

J-PARC主リングにおける 縦方向バンチ結合振動 フィードバックシステム

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,
古澤 将司, 山本 昌亘, 野村 昌弘, 島田 太平

第15回日本加速器学会年会 ハイブ長岡

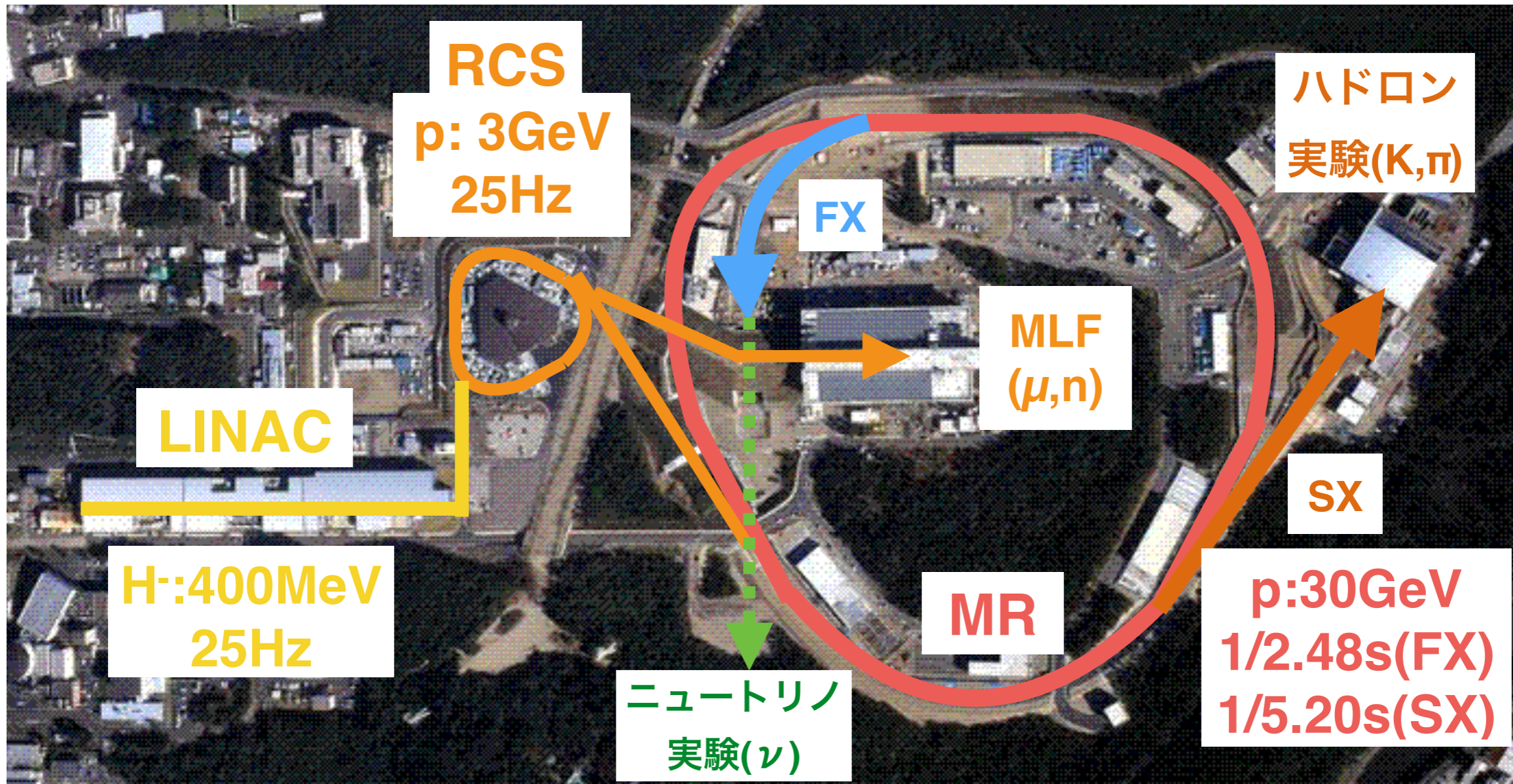
2018年8月10日(金)

Outline

- Introduction
- バンチ縦方向振動の解析
- Feedbackシステム開発
- Feedback試験

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex)

- ・ 陽子ビームをLINAC、RCS、MRを組み合わせて30GeVまで加速
- ・ MRでは取り出しサイクルが、速い取出し2.48s(FX),遅い取出し5.20s(SX)の二種類。
- ・ 利用運転では ビーム強度をRCS:500kW、MR: 500kW(FX), 50kW(SX)まで達成
- ・ RCS:1MW, MR:500kW(FX)を越えるビーム強度を目指してスタディを進めている。



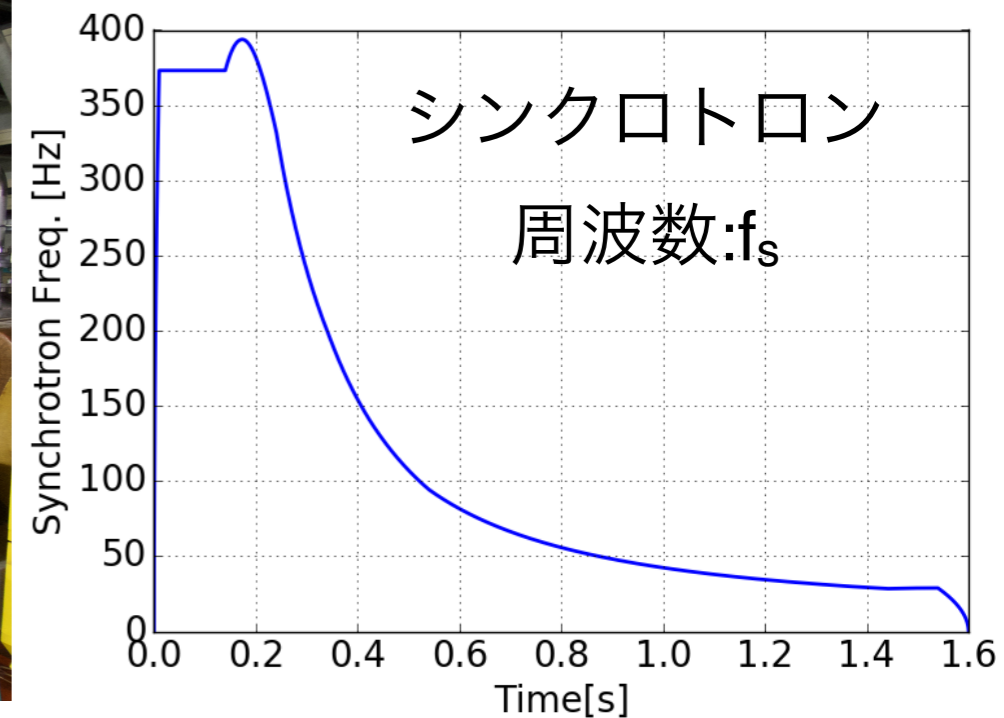
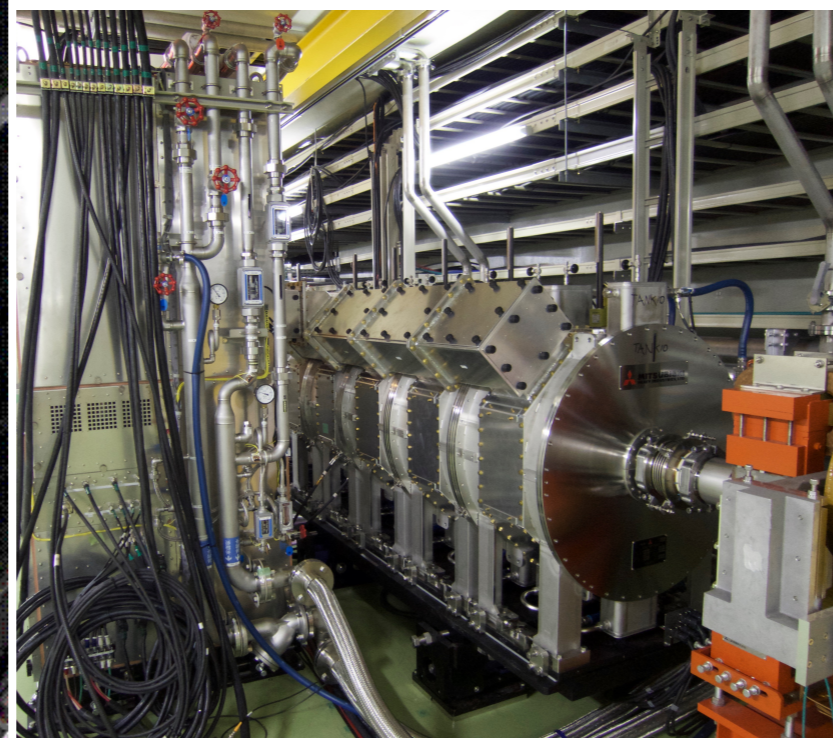
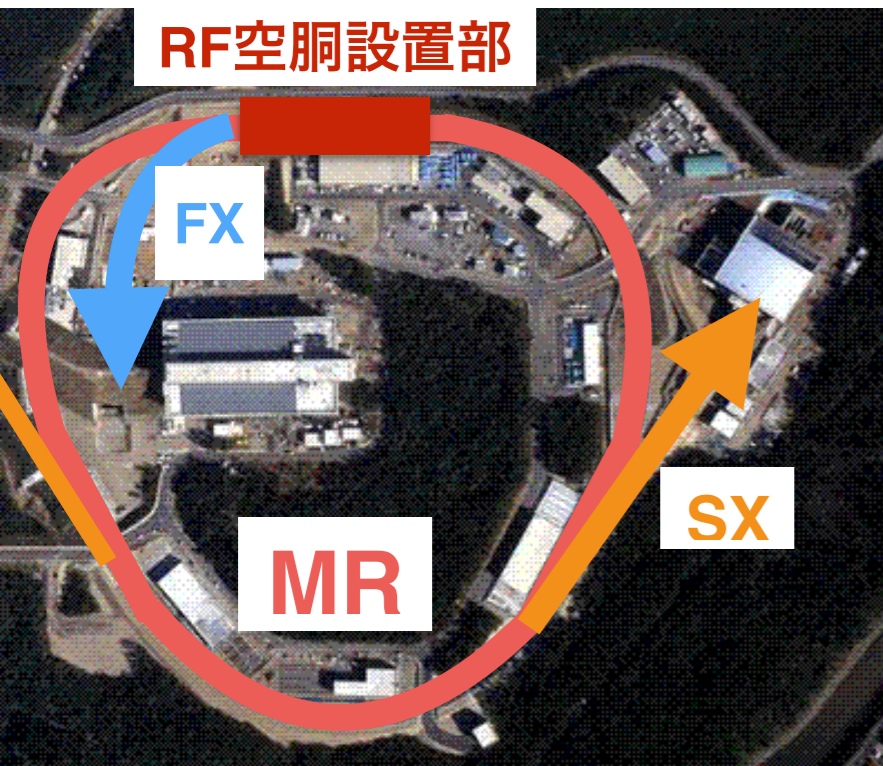
J-PARC 主リング(MR)におけるRF加速

