

# 電子・陽電子入射器用 RFモニタの開発

片桐 広明

加速器研究施設 加速器第五研究系

# 概要

- 電子・陽電子入射器で、大電力RF源の電力・位相を測定するRFモニタを更新した。従来のモニタでは入射器の同時入射運転に対応できなかった

## 報告内容

- 電子・陽電子入射器の同時入射運転とRF源の運用
- RFモニタへの要求
- RFモニタユニットの開発
  - 要求を満たすための設計
  - 同時入射運転への対応
- 達成度、成果、どのように役立っているか
  - ビーム運転への応用
  - RF源診断への利用
- まとめ

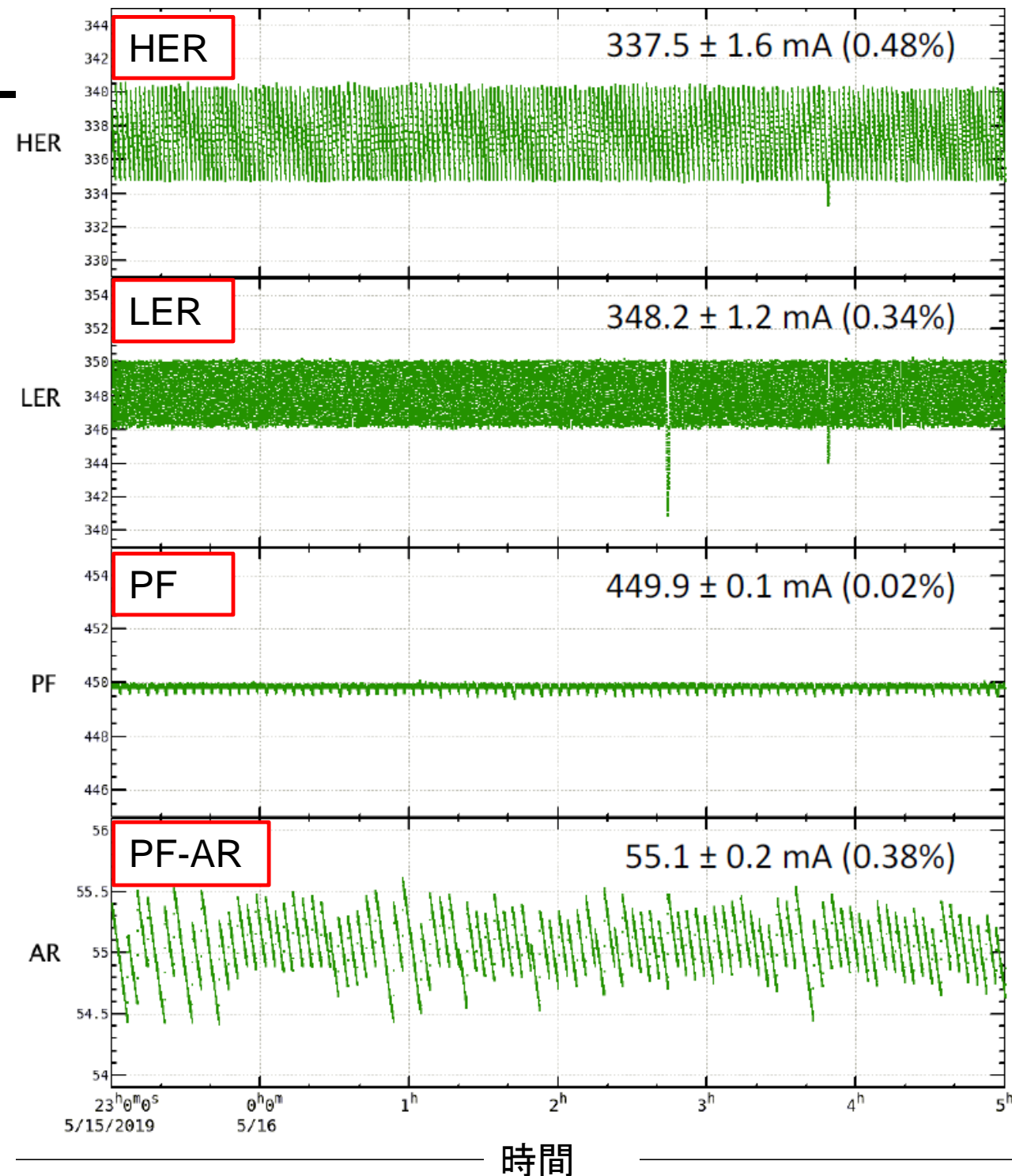
# KEK電子・陽電子線型加速器(入射器)

## 4つのリングに異なるエネルギーのビームを入射

- HER (SuperKEKB): e-, 7 GeV
- LER (SuperKEKB): e+, 4 GeV
- PF (放射光): e-, 2.5 GeV
- PF-AR (大強度放射光): e-, 6.5 GeV

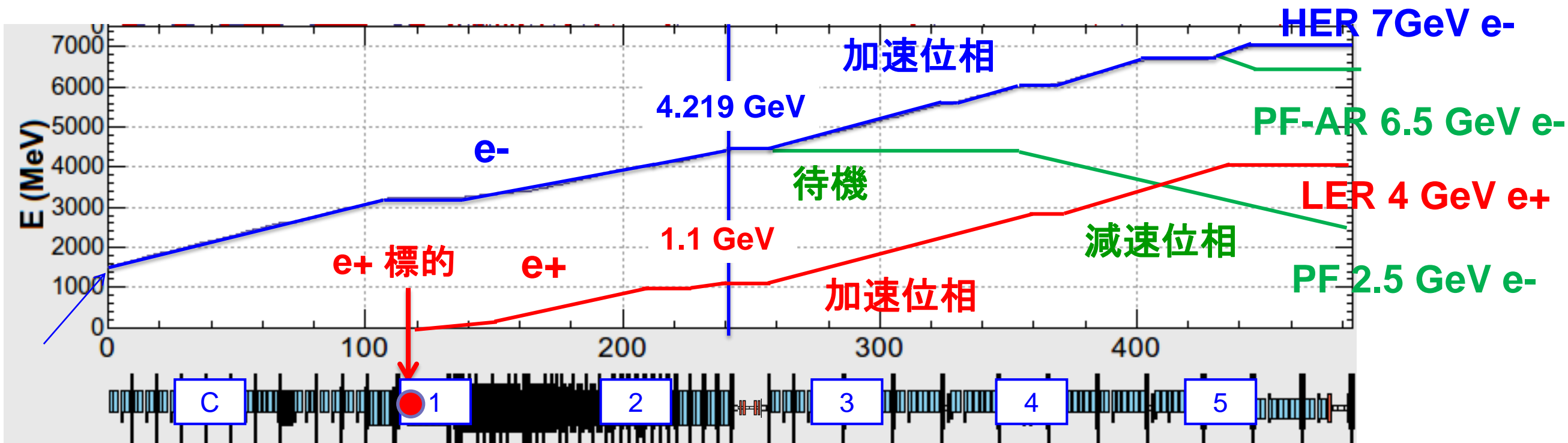
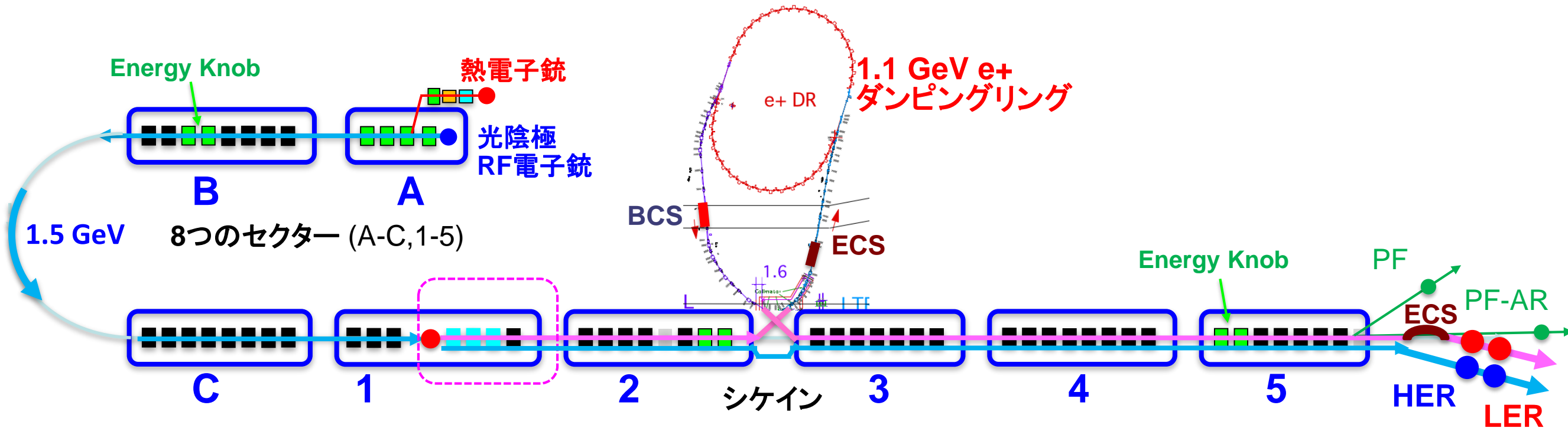
## 同時入射運転

- 50Hzごとにエネルギー、電荷の異なるビームを4つのリングに振り分ける
- トップアップ運転(一定の蓄積電流を維持)への対応



# 入射器のビームエネルギーパターン

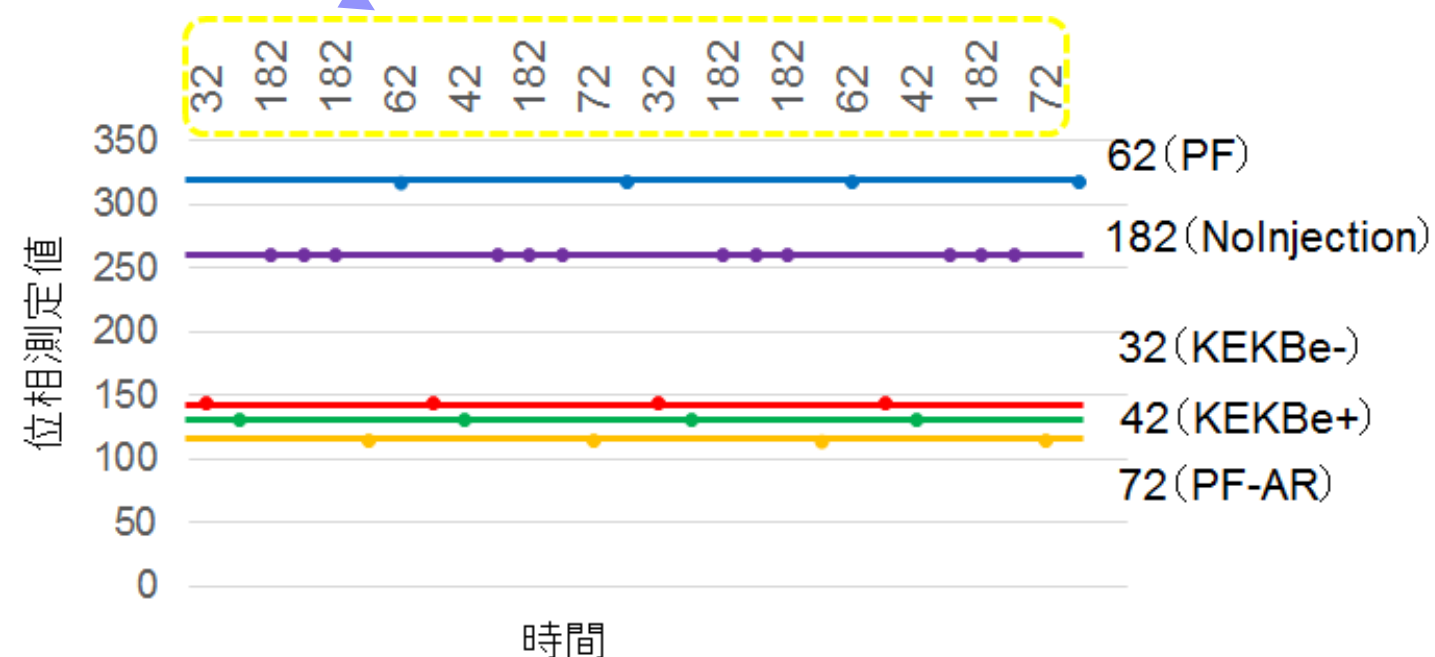
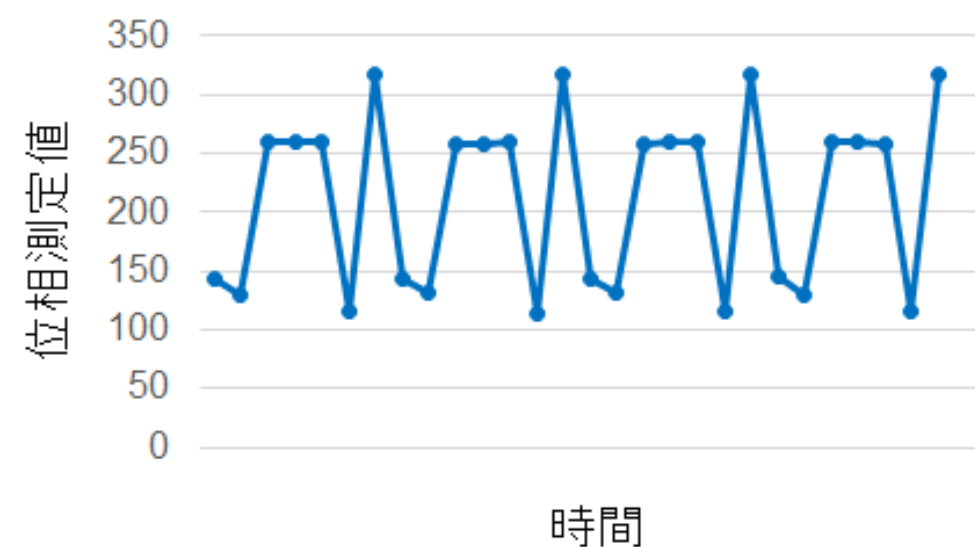
- 60 台の大電力RF(高周波)源から供給するRF電力によりビームを加速する



- イベントタイミングシステムが50Hzのパルス毎にビームモード(入射するリング)を切り替える
- RF源では50Hzのパルス毎にRFタイミング(加速、待機)、位相(加速、減速)を制御する 4

