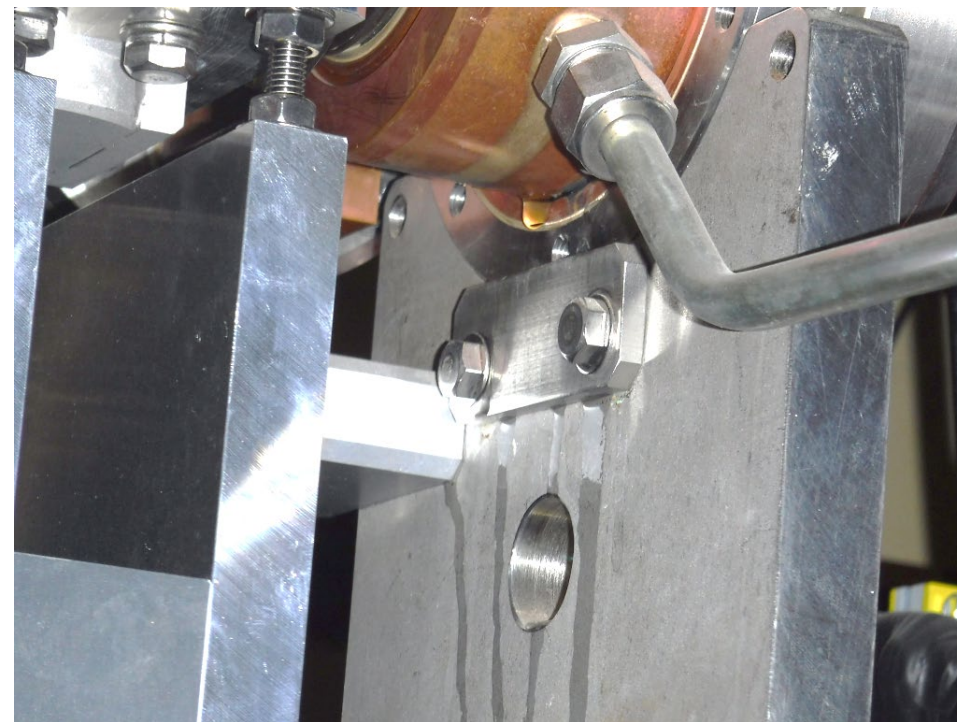
加速器の長期安定運転に影響大

Type	使用開始時期	使用数
PFタイプ	1980年代(建設初期)	125
KEKBタイプ	1990年代(KEKB運転)	74
LAS(Large Aperture S-band)	2010年代(SuperKEKB運転)	10
新型加速管	2020年代	16



1. 背景

- 加速管不具合事例
 - 水漏れ
 - 目視確認（特定容易）
 - 加速管内部での放電頻度増加



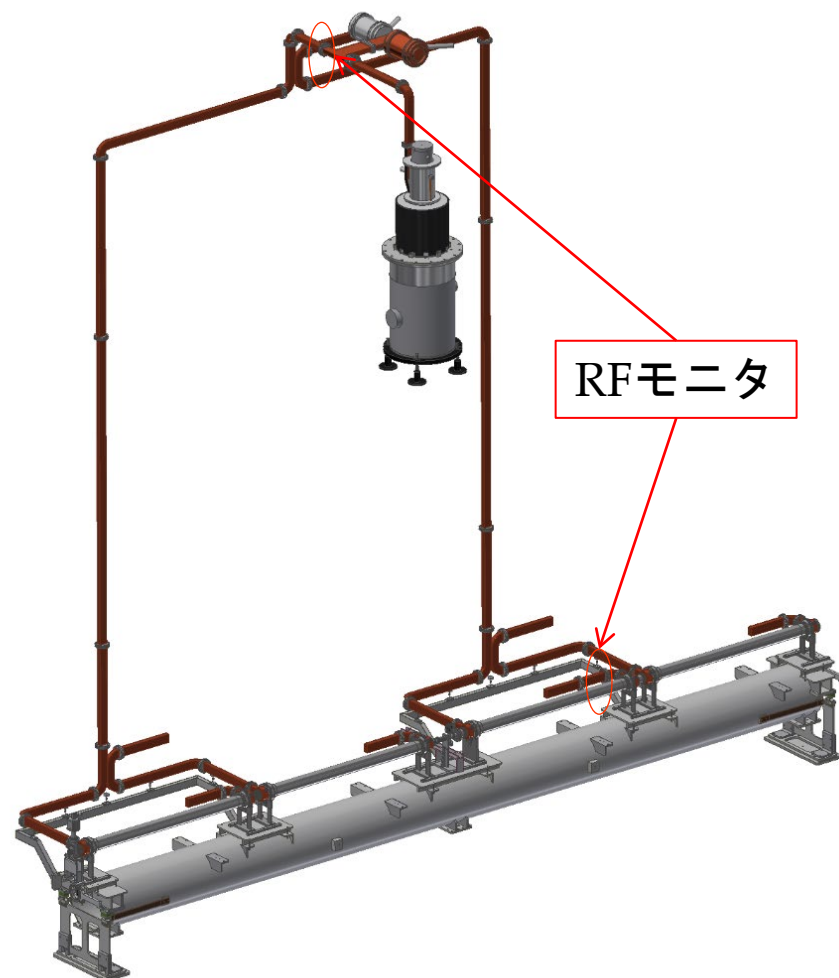
1. 背景

- 加速管不具合事例
 - 水漏れ
 - 目視確認（特定容易）
 - 加速管内部での放電頻度増加
 - RFモニタ箇所制限
（ユニット内での特定が困難）



音響センサーを用いた放電加速管特定の研究
（非破壊かつ低コスト）

新たなデータ収集システムの開発




2. 開発目標

【従来の計測における問題点】

- オシロスコープの使用
 - 低分解能(微弱信号の処理困難)
 - 測定チャンネル制限 (4ch/台)
 - 適切なトリガ信号の確保が困難
 - パルス毎のデータ保存不可
- ダミーロード部での測定
 - 加速管以外の放電時も反応

