

突発ビームロス事象解明のための 新型バンチ振動レコーダーの開発

東大理^A, 高工研^B, SLAC^C

能丸理玖^A, 三塚岳^B, Larry Ruckman^C

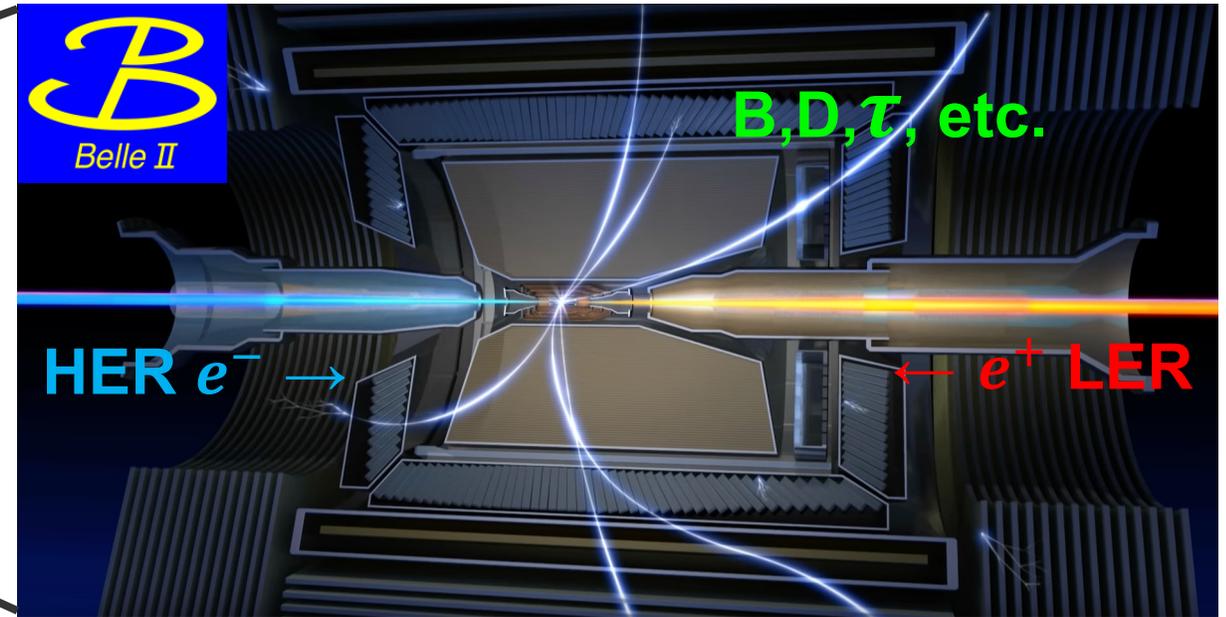
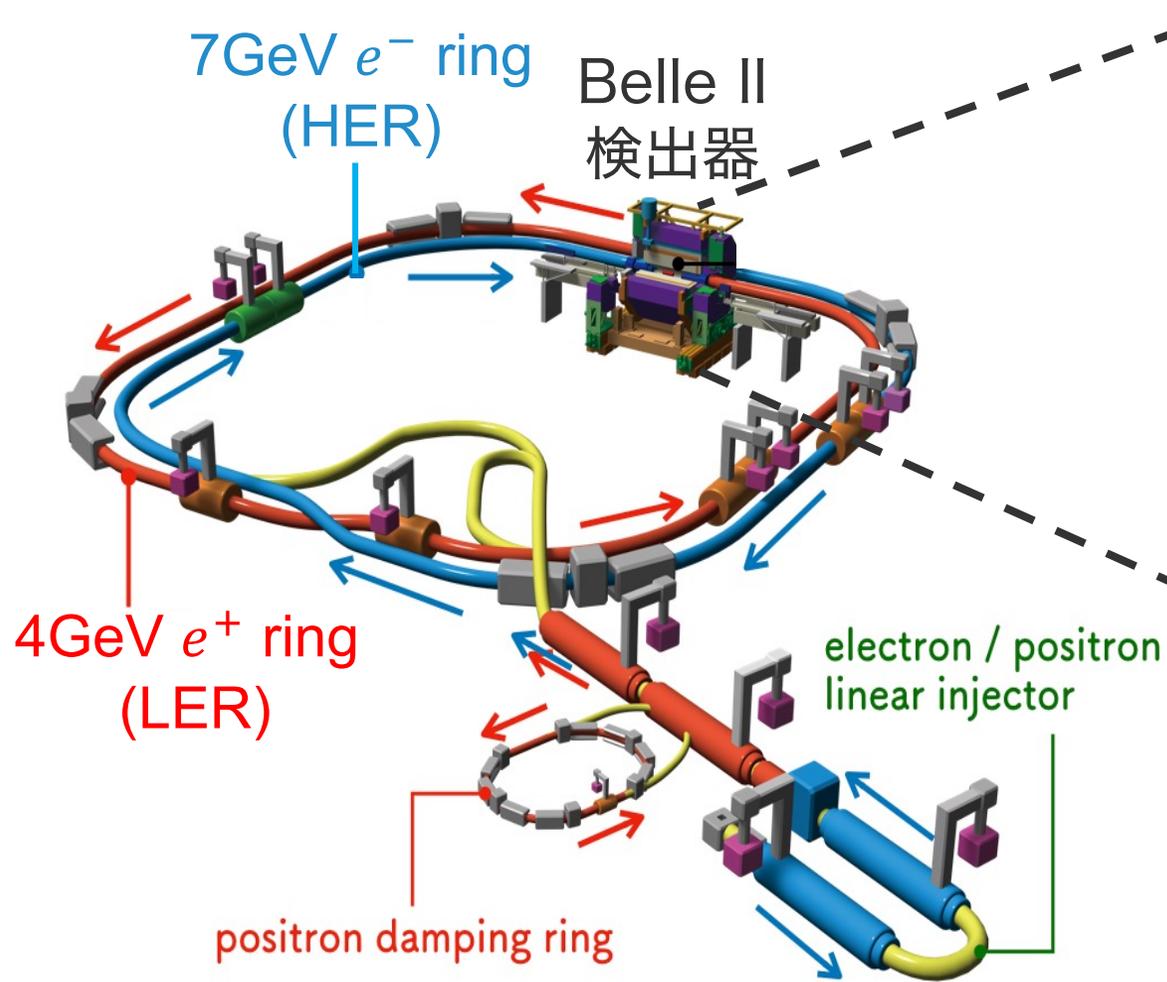


KEK

SLAC

NATIONAL
ACCELERATOR
LABORATORY

SuperKEKB/Belle II 実験



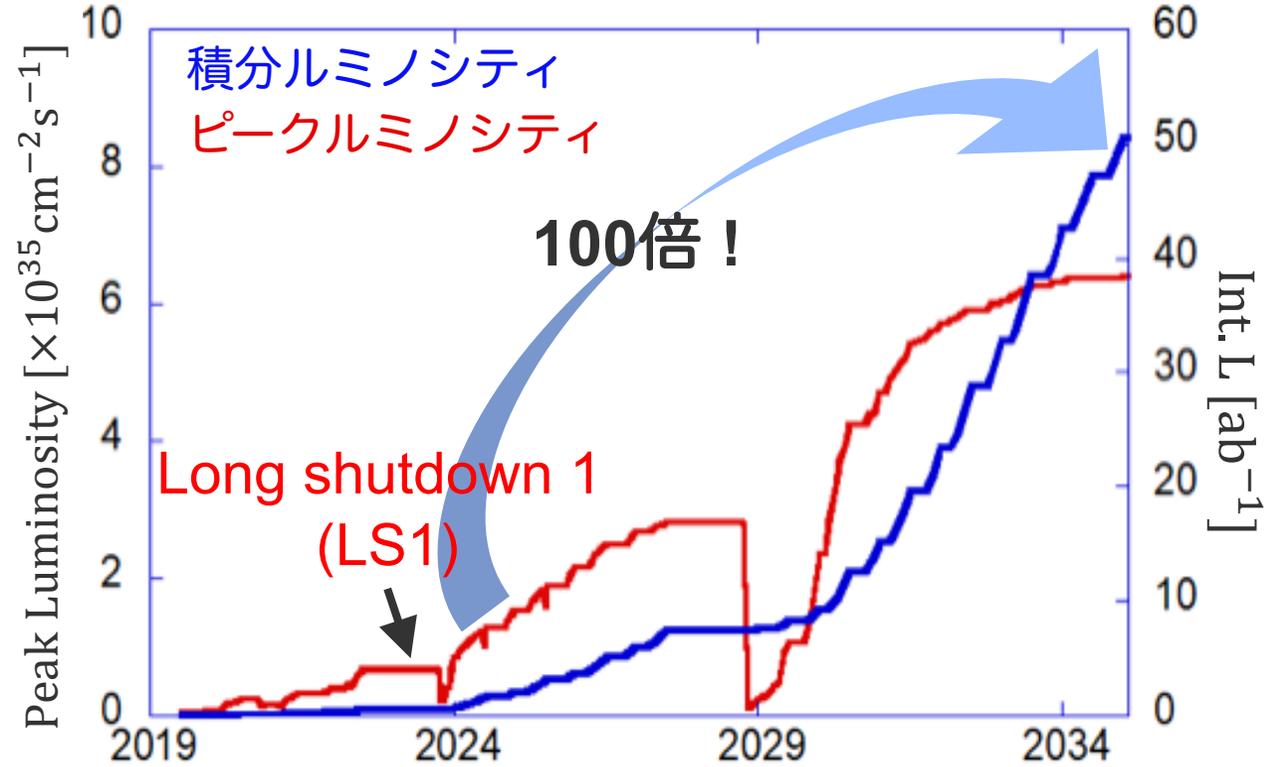
Belle II実験では、大量の素粒子反応を正確に測定し、新物理探索を行っている。

