

J-PARC MR フラットトップにおける 非断熱的バンチ操作への縦方向インピーダンスの影響

田村文彦、大森千広、吉井正人、冨澤正人、外山毅、
杉山泰之、長谷川豪志、小林愛音、沖田英史

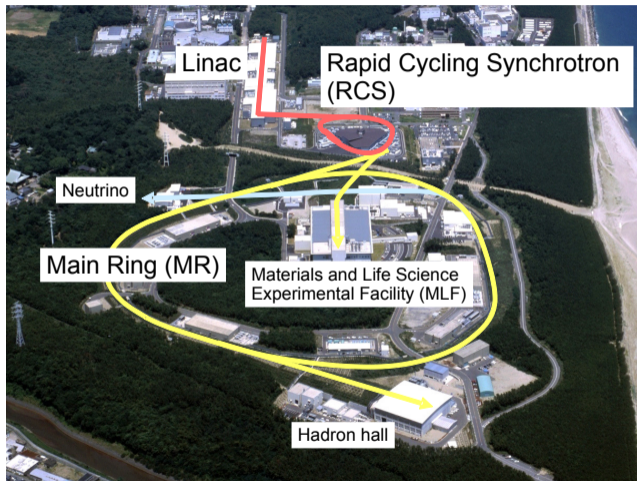
J-PARC センター

October 2022

Contents

1. はじめに
2. 要求および手法
3. 動作原理
4. インピーダンスの影響
5. 結論

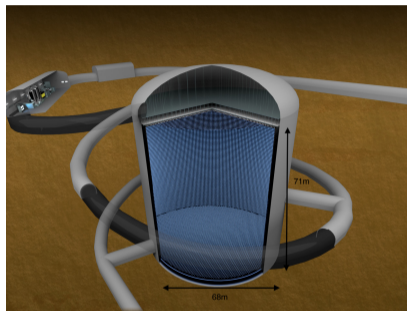
J-PARC Main Ring (MR)



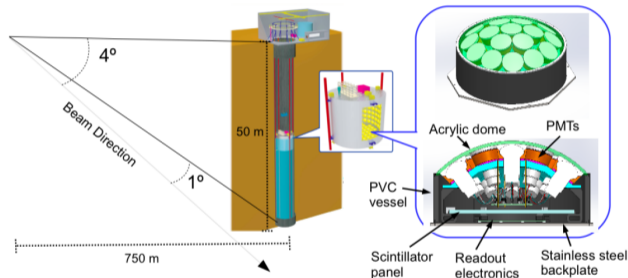
- J-PARC MR は 30 GeV の陽子ビームを実験施設に供給:
→ ハドロンホール、ニュートリノ実験施設
- ニュートリノ向け、510 kW の利用運転実績
- 今後のアップグレード
 - MR 周期: 2.48 s \rightarrow 1.16 s
(ビームパワー倍増)
 - バンチ粒子数 4×10^{13} を目標
 - ハイパーカミオカンデ

ハイパーカミオカンデ計画

Hyper-K, 10x larger than Super-K



中間水チェレンコフ検出器
(Intermediate Water Cherenkov Detector, IWCD)



IWCD では、バンチ内でのイベントパイルアップが問題となる。

- パイルアップ由来のデッドタイムの割合は、50 ns といった短バンチの場合特に大きい
- より長い時間構造 (完全または部分的にデバンチ) のビームで測定効率を向上できる

→ 加速中には積極的な操作を行うことは困難、フラットトップでのバンチ操作を検討中。

要求および手法

- 1) フラットトップ、MR 周期の延長は直接ビームパワーの低下に繋がる。
 - バンチ操作はできるだけ高速に行い、フラットトップの延長を最小限に抑える必要
 - 最小限の延長は 40 ms (RCS cycle)。3% のビームパワー低下
- 2) 8 番目のバンチと先頭バンチの間隙を保つ必要がある。
 - FX キッカーの立ち上がり時間は約 $1.1 \mu\text{s}$

考えられる手法:

RF 電圧をオフにしてデバンチ

- バンチ間隙を保つことができない

バリア電圧を立てながらデバンチ

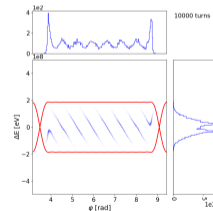
- 有望な方法だが、大強度のビームローディングに耐えるバリア RF システムは現在は存在しない