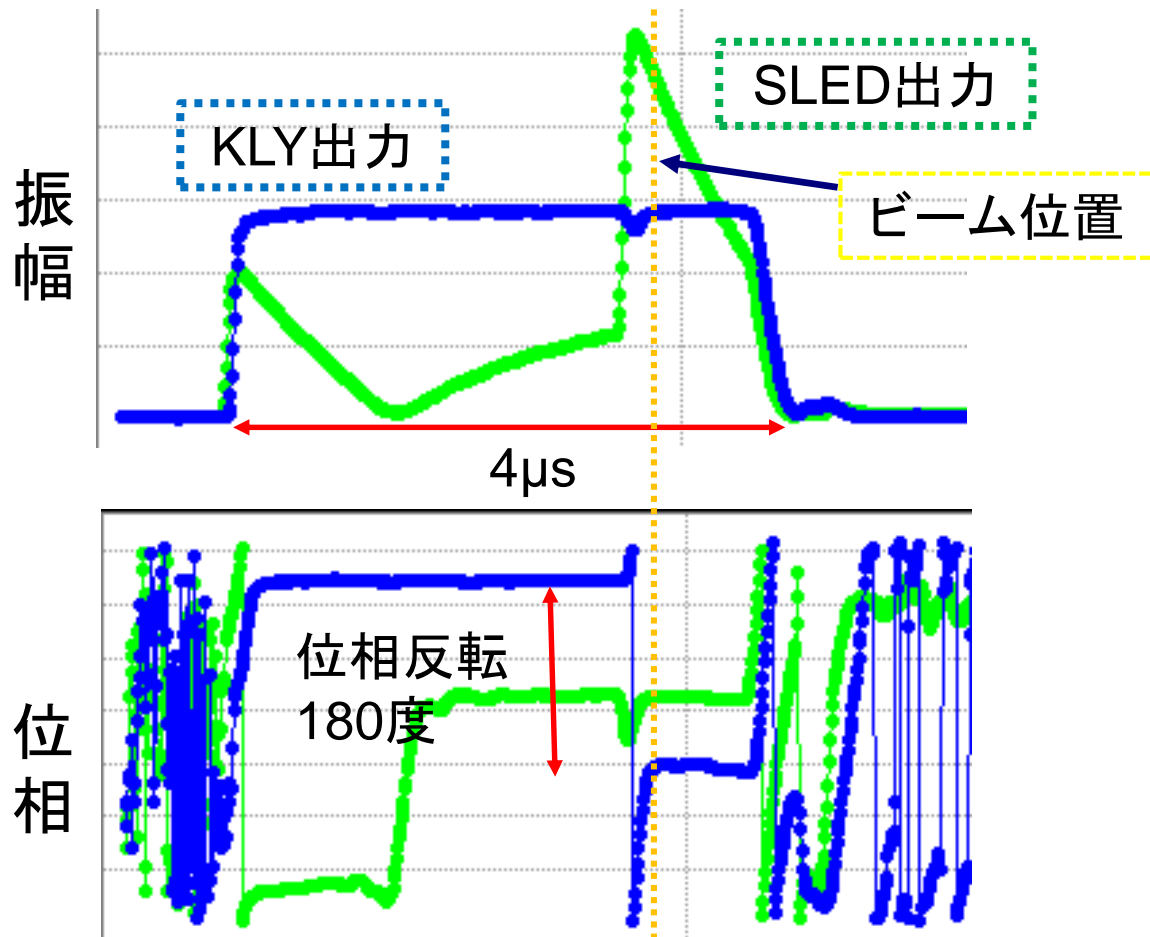
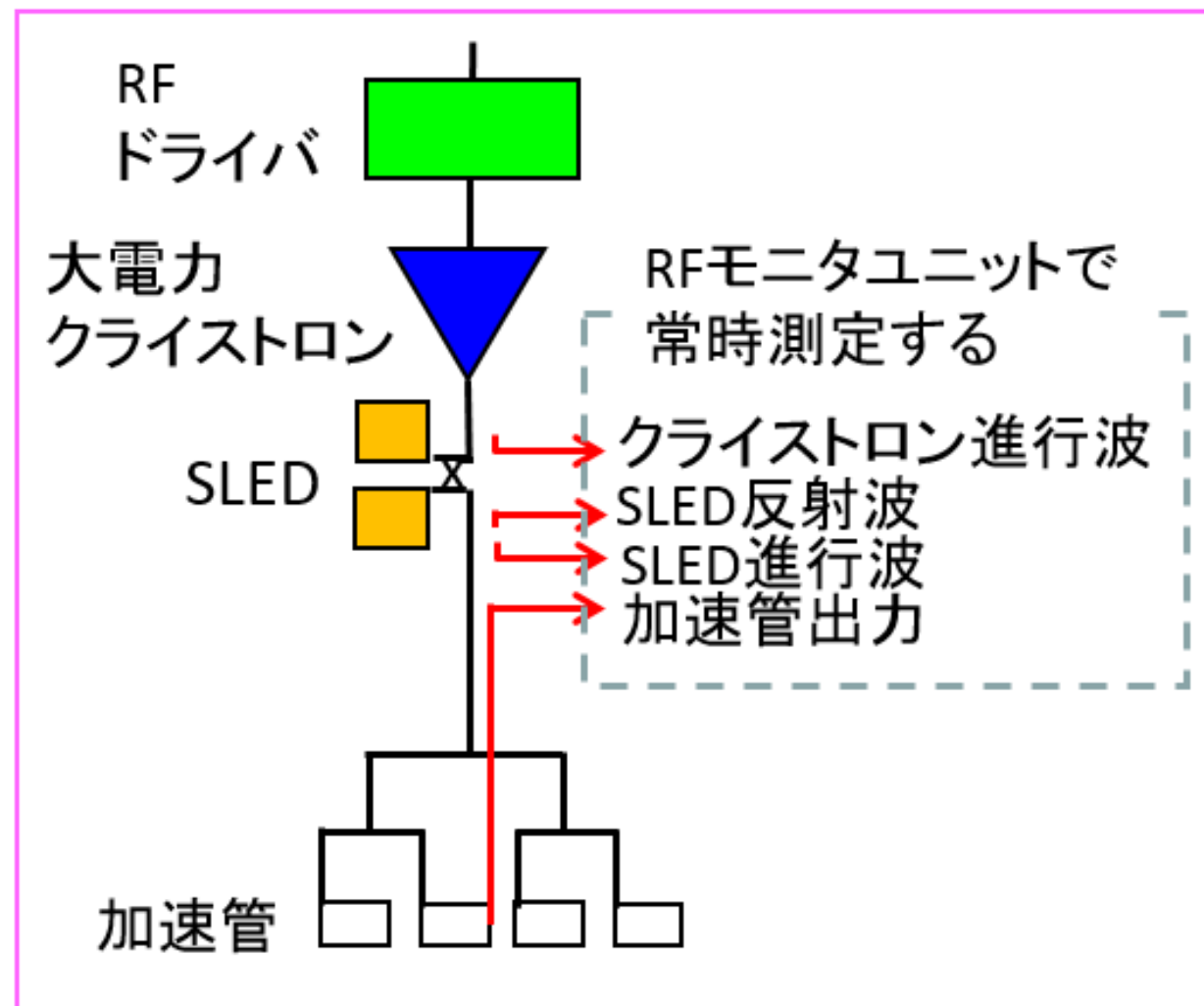
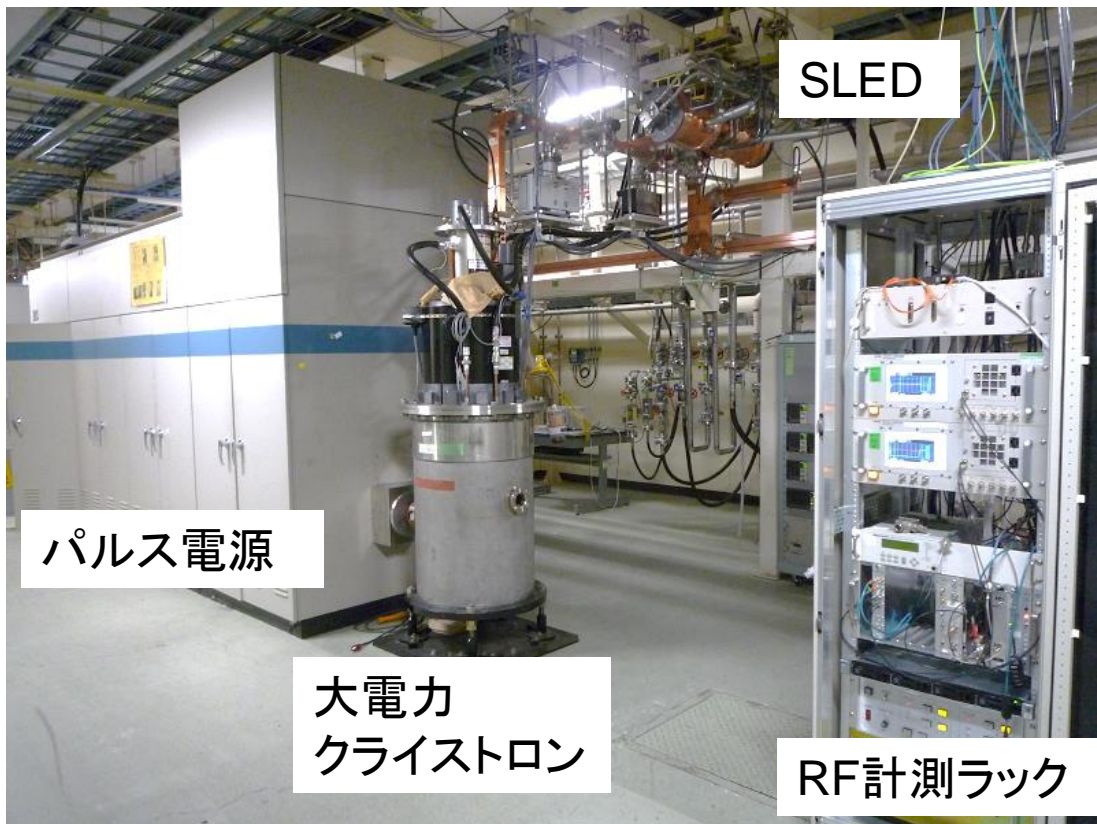
# RFモニタへの要求

- 大電力RF源の電力レベル(振幅)・位相を常時監視する
  - 約60台のRF源全数で、50Hz 全パルスを測定する
- 検出精度: 振幅0.1% rms、位相0.1度 rms
- 同時入射運転への対応
  - ビームモード毎に測定データを振り分け
  - イベントタイミングシステムからイベントコード、ショットIDを取得する



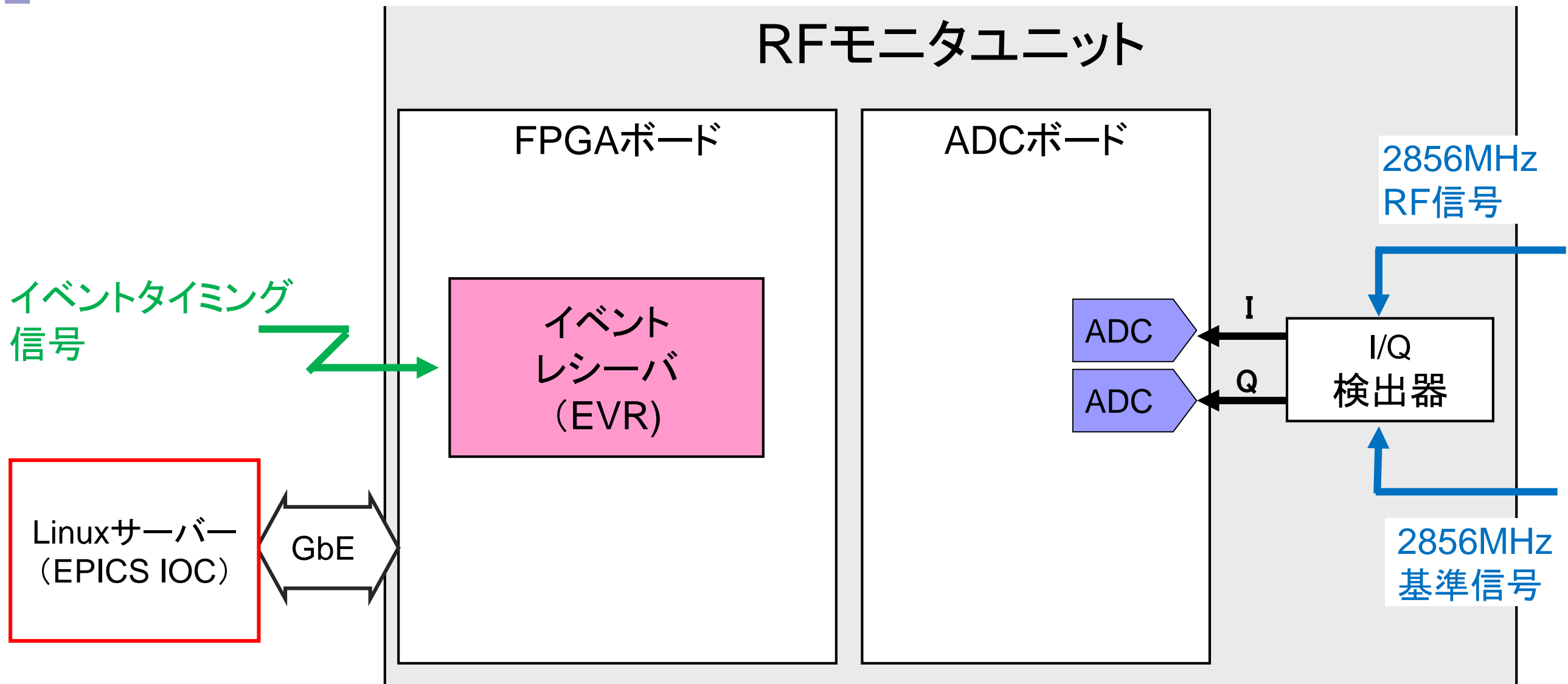
- **技術上のポイント**: イベントレシーバー(EVR)をFPGAに組み込む
- **工夫、努力した点**: EVRの実用化
- **課題・問題点**: データの構造を解析し、必要な情報を抽出する

# 大電力RF源



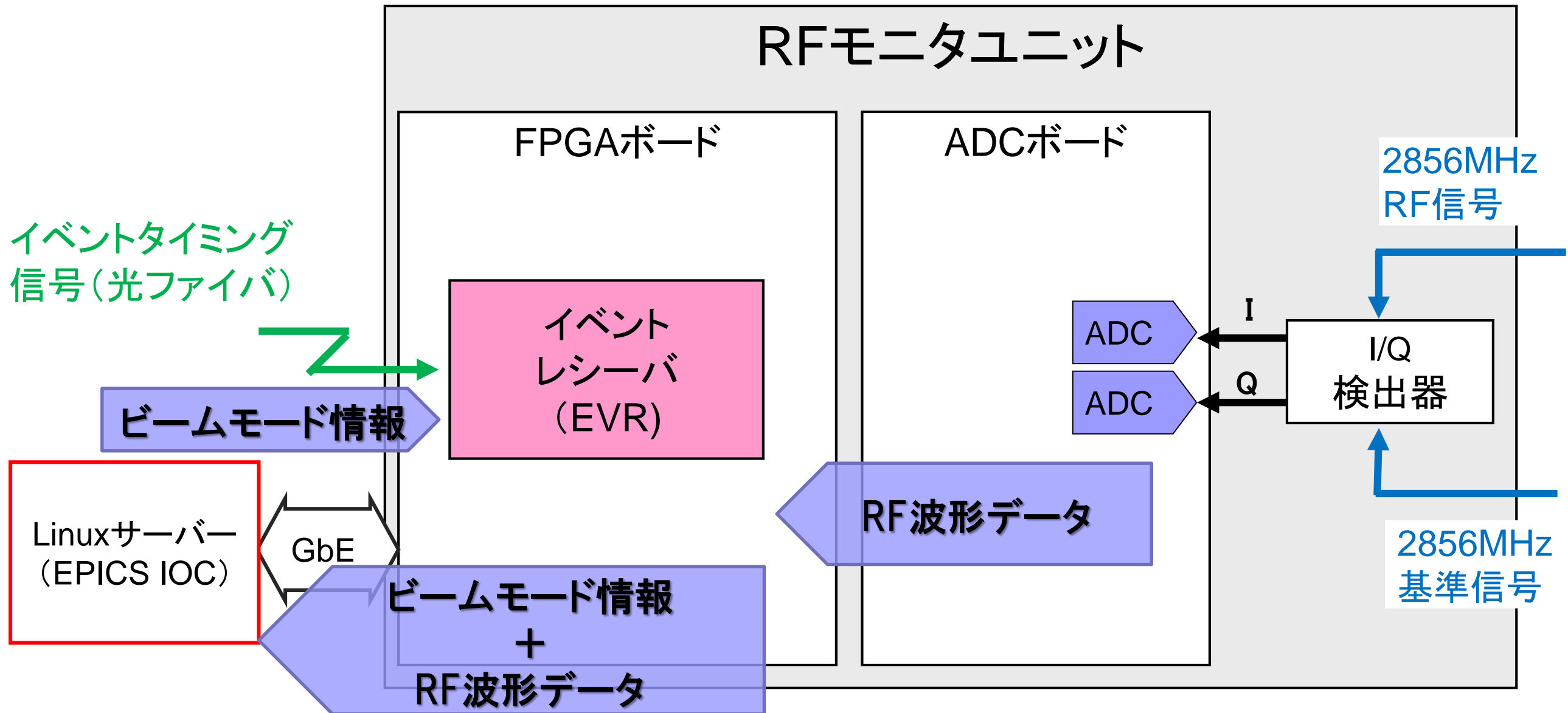
- 大電力クライストロン
  - 2856MHz、定格50MW、パルス幅4 $\mu$ s、繰り返し50Hz
- SLED(パルス圧縮装置)
  - 約2倍の加速電界を得る
- RFドライバ
  - パルス変調、位相反転、同時入射のための位相制御

# RFモニタユニット (RF測定、デジタル変換)



- I/Q検出器 [RF測定] : 0から360度切れ目無く、同じ感度で位相測定が可能
- ADCボード[デジタル変換] : 14bit ADCを採用、測定分解能を高めた
- FPGA [デジタル処理] : GbEにより、取得データをサーバーに転送
- **パルス波形全体の取得、検出精度、処理速度、全てを満たす設計**
- **改善、進歩**
  - 位相検出範囲 40度⇒360度、検出精度(rms) 1度以下⇒0.1度
  - 50Hzでのデータ取得達成、以前は最大25Hz

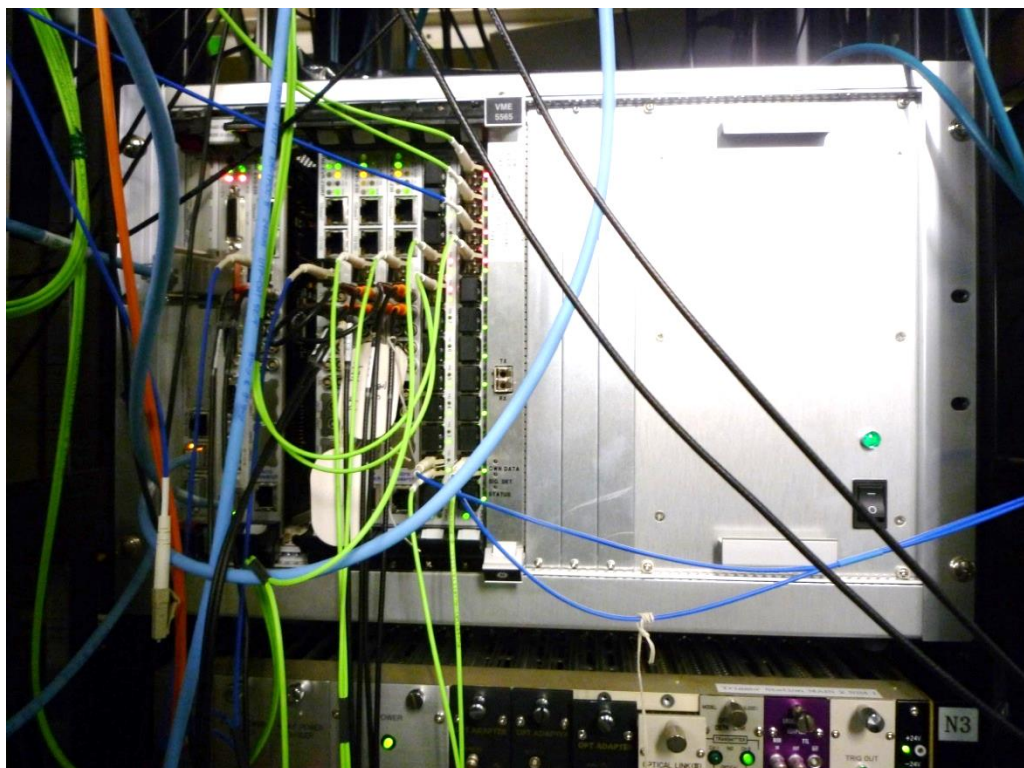
# RFモニタユニット(イベントレシーバ組み込み)



- **技術上のポイント:**
  - EVRをFPGAに組み込み、ビームモードの識別をハードウェアで行う
  - 測定データとビームモードの同時性を保証する
- **課題・問題:** イベントタイミング信号のフォーマットなど詳細な情報が無かった
- **工夫・努力:** EVR誤動作の原因究明と対策

