

電磁石電流によるリアルタイムベータトロン  
チューン補正時のJ-PARC Main  
Ring 遅い取り出しビーム品質の評価

栗本佳典、内藤大地、下川哲司、木村琢郎、武藤亮太郎、  
富澤正人、岡村勝也

高エネルギー加速器研究機構  
加速器研究施設

# 目次

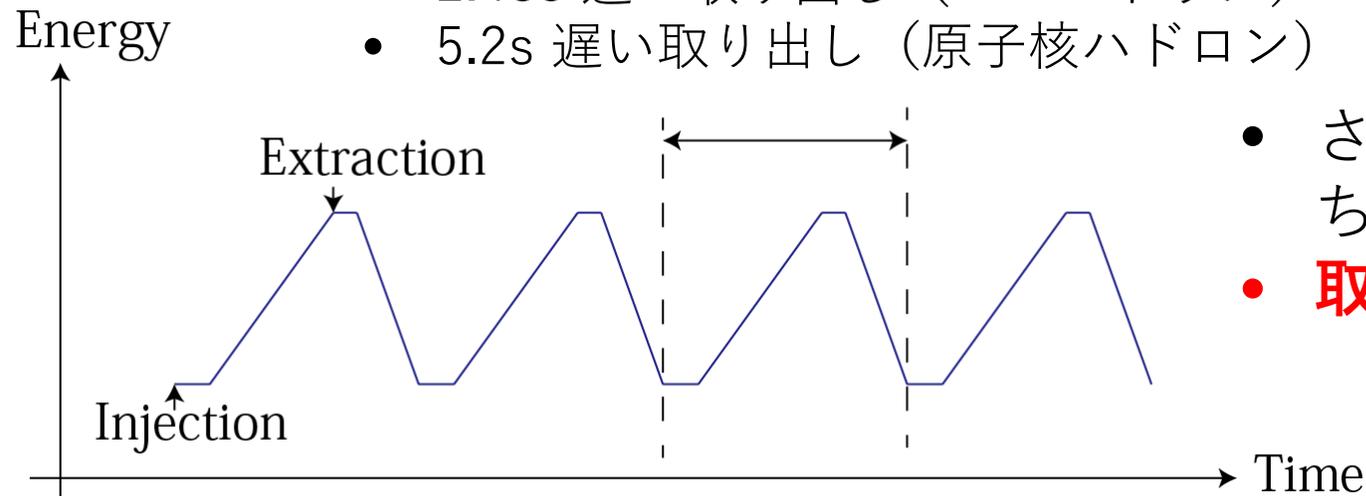
- J-PARC Main Ring について
- ベータトロンチューン
- 遅い取り出し
- 電磁石電流によるベータトロンチューンのリアルタイム補正
- ハードウェア構成
- 実験結果（チューン変動、取り出しビーム平坦性）
- 今後
- まとめ

# J-PARC 30 GeV シンクロトロン (Main Ring)



周長	1568 m
入射エネルギー	3 GeV
取出しエネルギー	30 GeV
バンチ数	8
ビーム取出し周期	2.48 s (速取), 5.20 s (遅取)
ビーム強度	<b>500 kW (速取), 50 kW (遅取)</b>

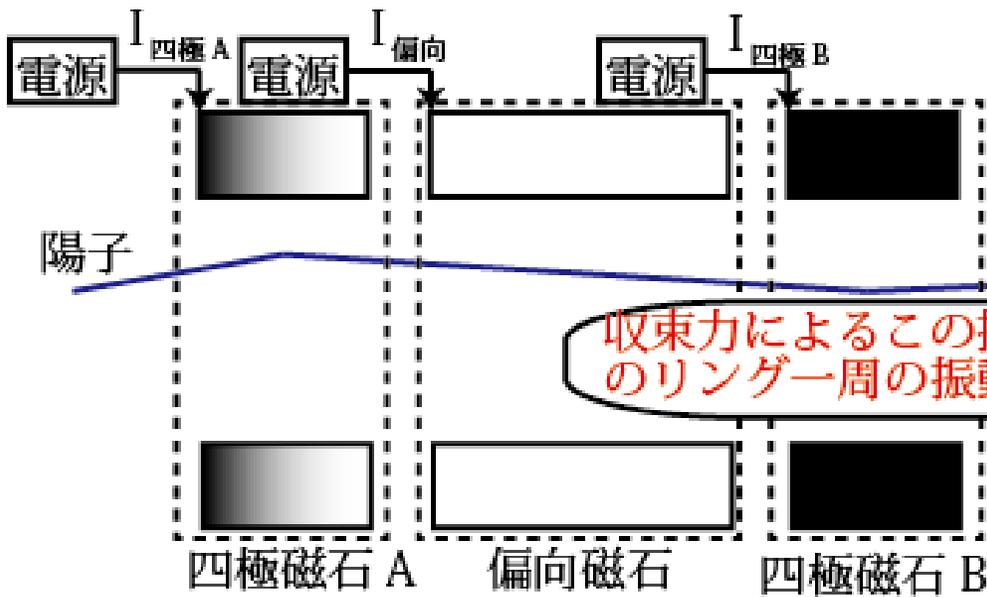
- 2.48s 速い取り出し (ニュートリノ)
- 5.2s 遅い取り出し (原子核ハドロン)



