

J-PARC RCS における大強度 1 バンチ加速の検討

田村文彦、沖田英史、發知英明、サハプラナブ、明午伸一郎、吉井正人、大森千広、
山本昌亘、清矢紀世美、杉山泰之、野村昌弘、島田太平、長谷川豪志、原圭吾、宮越亮輔

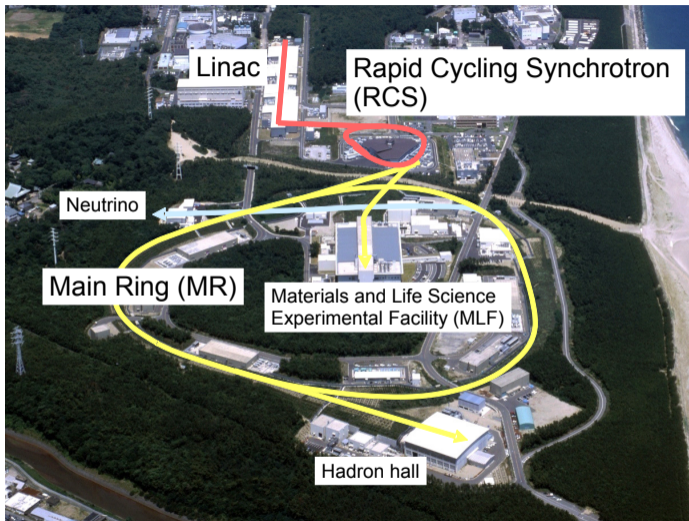
J-PARC センター

August 2023

Contents

1. はじめに – 大強度 1 バンチ加速の検討の動機
2. 電圧パターンの初期検討
3. デュアルハーモニック加速電圧パターンの検討
4. MR 入射の可能性
5. まとめと今後

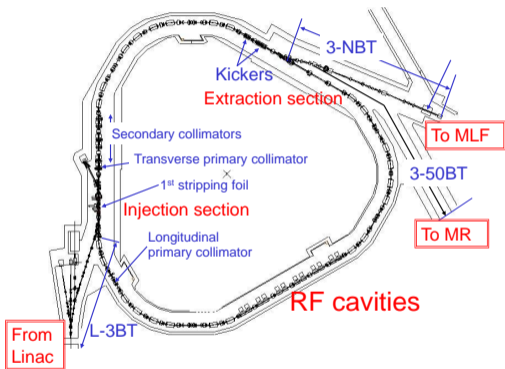
大強度陽子加速器 J-PARC



- 加速器: 400 MeV linac、3 GeV RCS、30 GeV Main Ring (MR)
- 実験施設: MLF、ハドロン、ニュートリノ

J-PARC Rapid Cycling Synchrotron (RCS)

RCS は MLF と MR に大強度陽子ビームを供給している。



circumference	348.333 m
energy	0.400–3 GeV
beam intensity	8.3×10^{13} ppp
output beam power	1 MW
accelerating frequency	1.227–1.671 MHz
harmonic number	2
maximum rf voltage	440 kV
repetition rate	25 Hz
No. of cavities	12
Q-value of rf cavity	2

- MLF にはほぼ 1 MW を供給中
- ハーモニック数は 2、通常は 2 バンチを加速

MLF の中性子実験には、1 バンチビームを強く望むものがある。

- 多くの中性子実験はバンチ構造をあまり気にしない

1バンチビームを望む例: BL04 ANNRI 中性子核反応測定装置

J-PARC MLF Next to Meet@MLF

実験装置 利用の流れ 運転情報 交通案内 滞在案内

試料の送付に関して
課題選択後・束所手続き

トップ » 実験装置 » BL04 ANNRI

BL04 ANNRI 中性子核反応測定装置

概要
一瞬の核反応を手中に

研究対象	中性子と原子核の反応を中性子のエネルギー毎に精密に測定し、新しい原子炉の開発や中性子科学研究を進展させる。
特徴	中性子の飛行時間毎に中性子核反応で発生する放射線を精密に計測します。大強度中性子ビームにより微量サンプルでも測定できます。

ANNRI is used for studies of nuclear science (nuclear data for nuclear technology and astrophysics, quantitative analyses etc.)

通常用いる中性子回析に用いるエネルギー範囲より高い領域を興味対象とするため、2バンチ構造に起因する飛行時間の不確定性は重大な問題となる。

現在の1バンチビームの作り方: 1つを空きバケツにするだけ

簡単だが、当然、最大強度は半分になってしまう。

$h = 1$ 加速が可能ならば...