04/15

- 9台の金属磁性体空洞で陽子を30GeVまで加速
 - 6~7台で加速し、2台で二倍高調波でのバンチ整形
- 9個のバケツに8バンチ：ビーム信号に様々な成分
- 加速周波数の変化に伴ってシンクロトロン周波数も変化

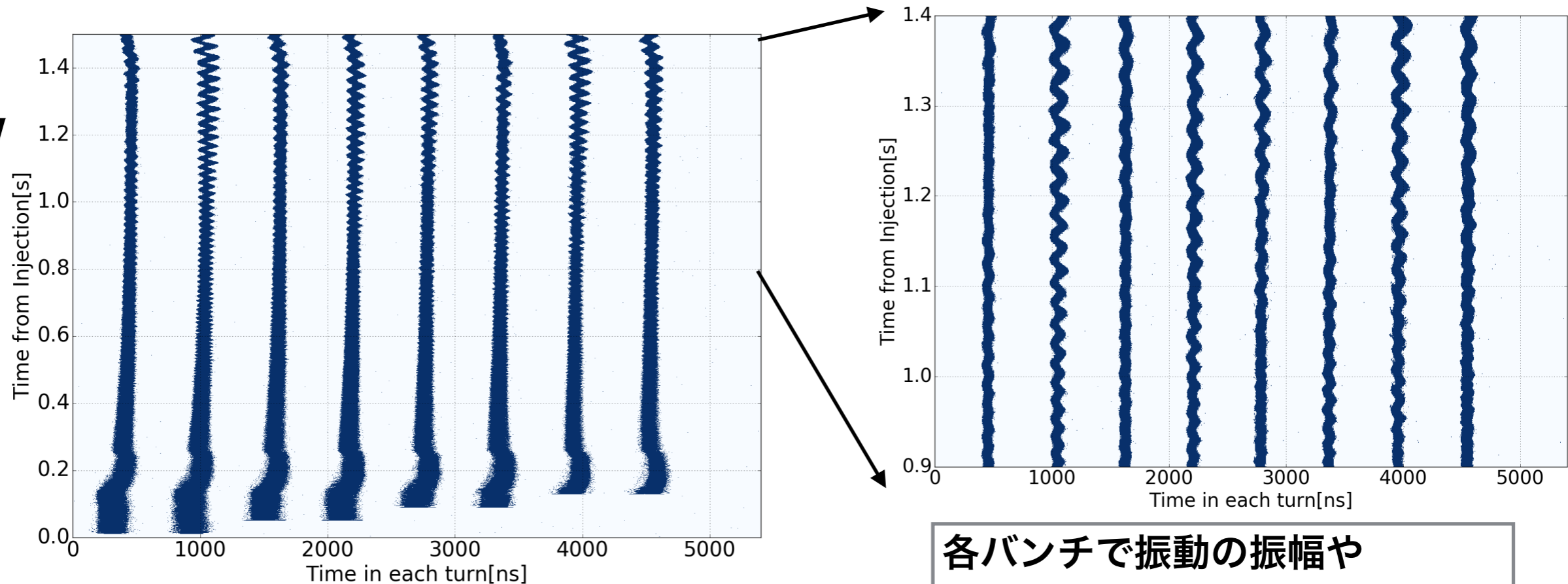
Energy	3~30GeV
加速周波数	1.671~1.721MHz
周回周波数 f_{rev}	186~191kHz
加速ハーモニック数	9
バンチ数	8
最大電圧	310kV(加速用) 110kV(2倍高調波)
シンクロトロン周波数: f_s	400Hz(加速開始)~ 30Hz(取り出し前)

MRのRF空洞



- ・ ビーム強度増加に伴い各バンチの縦方向振動が増大→バンチ毎の運動量のばらつきが増える。
 - ・ 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る。
- ・ 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