- さらなる**大強度化**、**ビームロス低減** (どちらも)
- **取り出しビーム平坦化** (遅い取り出し)

# ベータトロンチューンと共鳴条件

## ベータトロンチューン (チューン)



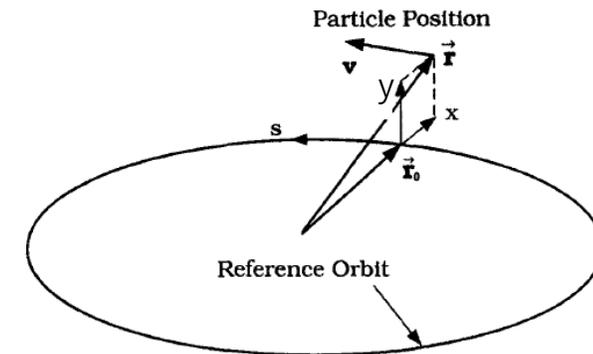
単粒子の横方向振動

チューン

$$: x(s) = \sqrt{\epsilon\beta(s)} \cos(\varphi(s) + \varphi_0)$$

$$: v_{x,y} = \frac{1}{2\pi} \oint \varphi(s) ds$$

→リング一周の横方向振動回数

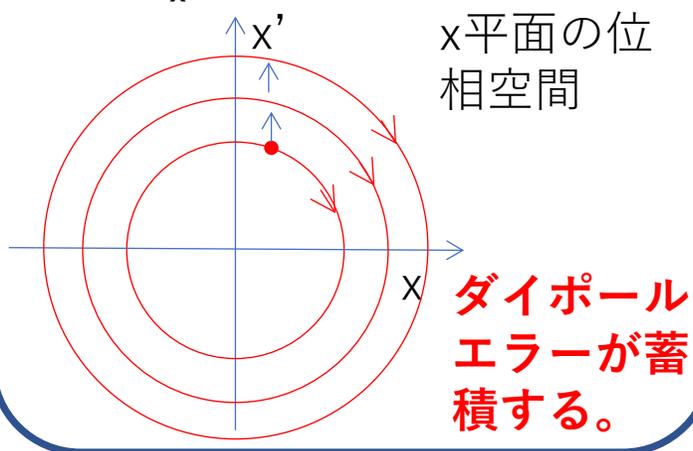


## 共鳴条件

$$lv_x \pm mv_y = n \quad (l, m, n \text{ 整数})$$

