

# J-PARC MR

## 次世代LLRF制御システム

J-PARC  
杉山泰之,

田村 文彦, 吉井正人, 大森千広, 長谷川 豪志, 原 圭吾,  
山本 昌亘, 野村 昌弘, 沖田 英史, 島田 太平

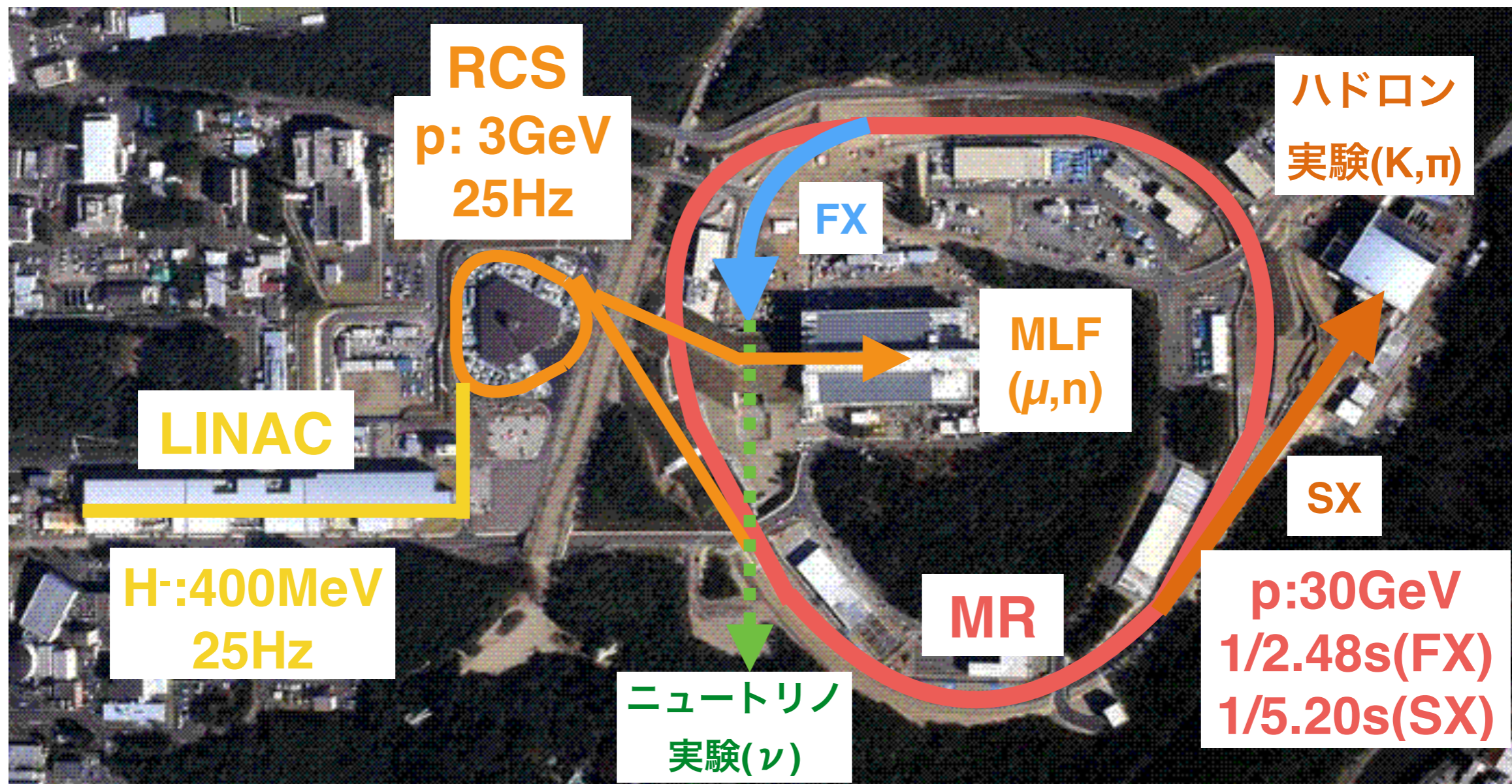


第19回日本加速器学会年会  
2022年10月19日(水)

# J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex)

02/16

- ・ 陽子ビームをLINAC、RCS、MRを組み合わせて30GeVまで加速
  - ・ MRの取り出しサイクル：速い取出し2.48s(FX),遅い取出し5.20s(SX)
  - ・ ニュートリノ実験へ $2.66 \times 10^{14}$ 個の陽子を2.48秒繰返しで取出し：最大515kW

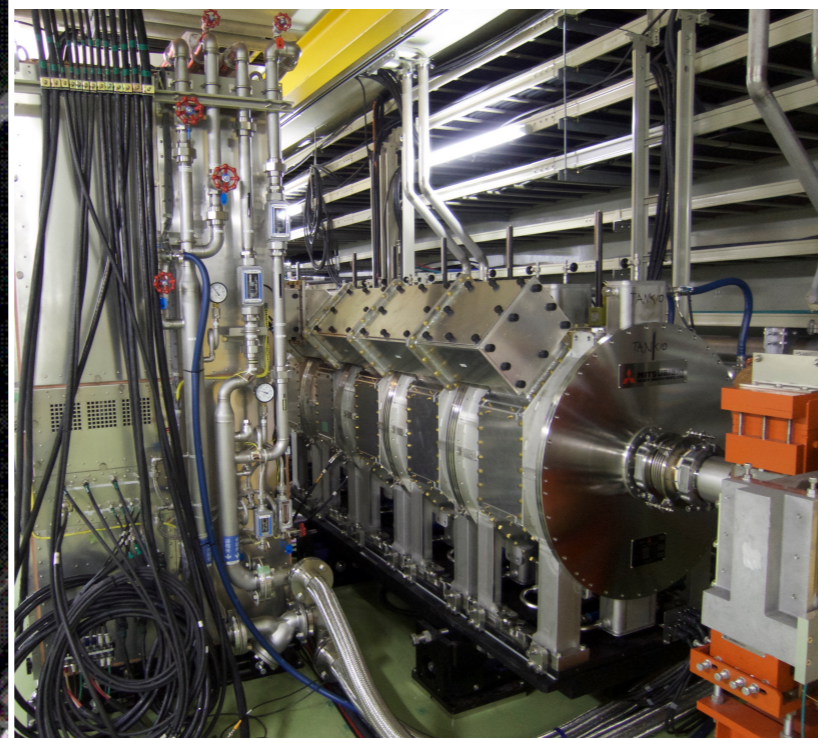


# J-PARC MR RF加速システム

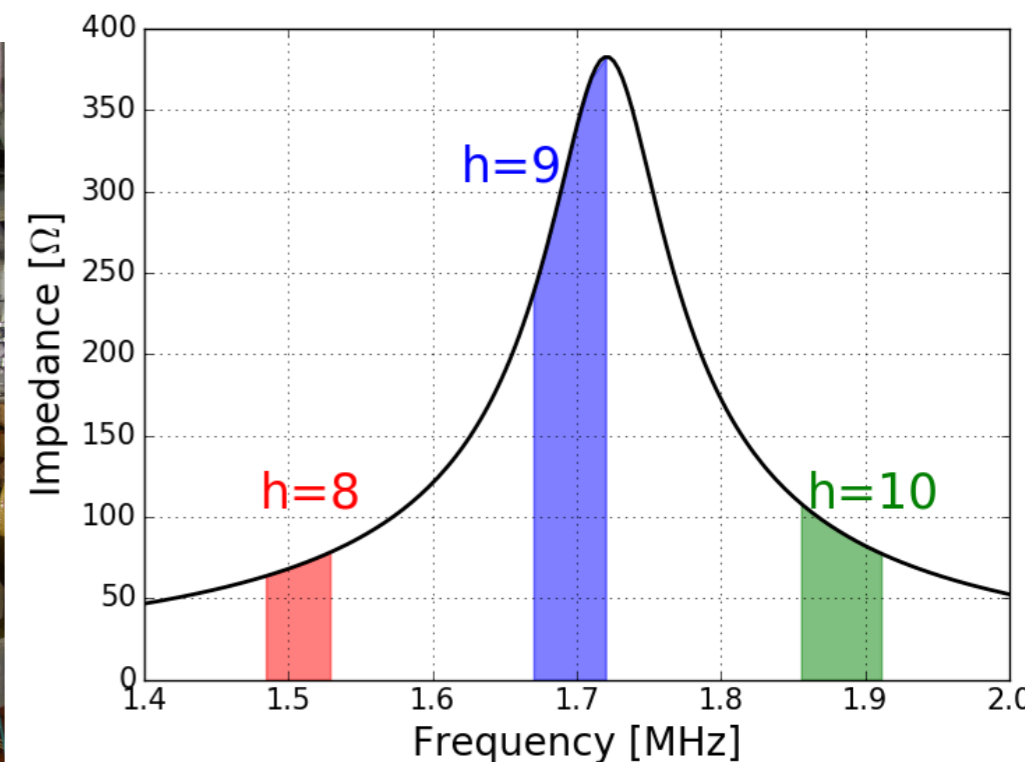
- 10台の金属磁性体空洞で陽子を30GeVまで加速
  - 8台で加速、2台で二倍高調波でのバンチ整形
  - 金属磁性体としてファインメットのコアを採用  
空洞Q値 $\sim 22$ で周辺ハーモニクス無視できず  
→ビームローディング補償が必須
- 2021年までは直線部Cに加速空洞9台  
2021～2022年に直線部Aに2台追加。
  - 直線部Aの電源棟にも制御システムが必要に。

Energy	3~30GeV
加速周波数	1.671~1.721MHz
周回周波数 $f_{rev}$	186~191kHz
加速ハーモニク数	9
バンチ数	8
最大電圧	310kV(加速用) 110kV(2倍高調波)
シンクロトロン 周波数: $f_s$	400Hz(加速開始)~ 30Hz(取り出し前)