デバンチ前にバッチコンプレッション (断熱的)

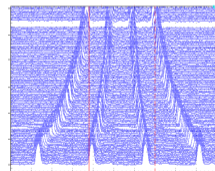
- $\eta = -0.0019$ と小さく、非常に長い時間が必要

→ 今回の非断熱的マルチハーモニックバンチ操作

バリアバケット



バッチコンプレッション



1. はじめに

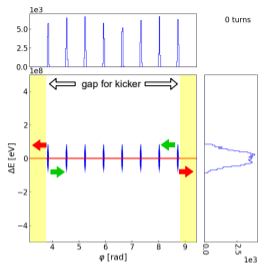
2. 要求および手法

3. 動作原理

4. インピーダンスの影響

5. 結論

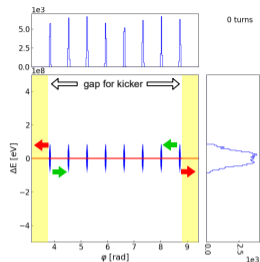
アイデア



なぜ単なるデバンチはうまくいかないのか？

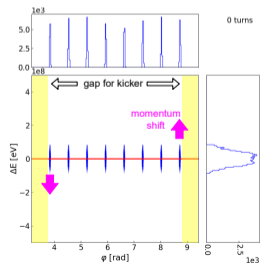
- 1 番目、8 番目のバンチが前後両方に動き、キッカーのための間隙に侵入してしまうから

アイデア



なぜ単なるデバンチはうまくいかないのか？

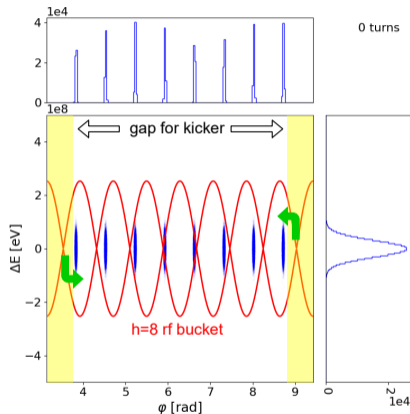
- 1 番目、8 番目のバンチが前後両方に動き、キッカーのための間隙に侵入してしまうから



もし 1 番目と 8 番目のバンチをデバンチ前にそれぞれ減速、加速しておけば、これらのバンチはデバンチ中にそれぞれ後ろおよび前に動く。

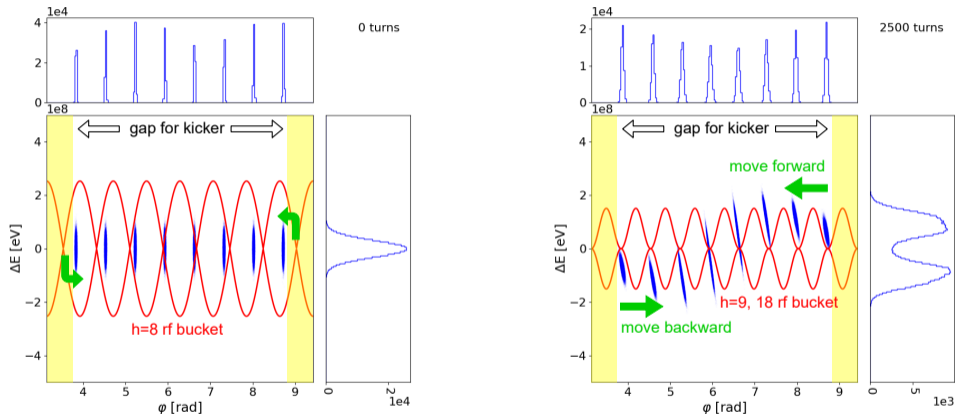
- 加速周波数 ($h = 9$) の隣接ハーモニクス ($h = 8$) を使えば、このような減速、加速が可能である
- 空胴 $Q = 22$ と比較的 low、($h = 8$) の電圧が発生可能

動作原理



- 加速終了後、加速周波数 ($h = 9$) の電圧を切り、隣接ハーモニック ($h = 8$) 電圧を発生
- ($h = 8$) 電圧の位相は 1 番目と 8 番目のバンチが減速および加速されるように設定

