

# J-PARC MR におけるバンチ軌道 制御用フィードバックシステム

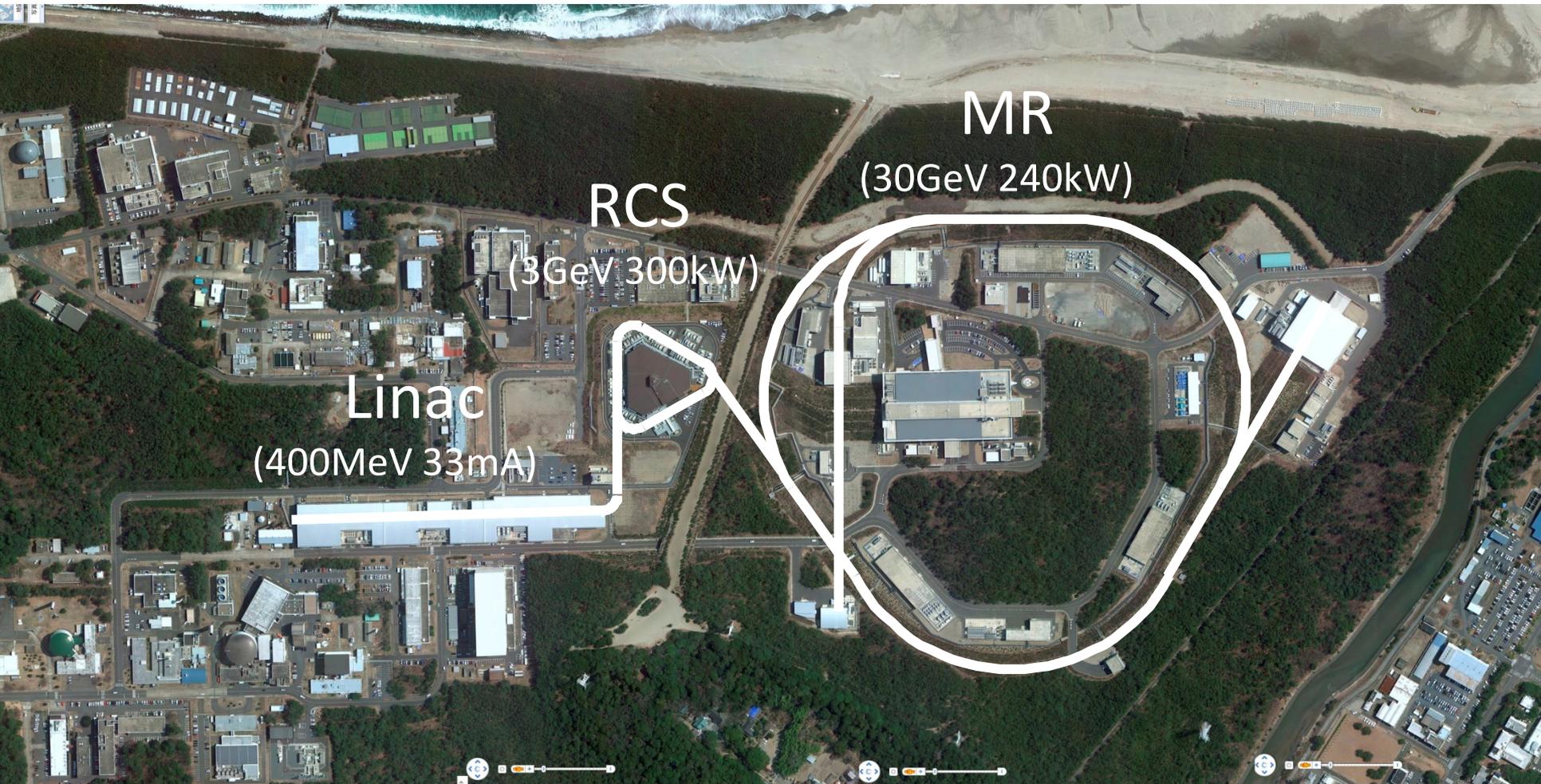
J-PARC加速器 モニタG 岡田雅之

コラボレーターの皆様

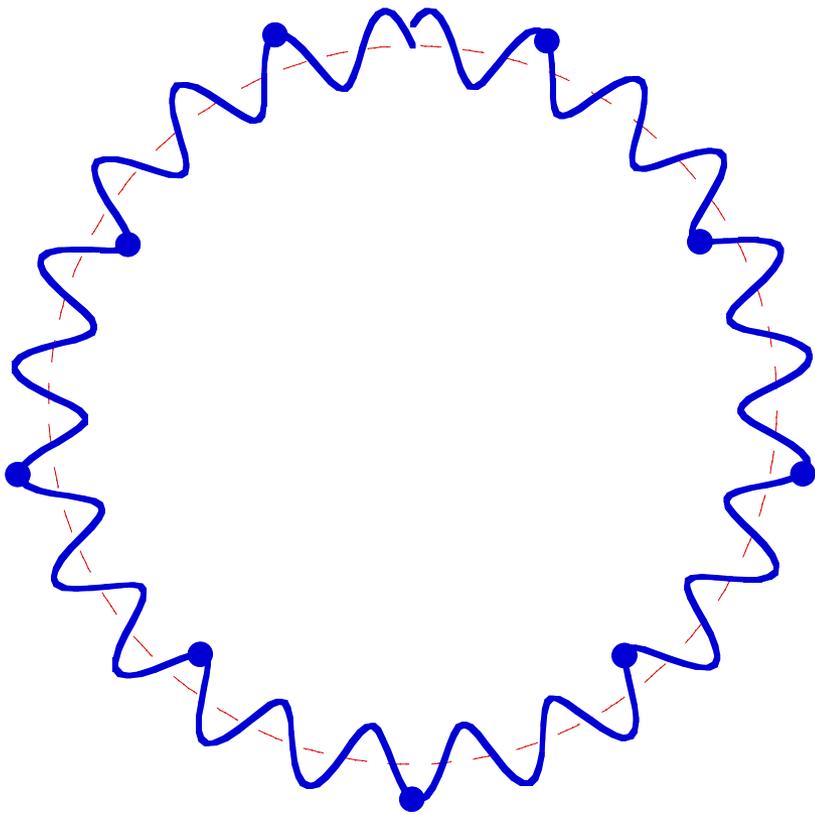
帯名 崇, 栗本 佳典, 菖蒲田 義博

陳 栄浩, 飛山 真理, 外山 毅, 仲村 佳悟

# J-PARC



# シンクロトロンのビーム軌道



リング内に入射されたビームは**基準粒子軌道** (**ビーム軸**)を中心に**ベータトロン振動**をしながら周回。

各種電磁石の適切な配置により、通常ベータトロン振動は安定的に維持される。

# ベータトロン振動の不安定性

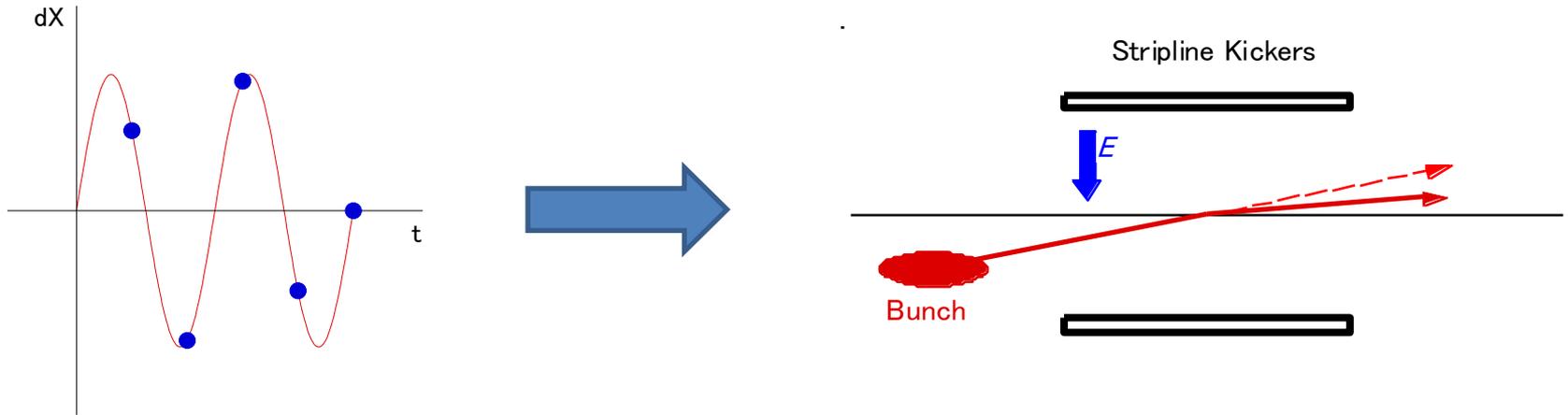
