

大強度加速のための ビーム縦方向不安定性対策

杉山泰之

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

自己紹介

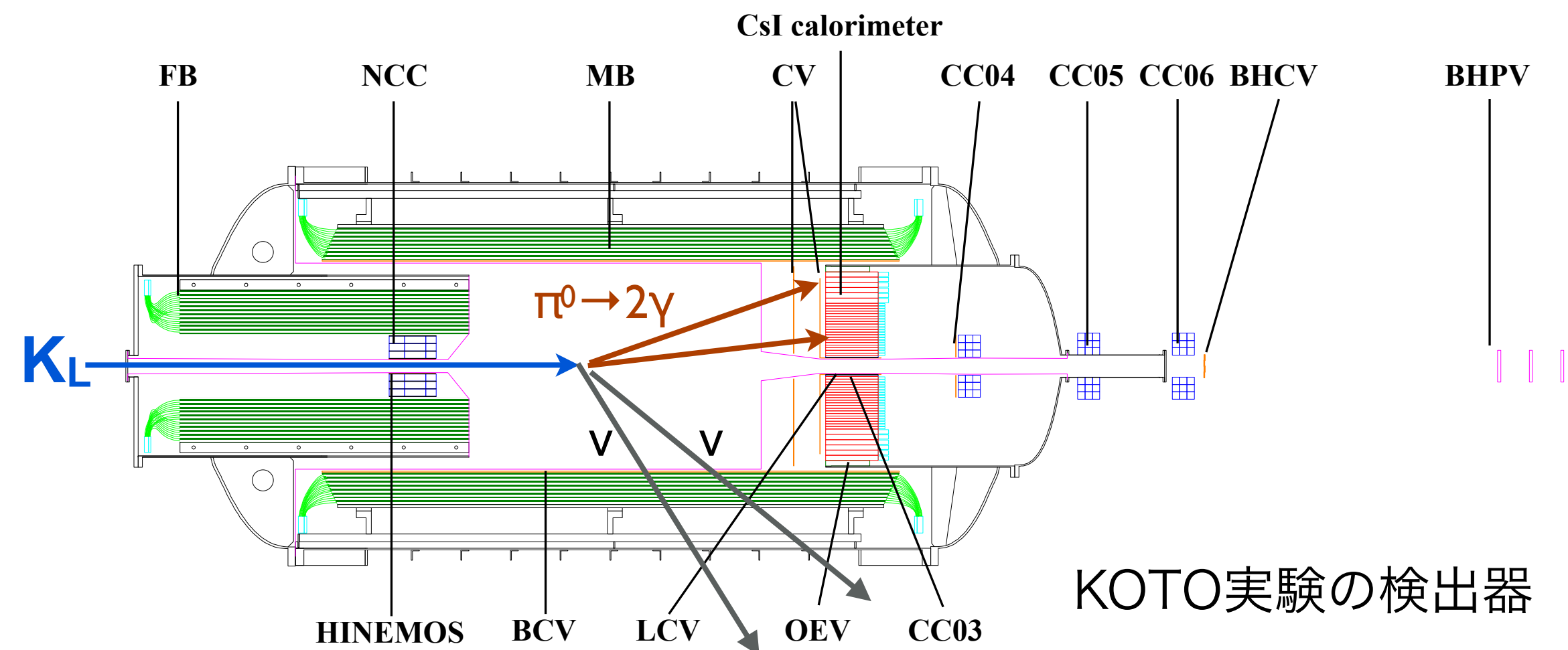
- ・ 名前：杉山泰之（すぎやまやすゆき）
- ・ 1986年生まれ 39歳
- ・ 京都生まれ京都市育ち
- ・ 2005年から2016年まで大阪大学に在籍
 - ・ 2005～2009 理学部物理学科
 - ・ 2009～2016 大学院理学研究科 修士・博士課程所属
 - ・ J-PARC(茨城県)での素粒子実験(KOTO実験)を専攻
- ・ 2016年7月から高エネルギー加速器研究機構に就職 (助教)
 - ・ 専門はJ-PARCでのRFを用いた陽子加速。

- ・ KOTO実験: 中性K中間子 K_L が $\pi^0+2\nu$ に崩壊する稀崩壊を探す実験。
(クォークのCP対称性の破れの精密測定)

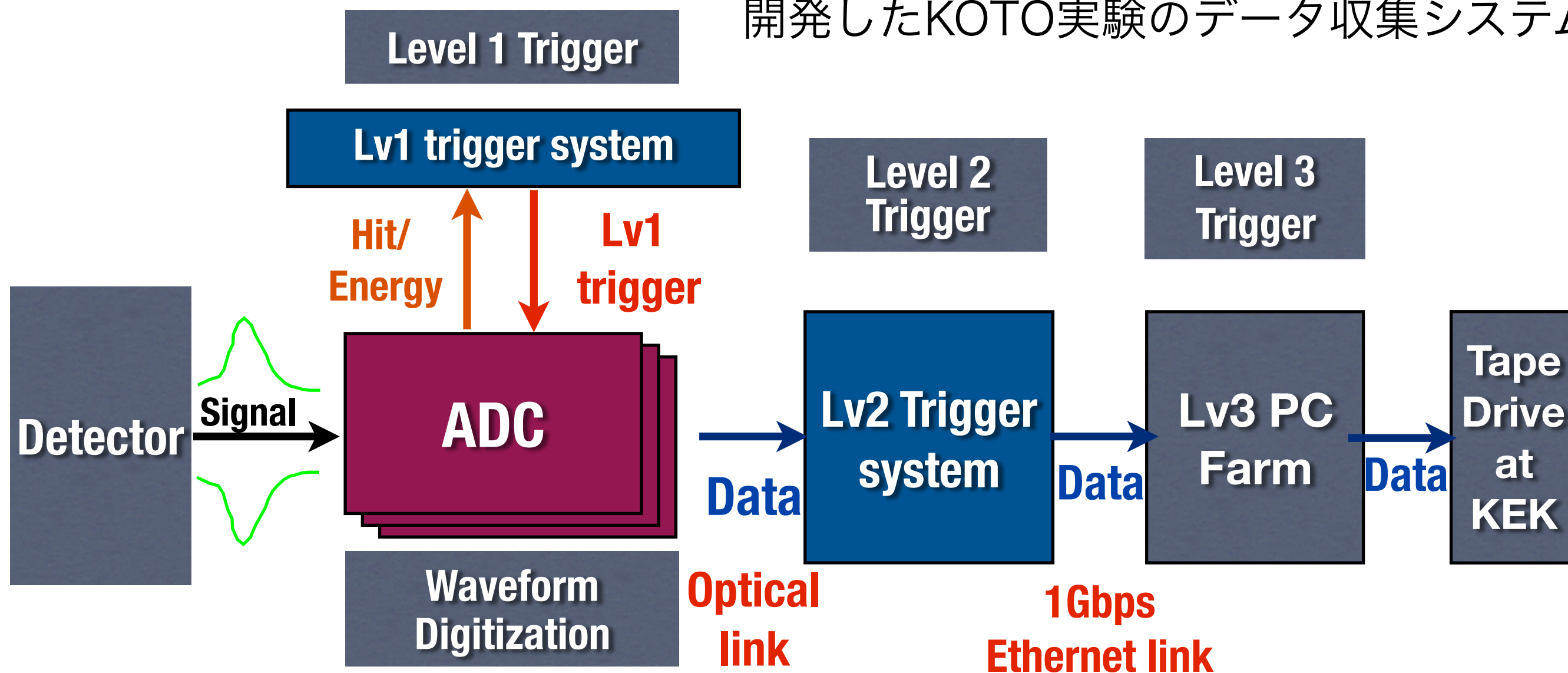
・ 研究内容:

- ・ **FPGA**を用いたデータ収集システムの開発・統合
- ・ 取得された波形データの**波形解析**による r/n 弁別
- ・ 高エネ実験時代の研究の経験は加速器でも活用できている。

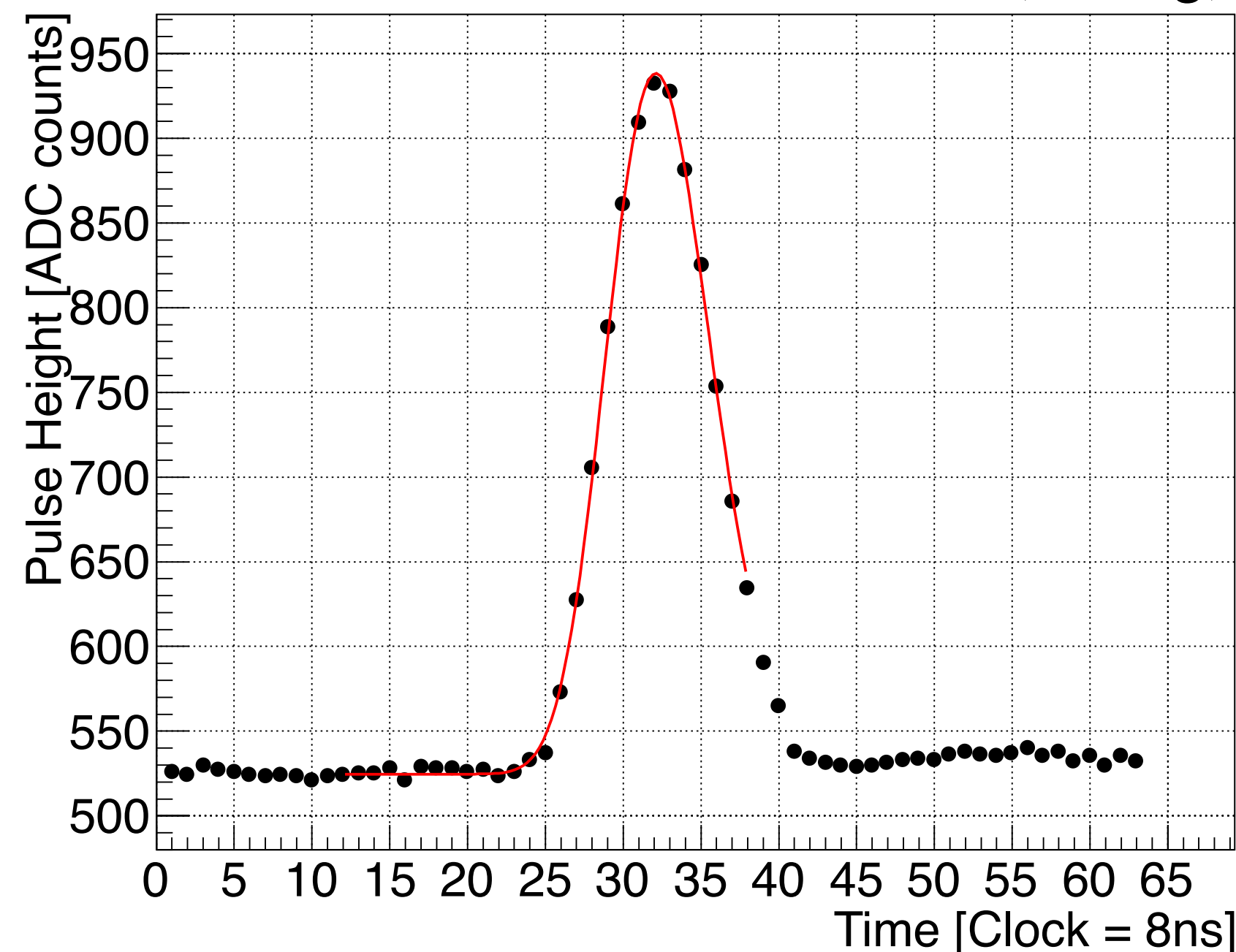
- ・ 参考: KOTO実験から加速器に5人ほど人材を輩出している
(J-PARC/KEK-PF/Spring-8)



開発したKOTO実験のデータ収集システム



取得された波形データの波形解析(Fitting)



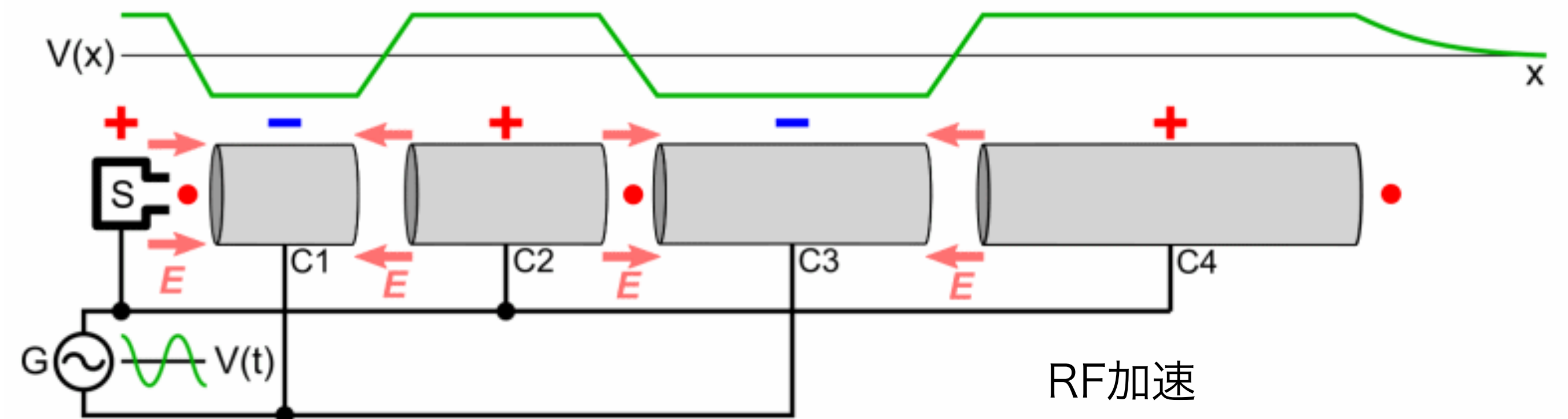
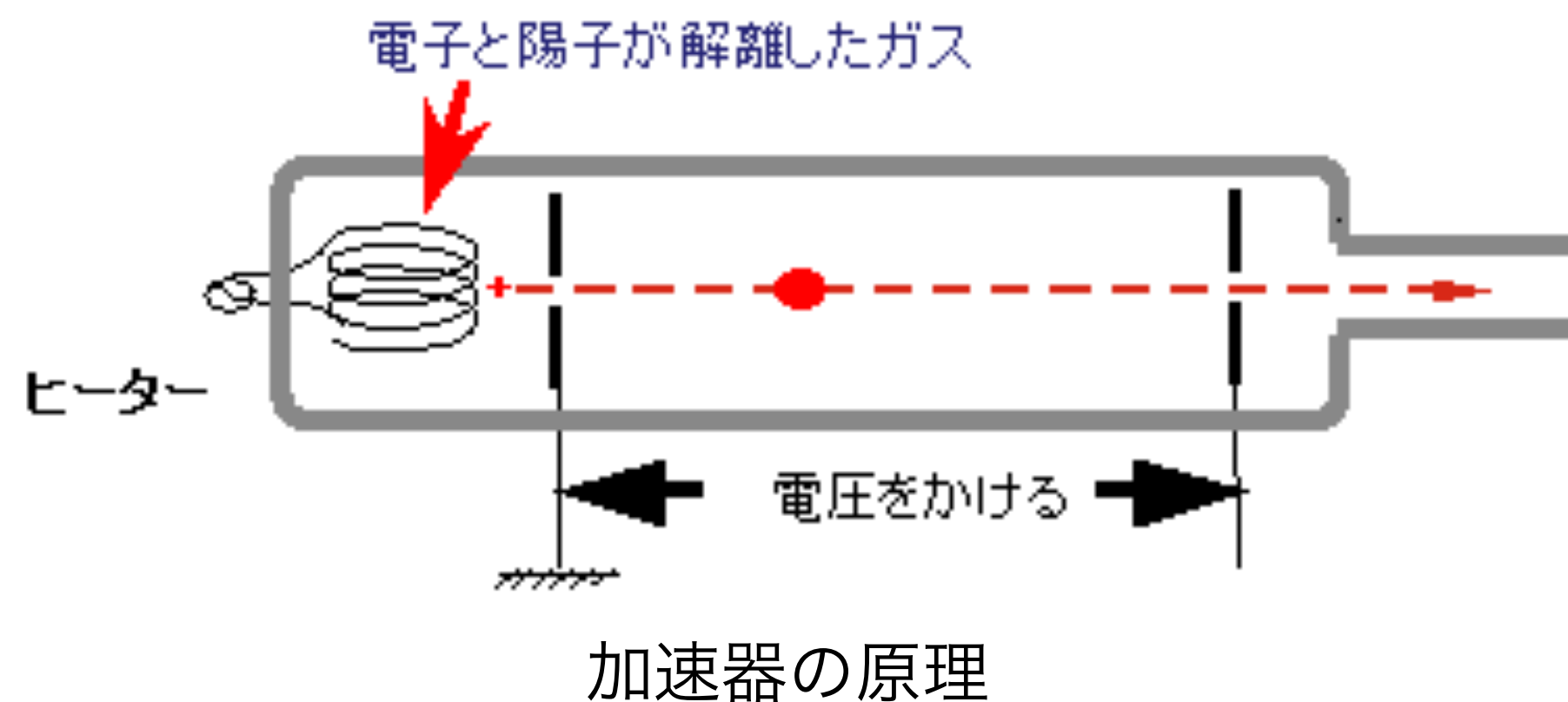
今回の発表の流れ

- ・ RF加速について
- ・ J-PARC MRのRFシステムに関して
- ・ 大強度化に伴って生じる不安定性の対処
 - ・ 不安定の原因を抑制する。
 - ・ RF操作で不安定を起きにくくする。