動作原理



- 1番目と8番目のバンチがそれぞれ十分に減速、加速された後に、加速周波数 ($h = 9$) および2倍高調波 ($h = 18$) 電圧を、デバンチが進むような位相で発生
- 単に電圧を切った場合よりも速くデバンチさせられる

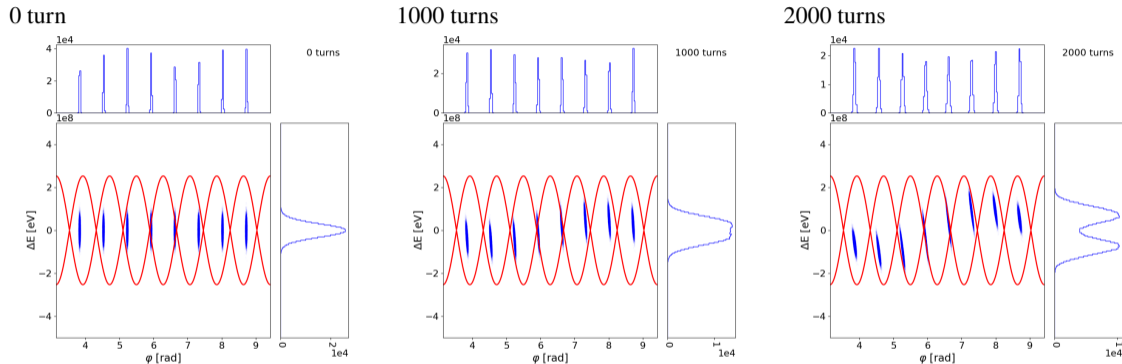
縦方向シミュレーションのセットアップ

前述の動作原理に基づき、CERNが開発した縦方向シミュレーションコード BLoND (Beam Longitudinal Dynamics) を用いてフラットトップ開始からデバンチ終了までのシミュレーションを行った。

- ビームの初期分布
 - 運動量広がり 0.1% (RMS)
 - バンチ長 10 ns (RMS)
 - RF 周期の間隔で 8 個配置
- 各バンチのマクロ粒子数 50000 個



縦方向分布

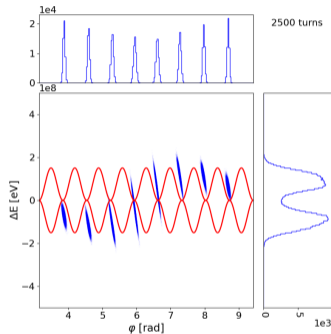


フラットトップ開始で加速周波数を切り、開始から 13 ms (2500 ターン) までは隣接ハーモニク ($h = 8$) を 50 kV 発生

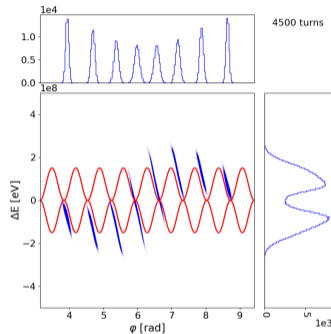
- 2000 ターンまでに、1 番目と 8 番目のバンチは隣接ハーモニク ($h = 8$) により十分に減速、加速されている

縦方向分布

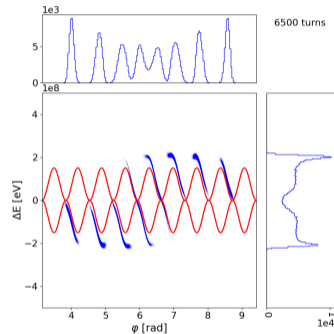
2500 turns



4500 turns



6500 turns

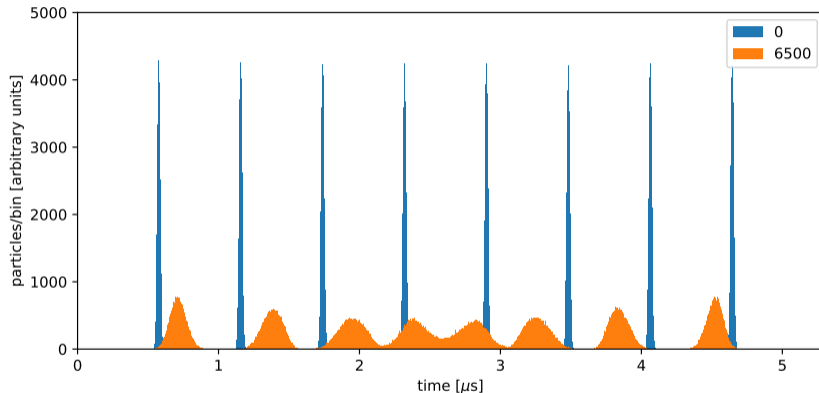


13 ms からは加速周波数 ($h = 9$) および 2 倍高調波 ($h = 18$) をそれぞれ 20 kV、10 kV 発生させる。バンチの場所に不安定不動点があるように位相を設定。