- 実際には、ダクトのresistive wallによるwake場や電子雲の影響、キッカー電圧の反射などによりベータトロン振動を増大させることがある。
- これは、ビーム強度が大きいほど顕著であり、ベータトロン振動の増大はビームロスにつながる為大強度化の大きな障害となる

⇒速やかに減衰させる事が必要。



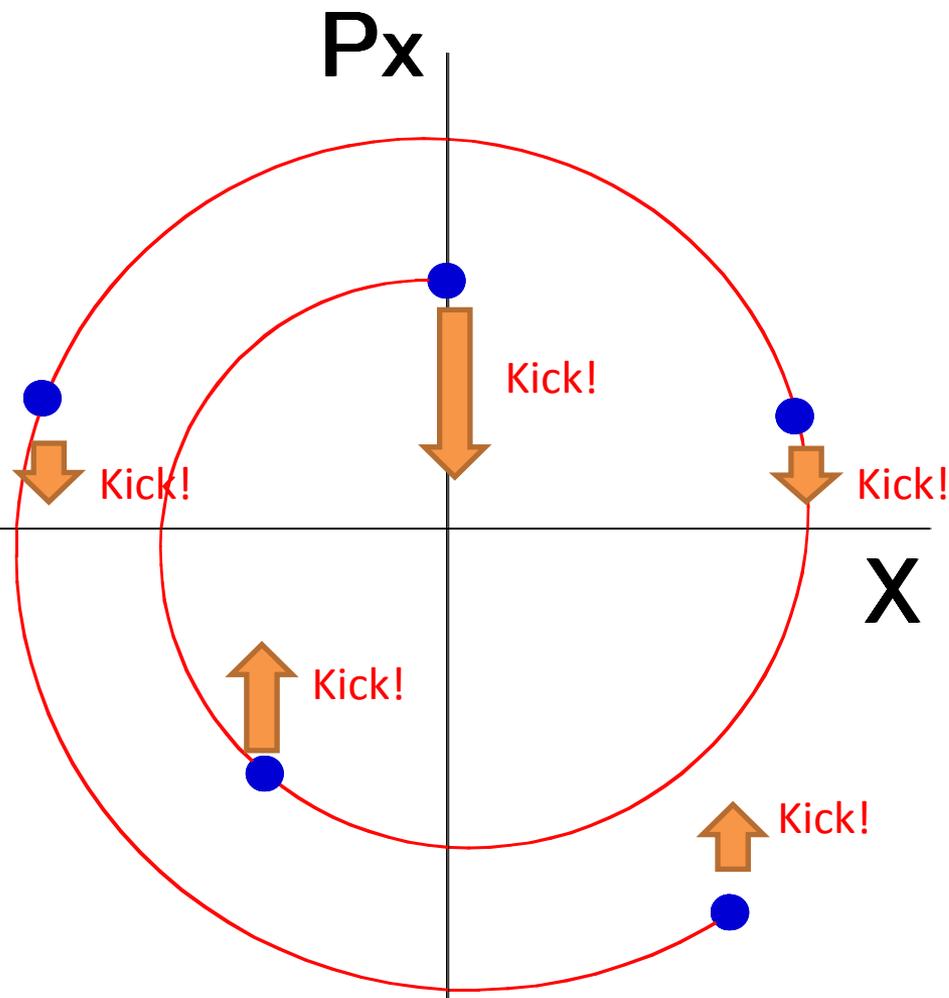
効率的なダンピングの為に  
フィードバックシステムの導入

# フィードバックシステム概要



- BPMの信号からベータatron振動の大きさと位相を算出。
- キッカー位置でのキック角度に換算して蹴る。

# ベータトロンチューン



$v=0.40$ の場合

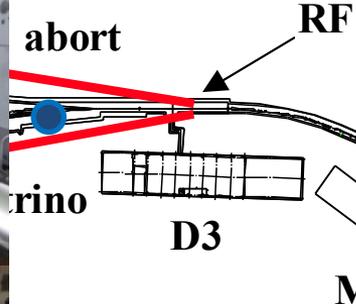
ベータトロンチューン( $\nu$ ):  
リングー周辺のベータトロン  
振動数