MRのRF空洞

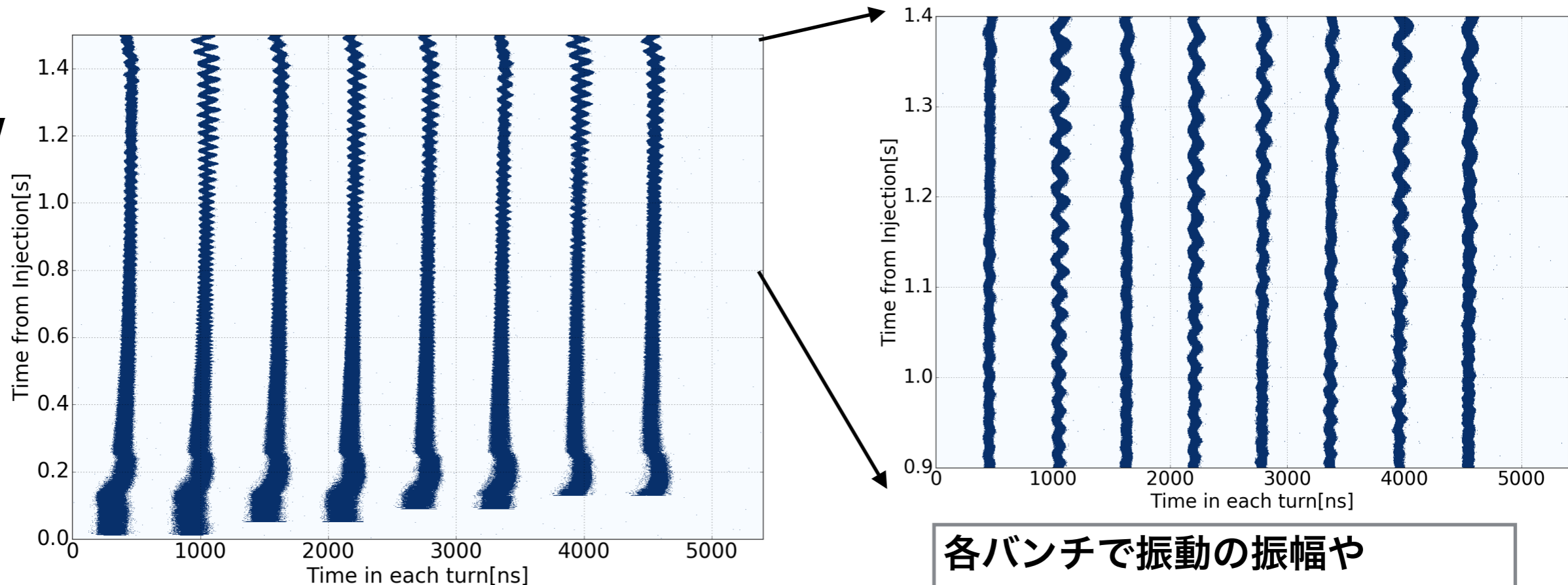


加速空洞のインピーダンス



- ・ ビーム強度増加に伴い450kW以上で各バンチの縦方向振動が増大
  - ・ 振動が大きくなりすぎると加速RFバケツから粒子がこぼれてリング内にロス発生。
- ・ バンチの縦方向振動が強度向上の妨げとなっていた。
- ・ 以下の観点からインピーダンスによって起こるバンチ結合振動の可能性を疑った
  - ・ 強度が増えると顕著になる→ウェイク電圧の強度依存（インピーダンスの影響）を示唆
  - ・ 各バンチの振動位相や振幅が異なる→バンチ結合振動の振動モードの存在を示唆

480kW  
(FX)  
での  
縦方向  
振動

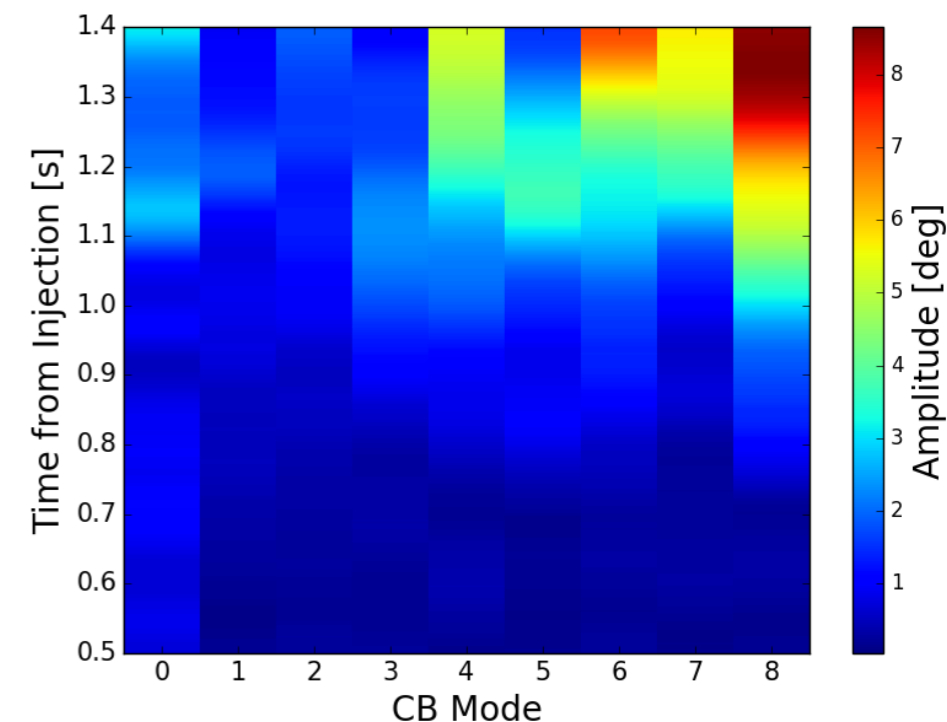


各バンチで振動の振幅や  
位相がバラバラ

# バンチ結合振動解析

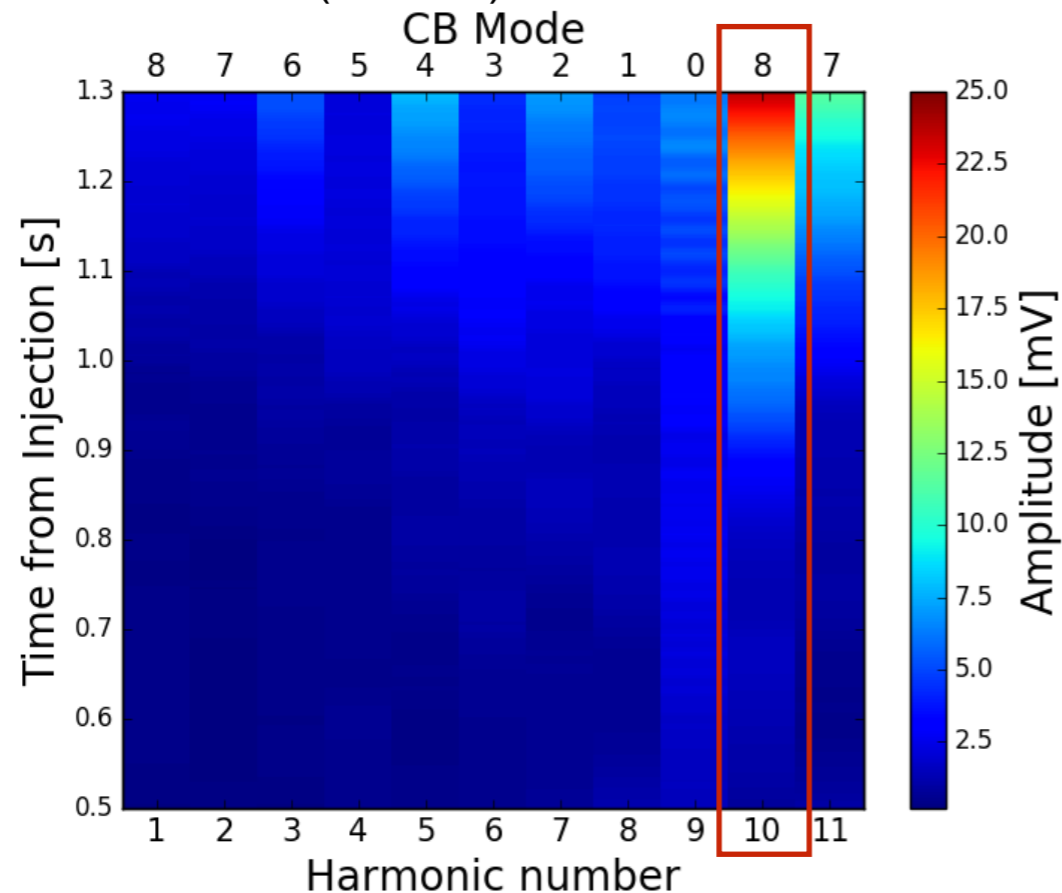
- 各バンチ中心の振動解析から、モードn=8のバンチ結合振動と同定
- ビーム信号スペクトラムもバンチ結合振動モードn=8に相当するサイドバンドで振動大
- 加速周波数(h=9)の隣接ハーモニクス(h=8,10) → 空洞インピーダンス？