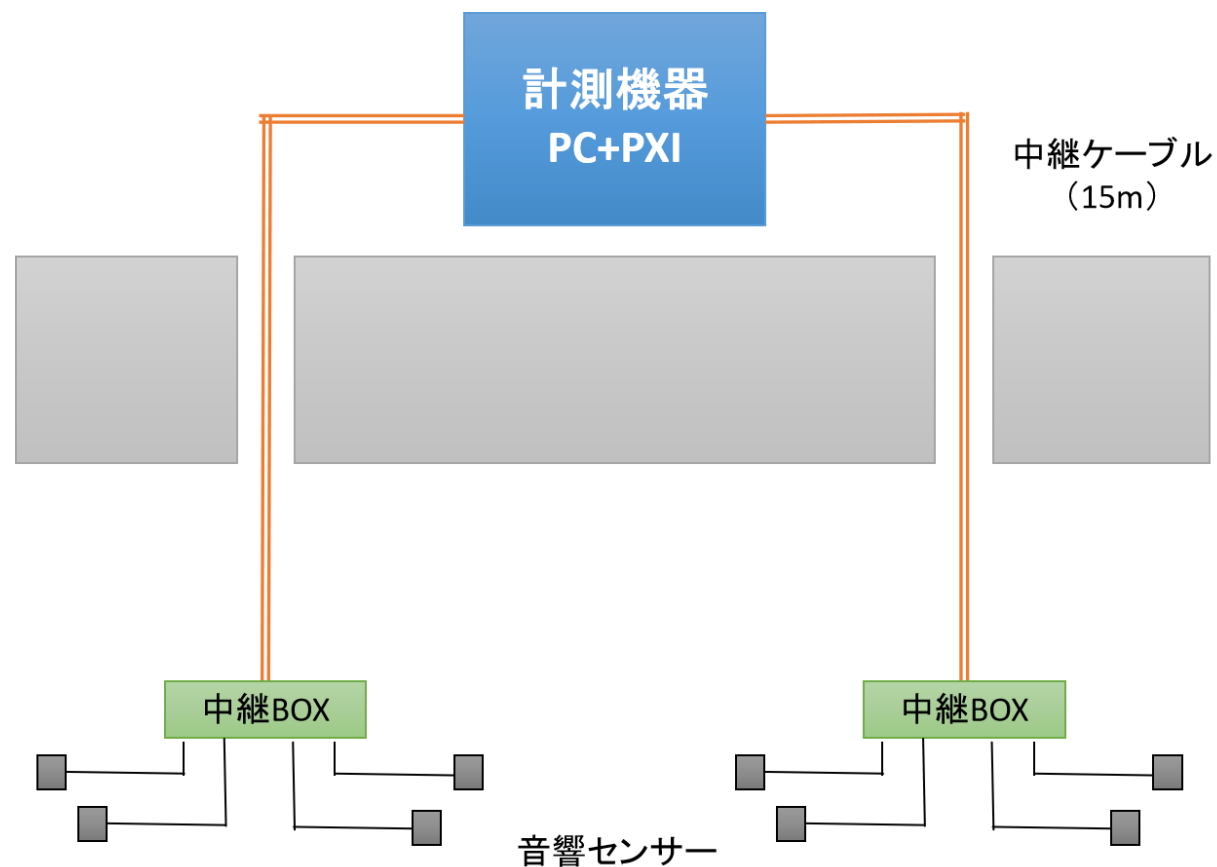


【開発目標】

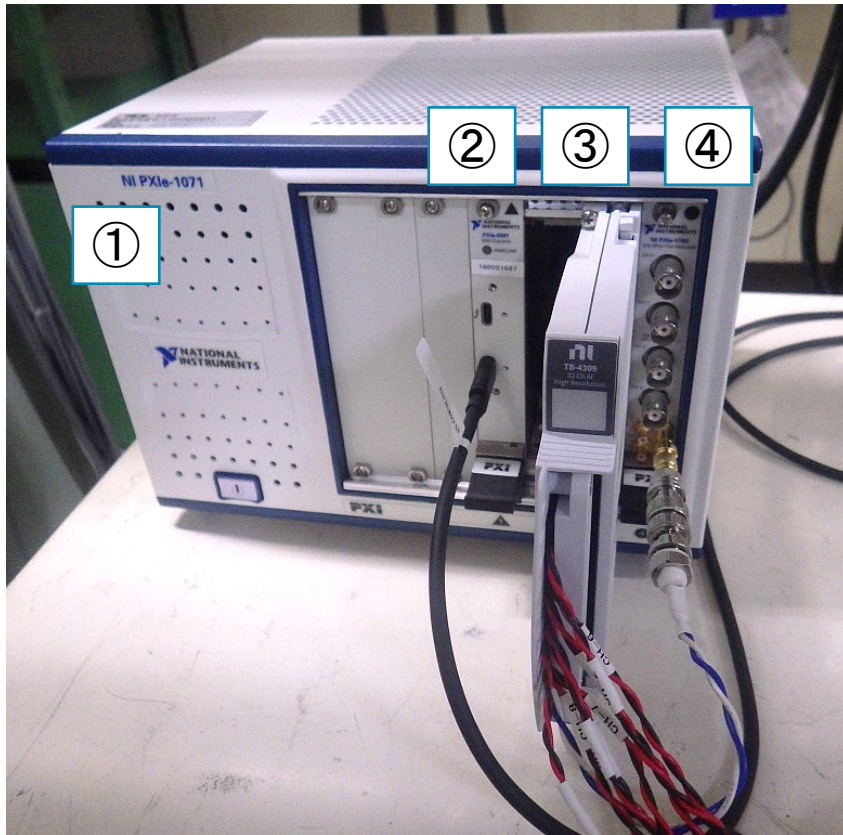
- 高分解能&多チャンネルADC
 - 最大50Hzデータ処理
 - トリガ信号の汎用性
 - データ収集自動化
- 
- PXIシステムの導入
 - 加速管からの直接信号を測定

3. システム概要

- 地上部
 - PC (データ収集プログラム)
 - PXIシステム
- 中継ケーブル
 - シールド付多芯ケーブル (15m)
- トンネル内
 - 4ch信号中継BOX
 - 音響センサー



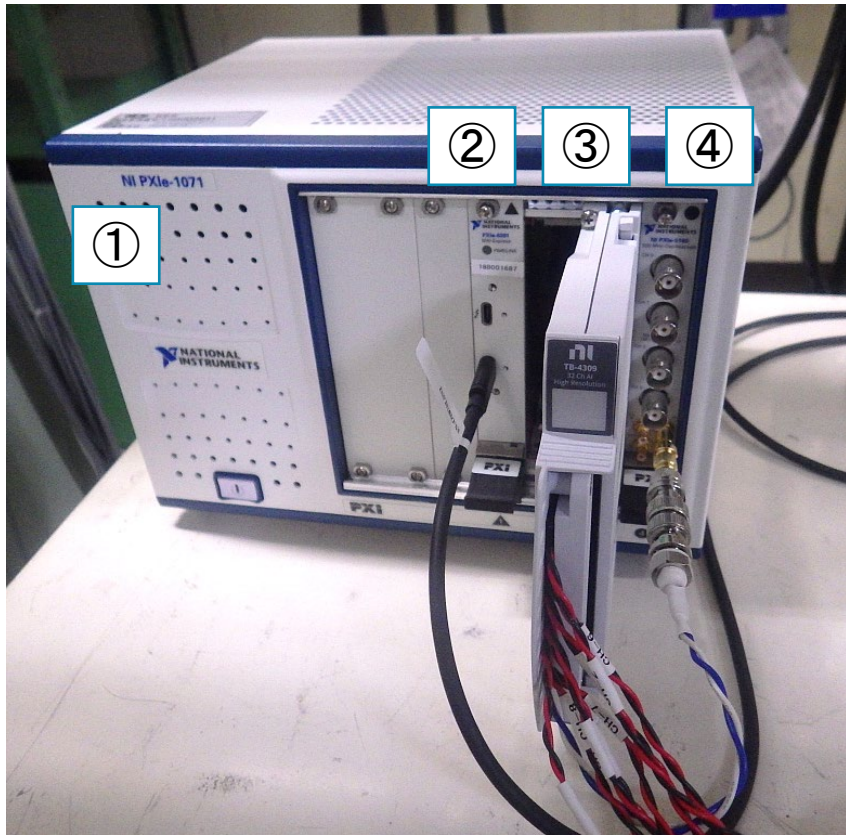
4. PXIシステム



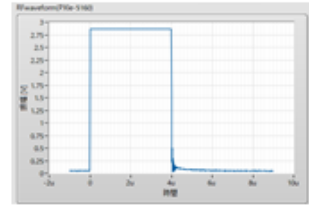
本システムの計測機器は National Instruments 社のPXIシステムを使用

型番	仕様	用途
① PXIe-1083	5-Slot (5 Hybrid Slots), Up to 2 GB/s PXI Chassis	PXIシャーシ
② PXIe-8301	Thunderbolt™ 3 PXI Remote Control Module	PC通信
③ PXIe-4309	Up to 28-Bit, 32-Channel, Up to 2 MS/s, ±15 V Flexible Resolution PXI Analog Input Module	音響センサー用 ADC
④ PXIe-5160	500 MHz, 2.5 GS/s, 10-Bit PXI Oscilloscope	RF信号モニタ用