ルミノシティの向上

物理事象数

$$N = \sigma[\text{cm}^2] \int \underbrace{L[\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}]}_{\text{ルミノシティ}} dt[\text{s}]$$

新物理探索の精度を上げるためには
SuperKEKB加速器のルミノシティ
向上は必須である。



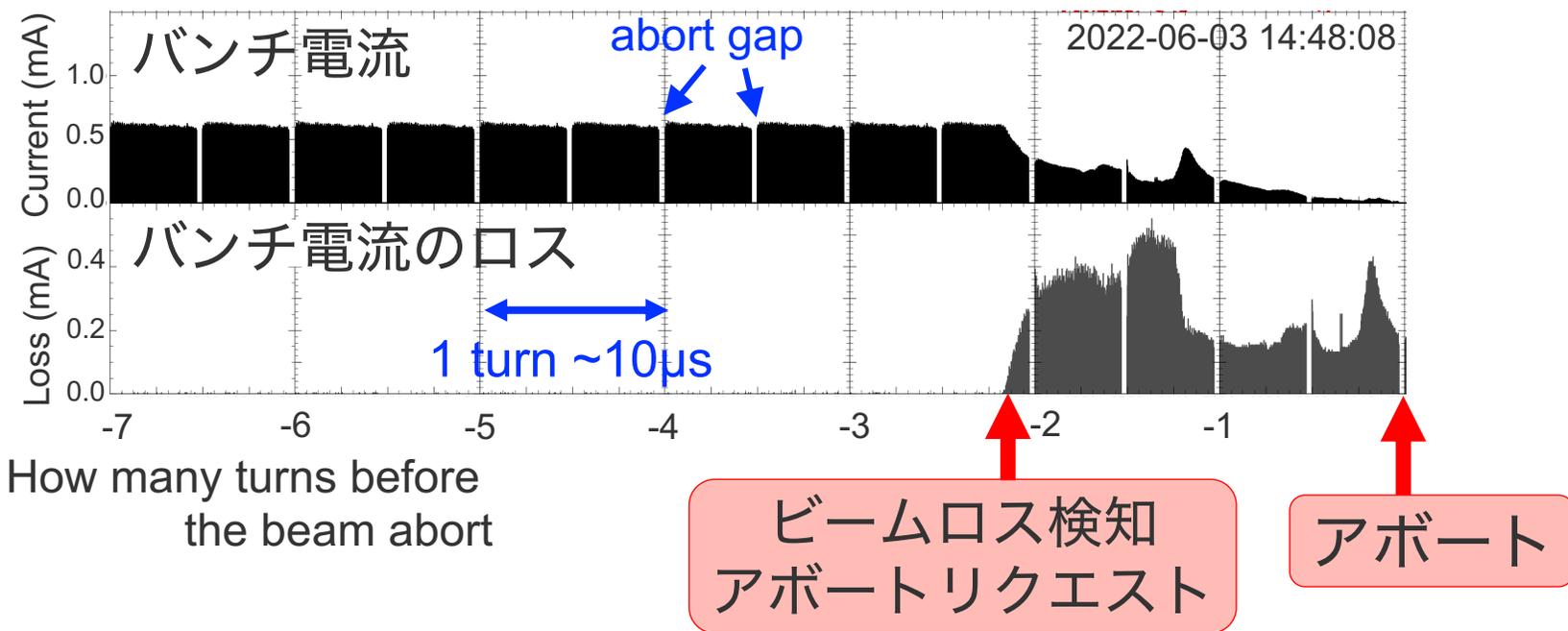
LS1 (2022/6~2024/2)が終わり、さらに
高いルミノシティを目指して運転中

しかし、突発ビームロス事象がルミノシティ向上を阻害している。
以下、簡単のためにSudden Beam Lossと呼ぶ

Sudden Beam Loss (SBL)

- アンペア級のビームが数ターン(数十マイクロ秒)で突然ロスしてアボートされる現象
- 発生原因と発生箇所は未解明である。

LERのある一点で観測したバンチ電流とそのロス



ビームロスがBelle II検出器
や加速器コンポーネント
にダメージをもたらす



垂直コリメーターヘッドが
削られた様子(LER)

SBLの懸念によりビーム電流が上げられず、瞬間ルミノシティ向上を阻害している

SBLの原因究明と解決はSuperKEKBにとって急務である

Long Shutdown 1 (~2022年)前のSBL観測

■ Bunch Oscillation Recorder (BOR)

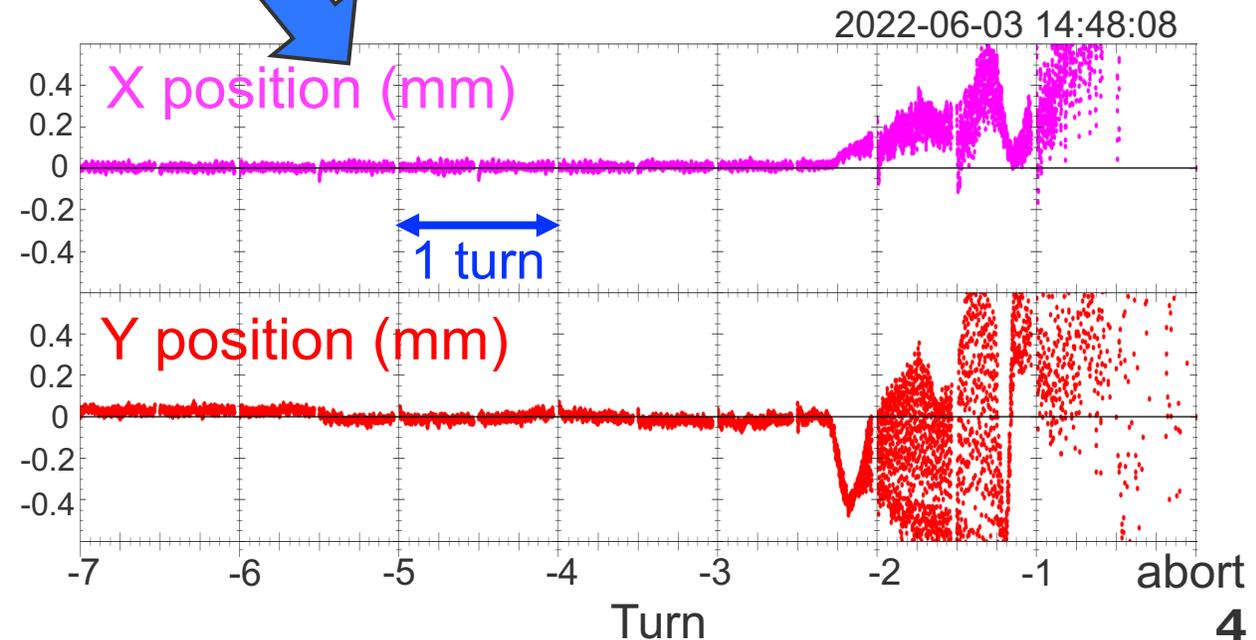
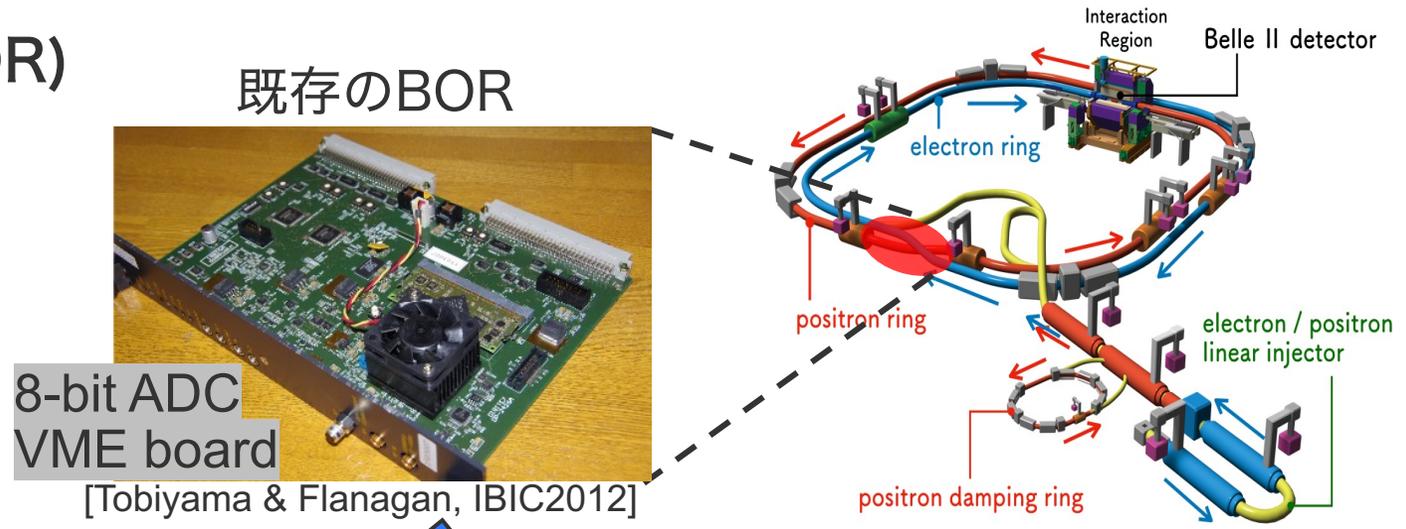
アボート前の何周分かのビーム位置をバンチバイバンチで記録し、ロスする時のバンチの挙動を観測する