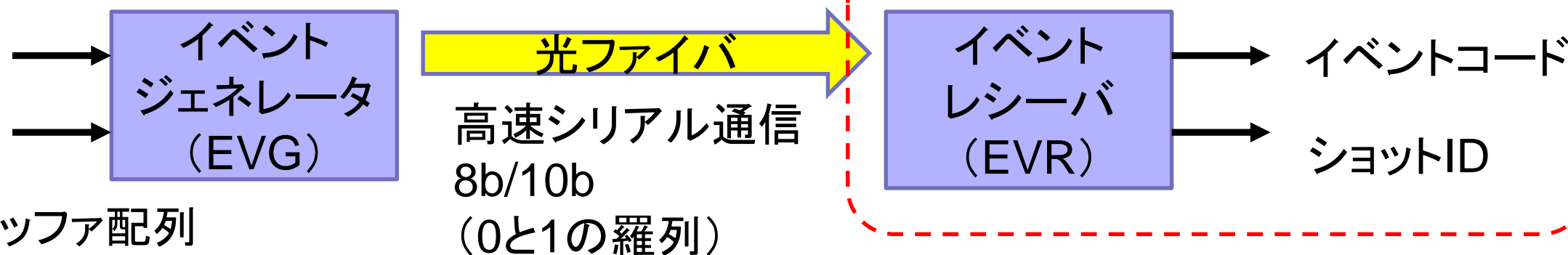


# イベントタイミングシステム



- 入射器のビームモードやタイミングを管理
- VME規格のハードウェアで構成

## イベントコード

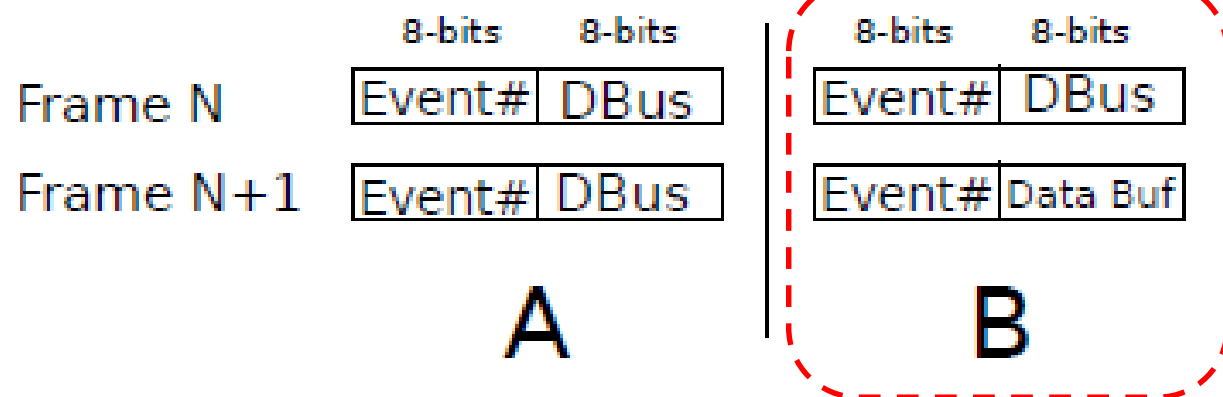


## データバッファ配列

- ・ショットID
- ・RF位相設定値など

- EVRの機能をFPGAに組み込み、受信データからイベントコードとショットIDを抽出する
- EVGから配信されるデータに構造を自力で解析する必要があった

# イベントレシーバの組み込み

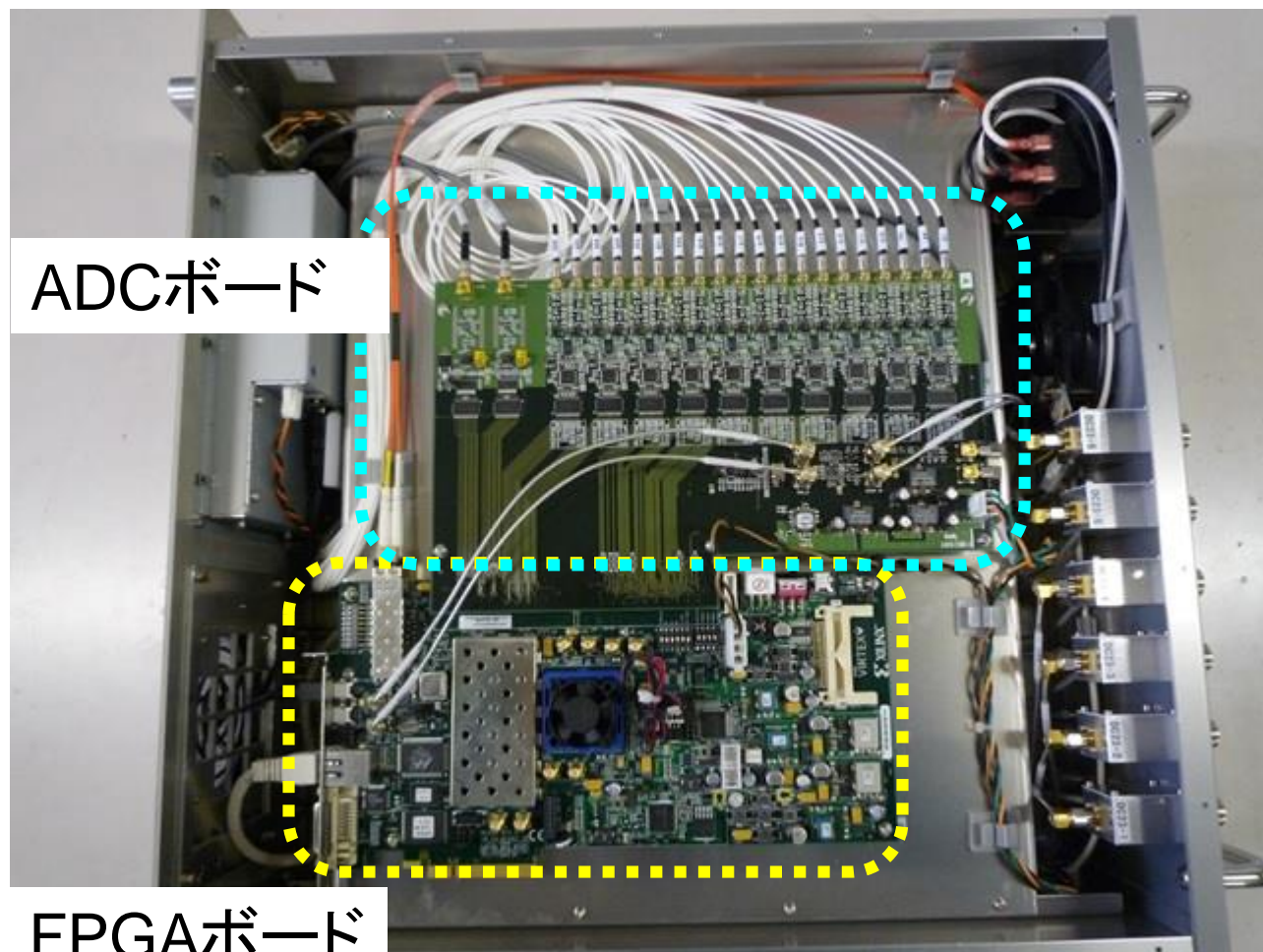


- イベントデータの構造(Bの方で運用)
  - 114.24MHzクロックごとに16ビット幅のデータを受信
  - 上位8ビットにイベントコードが入る
  - 下位8ビットにDbus、データバッファが交互に入る

クロック  
カウンタ

クロック カウンタ	下位8ビット	上位8ビット
↓	イベント	8b/10bのK28.0コード
↓	イベント	
↓	イベント	ショットID(上位8ビット)
↓	イベント	
↓	イベント	ショットID(下位8ビット)
↓	イベント	
↓	イベント	位相設定値(上位8ビット)
↓	イベント	
↓	イベント	位相設定値(下位8ビット)
↓	イベント	

- 組み込みEVRの受信データ
  - イベントタイミングシステムのファームウェアのバージョンにより、受信するデータの順番が違っていた
- 組み込みEVRの誤動作と対策
  - 114.24 MHzクロックの精度が原因だったが、この情報に辿りつくまで時間がかかった

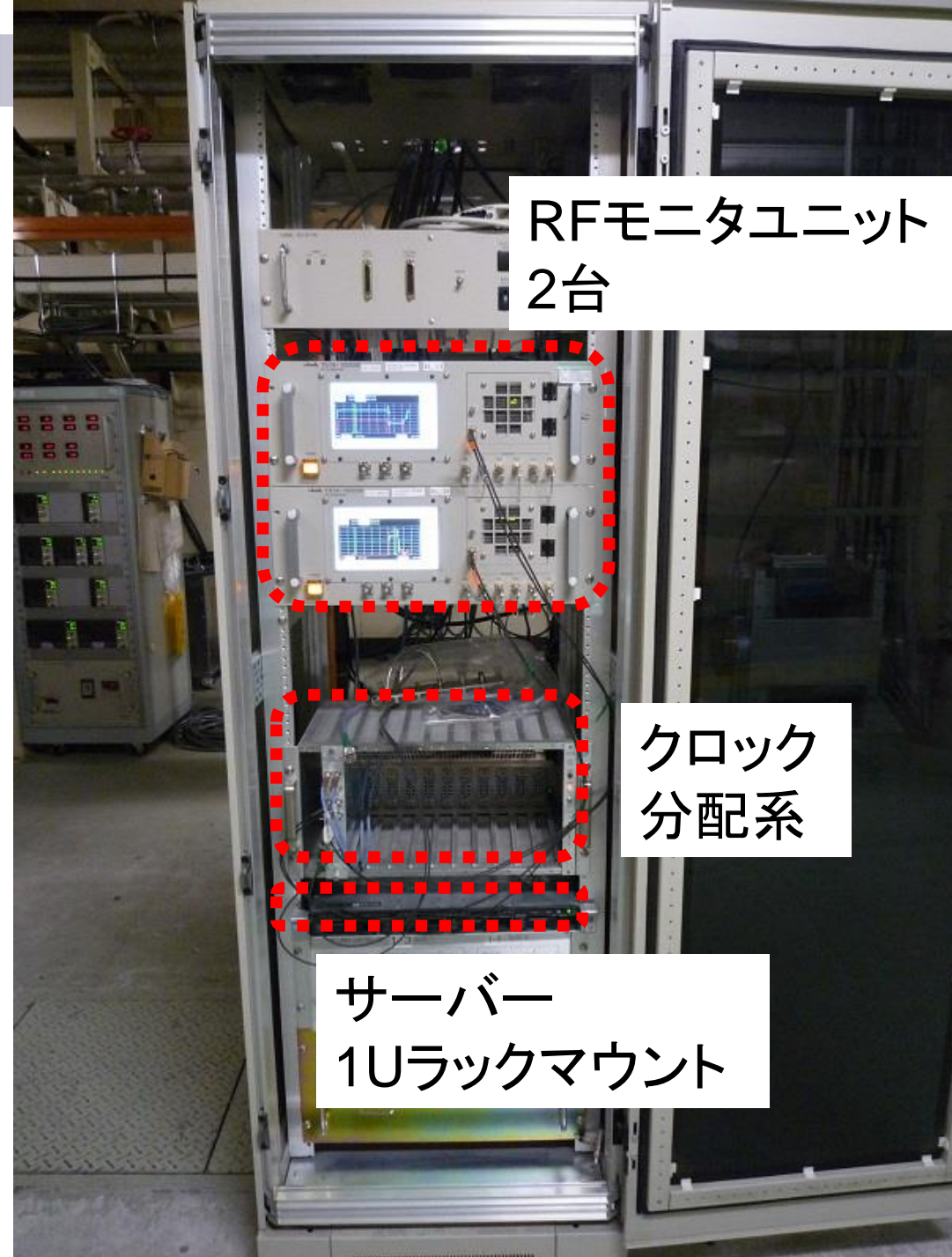


- RFモニタユニット内部

- I/Q検出器は5台搭載

- 改善、進歩

- RF入力チャンネル: 1Ch. → 5Ch
- ユニットの台数: 30台 → 60台



- 計測ラック(全30台)

- RF源2台分のモニタ信号が  
集結されている

# 新旧システムの比較

	旧システム VXIベース30台	新システム RFモニタ60台
ADC	8 bit, 最大1GHz	14 bit, 114MHz
位相測定範囲	< 40度, 2 $\mu$ s	360度, ACC 9 $\mu$ s/STB 9 $\mu$ s
RF測定チャンネル数	1CH(8CH切り替え式)	5CH(同時サンプリング)
50Hz データ捕捉	× (最大25Hz)	○
ビームモード識別	×	○
振幅/位相検出精度	0.15%rms, 0.2度 rms	0.1% rms, 0.1度 rms (テストスタンドでは 0.05%, 0.03度)

# 波形データの表示例 (Waveform viewer)

振幅波形

位相波形[度]



ユニット、信号の選択

ビームモードの選択

Shot ID: パルスカウンタの識別情報

ゲートの設定

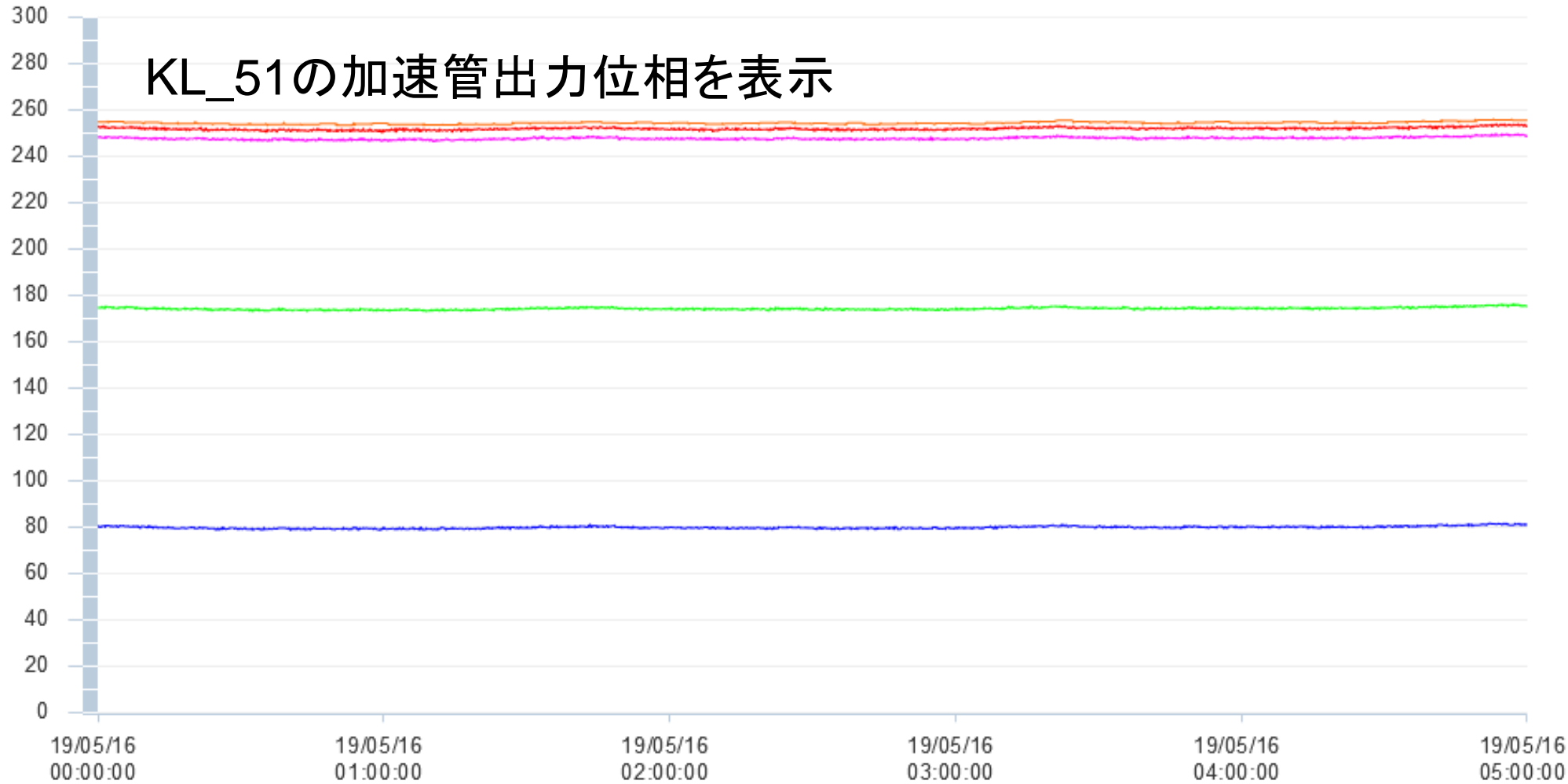
ゲート範囲内の平均値、  
最大値をアーカイブ

加速タイミング (約9μs)

待機タイミング (約9μs)

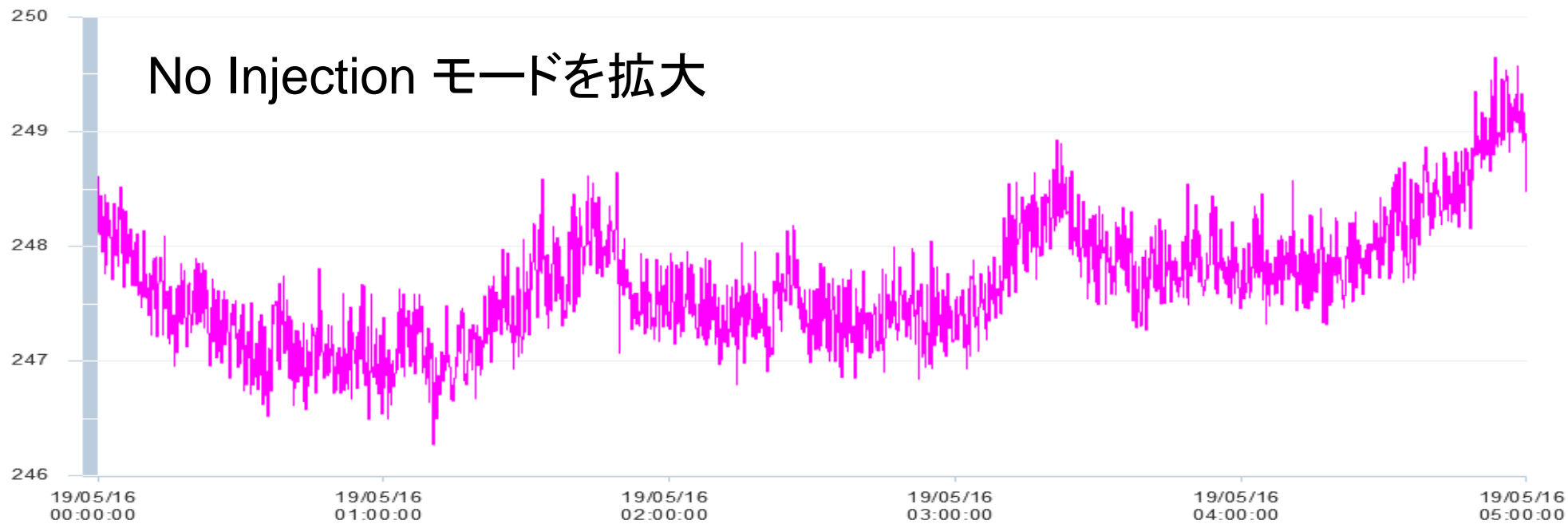
# トレンドグラフ表示例 (Archive viewer)