(J-PARCの場合  $\nu_x=22.40$   $\nu_y=20.75$ )

- チューンに端数がある場合、リング上の同地点では周回ごとに位相が端数分ずれて観測される。

➤ 複数回のBPM測定結果からベータトロン振動の大きさと位相を算出する。

# MR フィードバックシステム



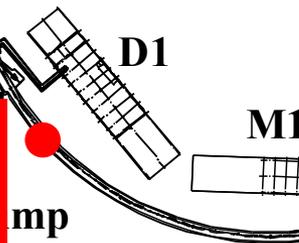
Intra Bunch Feed Back System  
#159 (FX取り出し下流)

- ストリップラインBPM
- iGp12 制御モジュール
- ストリップラインキッカー  
(電極長 770mm)
- キッカー電源 3kW/電極



B1 Collimators

Injection

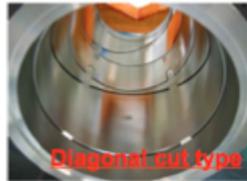


Bunch by Bunch Feed Back System  
#15 (入射部下流)

- Diagonal-cut BPM
- LLRF4 制御モジュール
- ストリップラインキッカー  
(電極長 1500mm)
- キッカー電源 1kW/電極

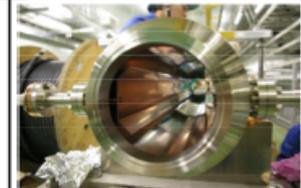
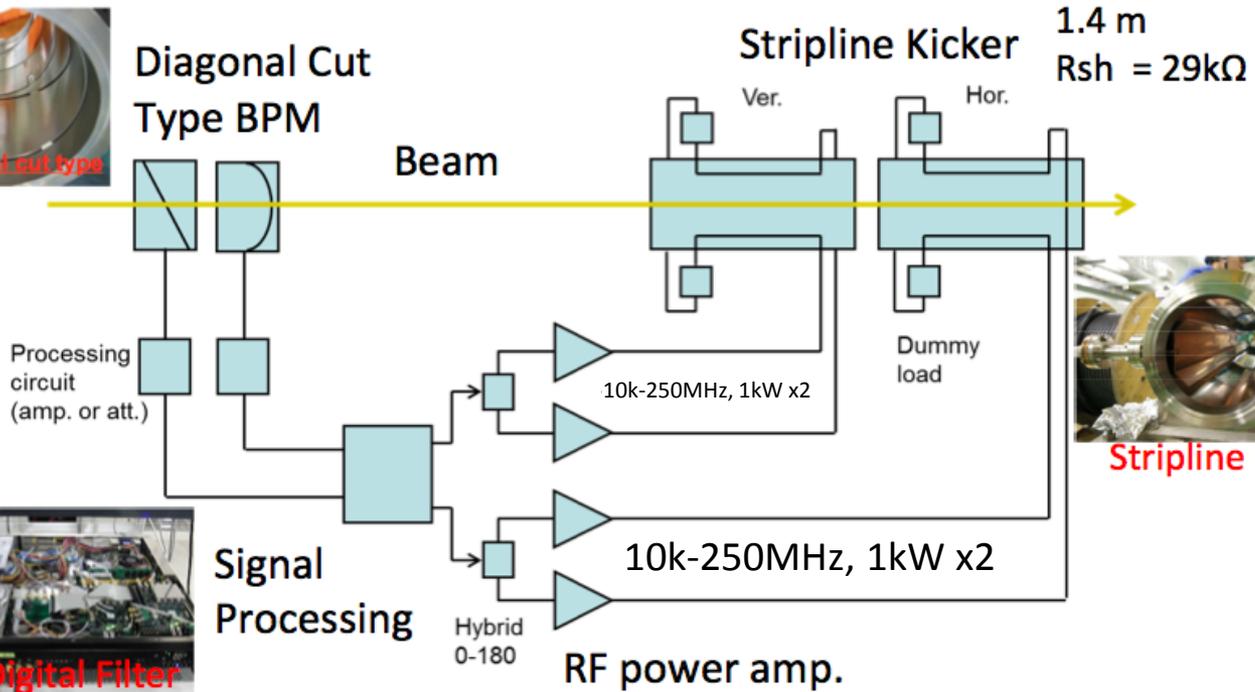