最大 8.3×10^{13} ppb の 1 バンチビームが供給できる。

- 前述の中性子核反応測定装置などにメリットあり
- MR は現在 2 バンチずつ 4 回の入射で 8 バンチを蓄積、これを 1 バンチずつ 8 回とすることで、バンチあたりの強度 4×10^{13} ppb 以上が可能になる
 - 現在の目標 1.3 MW を超える可能性

以上のように魅力的な $h = 1$ 加速であるが、ハーモニック数 h を変えることでバケツ高さや最適な同期位相 ϕ_s が変化するため、縦方向の運動について詳細な検討を行う必要がある。

$h = 1$ 加速が可能ならば...

最大 8.3×10^{13} ppb の 1 バンチビームが供給できる。

- 前述の中性子核反応測定装置などにメリットあり
- MR は現在 2 バンチずつ 4 回の入射で 8 バンチを蓄積、これを 1 バンチずつ 8 回とすることで、バンチあたりの強度 4×10^{13} ppb 以上が可能になる
 - 現在の目標 1.3 MW を超える可能性

以上のように魅力的な $h = 1$ 加速であるが、ハーモニック数 h を変えることでバケツ高さや最適な同期位相 ϕ_s が変化するため、縦方向の運動について詳細な検討を行う必要がある。

1. はじめに – 大強度 1 バンチ加速の検討の動機
2. 電圧パターンの初期検討
3. デュアルハーモニック加速電圧パターンの検討
4. MR 入射の可能性
5. まとめと今後

一般的事柄 (釈迦に説法)

RCS の偏向電磁石磁場は 25 Hz の正弦波で、運動エネルギーにして 400 MeV 相当から 3 GeV 相当まで励磁されている。

- 同期位相 ϕ_s

$$\sin \phi_s = \frac{2\pi R}{V_0} \rho \frac{dB}{dt} \quad (1)$$

ここには陽にハーモニック数 h は現われない

- バケツの高さ (dp/p)

$$(\text{bucket height on } dp/p) = \sqrt{-\frac{eV_0}{\beta_s^2 E_s \pi h \eta} (2 \cos \phi_s + (2\phi_s - \pi) \sin \phi_s)} \quad (2)$$

一般に、同じ電圧に対しては h が小さいほうが運動量方向に大きな RF バケツとなる

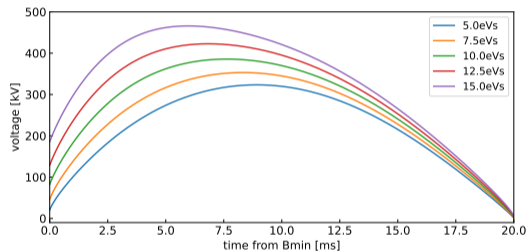
速い繰り返しのシンクロトロンでは特に、縦方向エミッタンスを保持して加速ができるような電圧パターンを設計することが重要であるが、RAMA と呼ばれる計算コードで、基本波電圧パターンを設計することができる。

RAMA で作った $h = 1$ 加速電圧パターン

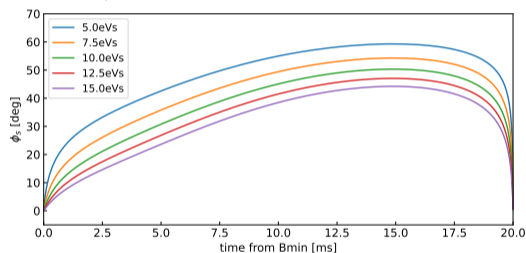
RAMA に与える条件:

- モーメントムフィリングファクター (MF): 余裕のある 0.8
- 初期エミッタンス: 5 eVs – 15 eVs

電圧パターン



同期位相 ϕ_s



- 15 eVs は 440 kV を超えるので不可。初期エミッタンス小 → 必要な電圧小 (5 eVs: 300 kV)
- 電圧が低いパターンは最大の ϕ_s が大、 ϕ_s 変化が速い
- 5 eVs の場合は加速の始め、1 ms 以内に 30 度近くまで変化、初期エミッタンス大で緩やか