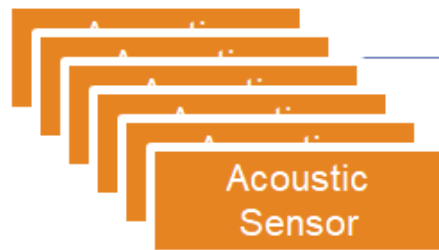
4. PXIシステム



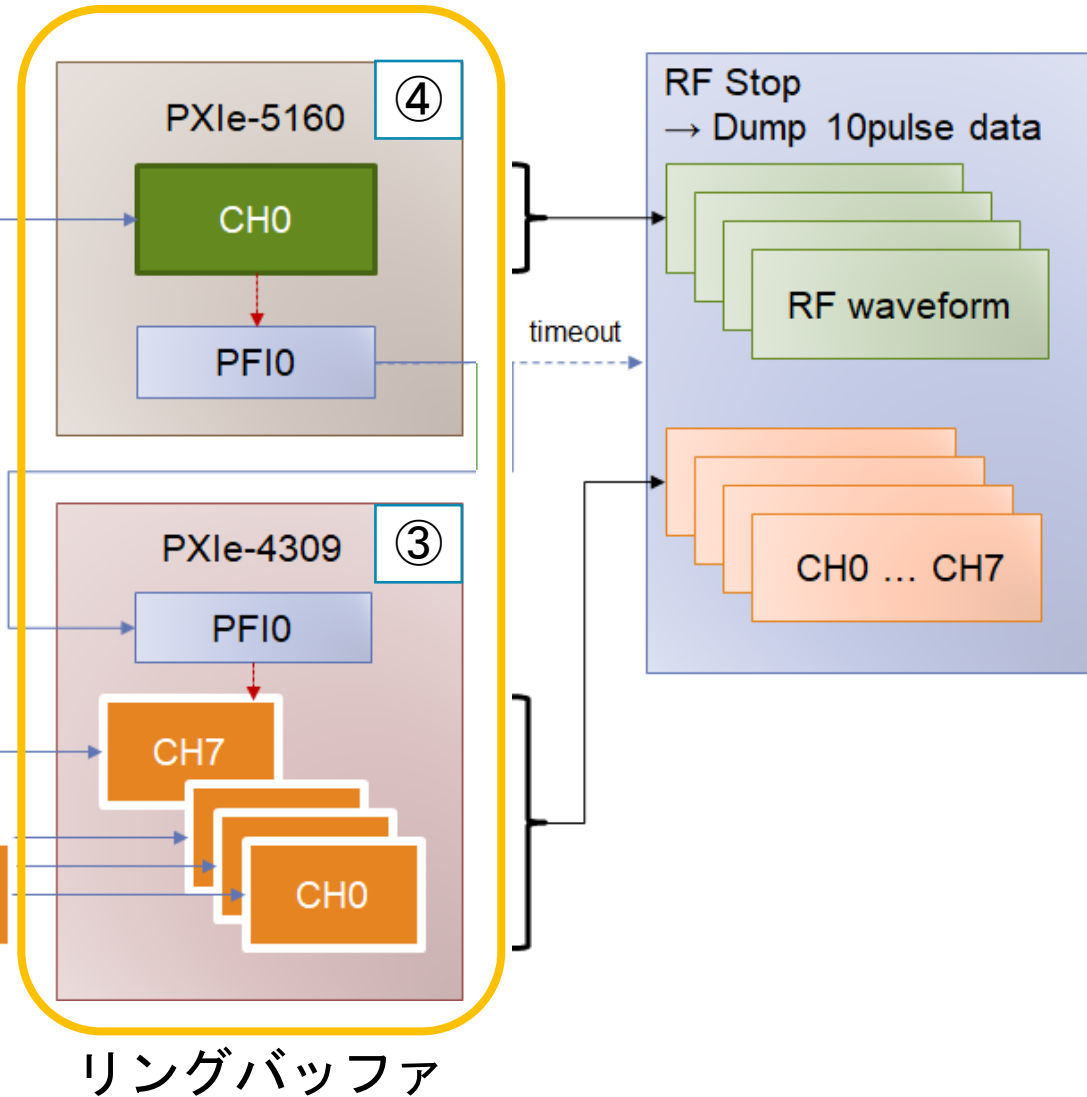
RF waveform
[KLY PF]



パルス幅 : 4 μ s



音響センサー
信号 : 数ms

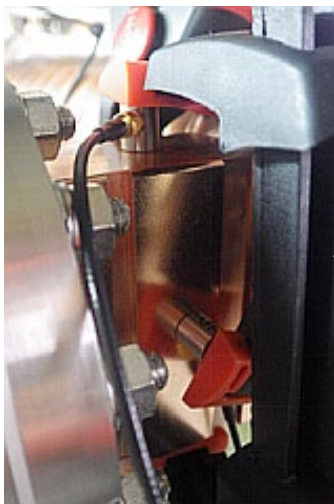


5. 動作試験

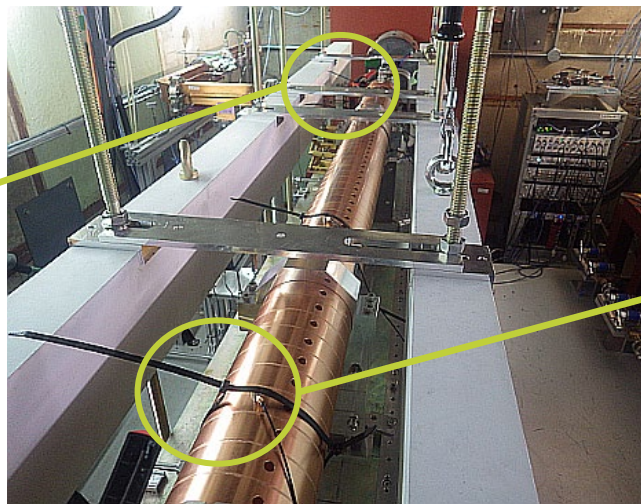
- e⁻/e⁺ LINAC 内の加速管試験施設 (新型加速管エージング中) にて動作試験

【目的】

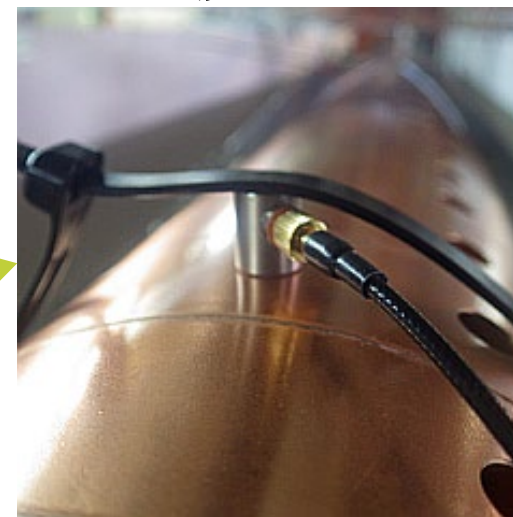
- データ収集プログラム開発
- 機器設置コストの把握
- 加速管本体および加速管導波管部における放電時の信号検出



加速管導波管部 (2か所×2)
(簡易クランプ)



加速管本体 (4か所)
(インシュロック)