# BxBフィードバックシステムの構成



Diagonal Cut Type BPM

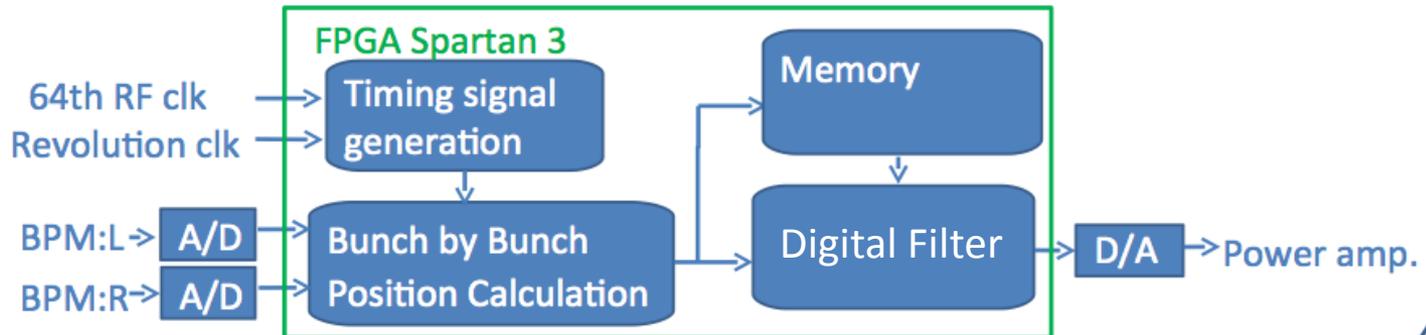
Diagonal cut type



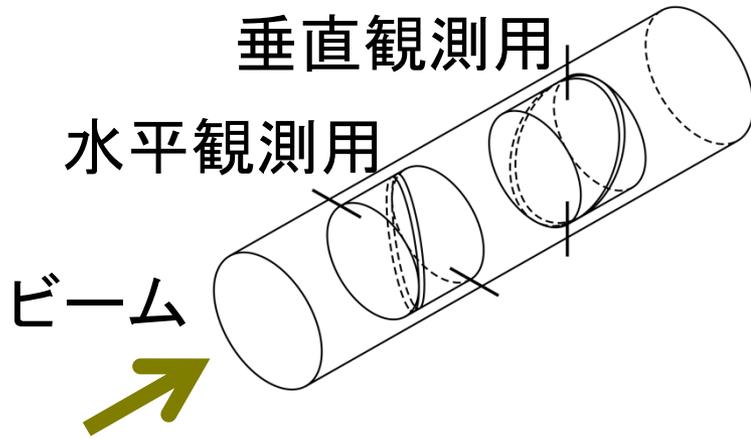
Stripline Kicker



Digital Filter

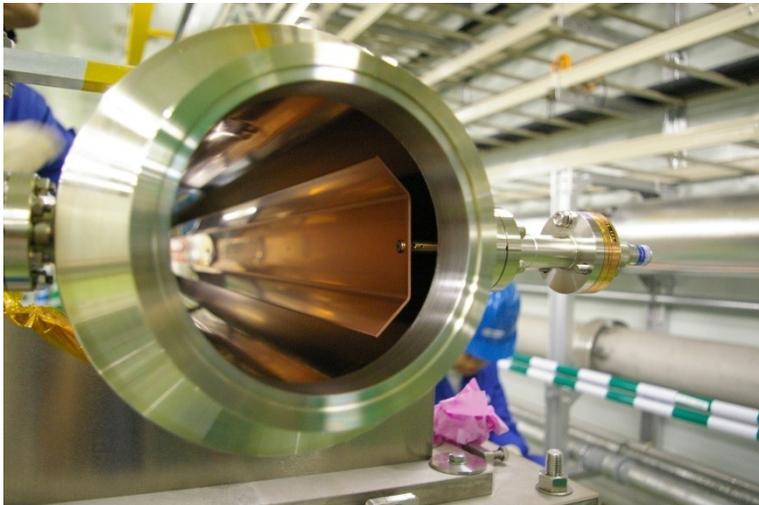


# Diagonal-cut 型BPM



- MR の標準的BPM  
(各Q-magに設置)
- 1台で1方向しか測定出来ないが、位置応答が線形なので処理しやすい。
- Cut-off周波数(処理回路を含む)が10MHzの為、バンチ内構造は分からない。

# ストリップライン型キッカー



- 電極長 1500mm
- 電極間隔 140mm
- 電源(各電極)
  - 出力 1kW(500wx2)
  - 帯域 10kHz~257MHz
  - 利得 57dB
- キックアングル@3GeV  
最大4 $\mu$ rad (計算値)

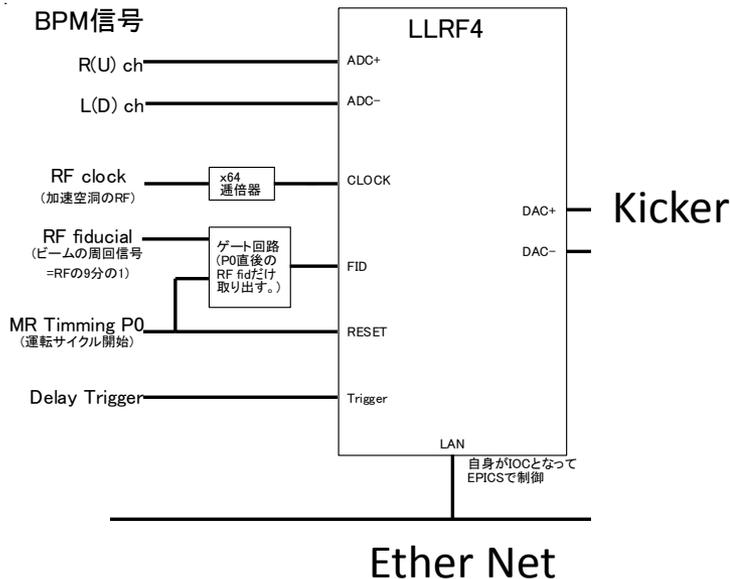
# 制御モジュール



## • LLRF4

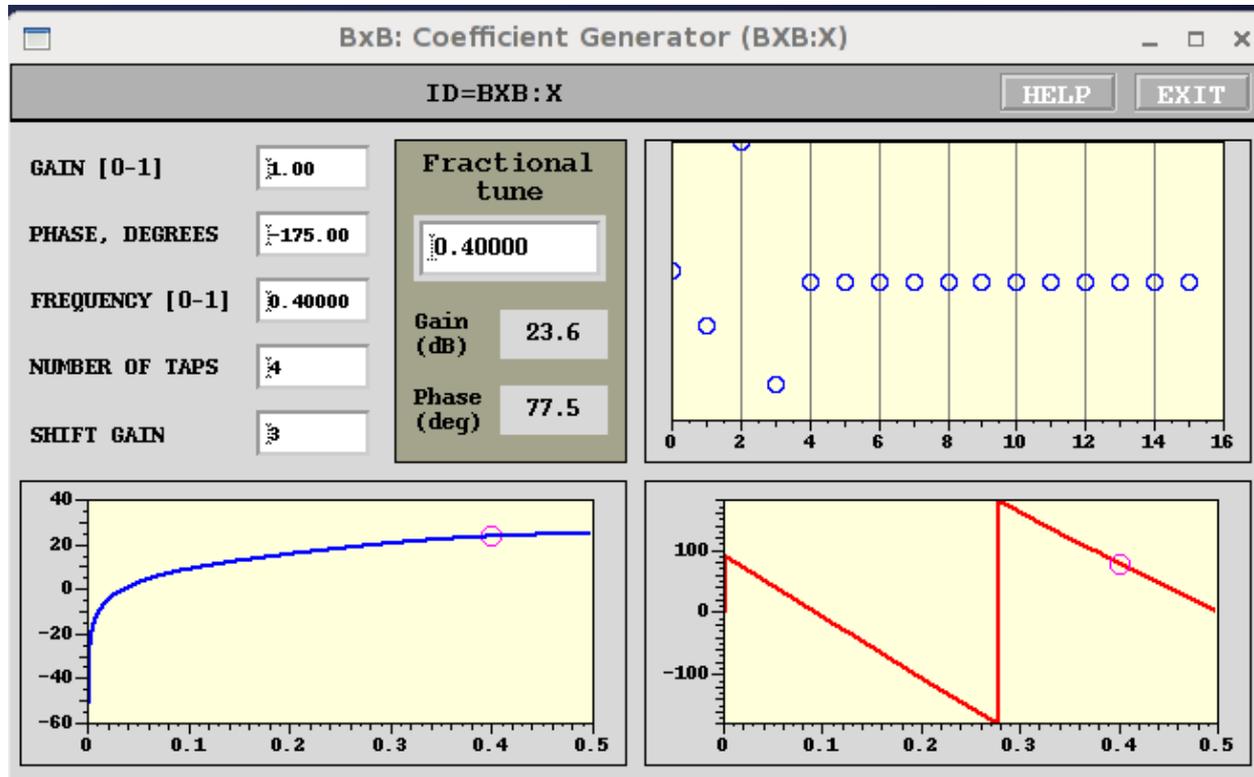
(dimtel社製 栗本カスタム)

