

J-PARC MRでの RF二倍高調波重畳による 取り出し前バンチ操作

J-PARCセンター (JAEA, KEK)

杉山泰之,

田村 文彦, 吉井正人, 大森千広



第18回日本加速器学会年会

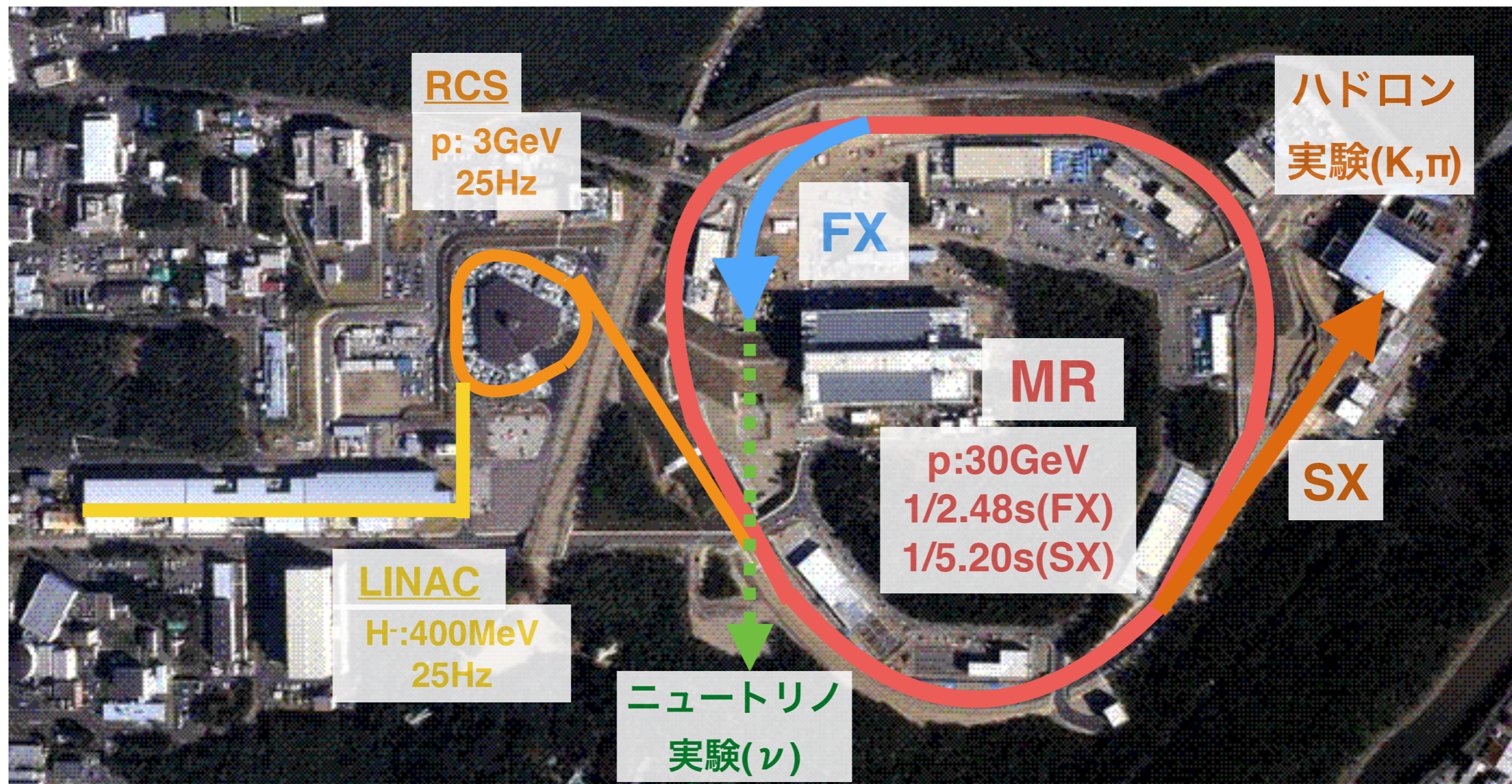
2021/08/10(Tue)

Outline

- J-PARC
- ハイパーカミオカンデ実験からのMRのビーム構造への要求
- シミュレーションによる検討
- 実ビームでのバンチ操作試験結果
- まとめ

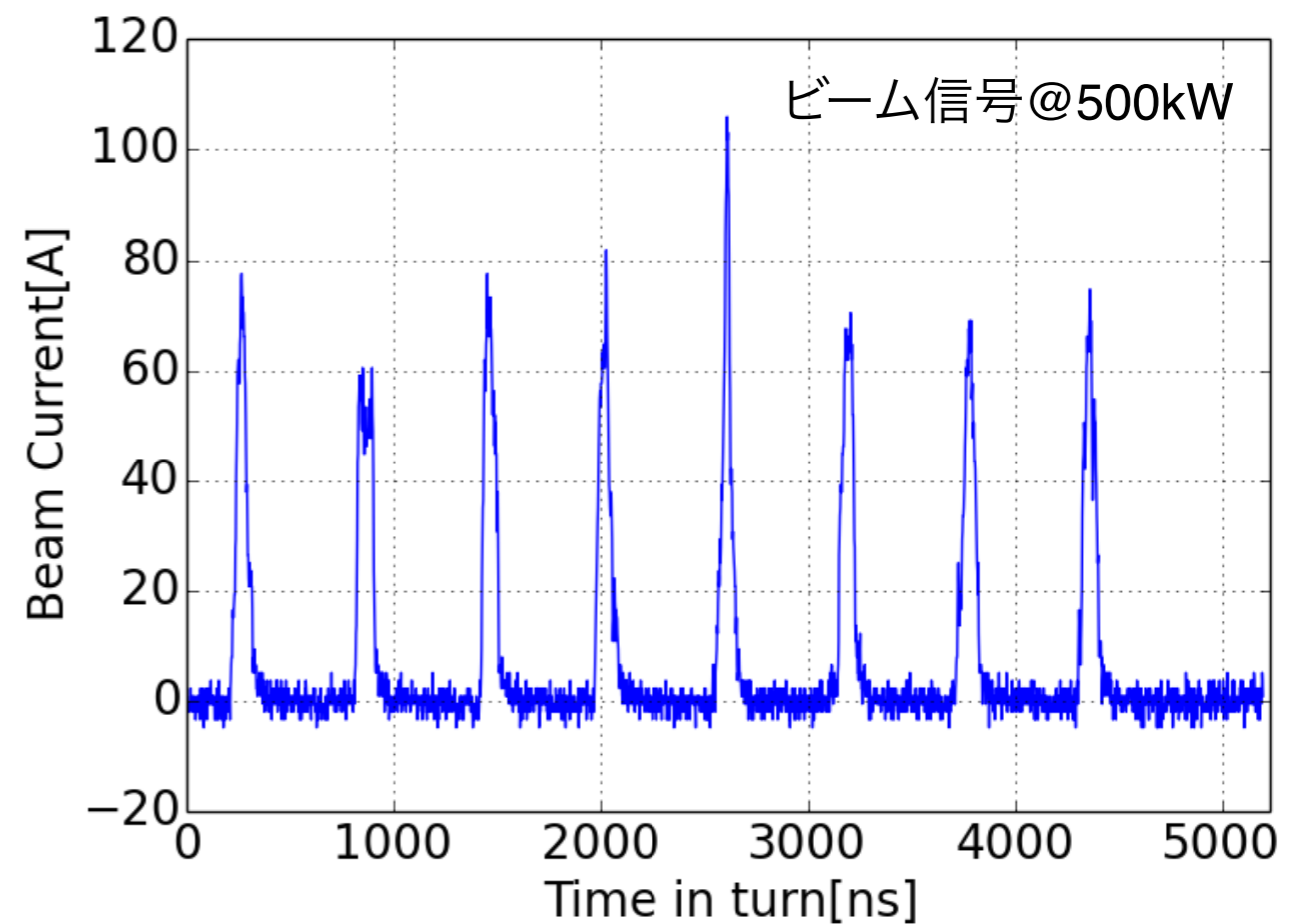
J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex)

- ・ 茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 (JAEAとKEKが運営)
- ・ 陽子ビームをLINAC、RCS、MRを組み合わせて30GeVまで加速
- ・ MRで加速した30GeV陽子を標的に当てて π ・K中間子やニュートリノを生成
 - ・ 生成したニュートリノをスーパーカミオカンデへ (T2K実験)



J-PARC 主リング(MR)