バンチ中心振動 モード振幅時間変化

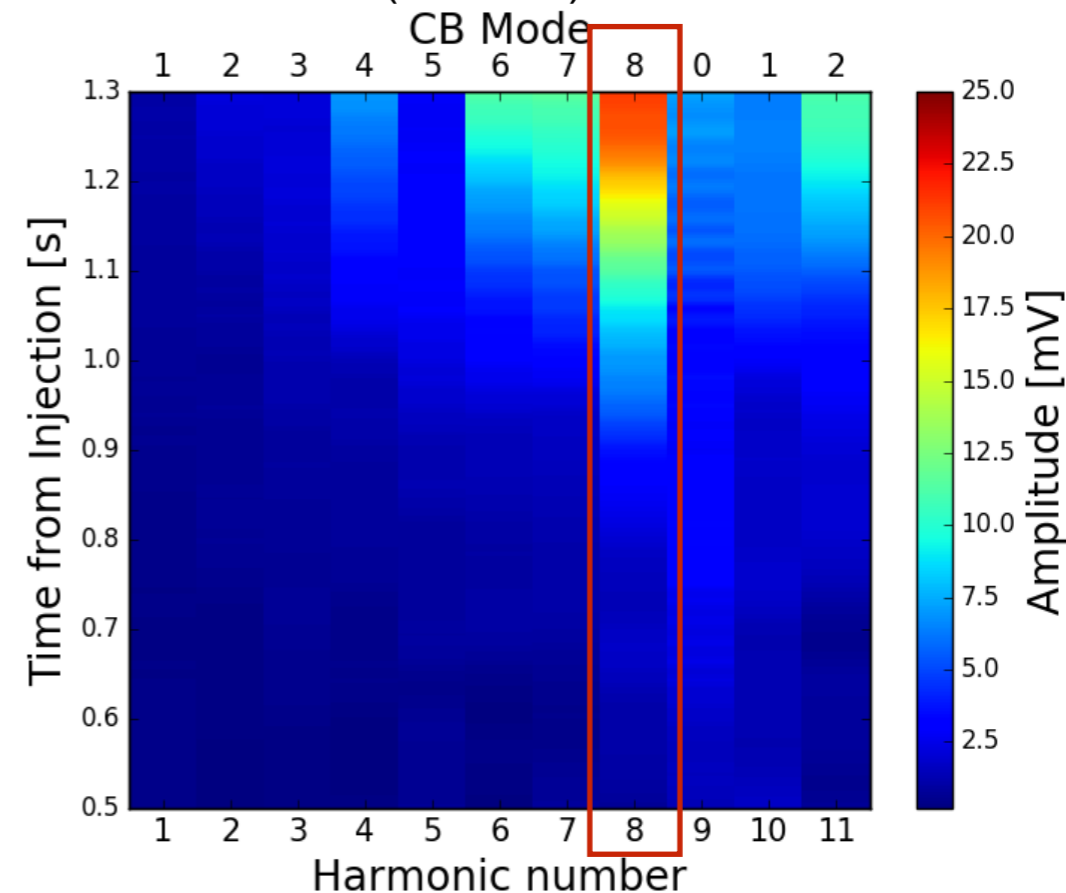


ビーム信号周波数サイドバンド解析

各LSB( $hf_{rev} - f_s$ )の振幅時間変化

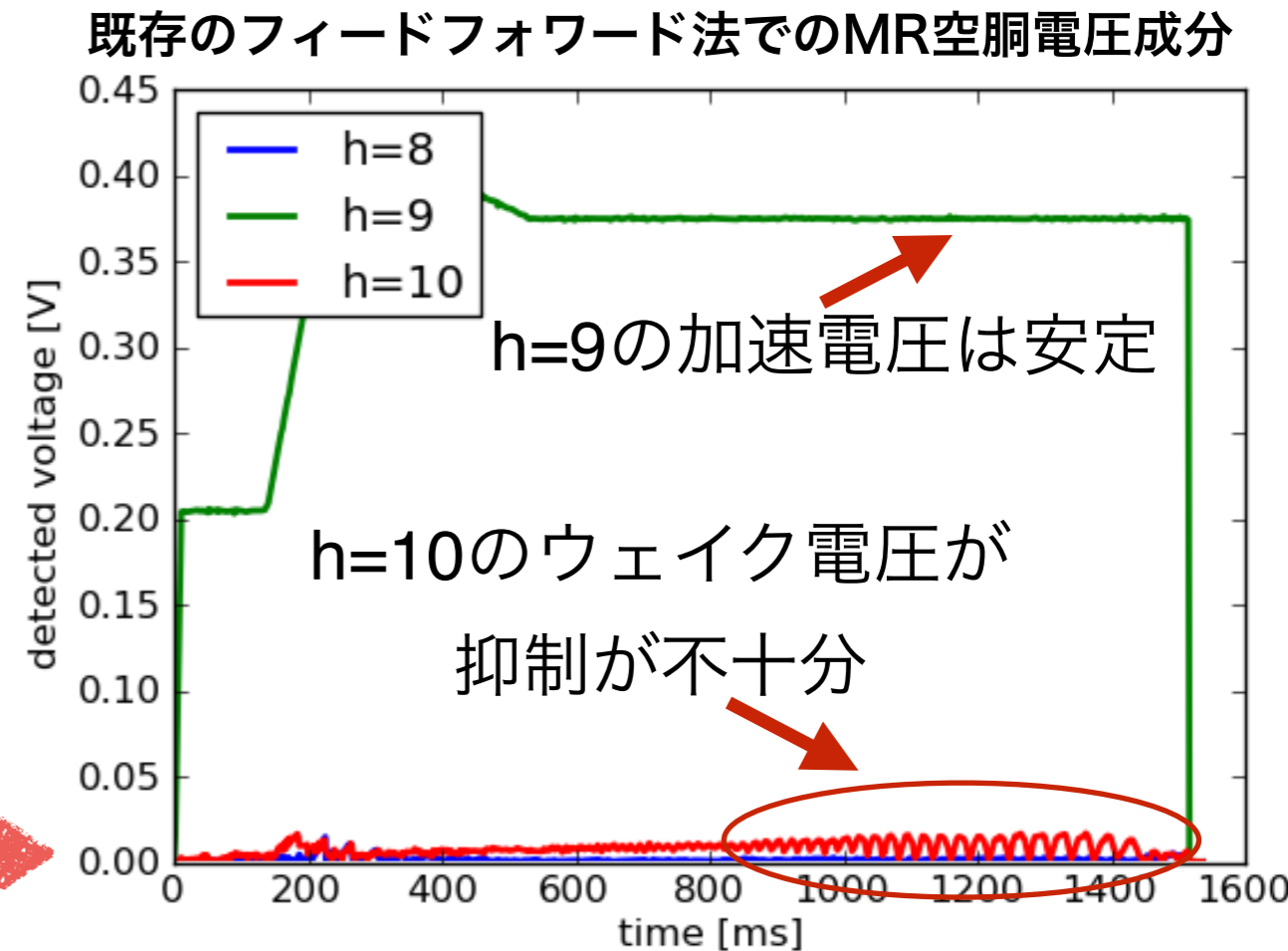
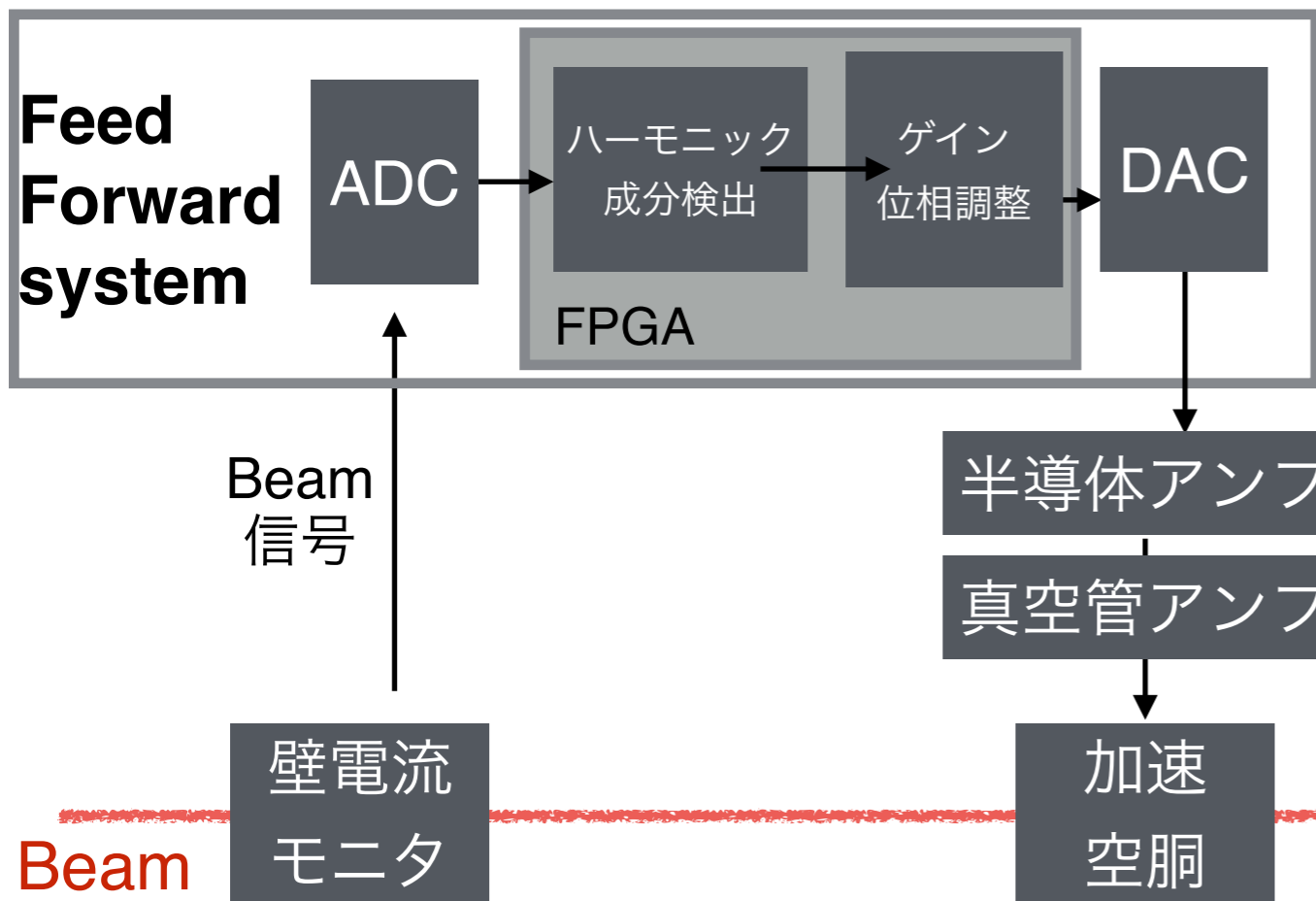


各USB( $hf_{rev} + f_s$ )の振幅時間変化



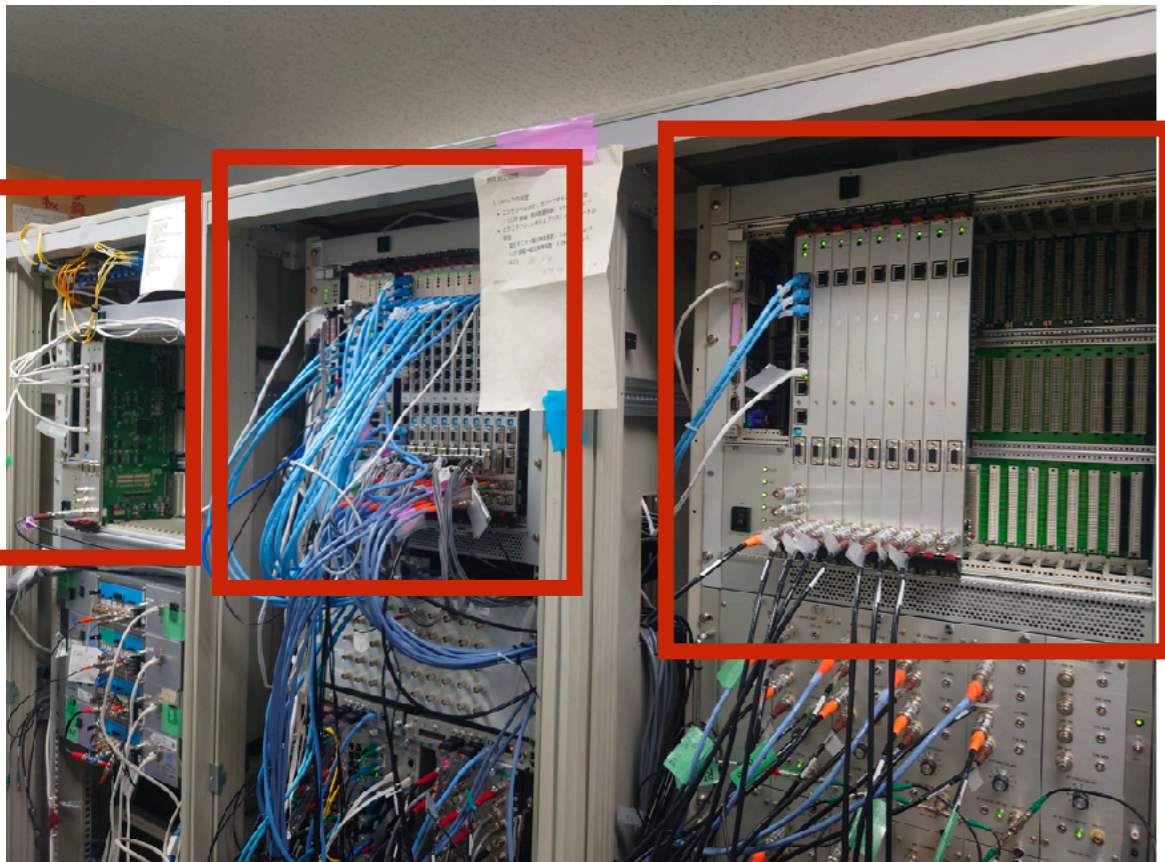
# LLRFの改善点：ビームローディング補償

- 現在のMRのLow-level RF(LLRF)システムではビームローディング補償にフィードフォワード法を使用
  - ビーム信号に含まれるハーモニック成分から補償信号を生成して空洞へ供給
  - 大強度ビームでは真空管アンプの非線形性からウェイク電圧補償が不十分となり、バンチ結合振動を生んでいる可能性。
  - フィードフォワード法に変わるビームローディング補償が必要となった。
- 2019年から次期LLRFシステムの開発に着手。