取付面へはグリス等の
塗布なし

5. 動作試験

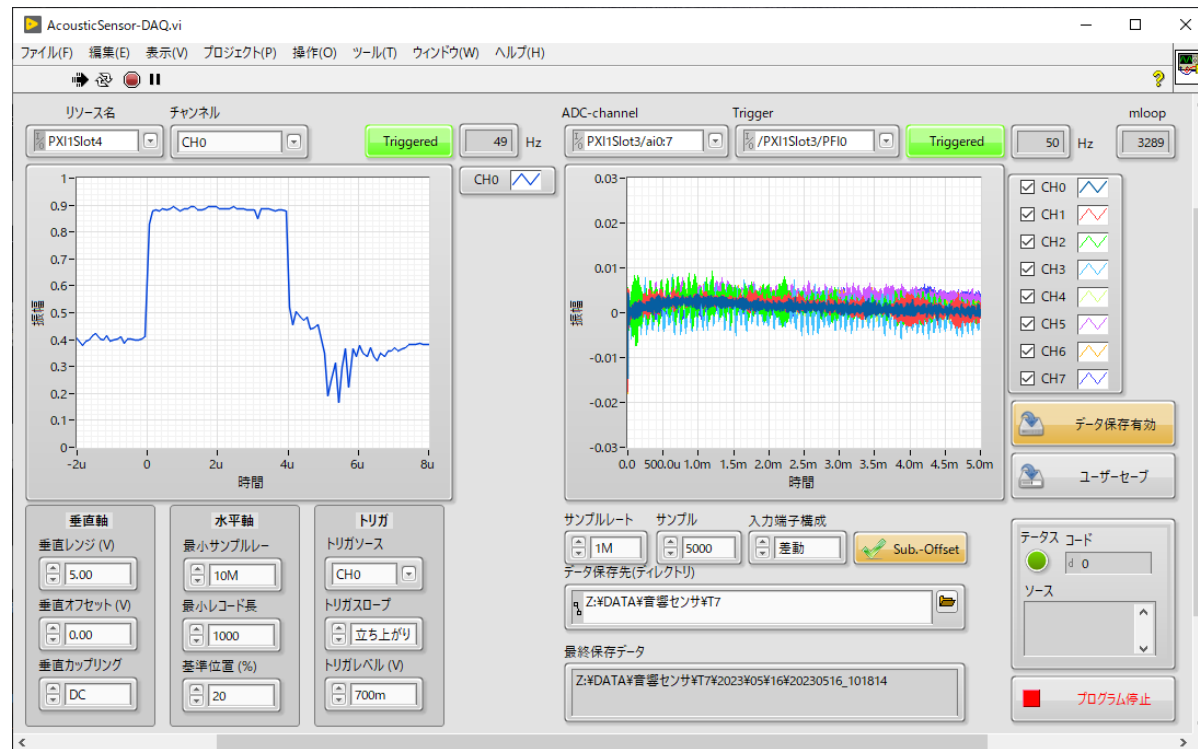
● データ収集プログラム

LabVIEW で作成

- 50Hzでのデータ収集
- RF出力停止時、メモリ上の10パルス分のデータを出力

【50Hz動作時のPXIe-4309パラメータ】

- サンプリングレート：1 MS/s
- CH数：8ch
- CH毎のデータ数：5000（5ms 相当）



5. 動作試験

● データ解析プログラム

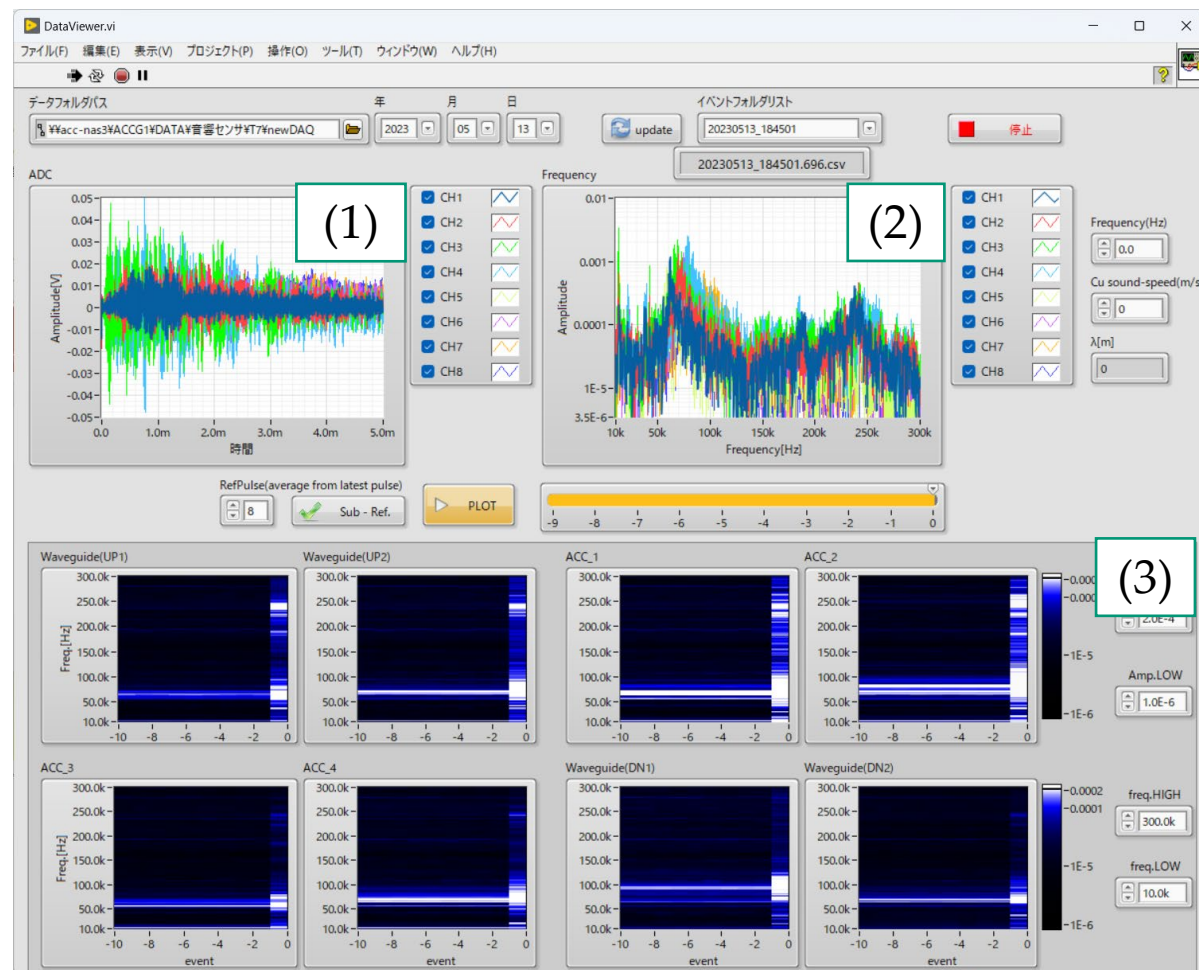
データ収集プログラムで保存されたデータを以下の手順で自動解析

- 1) パルス毎の信号表示
- 2) FFTで周波数分布変換
- 3) 各CHの周波数分布をパルス毎に表示

横軸：パルス

縦軸：周波数

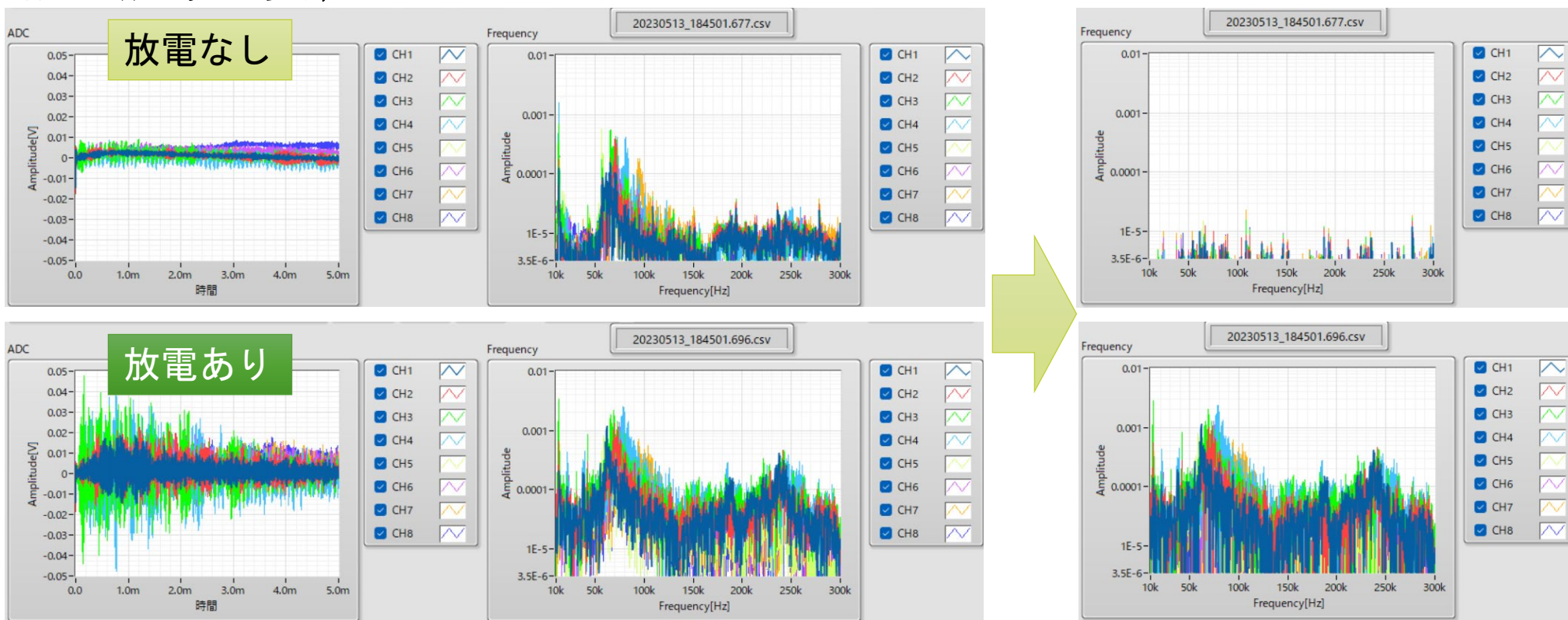
濃淡：周波数毎の信号強度



5. 動作試験

【データ解析】

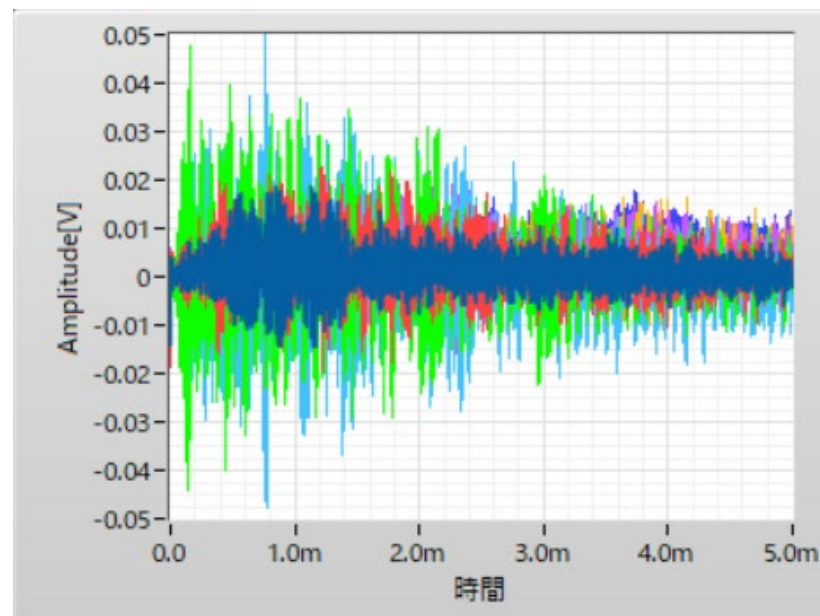
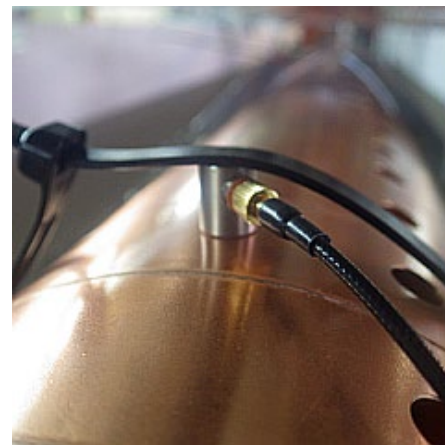
- 複数の通常パルス信号の平均をバックグラウンドとして処理
- 微細な信号の変化



