

BEAM DYNAMICS SIMULATIONS OF J-PARC MAIN RING FOR FAST EXTRACTION OPERATION: BENCHMARKS AND KEYS FOR UPGRADE PLAN BY HIGHER REPETITION

Yoichi Sato^{#,A)}, Susumu Igarashi^{A)}, Kazuhito Ohmi^{A)}, Keigo Hara^{A)}, Hideaki Hotchi^{B)}, Masato Tomizawa^{A)}, Chihiro Ohmori^{A)}, Masaki Tejima^{A)}, Yoshinori Hashimoto^{A)}, Takeshi Toyama^{A)}, Tadashi Koseki^{A)},

^{A)} KEK/J-PARC

2-4 Shirakata Shirane, Tokai, Naka-gun, Ibaraki 319-1195

^{B)} JAEA/J-PARC

2-4 Shirakata Shirane, Tokai, Naka-gun, Ibaraki 319-1195

Abstract

Beam loss simulations were performed in order to establish our upgrade plan of high intensity proton beams in fast extraction operation of Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) Main Ring. It is especially important to keep beam loss within the collimator capacity of accelerators for a J-PARC radio-activation control scenario. To evaluate our procedure of simulations, we compared the simulated beam losses with the beam losses measured in our past operations with DC Current Transformer. To upgrade beam power, increasing protons per bunch and making higher repetition pattern are considered. Through simulations including space charge effects, we found that to optimize both 2nd RF voltage pattern and phase pattern is a strong key to reduce beam losses for higher repetition. Upgrade scenarios of different repetition times are presented.

J-PARC Main Ring 速い取出し運転のビームシミュレーション:実測ビームロスとの比較ベンチマーク、高繰り返しによるビーム増強の要点

1. はじめに

大強度陽子ビーム運転ではビームロスをコリメータ容量に収めることが要求されるが、その予測には空間電荷効果を考慮したビームシミュレーションが不可欠である。本発表では、Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) Main Ring (MR)の速い取出し運転に対し、実験との比較によるビームシミュレーションのベンチマークとそれに基づくアップグレード計画の根拠を示す。

現在 MR 速い取出し利用運転では 40 ms 毎 4 回の入射タイミングに対し 2 バンチ毎に 3 GeV の陽子を $\sim 1.2E13/\text{bunch}$ 入射し、合計 8 バンチを 120 ms で蓄積後、1.9 s かけて 30 GeV まで加速し 1 パルスとして取出している。これを 3.2 s 周期で繰り返している。加速に際しては RF 電圧を引き上げるとともに、電磁石には 0.1 s のスムーズング、1.7 s の線形、0.1 s のスムーズングにした合計 1.9 s の磁場引き上げを行っている。ビームロスは入射から加速初期のスムーズング終了までのロスが大部を占める。このため、加速初期までの RF 電圧、RF 位相、電源パターンの選択が重要となる。シミュレーションベンチマークは、現状運転のビームロスとの比較で行った。ビームロスは DC Current Transformer (DCCT) で測定されている^[1,2]が、比較精度を上げるために、DCCT 特性を考慮したデータ補正を新たに必要とした^[3,4]。この補正後測定との比較でシミュレーションの妥当性を確認した。

J-PARC Main Ring アップグレード計画は、バン

チ当り陽子数の増加と、繰り返し時間の短縮を基に検討されている^[5]。陽子数増加は空間電荷効果によるロス数の指数関数的増大を伴うが、繰り返し時間短縮はロスの線形増加に留まる。両者のバランスによりビームロスを抑えたビーム増強を目指す。繰り返し時間の短縮は磁石電源の性能に依存するため、現行電源と現在開発中の新規電源それぞれの場合で到達可能な繰り返し時間に対して検討した。シミュレーションによれば、繰り返し時間短縮による短い加速時間においては RF 電圧パターンだけではなく 2 倍高調波 RF の位相パターンを調整することがビームロス抑制の鍵となる。この結果は動径方向の空間電荷効果を考慮することで確認された。

