

J-PARC Main Ring 大強度運転の進捗と展望

RECENT COMMISSIONING AND PROSPECT OF HIGH POWER BEAM OPERATION OF THE J-PARC MAIN RING

佐藤 洋一^{#,A)}, 五十嵐 進^{A)}, 原田 寛之^{B)}, 白形 政司^{A)}, 高野 淳平^{A)}, 山田 秀衛^{A)}, 山本 昇^{A)}, 小関 忠^{A)}, 内藤 富士雄^{A)}, 大見 和史^{A)}, 外山 毅^{A)}, 田村 文彦^{B)}, 栗本 佳典^{A)}, 下川 哲司^{A)}, 橋本 義徳^{A)}, 畠山 衆一郎^{C)}, 上窪田 紀彦^{A)}, 仁木 和昭^{A)}, 久保木浩功^{A)}, 仲村 佳悟^{D)}, 魚田 雅彦^{A)}, 石井 恒次^{A)}, 杉本 拓也^{A)}, 大森 千広^{A)}, 吉井 正人^{A)}, 堀 洋一郎^{A)}, 中村 衆^{A)}, 森田 裕一^{A)}, 手島 昌己^{A)}, 岡田 雅之^{A)}, 佐藤 健一^{A)}, 岡村 勝也^{A)}, 三浦 一喜^{A)}, 木村 琢郎^{A)}, 芝田 達伸^{A)}, 佐藤 健一郎^{A)}

Yoichi Sato^{#,A)}, Susumu Igarashi^{A)}, Hiroyuki Harada^{B)}, Masashi Shirakata^{A)}, Junpei Takano^{A)}, Shuei Yamada^{A)}, Noboru Yamamoto^{A)}, Tadashi Koseki^{A)}, Fujio Naito^{A)}, Kazuhito Ohmi^{A)}, Takeshi Toyama^{A)}, Fumihiko Tamura^{B)}, Yoshinori Kurimoto^{A)}, Tetsushi Shimokawa^{A)}, Yoshinori Hashimoto^{A)}, Shuichiro Hatakeyama^{C)}, Norihiko Kamikubota^{A)}, Kazuaki Niki^{A)}, Hironori Kuboki^{A)}, Keigo Nakamura^{D)}, Masahiko Uota^{A)}, Koji Ishii^{A)}, Takuya Sugimoto^{A)}, Chihiro Ohmori^{A)}, Masahito Yoshii^{A)}, Youichiro Hori^{A)}, Shu Nakamura^{A)}, Yuichi Morita^{A)}, Masaki Tejima^{A)}, Masayuki Okada^{A)}, Kenichi Sato^{A)}, Katsuya Okamura^{A)}, Kazuki Miura^{A)}, Takuro Kimura^{A)}, Tatsunobu Shibata^{A)}, Kenichirou Satou^{A)}

^{A)} KEK/J-PARC, ^{B)} JAEA/J-PARC, ^{C)} Mitsubishi Electric System & Service Co.,Ltd, ^{D)} Kyoto University

Abstract

In the fast extraction (FX) operation of J-PARC Main Ring (MR), the delivered beam power has been increased from 240 kW to 360 kW since October, 2014. The keys of the beam commissioning were to distinguish the beam loss sources and to take steps to meet the sources. Both of the hardware and software improvements for these keys are discussed.

1. はじめに

J-PARC Main Ring (MR) 速い取り出し(FX)運転では、Rapid Cycling Synchrotron (RCS)からの3 GeV陽子ビームを2バンチずつ40 ms 間隔で4回入射し、3 GeVでの待ち受け状態から1.4 sで30 GeVまで加速し、FXシステムを通して計8バンチを2.48 sサイクルでニュートリノ実験へと供給している(Figure 1)。MR FX調整では、大強度ビームに対し、待ち受け時の低ビームロス状況を確認し、受けたビームを安定加速し取り出すことを基本方針としている。ここ1年はハードウェア、ソフトウェアともに改良や増強を重ね、ビーム調整指針の改善を行った。その結果、ビームロス起源であるビーム不安定性と共鳴への対策調整が以前よりも効率的かつ効果的に行うことが可能となり、2014年10月から2015年6月にかけて、FX利用運転時に同じビームロス量でのビーム出力を240 kWから360 kWに増強した(Figure 2)。また新