粒子のチューンが上の共鳴条件に近づくと振幅が増大し、結果としてビーム損失となる

例  $v_x = \text{整数}$

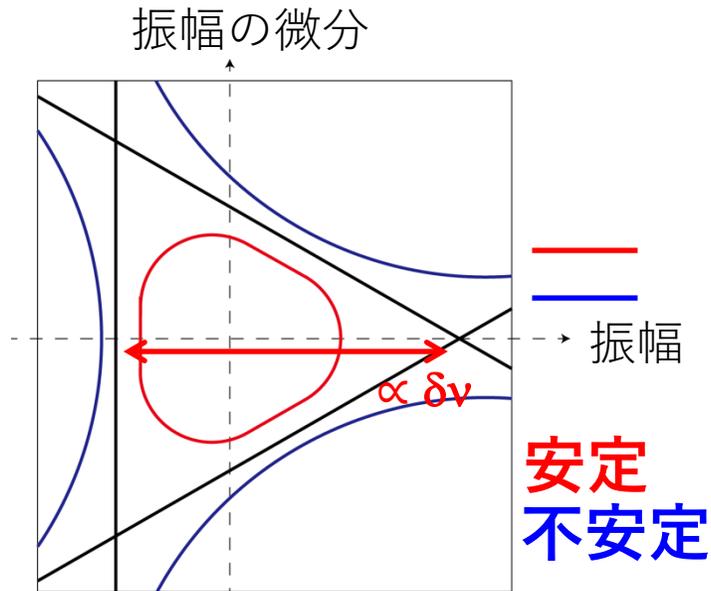


- チューンの選択とコントロールが重要
- ビームを蹴って測るため、利用運転中の測定は難しい

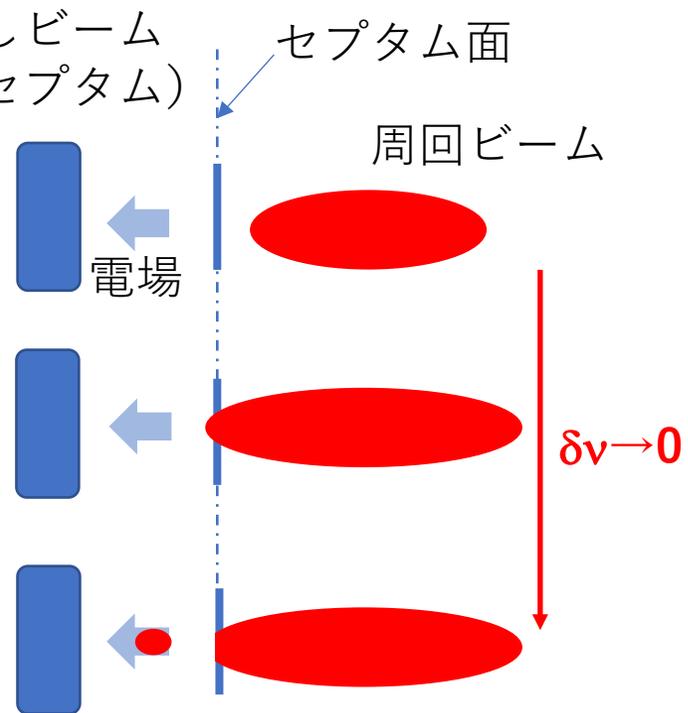
# J-PARC MR の遅い取り出し

四極電磁石電流を制御し、 $v_x$  を徐々に共鳴条件 ( $3v_x = 67$ ) に近づける

$v = -\delta v + 67/3$  における軌道 (位相空間)



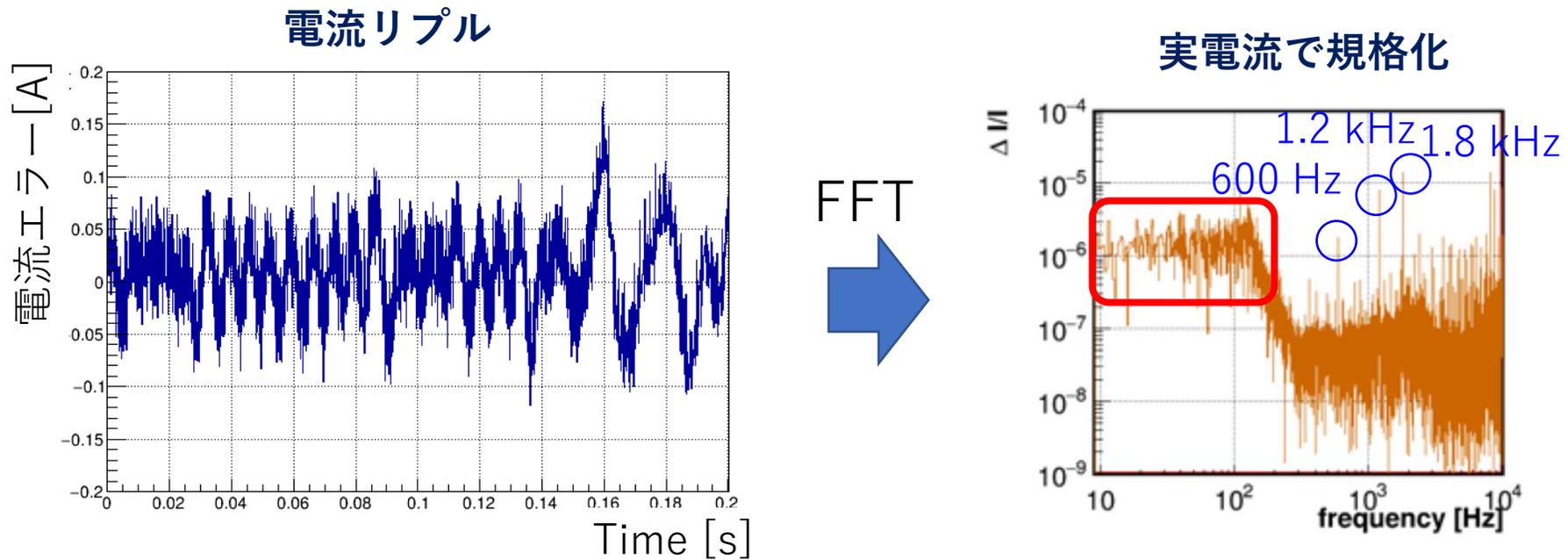
取り出しビーム  
(静電セプタム)



