

MOMENTUM LOSS DURING SLOW EXTRACTION IN THE J-PARC MR AND ITS COUNTERMEASURES

J-PARC MR 遅い取り出しにおける運動量ロスとその対策

Fumihiko Tamura, Masanobu Yamamoto, Chihiro Ohmori,
Masahito Yoshii, Alexander Schnase, Masahiro Nomura,
Masahito Tomizawa

J-PARC center, KEK & JAEA

2013/8/4

Overview

- はじめに
- デバンチ過程の運動量ロス
 - 運動量ロスの例
 - 縦方向シミュレーション
- 運動量ロスの対策
 - ギャップショート
 - rf フィードフォワード
- 大強度ビームの遅い取り出しに向けて
- まとめ

はじめに



Fig. 1: J-PARC topview.

- MR では 三次共鳴を利用した遅い取り出しでハドロン実験施設に供給、ユーザーへの供給ビームパワー **24 kW** (3.0×10^{13} ppp、6 秒サイクル)

遅い取り出し (SX)

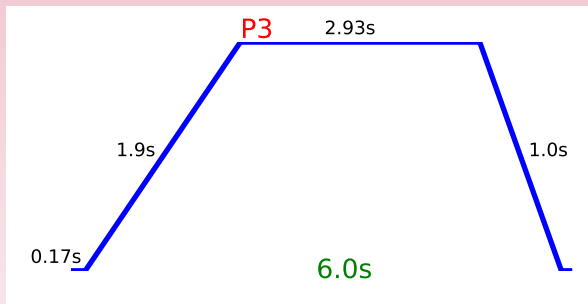


Fig. 2: SX cycle.

- ハドロン施設へは、デバンチしたビームを供給
 - フラットトップ開始 (P3) で rf 電圧をオフにすることでデバンチさせる
 - P3+300 ms から遅い取り出し開始

遅い取り出し (SX) の性能

- スピル性能

- スピル長: 約 2 秒
- duty factor: 40%超

- 取り出し効率

- 取り出し過程のビームロスによる SX 機器の放射化、放射線損傷を避けるために重要
- SX 大強度化の鍵
- 99.5% を達成

遅い取り出し (SX) の性能

- スピル性能
 - スピル長: 約 2 秒
 - duty factor: 40%超
- 取り出し効率
 - 取り出し過程のビームロスによる SX 機器の放射化、放射線損傷を避けるために重要
 - SX 大強度化の鍵
 - 99.5% を達成

デバンチ中の運動量ロス

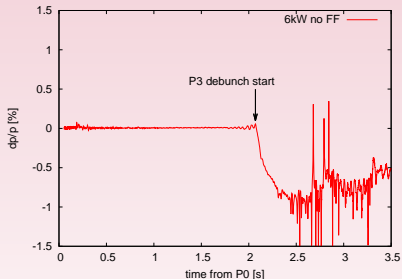


Fig. 3: Momentum deviations of 6 kW beam.

- 6 kW ビームから有意な運動量ロスを観測
 - ビーム強度依存
- 十分なデバンチまでに縦方向インピーダンスによる wake 電圧の効果
- 8 台の加速空洞 (ギャップあたり 1100 Ω)
- resistive wall、キッカーインピーダンス

デバンチ中の運動量ロス

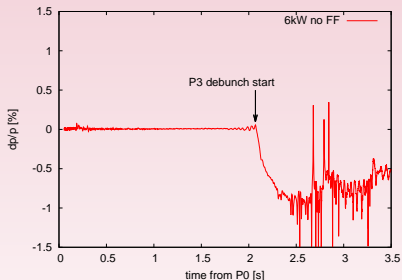


Fig. 3: Momentum deviations of 6 kW beam.