たなリングオプティクスにおける試験運転では、2バンチながら132 kWのビーム(8バンチ520 kW相当)を許容範囲内のビームロスで30 GeVまで加速させることに成功した。本発表では、これらの改良点と今後の課題、展望を報告する。

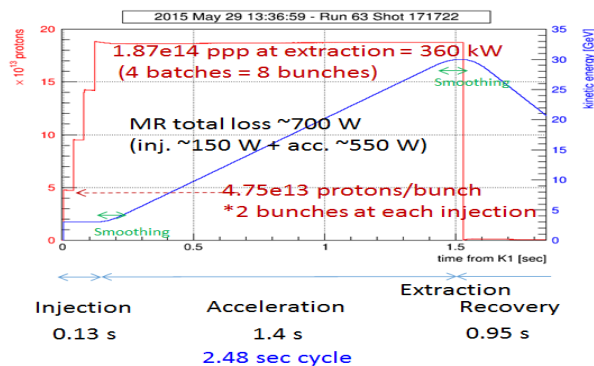


Figure 1: Typical operation status of MR 360 kW.

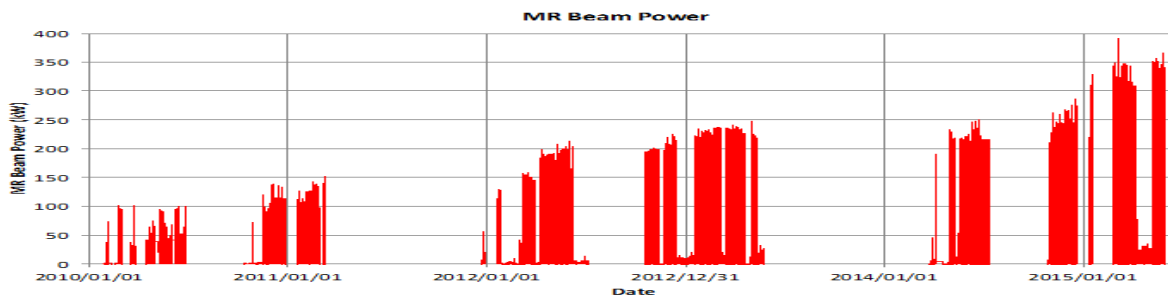


Figure 2: MR beam power trend for FX user operation.

[#] yoichi.sato@j-parc.jp

2. ビーム調整指針の改善

MR のビームロス起源は、次の 5 点が主となる。

1. 上流加速器からの入射ビームの質と入射
2. RF によるビーム捕獲と加速
3. 横方向ビーム不安定性の励起
4. ベータトロン共鳴線への抵触
5. リングオプティクス制御

ビーム運転ではこの 5 点が混在した形でロスが形成されるが、調整ではビームロス起源の相関を念頭にし、問題の切り分けによる対策に主眼を置いた。

第 1 ロス起源に対しては、上流条件に対し RCS と MR 間のビーム輸送ライン(3-50BT)に設置された OTR ハローモニタ^[1]を用いてハローサイズが極小となる上流条件(リニアック、RCS)をMR利用運転用に決定した。3-50BT 調整は上流条件への対応力の鍵となっており、3-50BT コリメータによるビームハローカット^[2]、MR への入射マッチング^[3]の効率的でかつ高精度な調整に向けて改善を進めている。

第 2 ロス起源に対しては、アーク部ビームロスを抑制しながら RF パターンを調整した。また RF 2 倍高調波も導入してチューン広がりを抑え、第 4 ロス起源の半整数共鳴線を避ける運転を行っている。大強度化の鍵となる RF のビームローディング補償^[4]の性能向上を今秋以降のビーム調整で行う。