1. 共鳴に近づけると振幅が増大し不安定になる粒子が現れる。
2. 最も外側のものが電場が印可されている箇所に入る。
3. 電場により蹴られ取り出しビームとなる

**電磁石電流の変動 =  $\delta v$  (チューン) 変動 = 取り出しビームの濃淡**

# 主電磁石電源の電流リップル



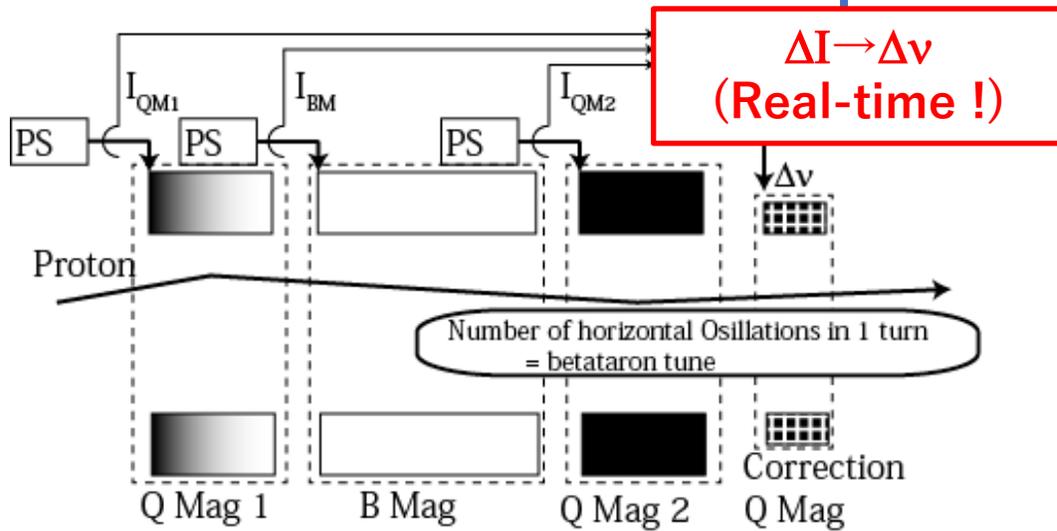
- スイッチングリップルは新電源では2 kHz 以上になる。  
➡ ダクト渦電流にシールドされあまり効かなくなる

□ **フィルタやフィードバック系の伝達特性 (<200 Hz)**

- ➡
- 新電源で電流計測に混入するノイズを小さくすればよい
  - **他に方法は？ (これが本研究の動機)**

# 電磁石電流によるリアルタイムチューン補正

装置の概念図



$$\Delta v = \frac{L_{SM}}{8\pi \sin \pi v} \sum_{k=1}^6 \Delta \theta_{BM,k} \sum_j^{BMk} \sum_i^{SM} K_{2,i} \beta_i^{\frac{3}{2}} \beta_j^{\frac{1}{2}} \cos(-\pi Q + |\varphi_i - \varphi_j|) + \frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^{11} N_i \beta_i \Delta K_{1,i} L_{QM,i}$$

①

②

- ① 偏向電磁石のエラー  $\Delta \theta_{BM}$   
→ 中心軌道のずれ @ 六極電磁石  $K_2$  →  $\Delta v$
- ② 四極磁場のエラー  $\Delta K_1$

- 補正四極（磁石+電源）のカットオフ周波数 ~ kHz
- FPGAによる  $\Delta I \rightarrow \Delta v$  は 10 us 以内で変換可能（無視） → Real-Time 補正は（原理的に）可能
- 補正したいチューンリップルは200 Hz以下 (5 ms)