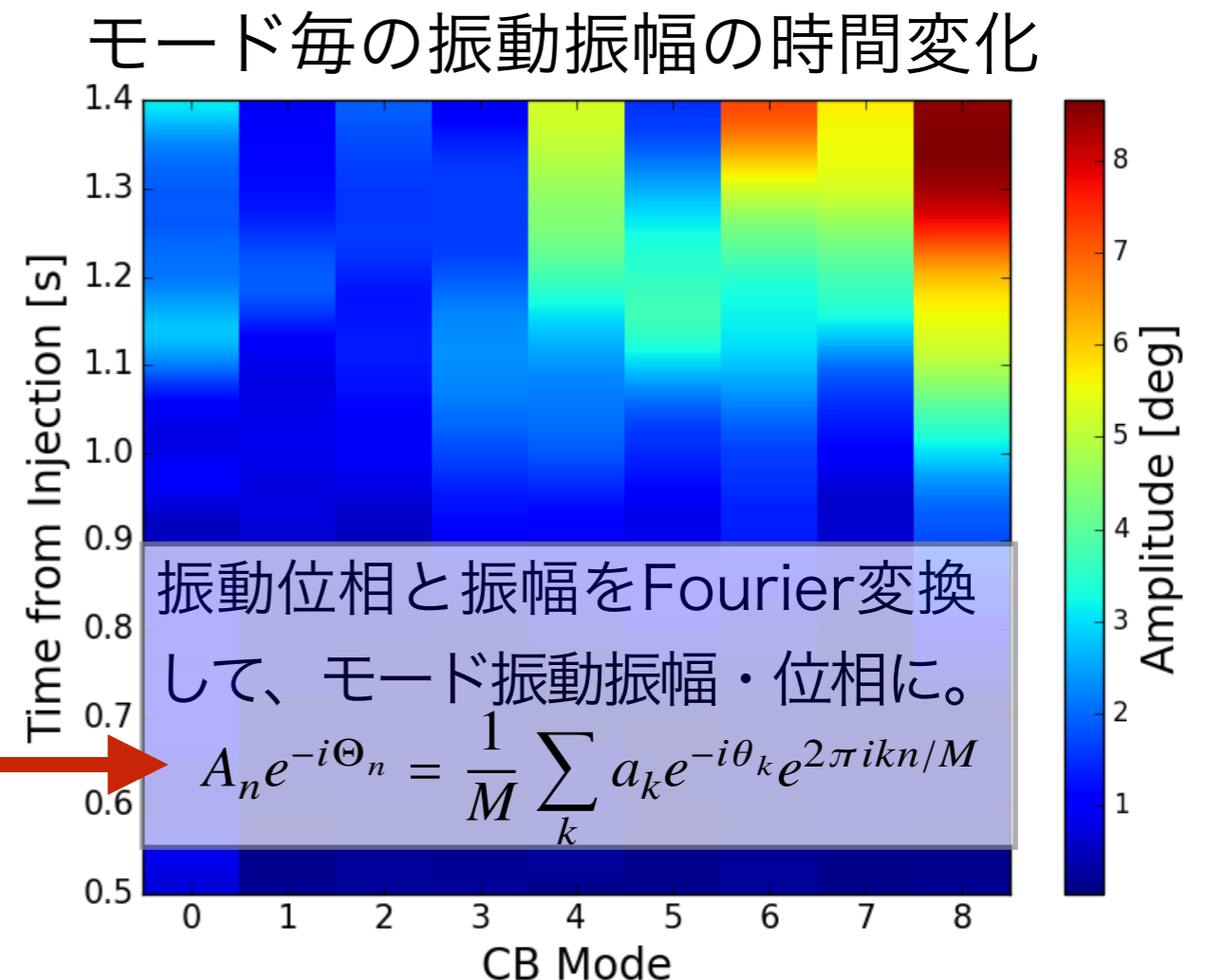
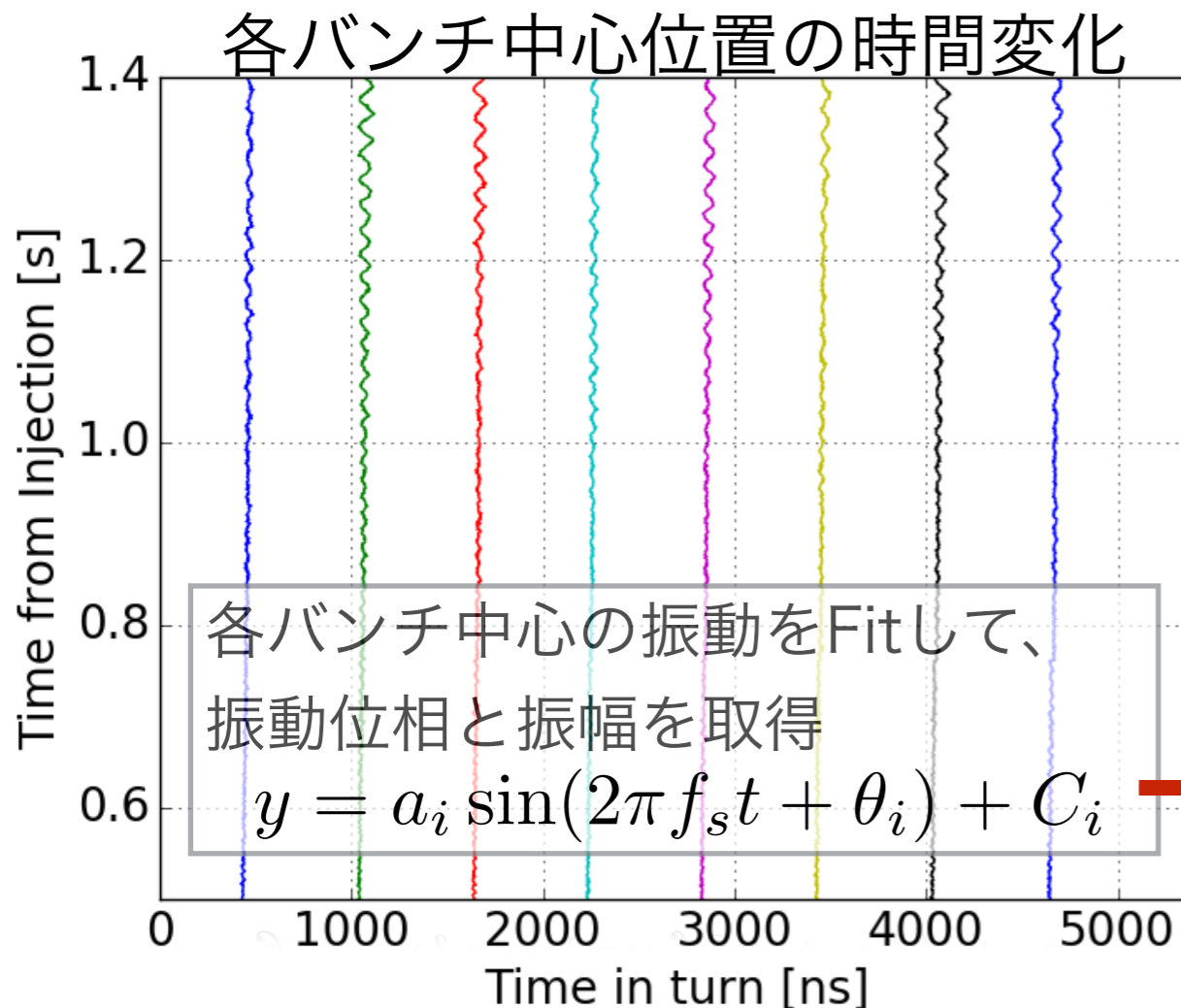


各バンチで振動の振幅や
位相がバラバラ

バンチ結合振動対策

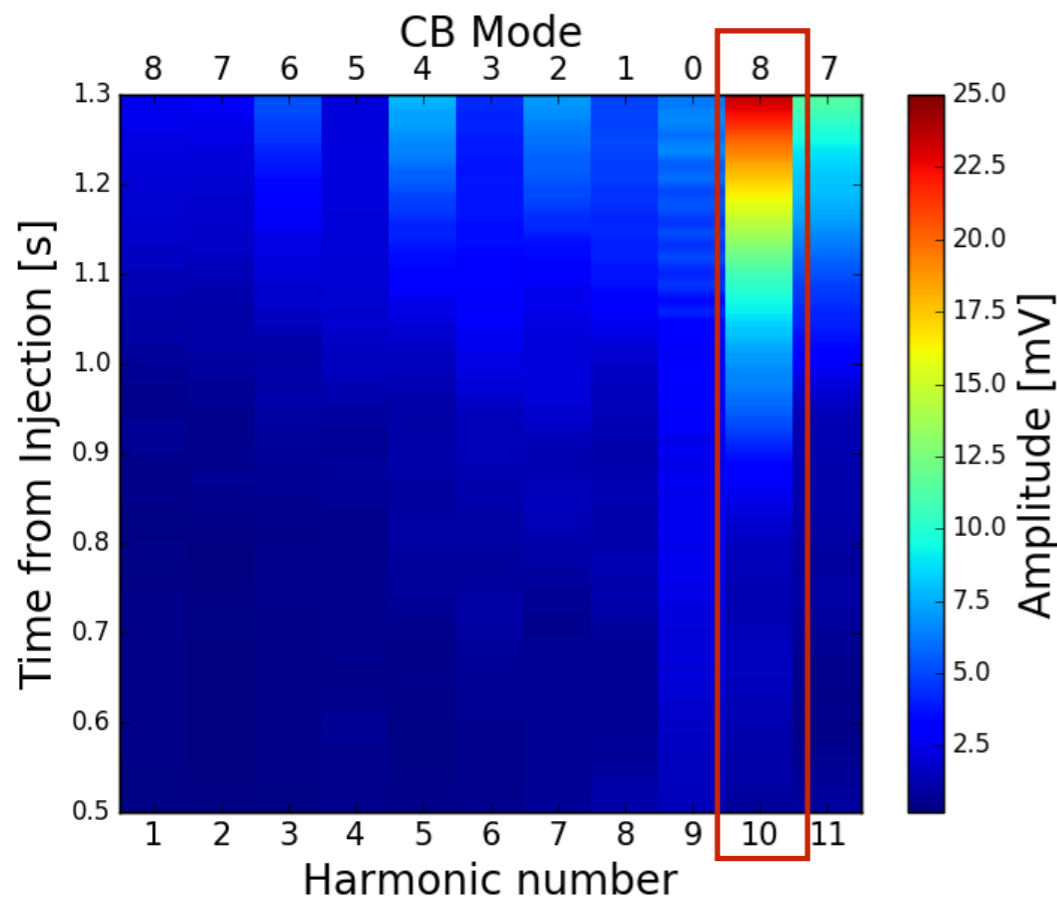
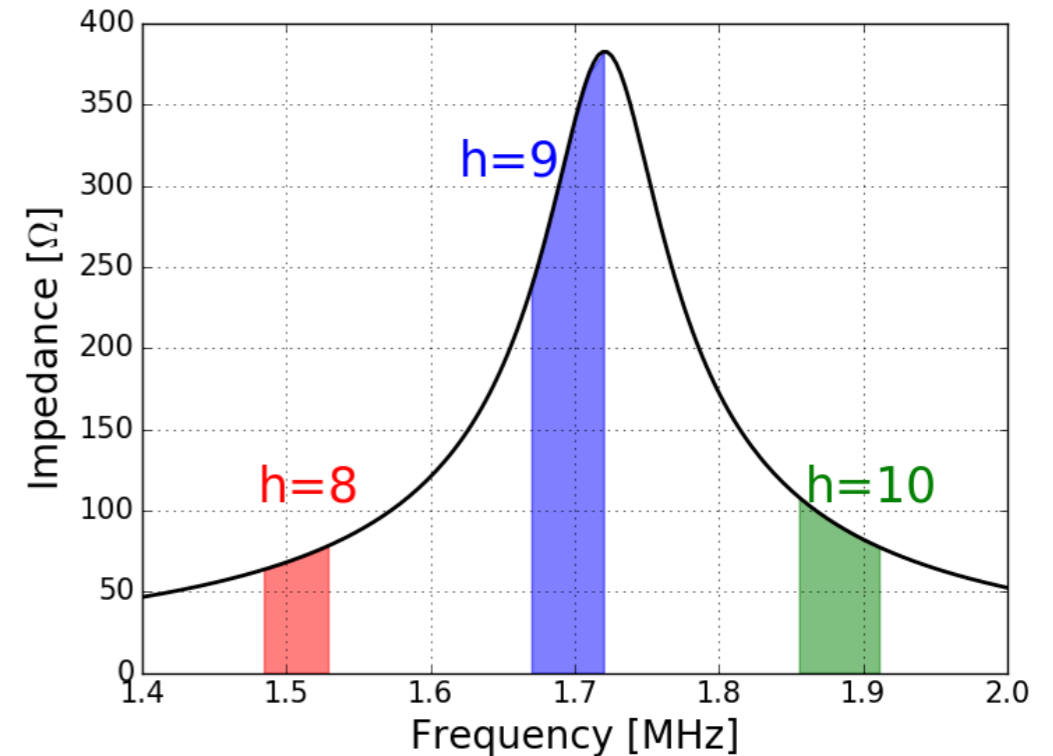
- ・ 以下のようにバンチ結合振動の同定と対策を行った。
 - ・ バンチ結合振動が起きているかどうかの確認→**バンチ中心振動解析**
 - ・ 原因となるインピーダンス源の周波数域の特定→**サイドバンド解析**
 - ・ 対策→**ビーム信号振動成分のフィードバック(FB)によるバンチ振動抑制**
 - ・ 開発したFBシステムの動作試験
→**ビームをFBシステムで振動励起させて動作を確認。**
 - ・ ビームを振動させて位相補正パラメータを測定
 - ・ PI制御FBにより振幅が制御できることを確認