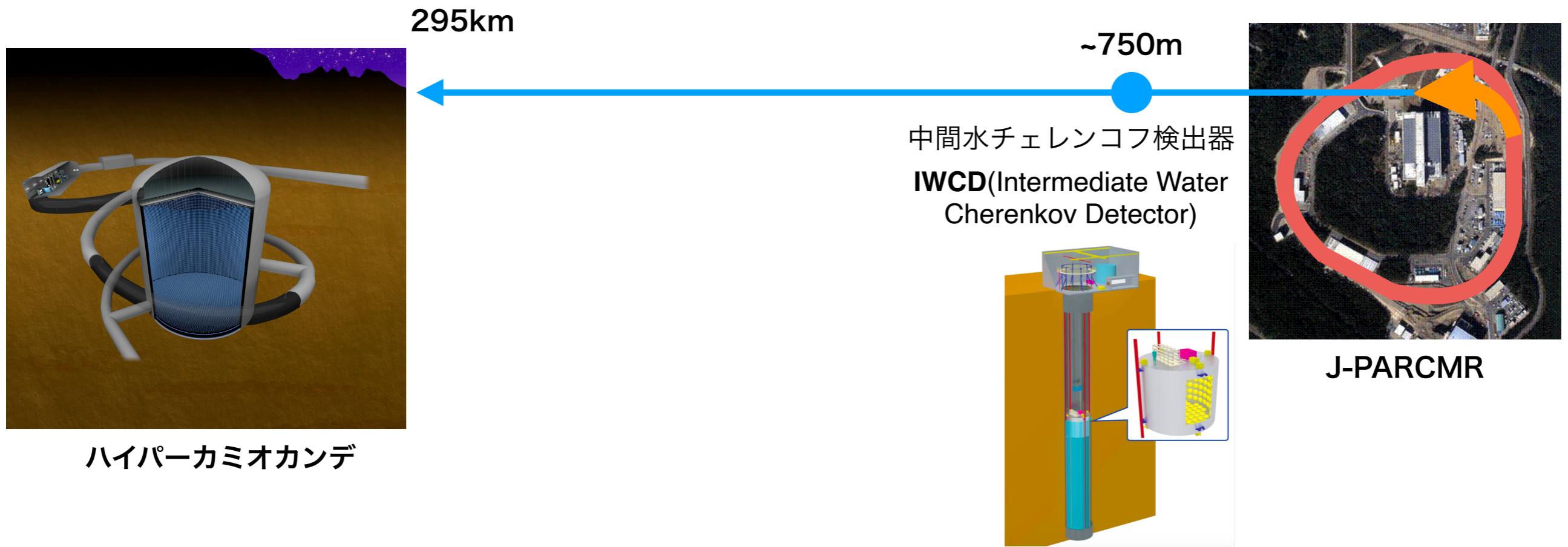
- ・ 加速RF h=9: 9個のRFバケツ
 - ・ 8バケツにバンチを入射 (1バンチは取り出しキッカー用Gap)
- ・ ニュートリノ実験へ 2.66×10^{14} 個の陽子を2.48秒繰り返して取り出し: 515kW
取り出しタイミングでの最大ピーク電流 > 100A



J-PARCとハイパーカミオカンデ

MOPOA02 :坂下さん(KEK)トーク参照

- ニュートリノ将来実験 : J-PARC MRの強度増強と検出器の大型化でニュートリノ振動事象を増やす
 - MR:陽子強度増加(3.3×10^{14})と繰り返し高速化(2.48s \rightarrow 1.16s)で1.3MWを目指す
 - **ハイパーカミオカンデ** : 水Cerenkov検出器 (有効体積19万トンでスーパーカミオカンデの8倍)
- J-PARC近傍(~750m)に中間検出器として水チェレンコフ検出器を追加して系統誤差を低減
 - 大強度νビームにより水チェレンコフ検出器の検出レートが高くなりすぎる可能性
→検出器の感度を保つために、ピーク電流を抑えたビームが望ましい。



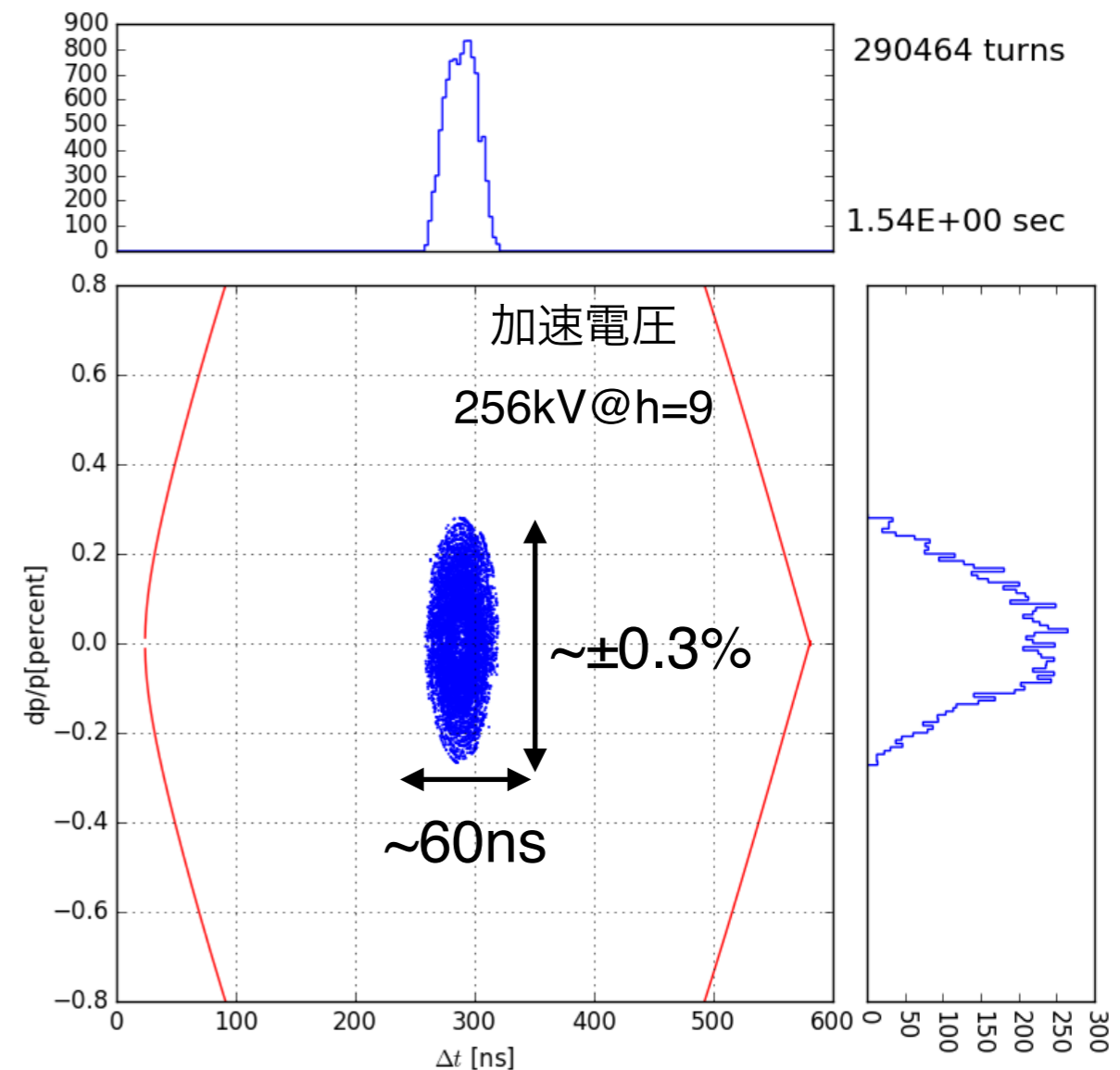
バンチ操作への要求

- バンチ操作を行ってピーク電流の低減を行う
 - 加速中のバンチ操作によるピーク電流の低減は限定的なため、加速後のフラットトップでの操作が必要。
 - 加速時間に加えてバンチ操作のための時間が追加で必要となる。
- 要求
 - ニュートリノ実験ではビームパワー(\propto 陽子数/繰り返し時間)が極めて重要
 - できるだけビームパワーを維持した上でピーク電流の低減が必要
 - バンチ操作にかかる追加時間は出来るだけ短く。
 - 二倍高調波重畳によって操作の高速化
- フラットトップでの二倍高調波重畳によるバンチ操作を検討