2019/05/16 00:00:00 ~ 2019/05/16 05:00:00



- HER
- LER
- PF
- PF-AR
- No Injection

2019/05/16 00:00:00 ~ 2019/05/16 05:00:00

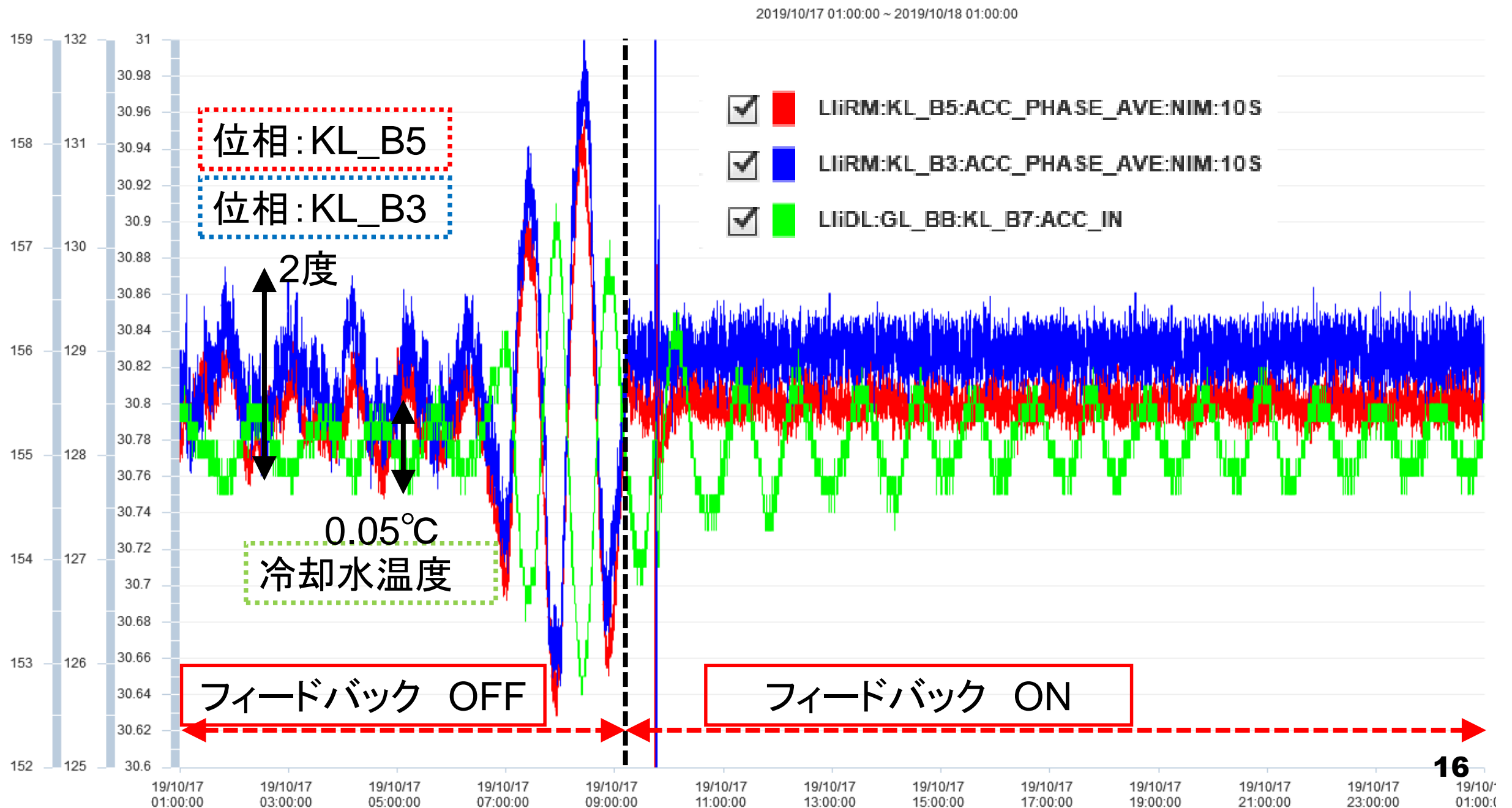


- LiIRM:KL\_53:ACC\_PHASE\_AVE:KBE:10S
- LiIRM:KL\_53:ACC\_PHASE\_AVE:KBP:10S
- LiIRM:KL\_53:ACC\_PHASE\_AVE:QFE:10S
- LiIRM:KL\_53:ACC\_PHASE\_AVE:ARE:10S
- LiIRM:KL\_53:ACC\_PHASE\_AVE:NIM:10S

達成度、効果、どのように役立っているか  
ビーム運転への応用

# フィードバック制御への応用

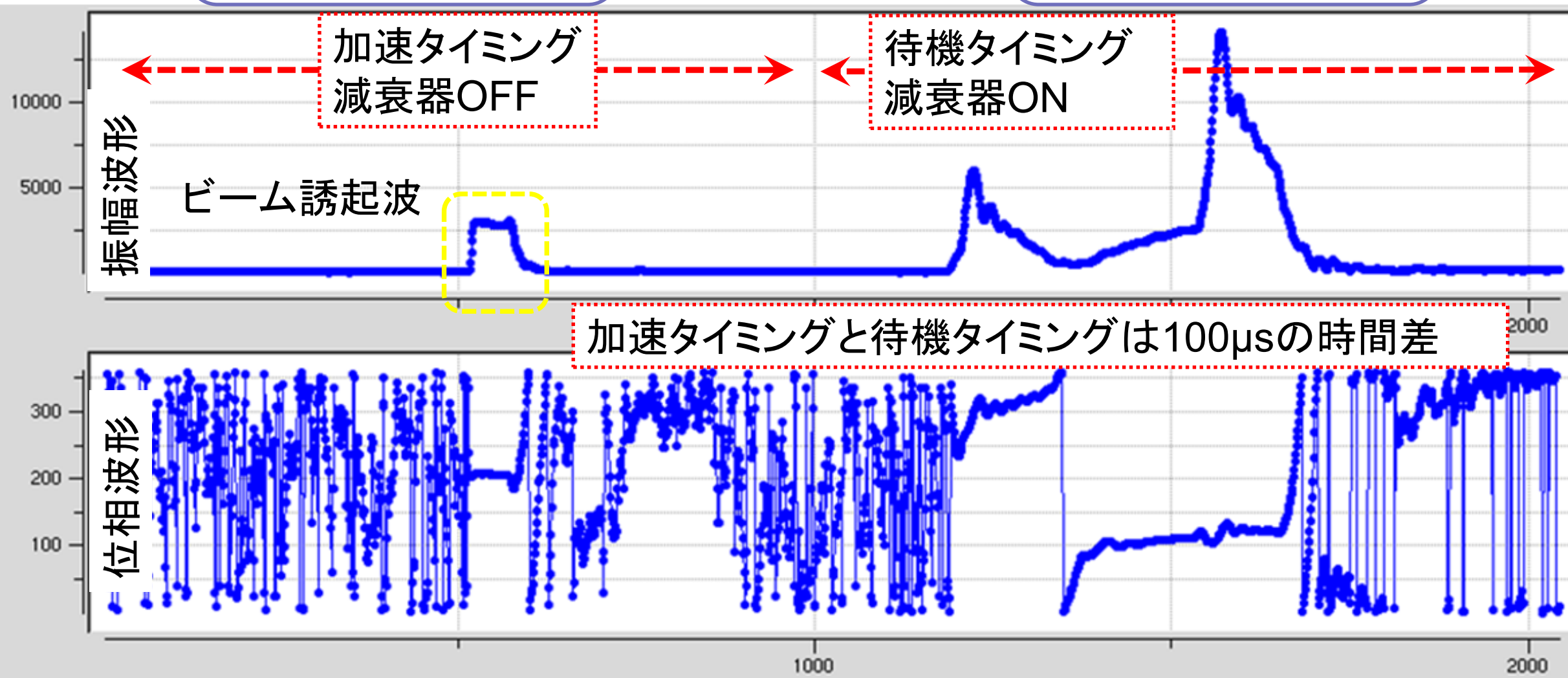
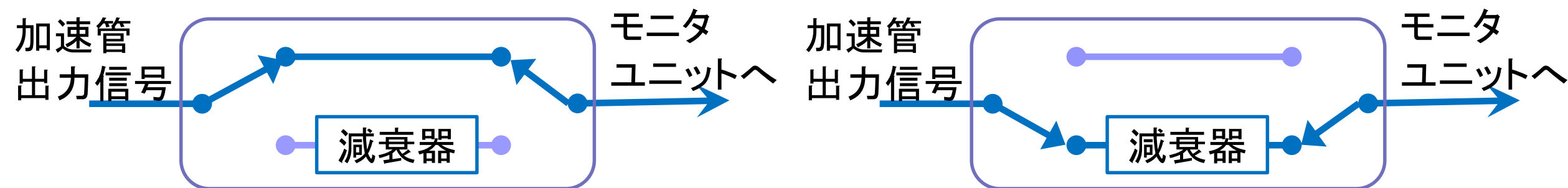
- 室温や冷却水温度の変化とRF位相の相関がより明確になった
- 加速管冷却水の温度変動による位相が変化を打ち消す方向に設定値を自動的に調整するフィードバック制御を導入





# ビーム誘起波測定

- ビームが加速管を通過する際に発生するRF電力
- 位相調整やビーム調整への利用(ビームモニタとして使う)
- 大電力RFよりも振幅が低いため高速でON/OFF可能な減衰器を導入し、同一パルス周期内で両方の信号を測定
- 減衰量とアンプの増幅率を適切に設定し、測定精度を向上



# 達成度、効果、どのように役立っているか RF源診断への利用

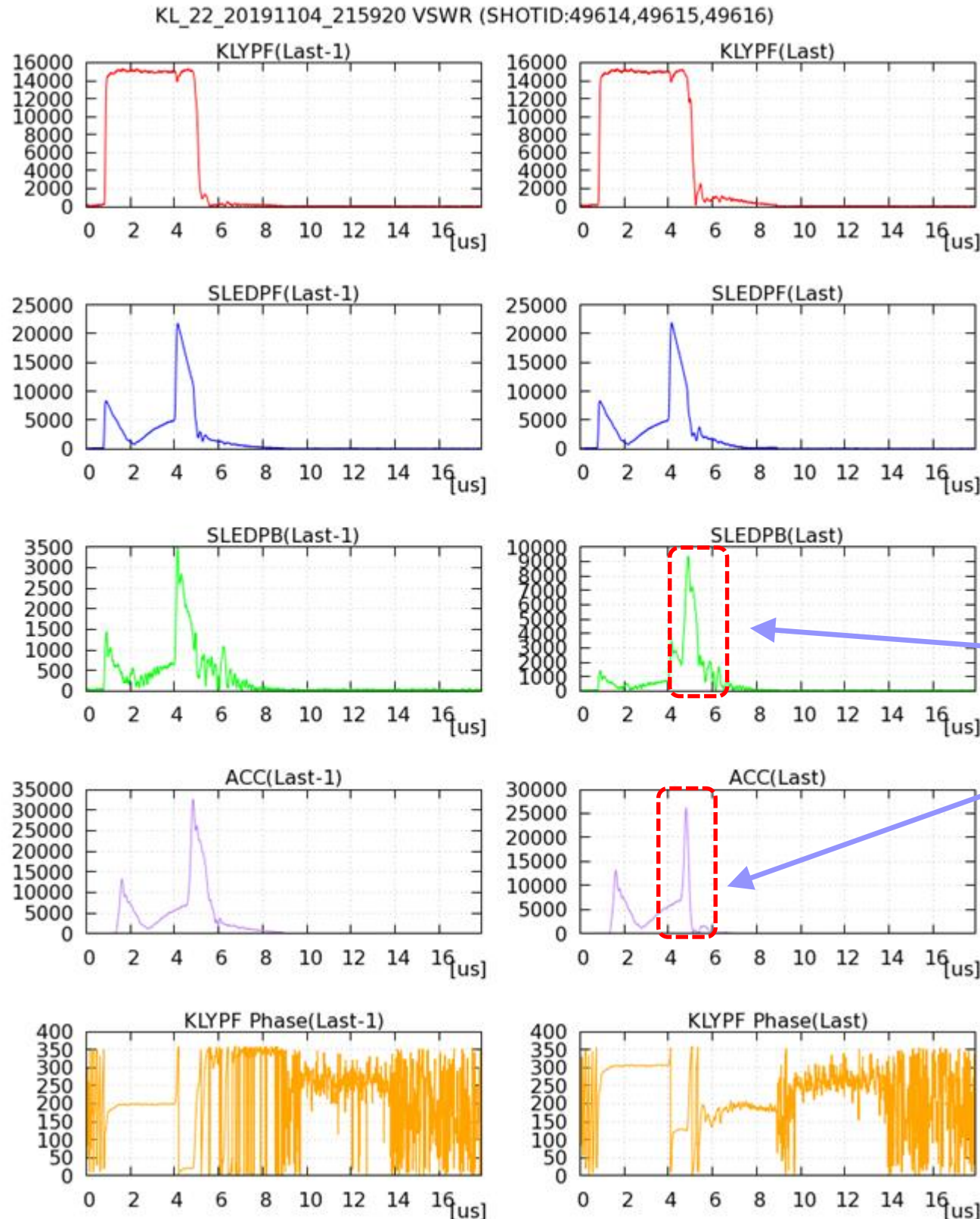
50Hz 全パルスを監視し、RF源で異常が発生した際の  
パルス波形を自動的に保存

# インターロック作動時の波形保存

## ■ VSWRインターロック作動時に得られたデータ

1パルス前

インターロック作動時



KLY Pf

SLED Pf

SLED Pb

加速管

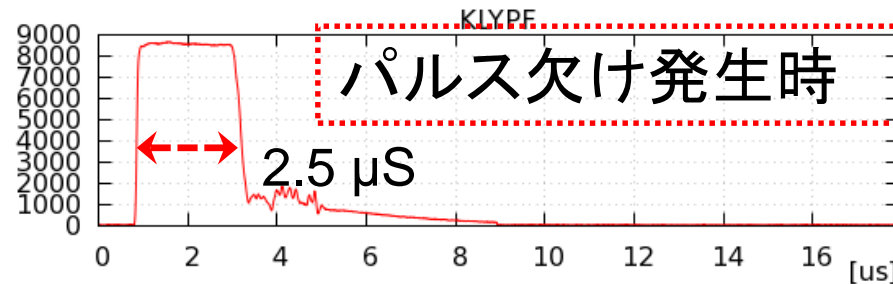
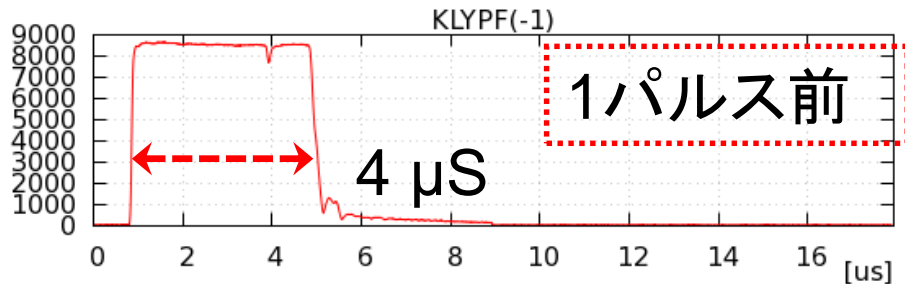
KLY Pf  
位相

加速管からの反射  
がSLEDに戻ってき  
ている

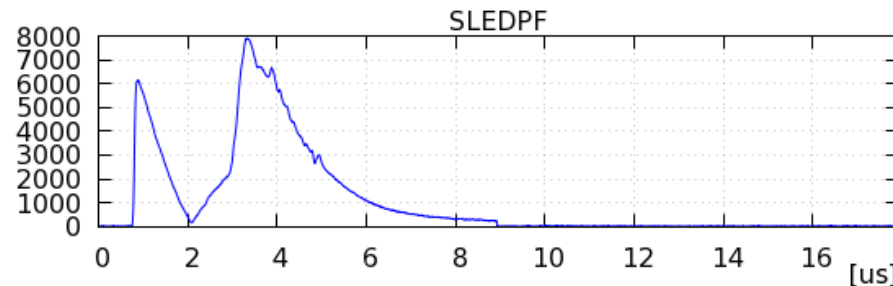
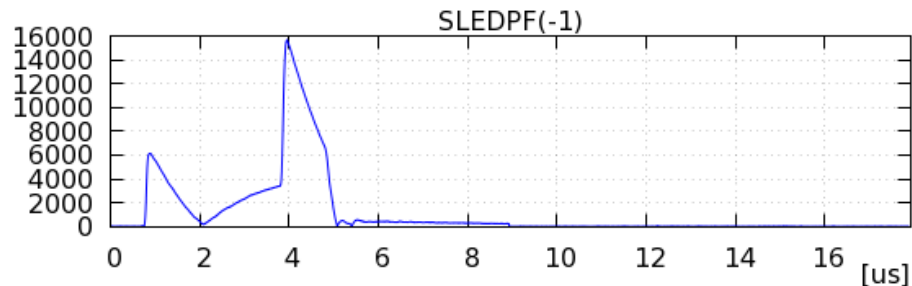
# パルス欠け検出