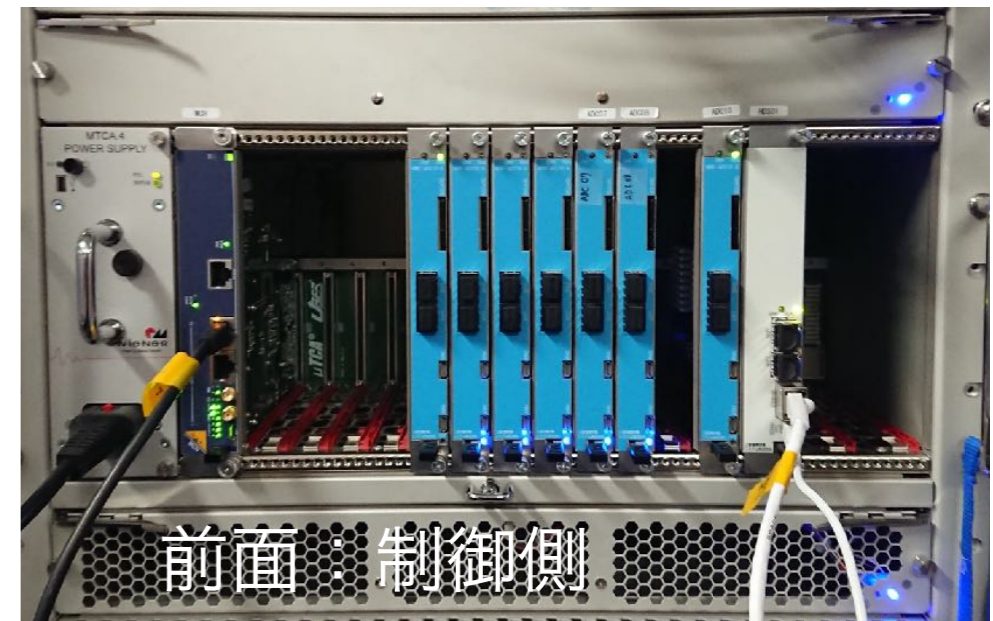


# 次期LLRFの特色：MTCA規格の採用

- ・ J-PARCシンクロトロン(RCS/MR)は建設期からVME規格のLLRFシステムを採用
  - ・ FPGAが古く、実装できる機能に制限、部品枯渇・開発環境継続困難
  - ・ ケーブル経由の高速データ通信。複数ラックにまたがるシステム
- ・ 各国の最新LLRFを参考にして次期システムはMicroTCA.4(MTCA.4)規格を採用
  - ・ 加速に必要な全機能が1シェルフに収まる
  - ・ バックプレーンによる高速データ通信

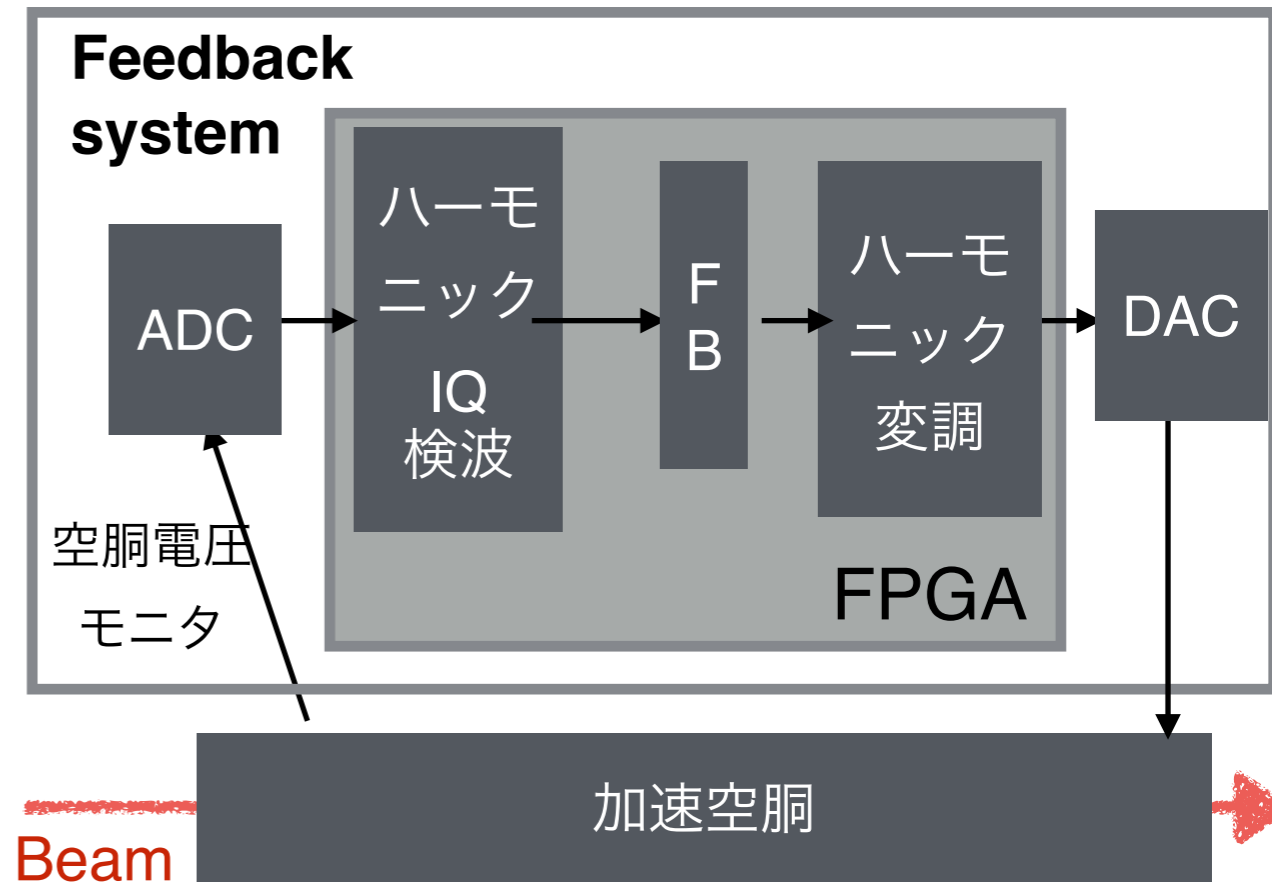


現在のMR LLRF (VME)

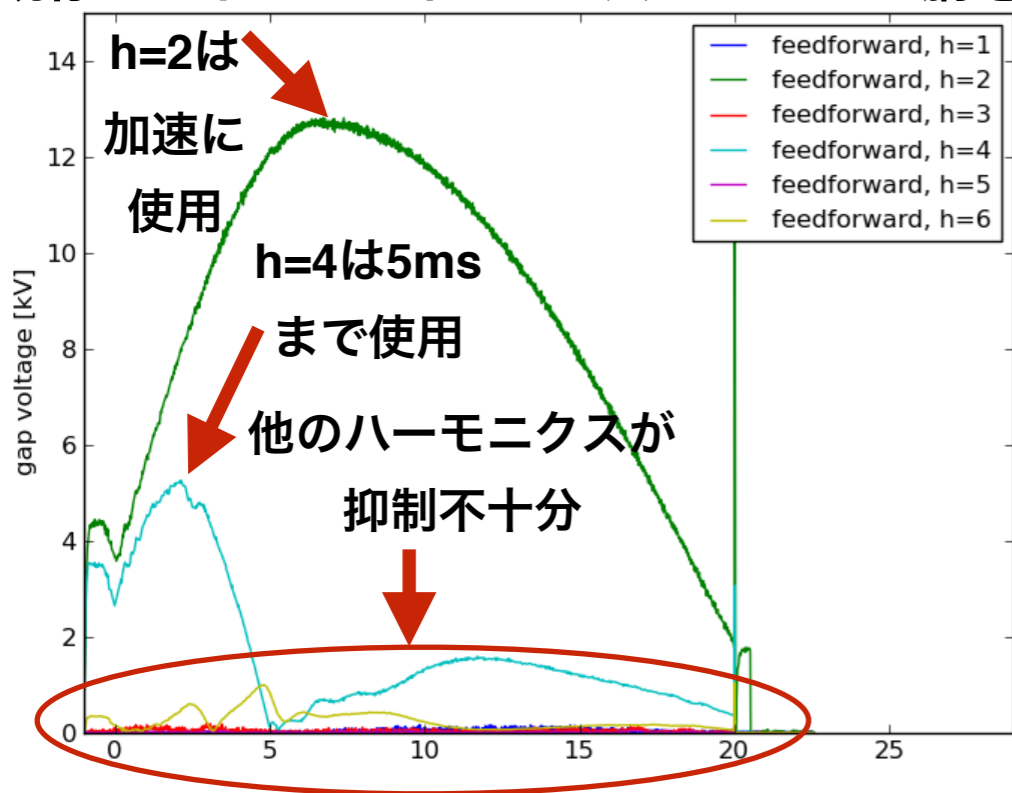


MTCA規格のLLRF

- ・ RCSが2019年に次期LLRFに置換
  - ・ MTCA.4規格ベース
  - ・ 空洞電圧の8ハーモニック成分に対するFeedbackによるIQベクトル電圧制御
  - ・ 周辺ハーモニック成分を大幅に抑制
- ・ MRでも同じ手法を導入して改善を期待。