- 各バンチの中心の振動を解析しバンチ結合振動が起こっているかどうかを調べた。
 - ハーモニクス数が9の場合、バンチ結合振動の振動モードは $n = 0 \dots 8$ の9個。
 - モード n の時 隣接バンチ間の振動の位相差は $2\pi n/9$ 。→位相差を解析しモード検出
- モード $n=8$ のバンチ結合振動が顕著。モード $n=4,6,7$ も揺れている

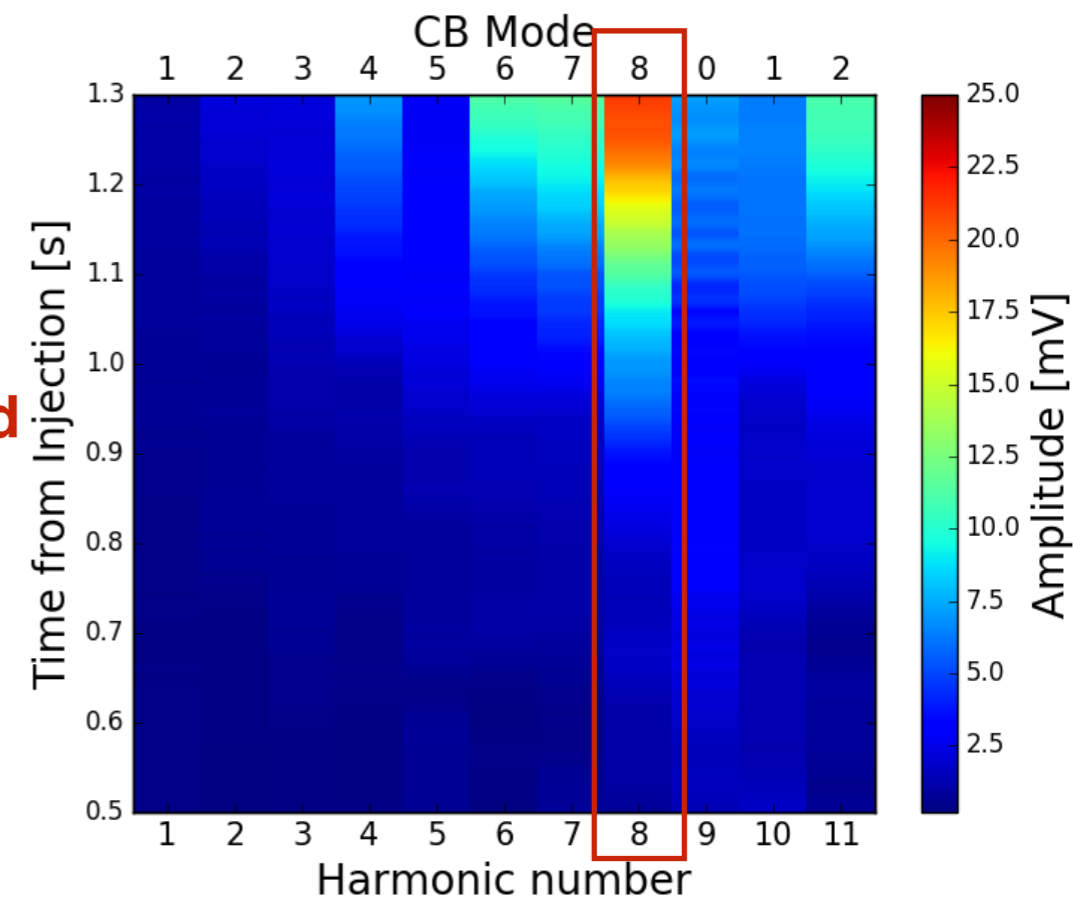
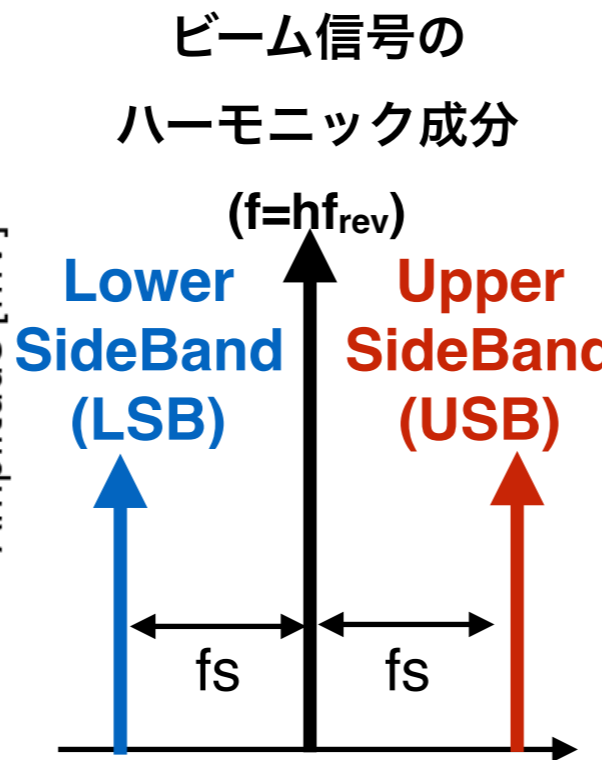


- バンチ結合振動の原因となるインピーダンス源の周波数域の特定を行った。
 - バンチ結合振動はハーモニック成分($f=hf_{rev}$)の $\pm fs$ のサイドバンドに現れる。
- モードn=8に相当するサイドバンドで振動大
 - 加速周波数($h=9$)の隣接ハーモックス($h=8,10$)
→空胴インピーダンス?