■ 複数のBORが必要

- 様々なベータatron位相をカバーして不感領域を減らしたい
- 発生地点を突き止めたい

新しいBORを製作することにした

- ・ ADCビット数の向上
 - ・ LSIが終わるまでに素早く作る
 - ・ 開発コストを減らす
- 将来のバンチバイバンチシステムのベンチマークとしてRFSocを使用



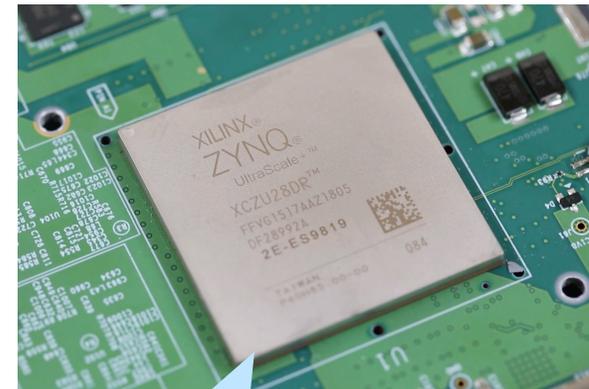
RF System on Chip (RFSoc)

by AMD/Xilinx

■ RFSocとは

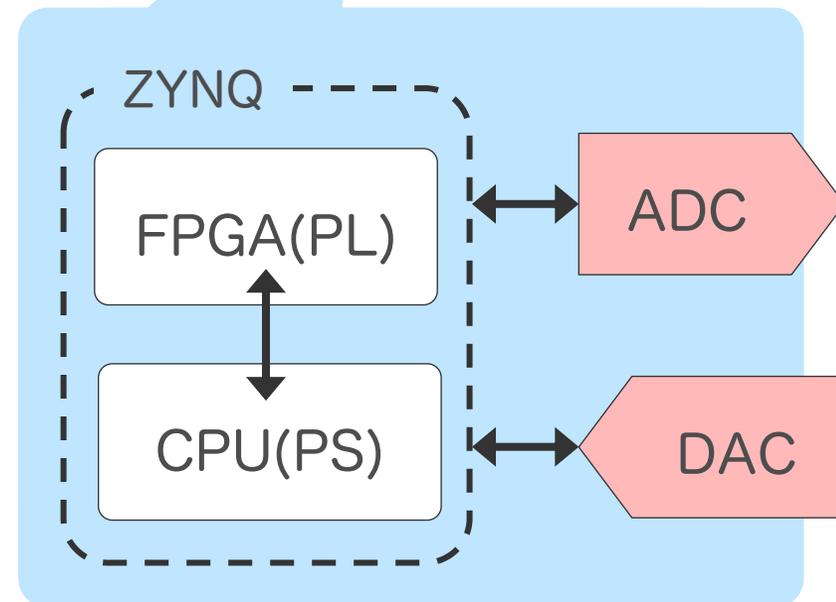
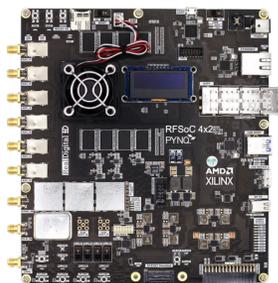
FPGA・CPU・ADC・DACが1つにまとまったチップ

- ・ データコンバーターとの通信を設計する必要がなく簡単
- ・ サンプルング最大5GSPS・14ビットのADCが最大16ch (Gen3)
- ・ 同期した多チャンネル高速サンプルングが簡単に行える
- ・ 様々な評価ボードがあり開発はすぐ始められる