- 大電力クライストロン出力パルス幅が短くなる現象
- リングのビームに影響する可能性があることが判明

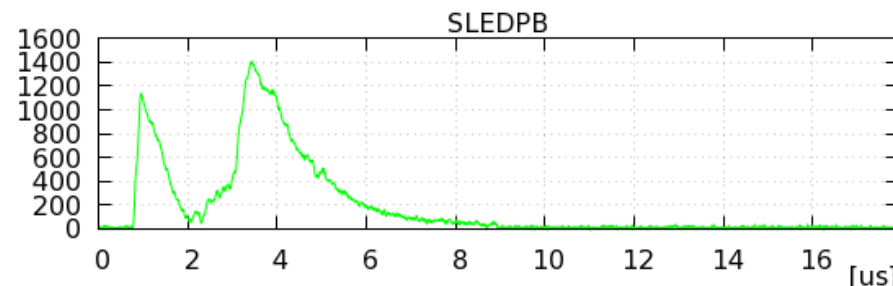
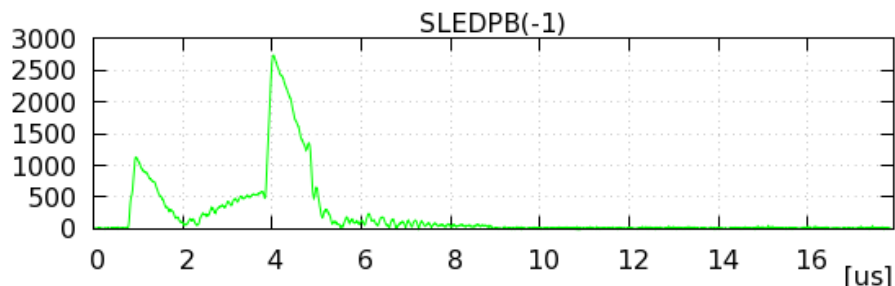
KL\_B4\_20191107\_010320\_132\_NIM\_pw\_pulse\_width (SHOTID:1137,1138)



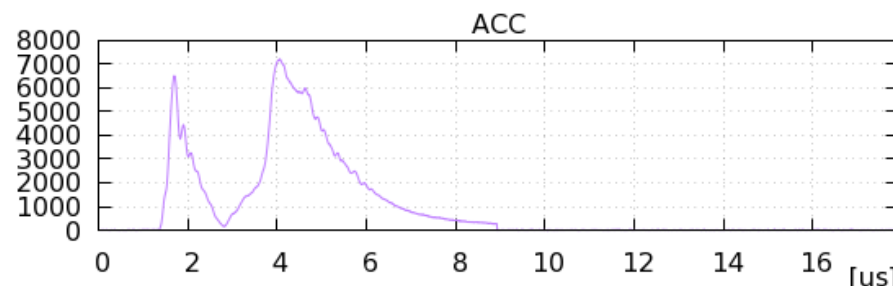
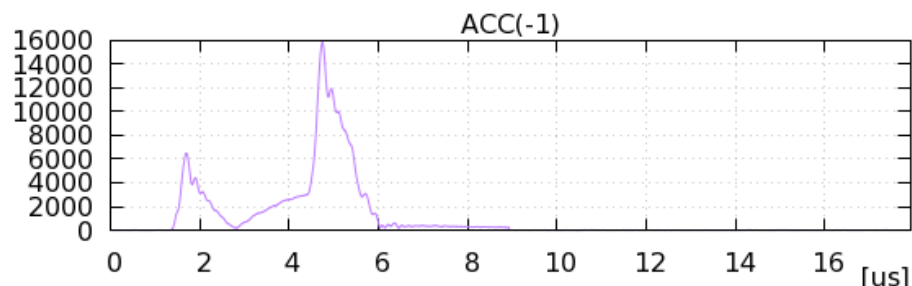
KLY Pf



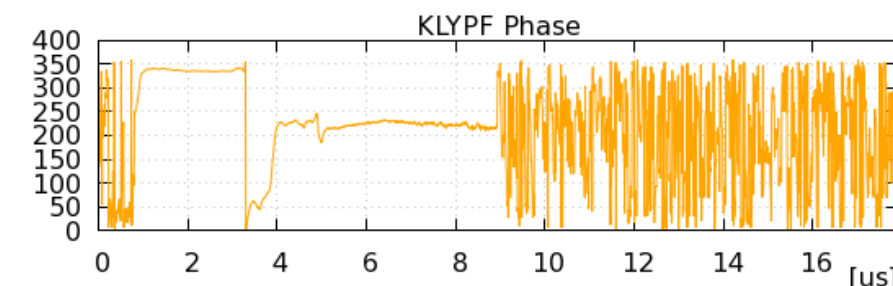
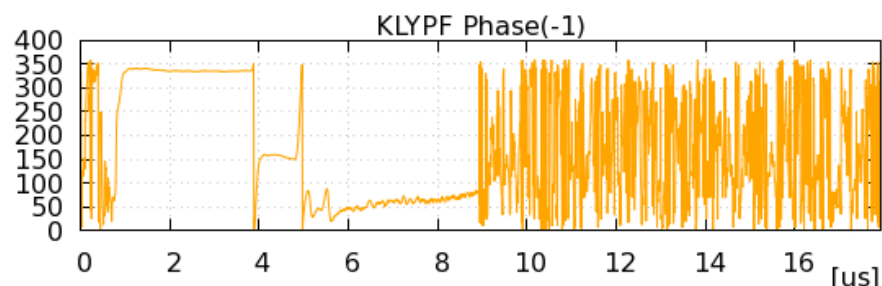
SLED Pf



SLED Pb



加速管



KLY Pf  
位相

## 本件に関する論文

2012年加速器学会年会 「同時入射に対応したRF モニタユニットの開発」

2014年加速器学会年会 「SuperKEKB入射器の高周波モニタシステム」

2015年加速器学会年会 「SuperKEKB入射器用高周波モニタシステムの現状」

2018年加速器学会年会 「SuperKEKB入射器のRFモニタシステムによるRF源診断」

2019年加速器学会年会 「SuperKEKB入射器のビーム誘起波測定」

IPAC2018 “RF Monitor System For SuperKEKB Injector Linac”, IPAC’18, WEPAK016

## 以前のシステムに関する論文

1988年リニアック技術研究会 「KEK 2.5GeVリニアックのクライストロンRF波形記録システム」

(PFとTRISTAN実験の期間のRFモニタ)

ICALEPCS ‘99 “RF Monitoring System In The Injector Linac”

(KEKBに向けた入射器増強の時期に導入したRFモニタ)

# まとめ

- 電子・陽電子入射器のRFモニタを更新
  - I/Q検出器、ADCボード、FPGAボードを組み合わせたRFモニタユニットを開発し、要求された検出精度と50Hzでのデータ取得を達成
  - FPGAにイベントレシーバーを組み込み、ビームモードの識別を実現
  - 60台のRFモニタユニットを導入し、全RF源を常時監視
- 入射器の安定した運転に貢献
  - フィードバック制御、ビーム誘起波測定など、新たな利用が可能となった
  - RF源の異常時のデータを自動的に保存し、維持管理に有効な情報提供

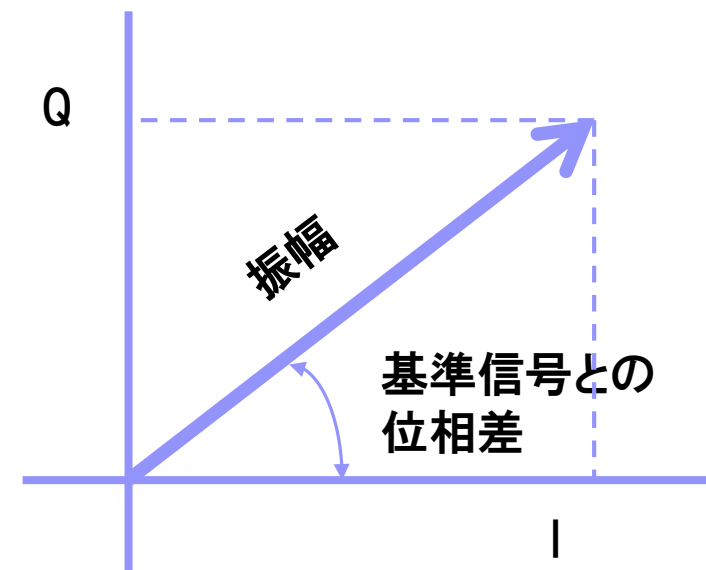
# ■ まとめ

- 測定の安定性の向上が必要
  - 温度に依存した測定値の変動
  - 2856MHzの基準信号にノイズが乗り、測定精度の悪化





# IQ検出器



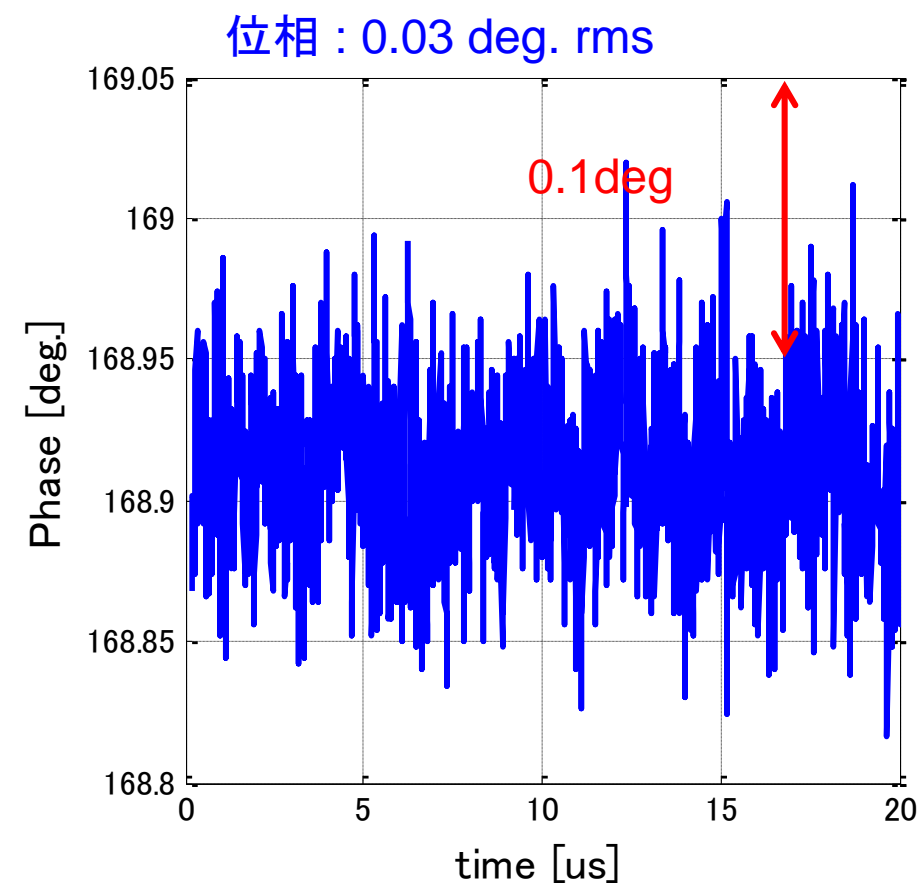
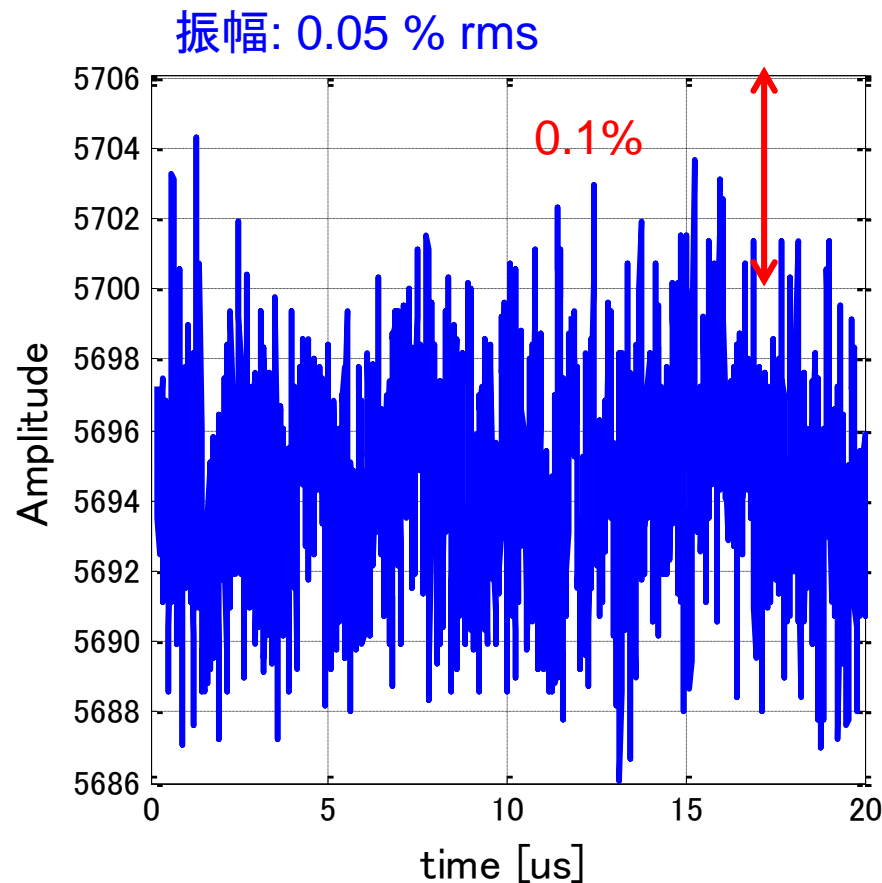
Test  
2856MHz

Ref.  
2856MHz

I/Q成分  
ベースバンド

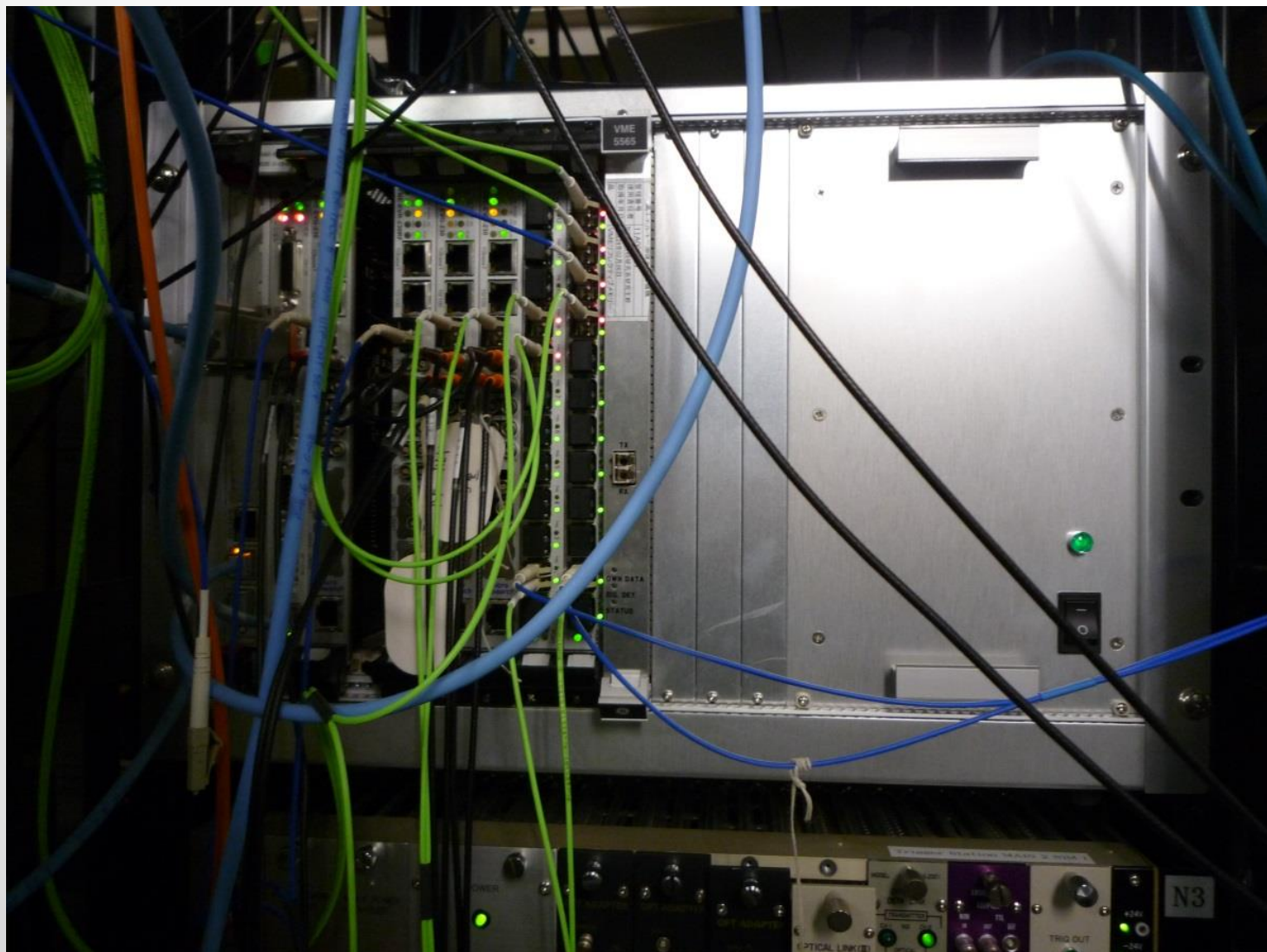
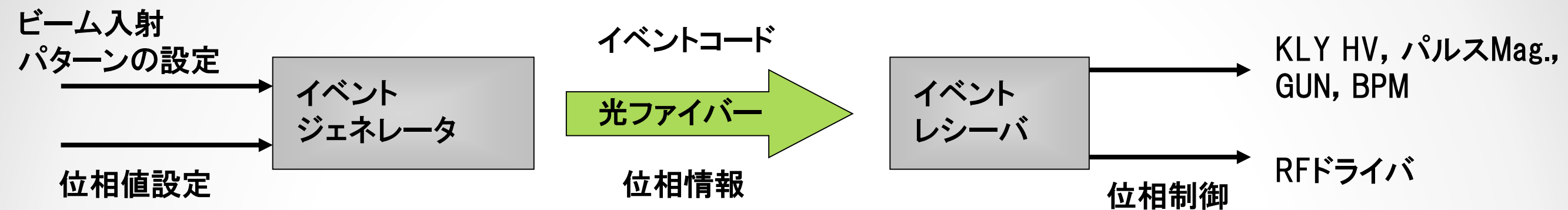
# 測定安定度の評価