RF加速のおはなし

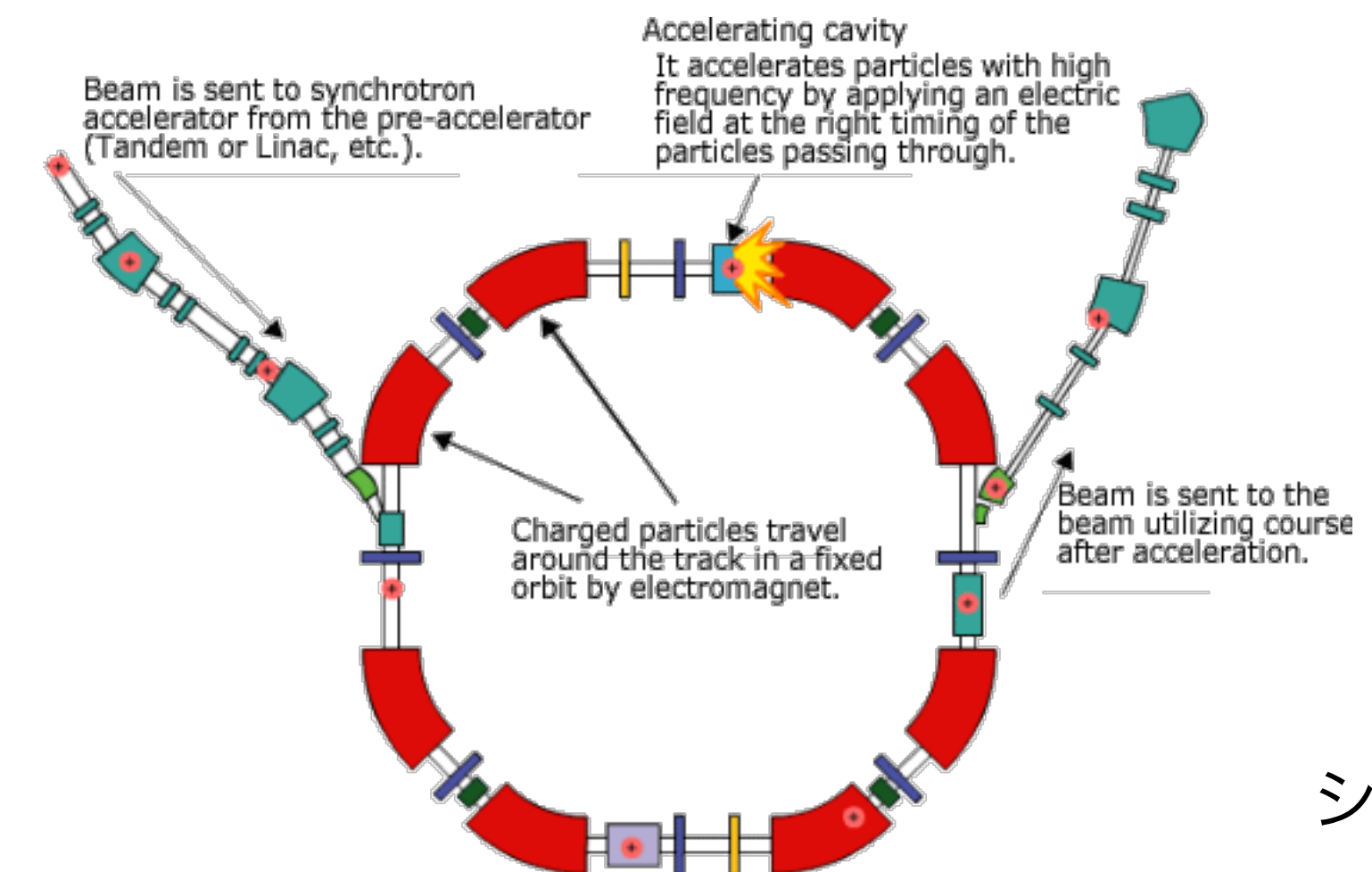
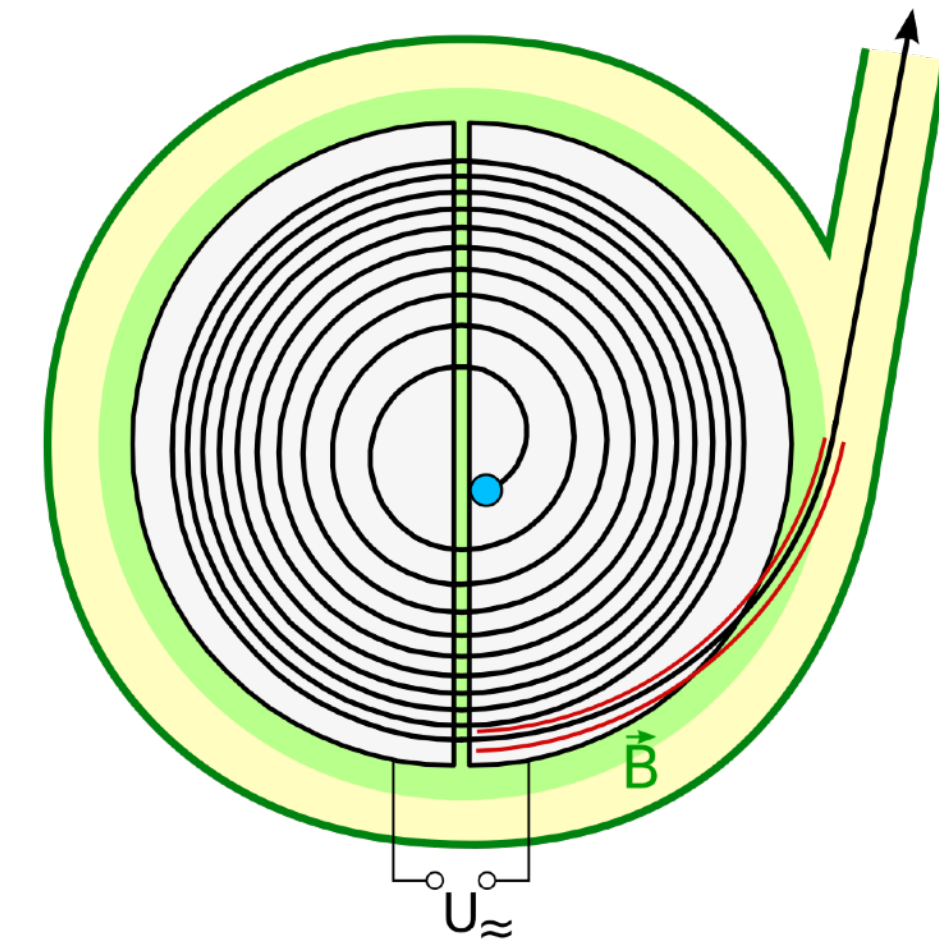
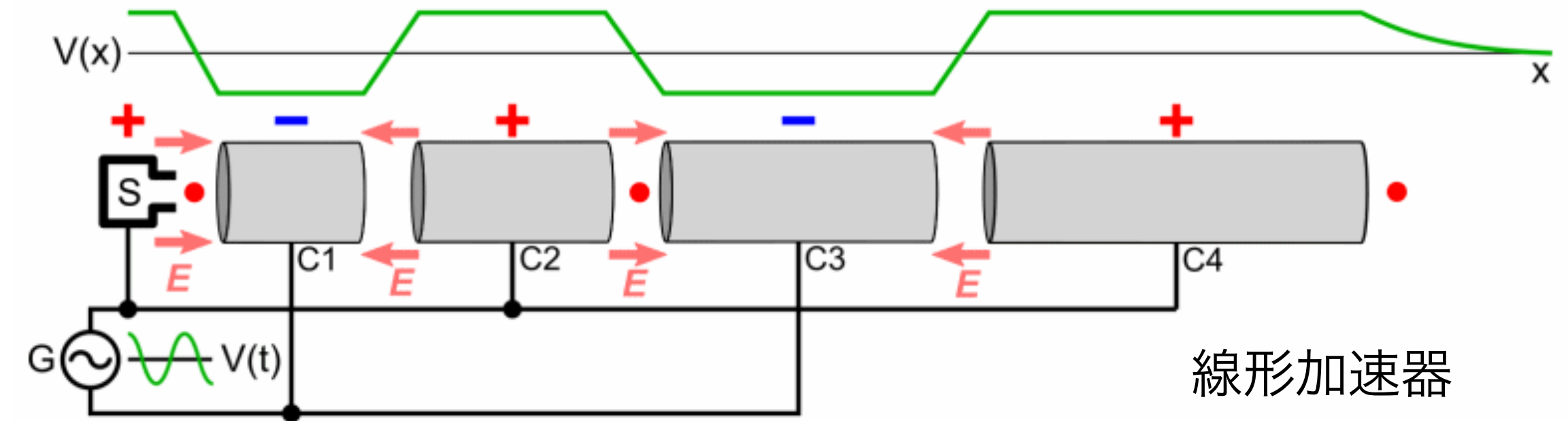
RF加速とはなんぞや？

- ・ 荷電粒子を加速するには電極の間に電圧をかける。
- ・ 一つの電極間にかけられる電圧には限界がある。
- ・ 高エネルギーまで加速するには電極を複数回通る必要がある
- ・ 粒子が通る位置・時間に合わせて電圧の符号を変える
＝高周波(RF:Radio Frequency)を用いた加速
- ・ 安定な加速にはRF信号の振幅・位相の精密制御が不可欠。



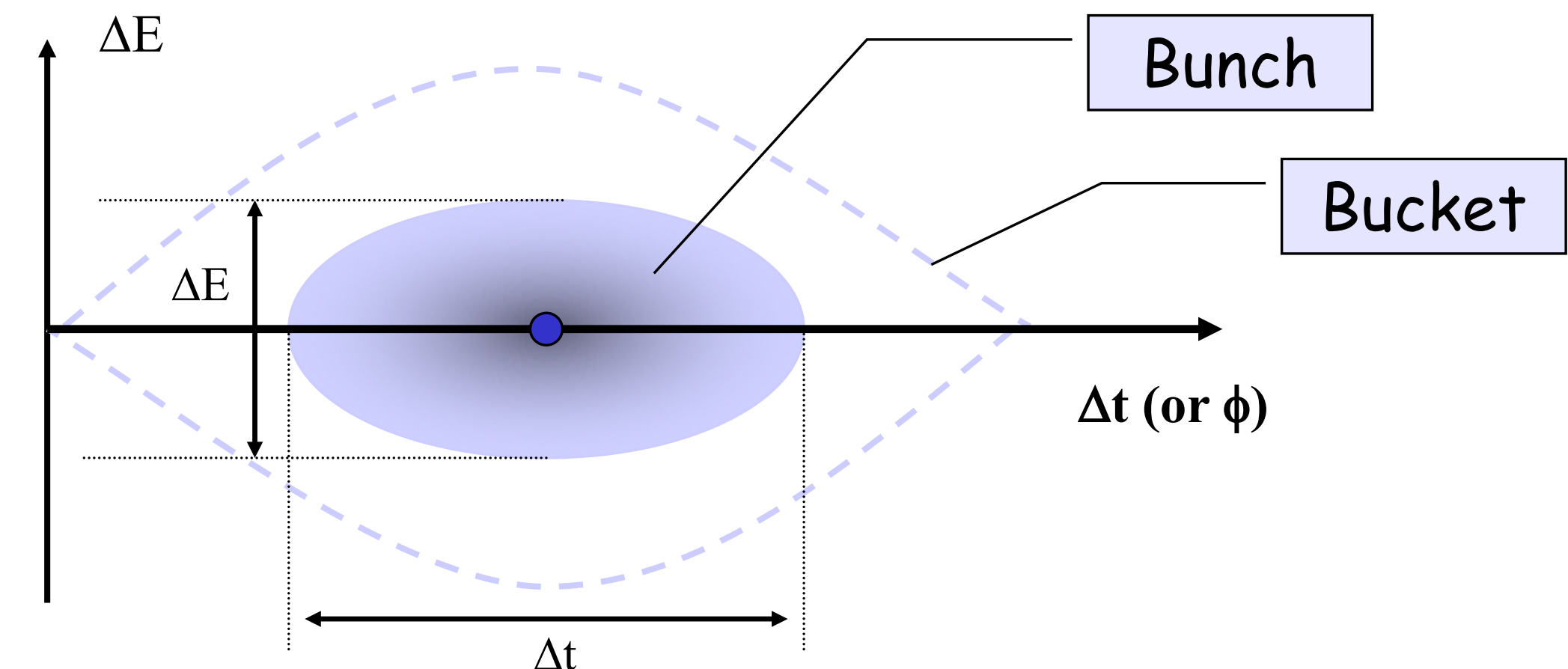
加速器の種類

- 加速構造を複数直線に並べる：**線形加速器**
- 到達エネルギーは加速器の長さで決まる
- 粒子を磁場で曲げて円形の軌道を描かせて(リング加速器)、加速構造に複数回通過させる：**円形加速器**
- 磁場と電圧の振幅・周波数を一定にする：**サイクロトロン**
 - エネルギーが増えると軌道半径が増える
- 磁場の大きさ、RF電圧の振幅や周波数をエネルギーに同期させて変更する：**シンクロトロン**
 - 磁場や電圧を増やす必要はあるがリングの大きさは一定でOK。**RF周波数・振幅・位相の制御が重要**



シンクロトロンでのRF加速

- ・ 粒子がリングを1周回る度に加速するにはRF周波数は周回周波数の通倍であれば良い。
- ・ $f_{RF} = h \cdot f_{rev}$ f_{RF} :RF周波数、 f_{rev} :周回周波数、 h :ハーモニック数
- ・ この場合、 h 個の粒子集団がそれぞれ別のタイミングで加速できることになる。
- ・ RF電圧によって作られる、加速可能なビームの位相空間($\Delta t, \Delta E$)内での範囲：RFバケツ
- ・ ハーモニック数 h の場合はリング上に粒子加速可能なRFバケツが h 個存在する。
- ・ RFバケツ内に留まって加速される粒子集団：バンチ
- ・ **もしバンチがバケツ領域を出てしまうと不安定になって周回不可能となる**
 - ・ 起こりうる原因
 - ・ RF電圧が足りなくてバケツの大きさがバンチよりも小さい
 - ・ RF位相がバンチのタイミングと合っていない
 - ・ 外乱でRF電圧・位相が乱される。

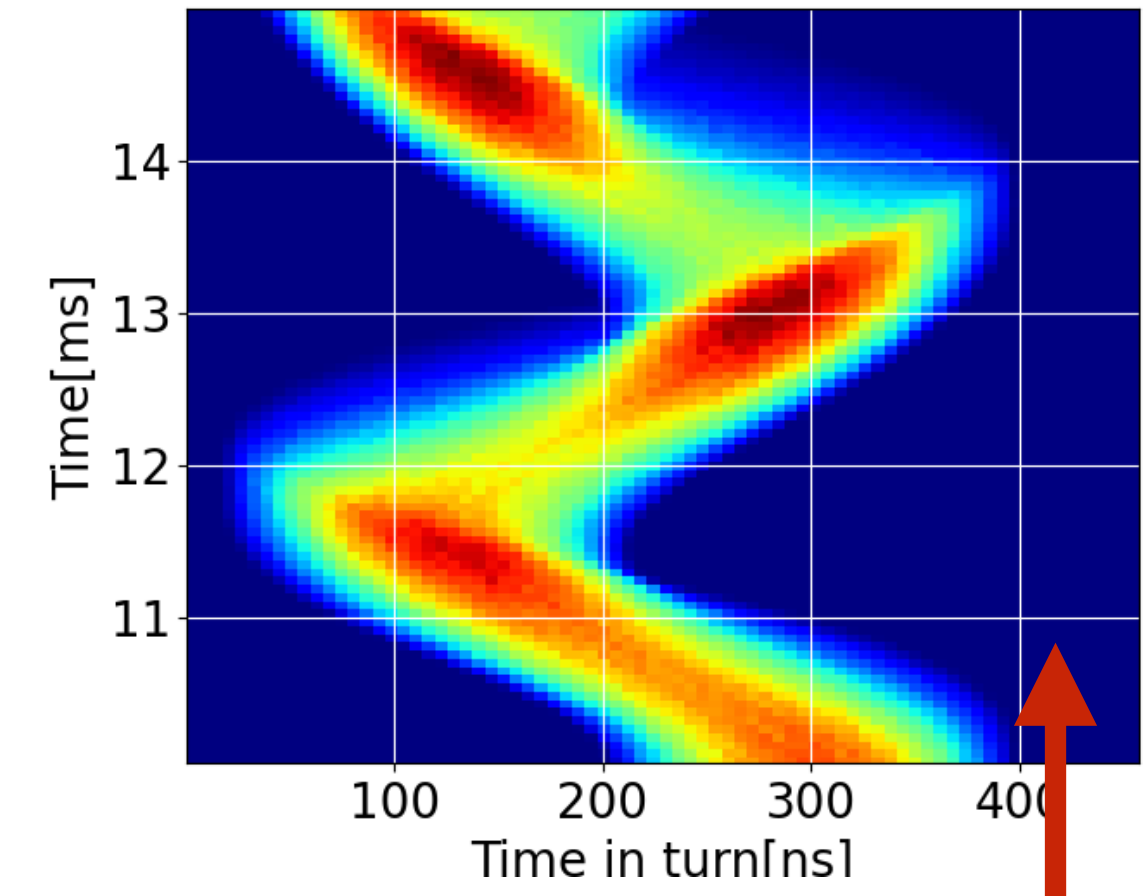


バンチの縦方向振動とは

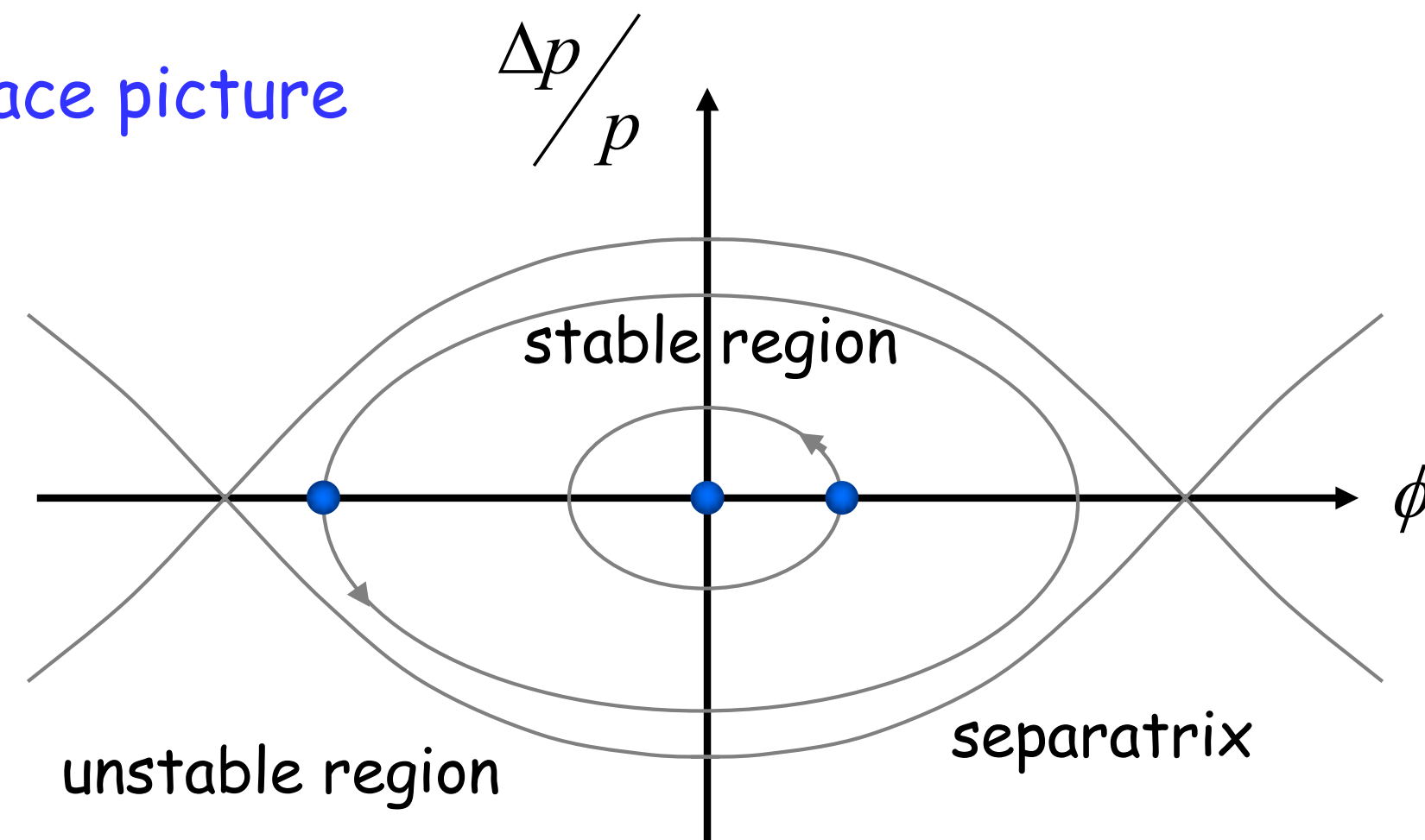
9/24

- RFバケツ内では粒子は位相空間内でハミルトニアン等高線上を円運動している。
- バンチ自体がバケツの中心からズレていると、バンチ自体が回転する。
- バンチの位相空間内での回転は、位相や運動量の変化に現れる。
- 各周回でのビーム信号を並べると振動が良くわかる
- ビームやバンチの進行方向に対する振動=縦方向振動
- 振動の周期:シンクロトロン周波数 f_s
- 外乱の影響によるバンチ縦方向振動を抑えることがビーム加速に重要。