加速空胴のインピーダンス



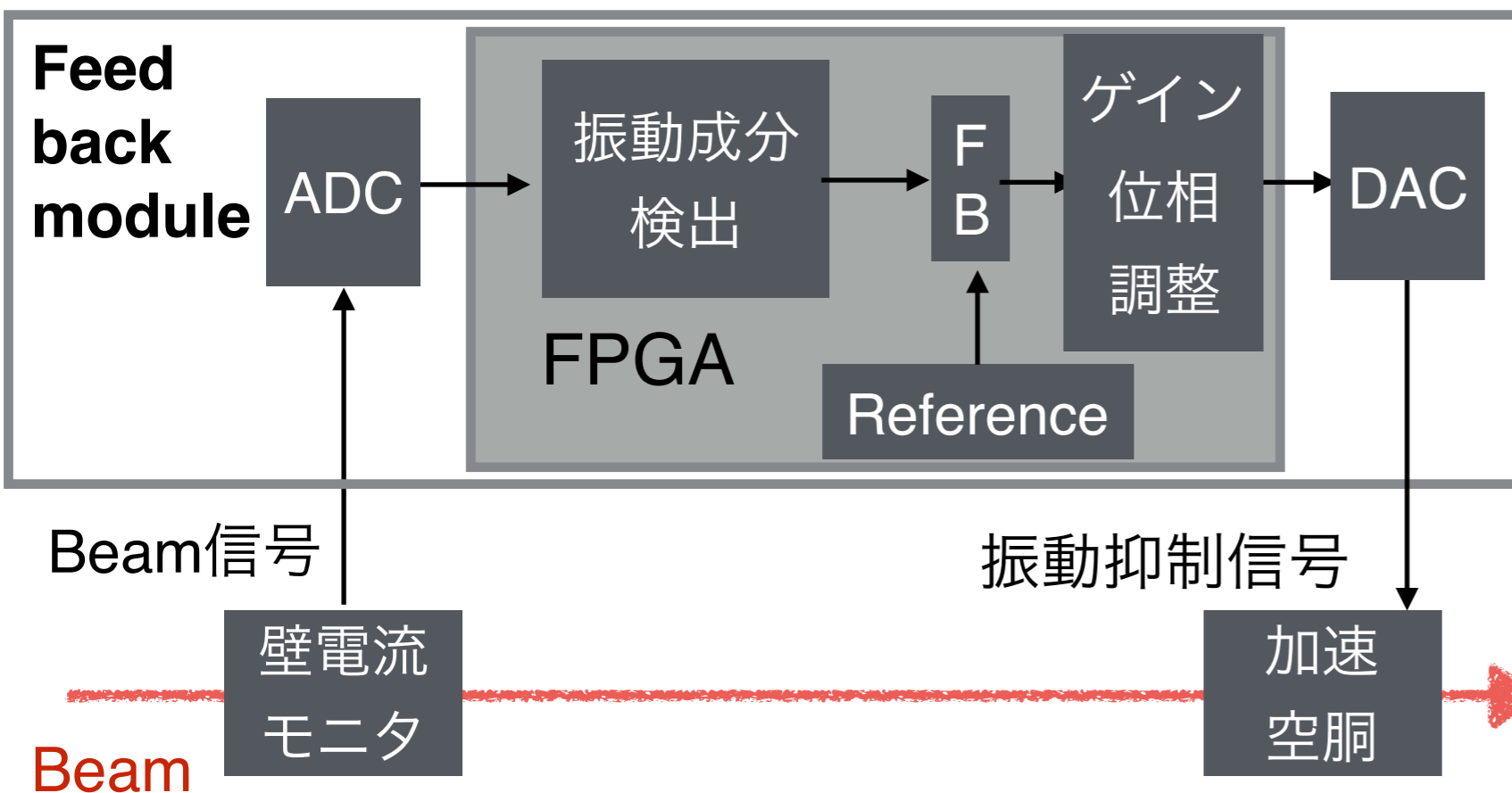
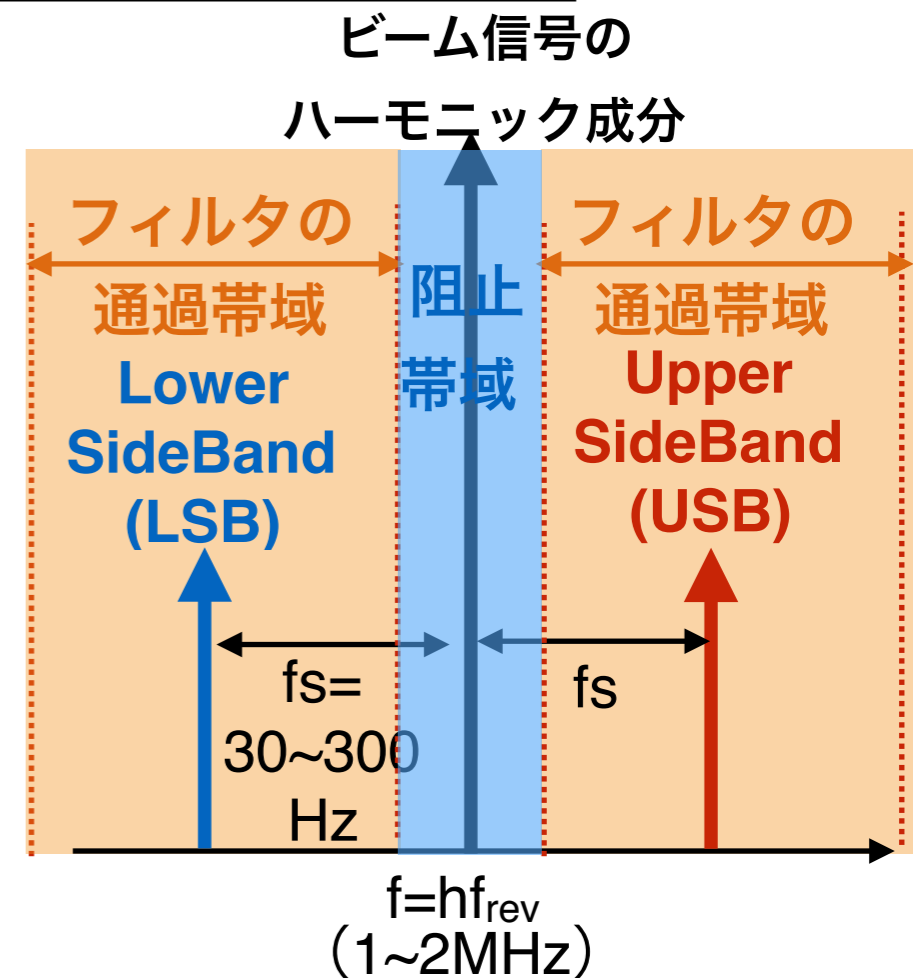
各LSB($hf_{rev} - fs$)の振幅時間変化



各USB($hf_{rev} + fs$)の振幅時間変化

バンチ結合振動に対する対策：フィードバックモジュール

- 各ハーモニックの振動成分を検出してそれを打ち消す信号を空胴に返すフィードバック(FB)モジュールを製作。
 - FPGAを用いて、振動成分検出・Feedback(FB)を行う
 - ハーモニック成分(1~2MHz)のサイドバンドである振動成分(30~300Hz)を検出する狭帯域バンドパスフィルタを設計。
 - 各サイドバンドを分離して個別モード制御を実現。
- 2017年10月中旬より試験を開始した。

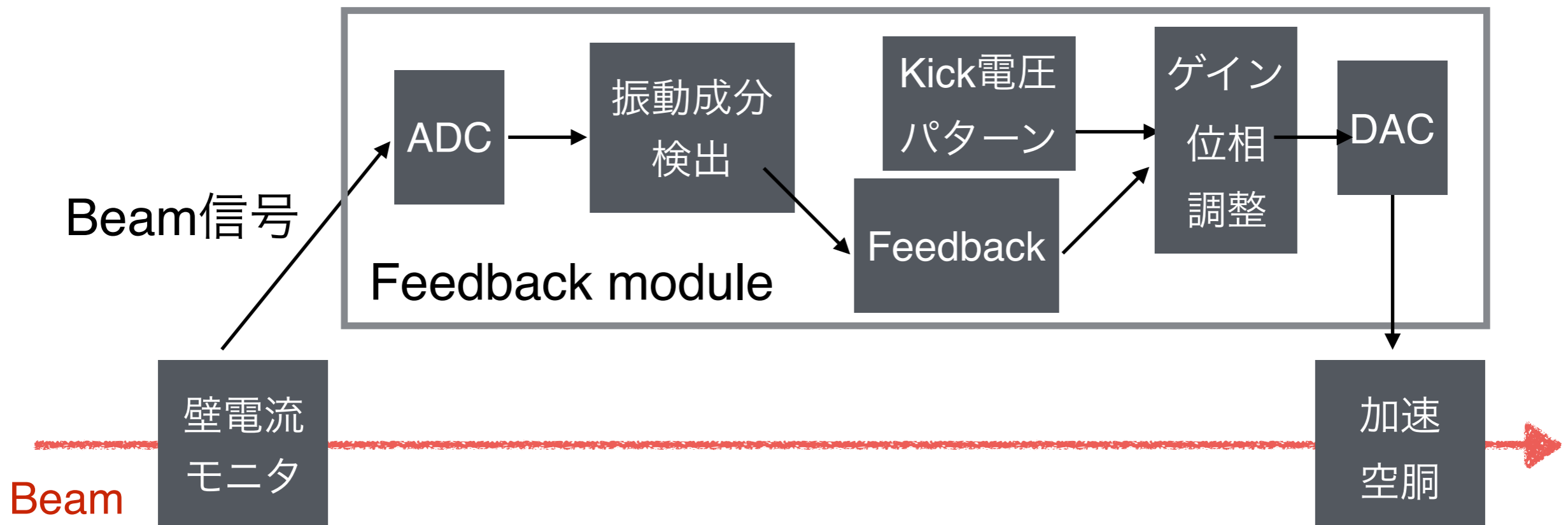


ビームによる動作実証

- ビームに対してKick電圧を与えて振動を励起し、振動させたビームに対するFBシステムの応答を調べた。
 - FBモジュールから空胴にFB信号に加えてKick電圧を出力し、ビームに対してモード $n=8$ に相当する振動を励起。