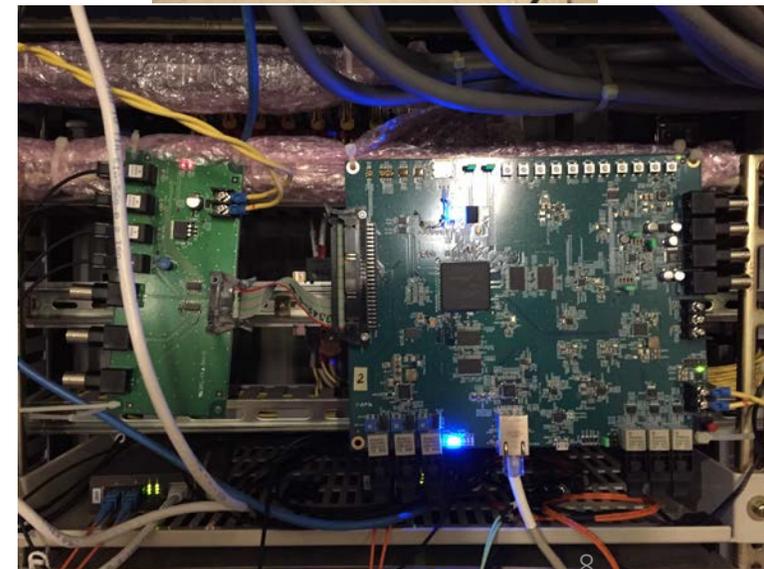
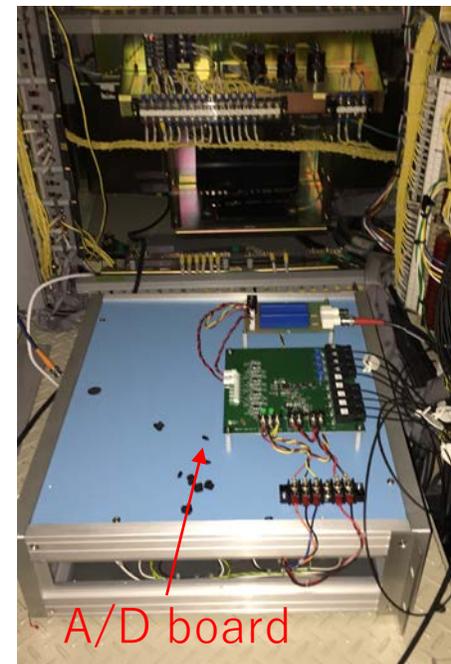
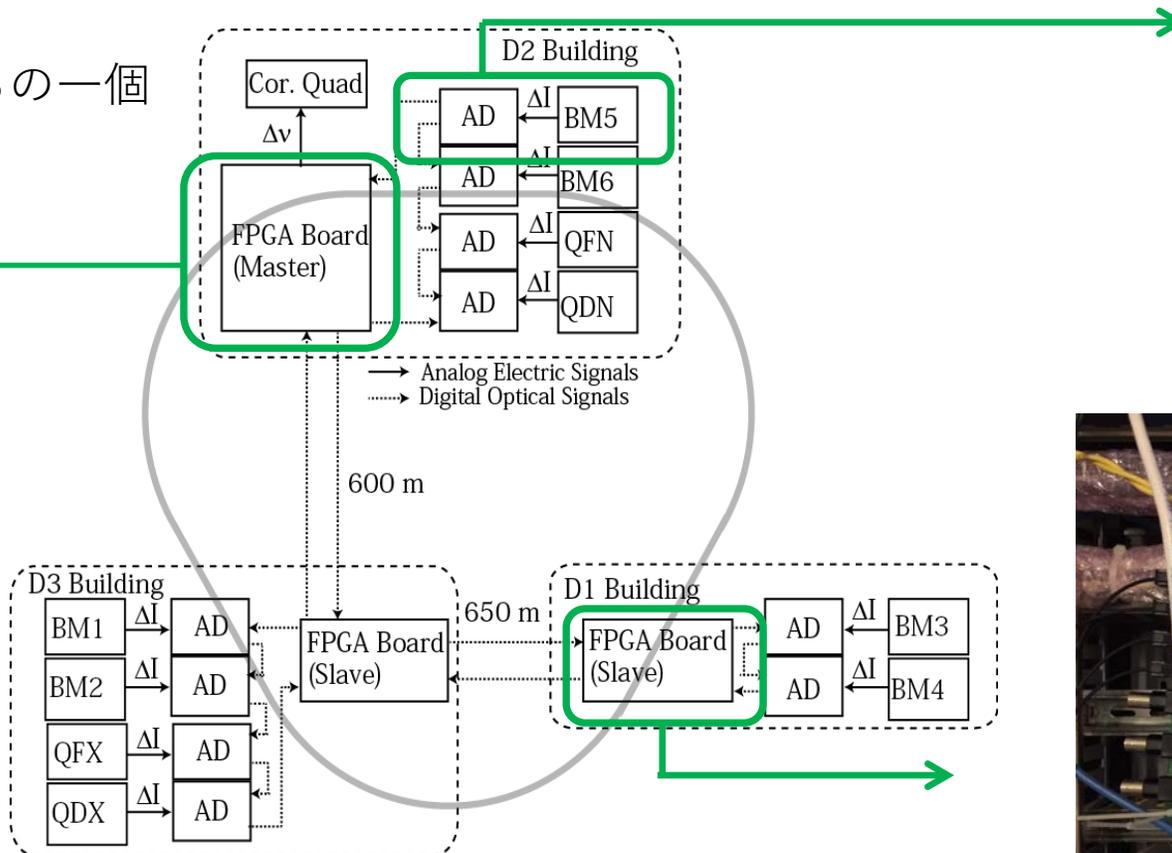
# 装置のセットアップ