- 6 kW ビームから有意な運動量ロスを観測
 - ビーム強度依存
- 十分なデバンチまでに縦方向インピーダンスによる wake 電圧の効果
- 8 台の加速空洞 (ギャップあたり 1100Ω)
- resistive wall、キッカーインピーダンス

デバンチ中の運動量ロス

運動量ロスは、取り出し効率の悪化を招く

- 先程の例では 97%

取り出し効率悪化の理由

- クロマティシティの高次の効果によりセパレートリクスが運動量に依存 → 取り出し角度の広がり
- 静電セプタムリボンへのヒット率増加

デバンチ中の運動量ロス

運動量ロスは、取り出し効率の悪化を招く

- 先程の例では 97%

取り出し効率悪化の理由

- クロマティシティの高次の効果によりセパレートリクスが運動量に依存 → 取り出し角度の広がり
- 静電セプタムリボンへのヒット率増加

デバンチ中の運動量ロス

- RCS 入射から MR フラットトップまでの縦方向のビームシミュレーション
- P3 から空洞の wake の効果を入れた (その他のインピーダンスなし)

デバンチ中の運動量ロス

- RCS 入射から MR フラットトップまでの縦方向のビームシミュレーション
- P3 から空胴の wake の効果を入れた (その他のインピーダンスなし)

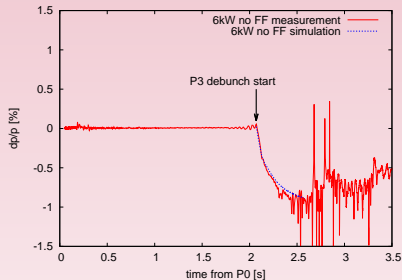


Fig. 4: A comparison of the momentum deviations of the simulation and measurement.

デバンチ中の運動量ロス

- RCS 入射から MR フラットトップまでの縦方向のビームシミュレーション
- P3 から空胴の wake の効果を入れた (その他のインピーダンスなし)

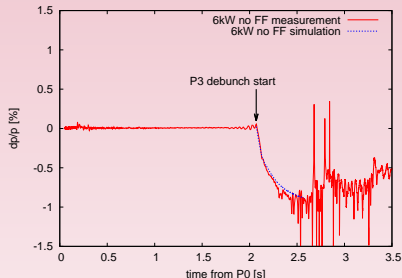


Fig. 4: A comparison of the momentum deviations of the simulation and measurement.

- 運動量ロスをよく再現、運動量ロスの原因は空胴のみと考えてよい
- では、位相空間ではどのような挙動を示すのか？
 - 空胴の主要な wake がキャンセルされている場合と比較してみる