- RF 電圧により、RF オフより速いデバンチ
- 運動量広がりが増大するが、0.7% はニュートリノビームラインで受け入れ可能

6500 ターン (約 35 ms) ではピーク電流が低い構造が得られ、ビームの取り出し準備完了である。

バンチ操作前後の時間構造



- ピーク電流は約 1/6 に減少
- FX キッカーの立ち上がりに必要な 8 番目と 1 番目のバンチの間隙は保たれている

非断熱的マルチハーモニックバンチ操作

将来のニュートリノ実験に向けた、新しい高速で非断熱的な操作手法を提案した。

- 隣接ハーモニック ($h = 8$) を使用
- ピーク電流を 1/6 に下げられる
- FX キッカーの立ち上がりに必要な 8 番目と 1 番目のバンチの間隙を確保
- 加速高周波 ($h = 9$)、2 倍高調波 ($h = 18$) によりデバンチ速度を上げ、周期の延長を 40 ms、ビームパワーの低下を最小限の 3% にできる

IWCD にまつわる要求を全て満たす手法である。

しかし……、

非断熱的マルチハーモニックバンチ操作

将来のニュートリノ実験に向けた、新しい高速で非断熱的な操作手法を提案した。

- 隣接ハーモニック ($h = 8$) を使用
- ピーク電流を 1/6 に下げられる
- FX キッカーの立ち上がりに必要な 8 番目と 1 番目のバンチの間隙を確保
- 加速高周波 ($h = 9$)、2 倍高調波 ($h = 18$) によりデバンチ速度を上げ、周期の延長を 40 ms、ビームパワーの低下を最小限の 3% にできる

IWCD にまつわる要求を全て満たす手法である。

しかし……、

1. はじめに

2. 要求および手法

3. 動作原理

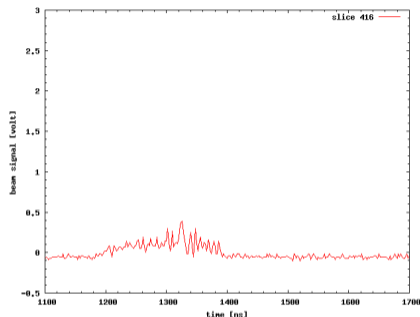
4. インピーダンスの影響

5. 結論

MR の縦方向インピーダンス

MR では遅い取り出し (SX) 運転のデバンチ過程においてビームマイクロバンチングが発生している。

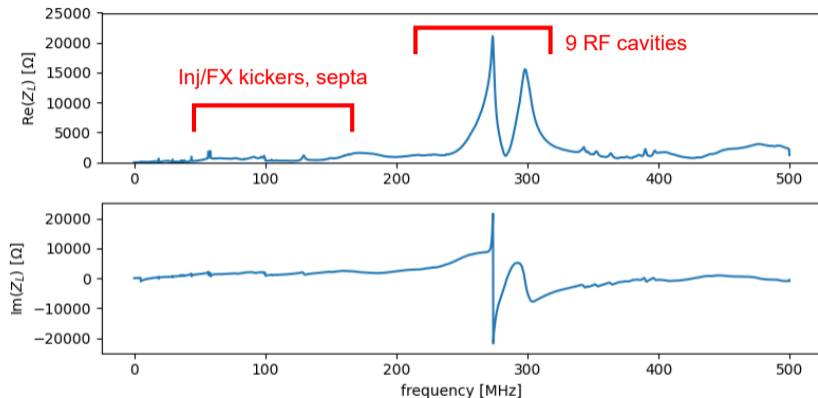
- FX の目標強度よりはるかに低い強度で発生
- マイクロバンチング由来の電子雲による横方向インスタビリティが問題