A/Dボード @ 各主電源

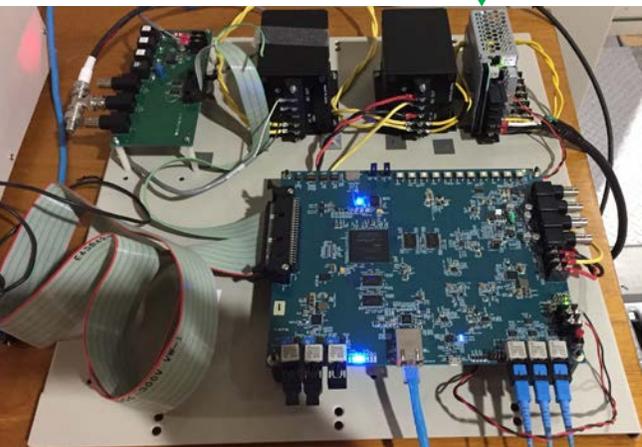
## Issues

- 主電源は3つの離れた電源棟に分散設置されている
- 補正電磁石電源はそのうちの一個の電源棟にしかない。

- $\Delta I$ のデジタル化と光信号化



FPGA /CPU ボード @ 各電源棟  
各電源からの $\Delta I$ 信号を集め、別の電源棟へ転送する。



$\Delta I \rightarrow \Delta v$  のリアルタイム変換を行うボード

# 直接測定チューンと磁石電流による予測

## チューン変動予測

- 6台全ての偏向電磁石電源および2台の四極磁石電源（四極電磁石約半分相当 96/216）の $\Delta I$ を使用

## ビーム条件

- 設定チューン 21.35 21.45 （速い取り出し）
- 3 GeV 入射

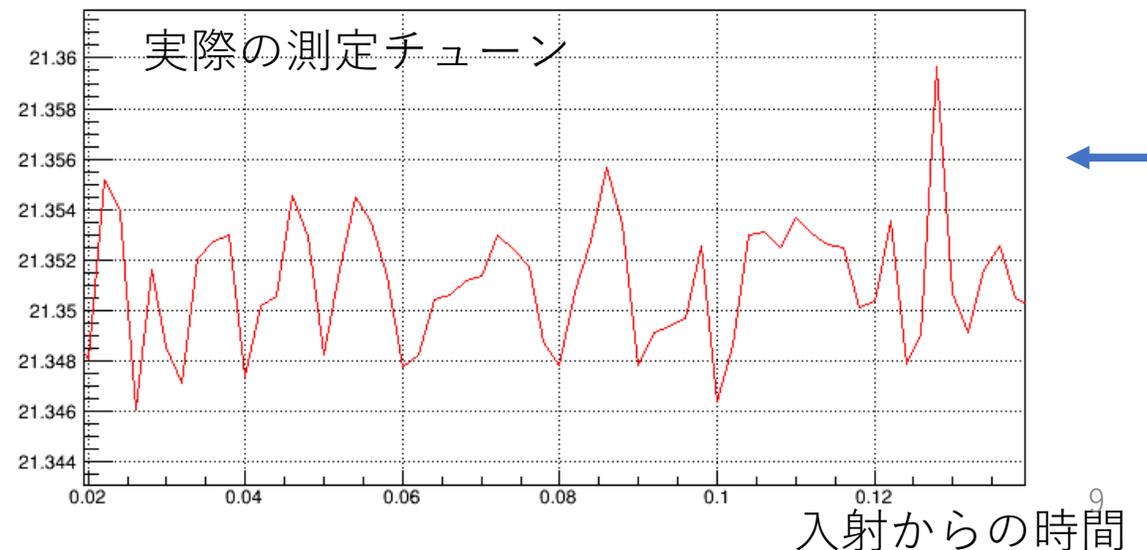
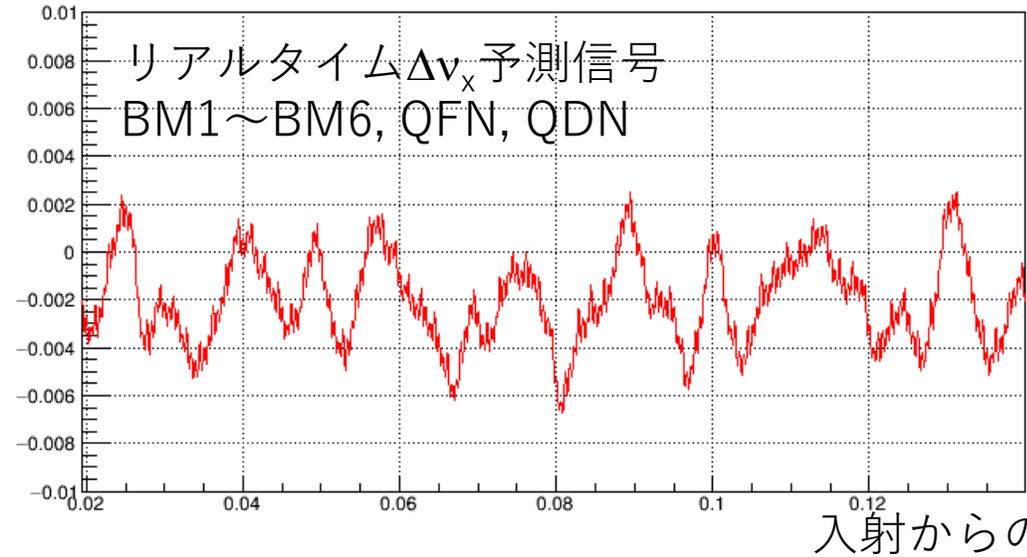
## 完全に一致しない原因（推測）