シミュレーションでの検討

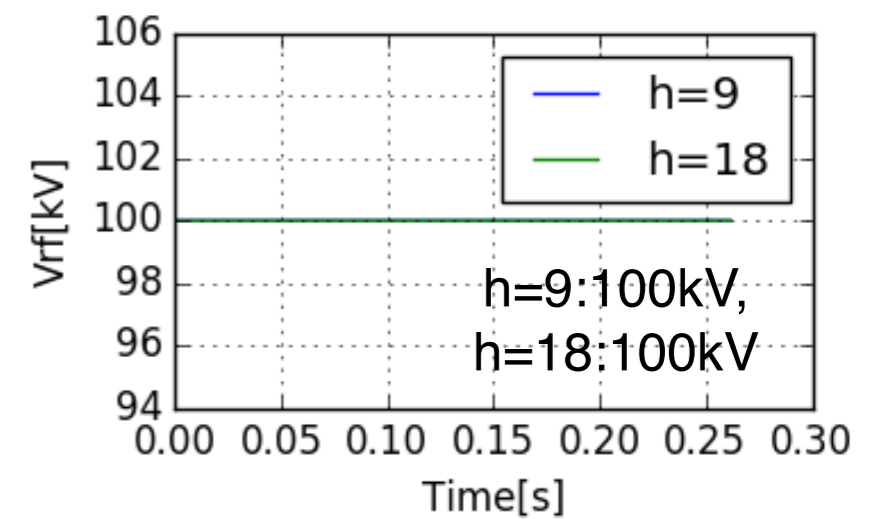
- CERNの縦方向シミュレーションコード BLoNDを使用してバンチ操作を検討
 - エネルギー30GeVでのバンチ操作をシミュレーション
- MRでの入射プロファイルの測定値を元に加速シミュレーションを行い、フラットトップでの初期分布として用いた
- インピーダンスによるビーム強度に依存する効果は考慮していない

加速終了時 (30GeV@フラットトップ)
の縦方向位相空間分布

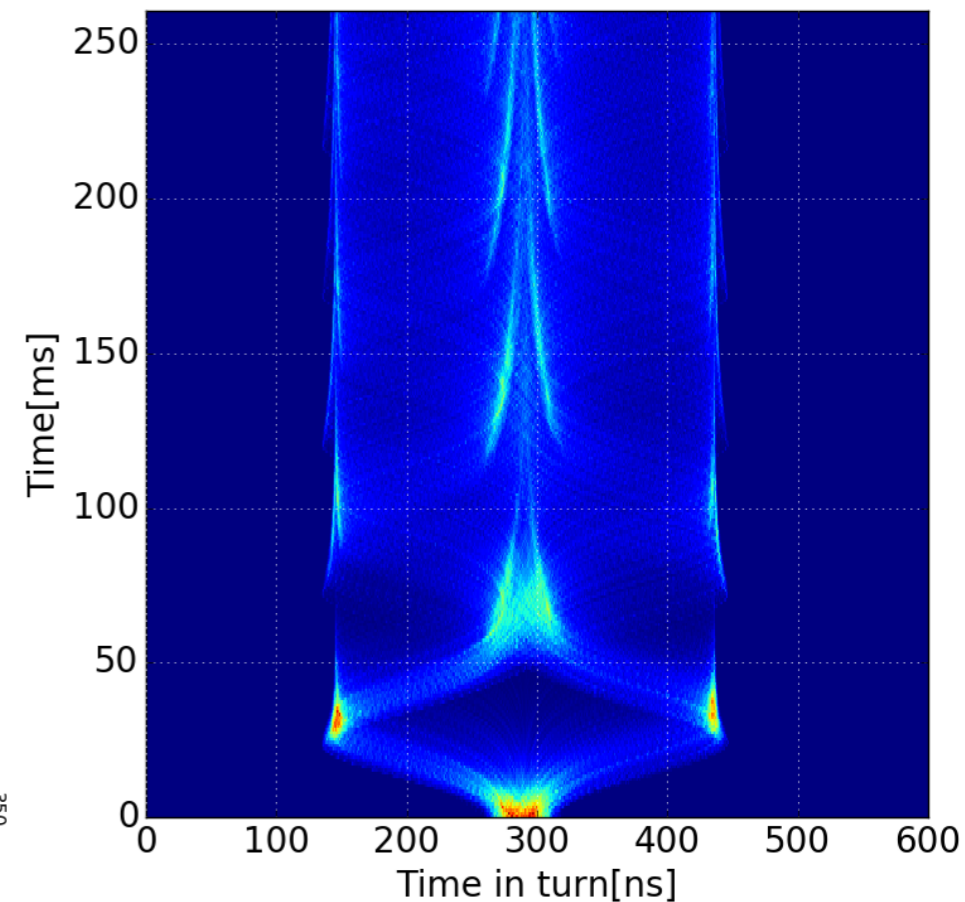
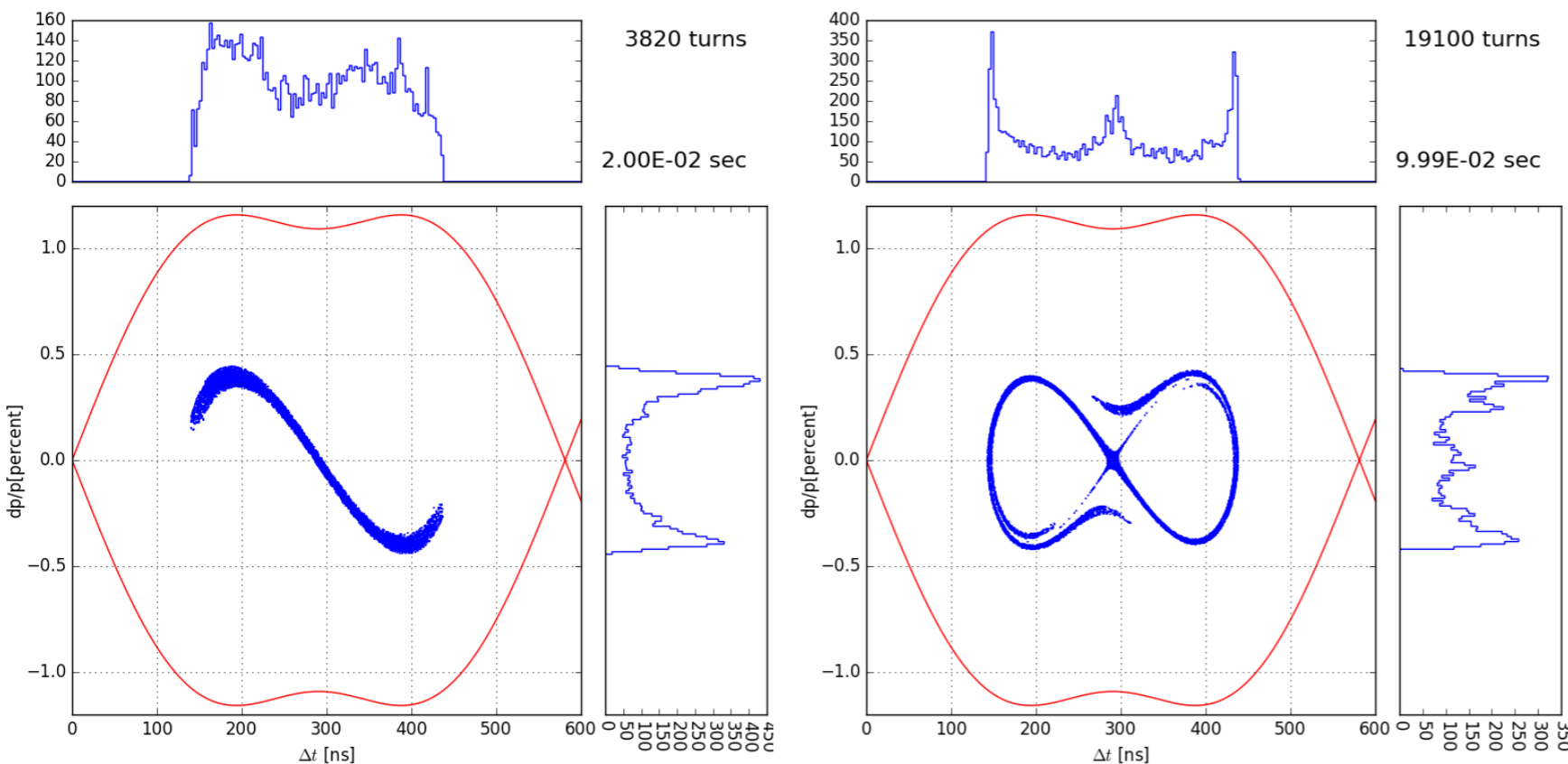