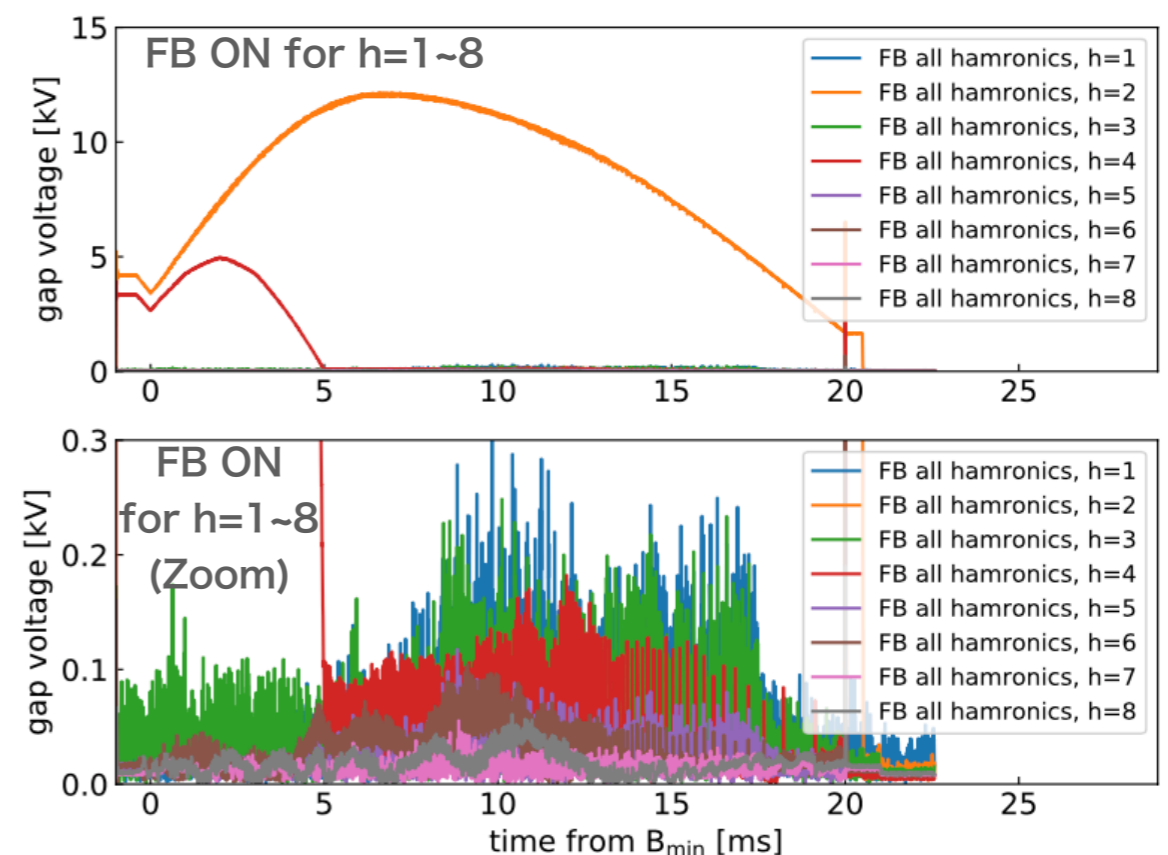


既存のフィードフォワード法でのRCS空洞電圧



RCS  
1MW相当  
でのビーム  
試験結果  
JAEA  
田村氏  
提供

空洞電圧フィードバックでのRCS空洞電圧



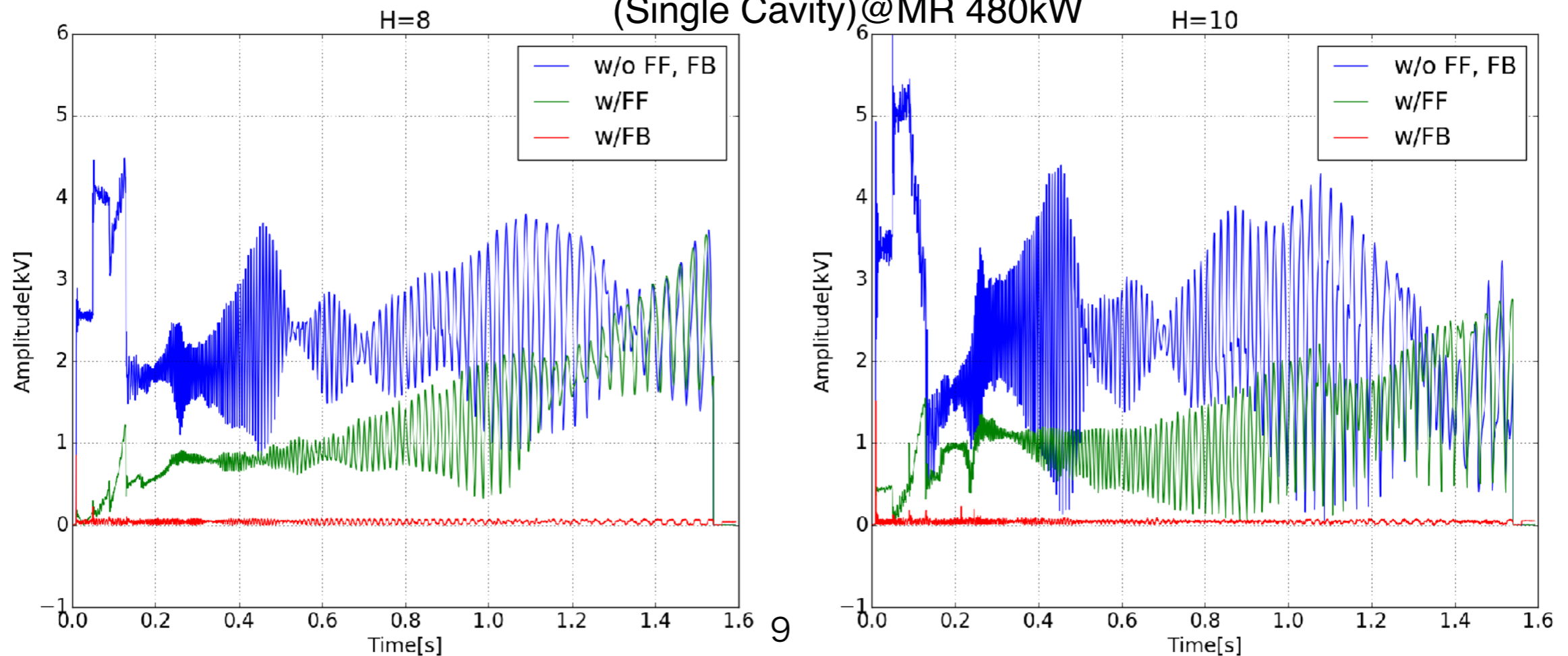


# プロトタイプ機での 空洞電圧フィードバック試験

- MRの次期LLRFシステム全体の更新に先立ち、  
空洞電圧FBのプロトタイプ機を2019年に試験
- H=8,10のウェイク電圧に対する制御試験
  - ウェイク電圧の大幅な抑制に成功



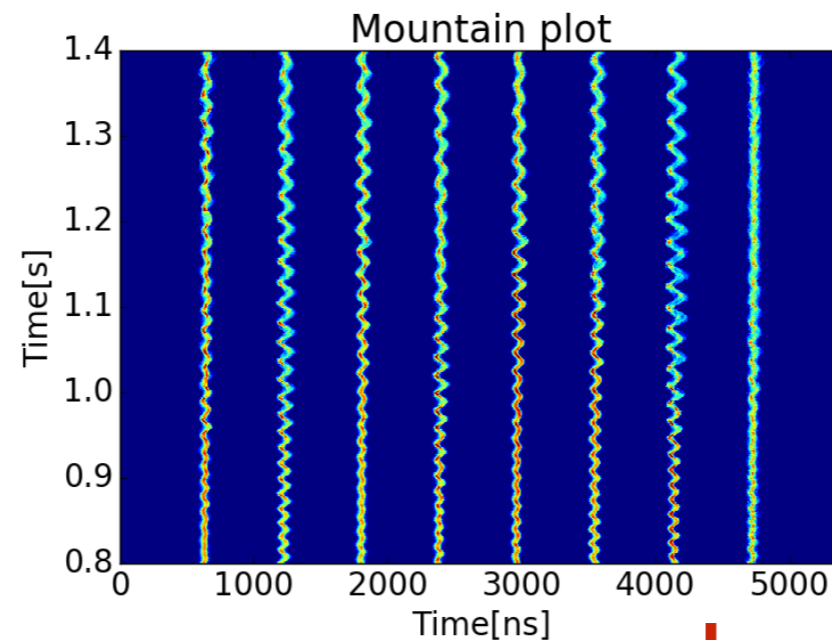
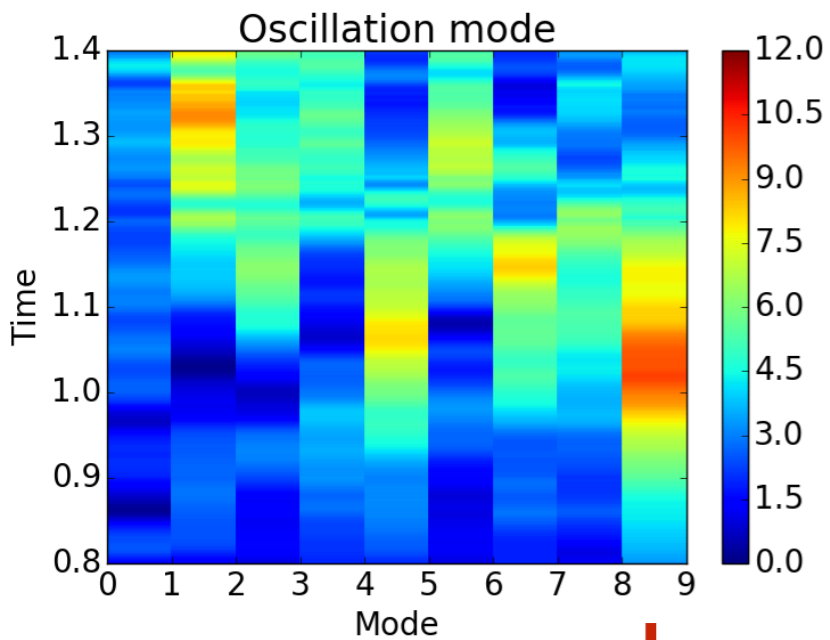
Detected Cavity Voltage  
(Single Cavity)@MR 480kW



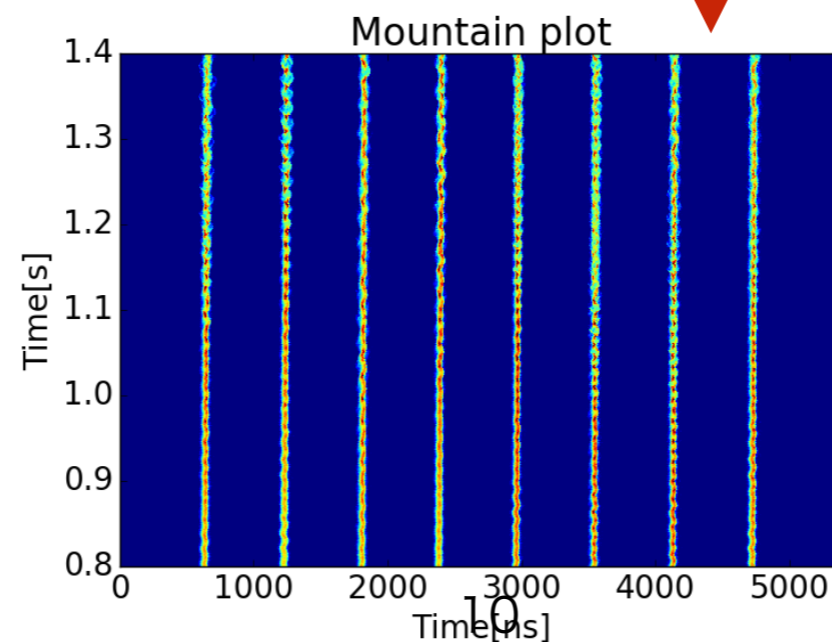
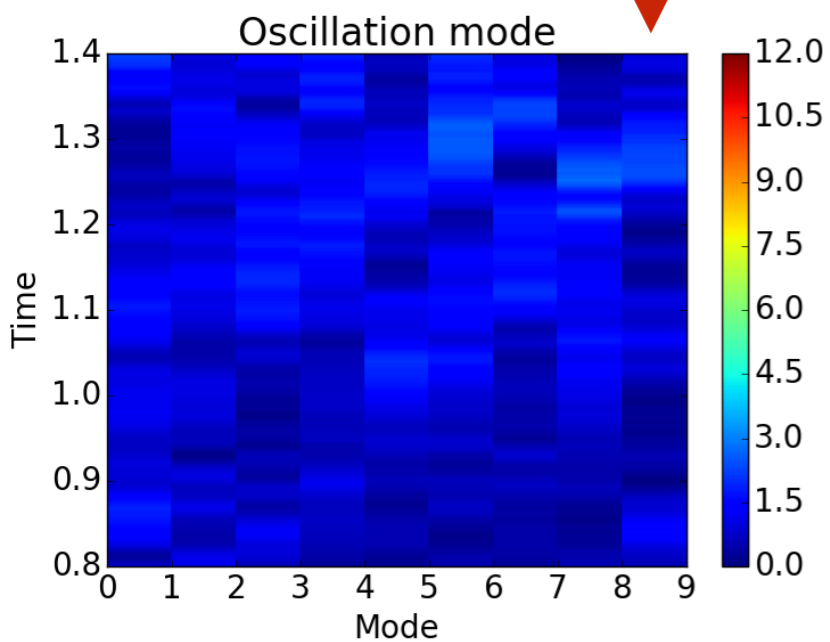
# 空洞電圧フィードバックによるバンチ結合振動抑制