■ RFSocをBORに使うメリット

- ・ ADCビット数の向上
- ・ ボードを簡単に移動できる
→発生地点の候補を狭めていける



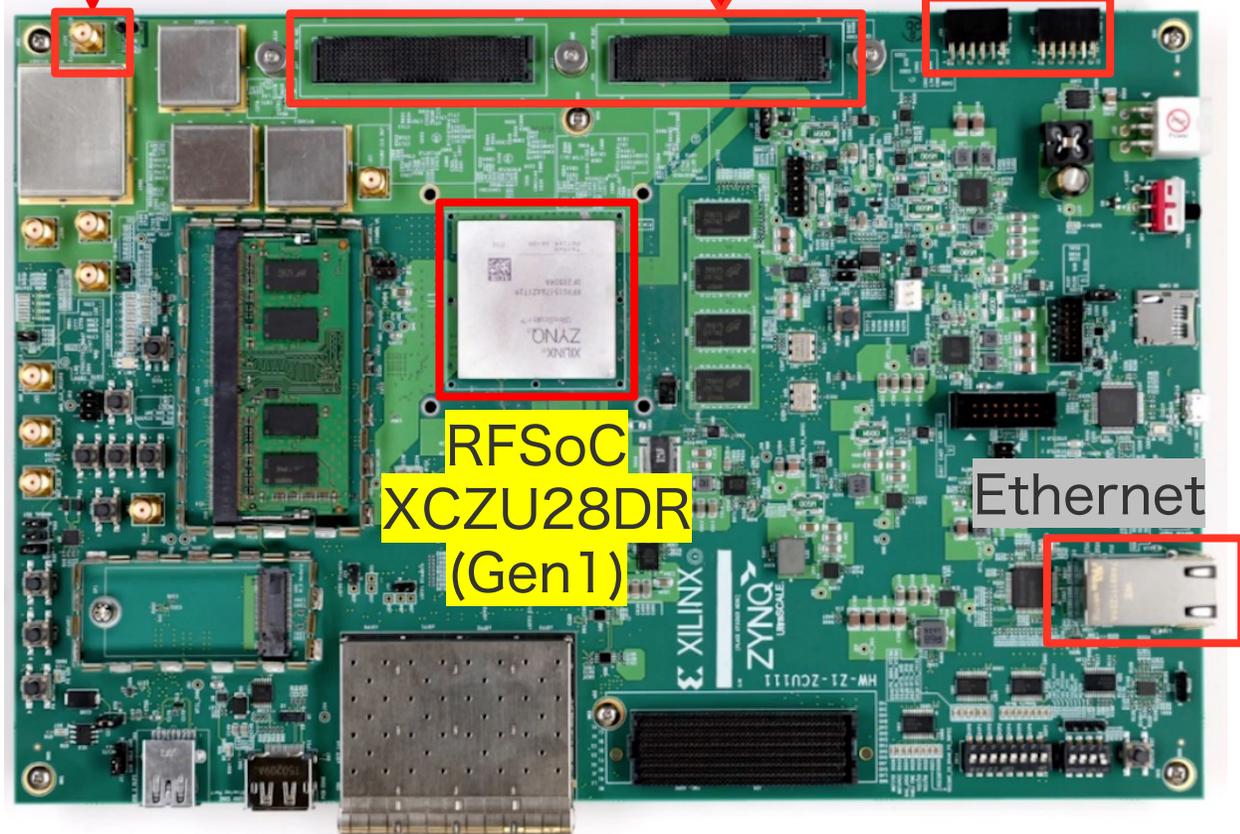
ZCU111 評価ボード

■ 最大4096MSPSの12ビットADCを8ch持つ

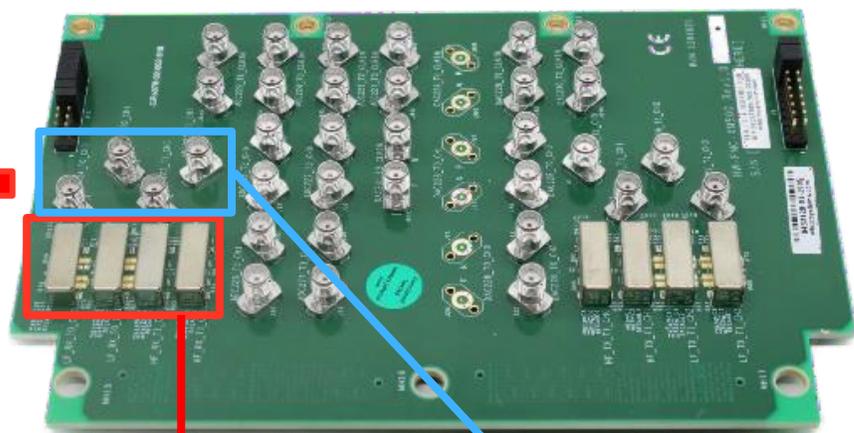
外部クロック入力

daughter board
コネクター

PMOD
GPIO



daughter board XM500



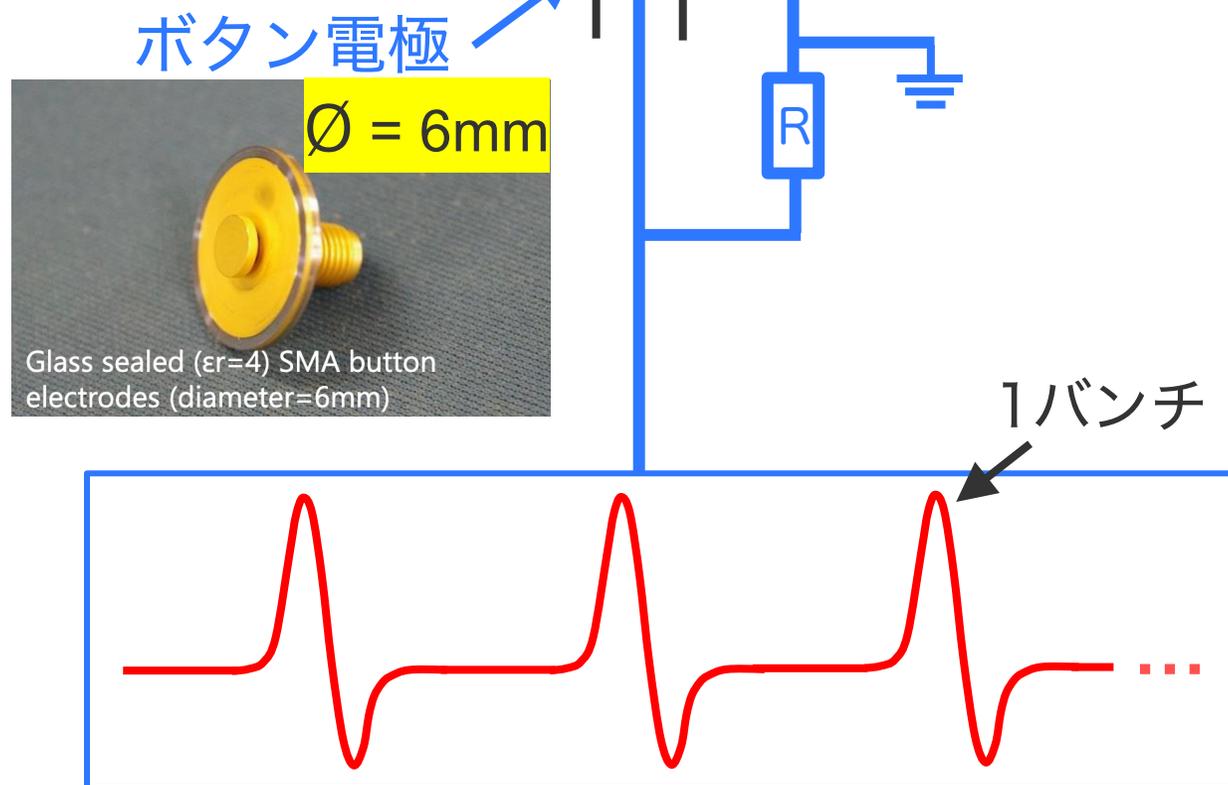
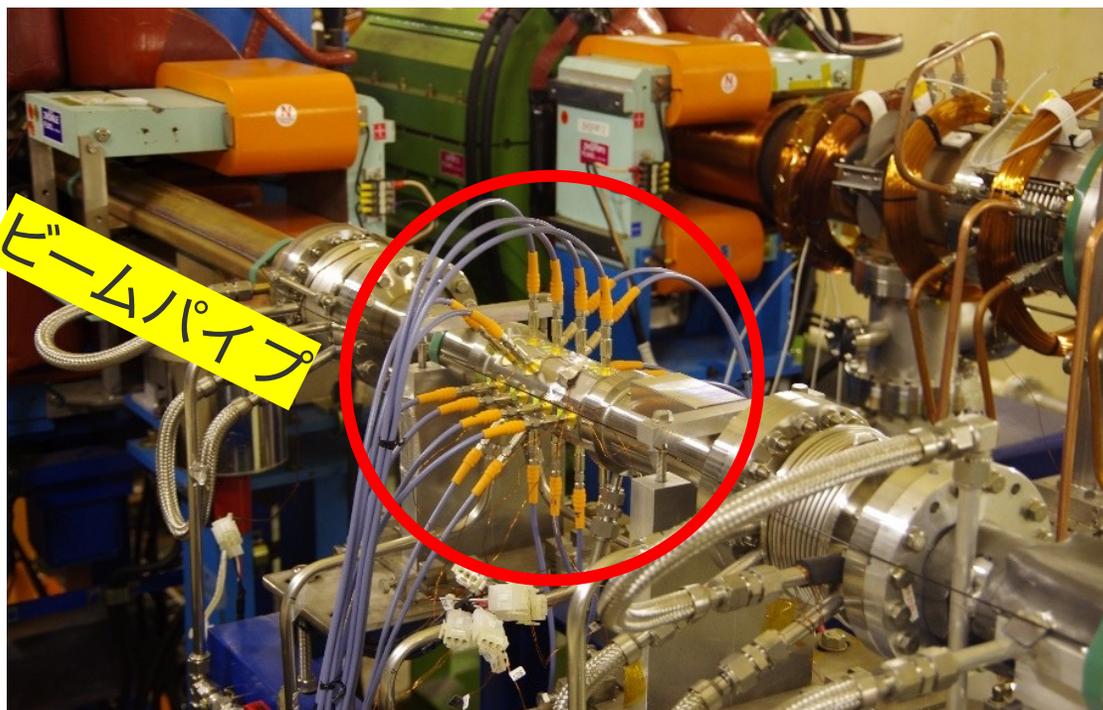
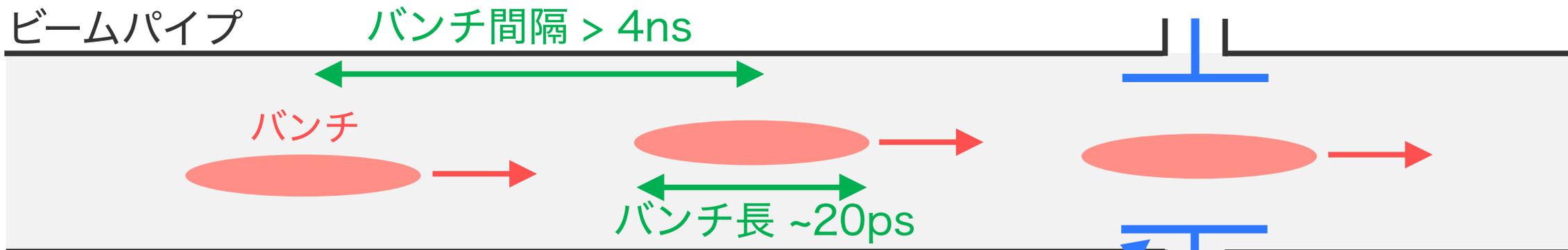
シングルエンド信号用
SMAのADC入力 × 4ch

RFバラン(シングルエンド信号を
差動信号に変換する素子)