バンチ延伸

- $h=9, 18$ の電圧を重畳してバンチ長を伸ばす。
- 等高線に沿ってバンチが伸びていき、眼鏡形の中空なバンチが形成される。

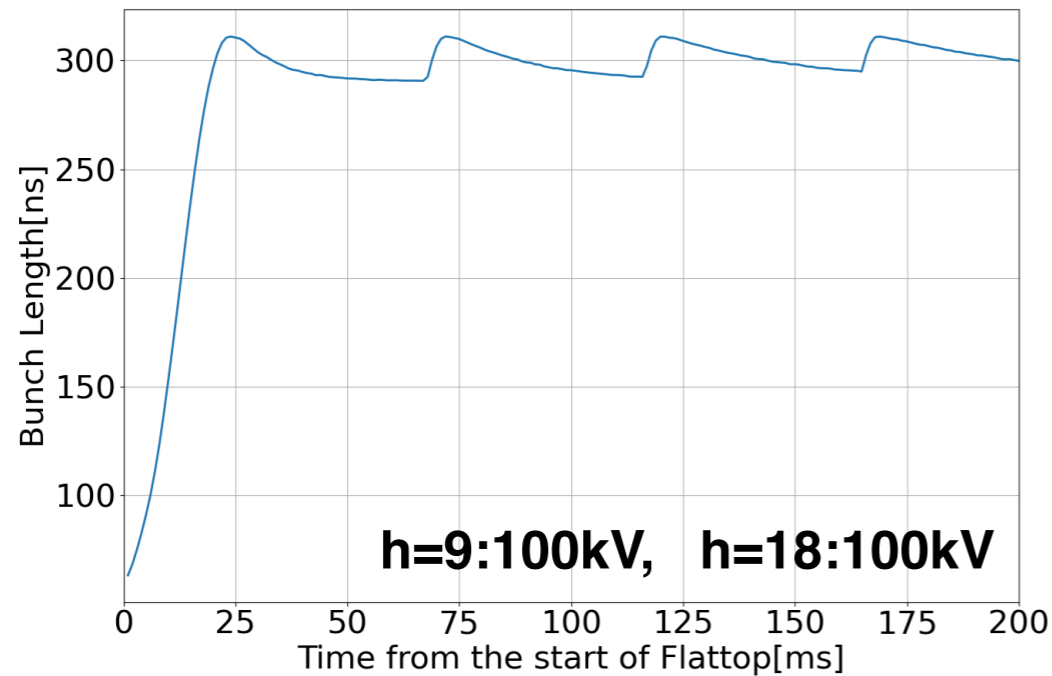


$h=9:100\text{kV}$, $h=18:100\text{kV}$

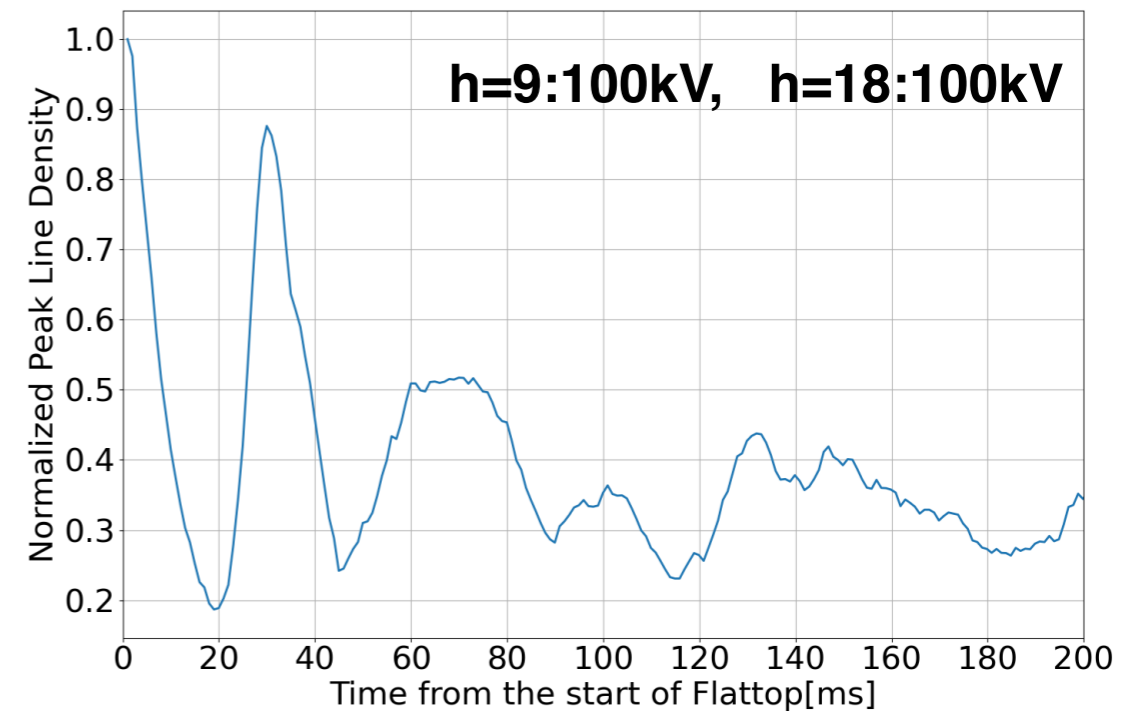


バンチ長やピーク強度の変化

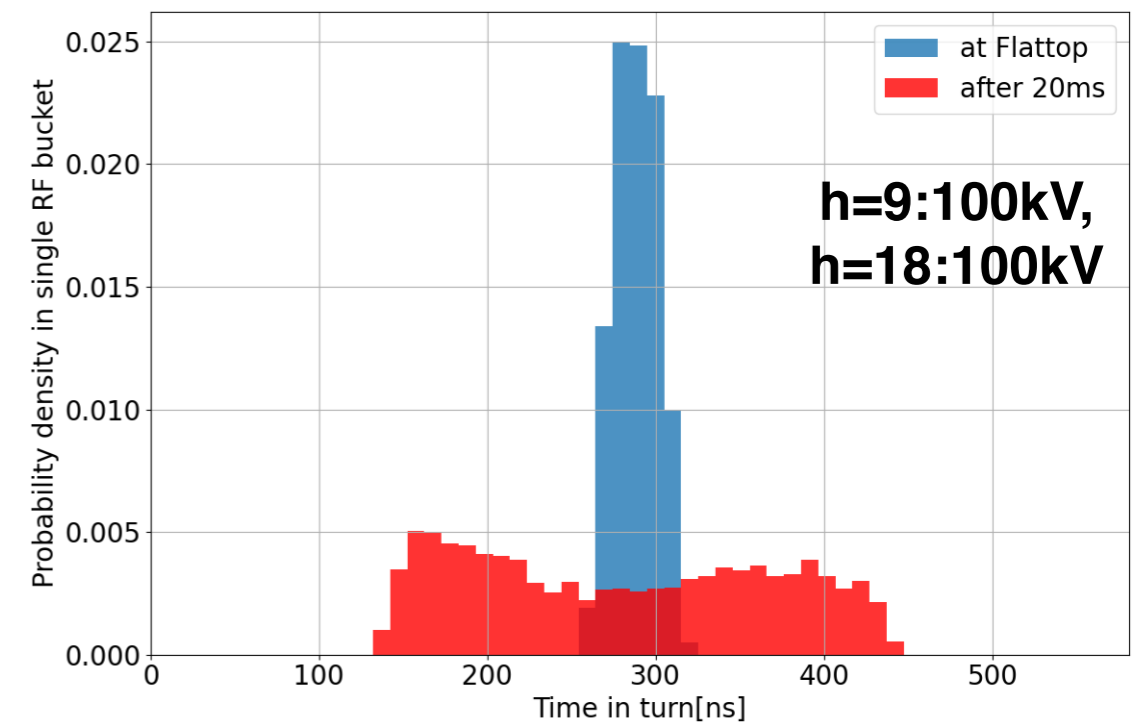
バンチ長の変化



ピーク電流の変化

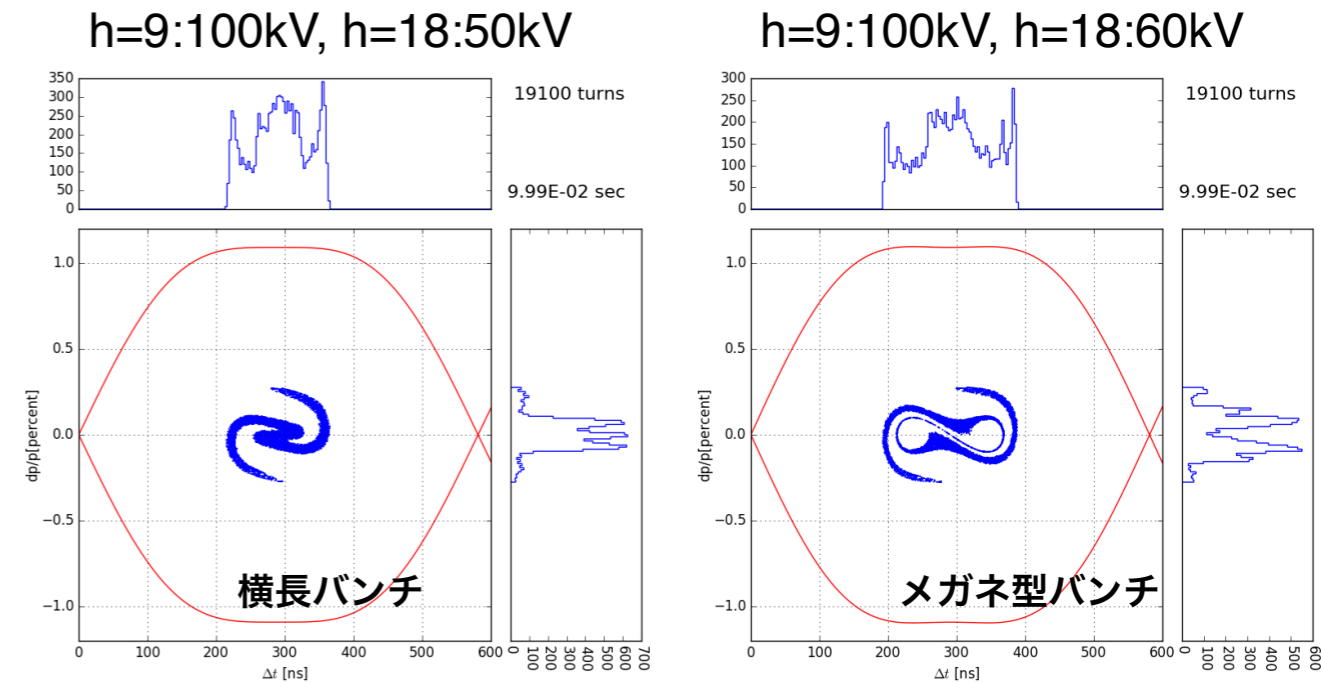


- バンチ長は25msで最大、ピーク電流は20msで最小