信号発生器 (SG) から2856MHz連続波を入力し、1パルス分の測定 (約2000点) での測定値のばらつきを評価  
検出精度の目標値を満たしていると判断



@100MHz sampling

# イベントタイミングシステム



KEKB e <sup>-</sup> (31~40) kbe	
31	準備イベント (32の1パルス前に発生)
32	ダブルパルス 1st, KLY HV
33	ダブルパルス 2nd
34	Main C7 Level 信号に使用
35	SHB HV
36	RF Gun用
KEKB e <sup>+</sup> (41~50) kbp	
41	準備イベント (42の1パルス前に発生)
42	ダブルパルス 1st, KLY HV
43	ダブルパルス 2nd
44	Main C7 Level 信号に使用
45	SHB HV
46	RF Gun用
PF (51~60) pfe	
51	準備イベント (52の1パルス前に発生)
52	ダブルパルス 1st, KLY HV
53	ダブルパルス 2nd
54	Main C7 Level 信号に使用
55	SHB HV
56	RF Gun用

# イベントレシーバの組み込み

- RFモニタ/RFドライバではFPGAに組み込む
- EVGからは高速シリアル通信8b/10bで符号化
  - 例) 00000000b > 100111 0100 と変換する
- 114.24MHzのクロック毎に2バイトのデータを受信
  - 必要なデータのみを抽出する作りこみが必要

# イベントレシーバの組み込み

- Xilinx Virtex6 FPGA GTX トランシーバを使用
- CoreGeneratorにて8B/10Bデコーダ、ビットアライメント、リファレンスクロック等を設計

The screenshot shows the 'Virtex-6 FPGA GTX Transceiver Wizard' window. The title bar reads 'Virtex-6 FPGA GTX Transceiver Wizard'. The main window has a 'Documents' tab and the title 'Virtex-6 FPGA GTX Transceiver Wizard' with version '1.7'. The current step is 'Line Rates and Encoding'. The 'Component Name' is 'sfp\_gtx\_v1\_7'. The 'Protocol Template' is 'Start from scratch'. The 'TX' section has 'Line Rate' 2.28 Gbps, 'Data Path Width' 20, 'Encoding' 8B/10B, and 'Reference Clock' 114.00 MHz. The 'RX' section has 'Line Rate' 2.28 Gbps, 'Data Path Width' 20, 'Decoding' 8B/10B, and 'Reference Clock' 114.00 MHz. There are checkboxes for 'Use Oversampling', 'TX off', 'RX off', and 'Use RXOVERSAMPLEERR Ports'. A checkbox for 'Use Dynamic Reconfiguration Port' is also present. The '8B/10B Optional Ports' section has checkboxes for TX (TXBYPASS8B10B, TXCHARDISPMODE, TXCHARDISPVAL, TXKERR, TXRUNDISP) and RX (RXCHARISCOMMA, RXCHARISK, RXRUNDISP). At the bottom, there are buttons for 'Datasheet', '< Back', 'Page 1 of 8', 'Next >', 'Generate', 'Cancel', and 'Help'.

Virtex-6 FPGA GTX Transceiver Wizard

Documents

**Virtex-6 FPGA GTX Transceiver Wizard** 1.7

**Line Rates and Encoding**

Component Name

Protocol Template  
  
Select optional protocol template above

**TX**

Line Rate  Gbps  
Data Path Width   
Encoding   
Reference Clock  MHz

Use Oversampling  TX off

**RX**

Line Rate  Gbps  
Data Path Width   
Decoding   
Reference Clock  MHz

Use Oversampling  RX off  
 Use RXOVERSAMPLEERR Ports

Use Dynamic Reconfiguration Port

**8B/10B Optional Ports**

**TX**

TXBYPASS8B10B  
 TXCHARDISPMODE  
 TXCHARDISPVAL  
 TXKERR  
 TXRUNDISP

**RX**

RXCHARISCOMMA  
 RXCHARISK  
 RXRUNDISP

Page 1 of 8

# イベントコードの抽出

クロック  
カウント

下位バイト	上位バイト
イベント	
イベント	位相データ
イベント	
イベント	位相データ
イベント	
イベント	位相データ
イベント	
イベント	位相データ
イベント	

受信データの解析結果

抽出すべきイベントコードは50Hzで来るため、トリガ検出後に受信したコードを保持する



トリガカウンタ	イベントコード
1	182
2	182
3	182
4	182
5	182
6	182
7	182
8	182
9	182
10	182
11	182
12	182
13	182
14	182
15	182
16	52
17	182
18	182

No Injection

PFE

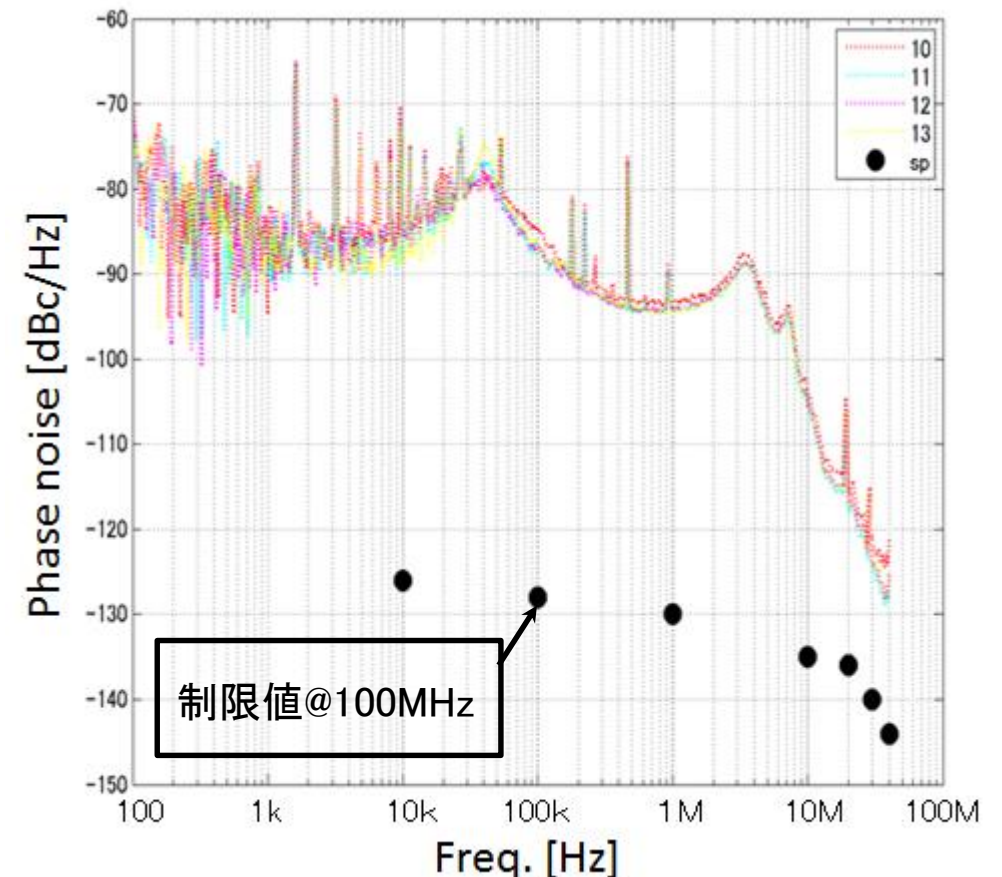
No Injection

検出されたイベントコードの例  
(PF 2Hz入射時)

# EVRの誤動作

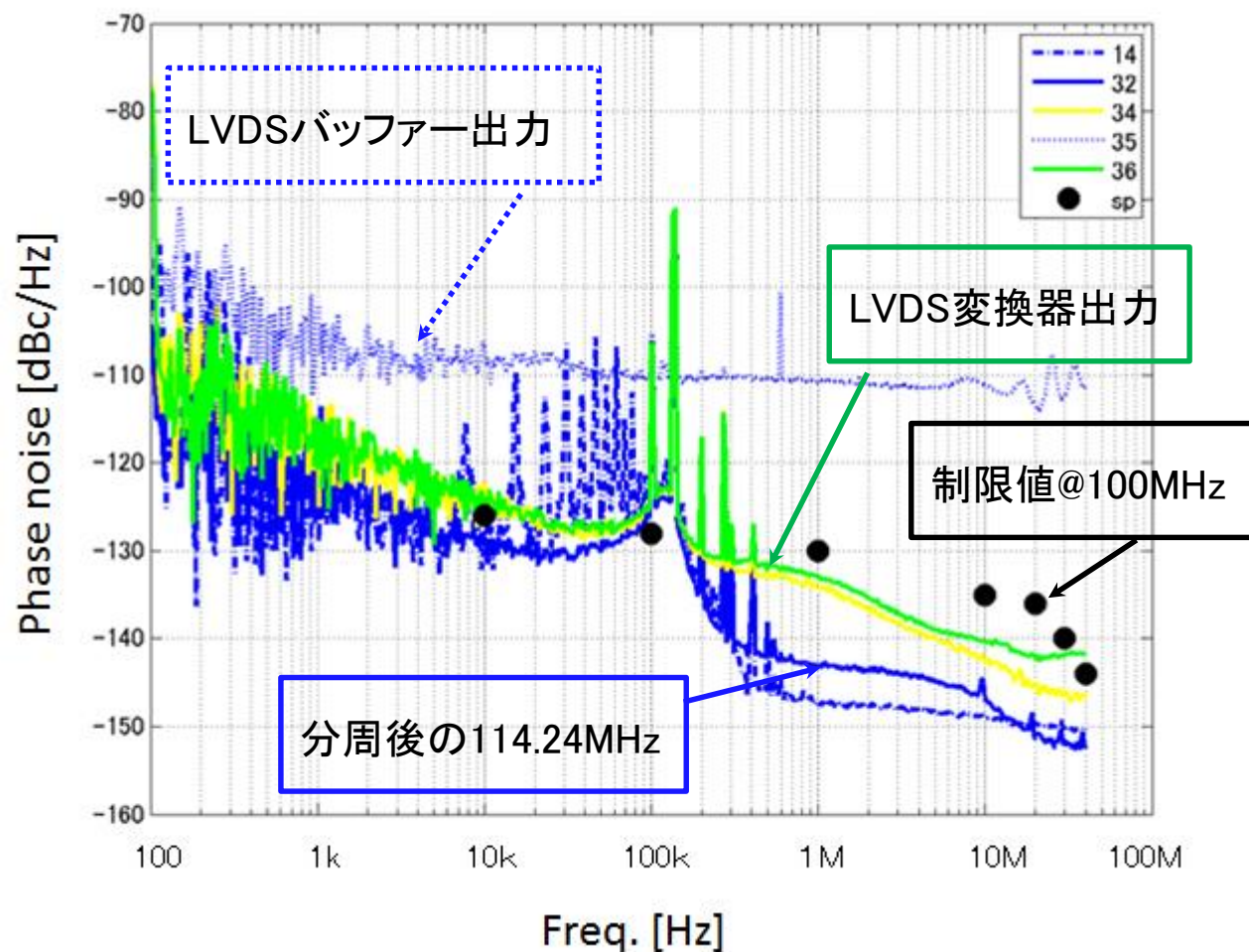
- テストスタンドでの動作確認
- 現場での動作確認(3台)
- 全数インストール後、EVRの誤動作が発生
- イベントタイミングシステムのクロックがGTXトランシーバーの位相ノイズ制限を満たしていなかった

Phase Noise Limits in dBc/Hz:							
Ref Clk Freq. [MHz]	10KHz	100KHz	1MHz	10MHz	20MHz	30MHz	40MHz
100	-126	-128	-130	-135	-136	-140	-144
125	-121	-132	-131	-136	-138	-141	-144
156.25	-119	-130	-130	-135	-136	-140	-143
250	-113	-126	-131	-134	-135	-135	-146
312.5	-110	-125	-132	-135	-135	-135	-135



# 114.24MHzクロック源の変更

- 入射器のタイミング制御用の571.2MHzを5分周した114.24MHzに変更
- ユニット内のLVDSバッファーを通さず、直接FPGAボードに入力



分周したクロックの位相ノイズ測定値



Analog Devices AD9518評価ボード  
(クロック分周に使用)



FPGAボードへのクロック入力の変更 32



# 大電力クライストロンの前段増幅器のトラブルにより出力電力を下げたのに伴いクライストロンへの入力変化。RFモニタの測定値が元に戻るよう位相調整を実施

SB\_3 印加電圧調整後、SB\_3 配下の KLY Phase 調整(三菱SC)

KL\_32φ 233.0° → 284.0°

KL\_33φ 182.2° → 232.2°

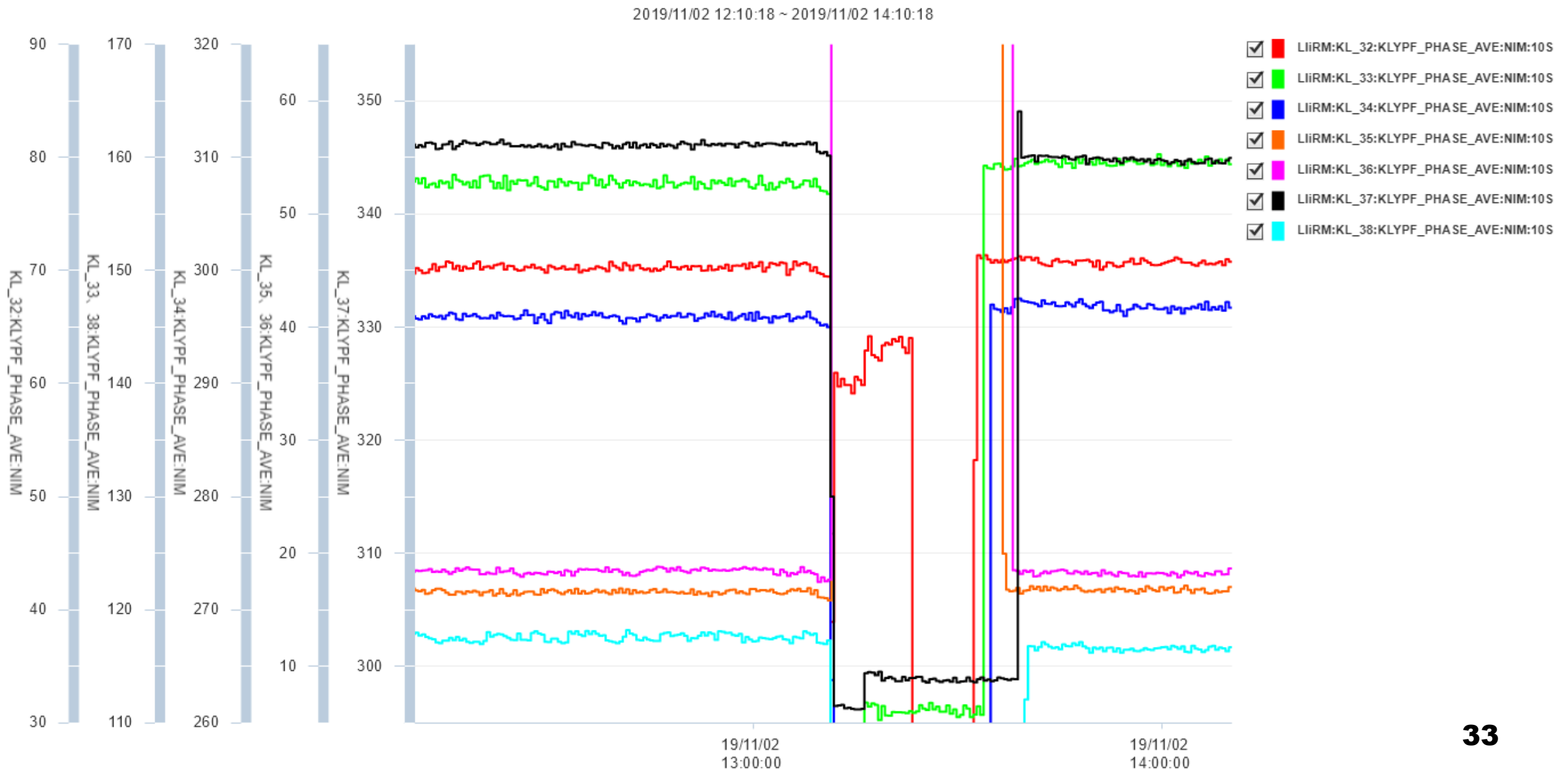
KL\_34φ 312.0° → 360.0°

KL\_35φ 24.0° → 70.0°

KL\_36φ 126.4° → 174.4°

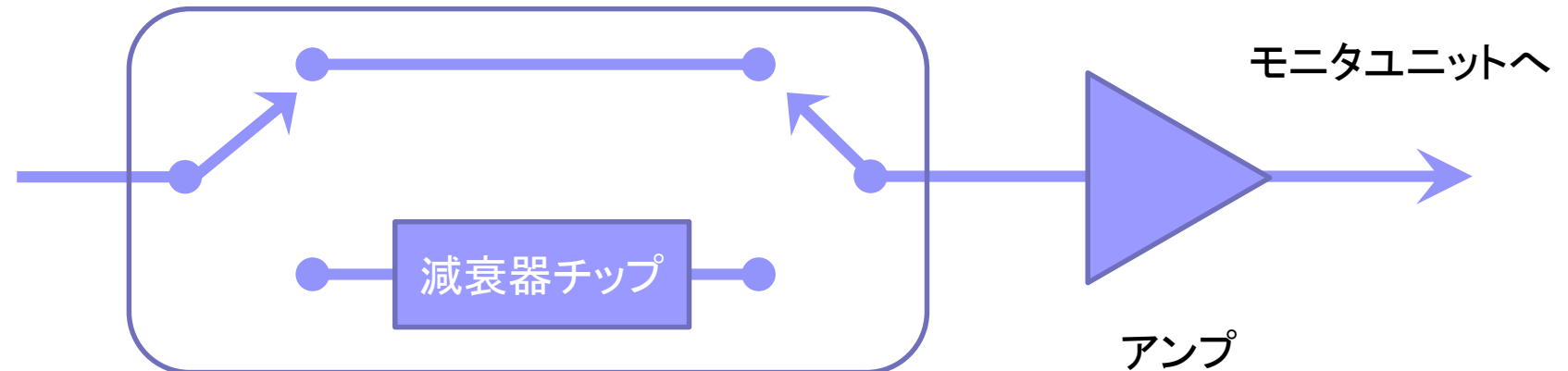
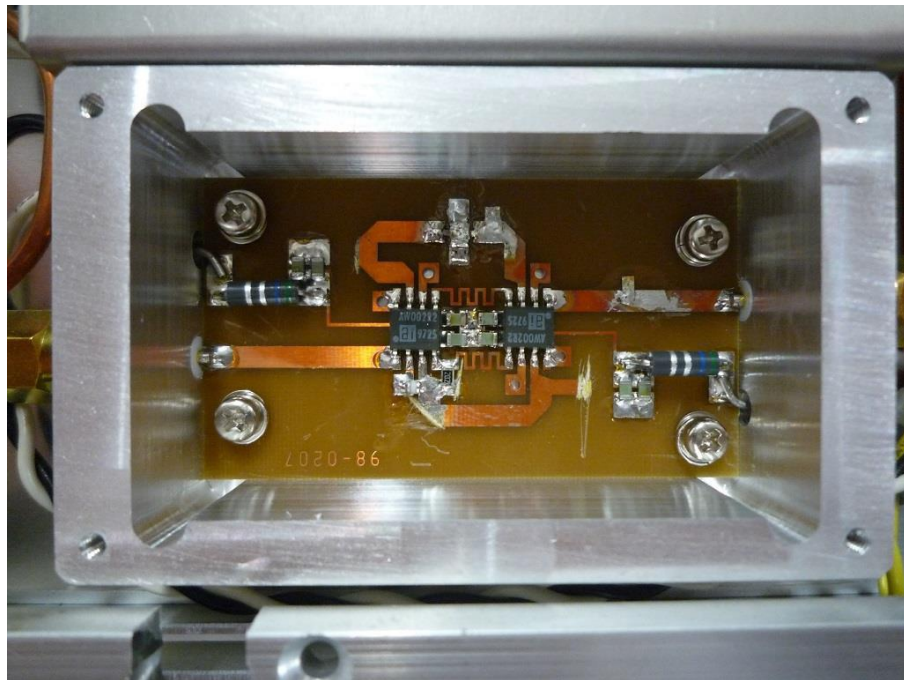
KL\_37φ 335.2° → 381.2°