2. MR 運転とシミュレーションの比較

ビームシミュレーションは MR 上流から 3 段階に分けた。まず SIMPSONS^[6]コードによる Rapid Cycle Synchrotron (RCS) ビームシミュレーション^[7]、次に STRUCT^[8]コードまたは SAD^[9]コードによる RCS-MR 間ビーム輸送ライン(3-50BT)シミュレーション、最後に SAD コードと SCTR^[10]コードによる MR ビームシミュレーションとした。この 3 段階の計算結果を繋げて、MR 速い取出し運転のシミュレーションとした。

シミュレーションの妥当性の確認は 2011 年 2 月 14 日の MR 速い取出し運転のビームロスとの比較で行った (図 1)。図 1 の測定時では初回入射タイミングのみキッカーを作動させ、2 バンチのみを加速した。120 ms の蓄積待ち受け時の RF 電圧は 80

kV とした。加速に際しては入射 120 ms 後から 150 ms かけて RF 電圧を 190 kV まで引き上げるとともに、電磁石には入射 170 ms 後から 1.9 s かけて 30 GeV に到達するまで磁場引き上げを行っている。同色の複数の線は同じ条件での測定結果である。2 バンチ $2.5E13$ protons 入射のシミュレーションと 2 バンチ $2.4E13$ protons 入射の測定結果のビームロス比率は 10% 程度の相違に留まる。測定結果の 2 バンチ陽子数は DCCT 測定値に補正関数を加えたものである^[3,4]。処理回路の改良により DCCT 測定精度は大きく向上している^[1,2]が、それでも図 2 の補正前結果のように入射から 20 ms の応答は立ち上がり遅れが見られる。そのため、DCCT 測定値の補正前減少カーブだけではビームロスを過少に見積もりことになる。応答特性を考慮した補正を加えた結果、測定陽子数の推移はシミュレーション結果とより対応が良くなる。図 2 での補正方法は、ショット毎に応答関数がばらつく現象を反映していない。そのため、現在改良が進められている^[4]。

ビームシミュレーションによるビームロスが現状運転と比べ約 1 割のずれに留まることを受け、次セクションで同様のシミュレーションに基づいた J-PARC Main Ring アップグレード計画を議論する。