これまでの FX 大強度運転では短いバンチのまま取り出すのでマイクロバンチングは発生していないが、今回の非断熱バンチ操作はデバンチ過程を含むため、FX 大強度ビーム運転においては問題となりうる。シミュレーションで調査した。

シミュレーションに用いた縦方向インピーダンス

ストレッチワイヤー法による測定を、台数を掛けて積算:

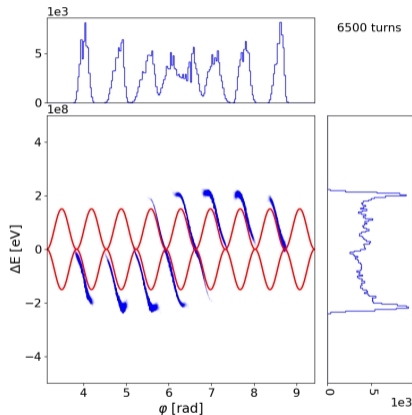


最も大きな縦方向インピーダンスを持つ機器は9台の加速空洞 (20000 Ω):

- 270 MHz、300 MHz の強い共振は、加速ギャップ、共振コンデンサとインダクタンスによるもの
- 加速周波数 1.7 MHz 付近の高いインピーダンスは、ビームローディング補償を仮定して除いた 50 MHz から 150 MHz にわたるインピーダンス源は、入射・取り出しキッカーやセプタム:
- 1000 Ω 程度、周波数が比較的 low 無視できない

インピーダンスありでの縦方向分布 (6500 ターン)

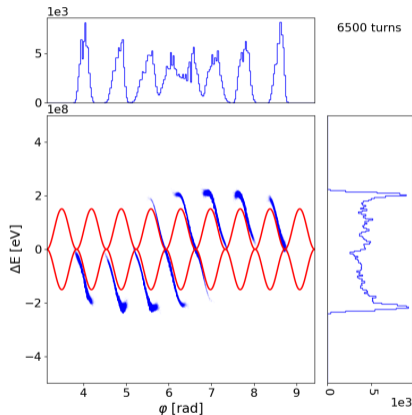
1×10^{13} ppb



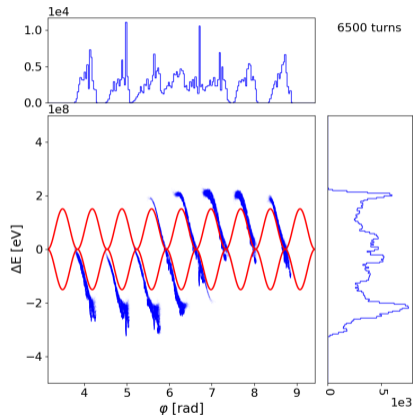
- 目標強度の 1/4、 1×10^{13} ppb では、インピーダンスのない時とほぼ同様のバンチ操作が実現できる
- 高い周波数のインピーダンスにより、細かな構造が発現

インピーダンスありでの縦方向分布 (6500 ターン)

1×10^{13} ppb



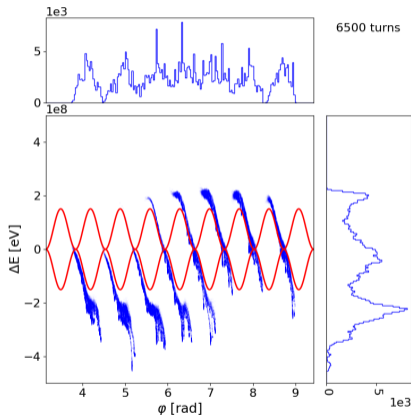
2×10^{13} ppb



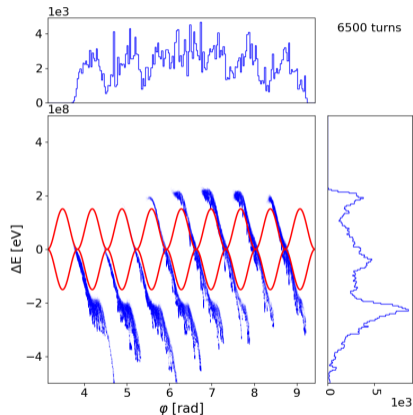
- 2×10^{13} ppb では、インピーダンスの実数部に起因する運動量のロスが発生
- 細かな構造はよりはっきり (2, 3 番目のバンチで顕著)
- 8 番目のバンチは後端が FX キッカーの立ち上がりに必要な間隙に侵入