KL\_38φ 312.0° → 358.0° (RF Monitor にて KLY PF Phase(NIM) を見て SB\_3 電圧変更前と同じ位相値になるよう調整)

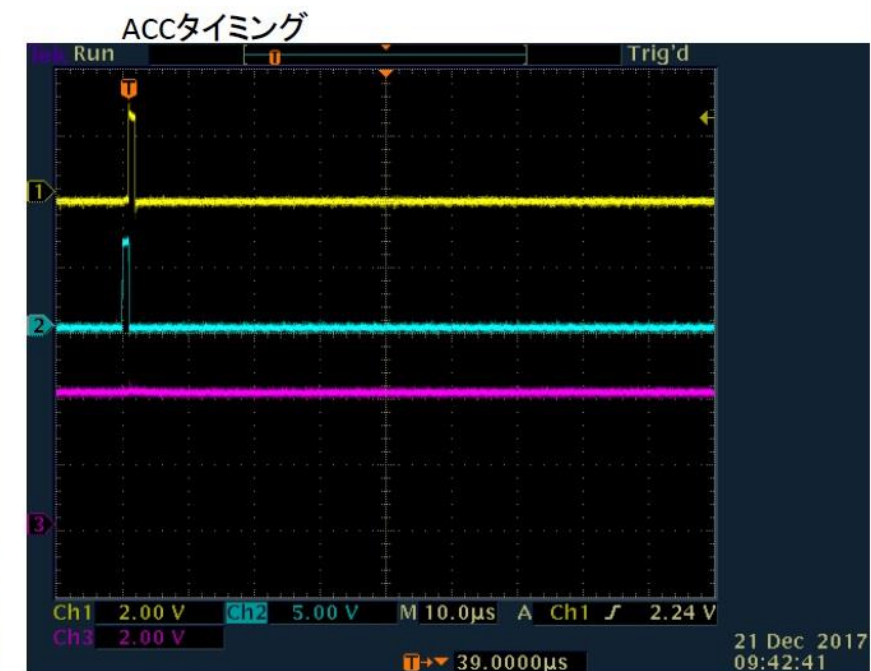
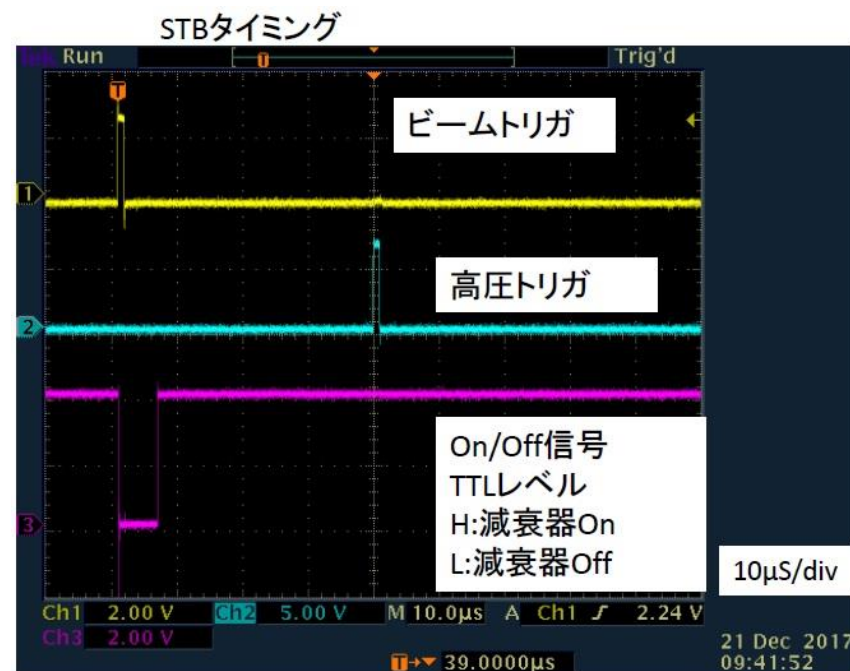


# ON/OFF式減衰器ユニット

- SPDTスイッチ2個で減衰器を通るパスとスルーを切り替える。ON/OFFでの位相差は±1度以内
- 減衰量は、30dB、40dB、46dBで試験

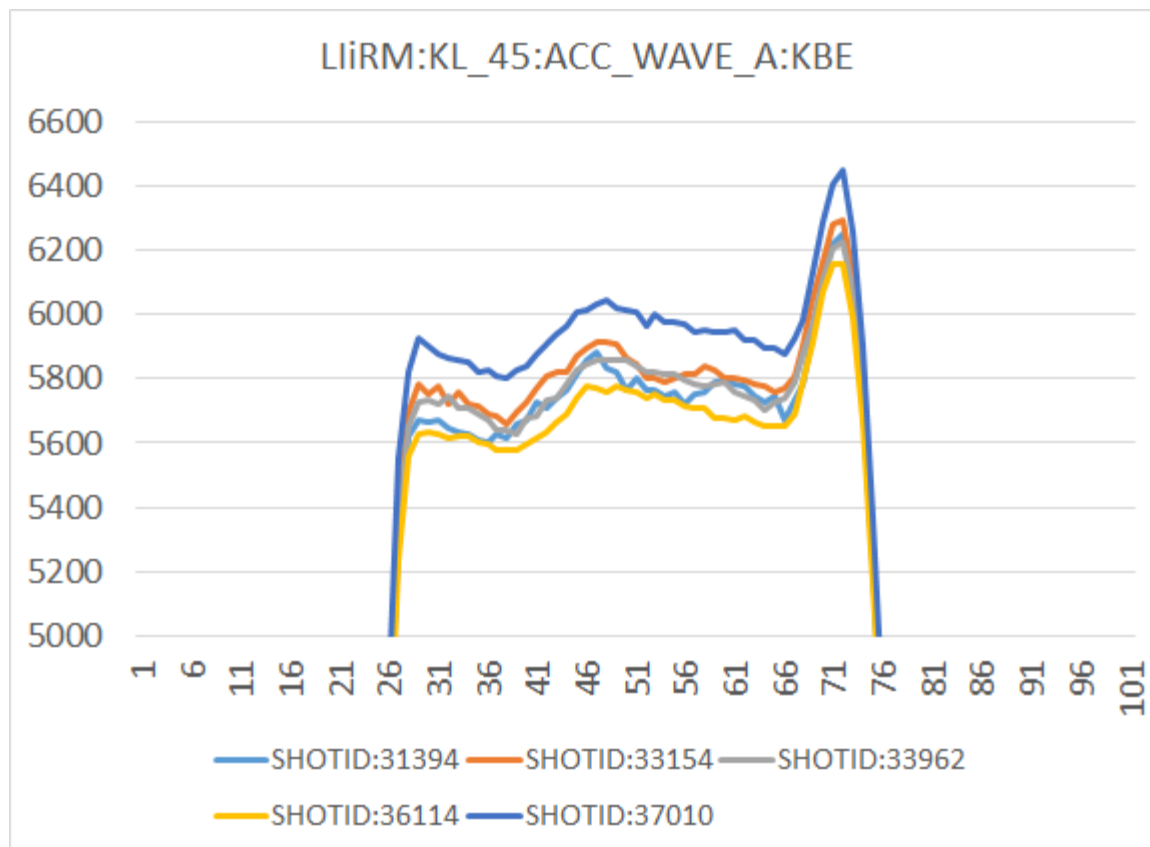


- ビームトリガと高圧トリガの時間差を検知し、減衰器のON/OFF制御

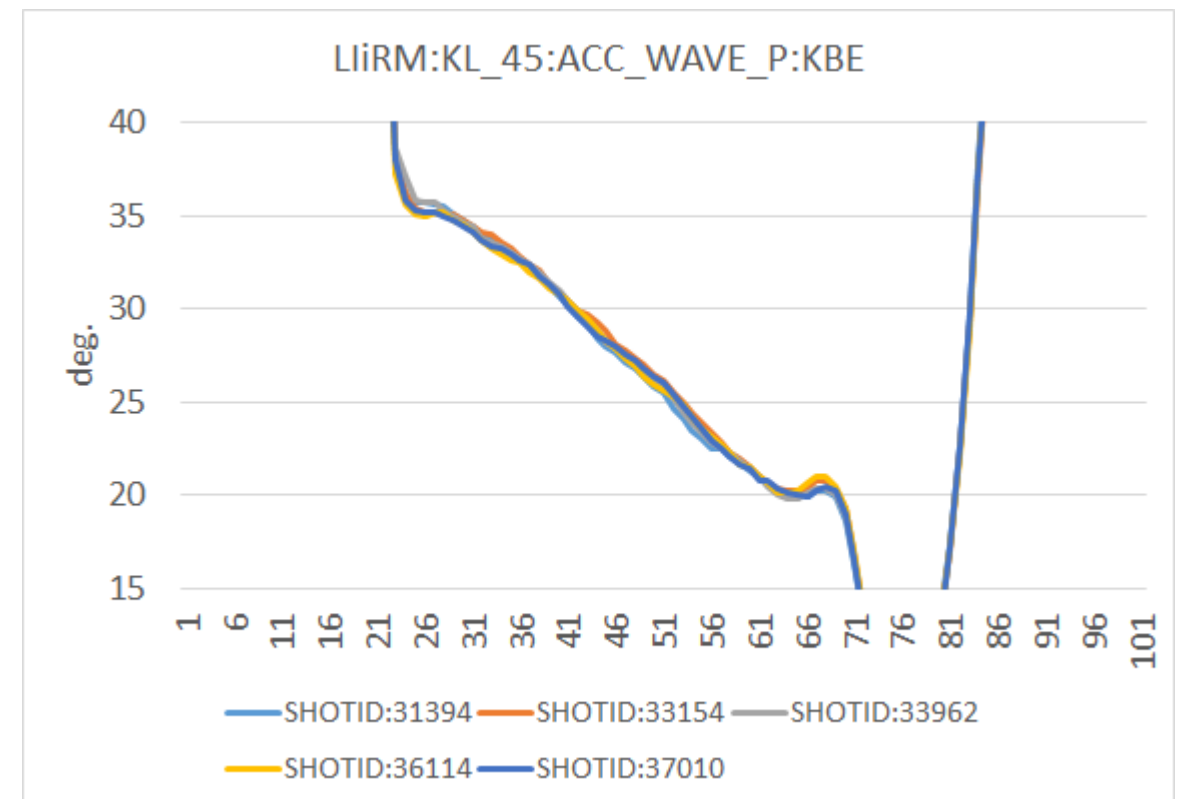


# 測定結果

- KL\_45ユニットで測定。減衰器46dB+アンプで、現状最も精度が良い構成
- 振幅波形を拡大すると、パルス毎の変動がみられる
- 位相は15度程度の傾きがある
  - 加速管冷却水の経路が一方向のため、上流から下流にかけての温度差による中心周波数からのズレが要因と推測される



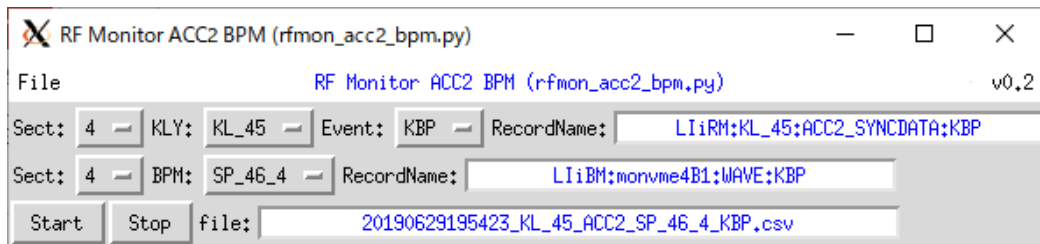
振幅波形



位相波形

# ビームポジションモニタとの協調

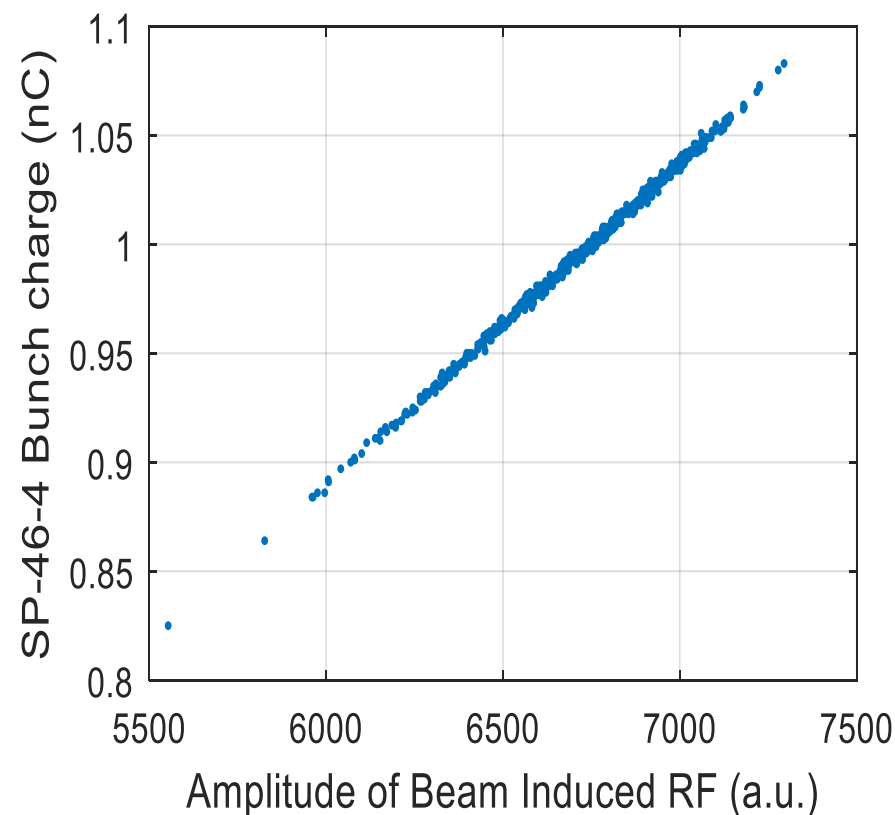
- イベントタイミングシステムから配信されるパルスカウント識別コード(ShotID)を参照し、BPMとデータの同期を取ることが可能
- KL\_45ユニットの誘起波と直近のBMP(SP-46-4)による電荷量換算値をプロット。SuperKEKB電子(KBE)及び陽電子(KBP)ともに比例関係が確認された