5. 動作試験

【試験結果】

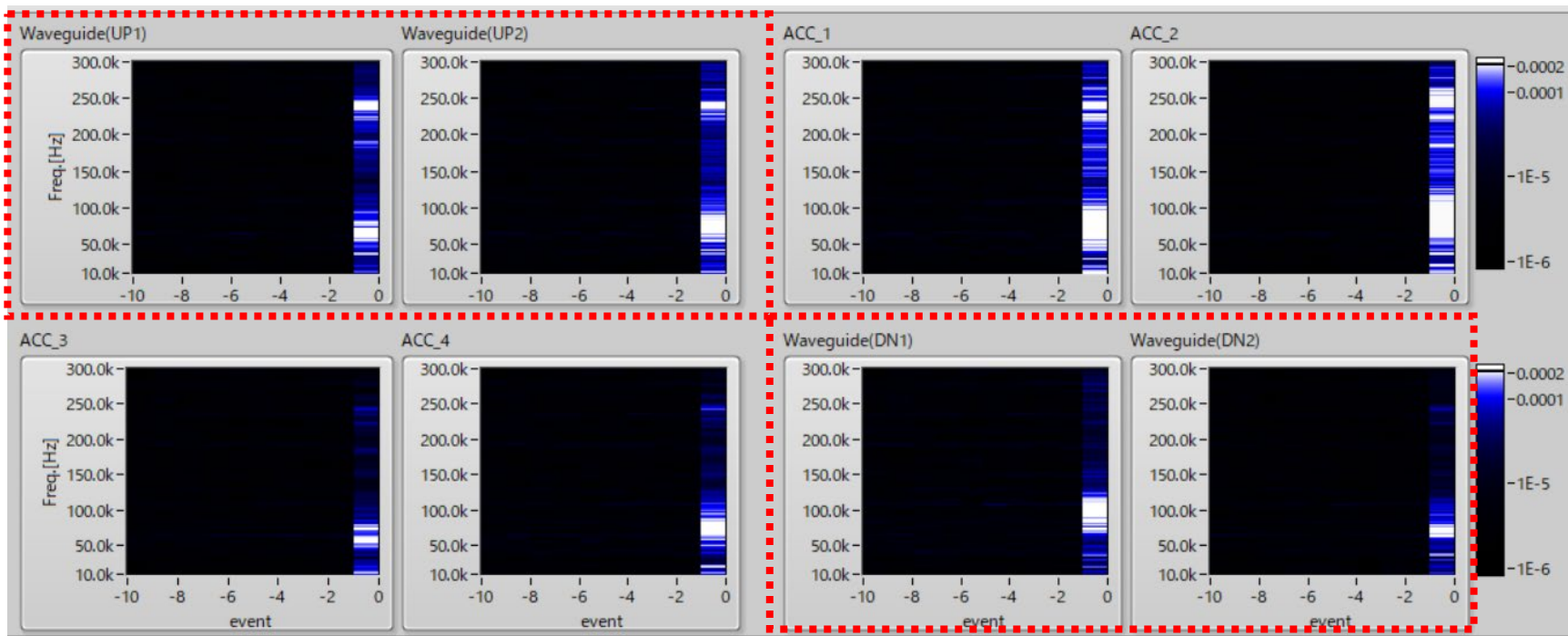
- 50Hzデータ収集実現
- センサーの簡易取付状態でも信号を確認（～50mV）
- 加速管導波管部でも管内放電時に信号を確認



5. 動作試験

【試験結果】

- 50Hzデータ収集実現
- センサーの簡易取付状態でも信号を確認（～50mV）
- 加速管導波管部でも管内放電時に信号を確認



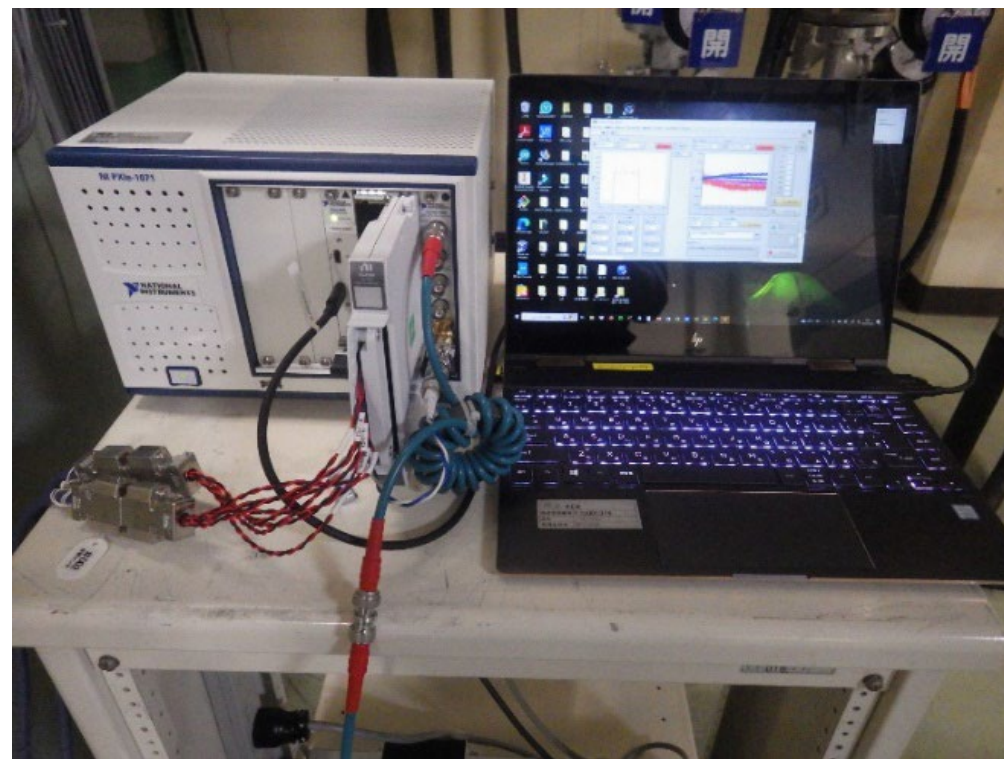
6. 放電加速管特定試験

【試験箇所】

- #4-6 ユニット （放電頻度が多いため、定格よりRFパワーを下げて使用中）
※試験時は 25Hz 運転

【試験準備】

- 事前のメンテナンス日にシステム一式を設置
 - [地上部] PC+PXI（計測機器）
中継シールドケーブル(15m×2)
 - [トンネル内]
 - 4ch信号中継BOX(2台)
 - 音響センサー(8個 [2箇所×4本分])
 - ※クランプによる簡易固定



6. 放電加速管特定試験

【試験箇所】

- #4-6 ユニット (放電頻度が多いため、定格よりRFパワーを下げて使用中)
※試験時は 25Hz 運転

【試験準備】

- 事前のメンテナンス日にシステム一式を設置
 - [地上部] PC+PXI (計測機器)
中継シールドケーブル(15m×2)
 - [トンネル内]
 - 4ch信号中継BOX(2台)
 - 音響センサー(8個 [2箇所×4本分])
 - ※クランプによる簡易固定



6. 放電加速管特定試験

【試験箇所】

- #4-6 ユニット (放電頻度が多いため、定格よりRFパワーを下げて使用中)
※試験時は 25Hz 運転

【試験準備】

- 事前のメンテナンス日にシステム一式を設置
 - [地上部] PC+PXI (計測機器)
 - 中継シールドケーブル(15m×2)
 - [トンネル内]
 - 4ch信号中継BOX (2台)
 - 音響センサー(8個 [2箇所×4本分])
 - ※クランプによる簡易固定