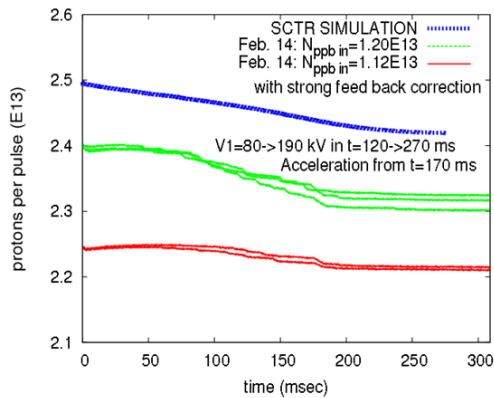


図 1 : J-PARC MR の DCCT 測定とシミュレーションの比較。横軸はキッカー第 1 入射タイミングからの時間、縦軸はパルス当りの陽子数。

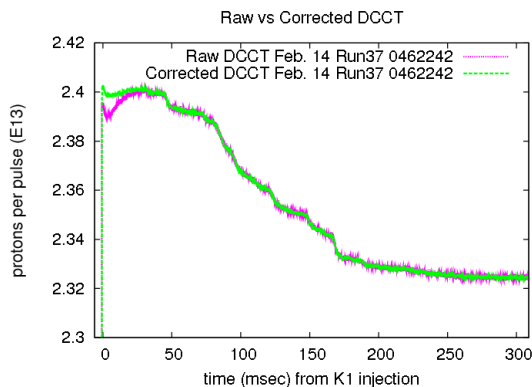


図 2 : DCCT 測定によるパルス当りの陽子数のデータ補正前後の相違。図 1 での 2 バンチ $2.4E13$

protons 入射の DCCT 測定値に対して補正関数適用前後を比較した。縦横軸は図 1 と同じ。赤線が補正前。緑線が補正後。

3. J-PARC Main Ring 増強計画

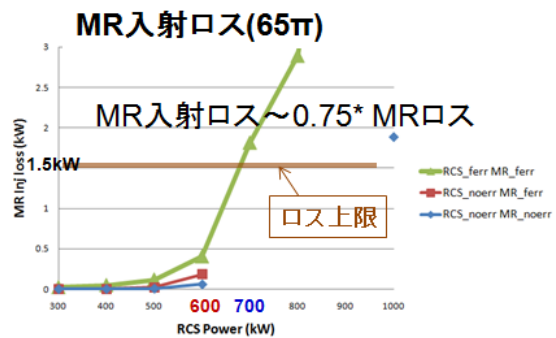
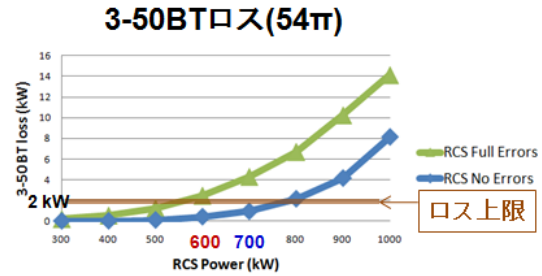


図 3 : 速い取出し運転 1.28 s 周期での予想ビームロス。横軸は RCS の出力ビームパワー。上図縦軸は 54π mmmrad のコリメータを設置した 3-50BT でのビームロス。下図縦軸は 65π mmmrad のコリメータを設置した MR での入射待ち受け時間 120 ms に生じるビームロス。緑線は RCS、MR 共に磁場および据付エラー要素を考慮した場合。青線は RCS、MR 共に磁場および据付エラーが無い理想的な場合。赤線は、RCS は磁場および据付エラーが無い理想的な場合だが MR は磁場および据付エラー要素を考慮した場合。コリメータ容量は 3-50BT、MR 共に 2 kW。MR では、加速初期の RF 電圧・位相パターン最適化後は、全体のロスのうち約 75% が入射 120 ms でロスすると推測される。

リニアックからの RCS への入射エネルギーを現行の 181 MeV から 400 MeV に引き上げる 2013 年以降の J-PARC Main Ring のビームパワー増強計画は、バンチ当り陽子数の増加と、繰り返し時間の短縮に基づく。陽子数増加は空間電荷効果によるビームロスの指数関数的増大を伴う (図 3) のに対し、繰り返し時間短縮はビームロスの線形増加に留まる。そのため、陽子数増加は RCS 600 kW 出力相当の $2.5E13$ protons per bunch 程度に留め、コリメータ容量の限界を見ながら繰り返し時間の短縮を行い、MR 出力増強を図ることになる。コリメータ容量は 3-50BT、MR 共に 2 kW である。繰り返し時間の短縮限界は主に磁石電源により決まる。現行電源で到

達可能な繰り返し時間は 2.4 s^[11]、現在開発中の新規電源で到達目標としている繰り返し時間は約 1.2 s である^[12]。

図 3 の計算は、RCS に対してはリニアックからの 400 MeV ビームを横方向ペインティングなしの中心入射した場合で、ビーム強度を出力 300 kW から 1000 kW まで変えた場合に 3-50BT、MR 入射時のビームロスに与える影響を見たものである。縦軸のロスパワー値は MR 繰り返し 1.28 s 周期に対してのものであるが、繰り返し周期 2.4 s の場合は 1.28 s/2.4 s = 0.53 倍して勘案する必要がある。

大強度における RCS への入射方法の最適化研究は近年急速に進んでいる^[13]が、それを反映した議論は現在研究中である。しかし、シナリオ作成の目的からは、より保守的な議論をしていると言える。RCS、MR は磁場および据付エラーが無い理想的な場合と全てある場合それぞれに対して検討した (表 1)。RCS の取出し RF 条件は MR 向けの物を採用している。MR 大強度化シナリオ作成に際は、3-50BT コリメータサイズを 3-50BT でのビームロスと MR でのビームロスのバランスを見ながら調整する。また繰り返し時間毎に MR の RF 電圧・位相パターンを最適化し、ビーム強度に応じたチューン設定が必要となる。