- 20msあれば低ピーク電流（強度比1/5）で長いバンチが実現
- 繰り返し時間=ビームパワーへの影響：
20ms/1.13s= <2%

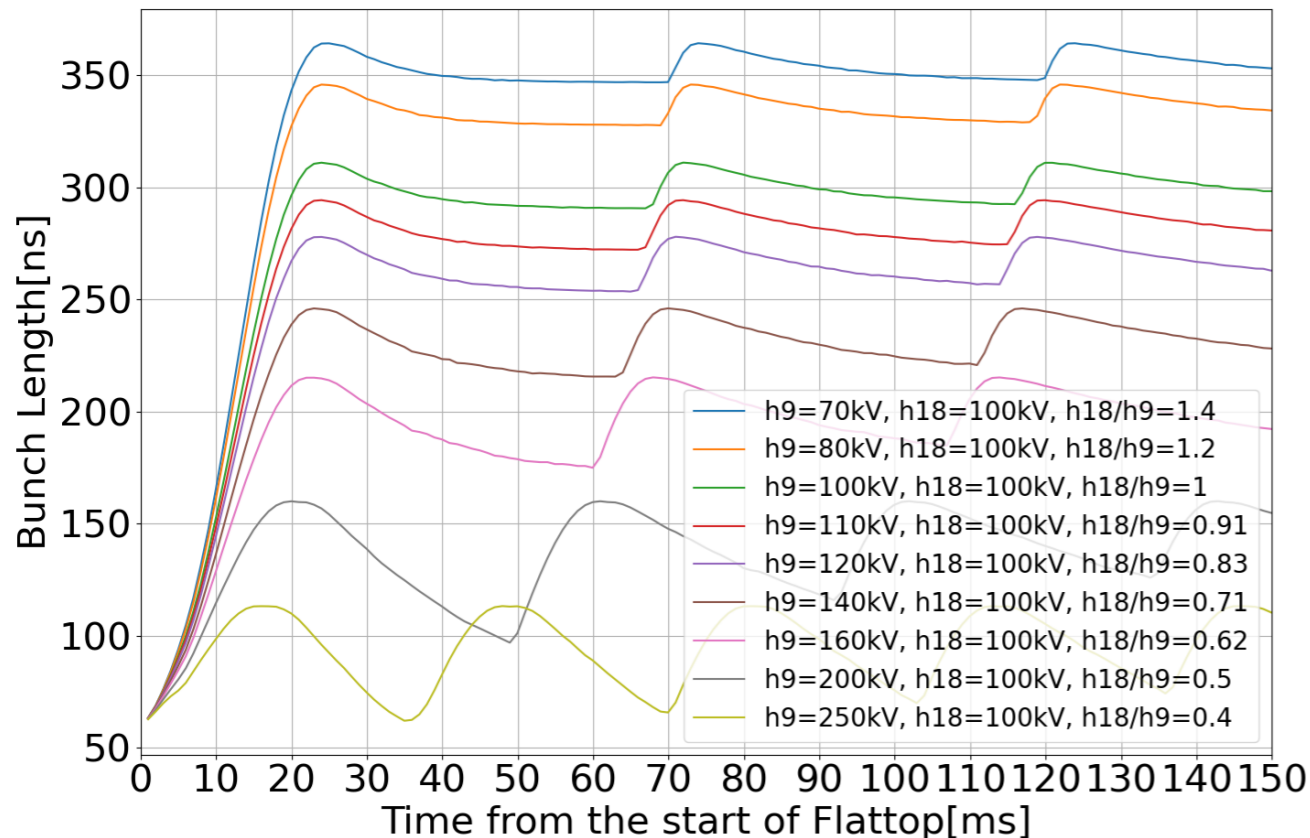


h=9,h=18の電圧比とバンチ構造

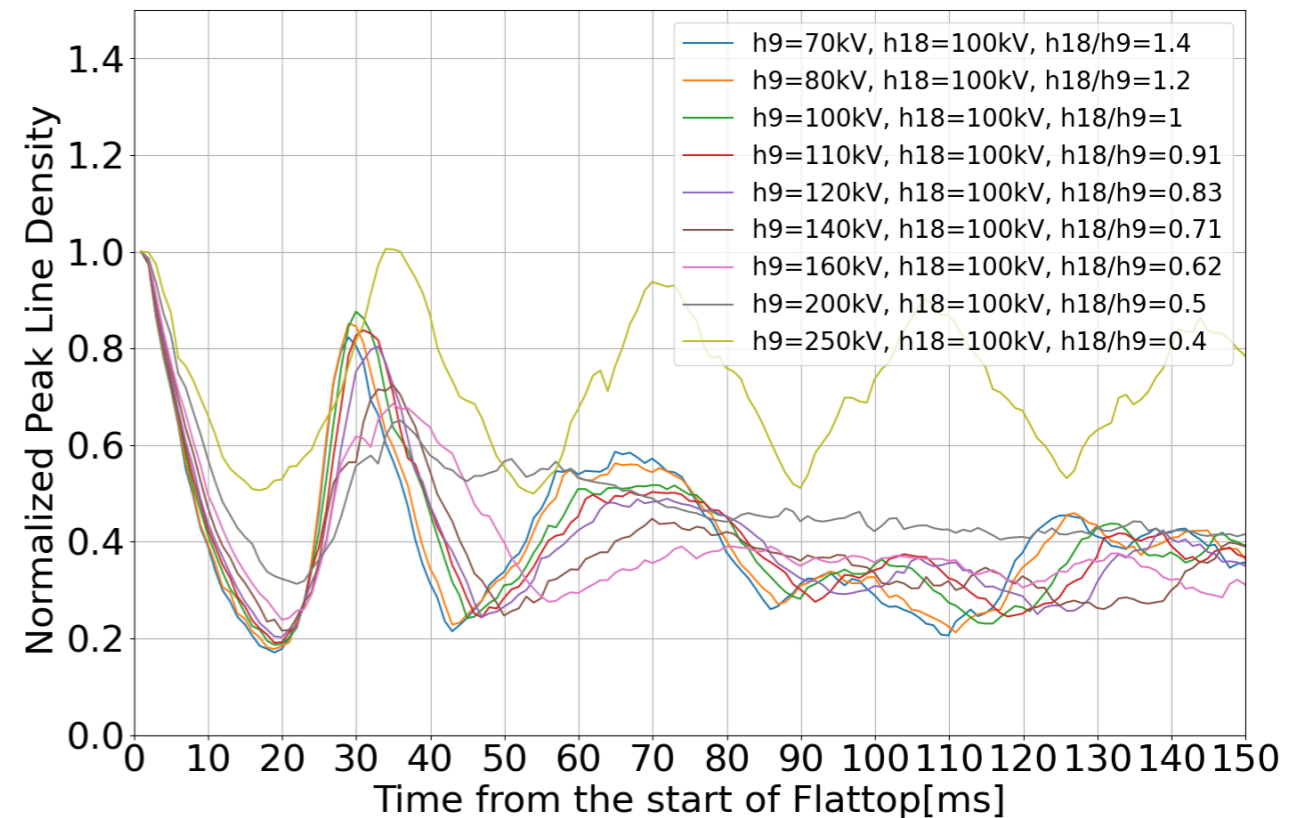
- 二倍高調波の割合を増やしていくにつれて、バケツ変形に伴いバンチも長くなる。
- ピーク電流の低減は 電圧比 $h_{18}/h_9 > 0.5$ でピーク強度比が0.2に収束
 - 電圧比0.5を境にバケツ形状が異なる
- バンチ長が最長、ピーク電流が最小となる時間はどの組み合わせもほぼ同じ