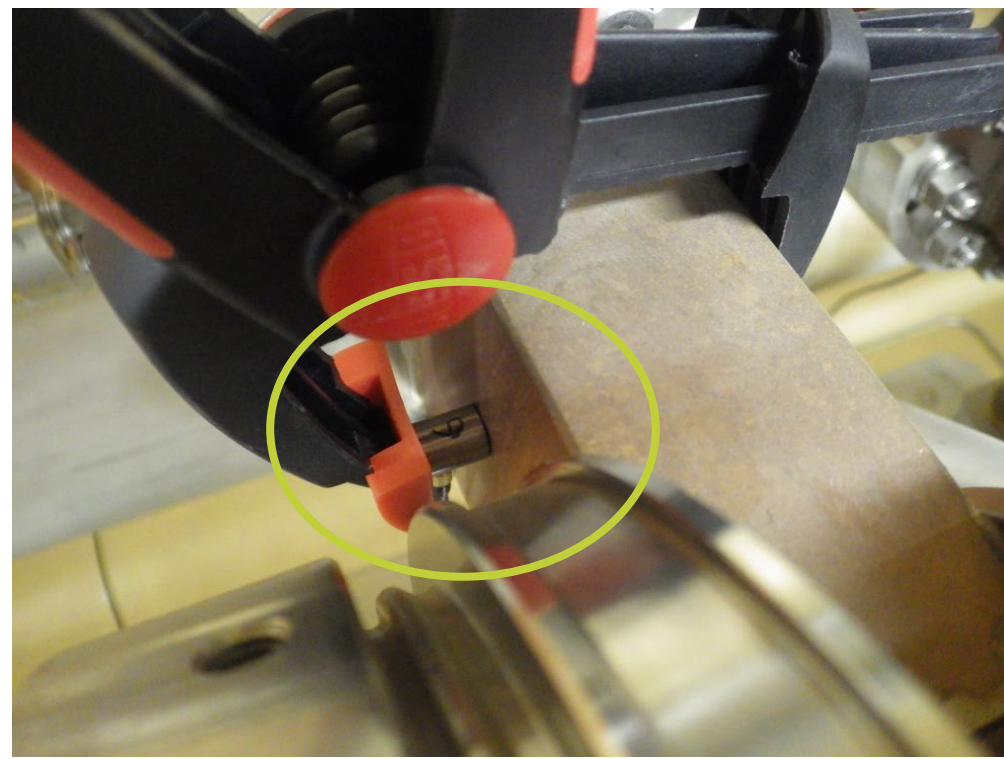
6. 放電加速管特定試験

【試験箇所】

- #4-6 ユニット（放電頻度が多いため、定格よりRFパワーを下げて使用中）
※試験時は 25Hz 運転

【試験準備】

- 事前のメンテナンス日にシステム一式を設置
 - [地上部] PC+PXI（計測機器）
中継シールドケーブル(15m×2)
 - [トンネル内]
 - 4ch信号中継BOX(2台)
 - 音響センサー(8個 [2箇所×4本分])
- ※クランプによる簡易固定



6. 放電加速管特定試験

【試験方法】

- LINAC 単独運転時、一時的に#4-6ユニットのRFパワーを定格に戻し、放電によるクライストロンのダウンを発生させデータ収集

【試験結果】

- 計測中7回のVSWRインターロック(放電による反射波過大)によるダウンが発生
- 全イベントでデータ自動保存に成功

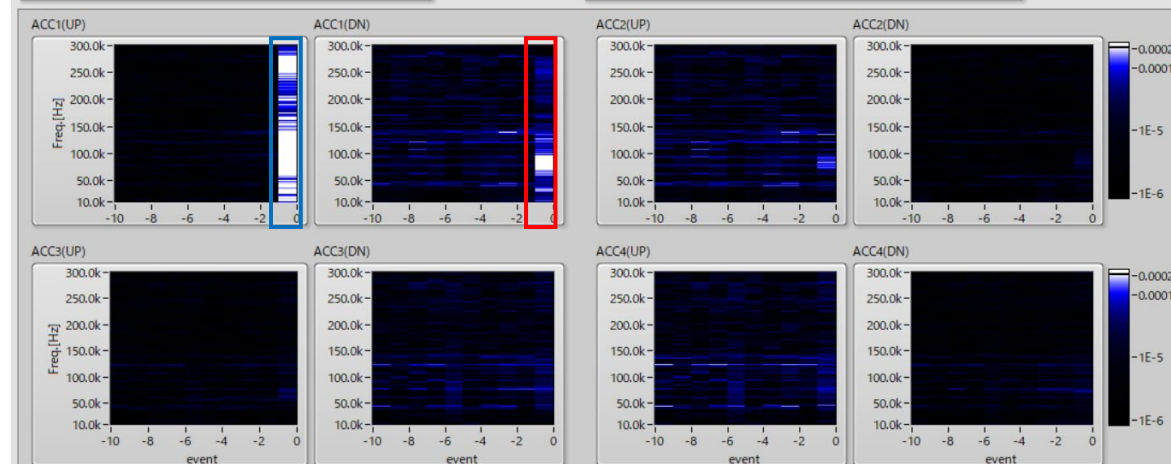
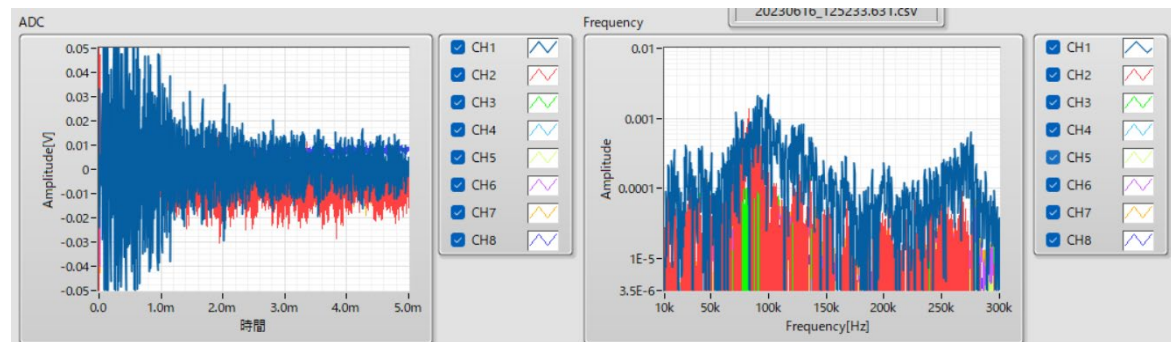
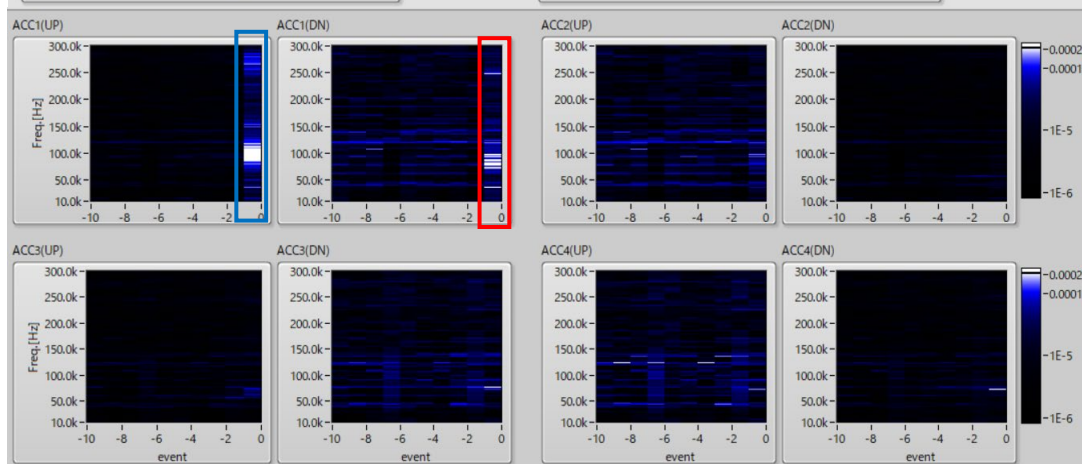
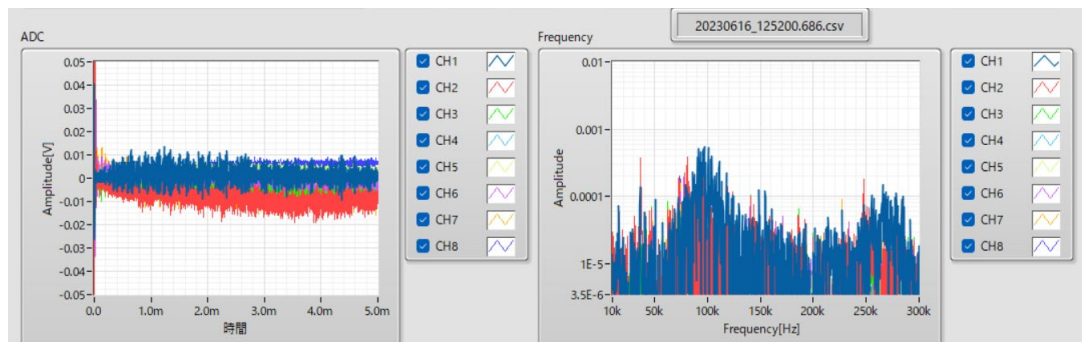
```
klystron KL_46 - downlist [10080]
16/Jun/2023 09:20:15> KL_46 READY --- 00 000 00 00 --- ( ) ES=41.00
16/Jun/2023 10:34:07> KL_46 Down --- 00 000 XX XX --- VSWR ( 1f) ES=41.50
16/Jun/2023 10:34:16> KL_46 READY --- 00 000 00 00 --- ( ) ES=41.50
16/Jun/2023 12:51:51> KL_46 Down --- 00 000 XX XX --- VSWR ( 1f) ES=42.00
16/Jun/2023 12:51:59> KL_46 READY --- 00 000 00 00 --- ( ) ES=42.00
16/Jun/2023 12:52:01> KL_46 Down --- 00 000 XX XX --- VSWR ( 1f) ES=42.00
16/Jun/2023 12:52:09> KL_46 READY --- 00 000 00 00 --- ( ) ES=42.00
16/Jun/2023 12:52:14> KL_46 Down --- 00 000 XX XX --- VSWR ( 1f) ES=42.00
16/Jun/2023 12:52:21> KL_46 READY --- 00 000 00 00 --- ( ) ES=42.00
16/Jun/2023 12:52:24> KL_46 Down --- 00 000 XX XX --- VSWR ( 1f) ES=42.00
16/Jun/2023 12:52:32> KL_46 READY --- 00 000 00 00 --- ( ) ES=42.00
16/Jun/2023 12:52:34> KL_46 Down --- 00 000 XX XX --- VSWR ( 1f) ES=42.00
16/Jun/2023 12:52:42> KL_46 READY --- 00 000 00 00 --- ( ) ES=42.00
16/Jun/2023 12:57:54> KL_46 Down --- 00 000 XX XX --- VSWR ( 1f) ES=42.00
16/Jun/2023 12:58:03> KL_46 READY --- 00 000 00 00 --- ( ) ES=42.00
```