表 1 : RCS, MR のエラー条件

<i>RCS Full Errors</i>	<i>MR Full Errors</i>
磁場誤差、多極成分、磁石据付誤差、取出しライン漏れ磁場、入射バンブ磁石 Edge focus、COD 補正	磁場誤差、多極成分、磁石据付誤差、入射第 1 セプタム磁石の漏れ磁場 (但し、入射第 2 セプタム磁石の漏れ磁場は含まない)、COD 補正
<i>RCS No Error</i>	<i>MR No Error</i>
上記の内、磁場多極成分のみ適用する	上記全て含まない

4. 繰り返し時間に応じたパラメータ最適化および大強度シナリオ作成

現在開発中の新規電源で到達目標としている繰り返し時間約 1.2 s と、現行電源で到達可能な繰り返し時間 2.4 s を想定したそれぞれの加速時間 0.5 s と 1.1 s に対し、RF 電圧・位相パターンの最適化をビームシミュレーションを通して行い、それぞれの場合で成立し得る MR 大強度化シナリオを作成した。特に短い加速時間においては RF 電圧パターンだけではなく RF 2 倍高調波の位相パターンを調整することがビームロス抑制の鍵となることが分かった。この結果は動径方向の空間電荷効果を考慮すること

で確認された。またコリメータ容量に収まるように 3-50BT、MR でのビームロスのバランスを取った。以下、加速初期の RF パターン最適化プロセスと 3-50BT コリメータサイズ設定プロセスを加速時間 0.5 s の場合について紹介し、加速時間 1.1 s の場合については成立シナリオ結果のみを紹介する。各条件に応じて最適化されたビームロスを表 2 に示す。

4.1 RF 基本波加速電圧の最適化

400 MeV 中心入射でエラーなし理想的条件の RCS からの 600 kW 出力ビームに対し、3-50BT のコリメータサイズを 54pi mmmrad に固定して、MR RF 基本波加速電圧の最適化をはかる。MR は磁場および据付エラーありの条件とした。

入射待ち受け時の RF 電圧は基本波 140 kV、2 倍高調波 91 kV に固定する。初回入射タイミングから 120 ms たった第 4 入射タイミング直後から加速初期の 0.1 s スムージング時間を取るが、その間に RF 基本波電圧をトップ電圧 $V_{1rf\ top}$ まで線形に引き上げ、RF 2 倍高調波は位相 0 のまま線形に 0 まで引き下げる。スムージング時間後は線形加速する。縦方向ビーム分布に対する 1 次元シミュレーション計算では $V_{1rf\ top}$ が 380 kV ~ 500 kV まで増加するに従いビームロスは単調に減少する^[14]。しかし、 $V_{1rf\ top}$ を 400 kV から 650 kV まで変え、初回入射タイミングで MR に入ったビームの 65pi mmmrad コリメータに対する生存率を見た SAD/SCTR シミュレーションでは $V_{1rf\ top} = 440$ kV でビームロスがもっとも抑えられた (図 4)。

表 2 : RCS, 3-50BT, MR 各条件とビームロス。但し RCS は 400 MeV-中心入射、MR のコリメータは 65 pi mmmrad。 ϕ_{2s} は MR RF 2 倍高調波の位相。

<i>RCS: Error type, Power</i> <i>3-50BT: Collimator size</i> <i>MR: Error type, Period,</i> $V_{1rf\ top}, \phi_{2s}$	<i>3-50BT</i> <i>loss(kW)</i>	<i>MR</i> <i>Power, loss</i> <i>(kW)</i>
(1) RCS: Ideal, 600 kW 3-50BT: 54pi mmmrad MR: Full error, 1.28 s, 440 kV, $\phi_{2s} = 0$	0.4	731, 1.5
(2) RCS: Ideal, 600 kW 3-50BT: 54pi mmmrad MR: Full error, 1.28 s, 440 kV, $\phi_{2s} > 0$	0.4	741, 0.5
(3) RCS: Full error, 600 kW 3-50BT: 54pi mmmrad MR: Full error, 1.28 s, 440 kV, $\phi_{2s} > 0$	2.5	718, 0.7
(4) RCS: Full error, 600 kW 3-50BT: 57pi mmmrad MR: Full error,	1.7	

1.28 s, 440 kV, $\phi_{2s} > 0$	725, 0.9
(5) RCS: Full error, 700 kW 3-50BT: 60pi mmmrad MR: Full error, 2.4 s, 240 kV, $\phi_{2s} > 0$	1.3 435, 1.3