バンチ長の変化

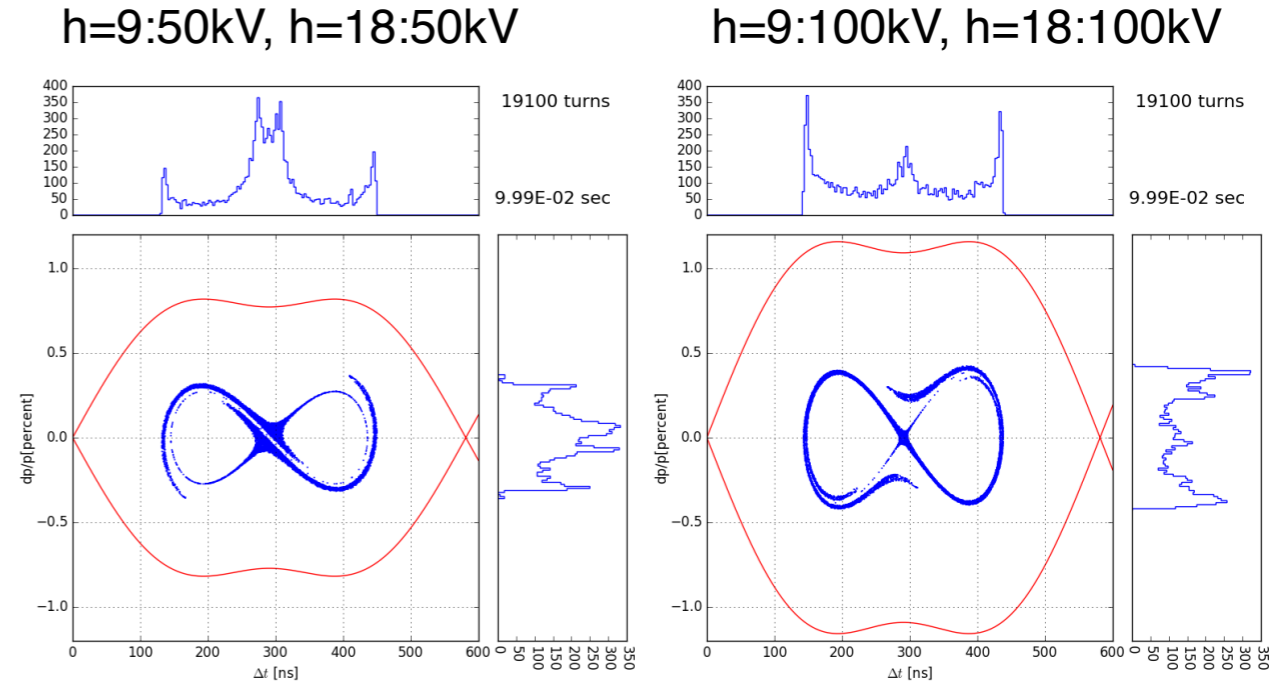


ピーク電流の変化

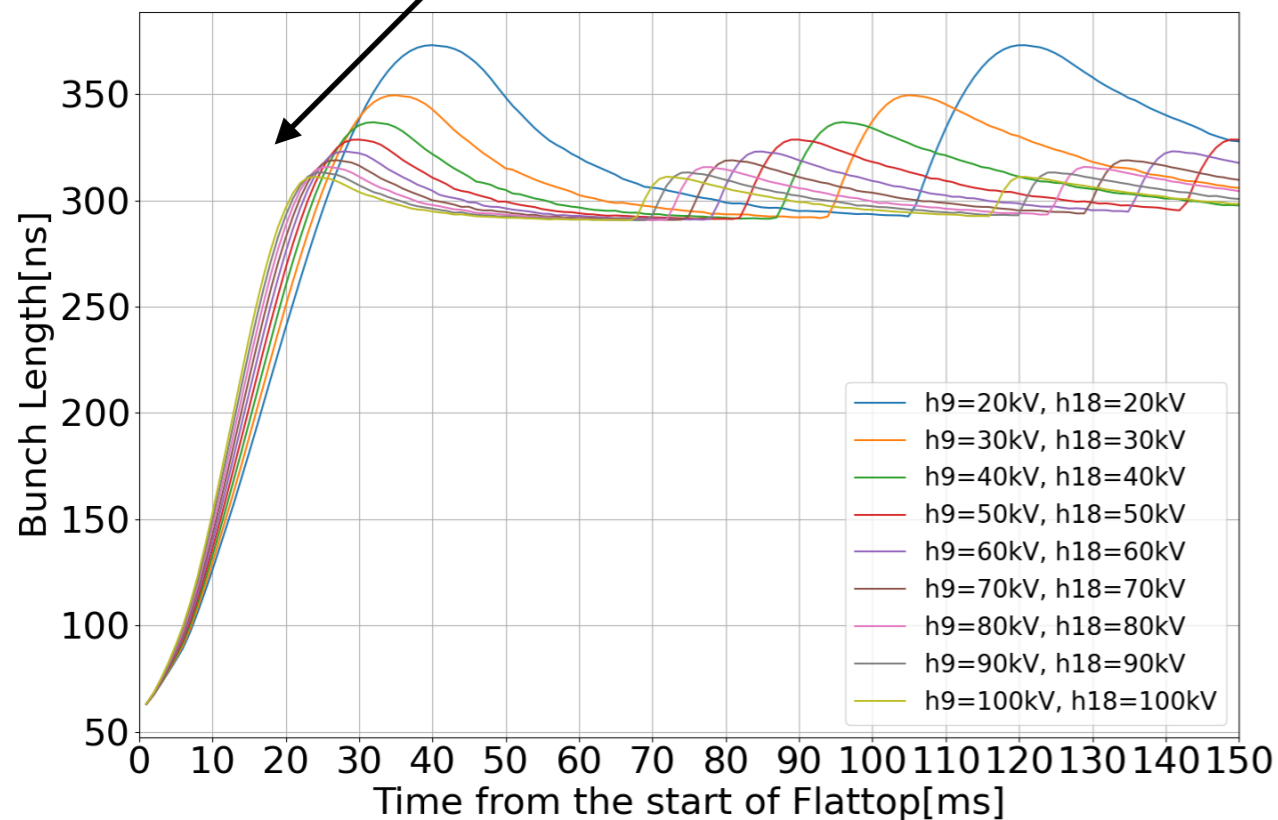


比を固定して電圧スキャン

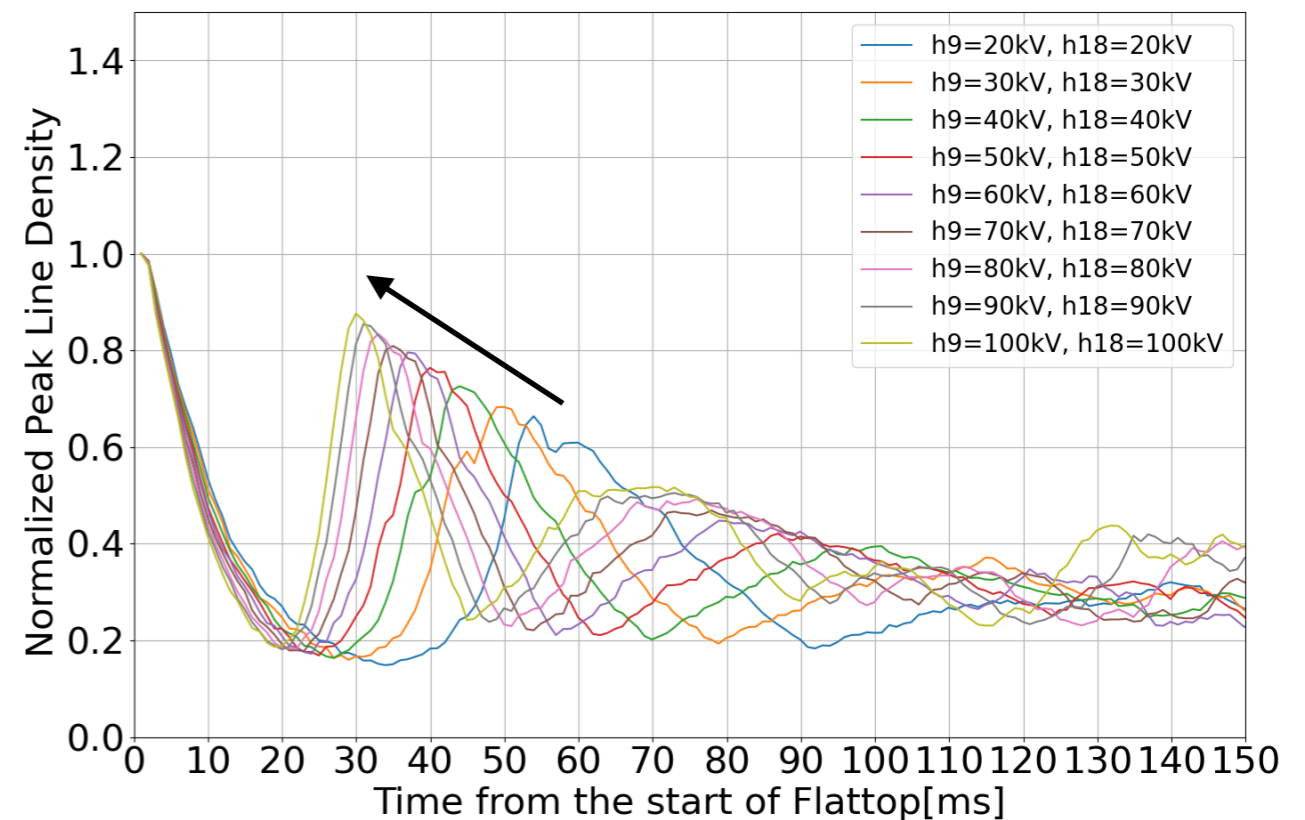
- $h=9$ と $h=18$ の比が同じであれば、最終的なバンチ長やピーク電流は同じ
- 電圧を増加させるとRFバケツが大きくなりシンクロトロン周期が早くなる。