- $h=8,10$ に対する空洞電圧フィードバックによりバンチ結合振動が大幅に抑制
- 500kWを越えても大きな振動無くビーム加速に成功
  - 2020年1月以降における500kWを越える強度での利用運転に貢献

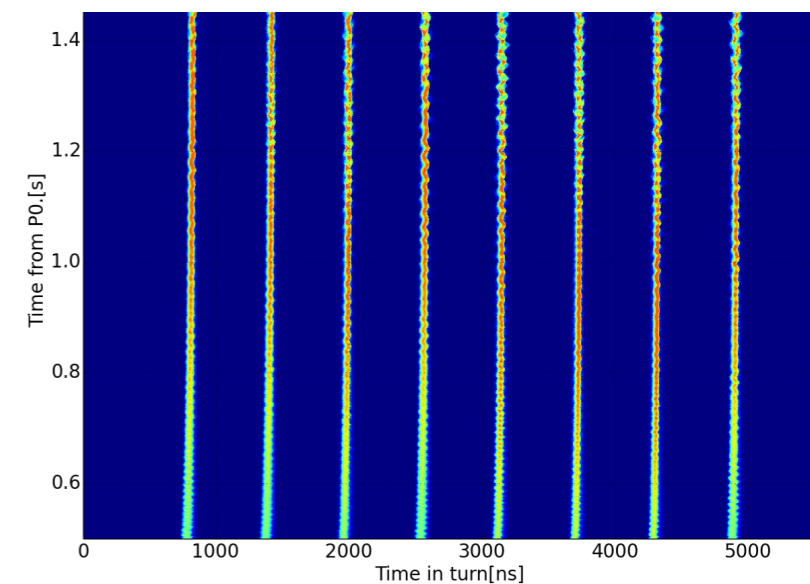
with FF 480kWでのバンチ結合振動



with FB

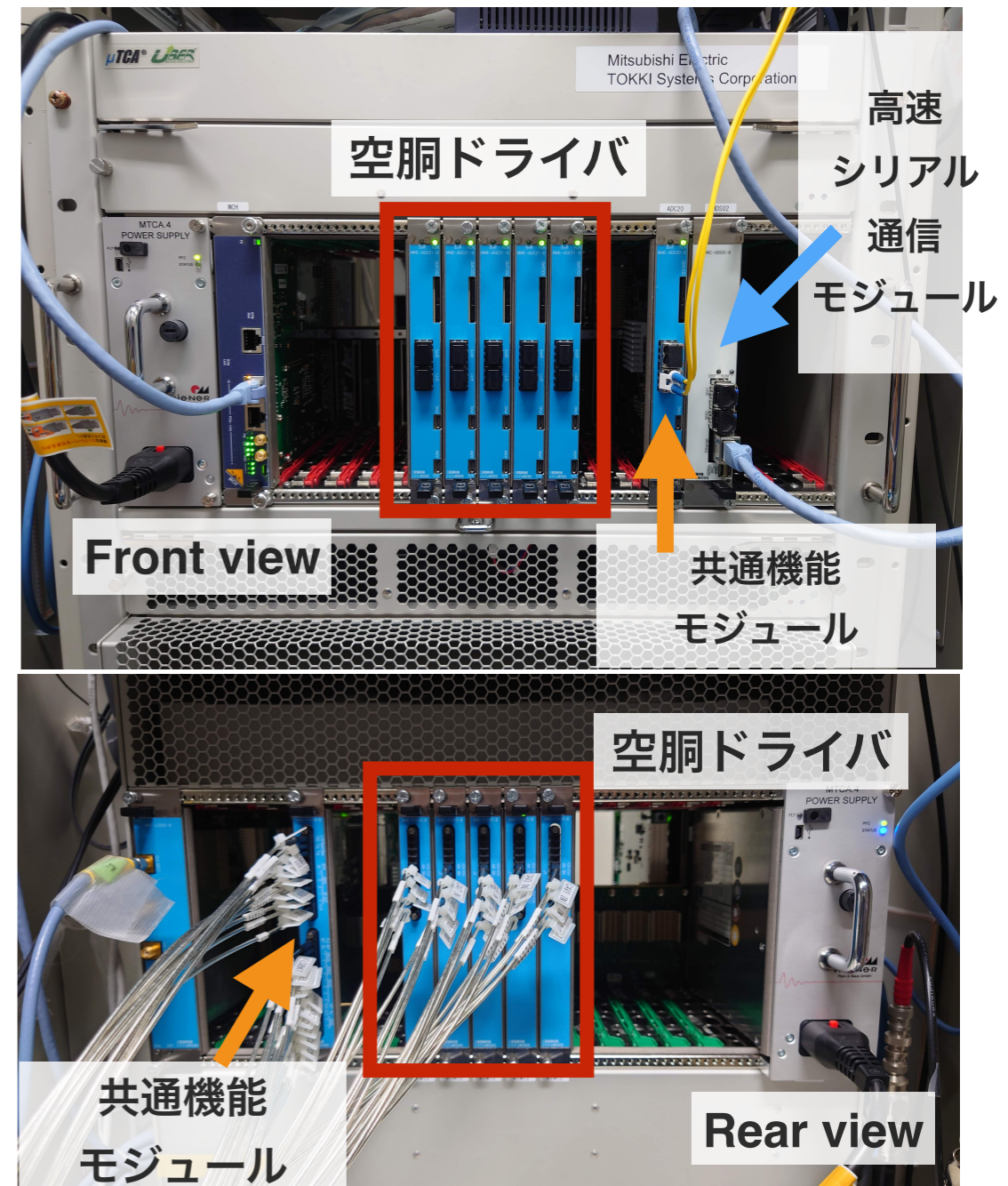


500kWでのバンチ振動  
(FB:  $h=8,10$ )



# MR新LLRFシステム

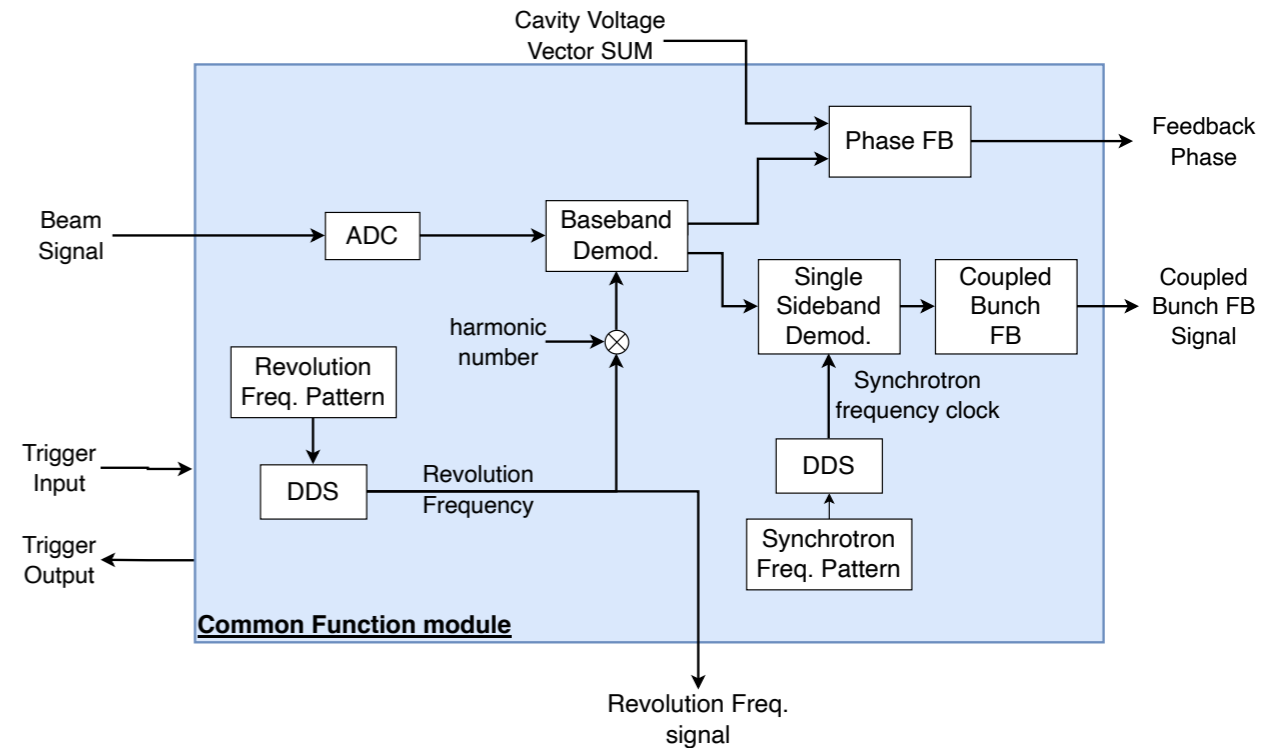
- MTCA.4ベースのLLRFシステム
  - 二つの直線部で二つのLLRFシステム
    - 基本波空洞@直線部CはMTCAフルサイズシェルフのメインシステム
    - 二倍高調波空洞@直線部Aは小型のサブシステム
  - LLRFシステム間は光ファイバ接続してデータ通信
- 主な構成モジュール：三菱電機特機システム製MTCAモジュール
  - 共通機能モジュール
  - 空洞ドライバモジュール
  - 高速シリアル通信モジュール
- 2020年に設計開始、2021年に納入。
- 2022年度に旧LLRFシステムから完全入替を実施し6月からビーム調整開始。