データ収集プログラムから出力されたデータ		
20230616_103406	2023/06/16 11:14	ファイルフォルダー
20230616_125150	2023/06/16 12:53	ファイルフォルダー
20230616_125200	2023/06/16 12:53	ファイルフォルダー
20230616_125213	2023/06/16 12:53	ファイルフォルダー
20230616_125223	2023/06/16 12:53	ファイルフォルダー
20230616_125233	2023/06/16 12:53	ファイルフォルダー
20230616_125753	2023/06/16 15:27	ファイルフォルダー
20230616_180337(usersave)	2023/06/16 18:03	ファイルフォルダー

6. 放電加速管特定試験

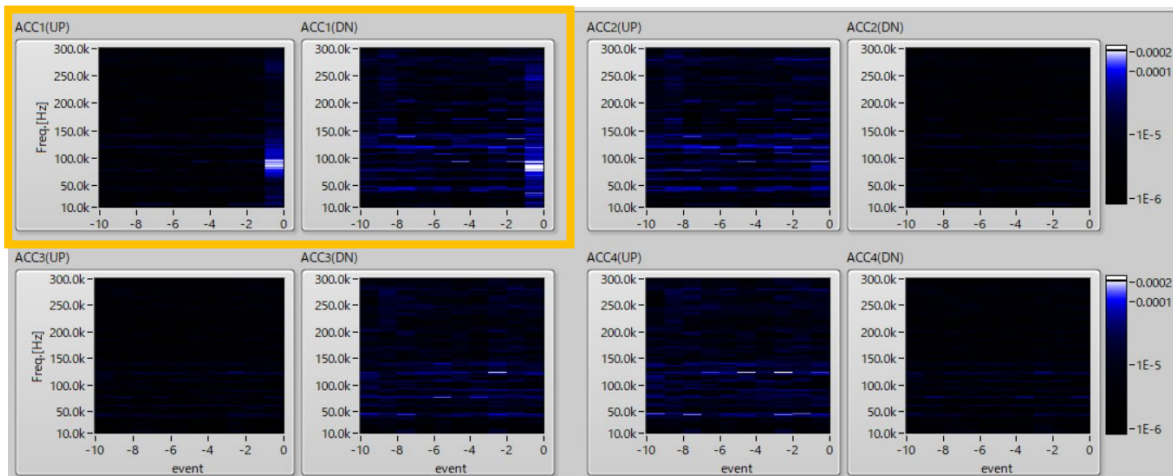
【放電時の信号】

- 放電時の信号は $\pm 10 \sim \pm 60\text{mV}$ の範囲で観測
- 比較的小規模な放電の様子も捉えることに成功

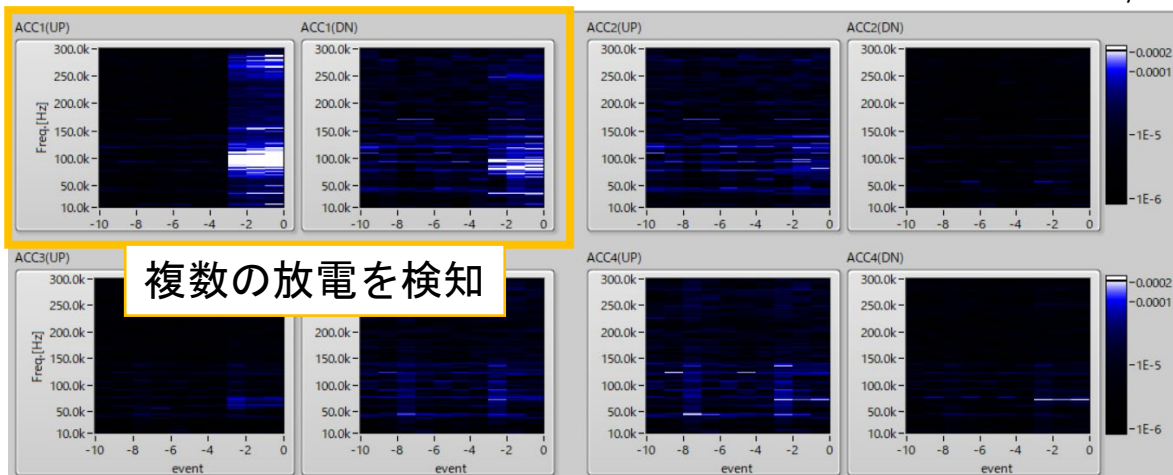