第 3 ロス起源に対しては、ビーム不安定性に伴うベータトロン振動の振幅増大を抑制すべく、横方向フィードバックシステムの導入^[5]と六極電磁石によるクロマチシティ補正量の最適化調整を行っている^[6]。なお、運動量広がりにはクロマチシティ補正量の最適化時に大きく寄与するため、第 2 ロス起源対策と連動させた逐次調整に留意した。

第 4 ロス起源に対しては、次章で詳述するが、

- 共鳴線励起因子の抑制
- 共鳴線の補正
- 共鳴線の回避

を目的として、ソフトウェアとハードウェアの整備を進めた。調整に当たっては、予め第 1, 2, 3 ロスの起源を抑制することで、ビームロス量を調整の目安とした第 4 ロス起源対策を可能とした。現在 MR において取り組んでいるのは、Figure 3 に示す 2 つのチューン領域における共鳴線対策である。

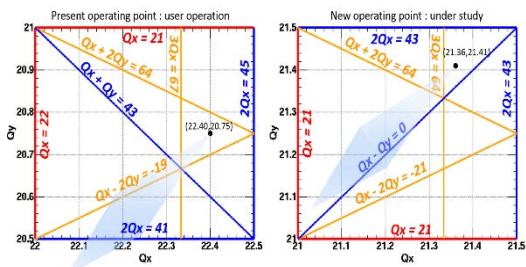


Figure 3: Tune diagrams for MR. Left one is for present user operation. Right one is under study. 1st, 2nd and 3rd order resonances are shown in red, blue and orange lines. The diamonds correspond to the tune spreads of MR 360 kW equivalent beams.

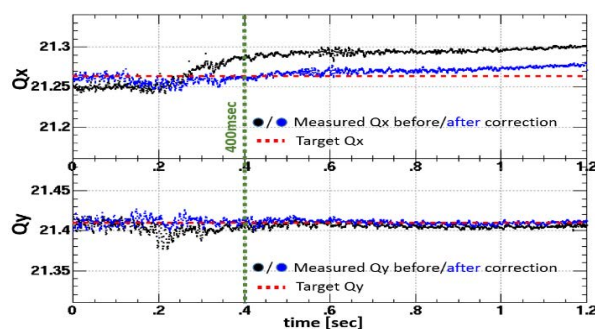


Figure 4: Tune excursion during acceleration before and after the optics correction at $(Q_x, Q_y)=(21.26, 21.41)$. Upper and lower are for Q_x and Q_y . Black dots are the measured tune before the correction. Blue dots are the measure tune after the correction. Red dash lines are the set tunes.

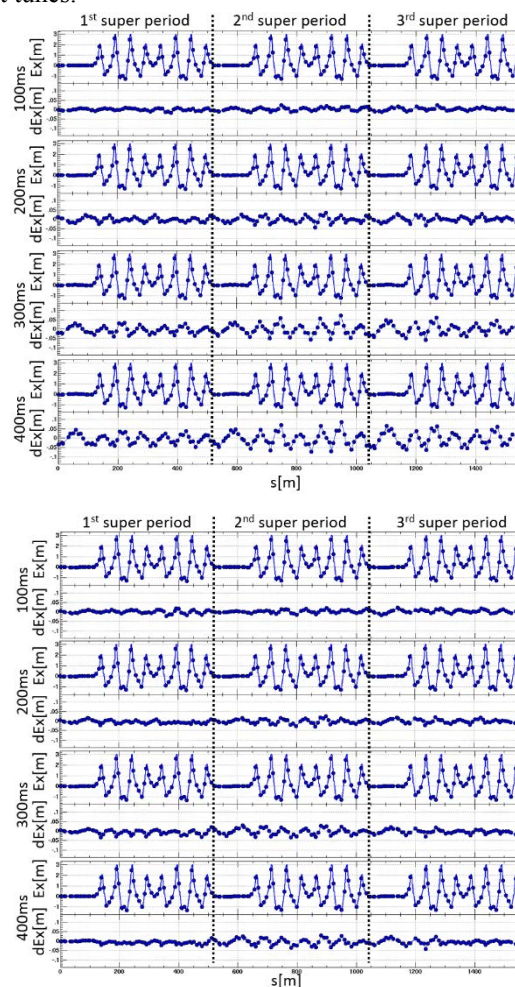


Figure 5: Measured dispersions (dots) and deviations (dots) from the ideal values (lines) of MR at 100, 200, 300, 400 ms from the injection timing at $(Q_x, Q_y)=(21.26, 21.41)$. The top and bottom are before and after the optics correction. Dispersion leakage during the acceleration (> 130 ms) in the insertion area was well dumped after the correction.