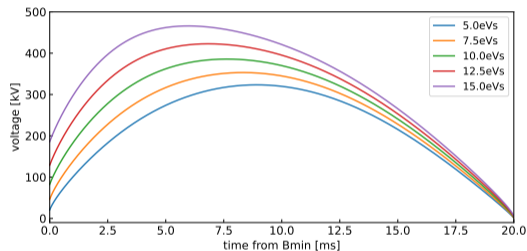
縦方向シミュレーションコード BLongD で計算を行った。

RAMA で作った $h = 1$ 加速電圧パターン

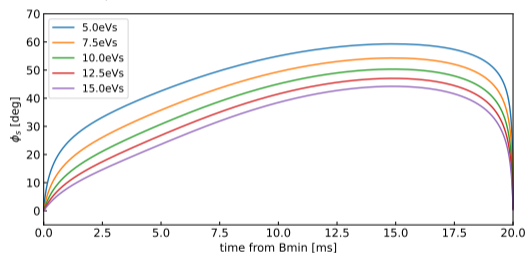
RAMA に与える条件:

- モーメントムフィリングファクター (MF): 余裕のある 0.8
- 初期エミッタンス: 5 eVs – 15 eVs

電圧パターン



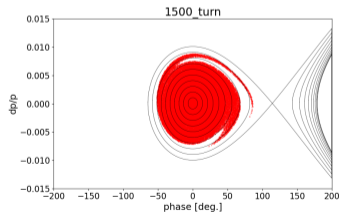
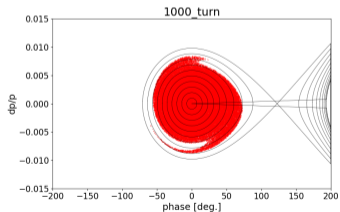
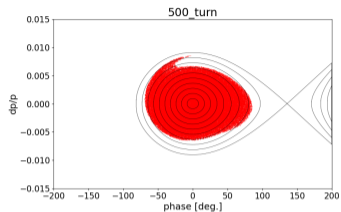
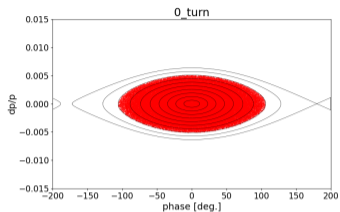
同期位相 ϕ_s



- 15 eVs は 440 kV を超えるので不可。初期エミッタンス小 → 必要な電圧小 (5 eVs: 300 kV)
- 電圧が低いパターンは最大の ϕ_s が大、 ϕ_s 変化が速い
- 5 eVs の場合は加速の始め、1 ms 以内に 30 度近くまで変化、初期エミッタンス大で緩やか

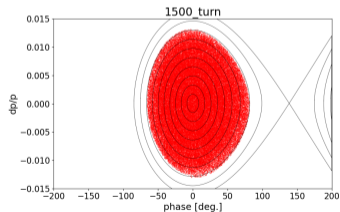
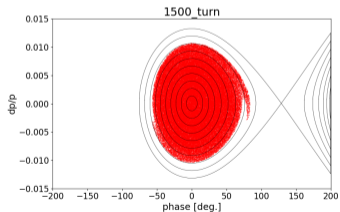
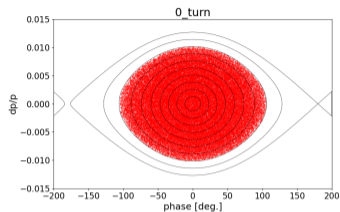
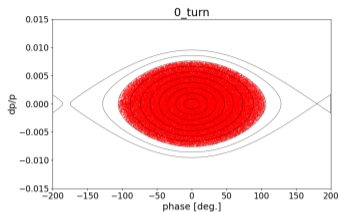
縦方向シミュレーションコード BLongD で計算を行った。

BLonD 計算結果、初期エミッタンス 5 eVs



1 ターン入射として計算。加速初期で ϕ_s の変化が速く、バケツの形が急激に変わる。粒子が追従できずフィラメント生成。このパターンは使えない。

BLonD 計算結果、初期エミッタンス (左) 7.5 eVs、(右) 10 eVs



電圧が高い分 ϕ_s の変化が緩やか。粒子が追従できる。加速終了までエミッタンスも保たれ安定。しかし dp/p が 1.1%、1.3% と設計上の許容値を超える。2 倍高調波を加えて扁平化させる必要がある。

1. はじめに – 大強度 1 バンチ加速の検討の動機
2. 電圧パターンの初期検討
3. デュアルハーモニック加速電圧パターンの検討
4. MR 入射の可能性
5. まとめと今後