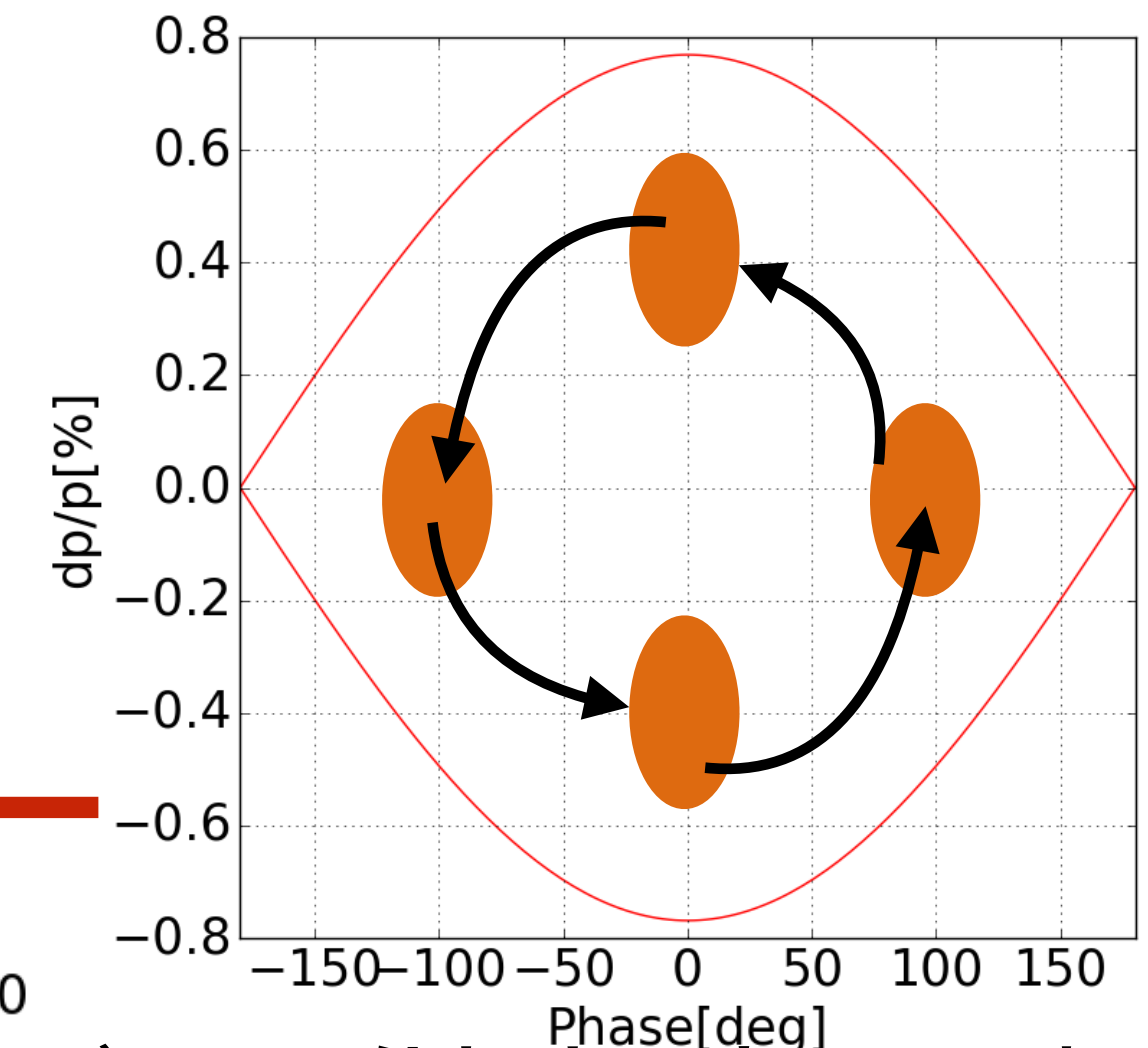
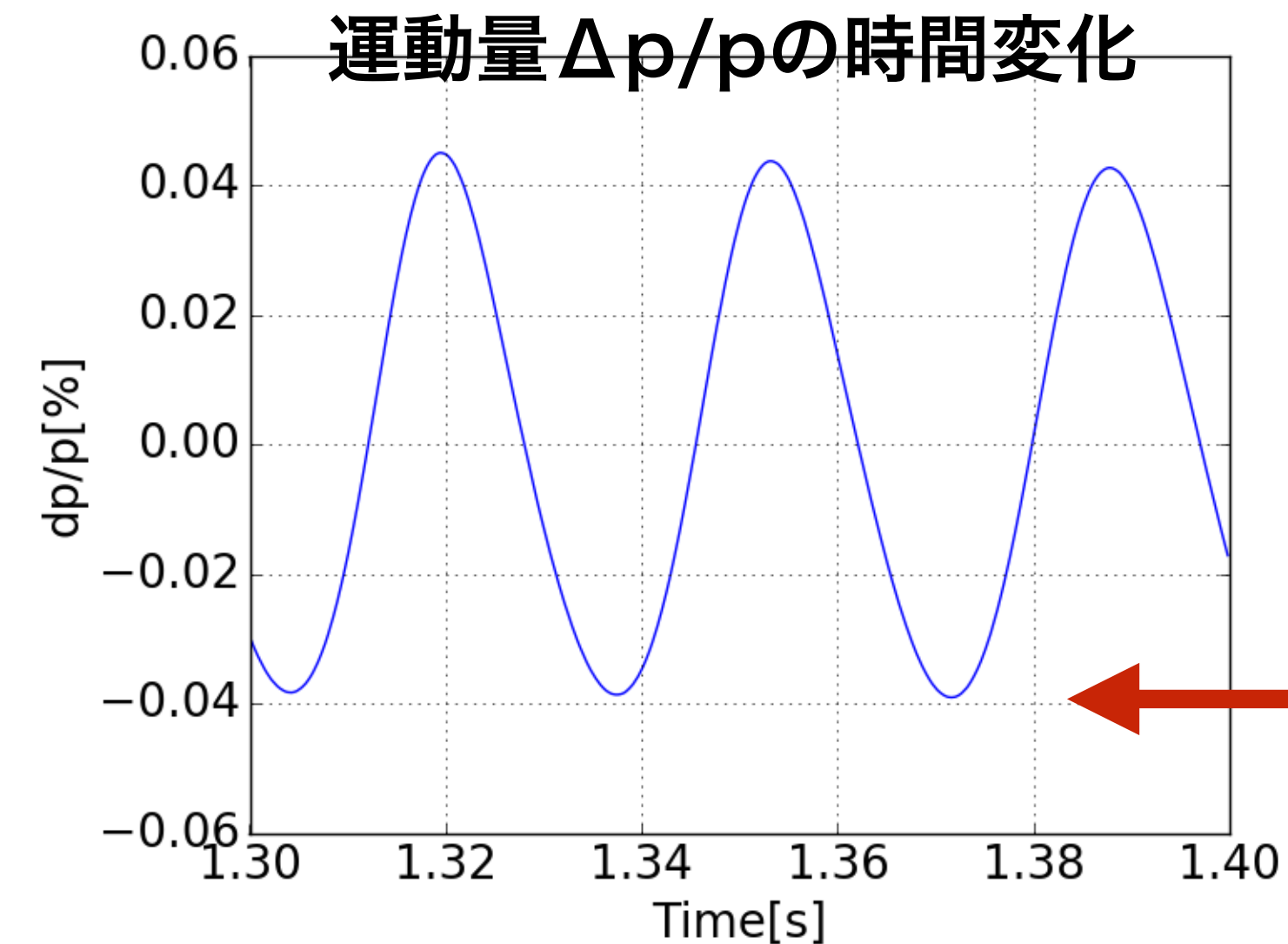
ビーム信号で見える位相の振動



Phase space picture



運動量 $\Delta p/p$ の時間変化

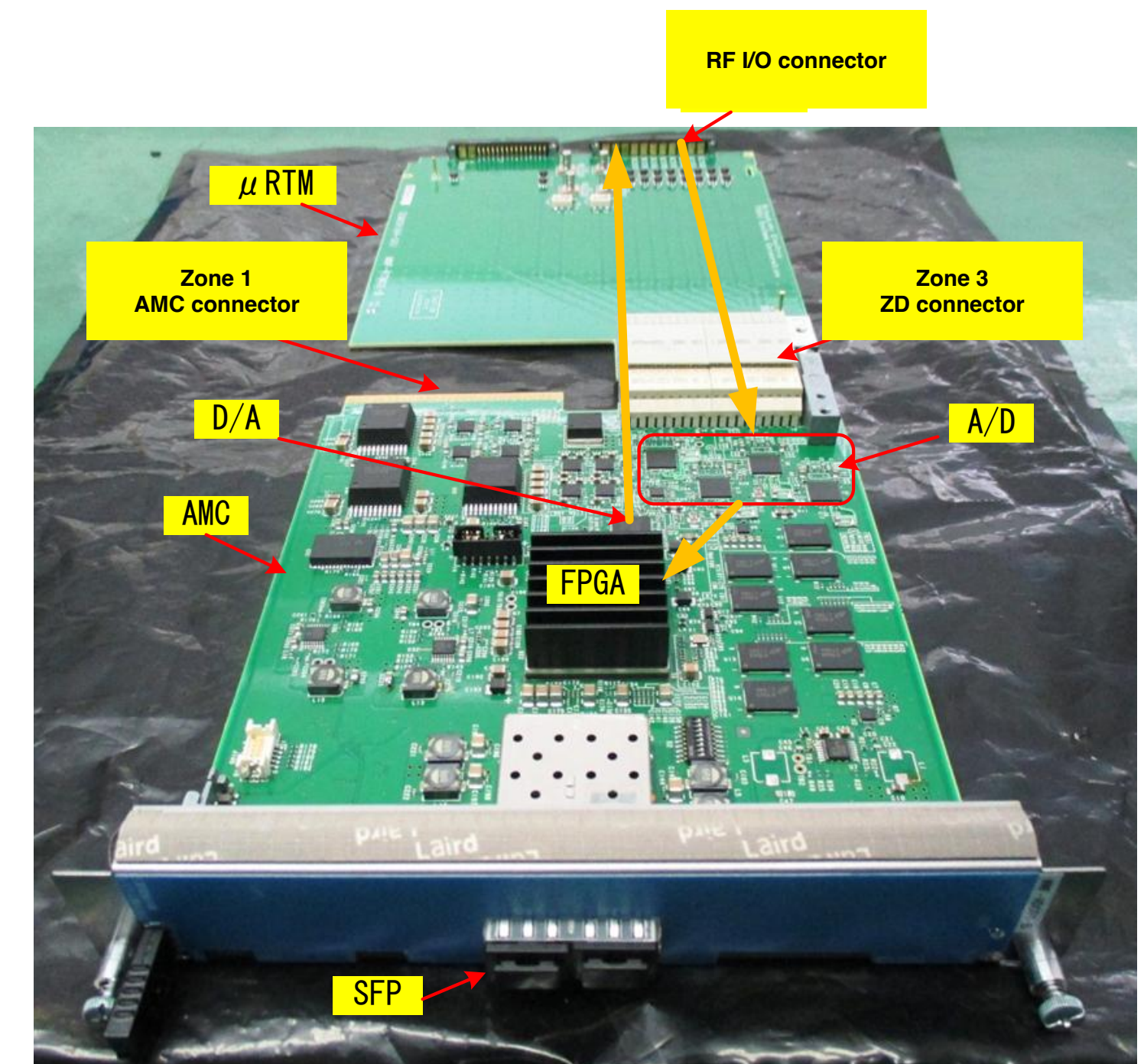
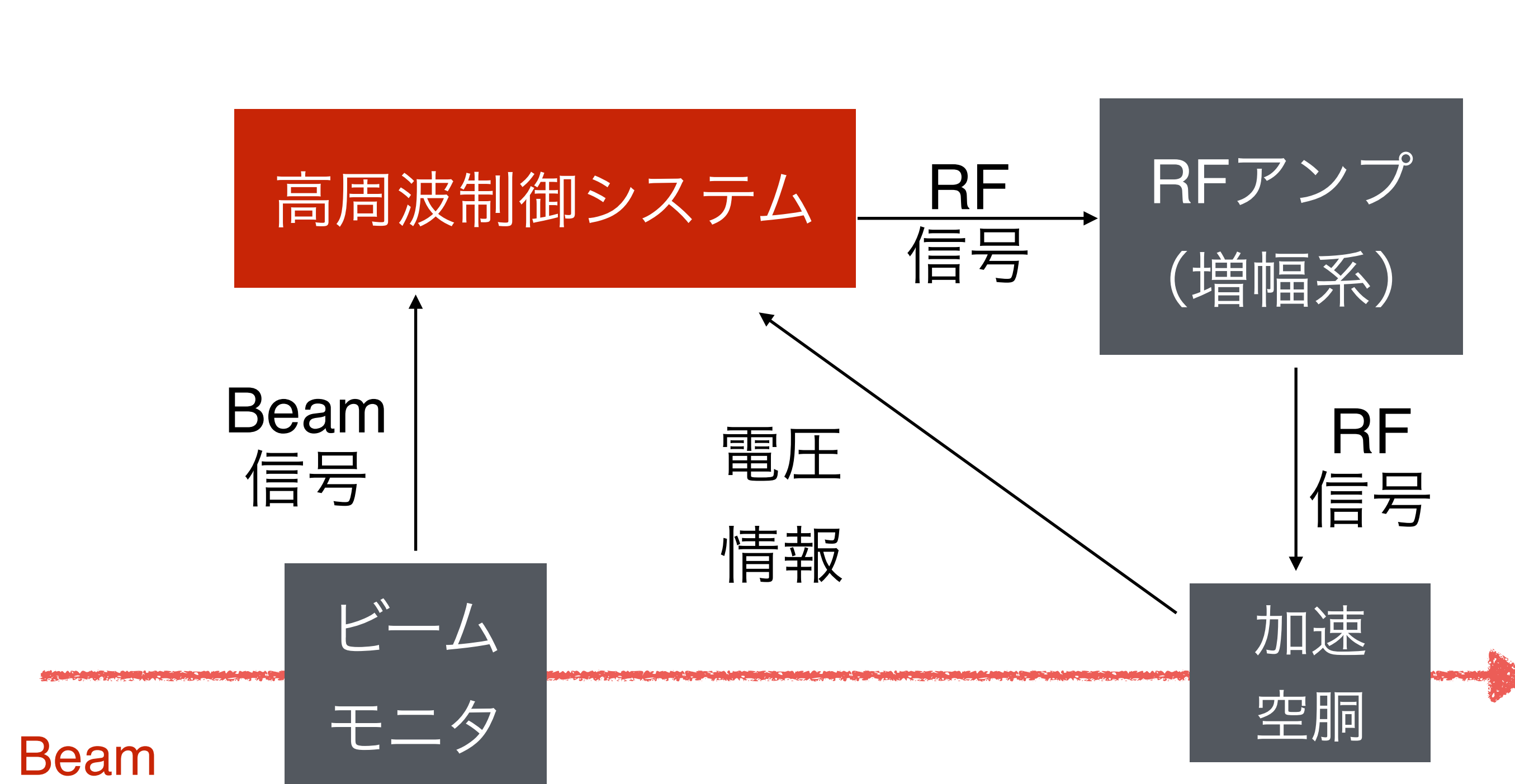


ビームの位相空間内での回転

高周波制御システム

10/24

- ・ シンクロトロンでは高電圧の高周波(RF)信号を電極に発生させ粒子を加速。
- ・ 加速する粒子に合わせた電圧振幅、位相、周波数を発生させることが重要
- ・ 高周波制御システムでこれらのパラメータを制御してRF信号を作り、RFアンプで増幅して加速空洞に供給。
- ・ 制御のために、ビームや加速空洞の状態をモニタしてフィードバック。
- ・ 高速で制御を行うために、**FPGA**が用いられることが多い。