- ADC (14bit 125MSPS)
- FPGA(Spartan3)
- DAC (14bit 260MSPS)
- Linux PC (EPICS installed)



- 2つの処理回路でX,Yを同時処理可能(クロックは共通)

# FIRフィルター



パラメータ設定

フィルター  
係数

Gain

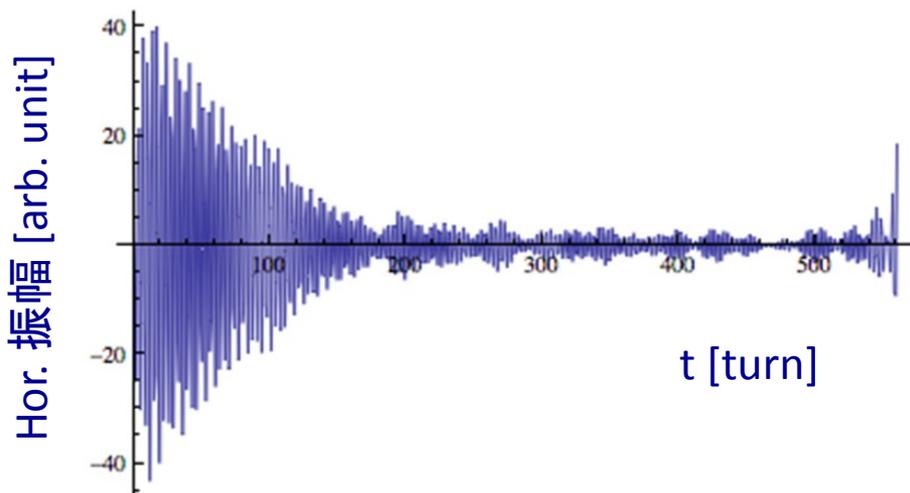
位相

チューン端数と初期位相、TAP数からフィルターの係数を計算。

BPMによる位置情報にかける事で、キックアングルを算出。

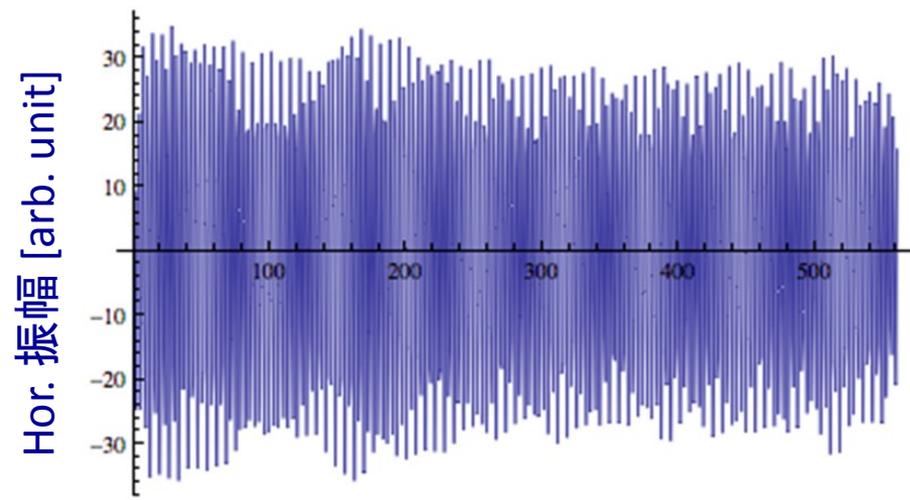
# 動作事例

## ■ BXB Feedback ON



入射エラー+キッカー電圧の反射エラーによる振動をBxB Feedbackでダンピングした。

## ■ BXB Feedback OFF



⇒約180ターン(≒1ms)でほぼ減衰させる事が出来た。

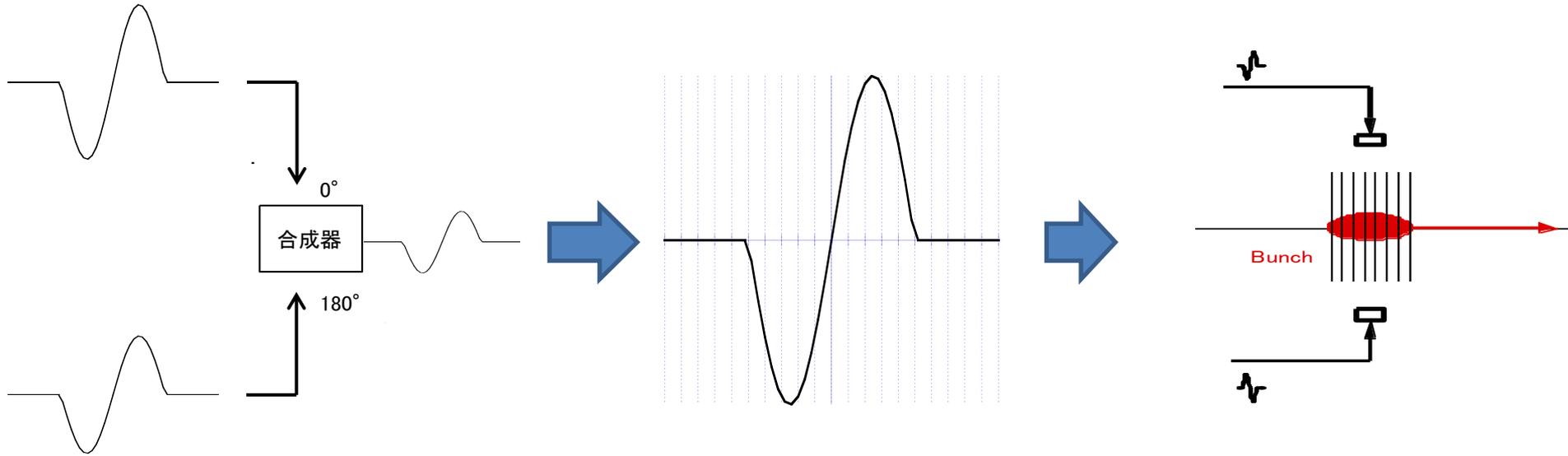
# バンチ内振動

- BxB Feedback Systemでは、キッカーはバンチ全体を一律に蹴る為、バンチの重心の動きは抑制できるが、ヘッドテール振動の様なバンチ内での動きには対処できない。