デバンチ中の位相空間分布、P3+0 ms

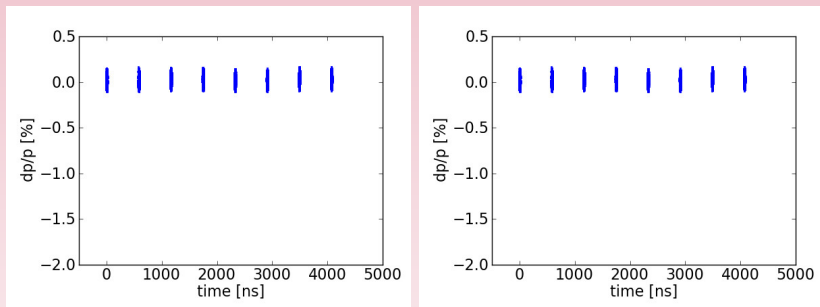


Fig. 5: (左) 補償あり、(右) 補償なし

- P3 時点で、バンチ長は全幅で 40 ns、運動量の広がりには全幅で $\pm 0.12\%$

デバンチ中の位相空間分布、P3+100 ms

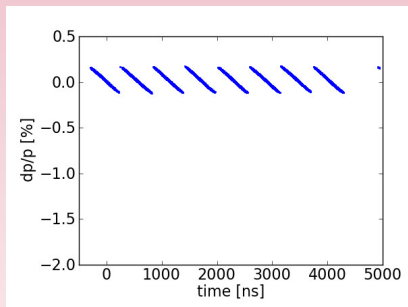


Fig. 6: (左) 補償あり、(右) 補償なし

- 補償ありの場合は運動量広がりによる周回周波数の違いのみによってデバンチ

デバンチ中の位相空間分布、P3+100 ms

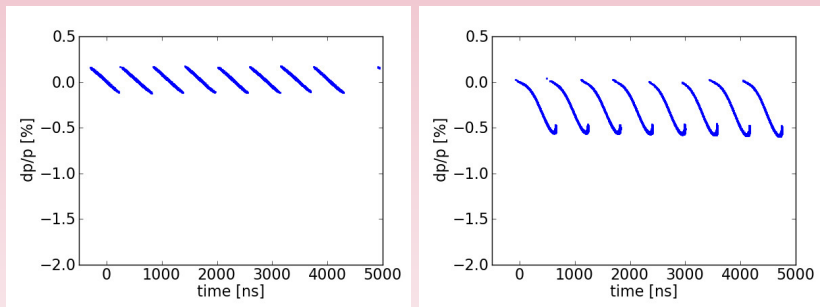


Fig. 6: (左) 補償あり、(右) 補償なし

- 補償ありの場合は運動量広がりによる周回周波数の違いのみによってデバンチ
- 補償なしの場合、wake により一部の粒子が加速、減速される
- 100 ms で既に運動量ロス、広がりが発生