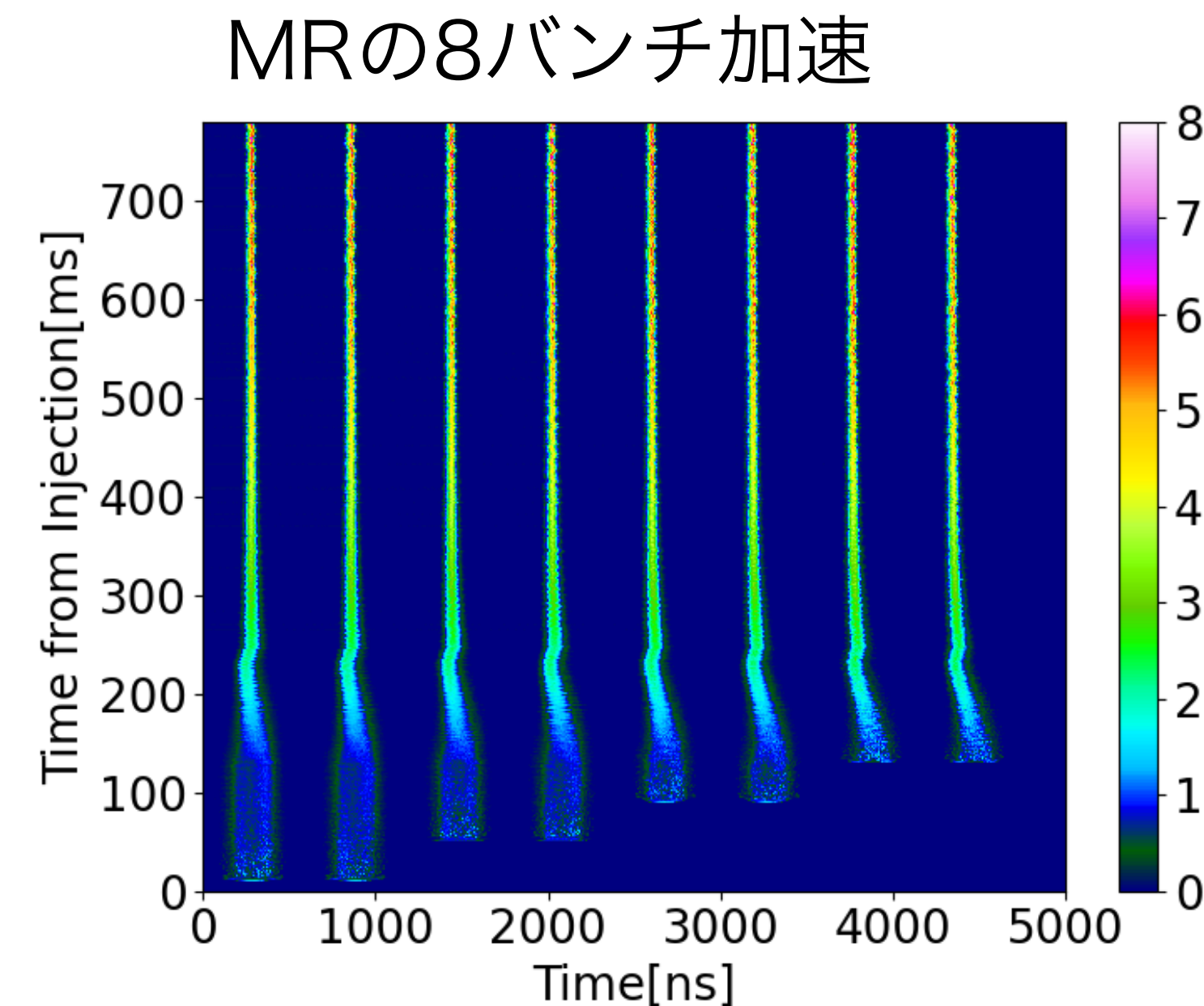
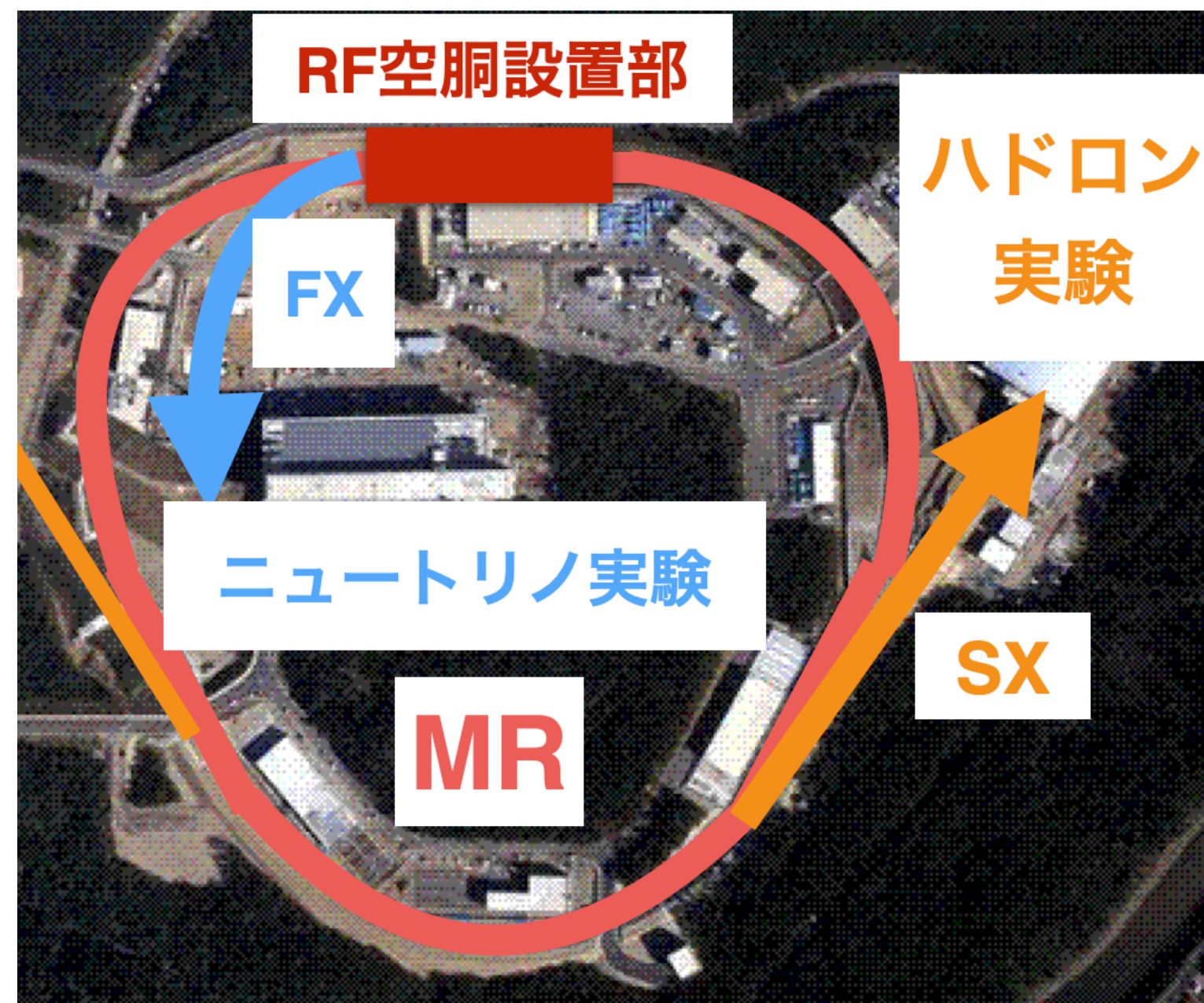
FPGA搭載 高周波制御モジュール

J-PARC MRとその大強度化

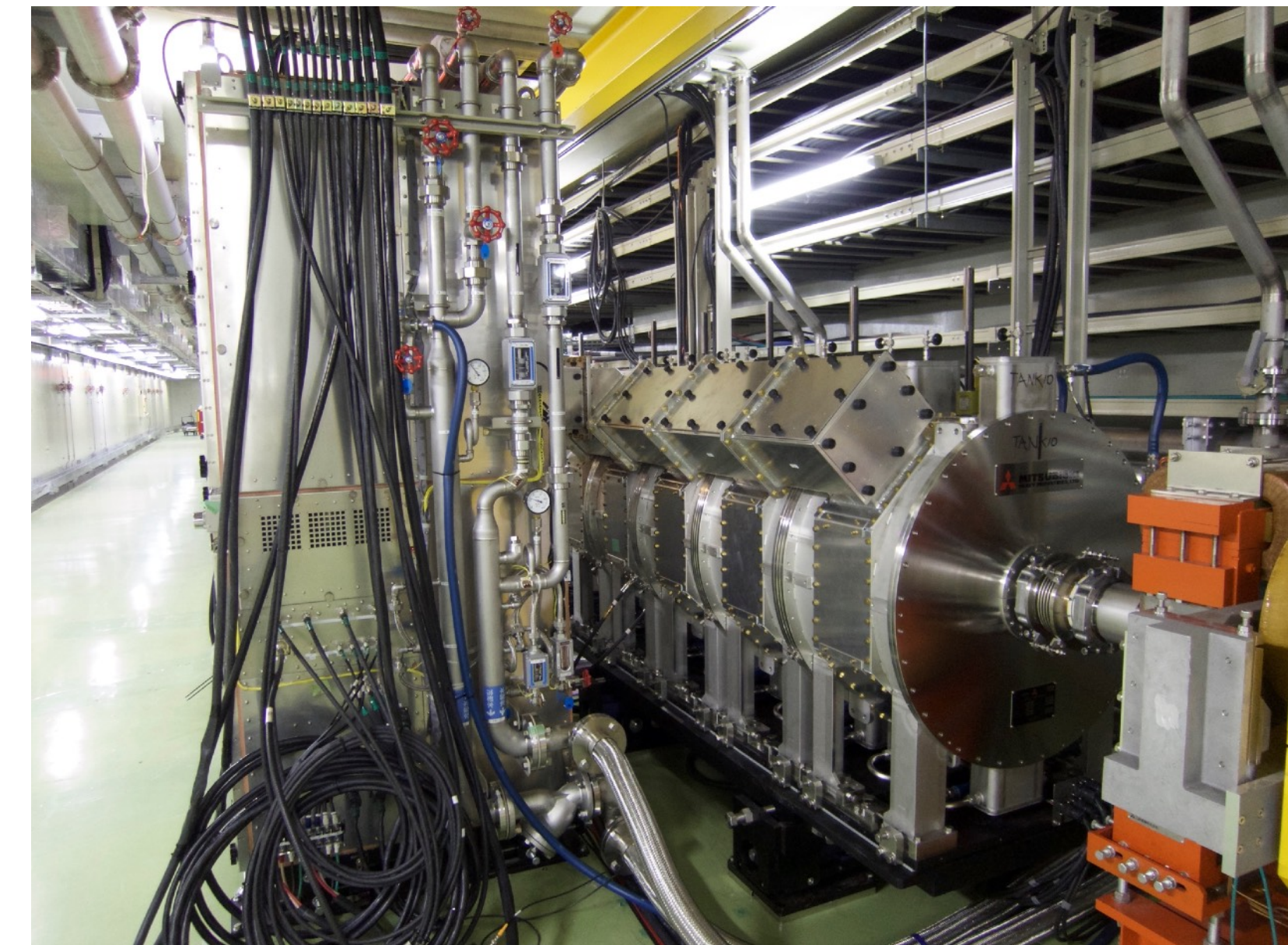
J-PARC 主リング(MR)におけるRF加速

- 12台のRF加速空洞により陽子を3GeV→30GeVに加速
 - 10台は $h=9$ で加速に使用、2台は $h=18$ でバンチ整形に使用
 - 9個のバケツに8バンチ。1バケツは取り出し機器の立上時間用に確保
- 取出し強度はニュートリノ実験への速い取出し(1turn)で900kW(1.28s cycle)、ハドロン実験施設への遅い取出し(~2s)で96kW(4.24s cycle)。
- さらなる大強度化を目指してアップグレード中！

Energy	3~30GeV
加速周波数	1.671-1.721MHz
周回周波数 f_{rev}	186~191kHz
加速時間	0.65 s
ハーモニック数	9
バンチ数	8
最大電圧	500kV(加速用) 110kV(2倍高調波)



MRのRF空洞



RFから見た大強度化の難しさ

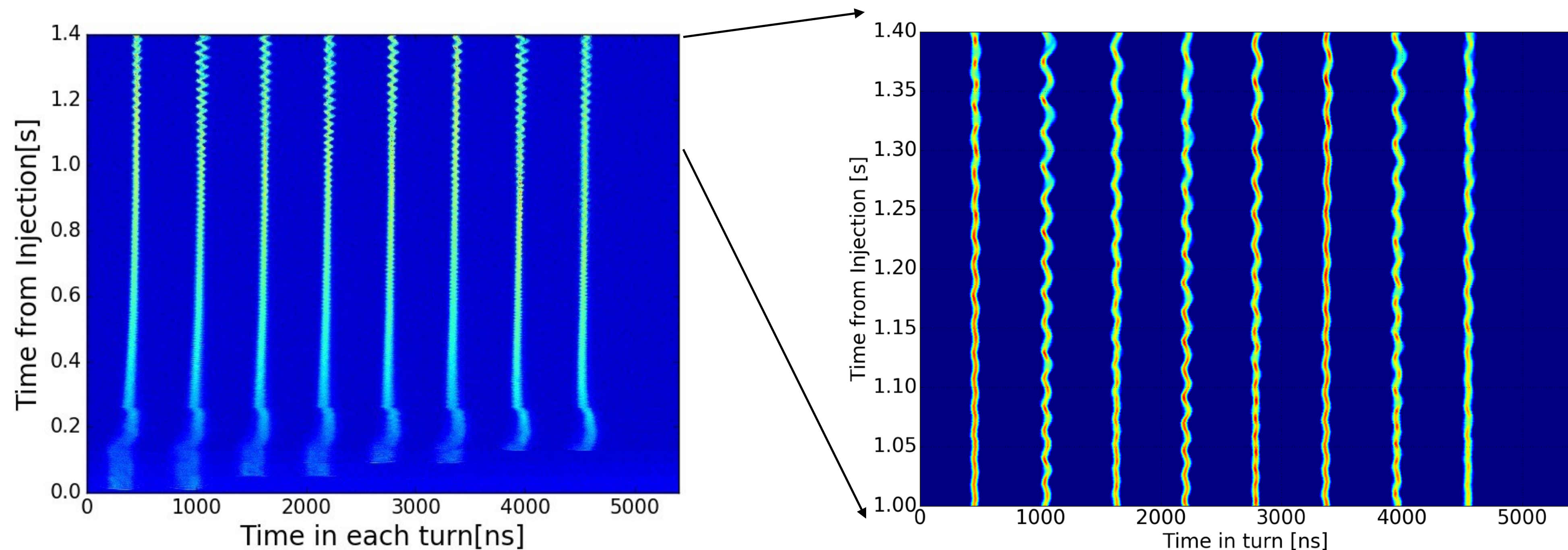
13/24

- ビーム強度 = エネルギー x 粒子数/供給サイクル
- 大強度化には高繰り返し化と粒子数増加が必要
- 高繰り返し化：
 - 加速時間が短くなる = 1ターンあたりに加速するエネルギーを増やす必要がある
 - 加速空洞の追加で対応。
- 粒子数増加 = 大電流化
 - 粒子数の増加に伴って、粒子同士、および粒子と加速器機器との相互作用でビームが不安定になる
 - ビーム電流によって加速器の内壁に誘起される電圧がビームを乱す = **ビーム不安定性**
 - 対策
 - 原因となる電圧誘起の抑制、あるいはビームを制御して安定化する。
 - ビームをRF操作してピーク電流を低減しビーム不安定性を起こしにくくする。

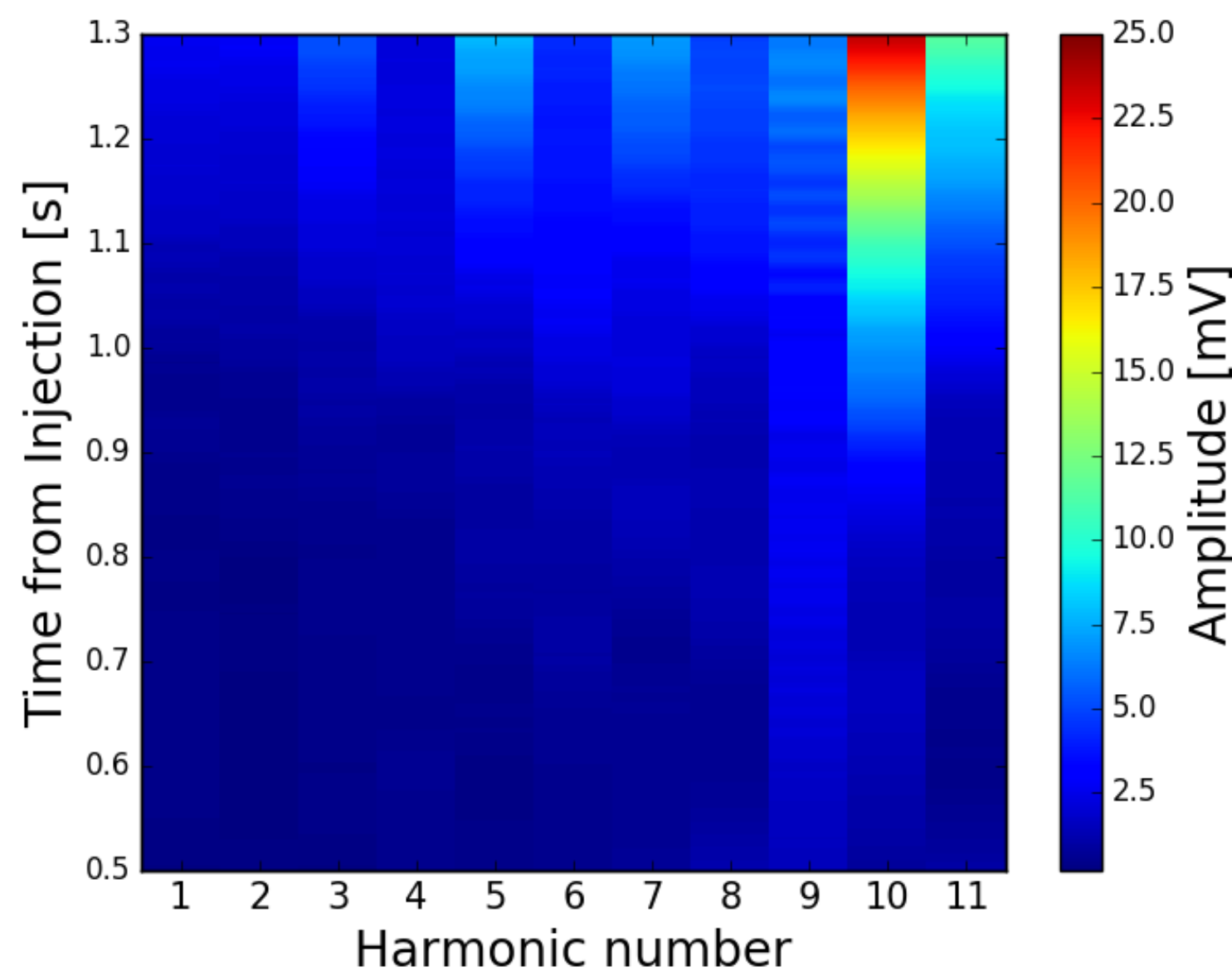
ニュートリノ実験への速い取り出しでの 縦方向不安定性抑制

- ・ 2021年までは1.4s加速(2.48sサイクル)でビーム運転。
- ・ 2016年頃に450kW (パルス辺り 2.3×10^{14} 個)を越えた辺りから加速終盤でビームの縦方向振動が顕著となった。
- ・ 振動の振幅がビーム強度の増加に伴って大きくなる
- ・ ビーム電流と機器のインピーダンスの相互作用によるビーム不安定性
- ・ 更なる粒子数増加、およびアップグレードでの加速時間短縮に向けて対策が必要となった。