インピーダンスありでの縦方向分布 (6500 ターン)

3×10^{13} ppb



4×10^{13} ppb



- 3×10^{13} ppb、強度 4×10^{13} ppb ではインピーダンスの影響はさらに強い
- 細かな構造はビームの時間構造全域に
- 運動量分布は下方に大きく広がり、 $dp/p = -1.8\%$ に達する。ビームラインの許容範囲外

このように、MR の高い周波数のインピーダンスの影響は強大であり、目標強度 4×10^{13} ppb でのバンチ操作は困難である。

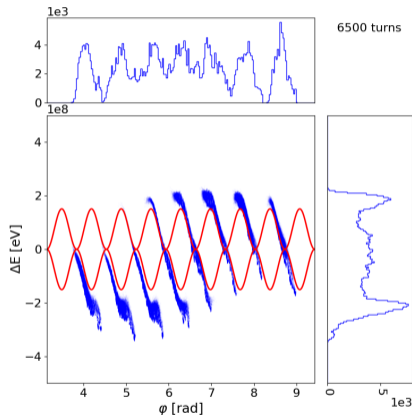
初期のバンチ長を長くすることで、ビームの持つ高い周波数の成分を減らす効果が期待できる。

エミッタンスを増やすとバンチ操作そのものが困難となるため、ここでは初期バンチ長を 20 ns および 30 ns (RMS) としたシミュレーションを行った。

- バンチ長だけを延ばすのは人工的な設定

初期バンチ長を変えた時の縦方向分布 (6500 ターン)

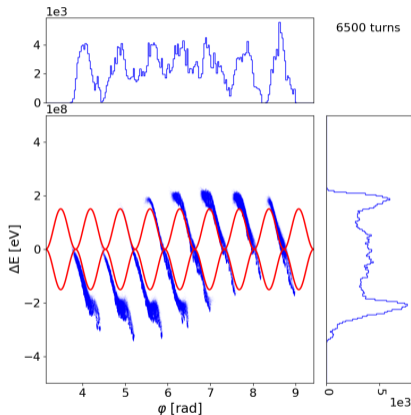
4×10^{13} ppb, 20 ns (RMS)



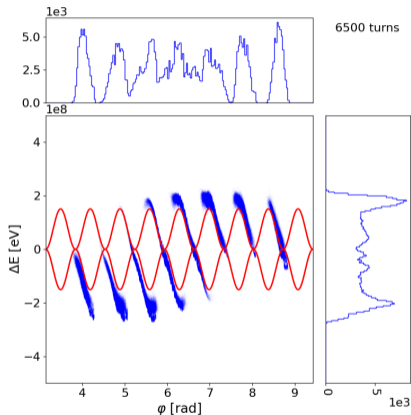
- 初期バンチ長 20 ns でも、影響は低減され運動量分布の下方への広がりは減少
- 8 番目のバンチ後端が 300 ns 程度 FX キッカーに必要な間隙に拡がっており、許容できない

初期バンチ長を変えた時の縦方向分布 (6500 ターン)

4×10^{13} ppb, 20 ns (RMS)

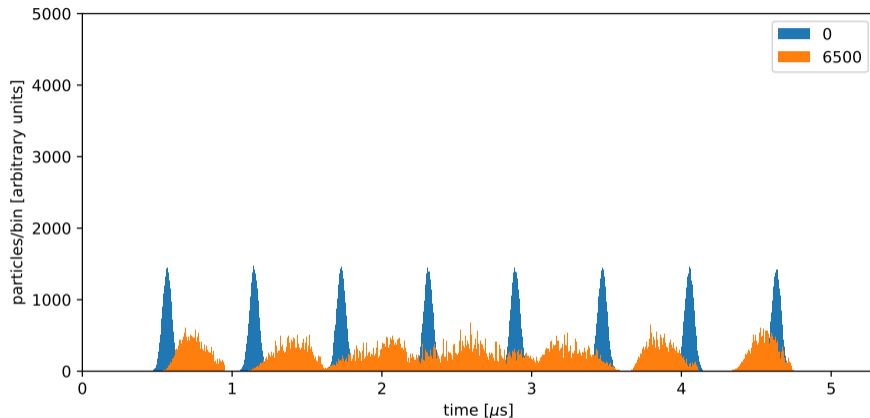


4×10^{13} ppb, 30 ns (RMS)