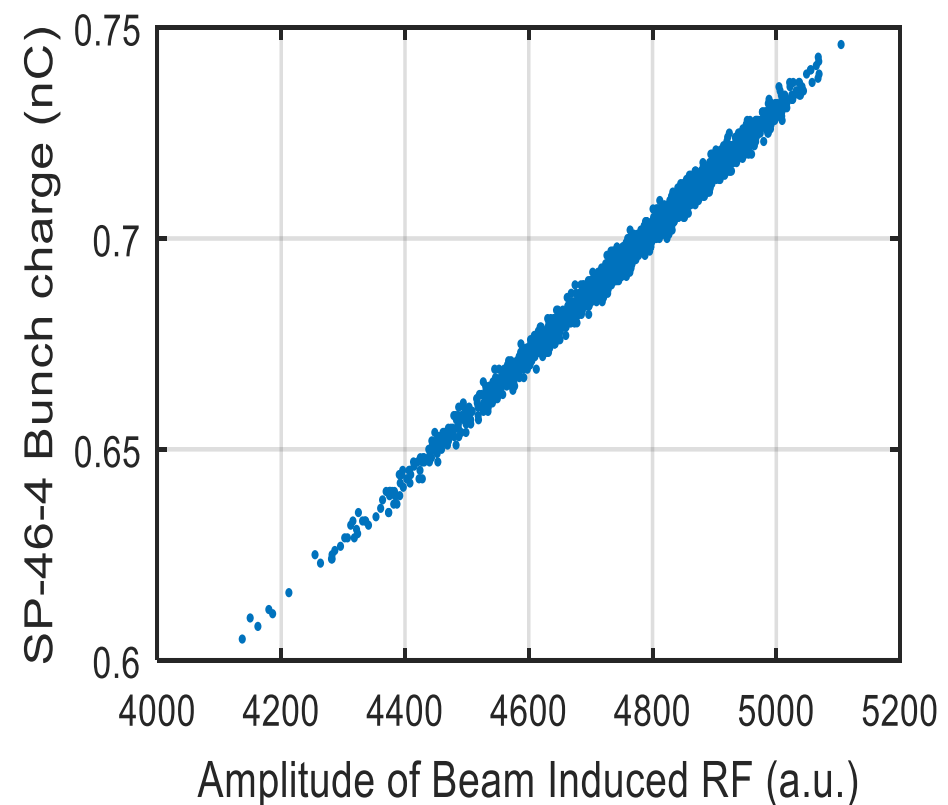
同期データ取得の操作画面

TIME	SHOTID	KL_45 ACC2 AMP	KL_45 ACC2 PHASE	SP_46_4 X(mm)	SP_46_4 Y(mm)	SP_46_4 I(nC)
2019/06/29 12:06:58	19860	6967.446777	26.84037	-0.121	-0.533	1.032
2019/06/29 12:06:58	19868	6956.300781	26.47143	-0.099	-0.516	1.031
2019/06/29 12:06:59	19876	6485.017578	26.718004	-0.002	-0.516	0.962
2019/06/29 12:06:59	19884	6714.224121	26.78989	0.009	-0.515	0.995
2019/06/29 12:06:59	19892	6692.557617	26.510437	-0.109	-0.5	0.992
2019/06/29 12:06:59	19900	6813.288574	26.667986	-0.065	-0.517	1.008
2019/06/29 12:06:59	19908	6266.181152	26.379122	0.009	-0.491	0.928
2019/06/29 12:06:59	19916	7066.933105	26.486324	-0.285	-0.523	1.048
2019/06/29 12:07:00	19924	6337.054688	26.888493	0.069	-0.494	0.939

取得された同期データの例



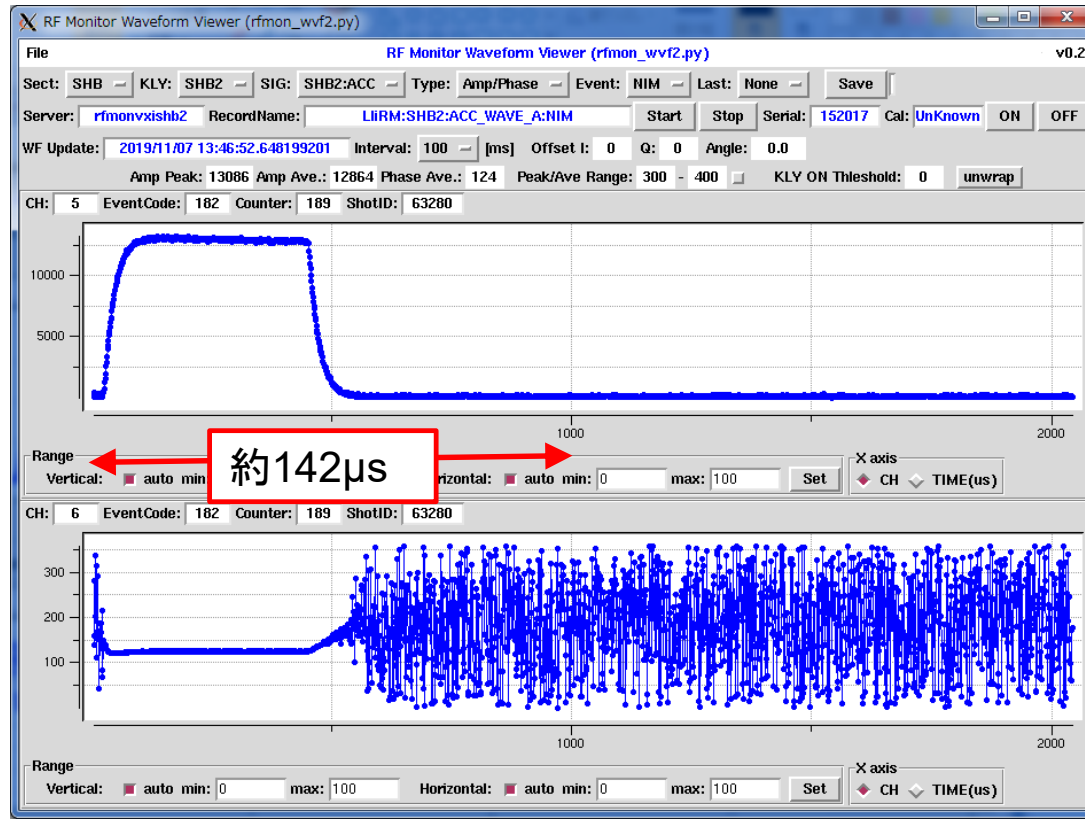
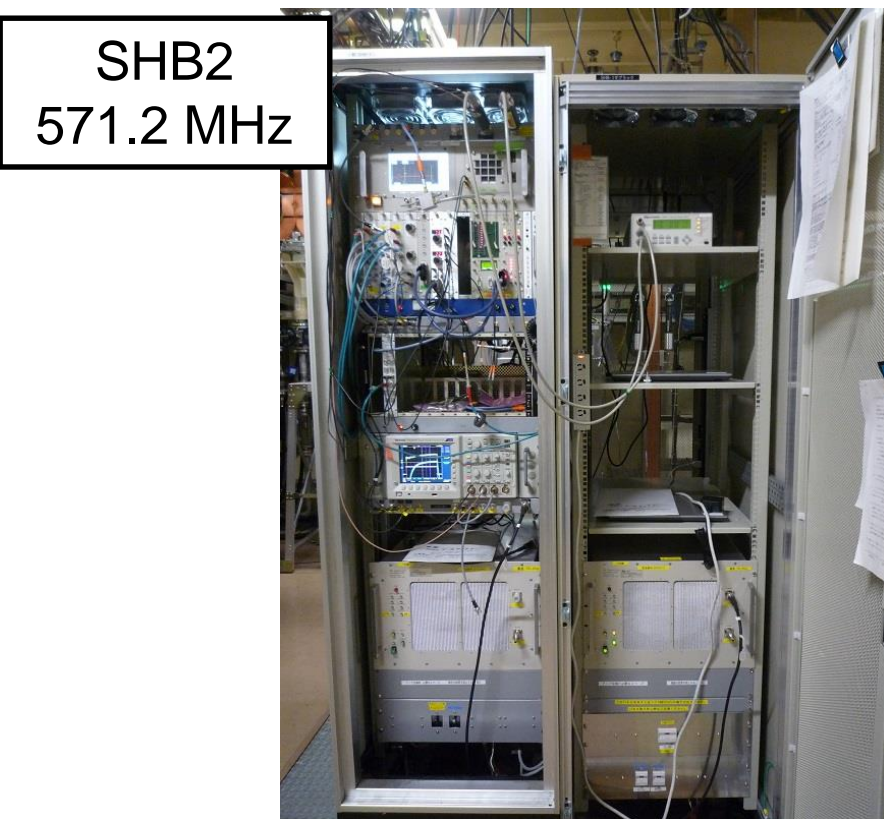
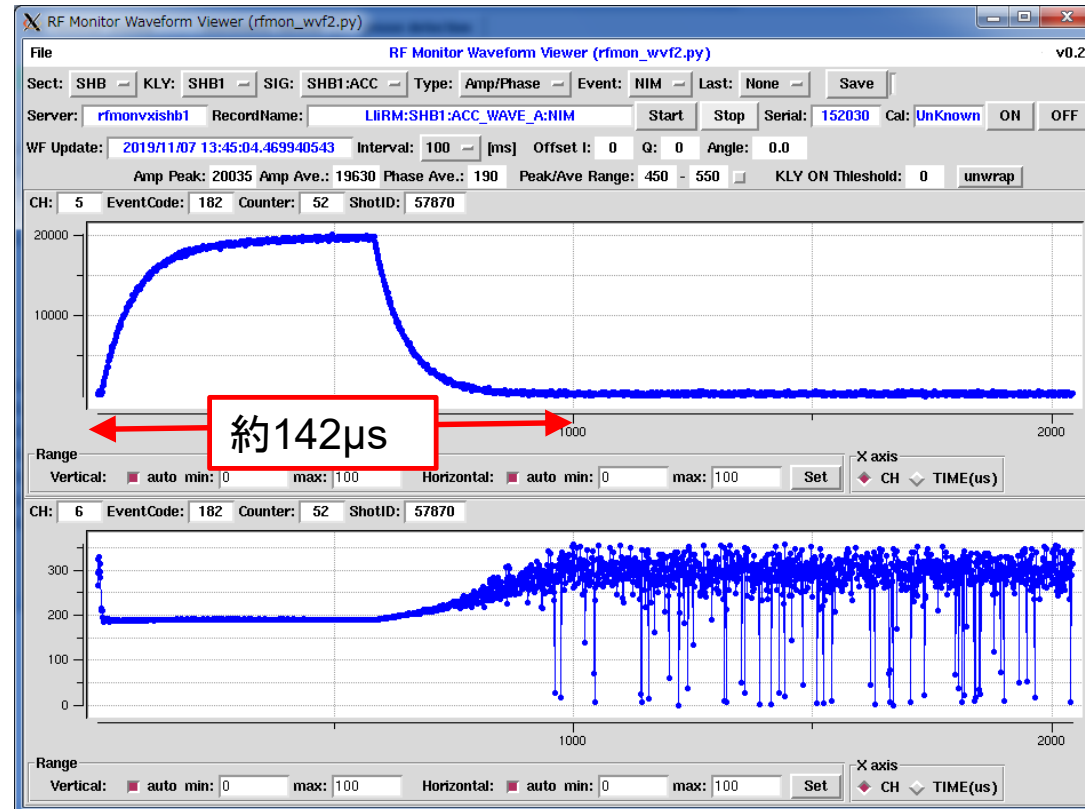
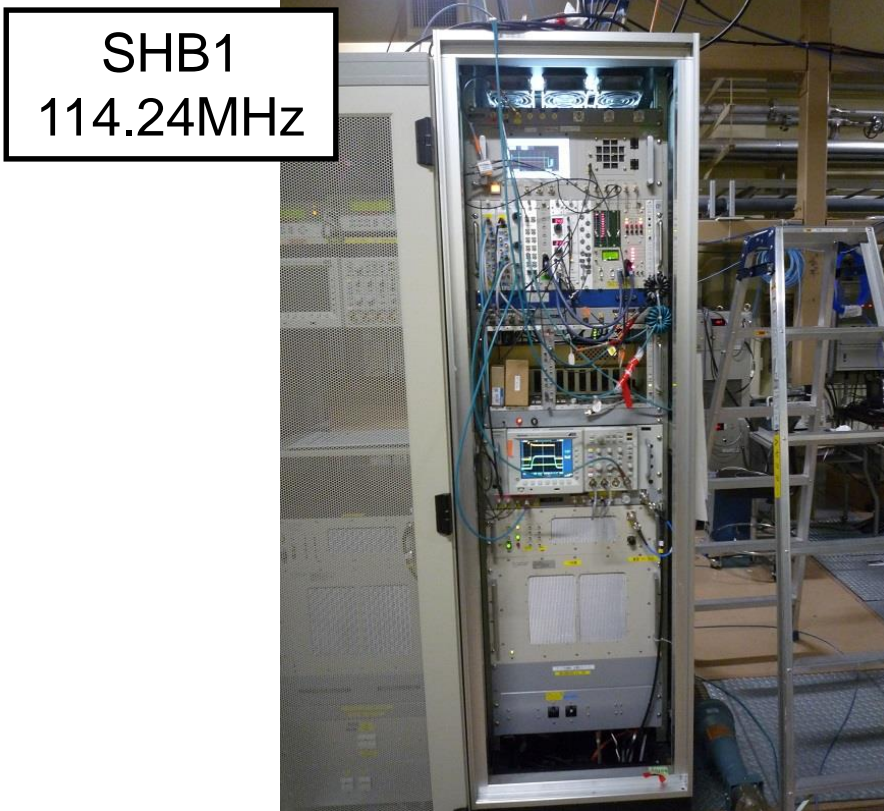
KL\_45誘起波振幅とSP-46-4電荷量(KBE)



KL\_45誘起波振幅とSP-46-4電荷量(KBP)

# SHB用RFモニタユニットの導入

- SHB(サブハーモニックバンチャー)用に114.24MHz、571.2MHzに対応したモニタユニットを導入

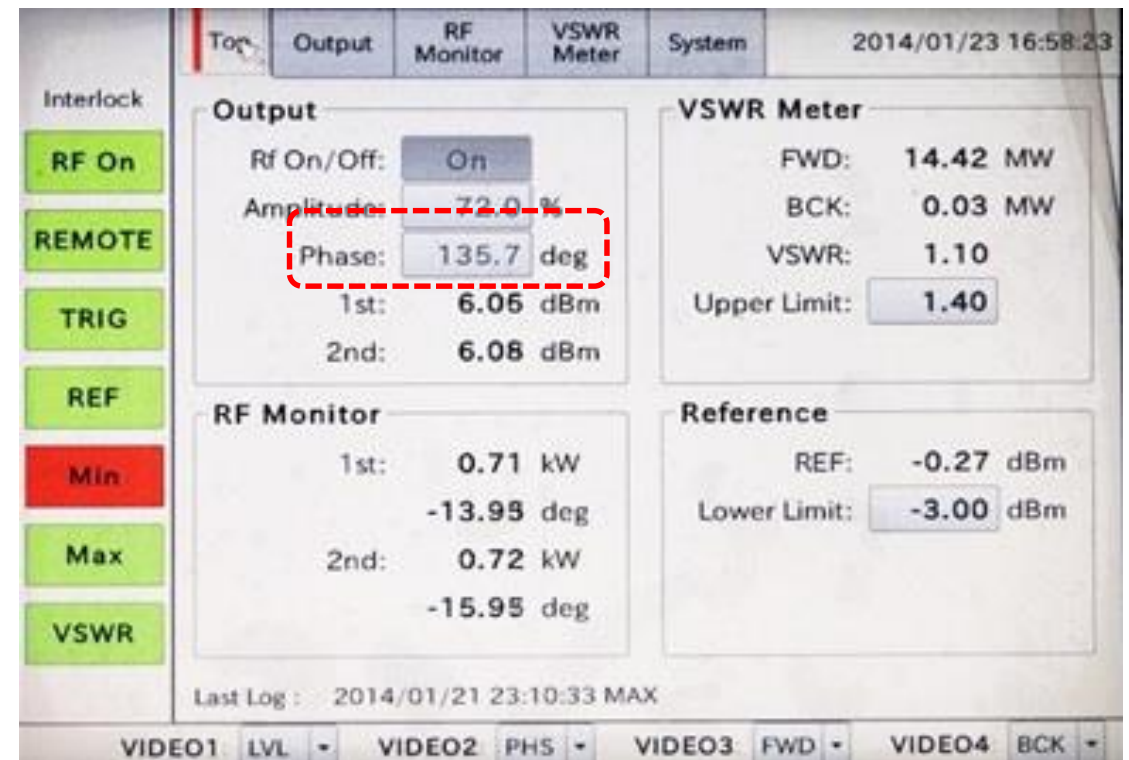


# RFドライバユニットの位相デジタル制御

- RFドライバユニットにもFPGA組み込みイベントレシーバを導入
- イベントシステムから位相設定値をデジタルで設定



RFドライバユニット前面



RF操作パネル

今後の展望として...

RFドライバ、モニタ、インターロック機能の統合を検討  
速いフィードバック制御への対応ほか

# ■ 加速管テストスタンドへの導入

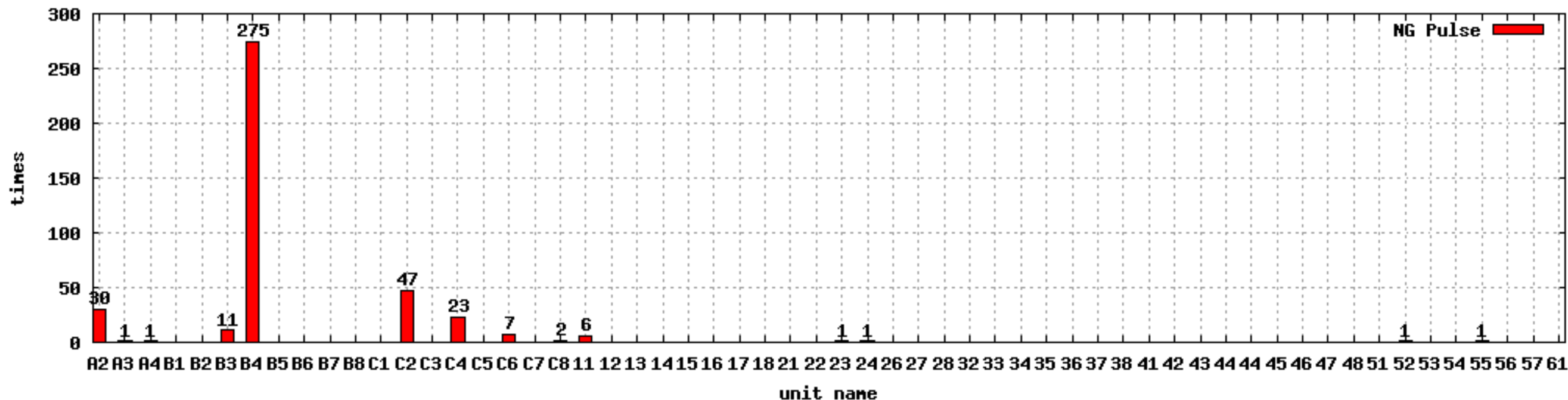


- 加速管の試験・開発のためのデータテータキングに使用

# パルス欠け検出

## ■ 全ユニットの統計

KLY NG Pulse (2019/11/03)



KLY NG Pulse (2019/11/04)