0~1GHz用 × 2ch
1~4GHz用 × 2ch

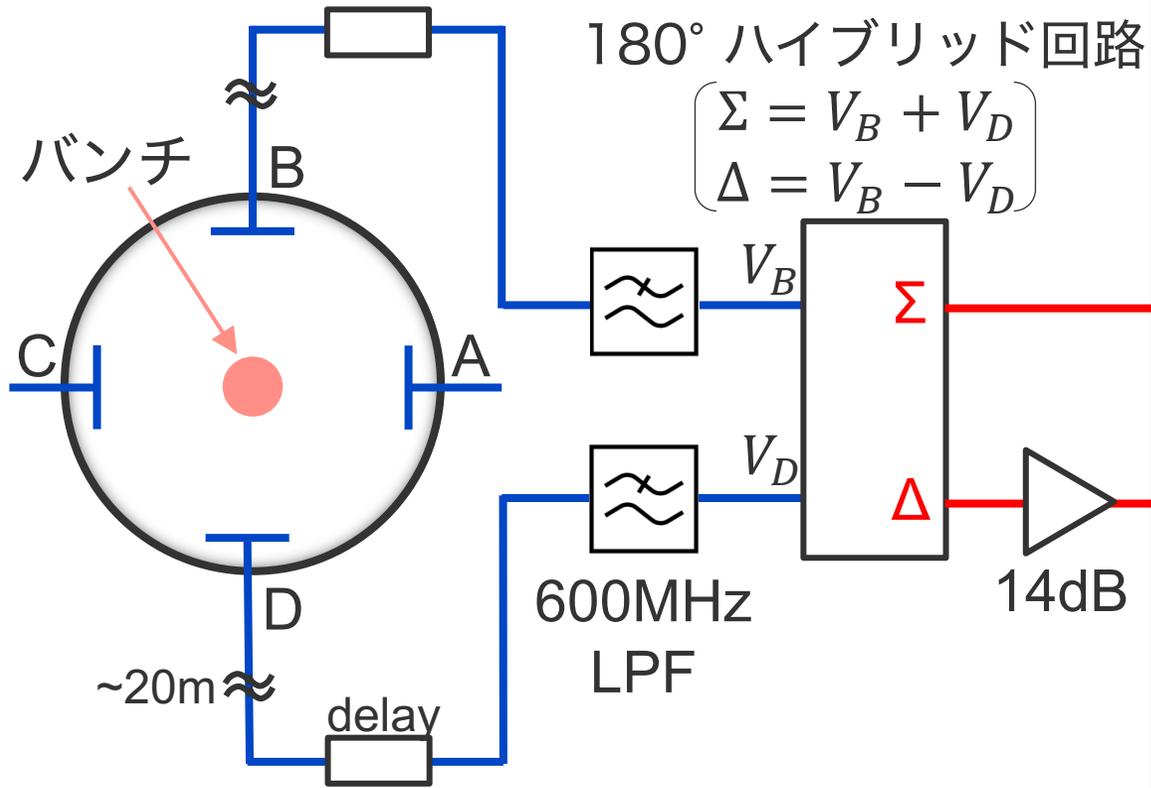
※全てのチャンネルに対して特性
が同じようなカスタムボードを
新規開発中

バンチ位置の測定

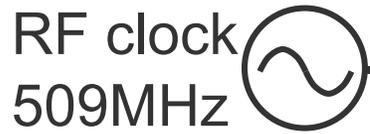


RFSocを用いたBOR

アナログ回路

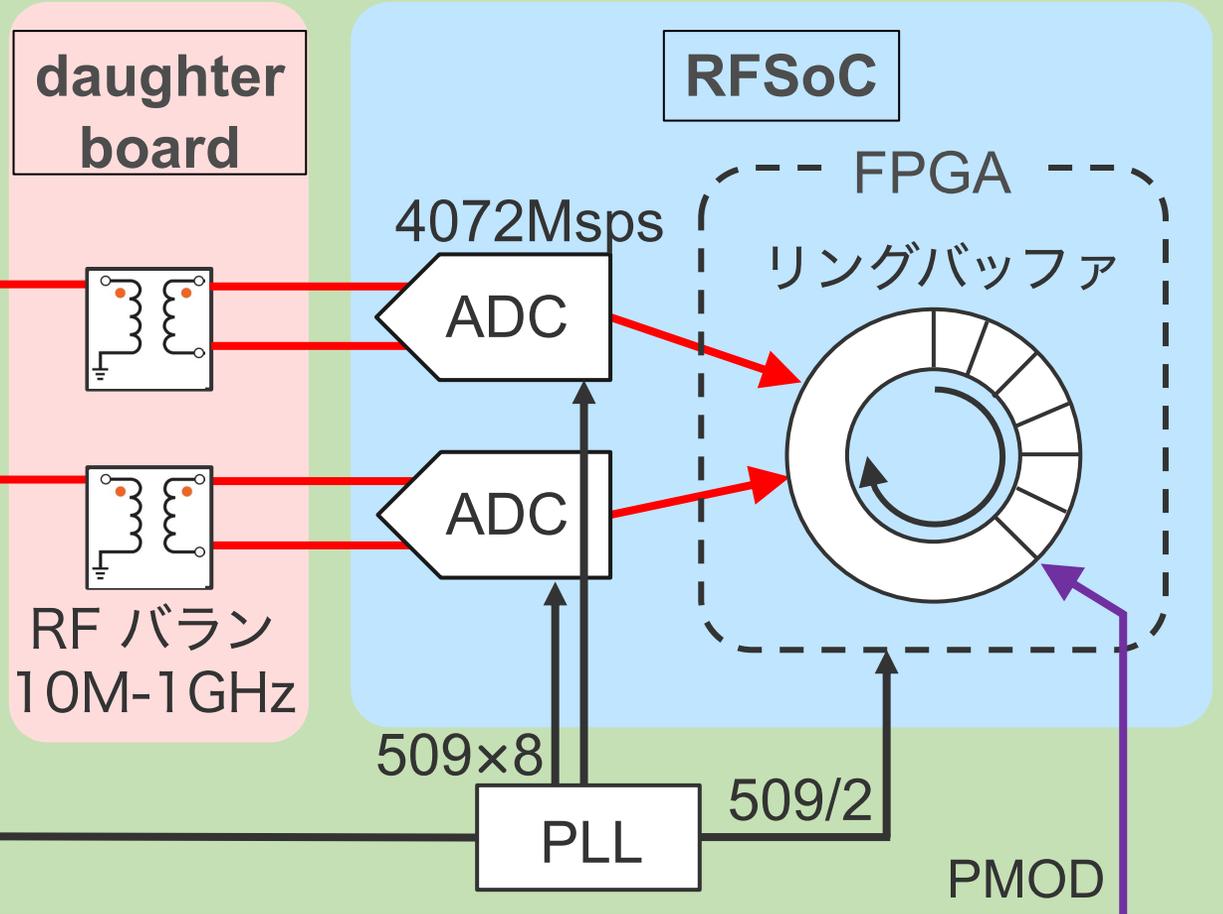


$$y = k_y \frac{V_B - V_D}{V_B + V_D}$$

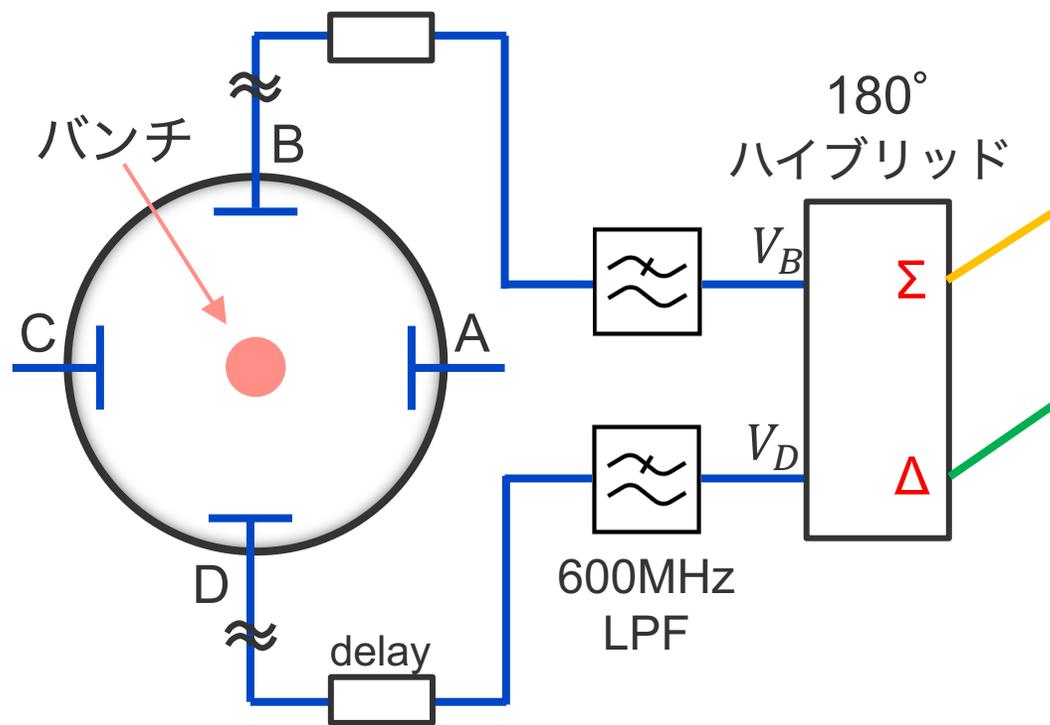


アボートトリガー

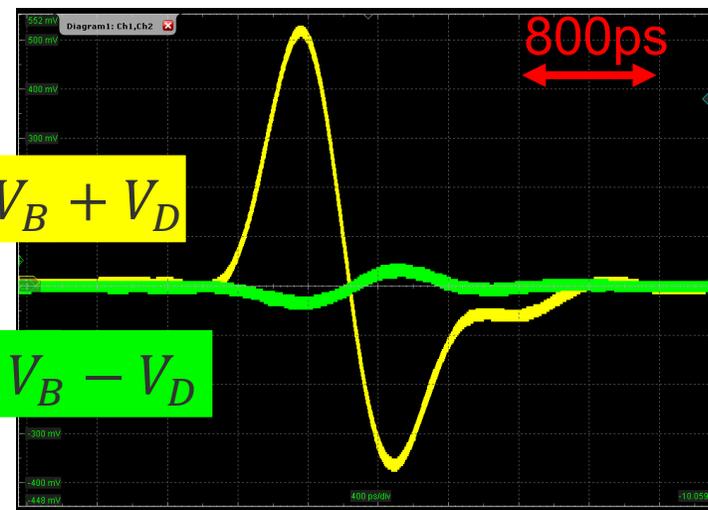
ZCU111 評価ボード



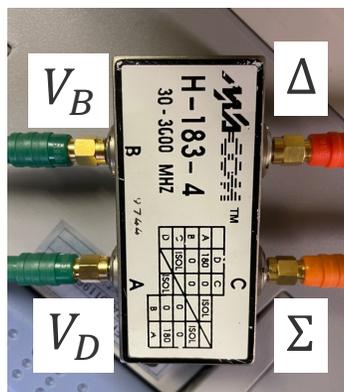
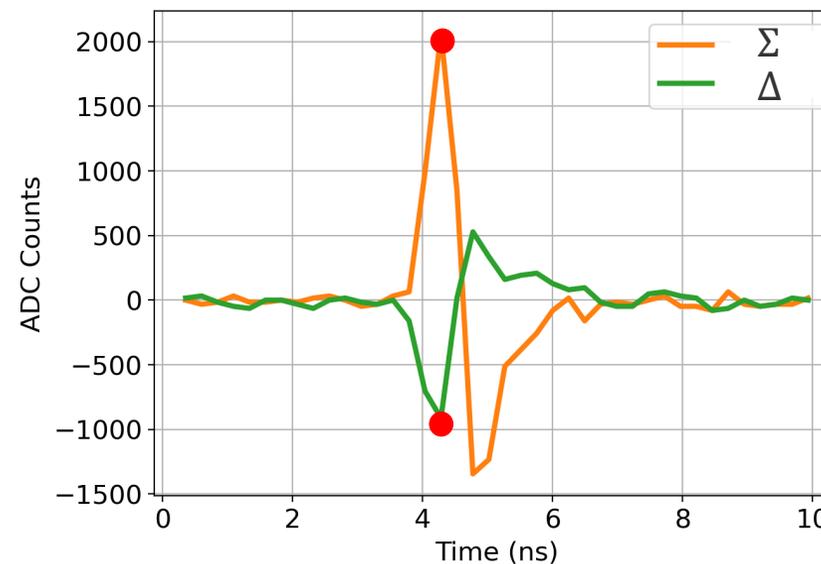
アナログ回路部分