4.2 MR 2 倍高調波 RF 位相をシクロナス位相よりずらした場合

セクション 4.1 の結果は表 1 の(1)に見るように、3-50BT, MR とともにビームロスがコリメータ容量以下に抑えられているが、これは RCS がエラーの無い理想的条件に対してのものである。RCS が全てのエラーを含む場合は MR におけるビームロスがコリメータ容量を越えることが予想されたため、ビームロス抑制要素として RF 2 倍高調波の位相に着目した。J. M. Kats と W. T. Weng の理論モデル^[5]によれば、2 倍高調波 RF 位相をシクロナス位相よりずらしたパターンを考えれば加速中のバケツ形状が長手に伸びることにより、ロスを抑制する可能性がある。そこで 2 倍高調波 RF 位相 ϕ_{2s} を加速初期スムージング中に 0 から $\phi_{2s} > 0$ にずらすパターンを検討した (図 5)。 ϕ_{2s} を 0 に固定した場合に比べ、加速中のビームロスを最大 1/4 に抑えることが出来る。なお、RCS、3-50BT、MR 条件は MR 2 倍高調波 RF 位相を除きセクション 4.1 と共通とした。MR 全体のビームロスはセクション 4.1 の 1.5 kW から 0.5 kW に軽減された (表 1 の(1), (2))。

$\phi_{2s} > 0$ パターンの Kats and Weng モデルは V2/V1 比が限定的 (0.25~0.5) な場合のみを検討していたが、SAD/SCTR 計算で検討の結果、より広い V2/V1 比でもロス抑制に効果があることが確認された。

4.3 加速時間 0.5 s での成立シナリオ

RCS、MR 共に磁場および据付エラーあり条件に変更して現実的なシナリオを検討する。RCS 600 kW 出力ビーム、3-50BT コリメータサイズを 54pi mmmrad と 57pi mmmrad、MR に入射する。MR では、セクション 4.1、4.2 で求められた、加速時間 0.5 s での RF 基本波および 2 倍高調波の最適パターンを用いて、繰り返し周期 1.28 s でのビームロスを算出した (表 1 の(3)、(4))。3-50BT コリメータサイズが 54pi mmmrad の場合では、3-50BT でのビームロスが 2 kW を越えるが、57pi mmmrad の場合では、3-50BT でのビームロスが 1.7 kW、MR 65pi mmmrad コリメータでのビームロスも 0.9 kW、MR 725 kW 出力となった (表 1 の(4)、図 6)。これを新規開発電源で可能となる繰り返し周期 1.2~1.3 s での成立シナリオとする。

4.4 加速時間 1.1 s での成立シナリオ

加速時間 1.1 s に対しても、セクション 4.1~4.3 と同様のプロセスで、MR RF パターンと 3-50BR コリメータサイズを最適化を行った。RCS、MR 共に

磁場および据付エラーあり条件とし、400 MeV 中心入射の RCS から 700 kW 出力ビーム、3-50BT コリメータサイズを 60pi mmmrad まで広げた。加速初期のスムージング時間は 0.12 s から 0.22 s までの 0.1 s 間。スムージング時間中に MR RF 基本波電圧を 140 kV から 240 kV まで、2 倍高調波 RF 電圧を 91 kV から 0 まで、2 倍高調波 RF 位相を 0 から 86° まで線形変化させた (図 7)。この条件で繰り返し周期 2.4 s にすると、3-50BT ビームロス 1.3 kW、MR 65pi mmmrad コリメータのビームロス 1.3 kW、MR 435 kW 出力となった (表 1 の(5))。これを現行電源で到達可能な繰り返し周期 2.4 s での成立シナリオとする。

2 倍高調波 RF 位相を変化させない場合 (図 7 の緑線) と最適化させた場合 (図 7 青線) を比較すると、ビームロスを 140 W 軽減する効果が見られた。加速時間 1.1 s での 2 倍高調波 RF 位相最適化の効果は加速時間 0.5 s と比べて高くはないものの、それでも有意である。また、実際の運転では 2 倍高調波電圧をスムージング終端で完全に 0 にすることが難しい可能性もあるが、終端で 10 kV まで下げ留めた場合 (図 7 紫線) でもビームロスへの影響は 20 W に収まることを確認した。