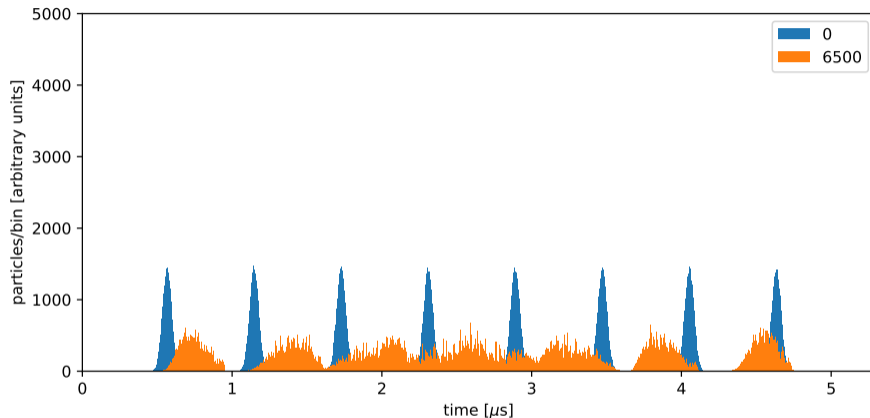
- 30 ns では、さらに運動量分布の下方への広がり減少 ($dp/p = 0.9\%$ 、ビームラインの許容範囲)
- 8 番目のバンチ後端の間隙への侵入は 100 ns 程度、キッカーの立ち上がり時間の高速化改造で取り出しは可能

初期分布 30 ns (RMS) での時間方向分布 (6500 ターン)



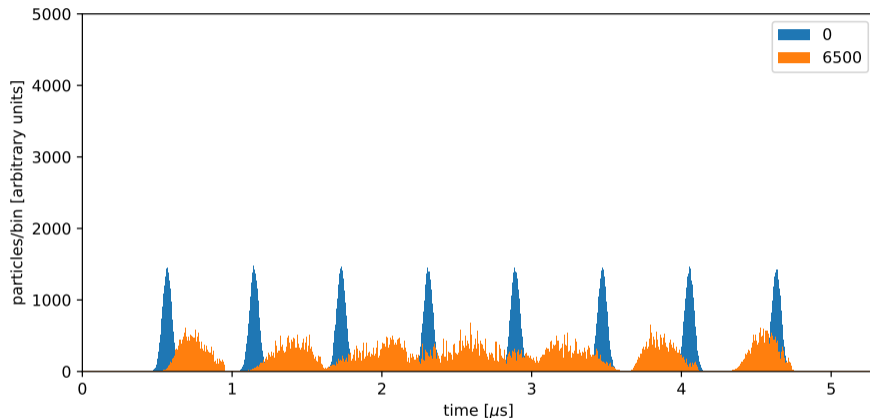
- 細かい時間方向のビン幅でプロット
- 6500 ターンではピーク電流は0ターンの半分から 1/3 程度

初期分布 30 ns (RMS) での時間方向分布 (6500 ターン)



- スパイク状のマイクロバンチング構造が全域にわたって発現
- SX 同様に電子雲を発生させ、横方向インスタビリティの原因となる可能性が高い

初期分布 30 ns (RMS) での時間方向分布 (6500 ターン)



目標強度 4×10^{13} ppb でのバンチ操作は、操作開始時の初期バンチ長を延ばした場合においても、困難であると言わざるを得ない。

結論

IWCD で要求されるピーク電流の低い時間構造を実現するために、MR フラットトップでの非断熱的バンチ操作について検討を行った。

- インピーダンスを含まない計算では所望の構造を得ることができる
- MR の高い周波数の縦方向インピーダンスを考慮すると、目標強度 4×10^{13} ppb でこのようなバンチ操作は不可能

RF 空洞の約 270 MHz および 300 MHz 周辺の強い共振は、加速ギャップの小さな静電容量と共振コンデンサ周辺の小さなインダクタンスが原因。

- 除去は困難

インピーダンスの影響は、他のバンチ操作手法にも同様の困難を及ぼすと考えられる。

- バリア電圧や、2 倍高調波によるバンチ延伸

MR から低いピーク電流の大強度ビームを供給するための手法としては、バンチ操作による方法は諦めざるを得ない。FX キッカーの高速化改造が前提となるが、VHF 電圧によるエミッタンス増加などの別の手法を考えていくことになるだろう。