6. 放電加速管特定試験

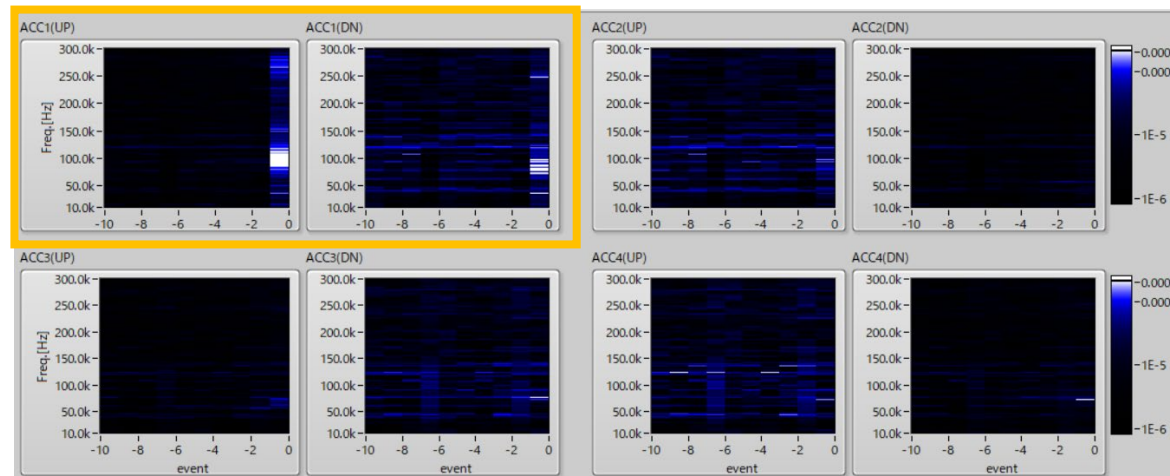
1/7



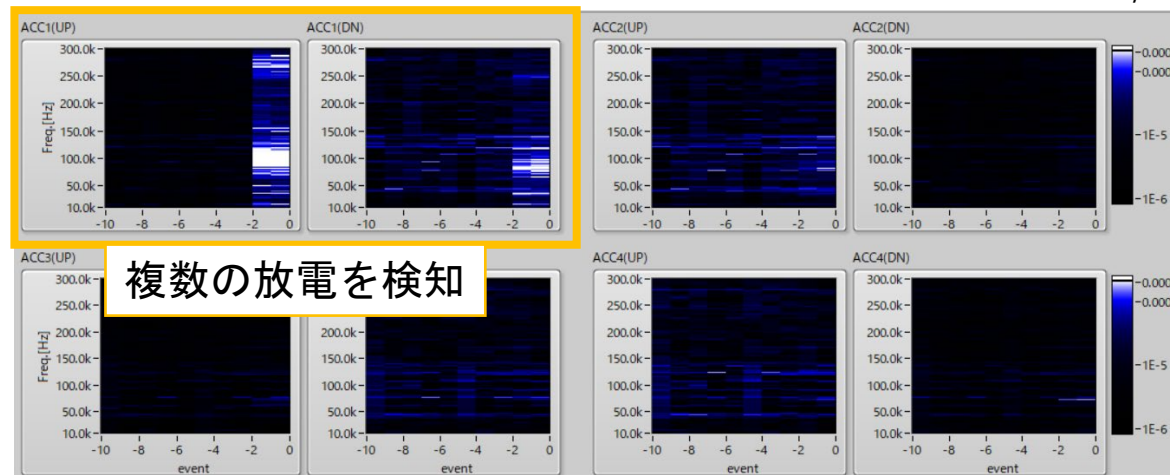
2/7



3/7

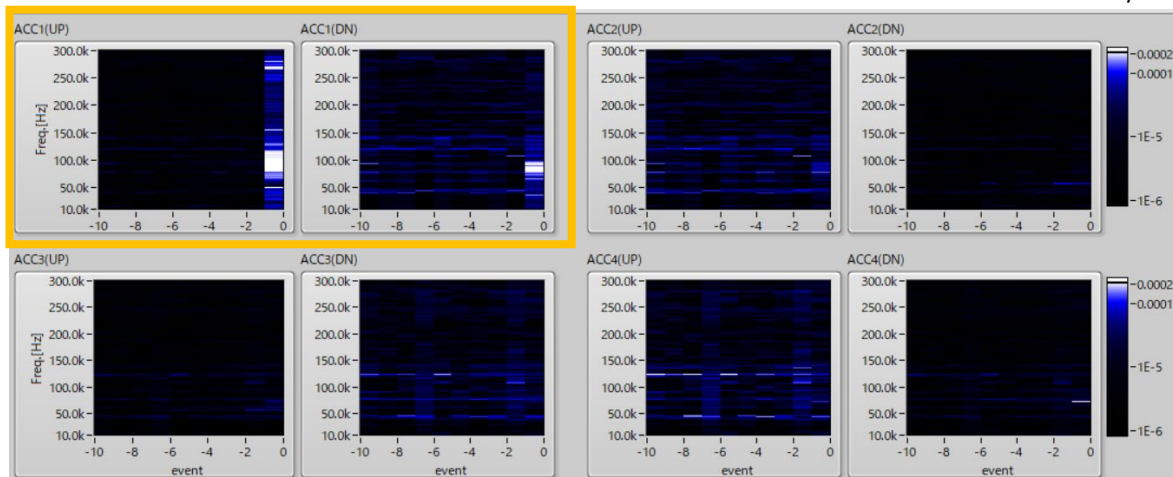


4/7

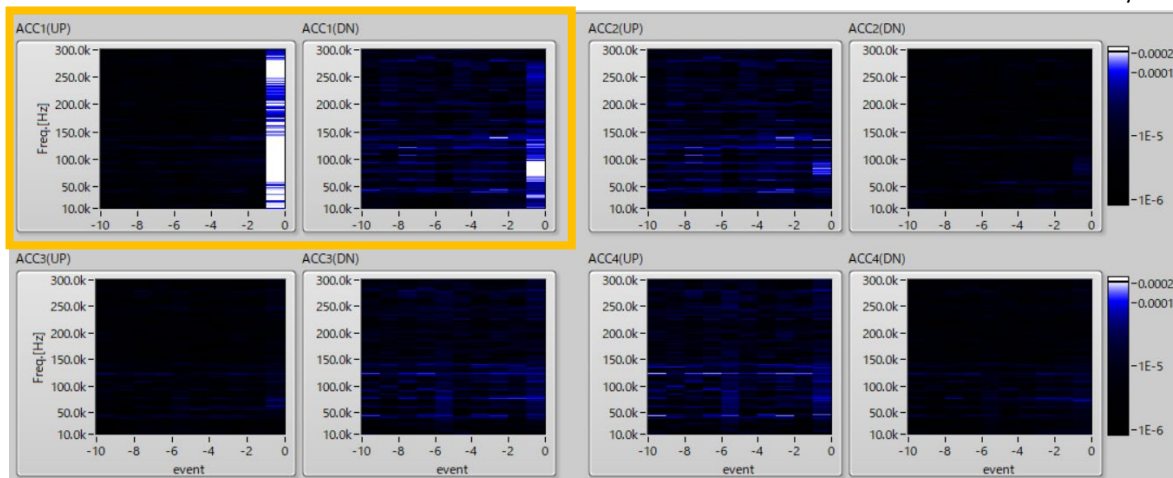


6. 放電加速管特定試験

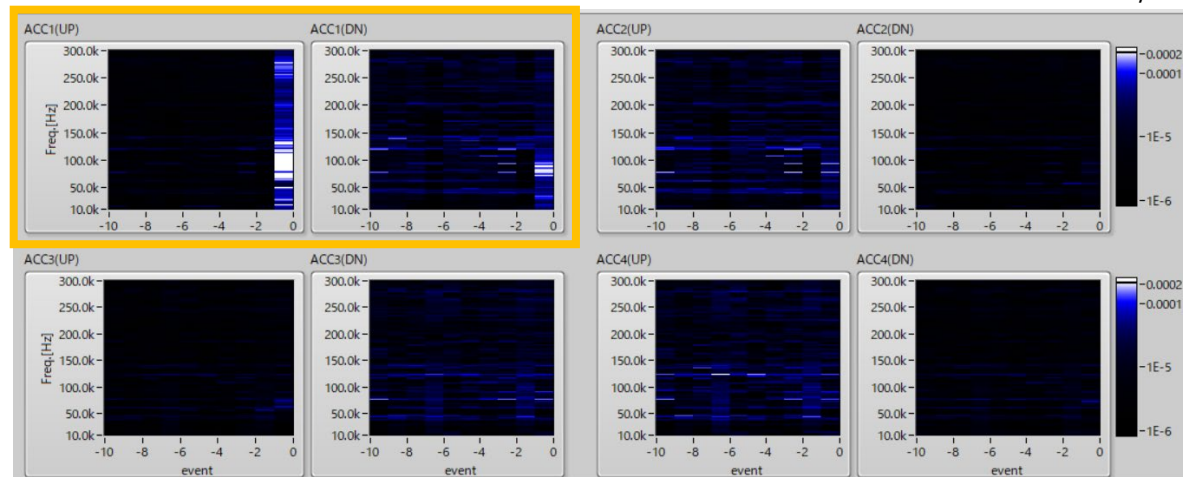
5/7



6/7



7/7



全イベントでユニット最上流の加速管に
設置した2か所のセンサーのみ反応



ユニット1本目の加速管が放電

7. まとめと今後の課題

- PXIシステムを用いた音響センサーデータ収集システムを作成
- 動作試験において50Hzでのデータ収集を確認
- 加速管導波管部で管内放電起因の信号捕捉に成功
- PFタイプ加速管を使用した加速ユニット内で放電加速管を特定

【今後の課題】

- データ解析方法の改善による管内放電位置の推定
- ユニット内導波管における放電調査