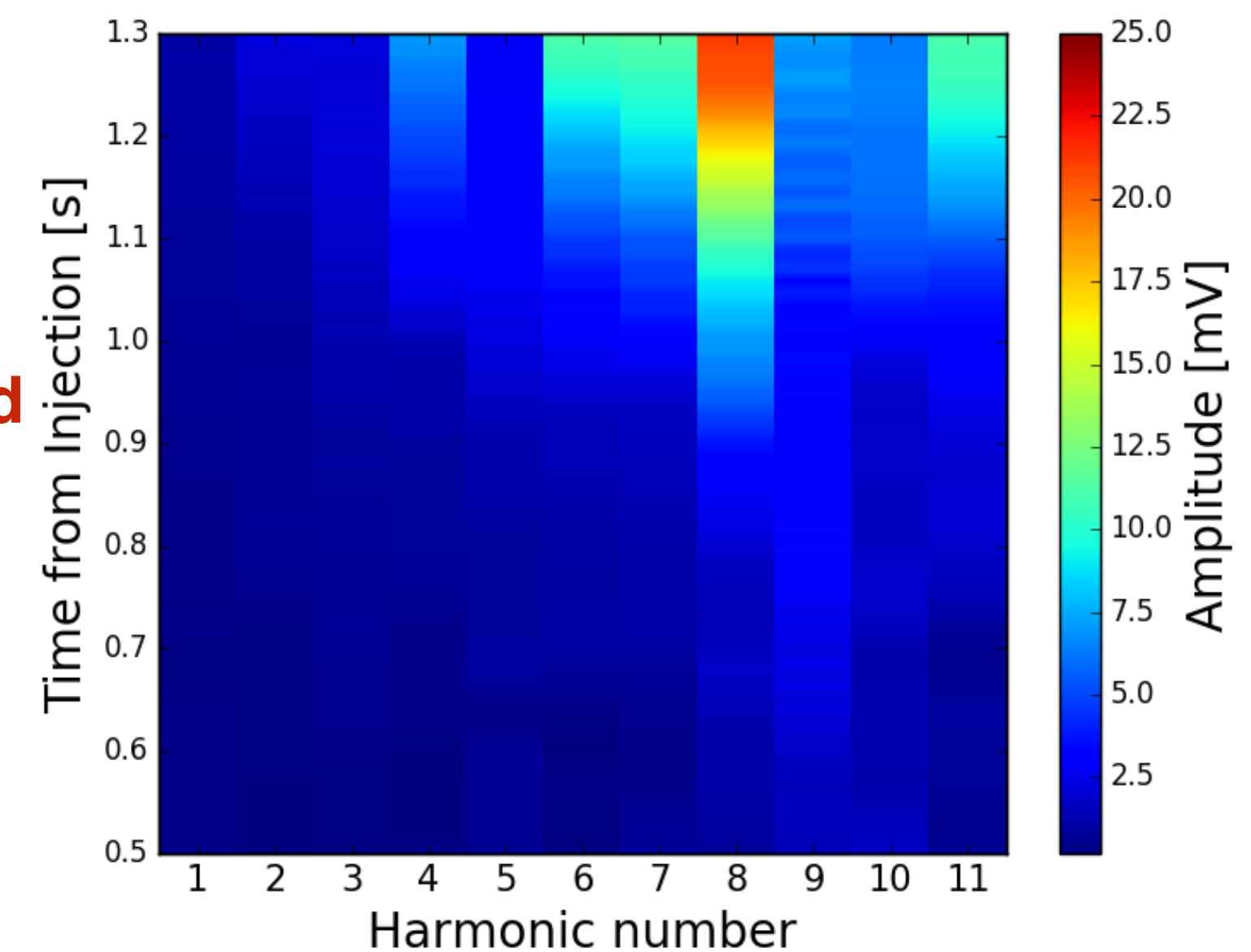
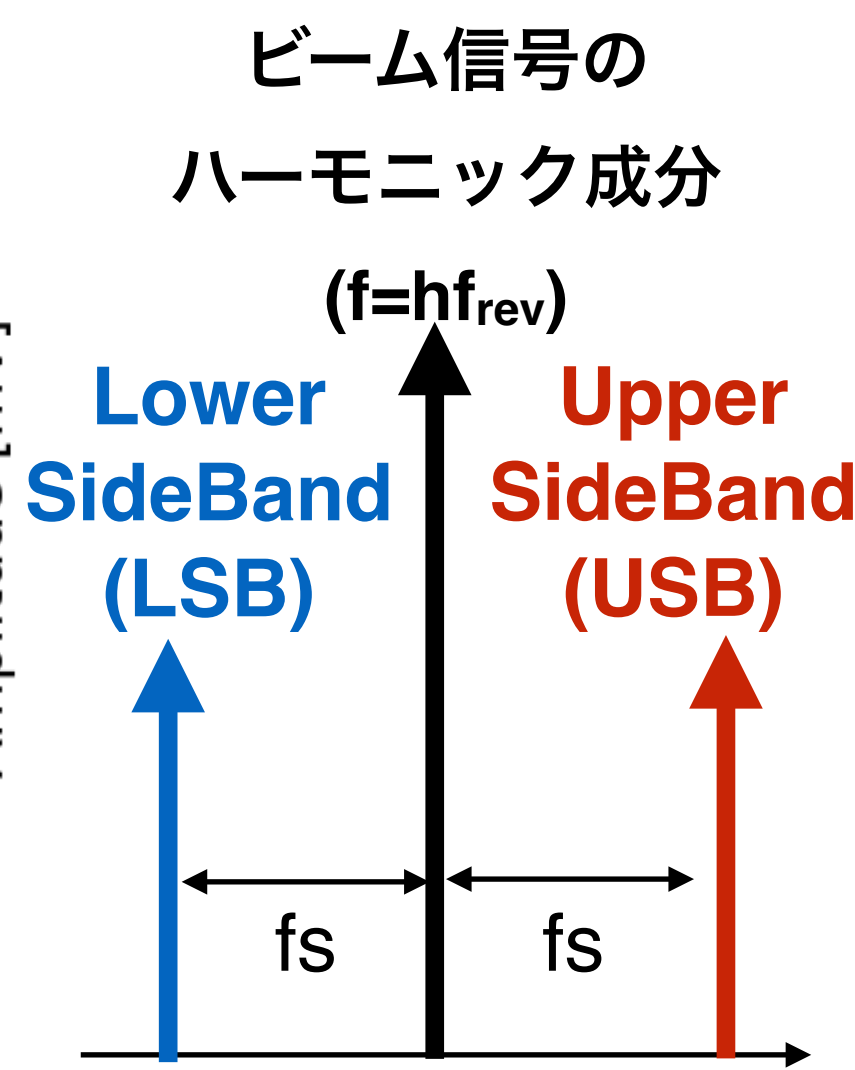
480kW
(FX)
での
縦方向
振動



- ・ ビーム振動は、機器の持つインピーダンス(抵抗)とビーム電流から生じる電圧によって引き起こされる。
- ・ ビーム信号をFFTを用いて解析し、ビーム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。
- ・ ビームの縦方向振動はビーム信号のハーモニック成分($f = hf_{\text{rev}}$)の $\pm f_s$ のサイドバンドに現れる。
- ・ ビームの揺れ方は揺らす電圧の周波数に対応。→原因となるインピーダンスの周波数帯がわかる。
- ・ 加速周波数($h=9$)の隣接ハーモニクス($h=8,10$)で振動大→空胴インピーダンスを疑った。



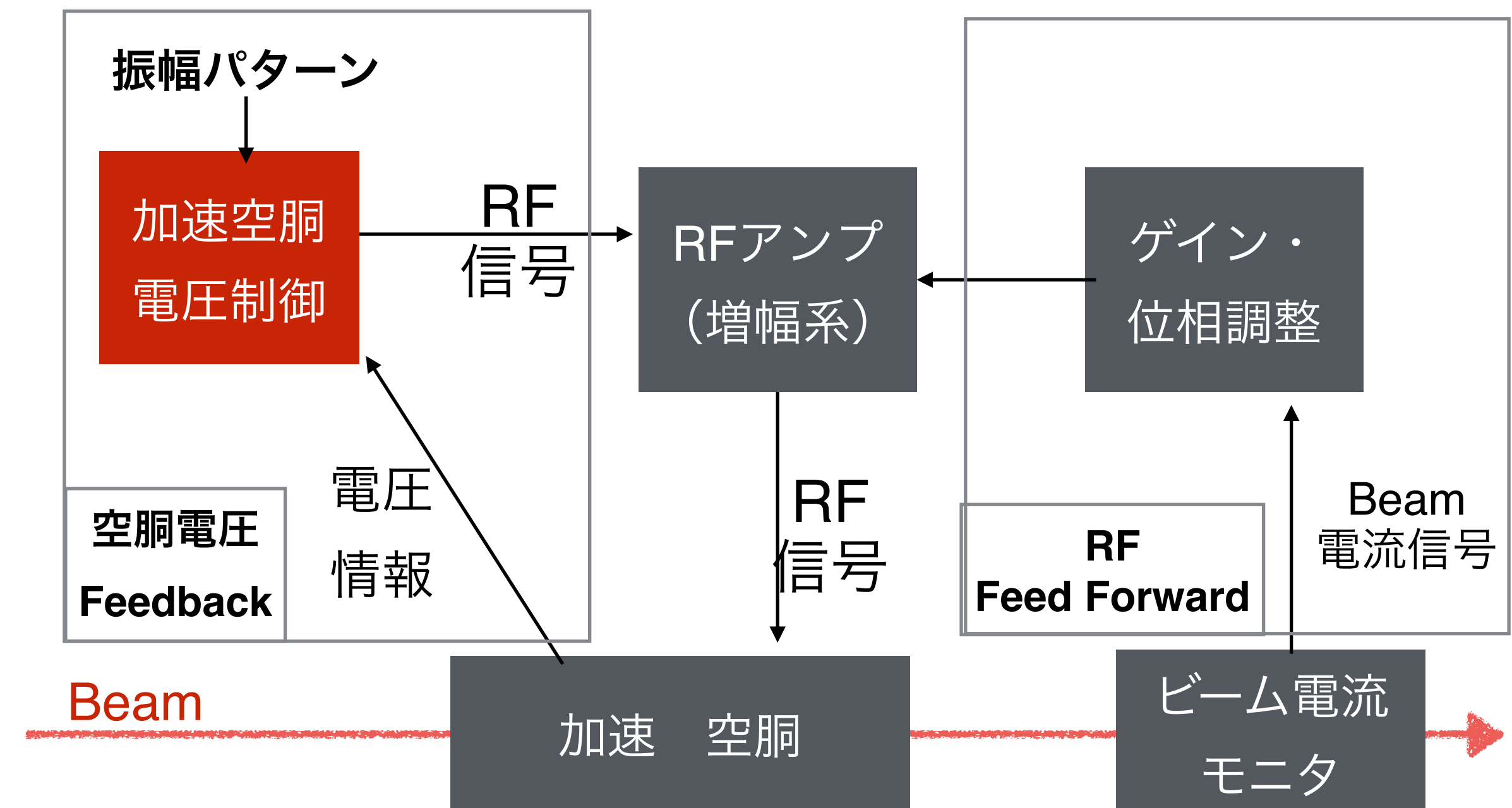
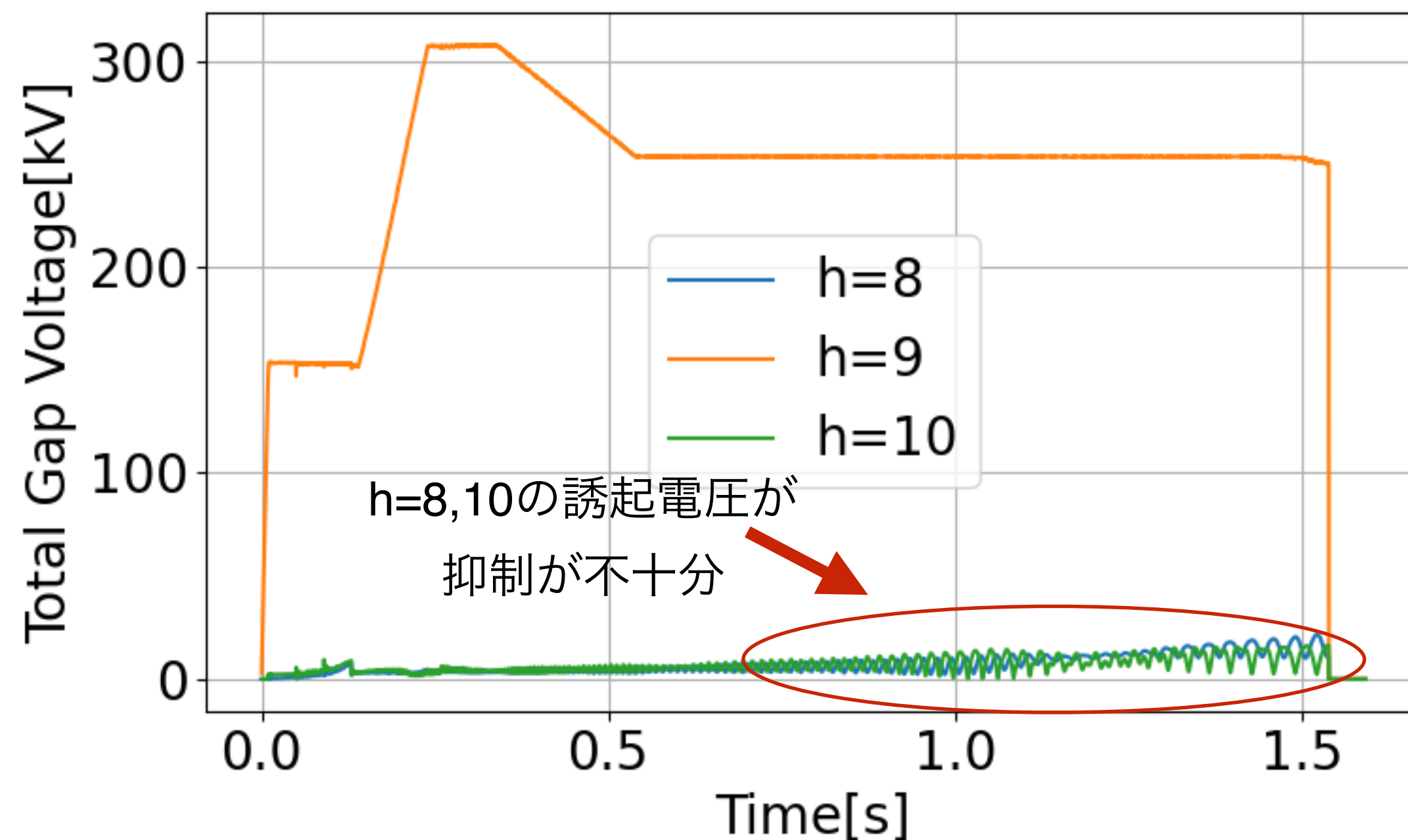
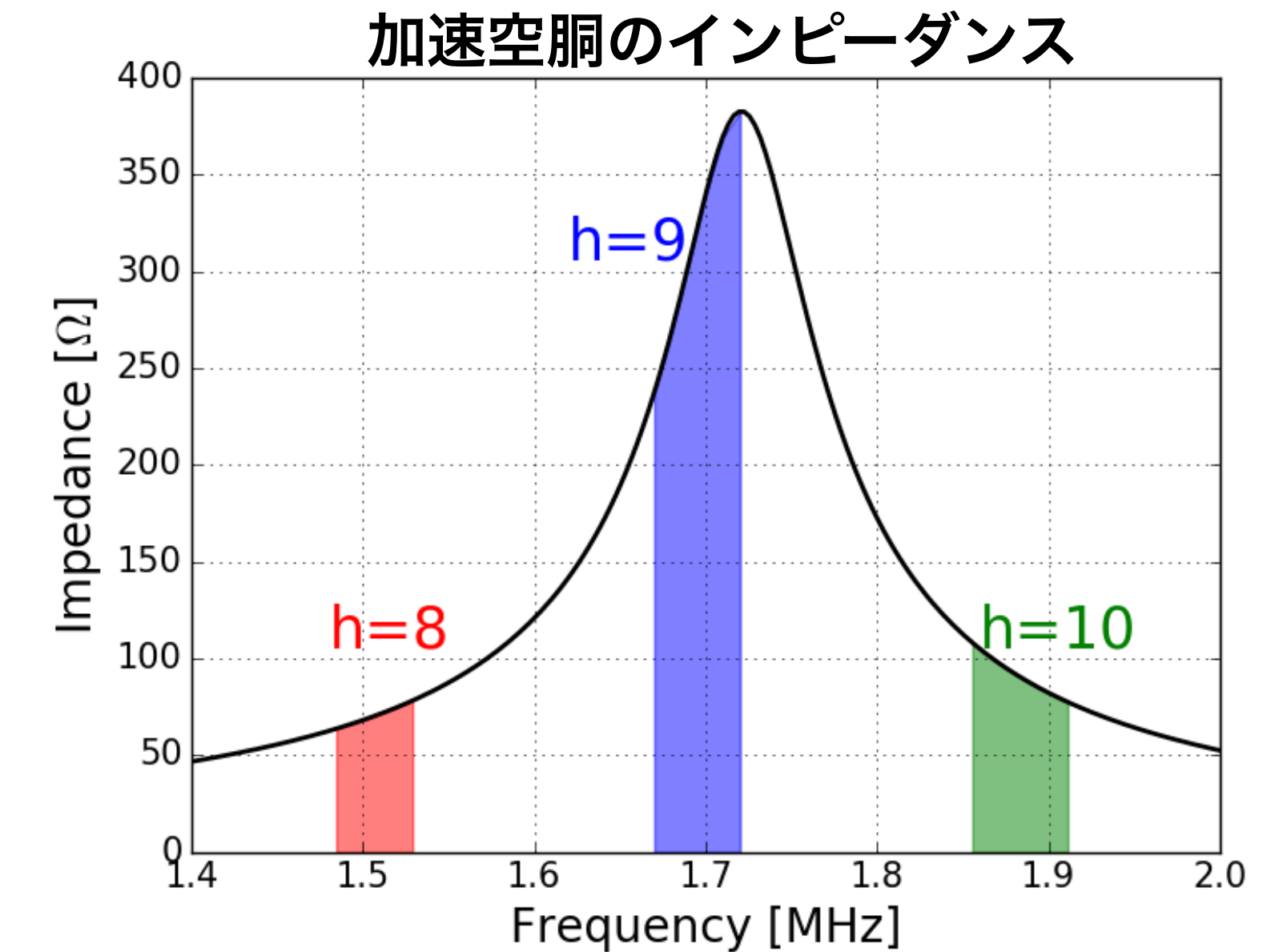
各LSB($hf_{\text{rev}} - f_s$)の振幅時間変化