1バッチの信号(オシロスコープ)

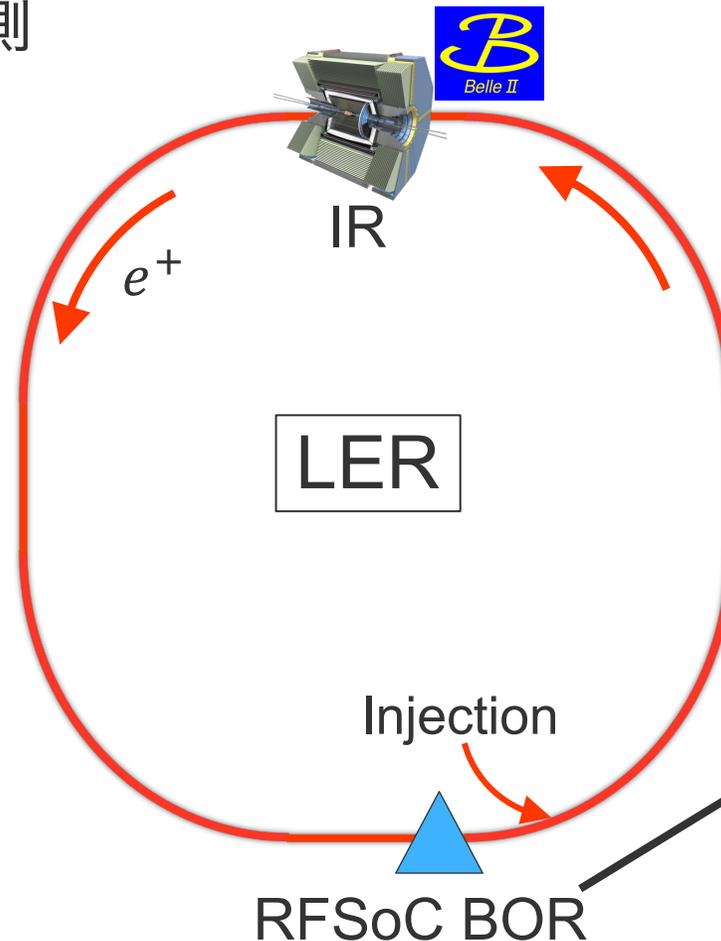
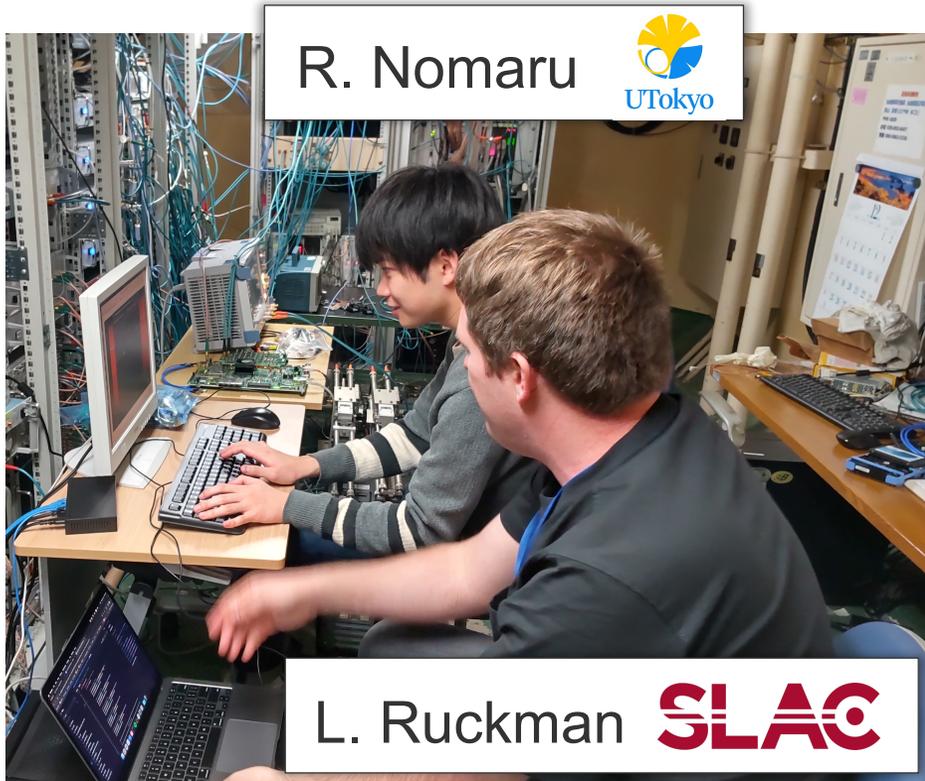


RFSocで測定 (4072Mps)

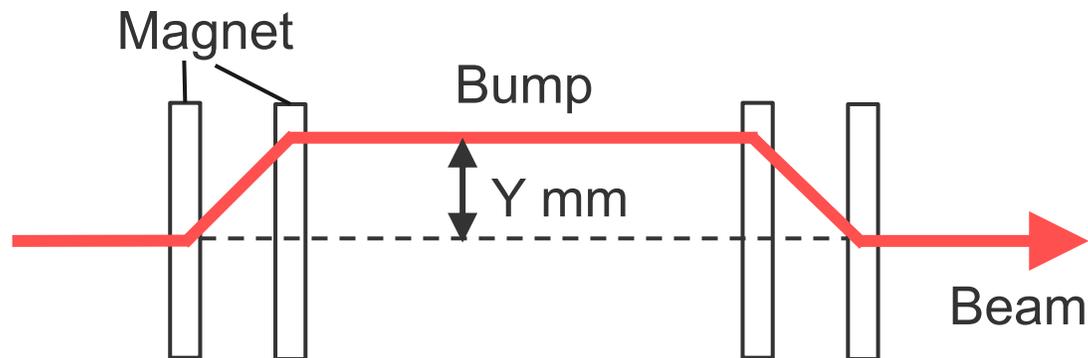


RFSocを用いてビーム測定開始

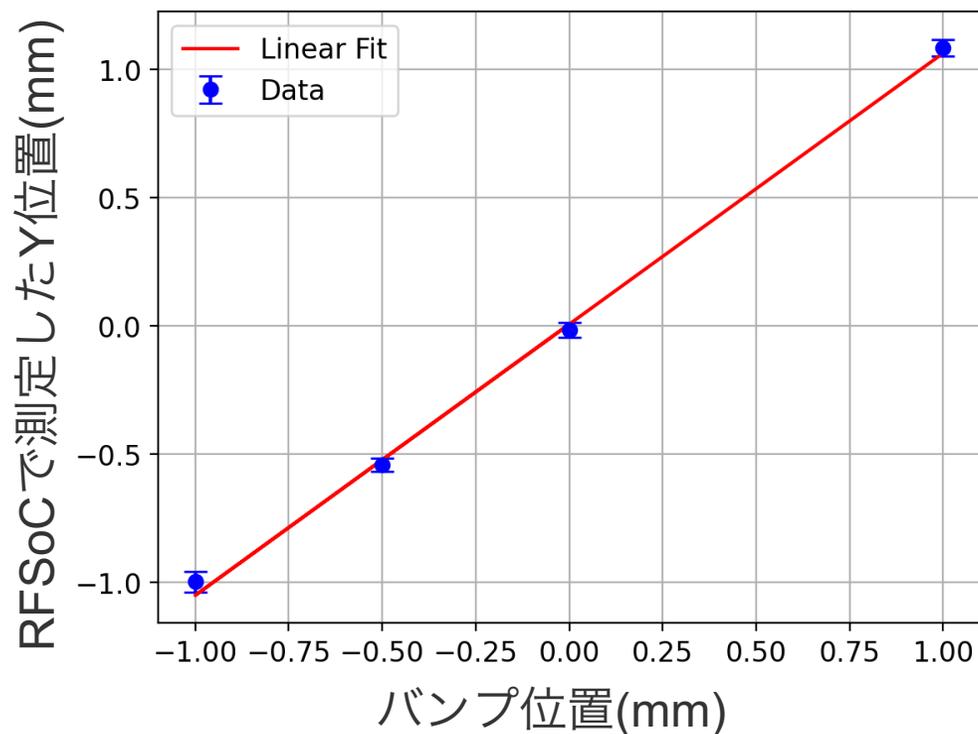
- ▲ RFSocで作った新しいBORはまず富士直線部に設置
SuperKEKB運転再開後、テスト・測定を開始
今のところはバンチのY位置だけ観測