デュアルハーモニック加速電圧パターン

2倍高調波が含まれる場合は、RFバケツのパラメータは簡単な式にならず、RAMAは使えない。ポテンシャルやセパトリクスを数値的に求め、ビーム分布に対応する適切な電圧を求めなければならない。

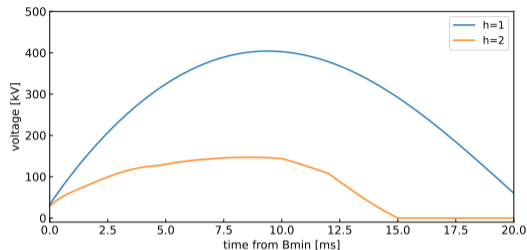
基本波、2倍高調波電圧をキーに、加速中の各時間で縦方向パラメータのデータベースを構築:

- ビーム分布は Hoffman-Pedersen 分布に従うと仮定
- 初期ビームエミッタンス 10 eVs
- モーメントムフィリングファクター 0.8

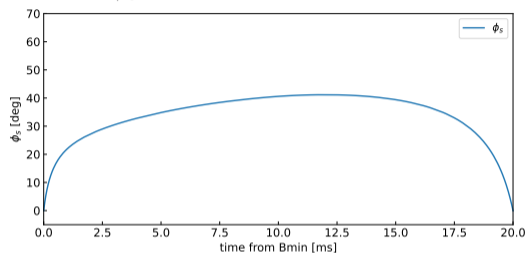
バンチングファクターが最大となるようデータベースから探索を行い、デュアルハーモニック加速電圧パターンを得た。

デュアルハーモニク加速電圧パターン

電圧パターン



同期位相 ϕ_s



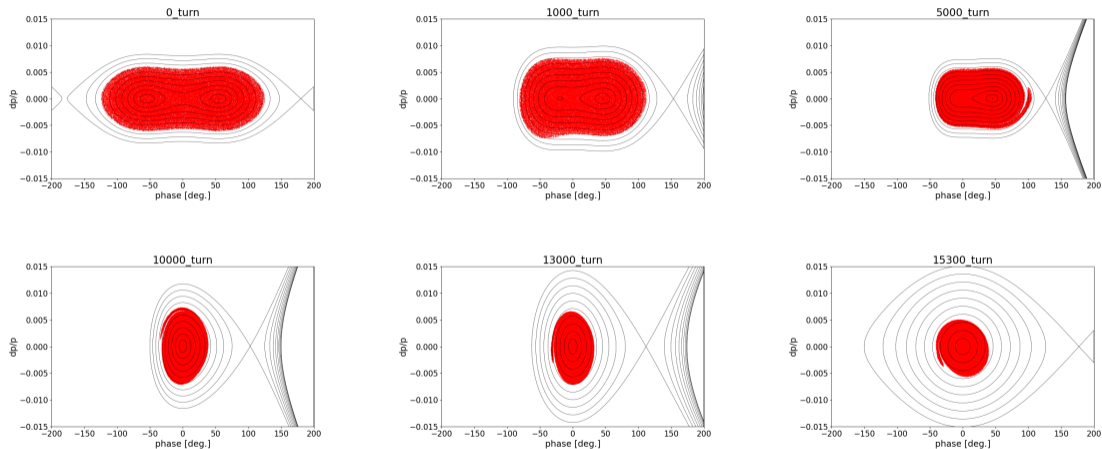
前半 10 ms まではデータベースによるパターンを使用。最大電圧 400 kV。

後半は、

- 基本波は正弦波的な形で取り出し時 60 kV まで下げていく
 - データベースパターンだと後半の ϕ_s 変化が速くて追従困難
- 2倍高調波は 10 ms から 15 ms にかけて 0 kV に落とす
 - 現在の運転に倣った。システム負荷低減