デバンチ中の位相空間分布、P3+200 ms

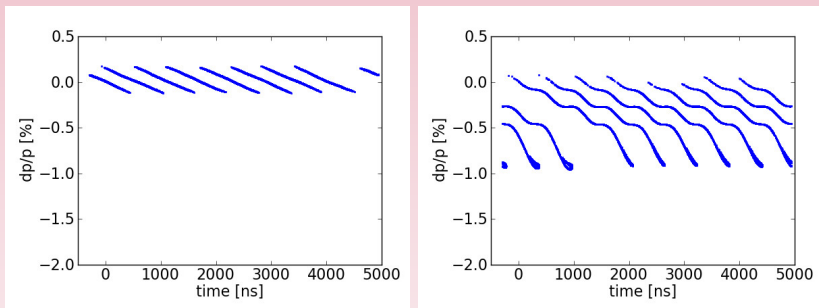


Fig. 7: (左) 補償あり、(右) 補償なし

デバンチ中の位相空間分布、P3+300 ms

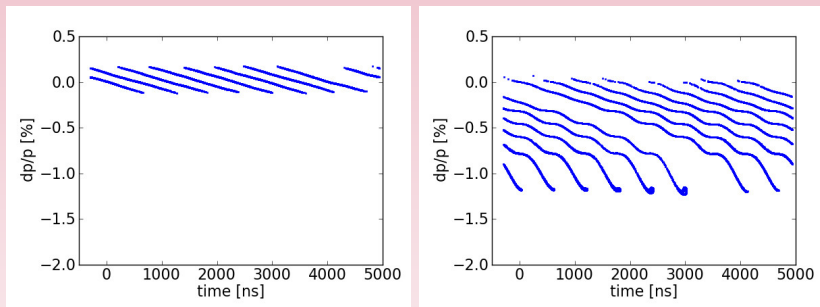


Fig. 8: (左) 補償あり、(右) 補償なし

- 時間が経つとさらに波うったような構造に

デバンチ中の位相空間分布、P3+400 ms

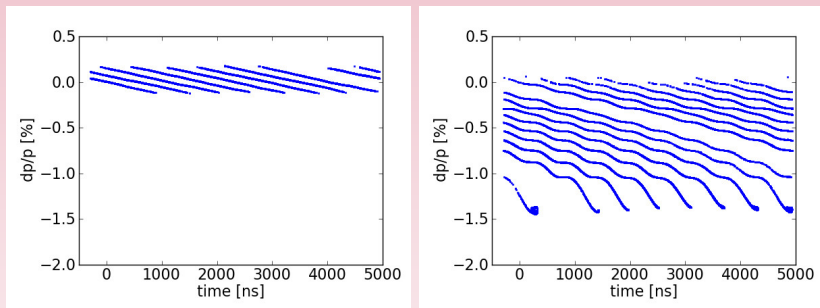


Fig. 9: (左) 補償あり、(右) 補償なし

デバンチ中の位相空間分布、P3+500 ms

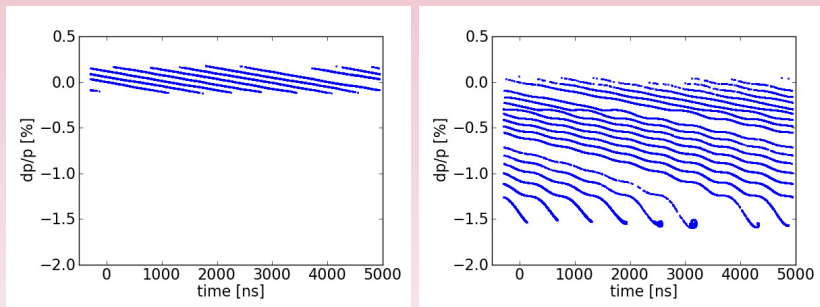


Fig. 10: (左) 補償あり、(右) 補償なし

- 500 ms では、運動量広がり是非常に大きい
- 各バンチは、補償なしのほうが伸びている

デバンチ後の運動量分布、P3+500 ms

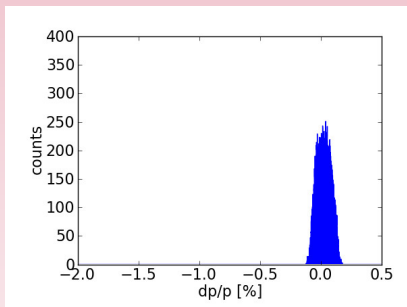


Fig. 11: (左) 補償あり、(右) 補償なし

- 補償あり: 運動量広がりにはデバンチ前と同じ、 $\pm 0.12\%$

デバンチ後の運動量分布、P3+500 ms

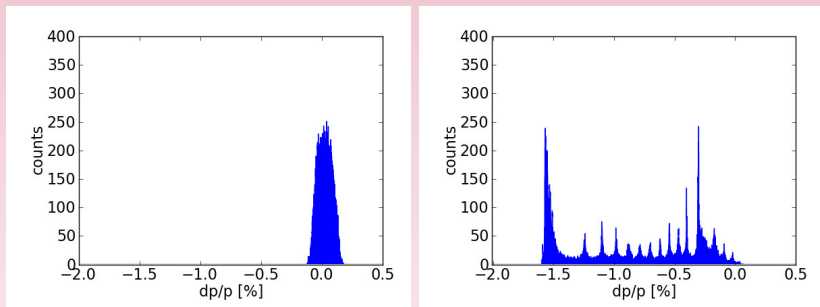


Fig. 11: (左) 補償あり、(右) 補償なし

- 補償あり: 運動量広がりにはデバンチ前と同じ、 $\pm 0.12\%$
- 補償なし: -1.5% から 0% にわたる大きな運動量広がり、分布の山
 - チューンの広がり、取り出し効率悪化

デバンチ後の時間分布、P3+500 ms

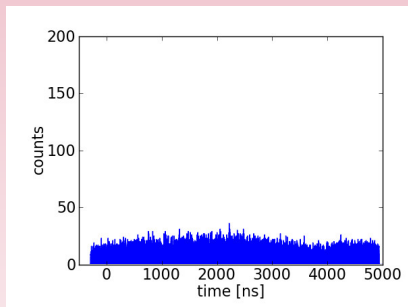


Fig. 12: P3+500 ms での時間分布。(左) 補償あり、(右) 補償なし

- 補償あり: きれいにデバンチ

デバンチ後の時間分布、P3+500 ms

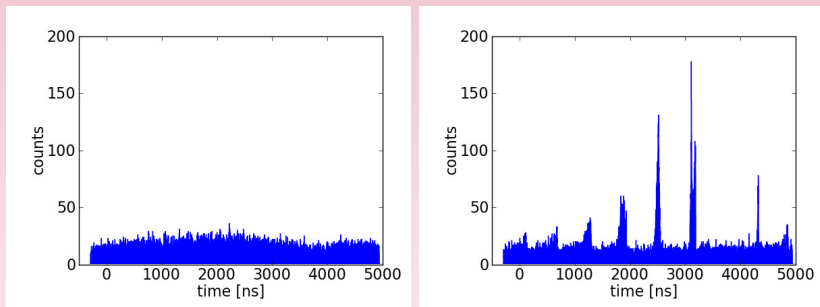


Fig. 12: P3+500 ms での時間分布。(左) 補償あり、(右) 補償なし

- 補償あり: きれいにデバンチ
- 補償なし: バンチ状の構造が残る
 - ユーザーへのビームの質も低下

シミュレーションまとめ

空洞インピーダンスによるデバンチ過程の影響：

- 大きな運動量ロスが発生
- 大きな運動量広がりが発生
- デバンチも遅い (構造が残る)