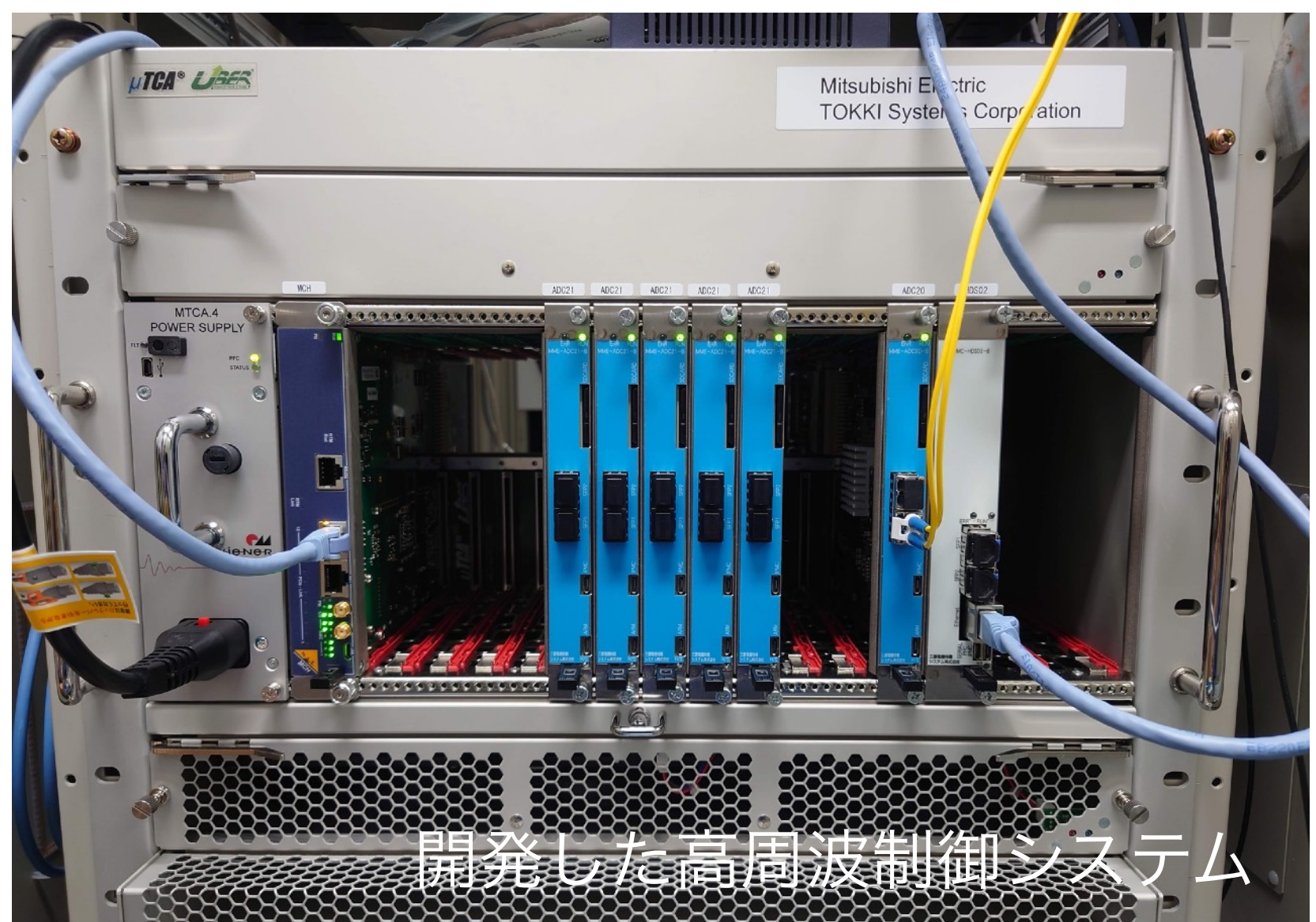
各USB($hf_{\text{rev}} + f_s$)の振幅時間変化

加速空洞の誘起電圧対策

- J-PARC MRでは加速空洞に広帯域金属磁性体を使用
- 幅広い加速周波数に対応できるが周辺周波数のインピーダンスも高い
- 誘起電圧の影響を無くすには打ち消す信号を空洞に与えてキャンセルする。
(ノイズキャンセリングのようなもの)
- 2019年までは、加速空洞に誘起される電圧をビーム電流から推定して打ち消すフィードフォワード法を用いていた。
 - 大電流になると推定の誤差が大きくなり誘起電圧が残ってしまう
- 空洞の電圧を監視してフィードバックし抑制することにした。

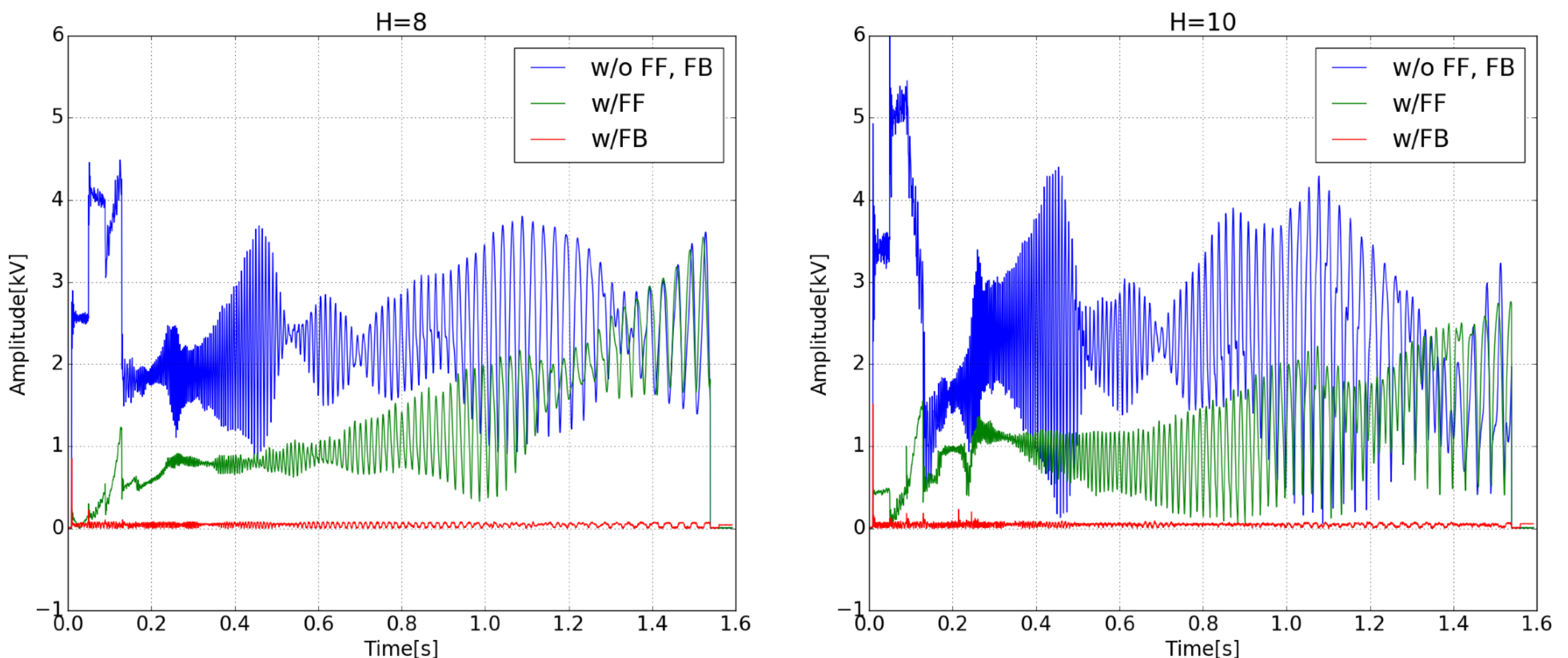


- 新しい空胴電圧用高周波制御システムを開発。
- $h=6\sim 12$ の電圧信号をベクトル信号としてフィードバック制御
- 空胴電圧のフィードバック制御の採用により、誘起電圧を抑制。
- ビーム振動の抑制に成功し、500kW (パルス辺り 2.7×10^{14} 個)の加速、ユーザー利用運転への供給に貢献した。
- 将来的に粒子数を増やす為の不安定性の抑制が可能となった。
- **2022年以降の大強度化アップグレードでも不安定性の抑制に貢献。**

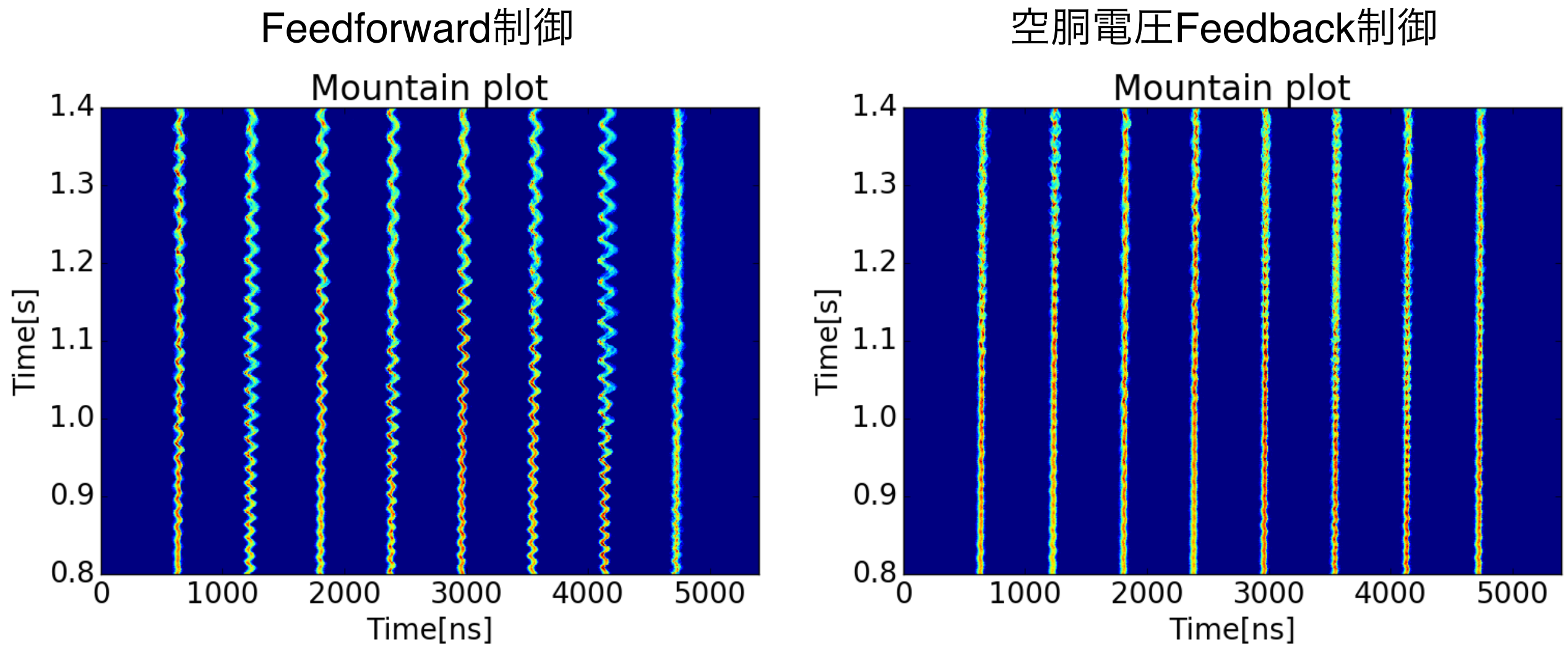


開発した高周波制御システム

空胴1台分のRF電圧測定値@480kW



480kWでの各バンチの動き

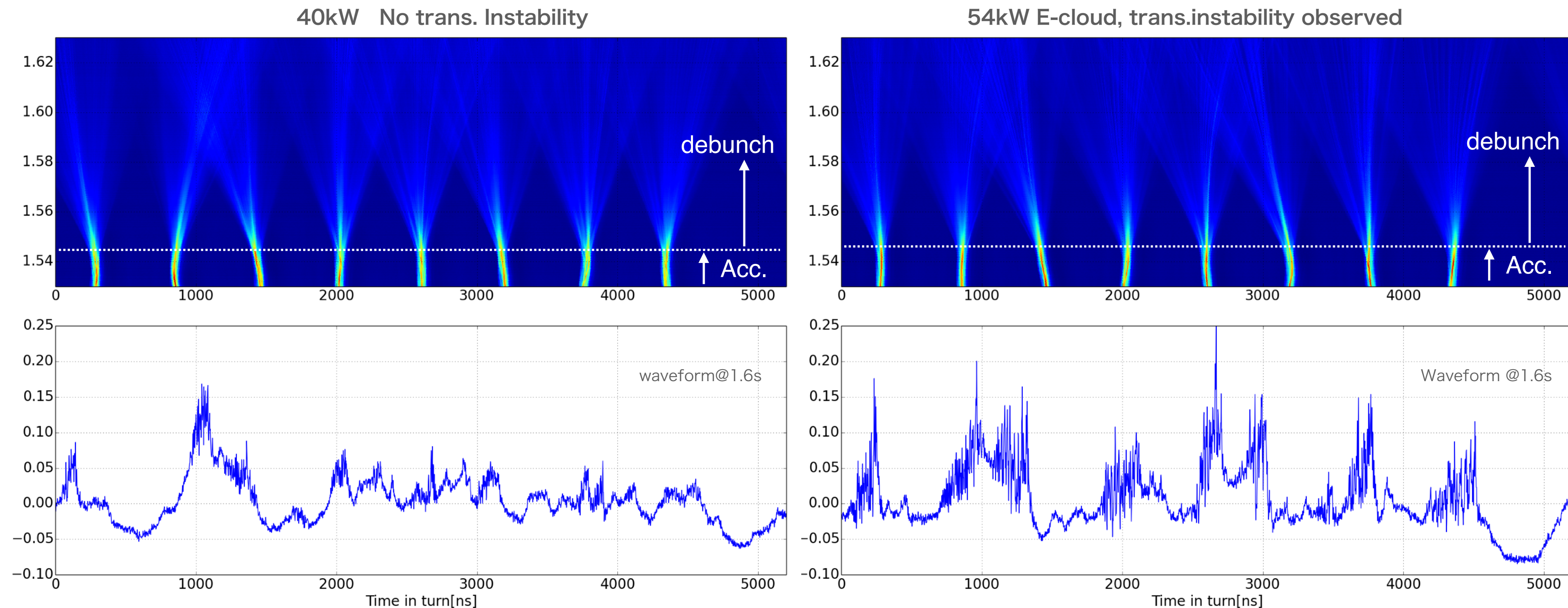


ハドロン実験への遅い取り出しでの 縦方向不安定性抑制

遅い取り出しにおける縦方向不安定性

20/24

- ハドロン実験での遅い取り出しでは、検出器の瞬時レートを低減するためにゆっくり取り出す（~2s）。
 - バンチ構造が残っていると瞬時レートが高くなるので、取出前にRFオフでバンチ構造を解消。(デバンチ)
- ビーム強度を増やしていくと、デバンチ時にビームにスパイク状の構造が見えるようになってきた。
- RFバケツが無い状態で、ビーム電流と機器のインピーダンスで電圧が発生して構造が出来ている(縦方向不安定性)
- 横方向の不安定性も同時に発生し、真空悪化やビームロスを引き起こす。
- この不安定性の対処には、RF操作を行ってデバンチ前のピーク電流を下げるのが重要。**