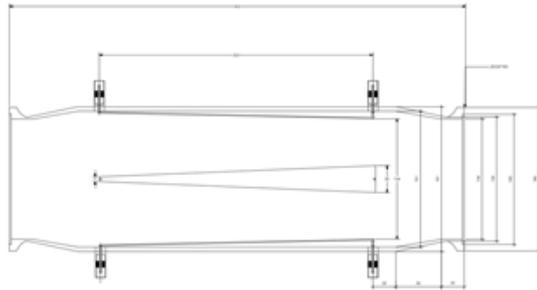
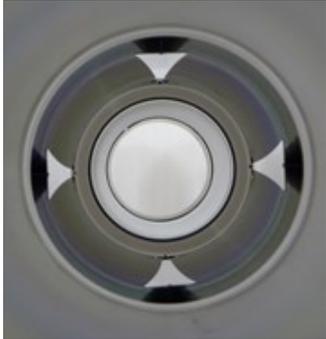
⇒より広帯域・高精度なIntrabunch Feedback Systemが必要

# イントラバンチフィードバック概要



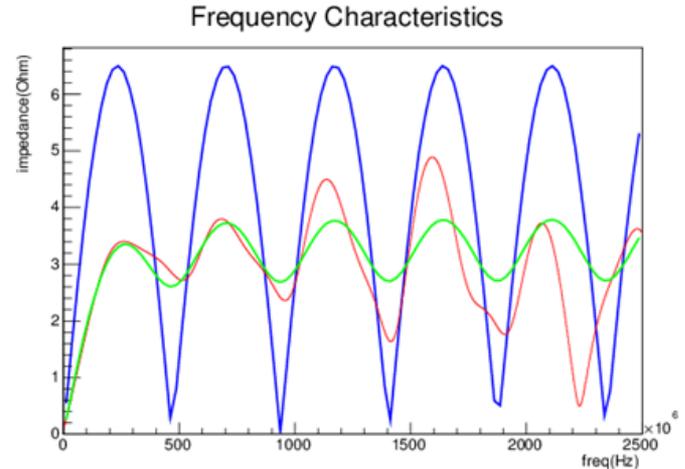
- BPMの出力を合成して差信号を生成
- 差信号をクロック単位(スライス)で分割。それぞれの位置でのベータatron振動を算出。
- キッカーもそれに対応した物でスライス単位で正確にキックする。

# 指数型電極 BPM



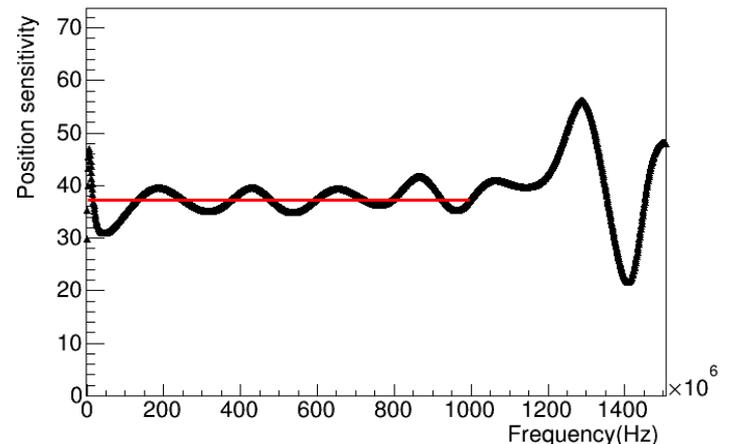
## 電極形状を指数関数型にした Stripline BPM

- Diagonal-cut BPMよりも高い周波数領域での測定が可能のためバンチ内形状も観測できる。
- 矩形板の様なノッチが無くより周波数特性が良い。



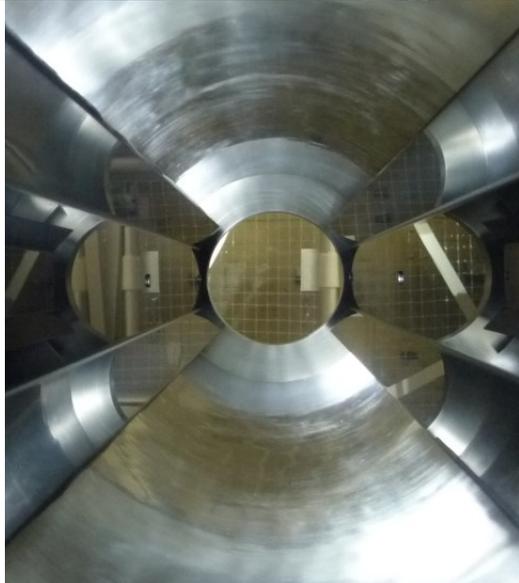
周波数特性

(青:矩形 緑:理想的な指数型電極 赤:実際に導入した電極)