これで BLonD でシミュレーションを行った。

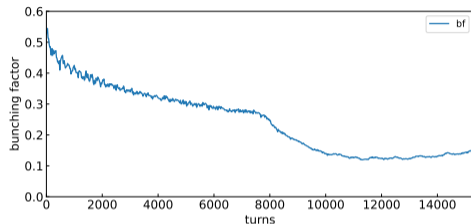
BLoND 計算結果、初期エミッタンス 8 eVs



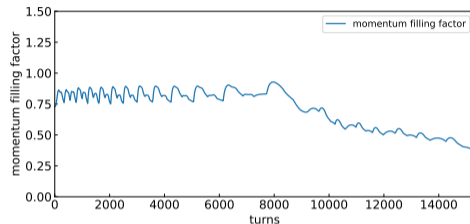
10 eVs だとフィラメント発生のため 8 eVs (これでも少し残る)。入射から取り出しまで安定に加速。前半は 2 倍高調波で扁平。後半はバケツに余裕ができる。取り出しバンチ長は約 250 ns。

BLoND 計算結果、初期エミッタンス 8 eVs

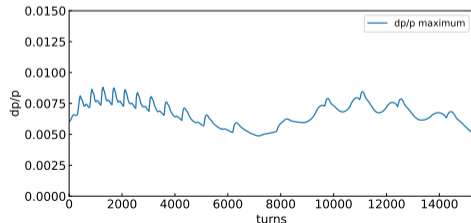
バンチングファクター



モーメントムフィリングファクター



ビーム運動量広がり dp/p



- 2倍高調波で加速初期に大きな B_f を実現
- MF はデータベースパターンの間は 0.8 程度で一定
 - 振動はフィラメントが原因
- 運動量広がり は 0.8% 程度、1% 未満

$h = 1$ 加速用デュアルハーモニックパターン完成。

1. はじめに – 大強度 1 バンチ加速の検討の動機
2. 電圧パターンの初期検討
3. デュアルハーモニック加速電圧パターンの検討
4. MR 入射の可能性
5. まとめと今後

MR 入射にあたって

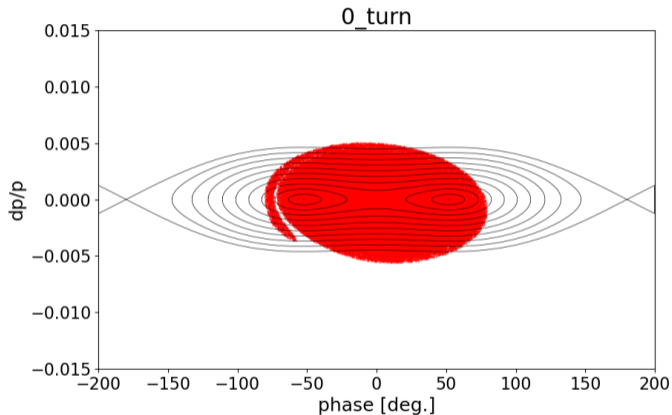
現在の $h = 2$ 加速ビームの MR 入射とはいろいろ異なり、自明ではない:

- $h = 1$ 加速だと RCS の取り出し周波数は MR の待ち受け周波数 (1.67 MHz) の半分
- $h = 1$ 加速での取り出しビームの分布は現在の $h = 2$ 加速のものと大きく異なる

MR 側の待ち受け電圧もデータベースを構築し再検討した。

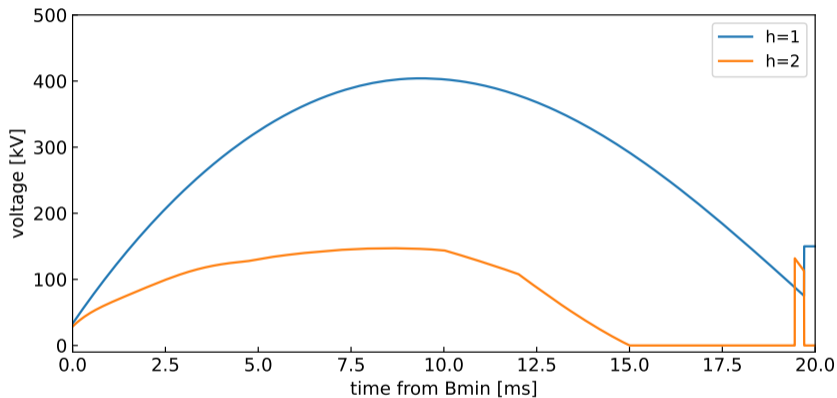
- 初期エミッタンス 10 eVs、MF は 0.8
- 基本波 ($h = 9$): 59 kV、2 倍高調波 ($h = 18$): 48 kV