バンチ長の変化

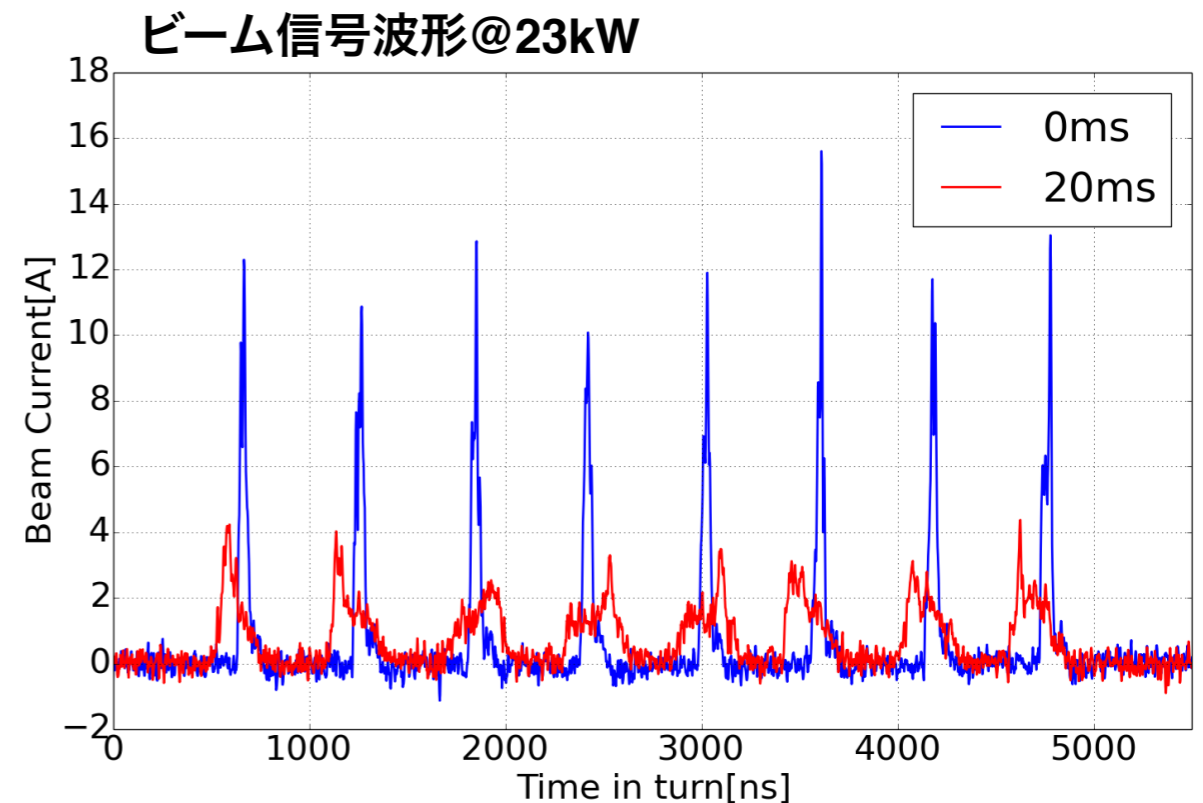
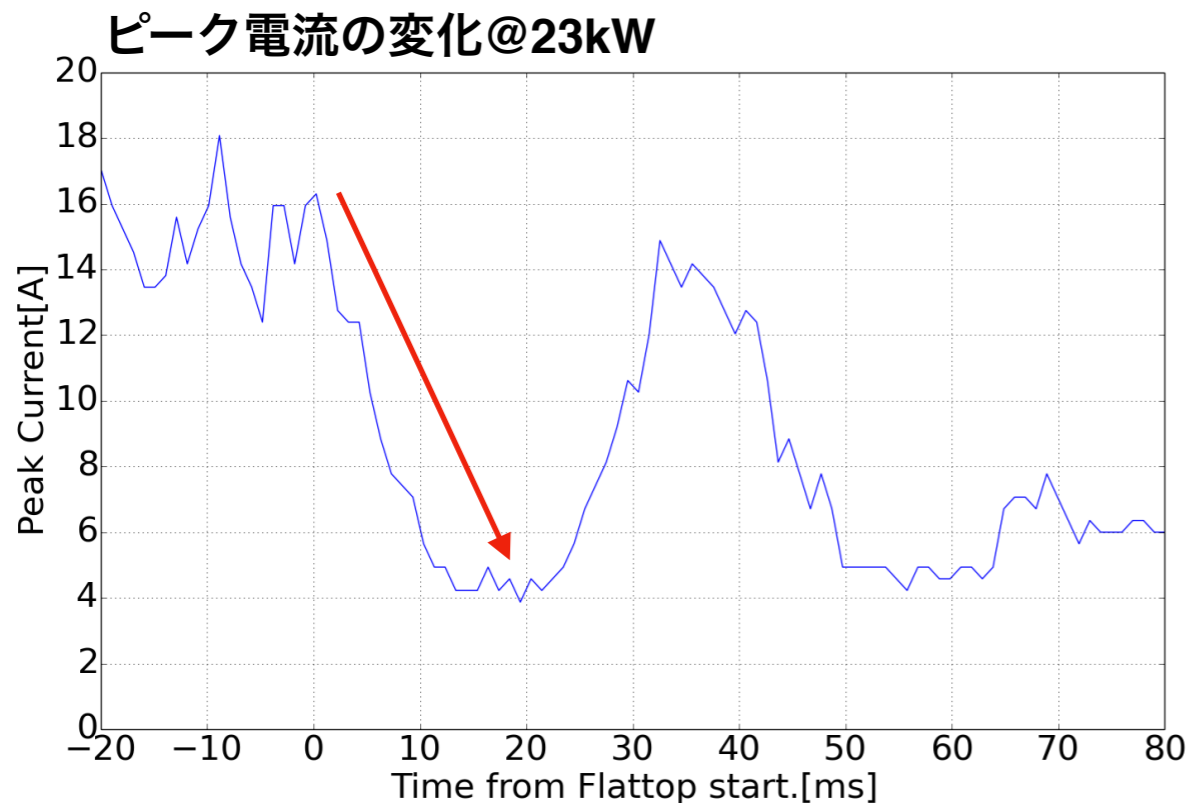
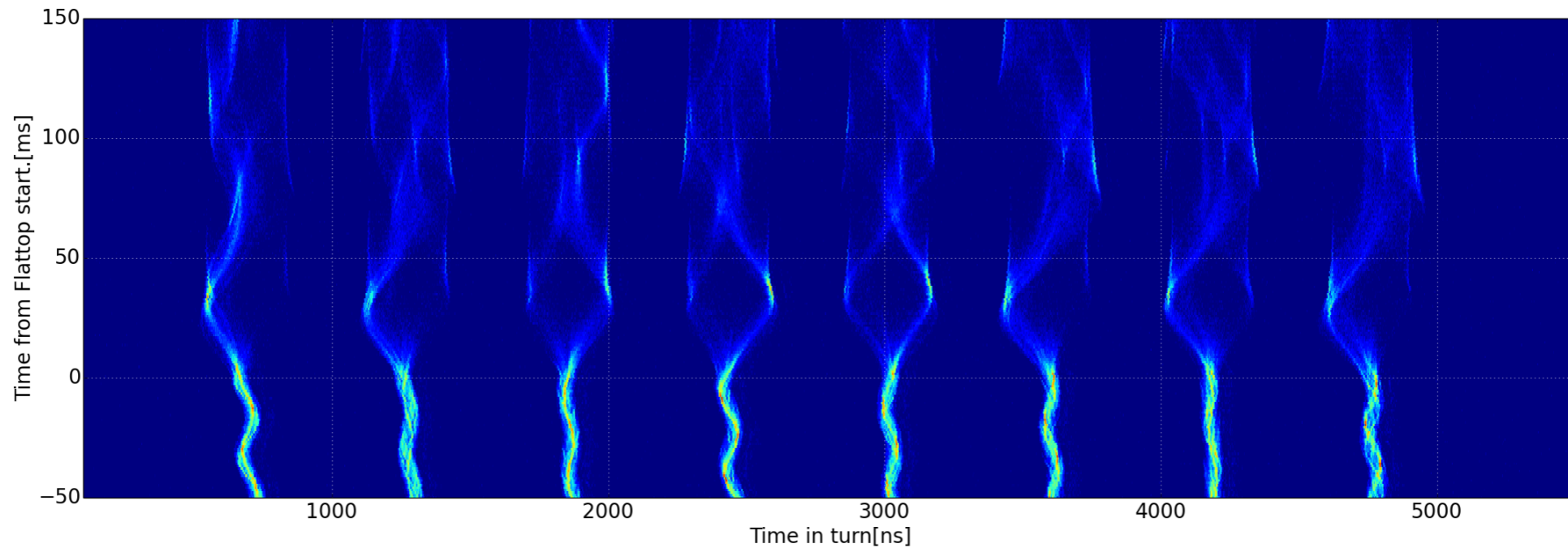