- すべての電磁石の情報を取り込んでいない。
- 電流→磁場の伝達特性を考慮していない。

チューン変動の少なくとも大きさは主電磁石の電流リップルの大きさと説明可能！

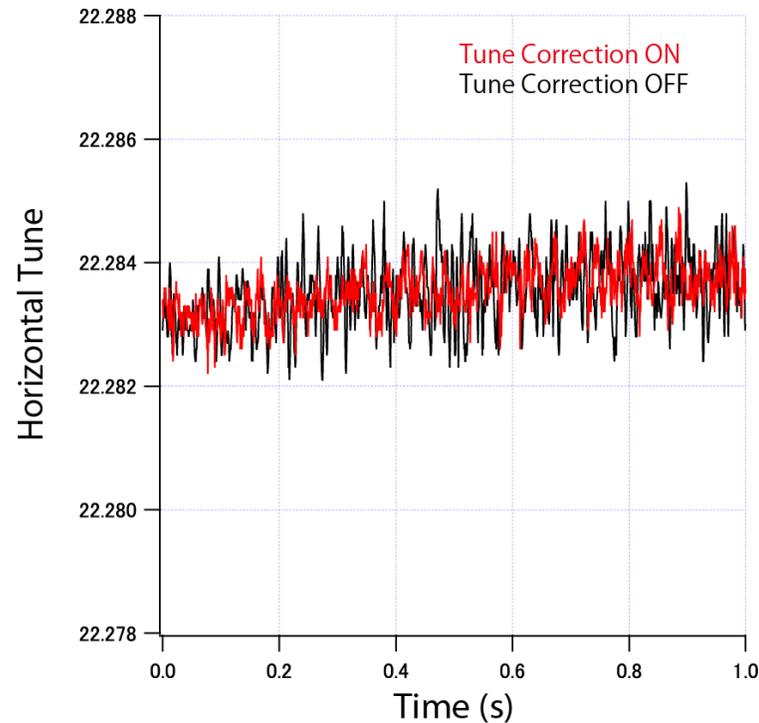


実際に補正電磁石にリアルタイム信号を入力し、チューンリップルが低減するか実験する。

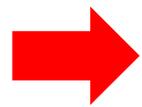
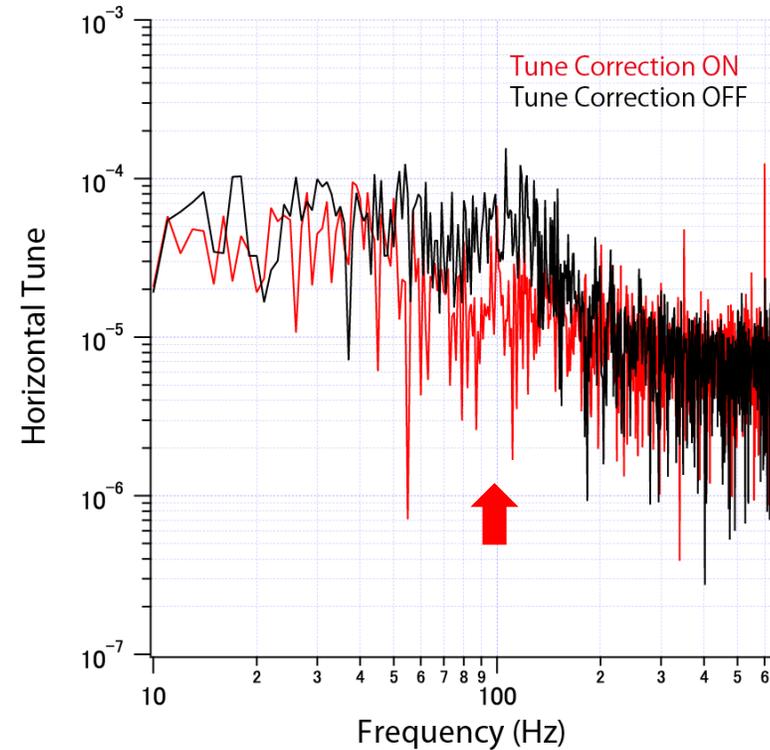