デバンチ中にビームの見る空洞インピーダンスを下げることが必要

運動量ロスの対策

運動量ロスの対策とは、デバンチ中のビームの見るインピーダンスを下げることである。

- ギャップショート
- rf フィードフォワードによるビームローディング補償

運動量ロスの方策

運動量ロスの方策とは、デバンチ中のビームの見るインピーダンスを下げることである。

- ギャップショート
- rf フィードフォワードによるビームローディング補償

ギャップショート

デバンチ中に、加速ギャップをショートすることでインピーダンスを下げる。

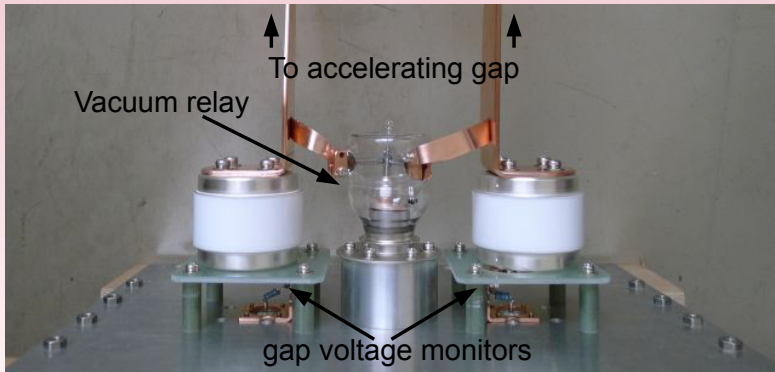


Fig. 13: ギャップショートリレー。Kilovac H-17 を使用している。

- 各空胴のひとつのギャップに、ギャップ電圧モニタとともにインストールされている

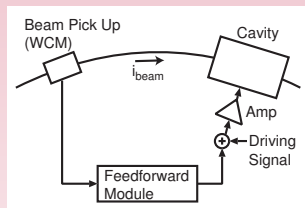
ギャップショット

- 耐圧 20 kV、最大許容電流は 16 A
- 加速電圧発生時にリレーを閉じると焼損
 - 真空管からの供給電流は数十 A
- P3 で rf 電圧オフ直後に動作指令を送る
- 25 ms 程度の時間がかかる
 - この間はインピーダンスを下げる効果はない

ギャップショット

- 耐圧 20 kV、最大許容電流は 16 A
- 加速電圧発生時にリレーを閉じると焼損
 - 真空管からの供給電流は数十 A
- P3 で rf 電圧オフ直後に動作指令を送る
- 25 ms 程度の時間がかかる
 - この間はインピーダンスを下げる効果はない

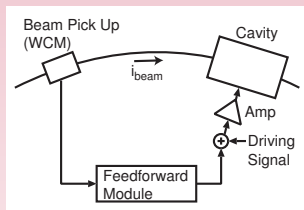
rf フィードフォワード



- ビーム電流を WCM で検出
- 空胴電圧発生のための **ドライブ電流に加えて、 $-i_{\text{beam}}$ なる電流を空胴に供給**
 - wake 電圧をキャンセル
- wake が隣接ハーモニクスの成分を含むので、フィードフォワードもマルチハーモニック

Fig. 14: フィードフォワードシステムの概念およびブロック図。

rf フィードフォワード



- ビーム電流を WCM で検出
- 空胴電圧発生のための **ドライブ電流に加えて、 $-i_{beam}$ なる電流を空胴に供給**

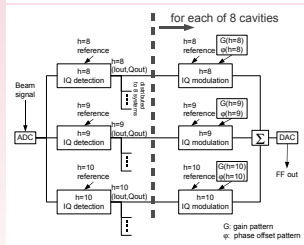


Fig. 14: フィードフォワードシステムの概念およびブロック図。

- wake 電圧をキャンセル

- wake が隣接ハーモニクスの成分を含むので、フィードフォワードもマルチハーモニック

rf フィードフォワード

- FX 大強度ビーム (200 kW 超) には安定な加速のために必須
- SX の現在の強度では、FF なしでも加速は問題なしだが、デバンチ中の運動量ロス低減には役立つ
- FF の最適なパターンはビーム条件により異なるが、これまで時間がとれず SX デバンチ用には簡易調整
 - ($h = 9$): 検波電圧をみながら調整
 - ($h = 8, 10$): FX で使ってるパターンのまま