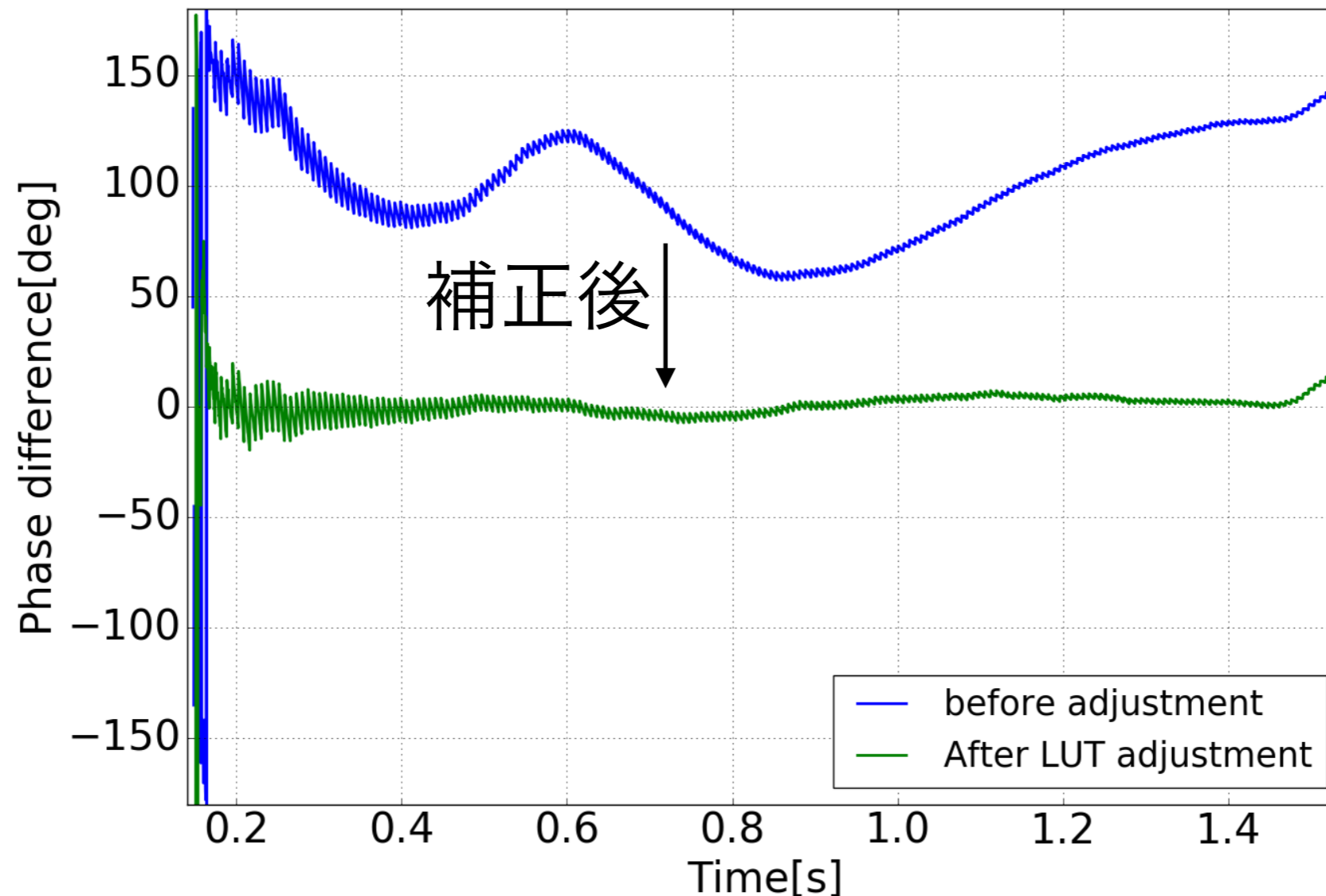
試験内容

- モード $n=8$ に対するFBの応答を調べる
 - Feedbackを無効にし、振動の測定とシステム較正(位相・周波数パターン)を行う。
 - Feedbackを有効にし、励起された信号の振動を抑制させる。



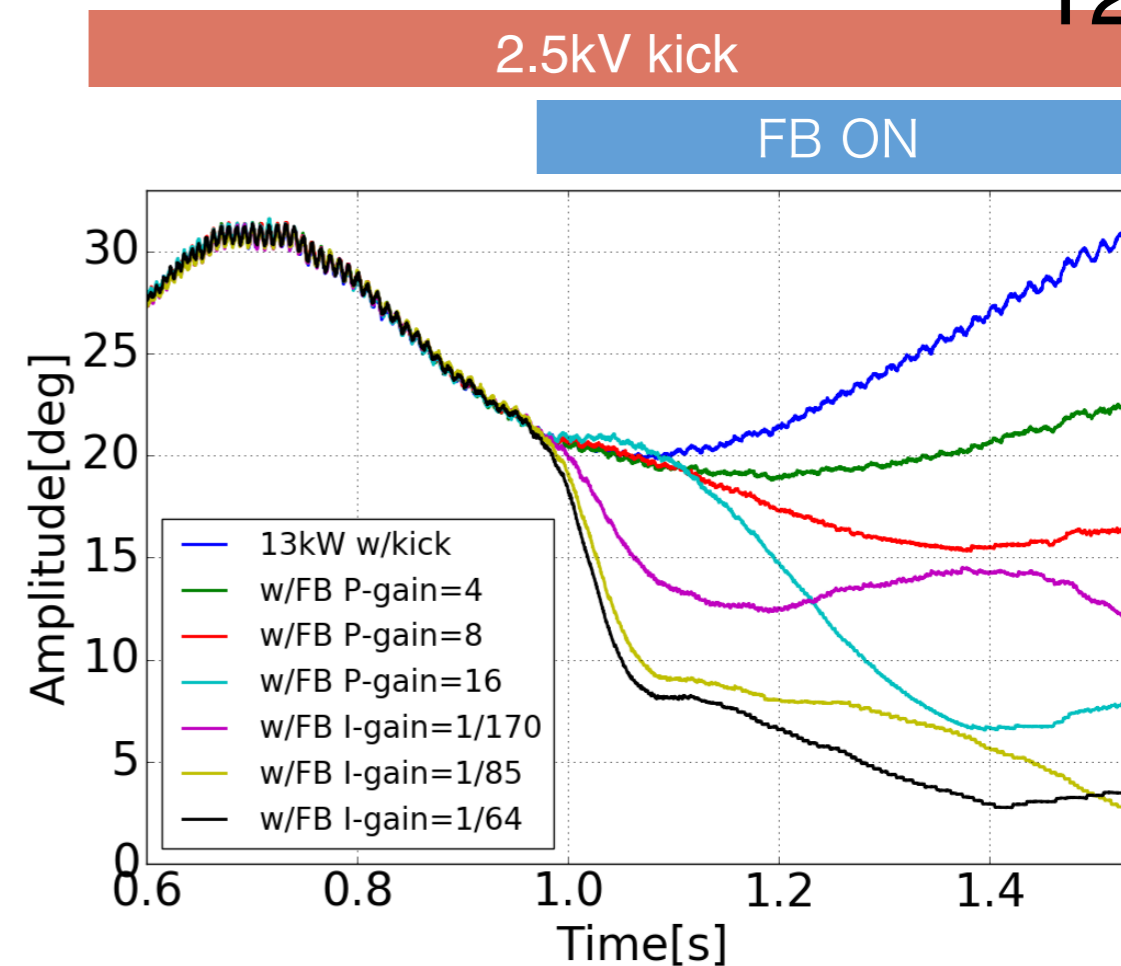
ビーム振動励起試験:振動ビームによる位相補正

- Feedbackを閉じるには、システムとビームとの位相差の補正が必要。
- 振動のない13kWビームに対して、Kickを与えてバンチの振動を誘起
 - FBをOFFにし、システムの励振電圧パターン位相と検波した振動位相を比較。
- 位相差が0となるように位相のLUTを作成して補正を行った。