ビームバンプを用いた回路試験



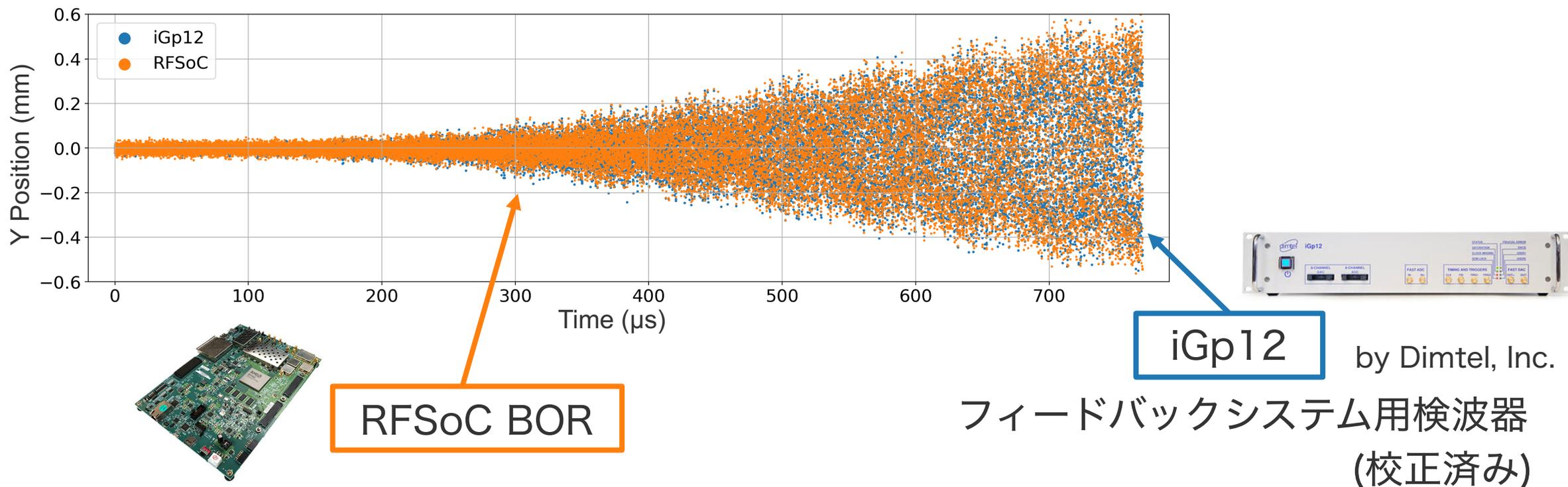
- ・ バンプの位置を変えながらRFSocで測定
 $y = k_y \frac{\Delta}{\Sigma}$ (k_y は事前に数値計算しておく)



- ・ 測定結果はバンプ位置とよく合っていた
綺麗な線形性もあった
- ・ 各測定点の標準偏差は約0.03mmほど
→既存のターンバイターンBPMと同程度の
精度

フィードバックシステムを用いた回路試験

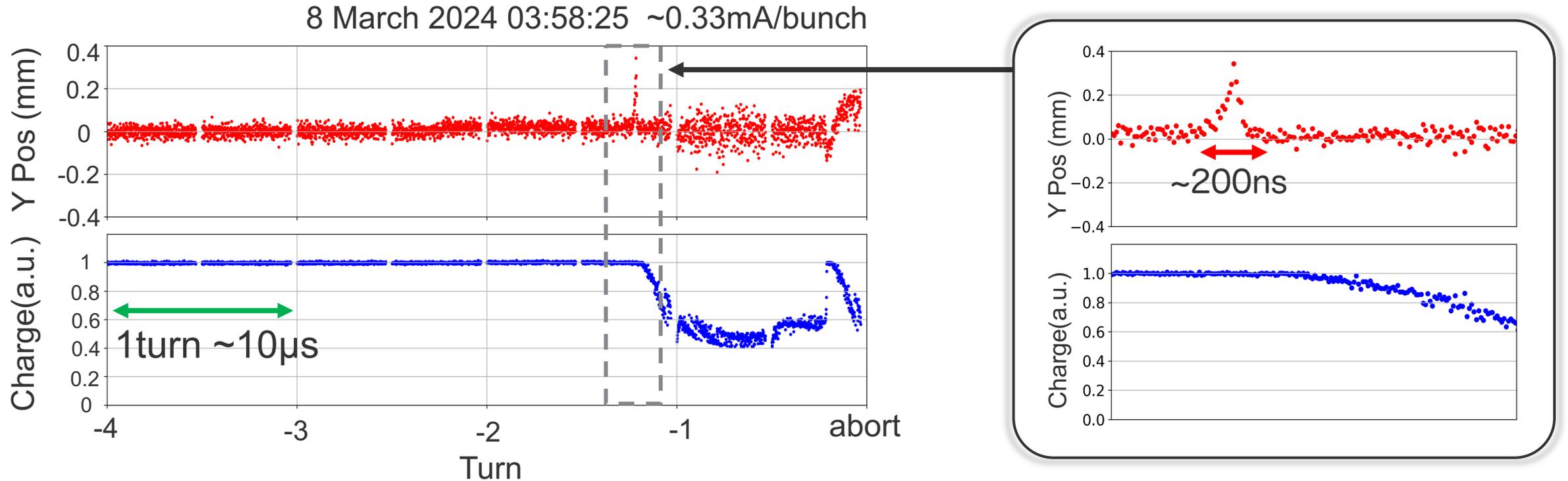
- フィードバックキッカーの位相を 180° 反転させることで、わざとビーム不安定性を起こす。既存のバンチバイバンチBPM(iGp12)と測定位置を比較し、RFSoc BORの性能を確認



振動の大きさ、不安定性の成長時間などがほぼ同一であったことから、RFSocがBORとして問題なく機能していると考えている。

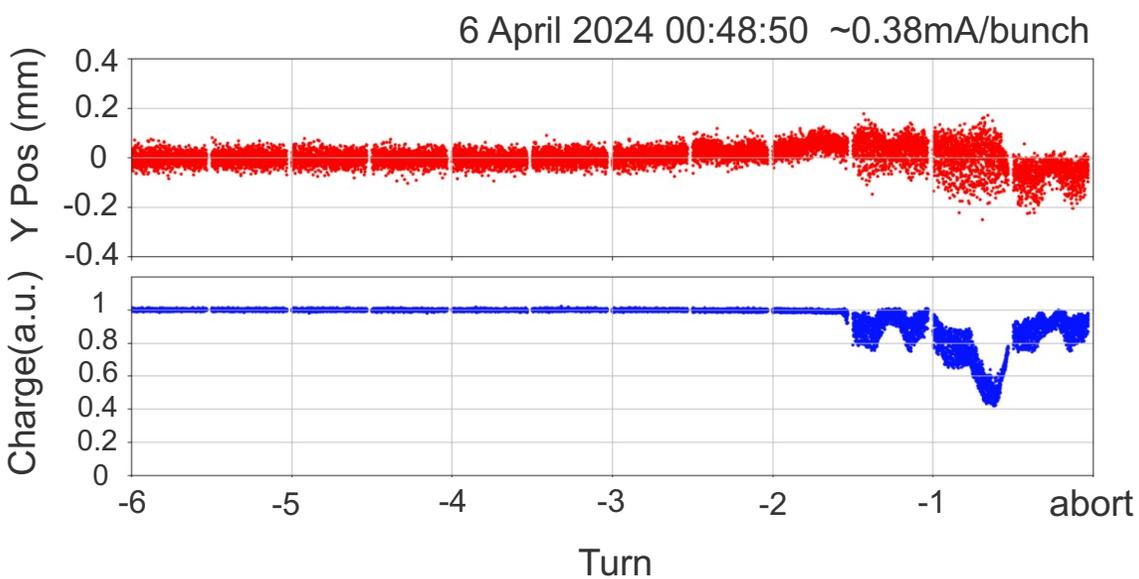
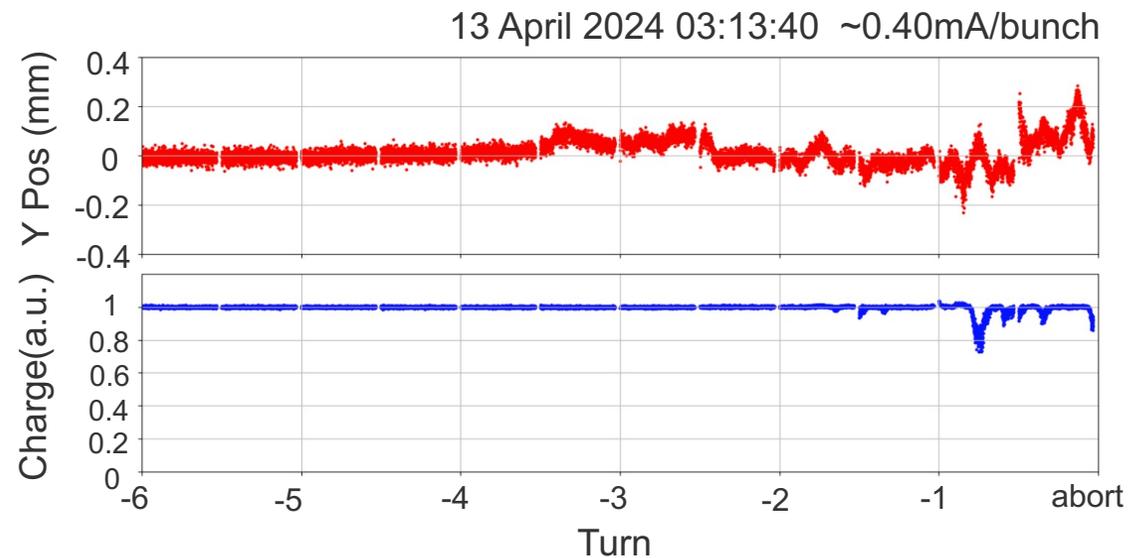
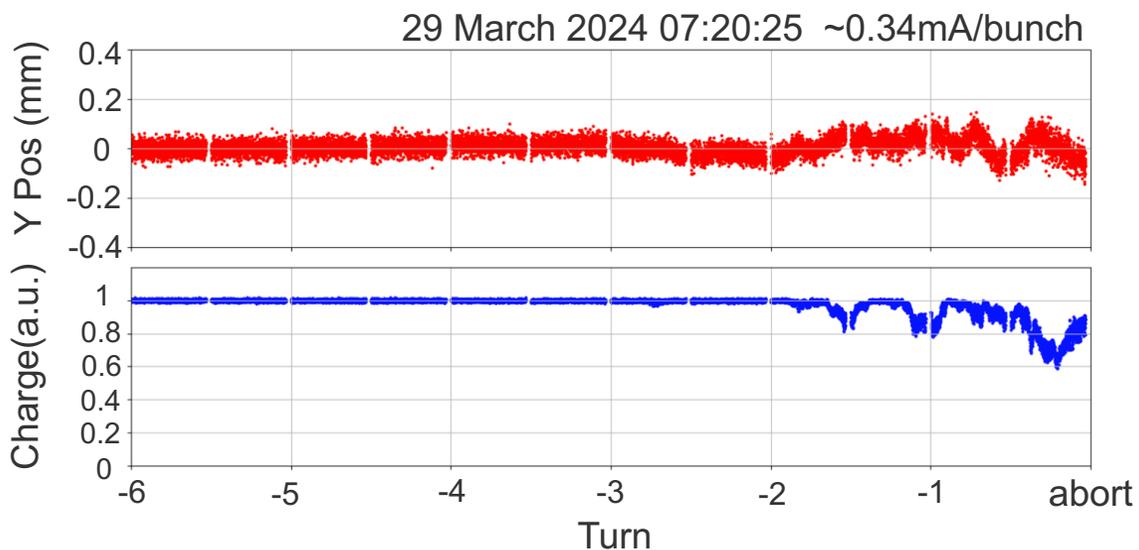
RFSocで記録した初めてのSBL