rf フィードフォワード

- FX 大強度ビーム (200 kW 超) には安定な加速のために必須
- SX の現在の強度では、FF なしでも加速は問題なしたが、デバンチ中の運動量ロス低減には役立つ
- FF の最適なパターンはビーム条件により異なるが、これまで時間がとれず SX デバンチ用には簡易調整
 - ($h = 9$): 検波電圧をみながら調整
 - ($h = 8, 10$): FX で使ってるパターンのまま

6 kW ビームでの結果

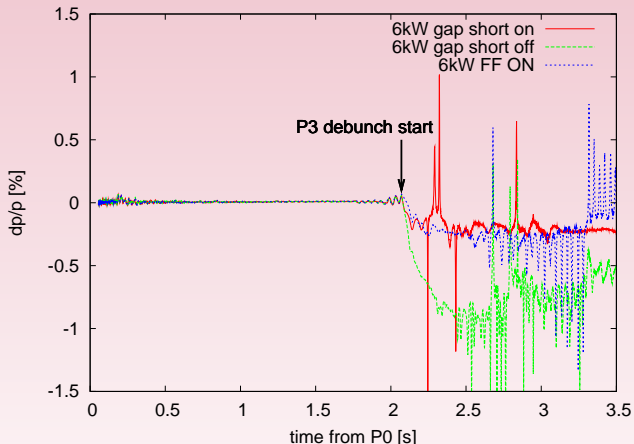


Fig. 15: 対策なし、ギャップショート、フィードフォワードの場合の運動量ずれの比較。

運動量ロスと同程度なので、焼損や寿命の心配のないフィードフォワードを通常運転に使用している。

6 kW ビームでの結果

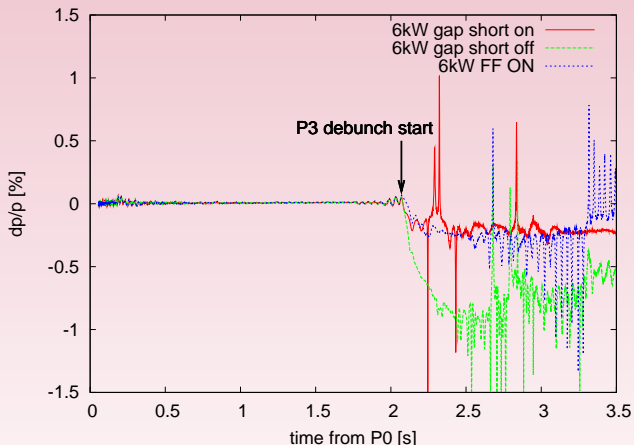


Fig. 15: 対策なし、ギャップショート、フィードフォワードの場合の運動量ずれの比較。

運動量ロスと同程度なので、焼損や寿命の心配のないフィードフォワードを通常運転に使用している。

フィードフォワード本格調整の試験

- 簡易調整では将来の大強度ビームには不十分

空洞電圧は wake、FF 成分の重ね合わせ

$$\begin{aligned} V_{\text{cav}}(h, t) &= V_{\text{cav,wake}}(h, t) + V_{\text{cav,FF}}(h, t) \\ &= Z'_{\text{cav}}(h, t) \cdot I_{\text{beam}}(h, t) + Z_{\text{FF}}(h, t) \cdot I_{\text{beam}}(h, t) \end{aligned}$$

- FF OFF で求めた $Z'_{\text{cav}}(h, t)$ を使い、 $Z_{\text{FF}}(h, t)$ (ビーム電流からフィードフォワード成分への伝達関数) が求まる
- $Z_{\text{FF}}(h, t) = -Z'_{\text{cav}}(h, t)$ となるようにパターンを調整