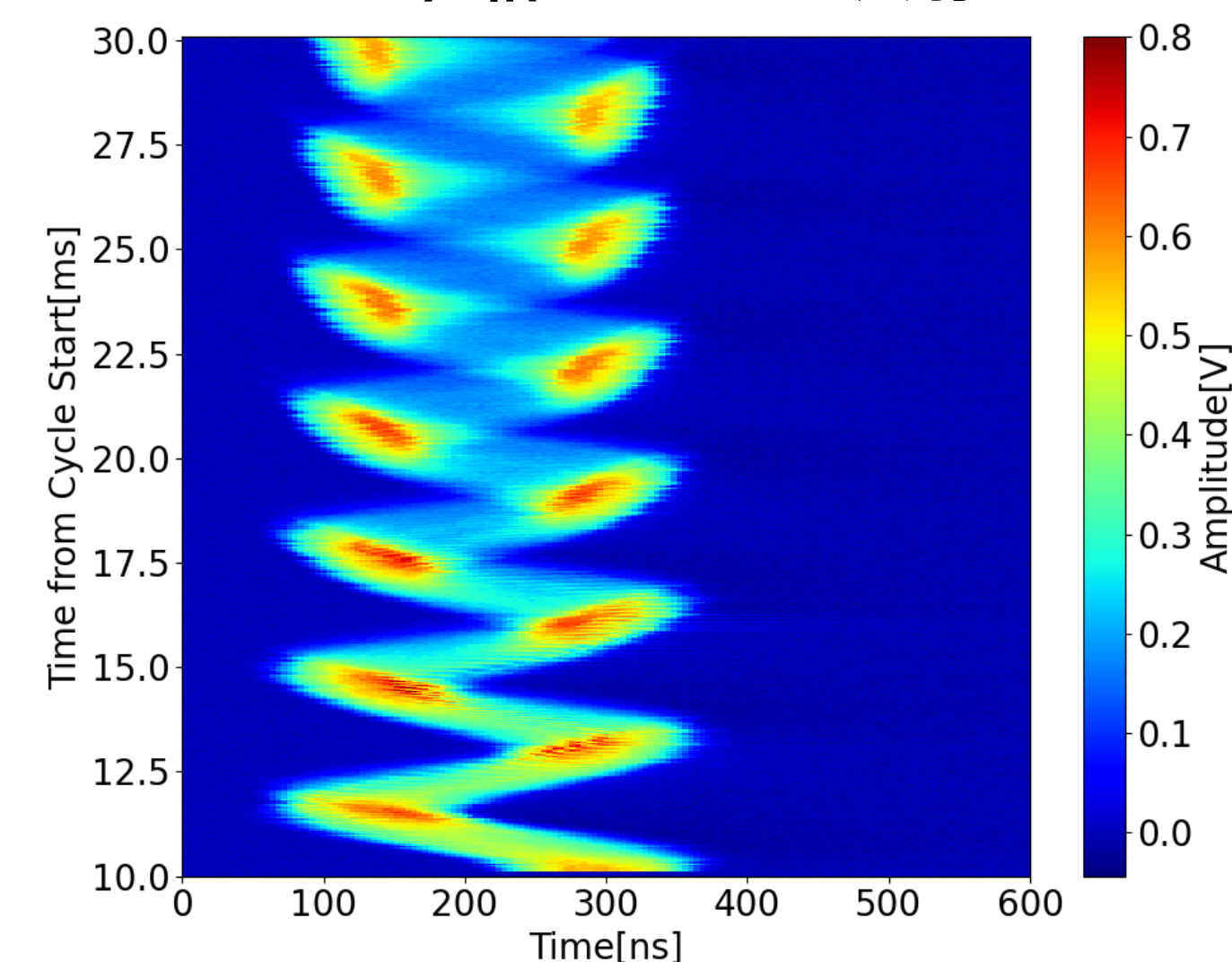


位相オフセット入射によるピーク電流減少

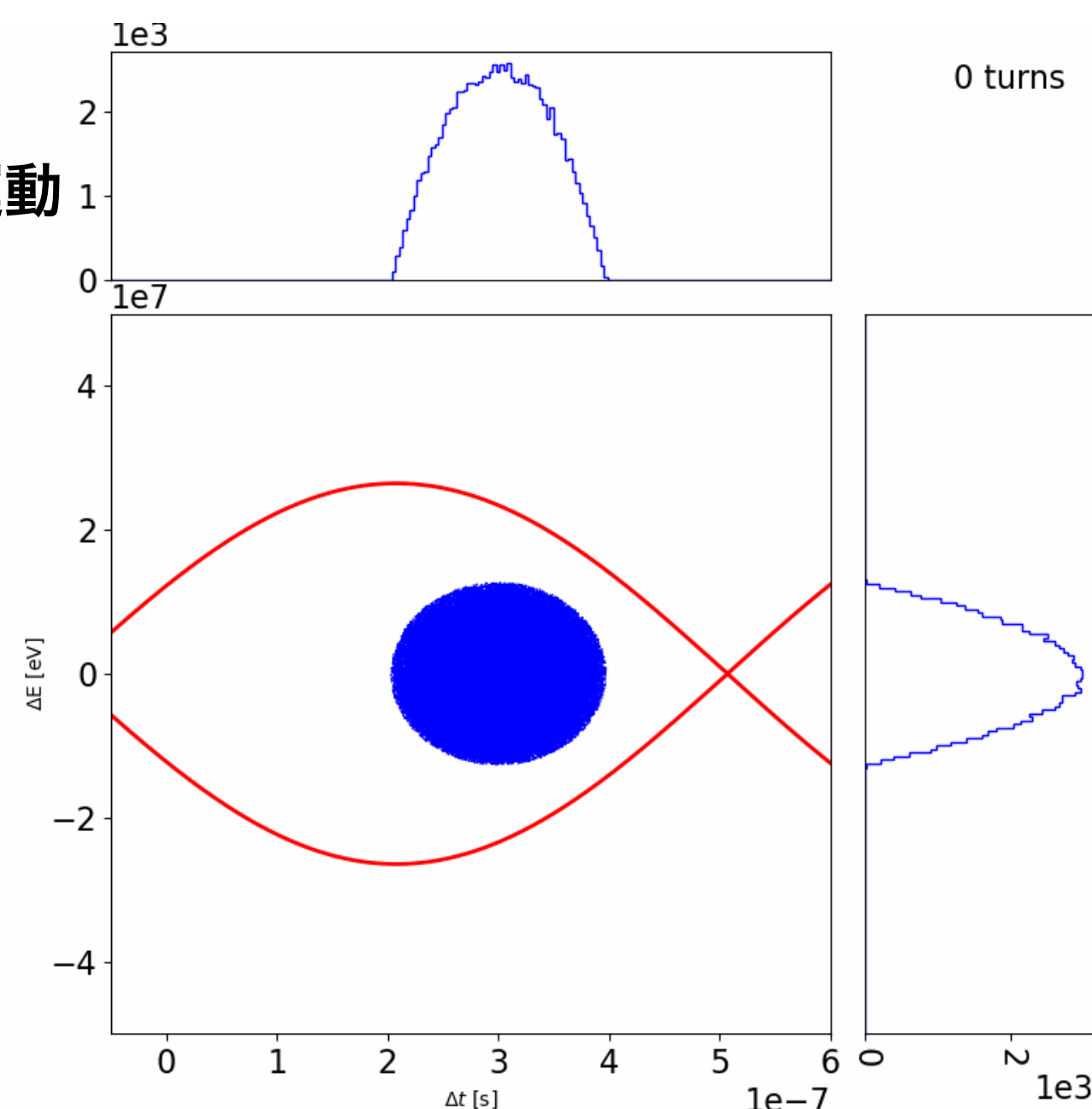
21/24

- RCSからの入射時にRFバケツの中心からずらした位置にビームを入射させる。
- 縦方向振動を発生させて長期間放置するとビームが引き延ばされて、位相空間内に薄く広く分布するようになる。
- 時間方向にも長くなるので、その分ピーク電流が減少する。
- 入射時の横方向の不安定性の抑制とロス低減にも効果。
- 加速中とデバンチ前のピーク電流が減少。50kWまでのビーム強度実現の鍵。

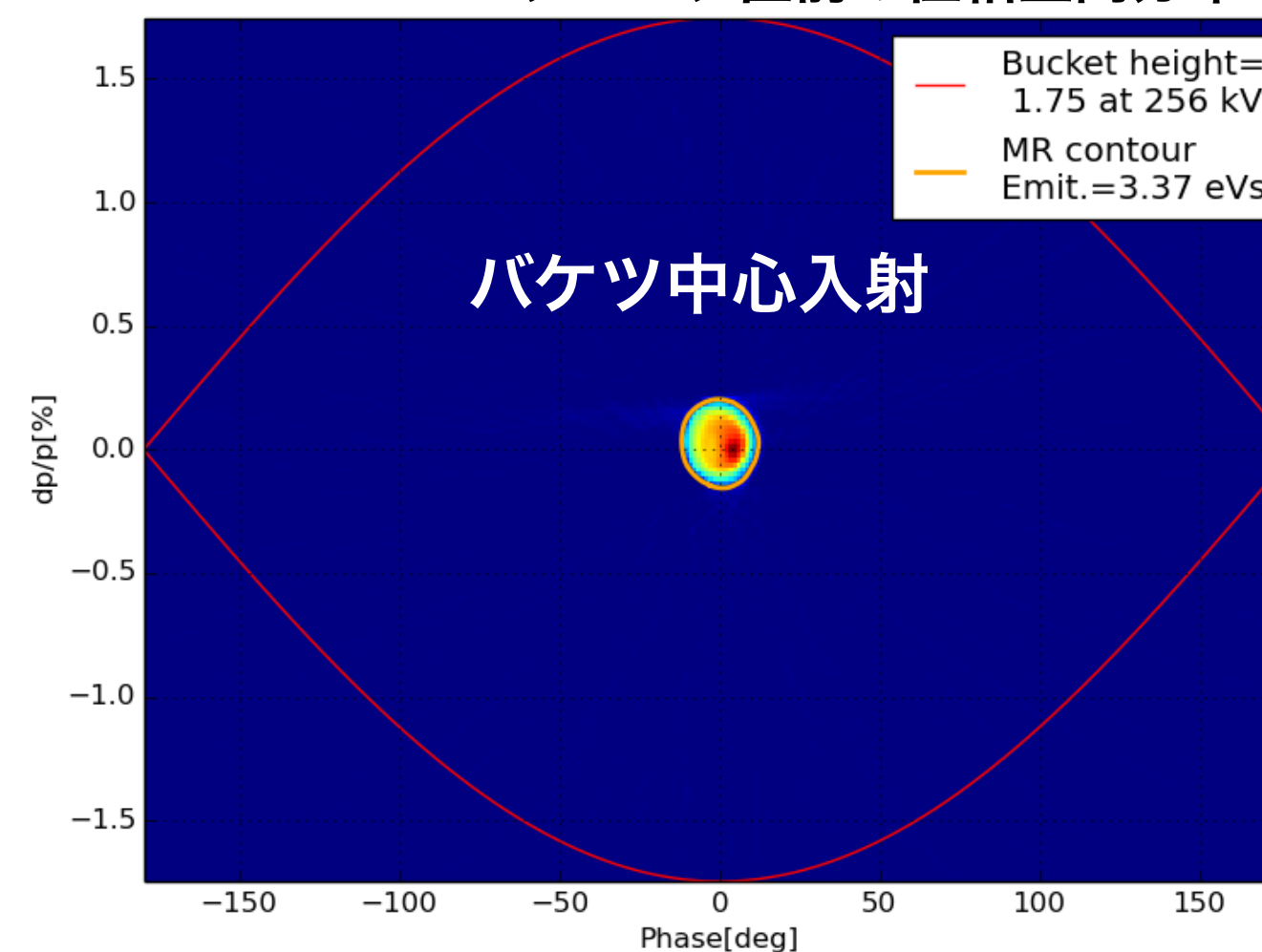
位相オフセット入射



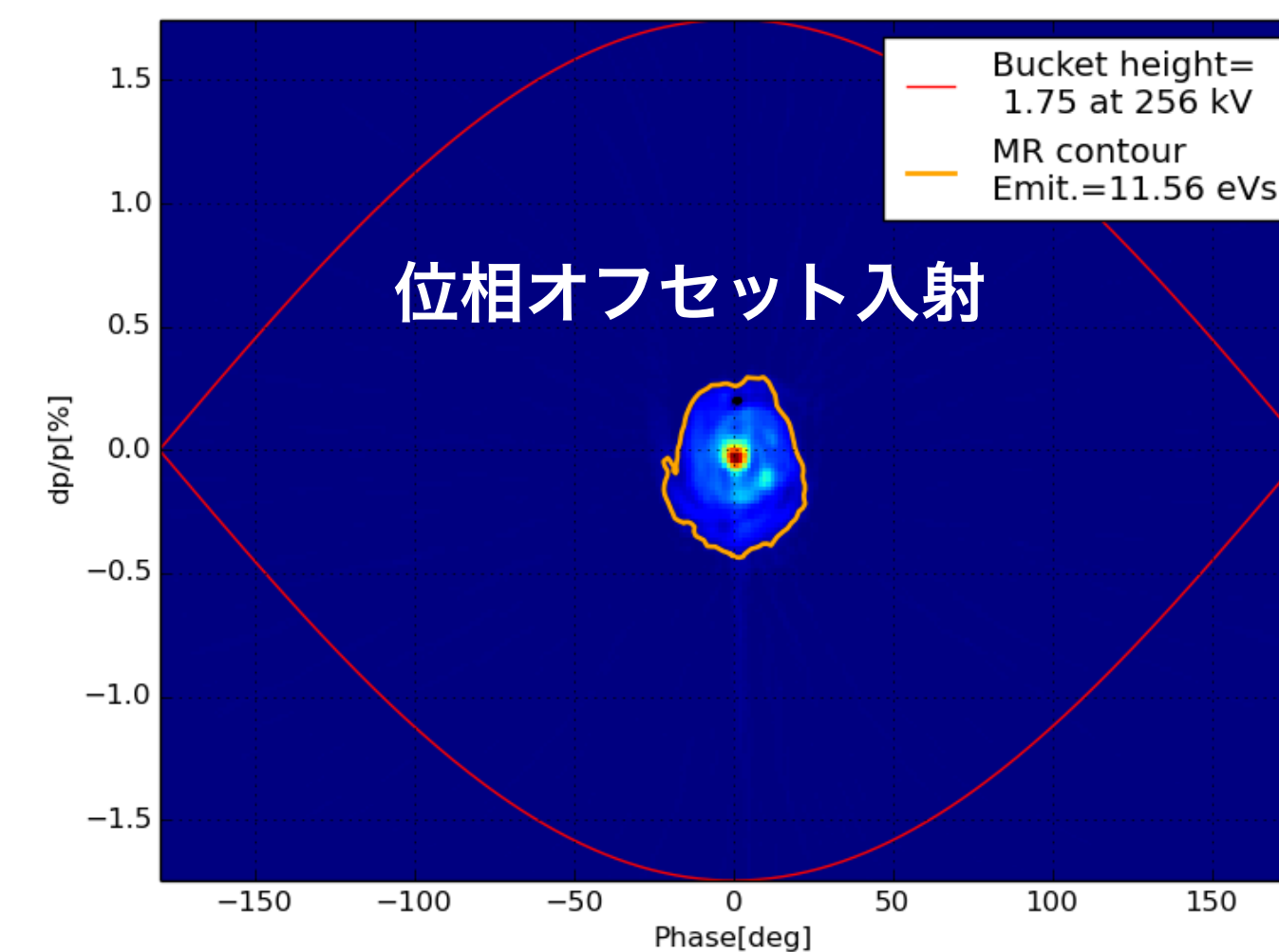
シミュレーションでの
ビーム粒子のバンチ内運動



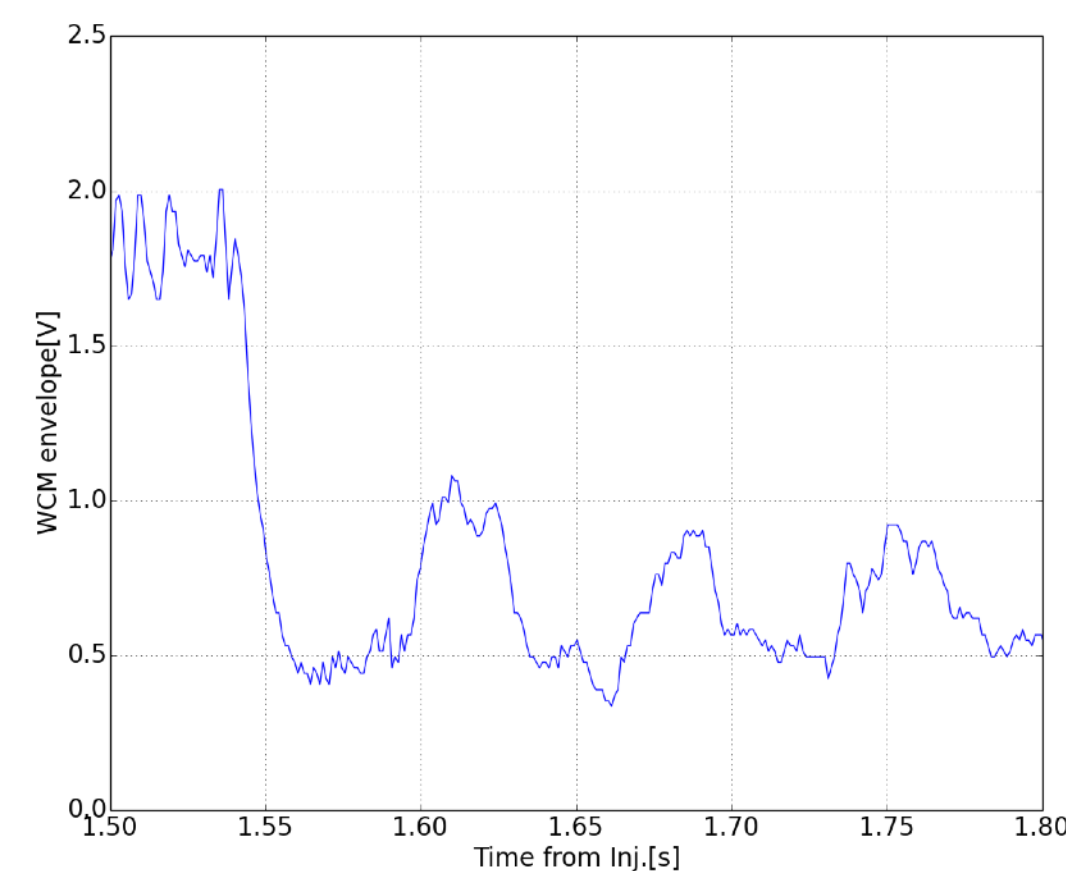
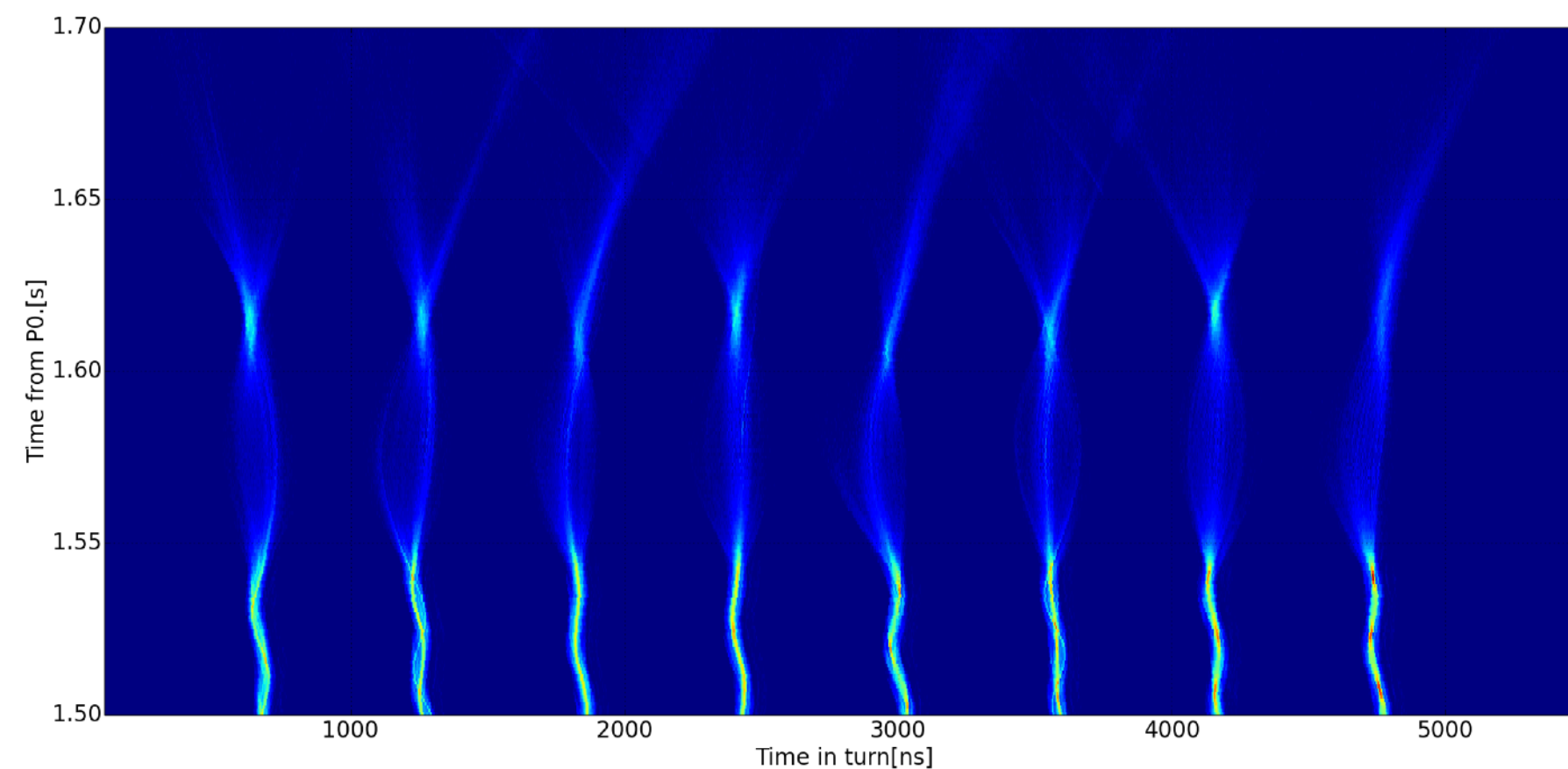
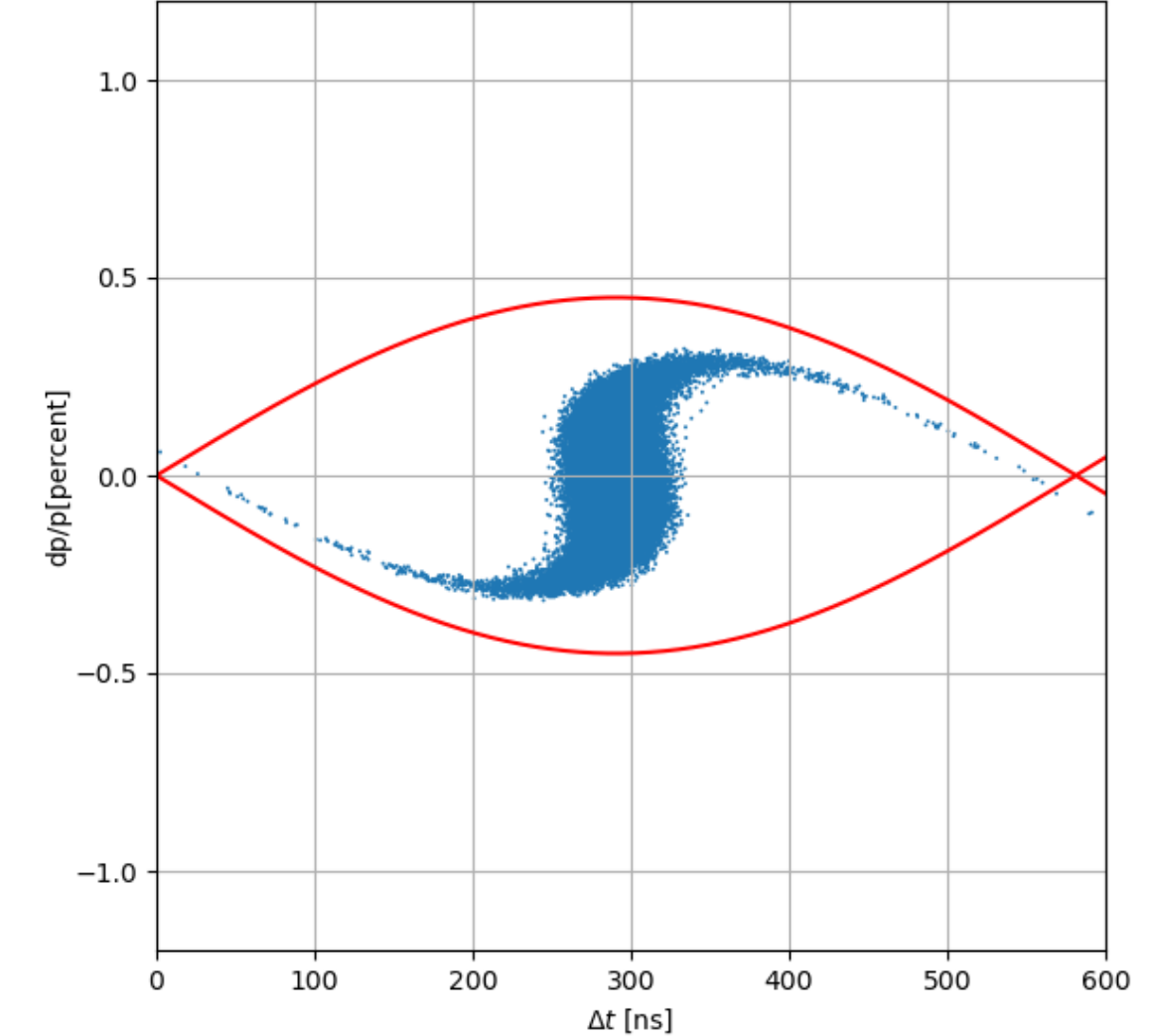
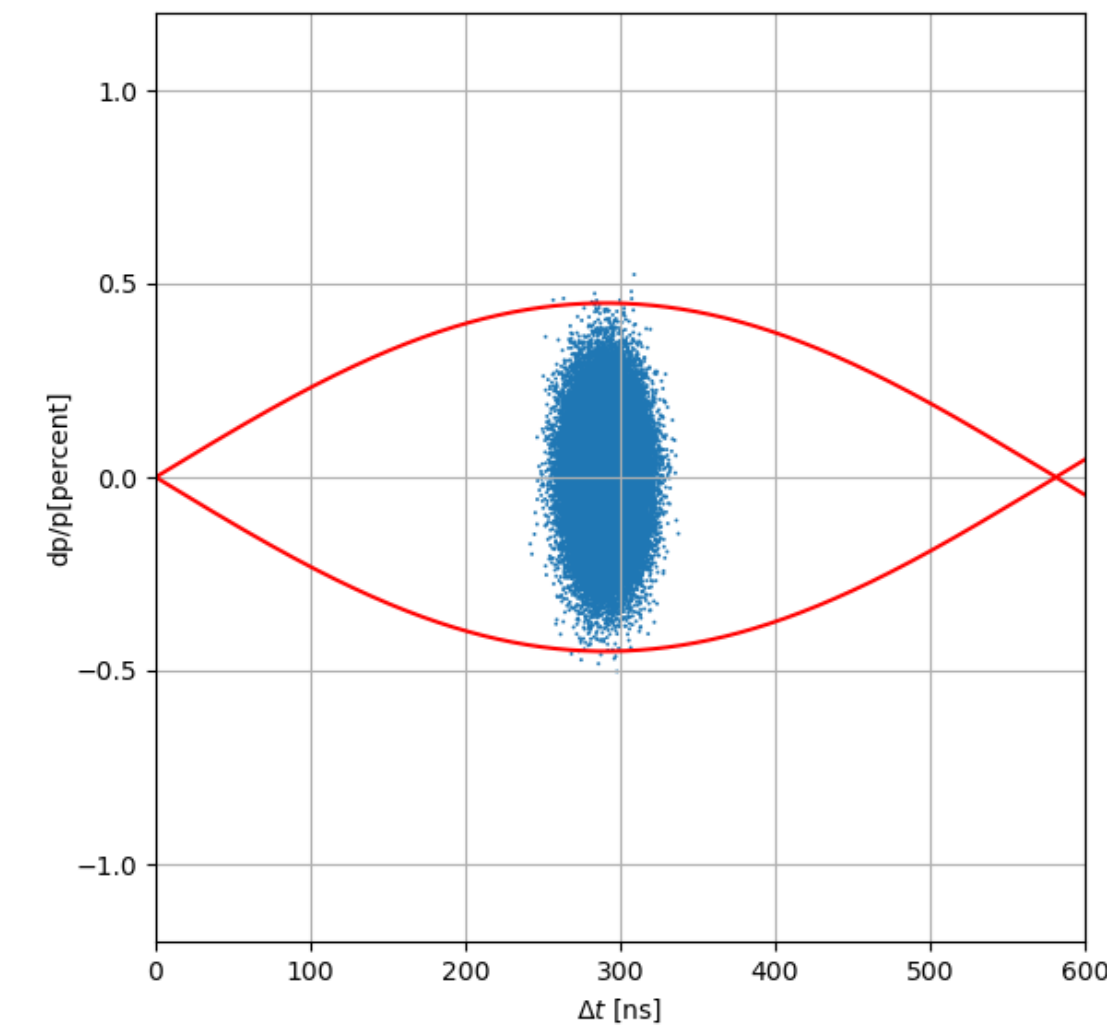
デバンチ直前の位相空間分布