ピーク電流の変化



バンチ延伸試験

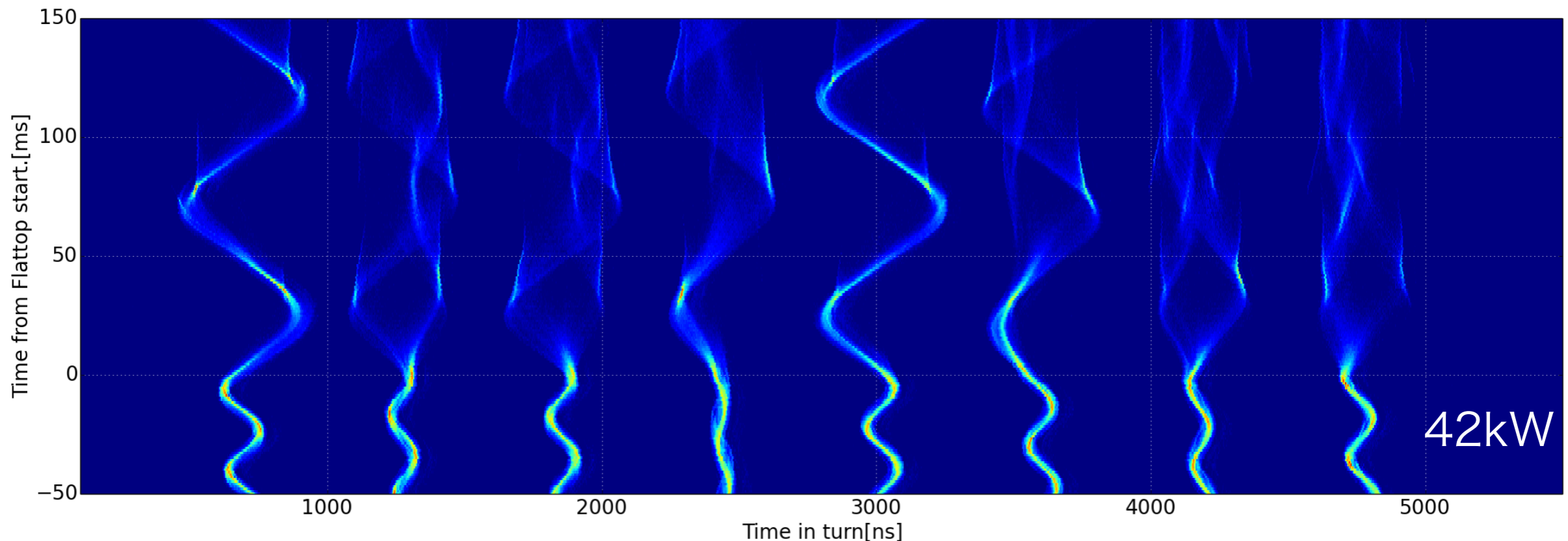
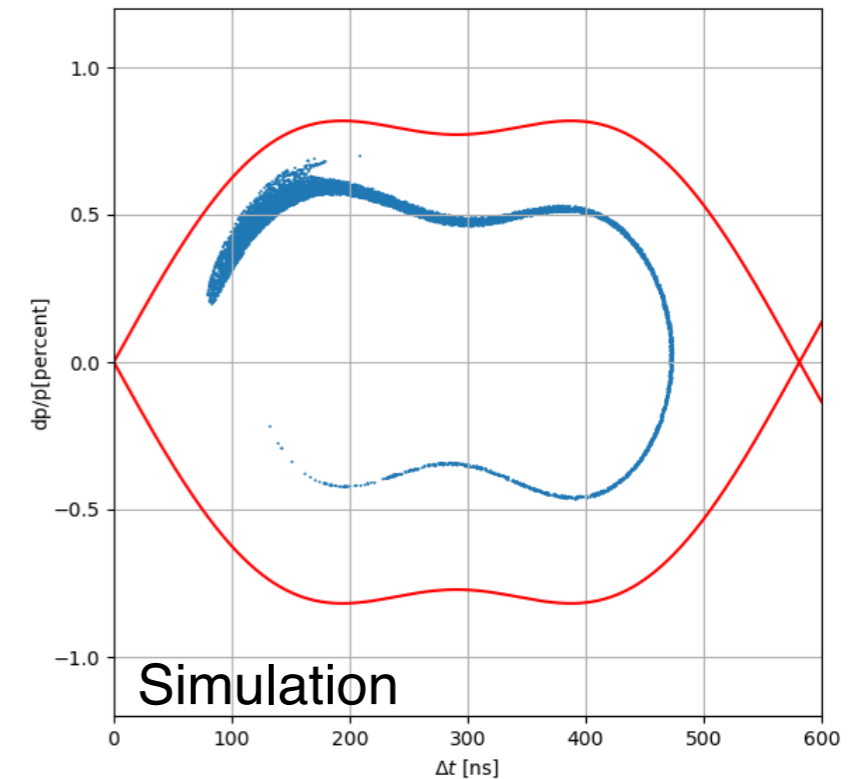
- 23kW (2.52×10^{13} ppp/5.2s) の実ビームで8バンチ延伸を確認。(h=9:50kV, h=18:50kV)
 - バンチ毎に異なる偏り→h=9,18以外のWake電圧の影響の可能性
- 20ms程度でピーク電流が1/4程度に低減



バンチ延伸試験

- 23kWではほぼ安定なバンチ延伸ができたが、42kW (4.63×10^{13} ppp/5.2s) ではバンチ操作後に大幅なダイポール振動を起こしている。
- ビーム強度増加によりWake電圧が強くなった事が原因の可能性はある。

中心から離れて運動する場合の例



実用に向けた検討

- 安定したバンチ操作のためには空胴ウェイク電圧の抑制が不可欠
- 現行システム h=9,17,18,19はRF feed forwardでビームローディング補償
h=8,10は先行して空胴電圧フィードバックで抑制
- 開発中の次期システムでは空胴電圧フィードバック化して抑制
- キッカー電磁石の立ち上げ時間の高速化
- キッカー電磁石の立ち上げ時間のためにビームが無い区間（ギャップ）が必要
 - バンチが伸びた分ギャップが縮んでしまう。
 - 現在の利用運転ではバンチ幅~90nsで取り出しギャップ1.05 μ s(ほぼ限界)
(シミュレーションでは60nsで取り出しGap1.1 μ s)
- キッカー電磁石の立ち上げ時間を100ns程度早く出来れば
h=18/h=9電圧比0.6程度でバンチ長200ns,ピーク電流1/4が実現出来そう。

まとめ

- 将来ニュートリノ実験向け水チェレンコフ中間検出器の瞬時イベント頻度低減を目的として、RF電圧操作によるピーク電流低減を検討した。
- フラットトップでの二倍高調波重畳によるバンチ操作でバンチ長延伸を行い、ピーク電流を1/4~1/5程度に抑えられることが分かった。
 - 操作に必要な時間は20ms程度でビームパワーへの影響も少ない
- MRのビーム試験でバンチ延伸を確認した。
- ニュートリノ実験への実用に向けて、RFや取り出しキッカーシステムの改良や検討を進めている。