5. まとめ、今後の研究方向

MR 運転との比較でシミュレーションによるビームロス時間構造の再現性確認をした。ビームロス測定に用いている DCCT の補正用測定を反映した、補正後の DCCT ビームロスはシミュレーションで良く再現された。

RCS と MR に対し、繰り返し時間に応じた大強度運転シナリオを作成した。RCS を理想条件に近づけるとともに、3-50BT と MR ロスのバランス取り必要となる。2 倍高調波の位相パターンは MR ロス軽減の調整要素になりうることが判明した。

今後の課題としては、MR で補正可能な要素 (共鳴補正、入射エラーなど) を考慮した計算、電源ゆれによる磁場エラーの影響の評価、ビーム不安定性対策などが挙げられる。J-PARC MR の大強度化 (> 750 kW) にむけた検討 (: RCS h=1、MR h=18、MR 入射エネルギー上げ、アクセプタンス拡張など) も行いたい。

参考文献

- [1] Y. Hashimoto et al., "Characteristics of a DCCT for the J-PARC Main Ring", in these proceedings.
- [2] Y. Ohmori et al., "A Calibration Method for Beam DCCT of the J-PARC Main Ring", in these proceedings.
- [3] 佐藤洋一、手島昌己、橋本義徳：メモ、「DCCT 補正用測定 (測定日：2010/08/23-25)」.
- [4] T. Toyama et al., "BEAM-BASED CORRECTION OF A DCCT RESPONSE" in these proceedings.
- [5] 小関忠 "J-PARC 加速器高度化の進捗と見通し" [- 202 -](http://www.kek.jp/intra-j/suishinkaigi/2011/documents/J-

</div>
<div data-bbox=)

PARC_koseki_20110228.pdf.
 Koseki, "J-PARC Accelerator Status",
http://nuclpart.kek.jp/pac/1107/pdf/PAC_accelerator_koseki_20110708.pdf.

- [6] S. Machida, SSCL-PREPRINT-197 (1993).
- [7] H. Hotchi et al., Proceedings of IPAC10, 624 (2010).
- [8] A. Drozhdin and N. Mokhov. The STRUCT program user's reference manual. <http://www-ap.fnal.gov/drozhdin>.
- [9] K. Oide et al., <http://acc-physics.kek.jp/SAD/>.
- [10] K. Ohmi et al., Proceedings of PAC07, 3318 (2007).
- [11] S. Nakamura, J-PARC ATAC'11 (2011).
- [12] K. Kurimoto and K. Koseki, J-PARC ATAC'11 (2011).
- [13] H. Hotchi, J-PARC ATAC'11 (2011).
- [14] K. Hara et al., "Simulation calculation of longitudinal beam distribution in J-PARC Main Ring" in these proceedings.
- [15] J. M. Kats and W. T. Weng, Proc. XVth Int. Conf. on High Energy Accelerators, Hamburg, July 20-24 1992, p.1052.

T. ム生存率を示す。

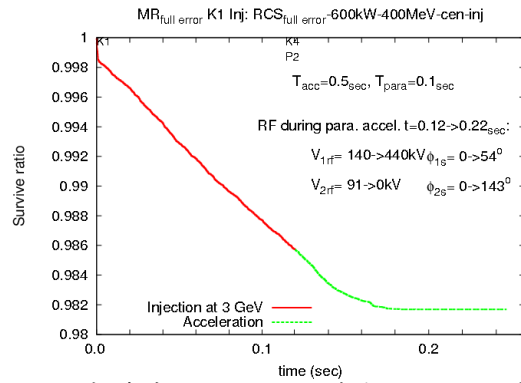


図 6 : 加速時間 0.5 s での成立シナリオ。横軸は初回入射タイミングからの時間。縦軸は MR におけるビームの生存率。RCS、MR 共に磁場および据付エラーあり条件。それ以外の RCS、MR 条件は、MR RF パターンも含め図 5 の紫線と共通。3-50BT はコリメータサイズを 54pi mmmrad から 57pi mmmrad にし、3-50BT でのロスを減らした。