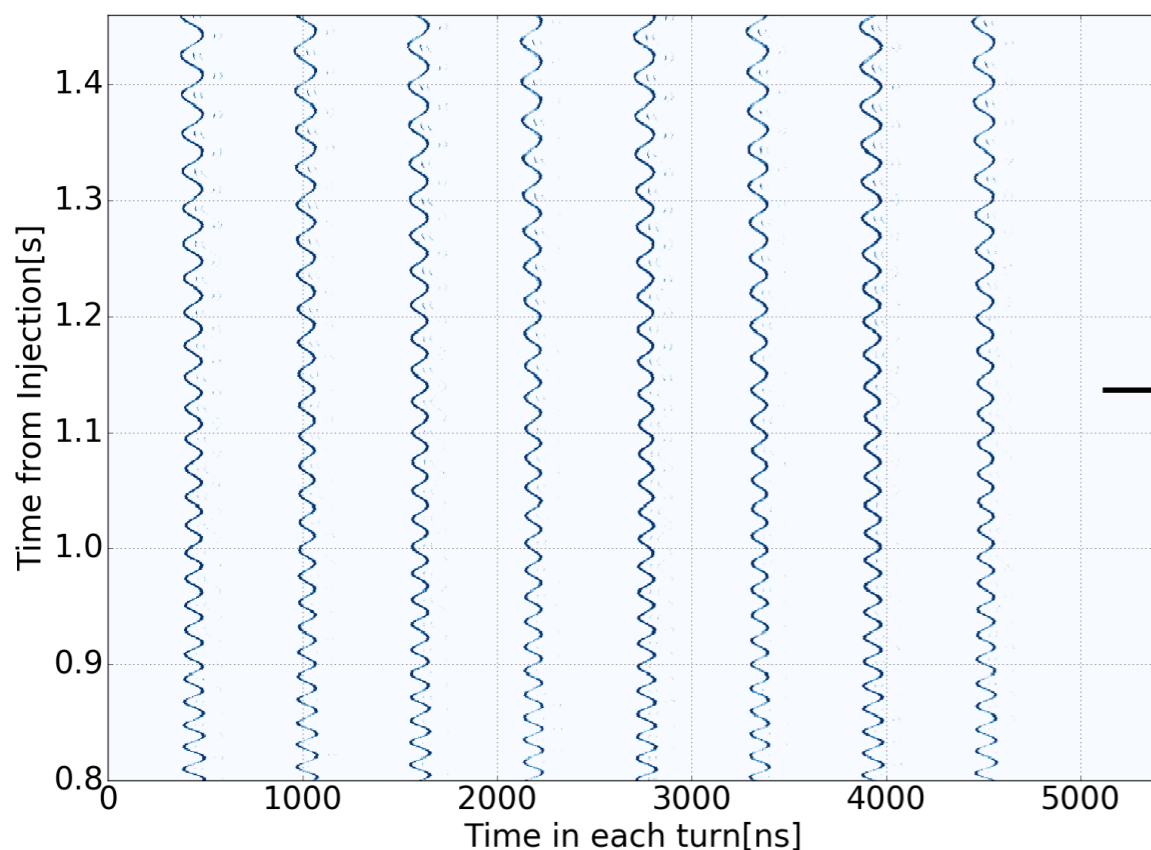


Feedback試験

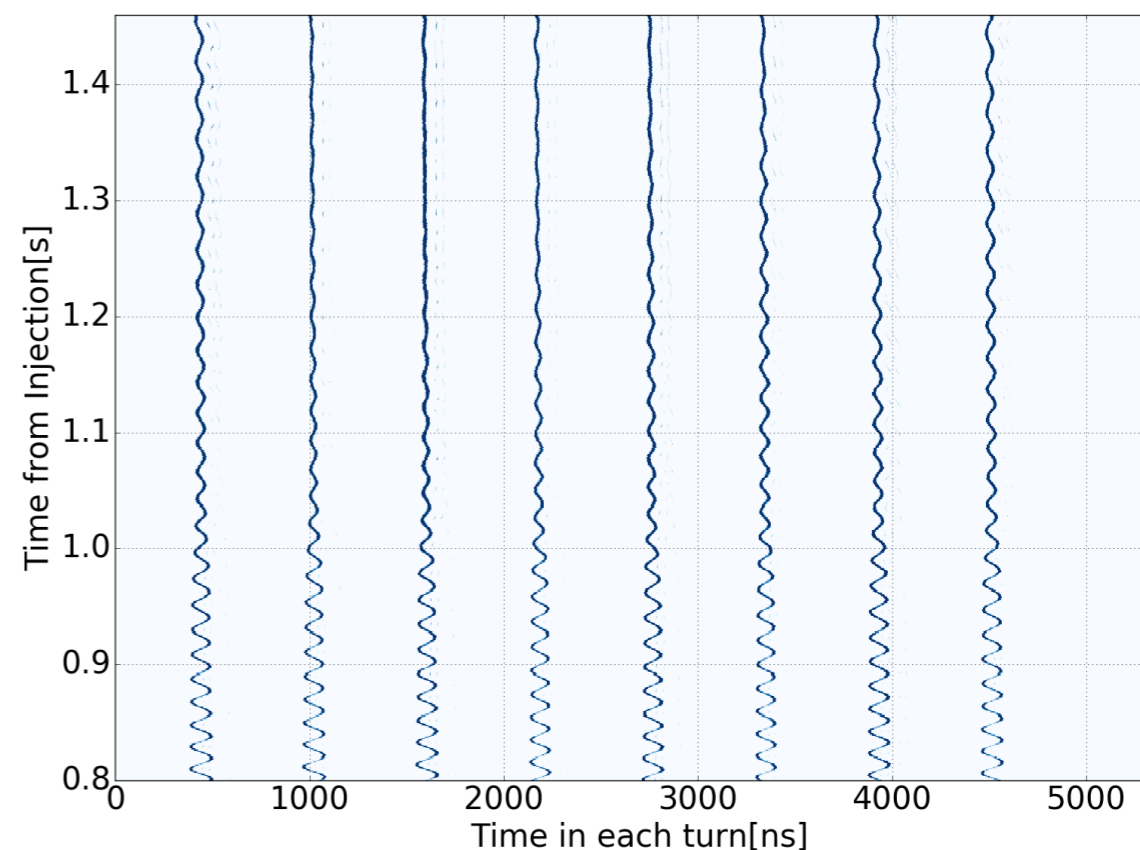
- 加速開始から13kWビームを2.5kVでキック
- 加速後半(0.95s)からFBをONにして、FBによる振幅の変化を調べた。
- FBを有効にすると振動が抑制できている。**