位置感度特性

# 短電極キッカー



- 電極長 770mm
- 電極間隔 140mm
- 電源(各電極)
  - 出力 3kW
  - 帯域 100kHz~100MHz
  - 利得 65dB
- キックアングル  
最大 $2\mu\text{rad}$  (計算値)

上:キッカー外観

下:キッカー電極(DLCコーティング)

# iGp12

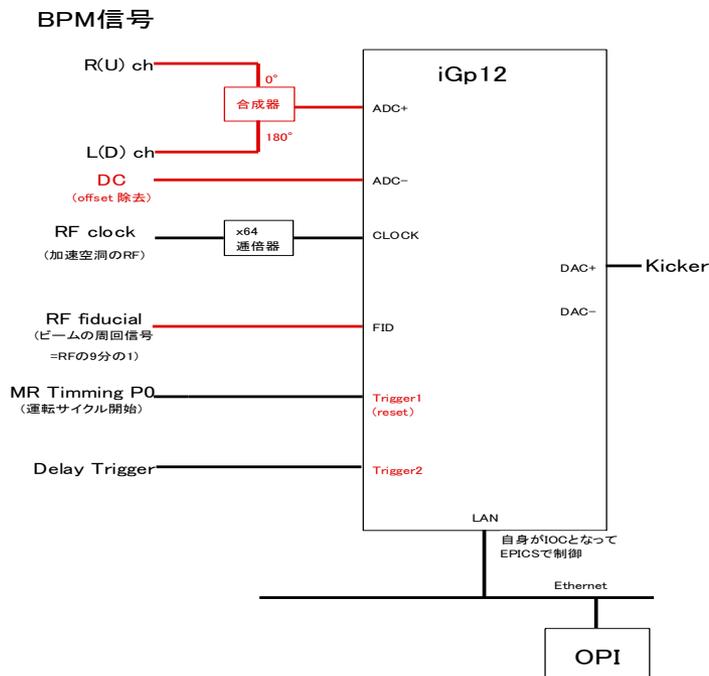


## LLRF4の高速対応版

Dimtel社製

- 12bits ADC  
~510MHz sampling
- 12bits DAC  
~510MHz sampling
- FPGA
- LinuxPC (EPICS installed)