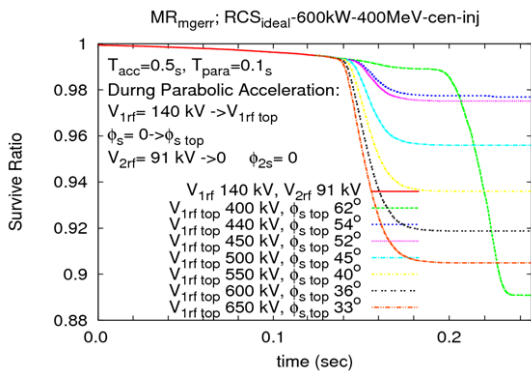


図 4 : MR RF 基本波加速電圧の最適化。横軸は初回入射タイミングからの時間。縦軸は MR におけるビームの生存率。入射ビームは 400 MeV 中心入射でエラーなし理想的条件の RCS からの 600 kW 出力ビームを、コリメータサイズ 54pi mmmrad の 3-50BT を通したものの。MR は磁場・据付エラーありの条件。加速初期のスミージング時間は 0.12 s から 0.22 s までの 0.1 s 間。スミージング時間中に RF 基本波電圧と位相を $V_{1rf\ top}$, $\phi_{s\ top}$ に線形変化させる。

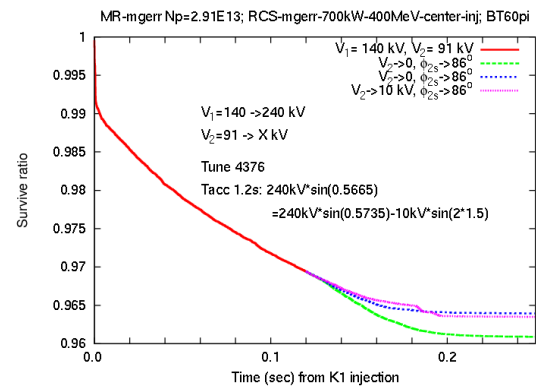


図 7 : 加速時間 1.2 s での成立シナリオ。横軸は初回入射タイミングからの時間。縦軸は MR におけるビームの生存率。RCS、MR 共に磁場および据付エラーあり条件。RCS は 400 MeV 中心入射で 700 kW 出力ビーム。3-50BT コリメータサイズ 60pi mmmrad。MR コリメータサイズ 65pi mmmrad。MR の加速初期のスミージング時間は 0.12 s から 0.22 s までの 0.1 s 間。スミージング時間中に MR RF 基本波電圧を 140 kV から 240 kV まで、2 倍高調波 RF 電圧を 91 kV から 0 (青線) もしくは 10 V (紫線) まで、2 倍高調波 RF 位相を 0 から 86° まで線形変化させる。2 倍高調波 RF 位相を 0 に固定した場合は緑線。

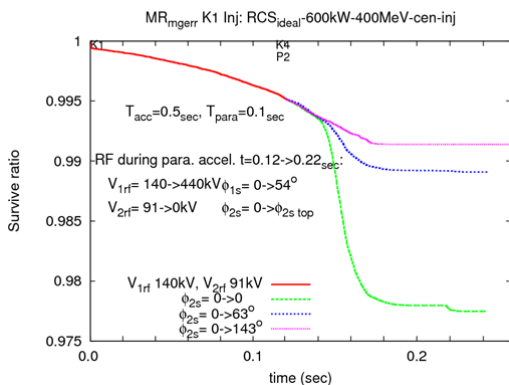


図 5 : MR 2 倍高調波 RF 位相ずらしのビームロスへの影響。横軸、縦軸、MR 入射ビーム、待ち受け時の RF 電圧、スミージング時間は図 4 と共通。スミージング時間中に MR 2 倍高調波 RF 位相を 0 から $\phi_{2s\ top}$ まで線形に変化させる。緑線は $\phi_{2s\ top} = 0$ 、青線は $\phi_{2s\ top} = 63^\circ$ 、紫線は $\phi_{2s\ top} = 143^\circ$ でのビー