結論

IWCD で要求されるピーク電流の低い時間構造を実現するために、MR フラットトップでの非断熱的バンチ操作について検討を行った。

- インピーダンスを含まない計算では所望の構造を得ることができる
- MR の高い周波数の縦方向インピーダンスを考慮すると、目標強度 4×10^{13} ppb でこのようなバンチ操作は不可能

RF 空洞の約 270 MHz および 300 MHz 周辺の強い共振は、加速ギャップの小さな静電容量と共振コンデンサ周辺の小さなインダクタンスが原因。

- 除去は困難

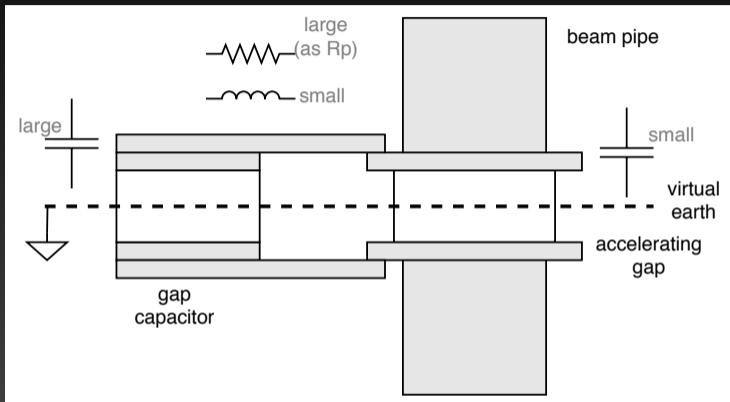
インピーダンスの影響は、他のバンチ操作手法にも同様の困難を及ぼすと考えられる。

- バリア電圧や、2 倍高調波によるバンチ延伸

MR から低いピーク電流の大強度ビームを供給するための手法としては、バンチ操作による方法は諦めざるを得ない。FX キッカーの高速化改造が前提となるが、VHF 電圧によるエミッタンス増加などの別の手法を考えていくことになるだろう。

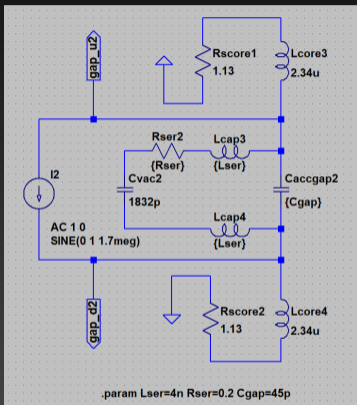
Backup slides

Resonance around accelerating gap (復習)



The model can explain the high frequency resonance.

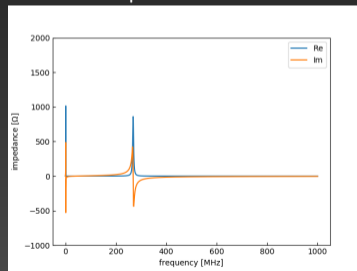
Single gap cavity model (復習)



Realistic single gap cavity model:

- MA cores modeled by L and R series
- Series inductance and resistance introduced for gap capacitor
- $L_{ser}=4$ nH (total 8 nH), $R_{ser}=0.2$ Ω , $C_{gap}=45$ pF seem to be realistic values

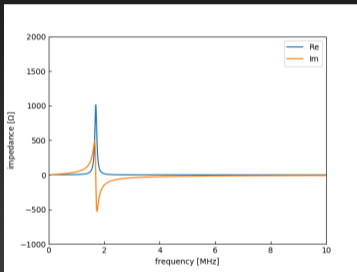
Both fundamental and high frequency resonances reproduced:



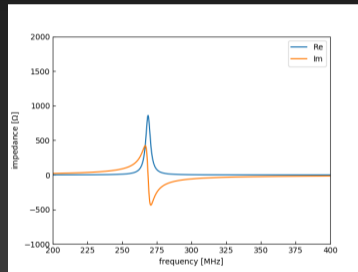
Single gap cavity model (復習)

Magnified view:

Fundamental resonance:



High frequency resonance:



Now we understand the source of high frequency resonance.