空洞 1 号機で、本格調整での wake 抑制効果を調べた。

フィードフォワード本格調整の試験

- 簡易調整では将来の大強度ビームには不十分

空洞電圧は wake、FF 成分の重ね合わせ

$$\begin{aligned} V_{\text{cav}}(h, t) &= V_{\text{cav,wake}}(h, t) + V_{\text{cav,FF}}(h, t) \\ &= Z'_{\text{cav}}(h, t) \cdot I_{\text{beam}}(h, t) + Z_{\text{FF}}(h, t) \cdot I_{\text{beam}}(h, t) \end{aligned}$$

- FF OFF で求めた $Z'_{\text{cav}}(h, t)$ を使い、 $Z_{\text{FF}}(h, t)$ (ビーム電流からフィードフォワード成分への伝達関数) が求まる
- $Z_{\text{FF}}(h, t) = -Z'_{\text{cav}}(h, t)$ となるようにパターンを調整

空洞 1 号機で、本格調整での wake 抑制効果を調べた。

本格調整の試験 (15 kW ビーム)

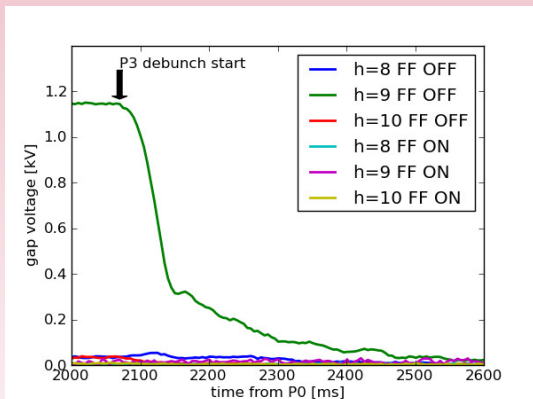


Fig. 16: A comparison of the harmonic components of cavity #1 gap voltage without and with feedforward.

- ($h = 9$) 1.15 kV から 30 V 以下に抑制 (簡易調整では数分の一)
- 50 kW 以上の大強度に向けては、全号機の本格調整が有効であることを示唆

24 kW ビーム

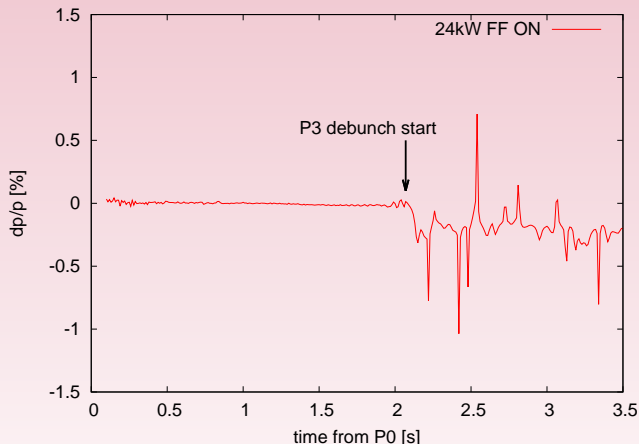


Fig. 17: Momentum deviation during the debunching process with feedforward at the beam power of 23.8 kW.

- 運動量ロス は 0.2% 程度
- 取り出し効率 99.5% を維持

まとめ

- デバンチ過程中には、空洞インピーダンスによる運動量ロスがある
- シミュレーションにより運動量ロスを再現、大きな運動量広がりを生じることを確かめた
- 空洞インピーダンス低減方法として、ギャップショートおよびrf フィードフォワードを試験、低減効果を確認した。通常運転にはリスクの少ないフィードフォワードを採用
- 24 kW ビームでも、運動量ロス 0.2%、取り出し効率 99.5% を維持

大強度化に向けては、FF の全号機本格調整が必要と思われる

まとめ

- デバンチ過程中には、空胴インピーダンスによる運動量ロスがある
- シミュレーションにより運動量ロスを再現、大きな運動量広がりを生じることを確かめた
- 空胴インピーダンス低減方法として、ギャップショートおよびrf フィードフォワードを試験、低減効果を確認した。通常運転にはリスクの少ないフィードフォワードを採用
- 24 kW ビームでも、運動量ロス 0.2%、取り出し効率 99.5% を維持

大強度化に向けては、FF の全号機本格調整が必要と思われる