MR バケツにさきほどのビームを入れてみると



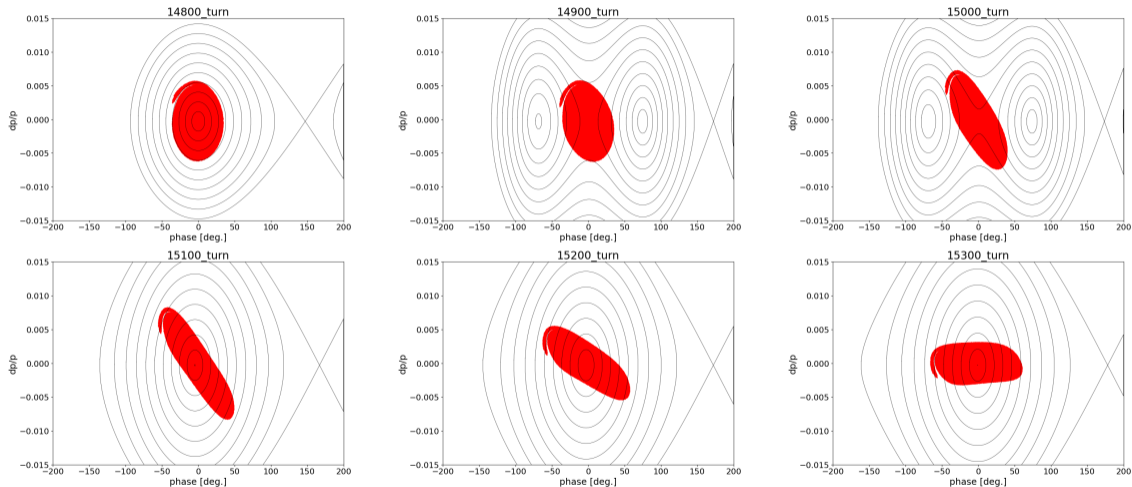
運動量方向にはみ出して入らない。RCS でのバンチ操作で扁平化が必要である。

2倍高調波を使ったバンチ操作



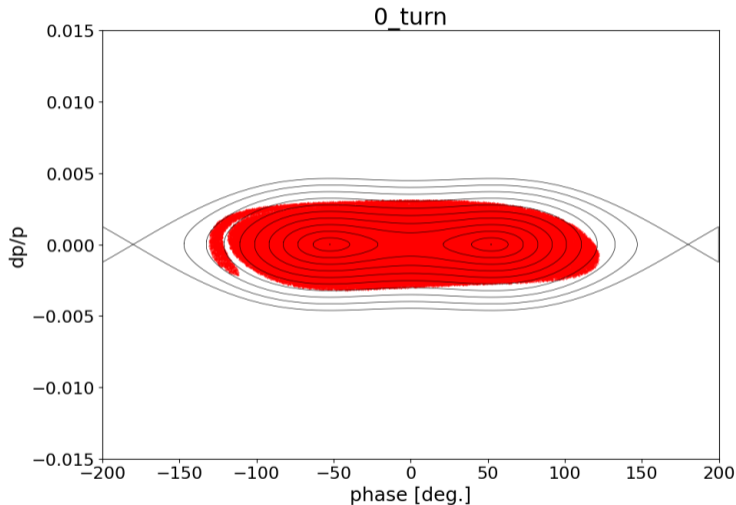
ここでは2倍高調波とバンチ回転を組み合わせた方法を紹介する。

2倍高調波を使ったバンチ操作



2倍高調波で不安定不動点を作り、バンチを延伸。急に2倍高調波をオフと同時に基本波電圧を上げ、回転を起こす。取り出しで扁平ビームが得られる。バンチ長約400 ns。

MR バケツにさきほどのビームを入れてみると



扁平ビームは MR バケツに入るようになった。MR の詳細な計算はこれからである。

まとめと今後

RCS における $h = 1$ 加速の縦方向シミュレーション結果は期待の持てるものである。

- $h = 1$ 加速は縦方向エミッタンスの大きいビームの加速に適している
- 取り出し直前のバンチ操作により、MR バケツとのマッチングを改善できる

今後の課題：

- RCS でのマルチターン入射を含めた縦方向シミュレーション
- MR の縦方向シミュレーション
- RCS 空洞共振点・Q 値の検討、真空管動作解析
- RCS / MR の空間電荷を含む横方向シミュレーション
- MR に長いバンチを入射するための入射キッカーの高速化の検討

上記の総合的な検討を進め、 $h = 1$ 加速の実現可能性を検証していく。