# LLRFモジュールの機能

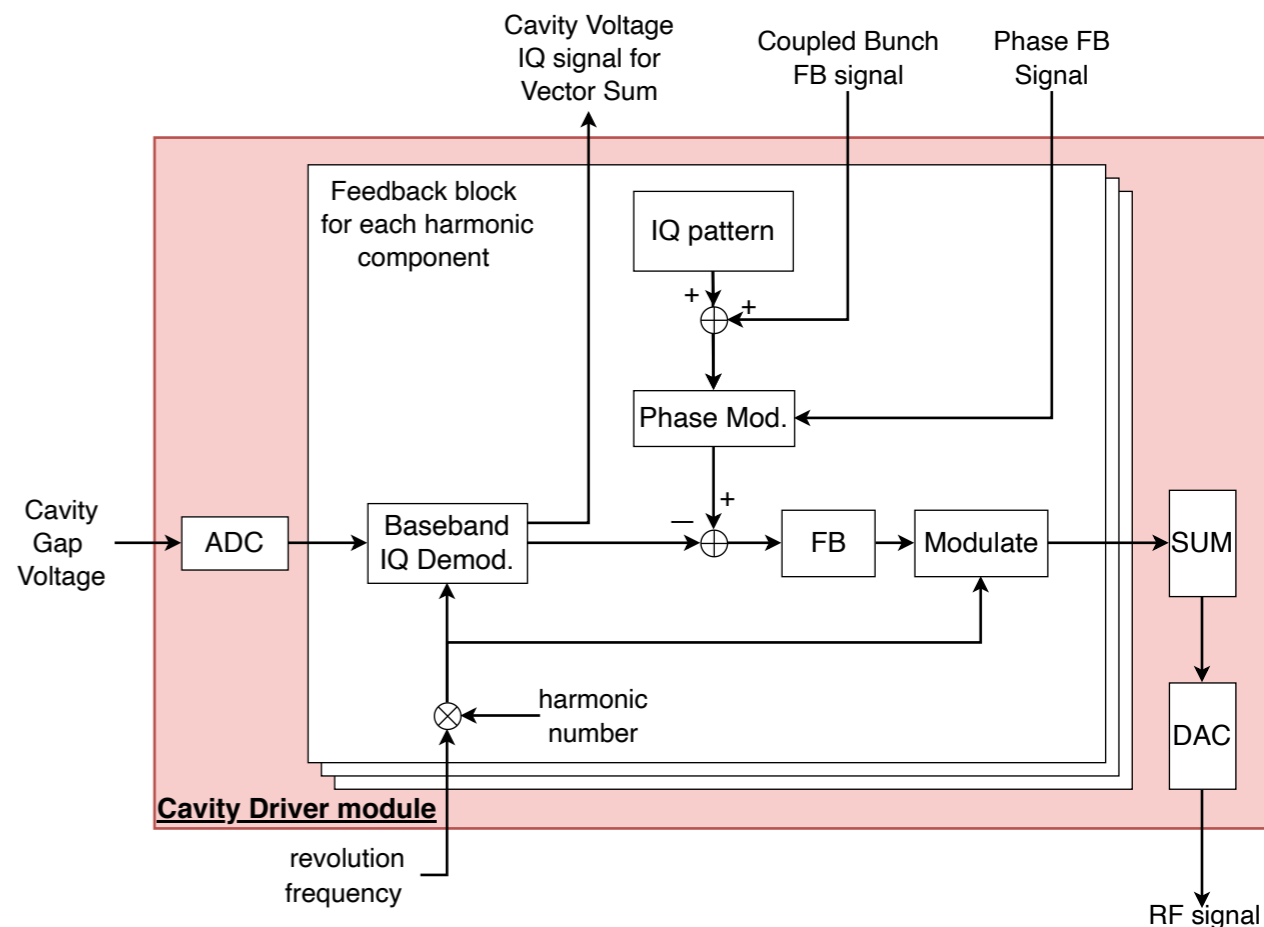
- 共通機能モジュール

- システム全体で使う周波数パターンをDDSで生成してMTCAのバックプレーン経由で分配
- ビーム信号を検波してビームFB
  - 空洞IQベクトル和と比較して位相FB
  - シンクロトロンサイドバンド検波してバンチ結合振動検知



- 空洞ドライバモジュール

- 8ハーモニクス of 空洞電圧IQベクトルFB
  - 検波電圧IQ信号をバックプレーン経由で送信してベクトル和計算
- 1台で2空洞分制御できる。



## メインシステム

- h=9のビーム・空胴電圧信号をMTCAバックプレーン経由で高速シリアル通信。

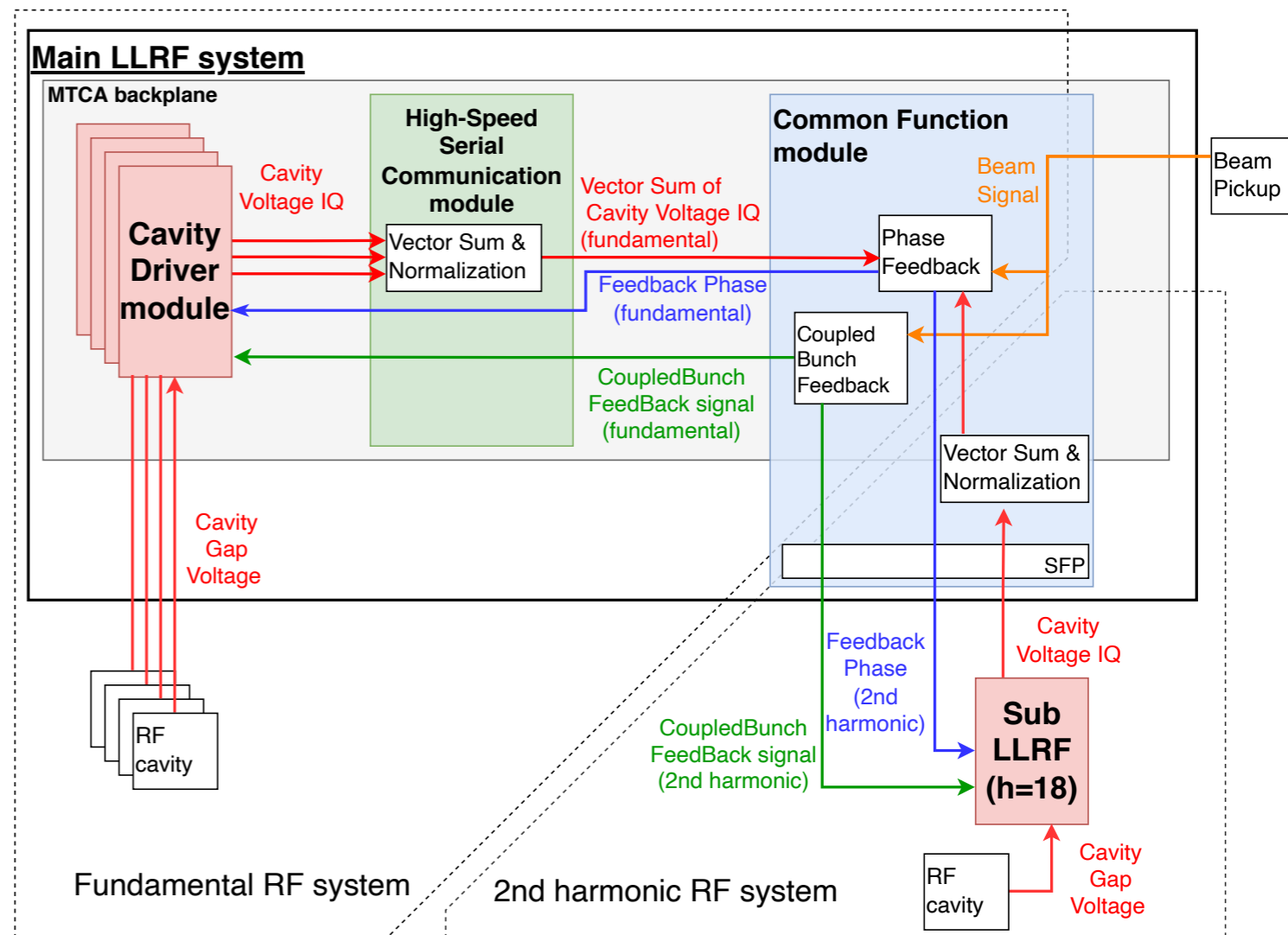
- 空胴ドライバモジュールからの空胴電圧信号を高速シリアル通信モジュールでベクトル和計算して共通機能モジュールへ送信。