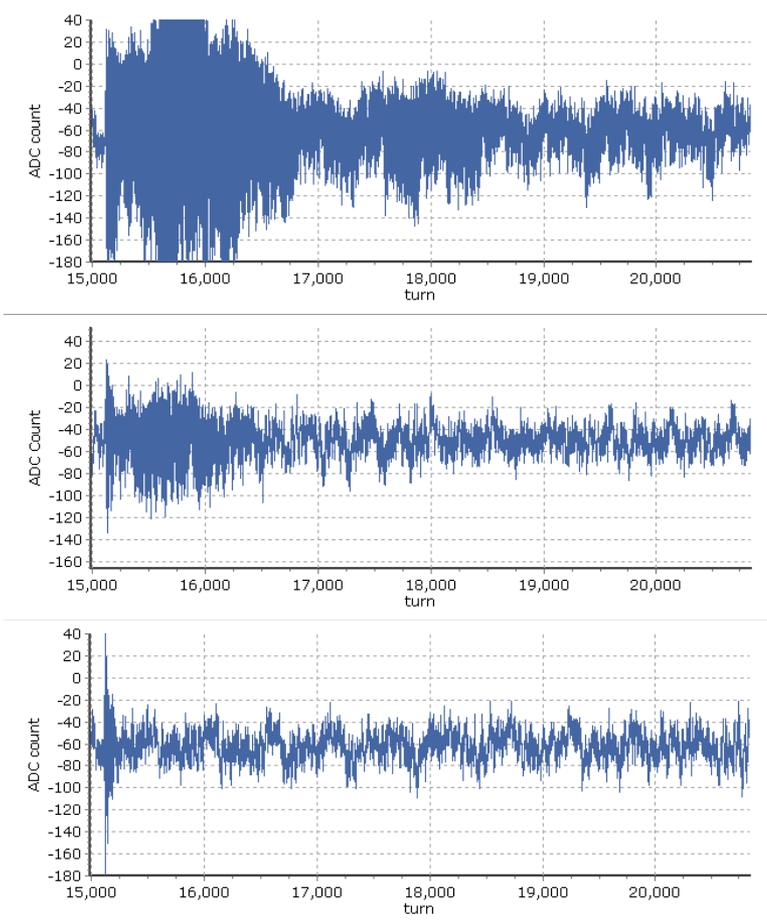
1台で1チャンネル



# 動作事例

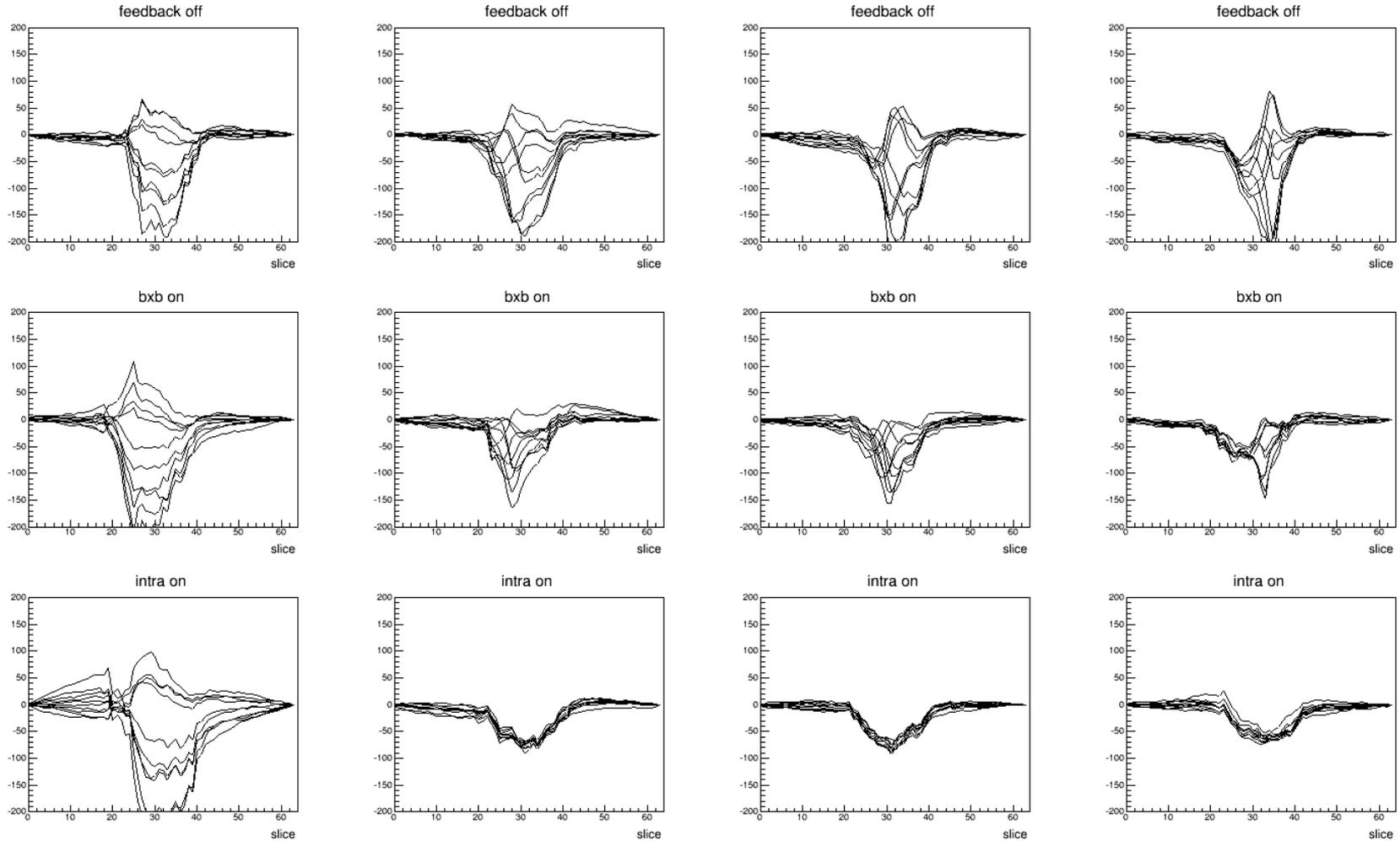
入射時のエラーのダンピングテストの結果。

- 水平方向のベータatron振動がBxBよりも速く減衰している事が分かる。



35番スライスでの水平振動の様子  
上:FB無し 中:BxBFB 下:IBFB

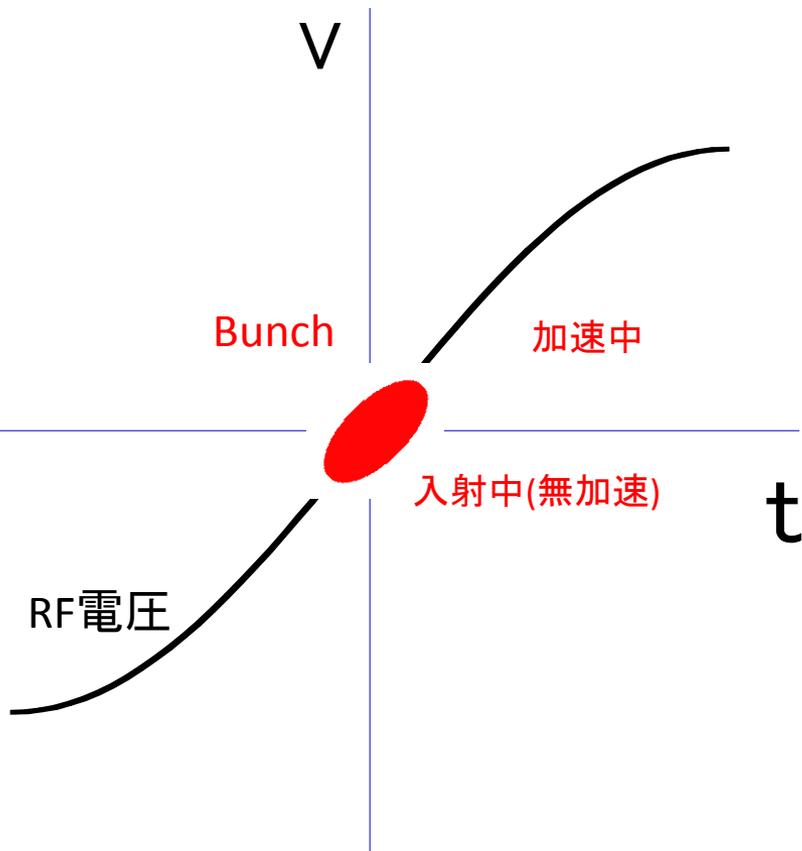
# 動作事例(2)



100ターン毎のBPMの差信号の様子(上:FBなし 中:BxB 下:Intra-bunch)

# 現在の課題

# 加速時におけるフィードバック



- 加速時にはバンチをRFの加速位相に移動させる。
- バンチの周期は短くなるが信号の処理伝達速度は変わらない。

⇒ Delay等の設定を適宜調整する必要がある

# パラメーター変更機能

BxB: State Machine (BxB:X2) ID=BXB:X2 [HELP] [EXIT]

FEEDBACK STATE MACHINE CONTROL

STATE	COEFF SET	SHIFT GAIN	FIDUCIAL COARSE	DELAY FINE
0	0	5	1	42
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
7	0	0	0	0
8	0	0	0	0
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0
11	0	0	0	0
12	0	0	0	0
13	0	0	0	0
14	0	0	0	0
15	0	0	0	0

STATE RESET  off STATE READBACK  0

- フィルター(4SET)やディレイ、出力のゲインを切換る機能
- バンチの状態に合わせて外部トリガーで16のパターンを順次切り替える。

➤ 現在、加速時のパラメーターを調整中。

# まとめ

- J-PARC MRでは、ビームの不安定化によるビームロスを低減させるためBunch by Bunch, Intra-bunch Feedback Systemを導入している。
- これらは、BPMによる位置情報にフィルタ処理をしてベータatron振動を計算、キッカーにより振動を減衰させるシステムである。
- テストの結果、効果が認められたので現在利用運転で使用。
- 加速中のフィードバックのセッティングは調整中