- 約半年間でBOR開発を完了し、運転再開(2024年1月)に間に合わせることができた。



一部のバンチが大きく蹴られた直後に、
約1ターンで電荷が半分ほどに減少してしまった。

SBLの観測を継続



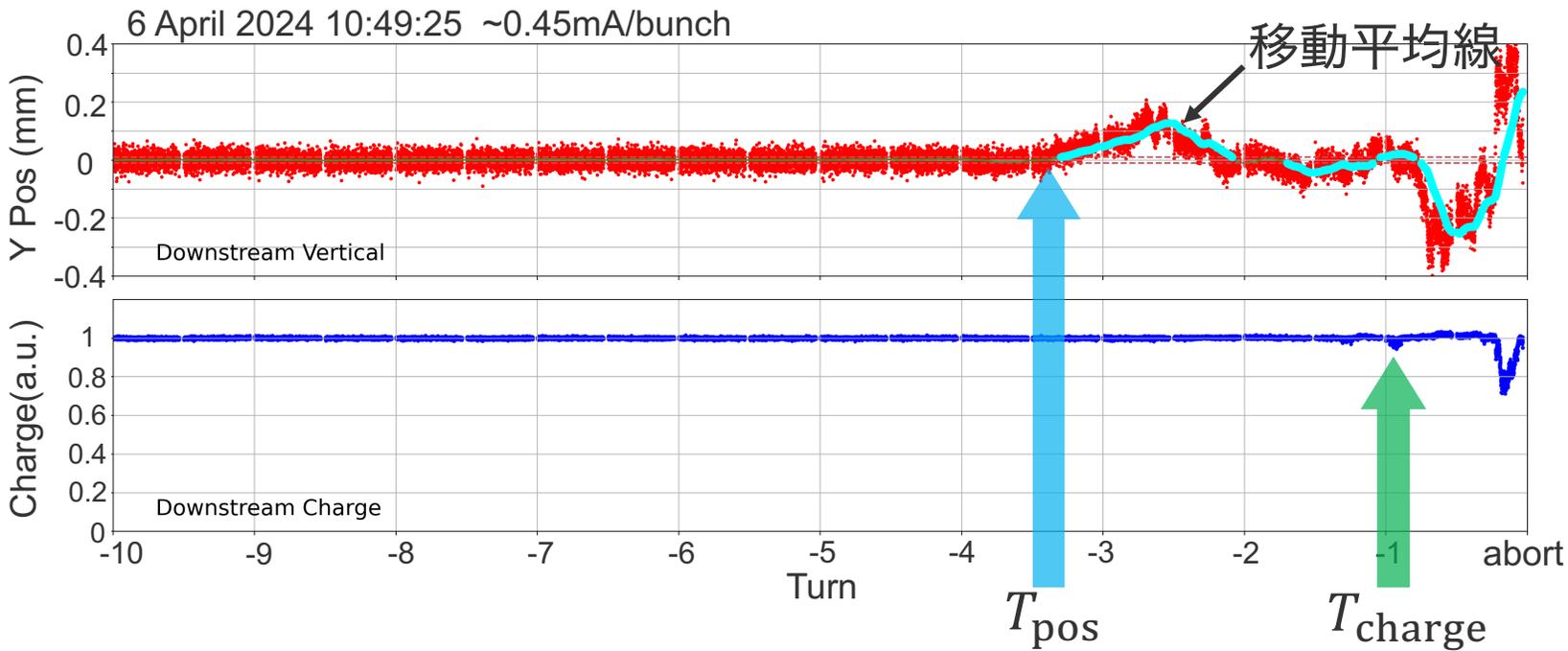
様々なタイプの振動やチャージロスがあることが分かった

- 複数のBORで振動源の位相を絞り込む
- 怪しい箇所を挟み込むことで振動源の位置を絞り込む

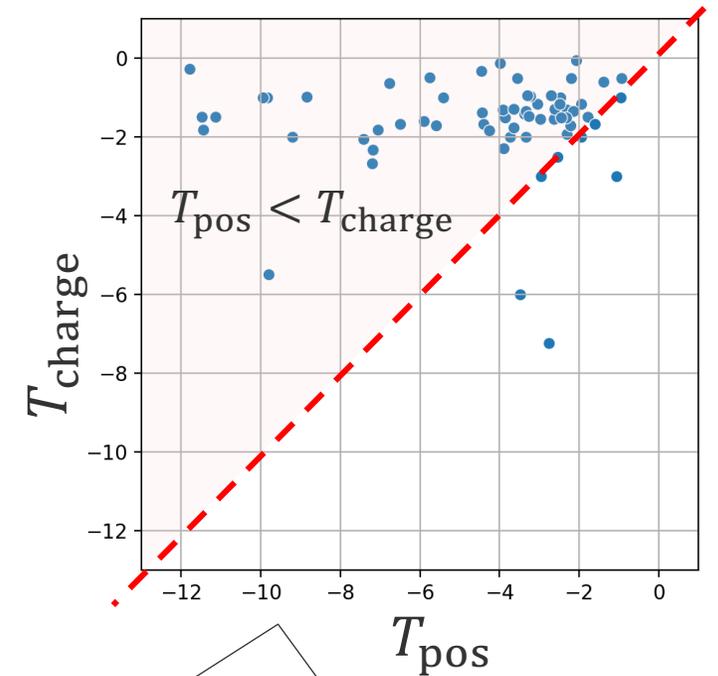
RFSoc BORを複数台製作/設置していきたい

RFSocによる高速アボートシステムの検討

■ RFSocでバンチ振動を検知してアボートできれば、従来のビームロスを検知するアボートシステムよりも、高速なアボートシステムが構築可能



T_{pos} : 移動平均線が ± 0.01 mmの閾値を超えたタイミング
 T_{charge} : 電荷が初めて5%ロスしたタイミング



多くの場合、位置振動が電荷ロスよりも先に始まる

RFSoc内のFPGAを書き換えることで比較的簡単に開発・テストできることも魅力的

まとめと今後

■ まとめ

- ・ SuperKEKB加速器では突発ビームロス事象(SBL)という現象が問題となっている。
- ・ SBLを詳しく解析するために、RFSocという新しいアーキテクチャーを用いて、Bunch Oscillation Recorder(BOR)を開発した。
- ・ RFSocのバンチバイバンチモニターとしての有用性を確認し、さらに実際に複数のSBLの記録を行うことができています。

■ 今後の展望

- ・ RFSocを用いたBORを増設し、SBLの発生箇所特定と原因究明に努める
- ・ SBLの解決に向けて、BORやビームプロファイルモニターのデータを活用した統合的な解析を進めていきたい (THP011 三塚)
- ・ 高速アボートシステムの構築へ向けて、RFSocを用いたBPM開発も進めていきたい