FB OFFの際のバンチ振動

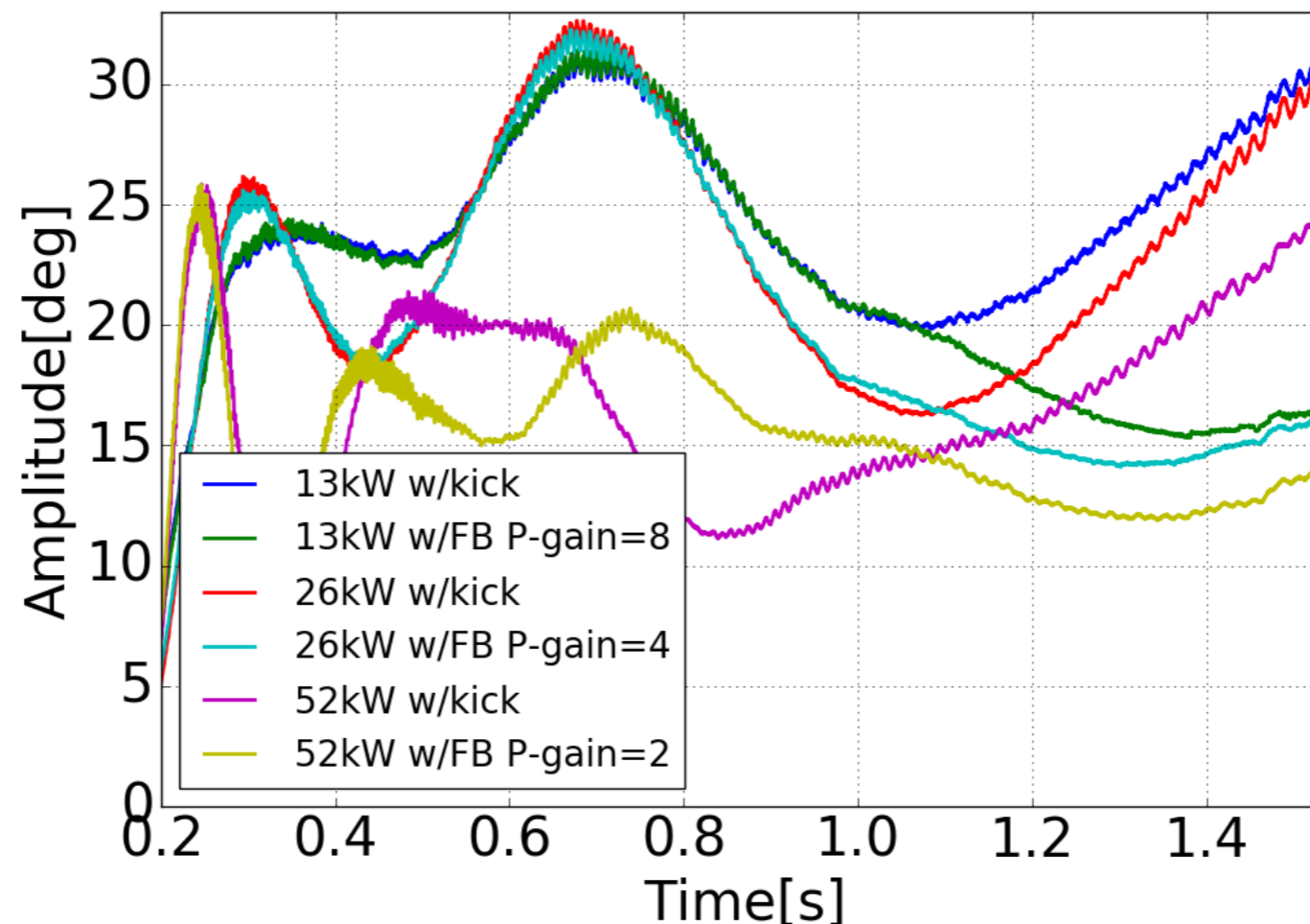


I gain=1/64の際のバンチ振動



Feedback試験

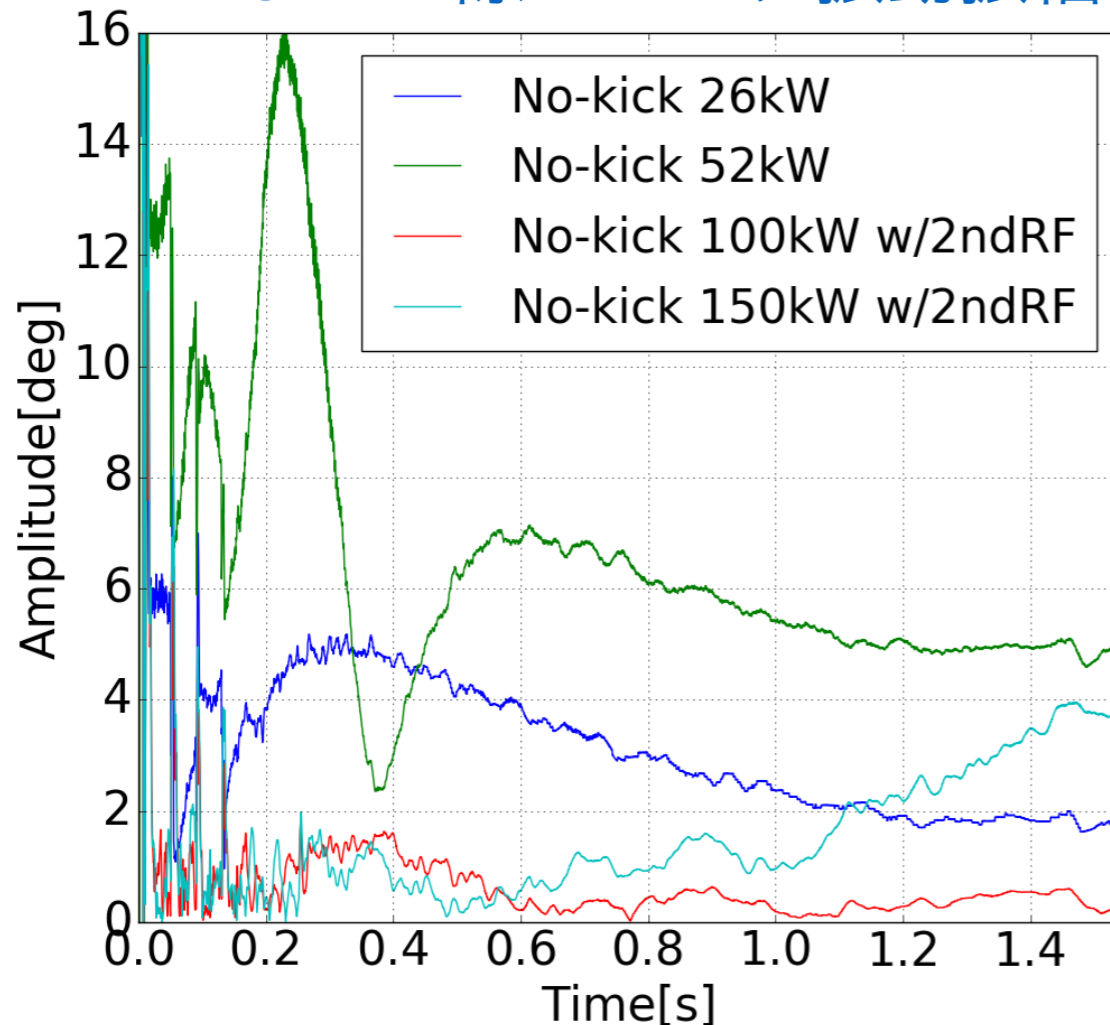
- ・ ビーム強度によるP制御FBの応答の変化を確認した。(位相補正は13kWデータのまま)
- ・ 強度を13kWから26kW,52kWと変更すると、Pゲインを1/2, 1/4にしたときに13kWと同じ振動抑制の効果がみられた。
- ・ 13kWで作成した位相補正LUTが高いビーム強度でも有効である事を確認出来た。
- ・ 同じバンチ振動振幅でもビーム強度が増えると信号強度が増える
→小さな比例ゲインでも同じ効果が得られている。



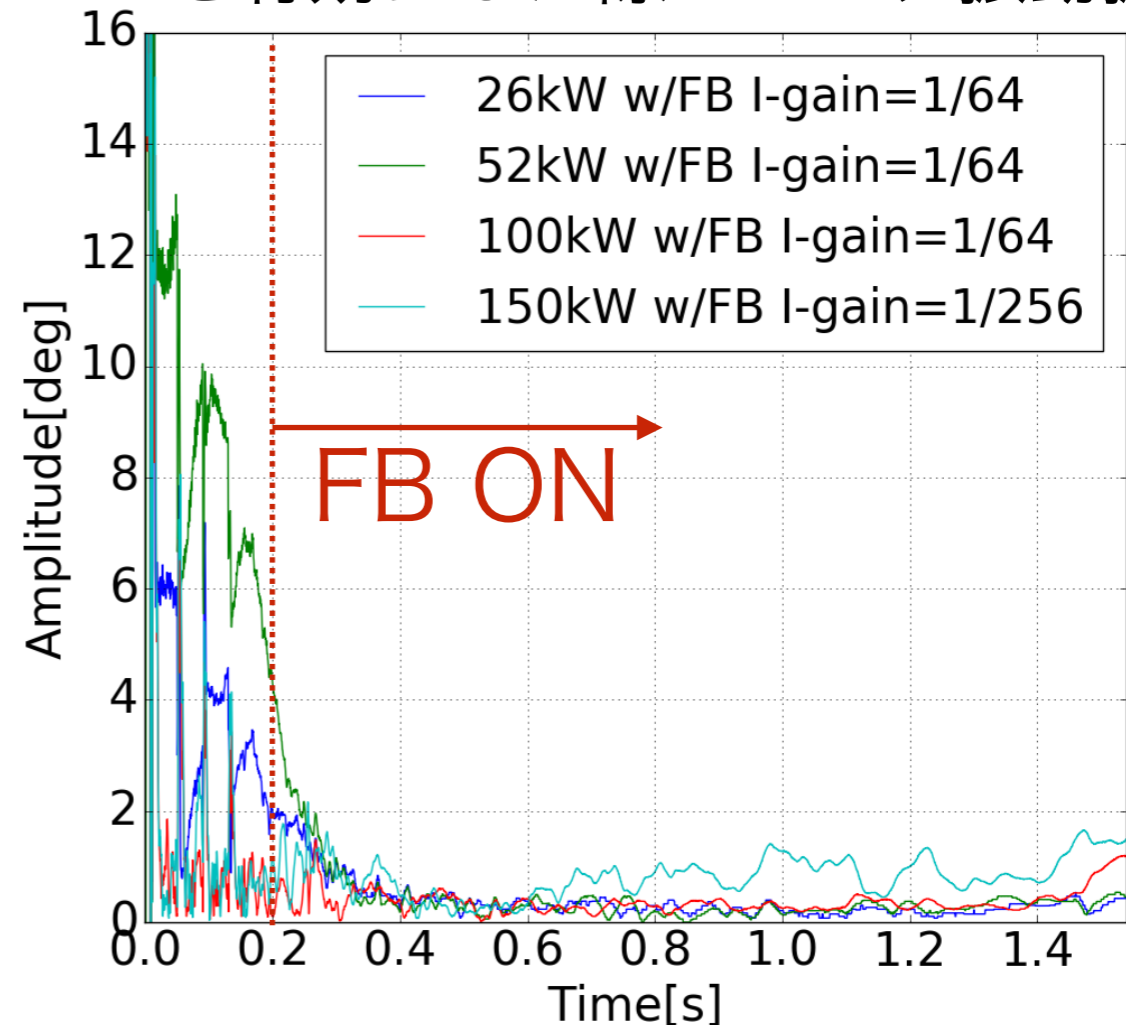
Feedback試験（自発振動の抑制）

- 26kW以上ではKickしなくてもある程度の振動がみられたため、これに対するFBによる振動抑制の効果を確認した。
- FB(I制御)を有効にする事によって、バンチの振動振幅を1°程度に抑えられている。
- 13kWで作った位相LUTを元にして、150kWまでは自発的な振動を抑制できた。

FB OFFの際のバンチ振動振幅



FBを有効にした際のバンチ振動振幅



まとめ

- ・ J-PARC MRでは速い取出し(FX)で500kW、遅い取出し(SX)で50kW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強度向上を妨げる一因となっている。
 - ・ ビーム信号の解析により、縦方向のバンチ結合振動が起きていること、およびその典型的振動モードを同定した。
 - ・ バンチ結合振動の対策としてフィードバックモジュールを開発。
 - ・ 振動の検出及び抑制が可能であることをビームを用いて確認した。
 - ・ 150kWまでは自発的な振動を抑制出来た。
 - ・ 利用運転における運用にむけて、更なる調整を進めていく。