- 空胴ベクトル和とビーム信号で位相FB処理し、FB位相をMTCAバックプレーン経由で配布

## サブシステム

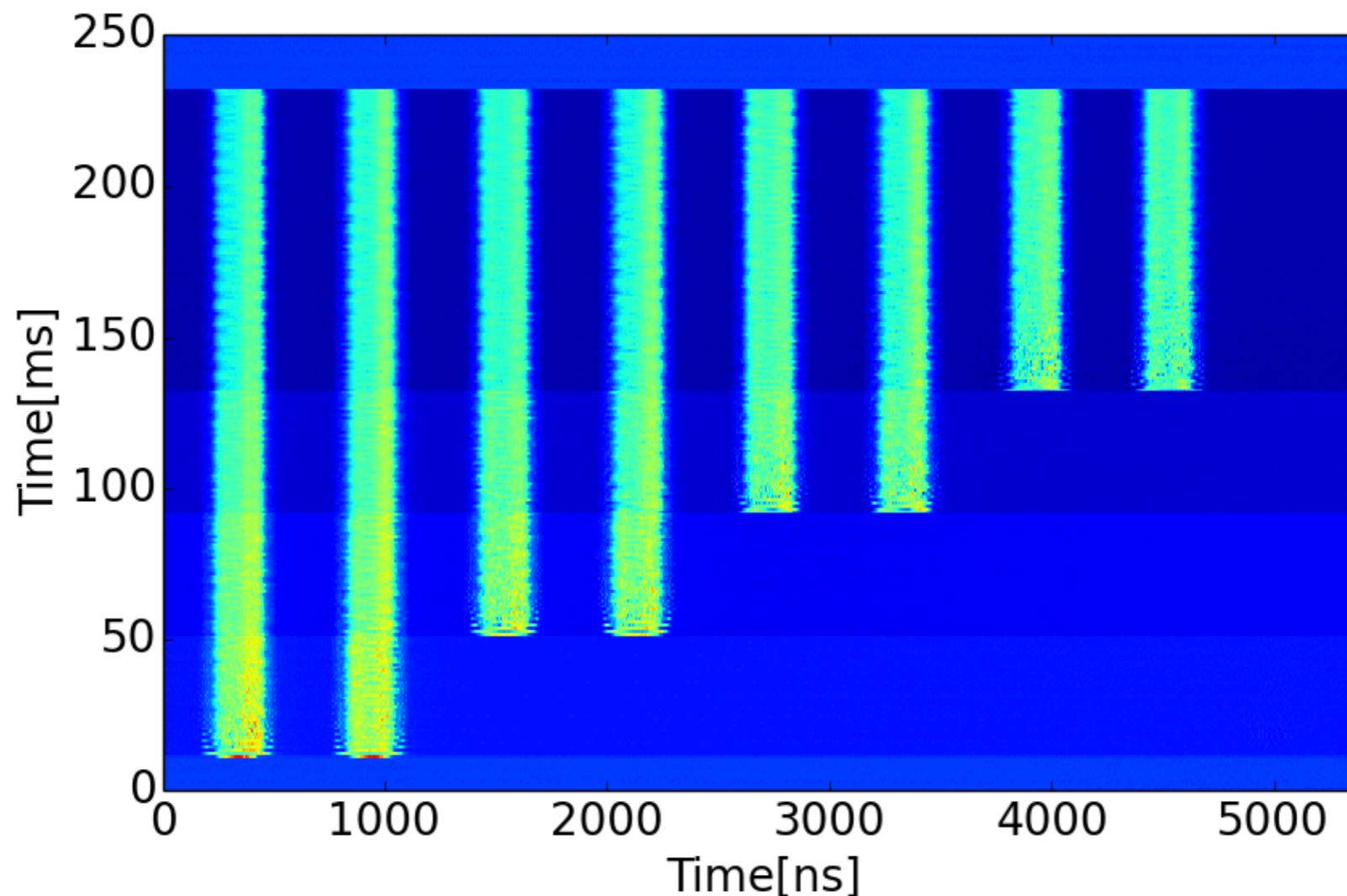
- メインLLRFシステムと光ファイバを介して高速シリアル通信

- h=18の空胴電圧・ビームFB信号を共通機能モジュールと直接やりとり



# 2022年6月ビーム試験

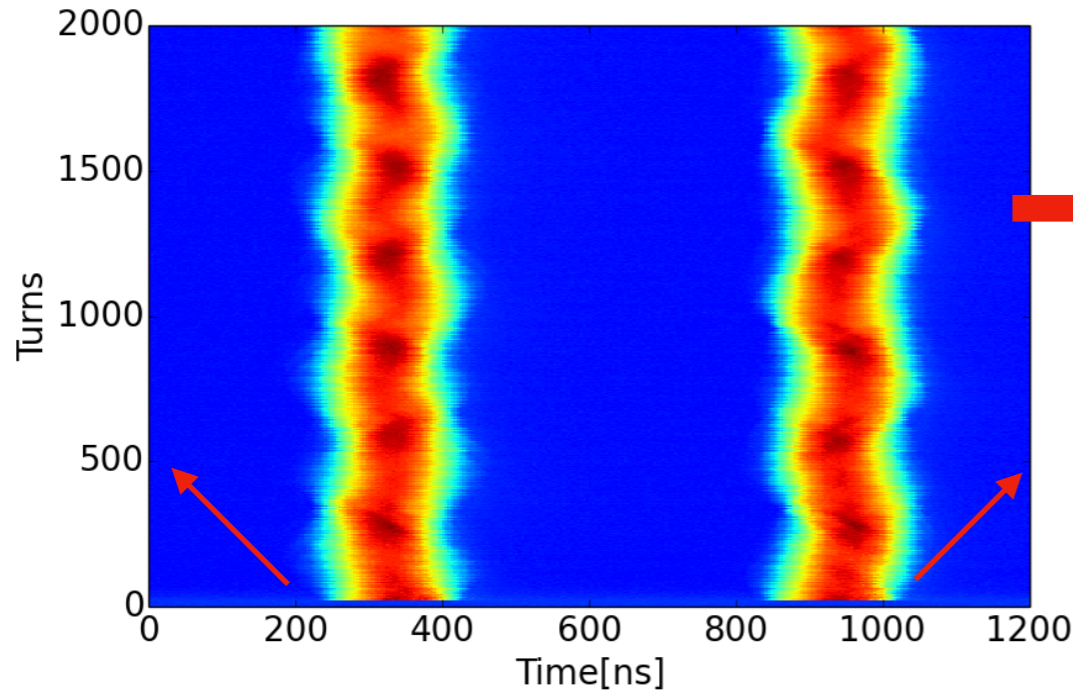
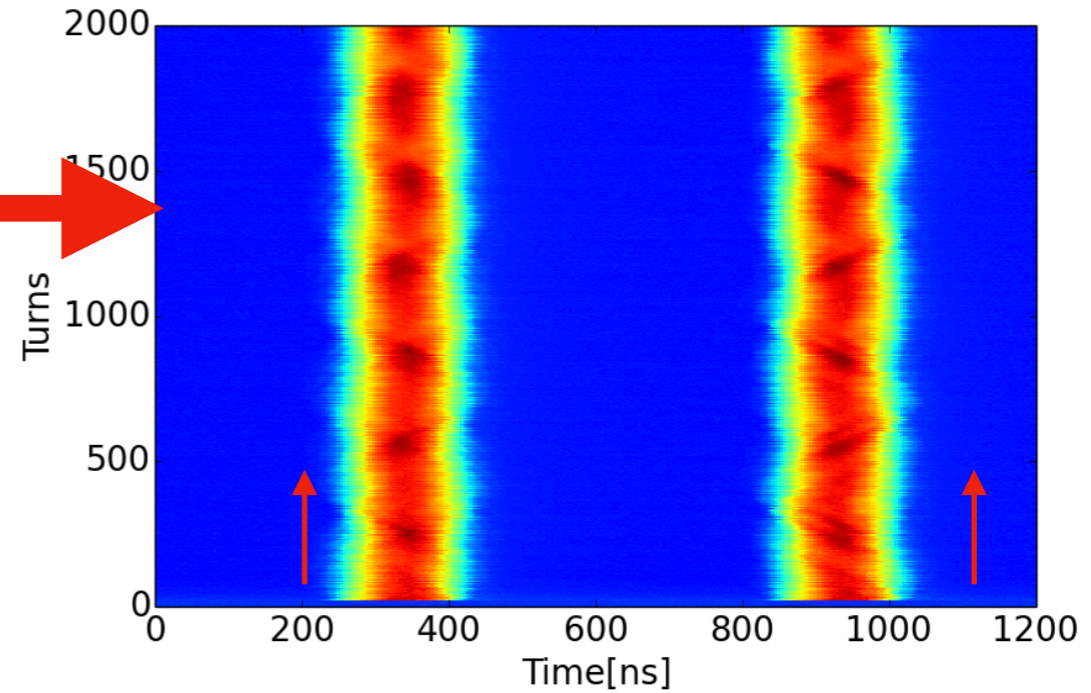
- 2022年6月試験は3GeVビーム周回試験として、空胴電圧FBの動作確認とビームが安定に入射・周回出来るかを確認した。
  - $2.4e14$  pppのビームが正しく入射し、大きなバンチ結合振動せずに周回出来た。
- 加速試験は2022年11月を予定。
  - これまでよりも早い、1.36秒サイクルでの加速を予定。



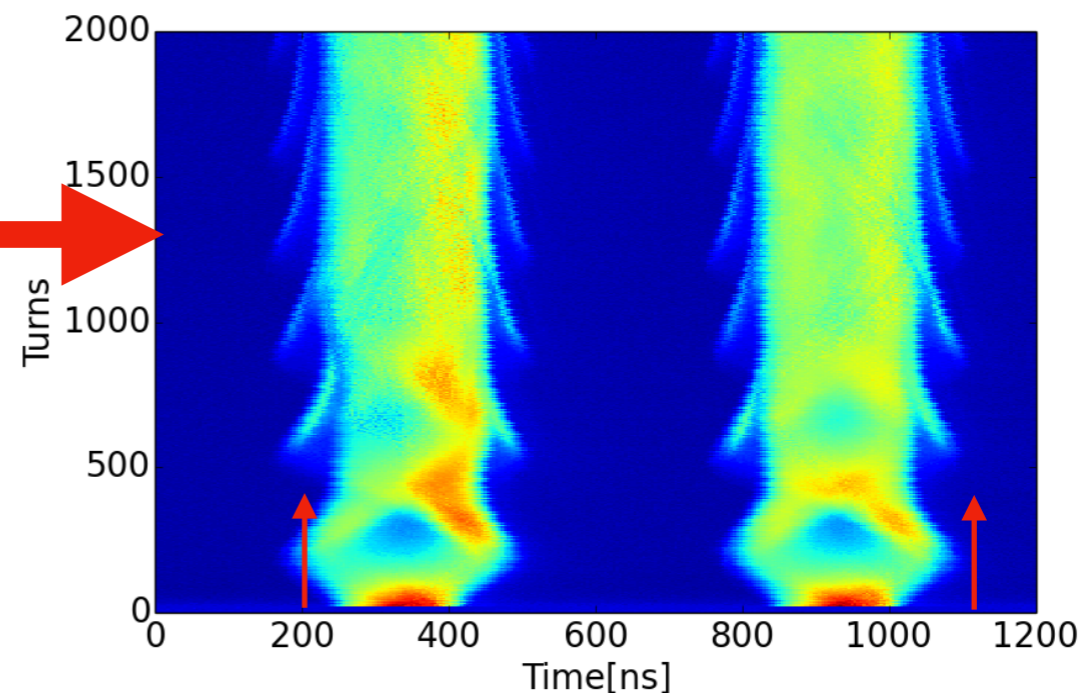
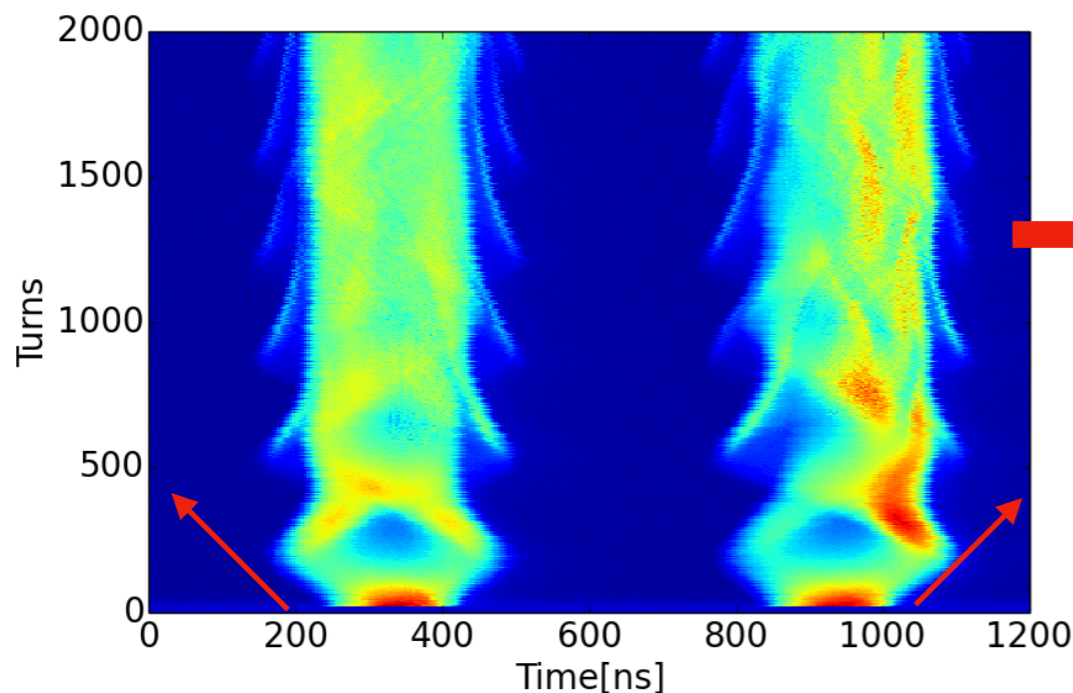
Run89 Shot#2575  
K1 ~K4 8bunches  
Chop width: 456ns  
Macro:500 $\mu$ s  
Thin:96/128  
(Power:2.4e14ppp)  
(FB:P=16,l=64)

# 空胴電圧FBによる入射バンチの安定化

- 基本波空胴: $h=6\sim 12$ , 二倍高調波空胴:  $h=15\sim 21$  で空胴電圧をFB制御
- 基本波のFB対象ハーモニックを $h=6\sim 12$ まで広げることで入射バンチのバンチ結合振動を大強度ビームで大幅に抑制出来た

基本波を $h=8\sim 10$ のみFB制御基本波を $h=6\sim 12$ でFB制御

二倍高調波あり



# まとめ

- ・ J-PARC MRではニュートリノ実験への速い取出し(FX)で515kWを達成し、更なる強度向上に向けてスタディを進めている。
- ・ バンチの縦方向振動が500kWの強度到達を妨げる一因となっていた。
  - ・ ビーム信号の周波数成分解析はRF空洞のウェイク電圧の影響を示唆。
- ・ 従来のLLRFのビームローディング補償が不十分となったと判断し、次世代LLRFシステム開発に2019年より着手。
  - ・ 2019年にプロトタイプ機をインストールして、ウェイク電圧の抑制およびバンチ結合振動の抑制に成功。2020年以降の強度500kWを越える利用運転に貢献。
- ・ 完成したLLRFシステムは2021年にMRに設置、2022年に置き換え完了。
  - ・ 2022年6月末のビーム試験で大強度3GeVビームの安定な周回に成功。
  - ・ 11月よりビーム加速試験と利用運転を行う予定。