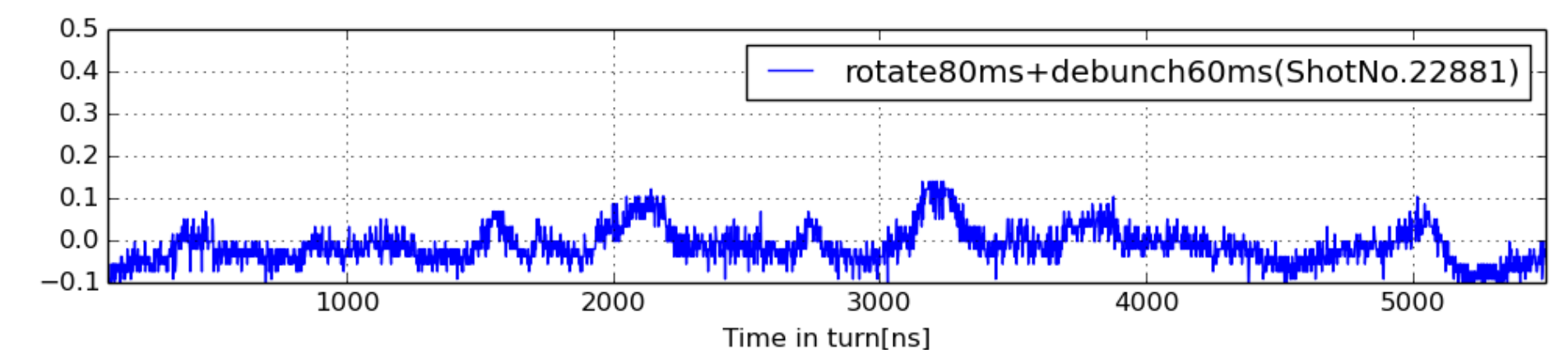
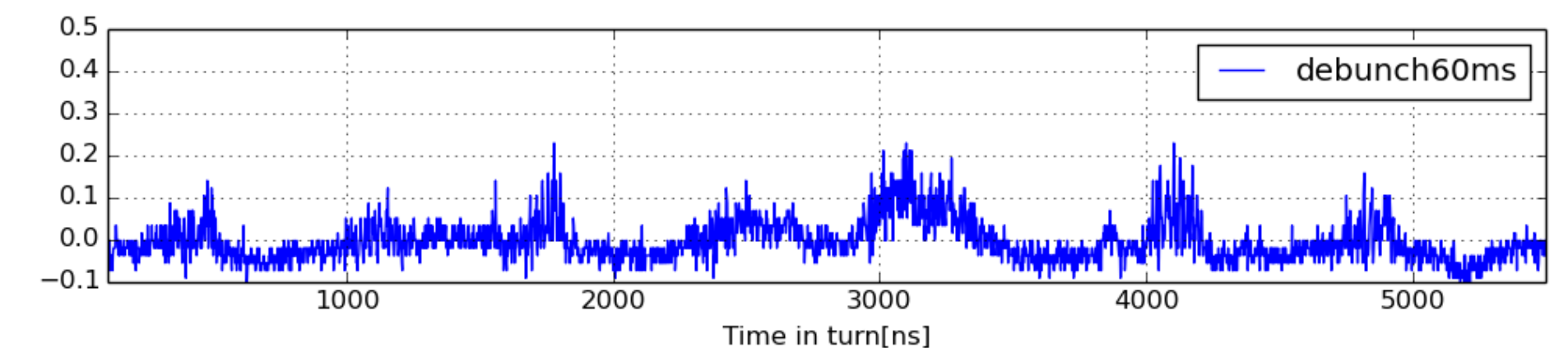
デバンチ直前の位相空間分布



- 位相オフセット入射でも50kWを越えるとデバンチ時にスパイク状の縦方向不安定性が見える。
- デバンチ前にRF電圧を急激に下げてバンチ回転。
- RFバケツの形状が変わるとバケツ内の粒子はバケツの形に合わせようと回転を始める。
- 回転による形状変化でピーク電流減少
- 不安定性も減少し、50kW～80kWの達成に貢献。

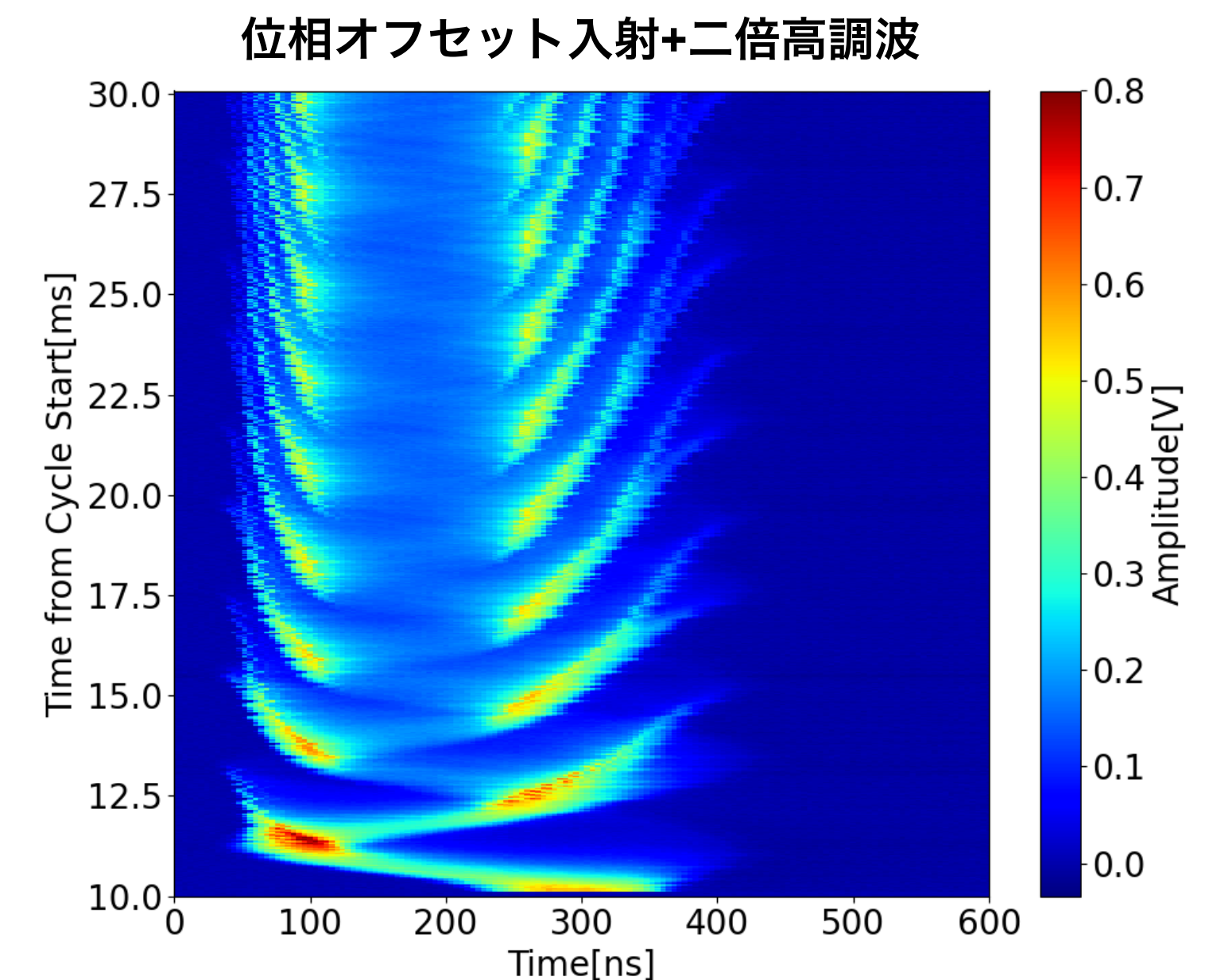
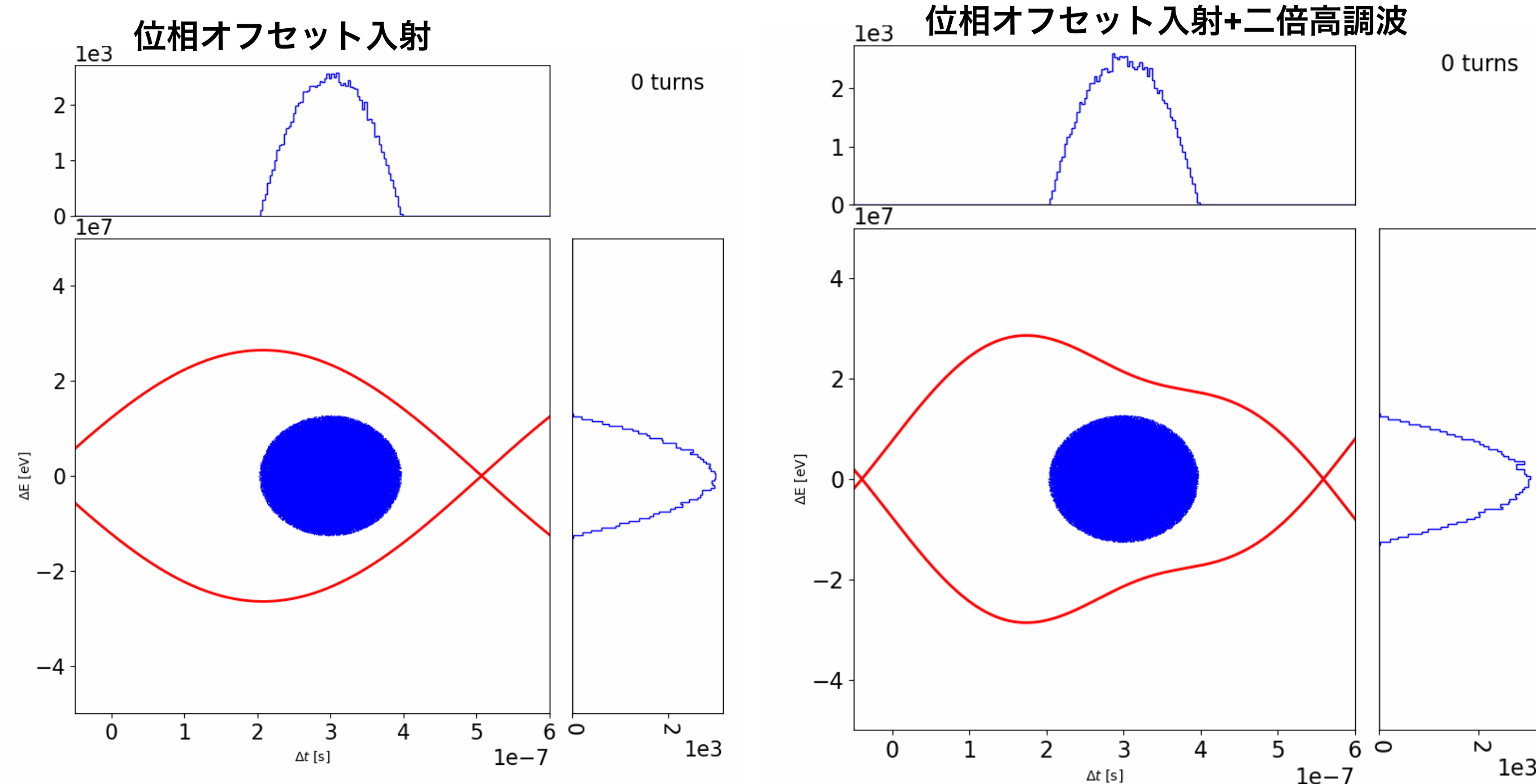


Beam pickup waveform



- 80kWを越えると、デバンチ時の不安定性に加えて入射時のビームロスも顕著になってきた。
- 入射時の位相オフセットには限界があるため、二倍高調波を加えてバケツを変形させた。
- 基本波と二倍高調波の位相をずらすことでRFバケツを非対称に成形。
- ビームを非対称バケツの中心からずらして入射させることで、より平坦なビームを実現
- 入射時のビームロスとデバンチ時の不安定性の低減につながり、80kW以上のビーム強度の実現に貢献。

シミュレーションでの位相空間分布



- ・ 素粒子原子核実験や物性実験、産業利用の観点からも加速器の大強度化が求められている
- ・ 大強度化は加速粒子数増加と加速サイクル短縮で実現
- ・ RFの観点での加速粒子数の増加への課題＝**加速粒子数増加に伴うビーム不安定性の抑制**
 - ・ 不安定性の原因を究明し、抑制する高周波制御システムを開発
 - ・ RF操作を用いて不安定性を起きにくくする
- ・ 加速サイクルの短縮と組み合わせて、速い取出し1MW、遅い取出し100kWを達成。
- ・ FPGAを持ちいたシステム開発やデータの波形解析など、
学生時代の素粒子・原子核実験での経験は、加速器研究でも大いに活かせる。