# チューン補正

ビーム試験中ならビームを蹴って励起したコヒーレント振動のBPM信号を周波数解析しチューンを直接測定できる。→ 本システムON/OFFでのチューンを比較



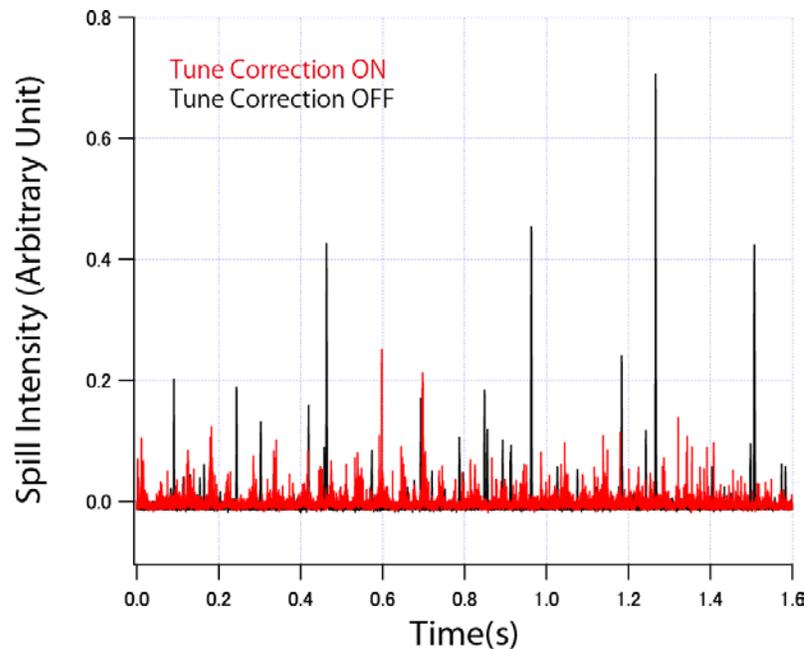
FFT



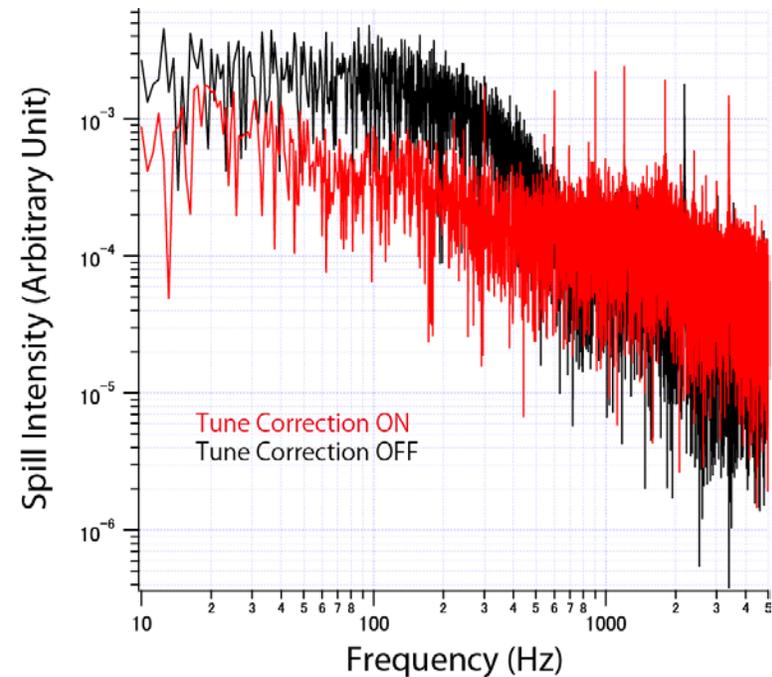
- **100 Hz 付近のチューン変動を1/3~2/3程度に減らす。**
- 200 Hz 以上は逆に変動を増やす。← 当たり前（高周波では磁場の電流から遅れが無視できない）

# 取り出しスピル平坦度への影響

- 本システムの効果を見るため、EQ磁石RQ磁石によるスピルフィードバック、Transverse RFシステム、コイルショートをOFFした。
- ビーム平坦度の指標Dutyを  $\frac{\langle I \rangle^2}{\langle I^2 \rangle}$  ( $I$ はビーム強度) で定義する。



FFT



- **Dutyを3.2 %から28.1 %に改善した**
- **低周波 (<200 Hz) で変動を改善、それ以上で悪化 (tuneと無矛盾)**
- 本システム単体では、利用運転のスピル制御フル装備 (EQ RQ TrRF) にはかなわない (Duty ~ 50 %) → 併用の必要あり

# 今後

## 本システム自体の改善

- デジタルフィルタにより悪影響の周波数帯をカット
- 磁場測定により電流-磁場の伝達関数も実装する。

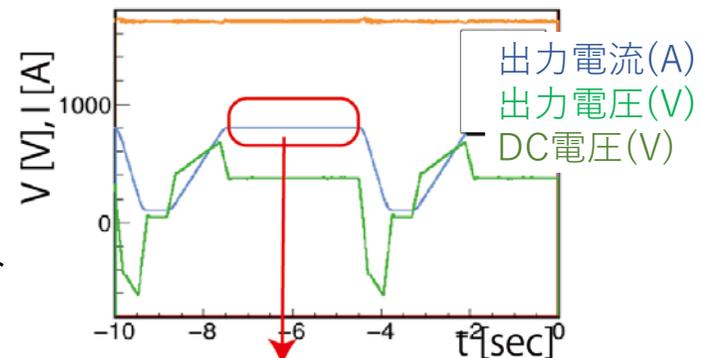
## 取り出しスピル調整

- 本システムと現行のスピル制御と合わせた調整

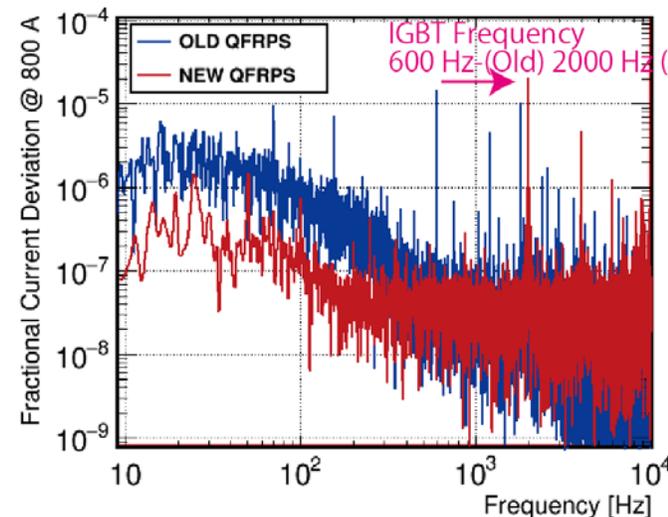
## ハードウェア

- そもそも新電源は一桁リップルが低い。2021年度導入予定。

## 遅い取り出しパターン (5.52 s)



## 新旧電源との比較 (リップル)



$\Delta B \approx 1/10 \Delta I$   
@ > 1 kHz (過去の測定)

➡ 旧電源よりリップルは一桁近く改善

# まとめ

- 主電磁石電流値を使ってチューン変動の予測値をリアルタイムで計算し、補正四極電磁石にフィードフォワードするシステムを考案して、J-PARC MRに実装した。
- 本システムで100 Hz付近のチューン変動を1/3~2/3にできる。
- 本システム単体で、遅い取り出しスピルのDutyを3.2 %から28.1 %に改善した。
- ただし、現行のスパイル制御はDuty 50 %程度にできるので、本システムを利用運転に使用するには、両者を組み合わせた調整が必要である。