第5ロス起源に対しては、まずビーム中心運動量のずれ $\Delta p/p$ の算出手法から見直した。 $\Delta p/p$ は、全ビーム位置検出器(BPM)での閉軌道とのずれ(COD)から $\Delta p/p$ に起因したCODのみを導出し、そこでの分散関数で割ることで算出していた。しかしながらCODが大きい場合には、見掛け上 $\Delta p/p$ がずれることが判明した。そこでベースのCODがキャンセルする位相関係にあるBPMを選ぶことで、CODの大きさに依存しない $\Delta p/p$ の導出ならびにRFの周波数調整が可能となった。この調整結果によって、より高精度な偏向電磁石と四極電磁石のマッチング調整やステアリング電磁石によるCOD補正を可能とし、加速中のビームロス低減に大きく寄与した。また、MRではビーム待ち受け時にベータトロンチューン、 β 関数、分散関数を全周にわたって測定し、加速器モデル上で再現できる四極電磁石の収束力を求め、設定とのずれをファジファクターとして導出し、オプティクス補正や制御を行ってきた。新たに加速中の β 関数測定手法^[7]を確立したことにより、加速中でのチューン制御のみならず β 関数や分散関数などのオプティクスの制御が可能となった。ビーム試験における400msまでの各測定値を用いて補正を行った結果として、加速中のチューンと分散関数をFigures 4とFigure 5に示す。加速中のビームロス軽減に大きく貢献しており、今後の調整精度の向上に大きく寄与する成果である。

以上のビーム調整経験の蓄積には、主電磁石励磁量の再現性と操作性の大幅な向上が必須であり、この向上が効率的なビーム調整を可能にした。また、上記の各ロス起源への対策に加え、メンテナンス性の観点から残留線量測定と連動した形で、コリメータ部へのビームロス局在化やロス総量の抑制に向けてコリメータ調整を行っている。ビームロスモニタを用いた放射化法によるメンテナンス時の残留線量予測も継続的に進めている^[8]。

3. ベータトロン共鳴に起因するビームロス対策

2014年春までにMR全周のビームBPMに対し、ビームを用いた位置較正(BBA)がほぼ完了した^[9]。ビームロス起源を議論できる土台ができたため、共鳴に励起する起源の同定や対策を改めて行った。

3.1 共鳴線励起因子の抑制

リングオプティクスの対称性の崩れは、様々な非構造共鳴も励起する。FXセプタムはMR速い取り出し部にあるが、周回ビーム軸上への漏れ磁場として四極磁場が存在することがオプティクス測定より判明した。この四極磁場により3回対称性が大きく崩れていた。そこで、FXセプタムに近接する3台の四極電磁石に付属するトリムコイルを追加の3台の電源で励磁し対称性の崩れを補正した。補正適用前後の β 関数測定結果 B_x , B_y とモデル計算からのずれ dB_x , dB_y の相違をMR全周に対し三つ折りの形でFigures 6に示す。特に垂直方向に大きく歪んでいた β 関数が十分補正できたことがわかる。この補正は

2015年春から影響の大きい3GeV待ち受け時のみで運用中であるが、今後加速時への拡張を進める。また、運転モードの違いによって励磁する機器が異なるため、その他の機器の影響も継続して調査と対策を続ける。

また、次節3.2で述べる非構造共鳴である3次共鳴線が大きく励起されており、ビームロスへと繋がっている。この共鳴線は、異なる運転モード(SX)で使用する3次共鳴励起用六極電磁石の残留磁場によって大きく励起していると考えており、今後運転モード切り替え(SX→FX)時に消磁プロセスを設け、励起因子を抑制する予定である。

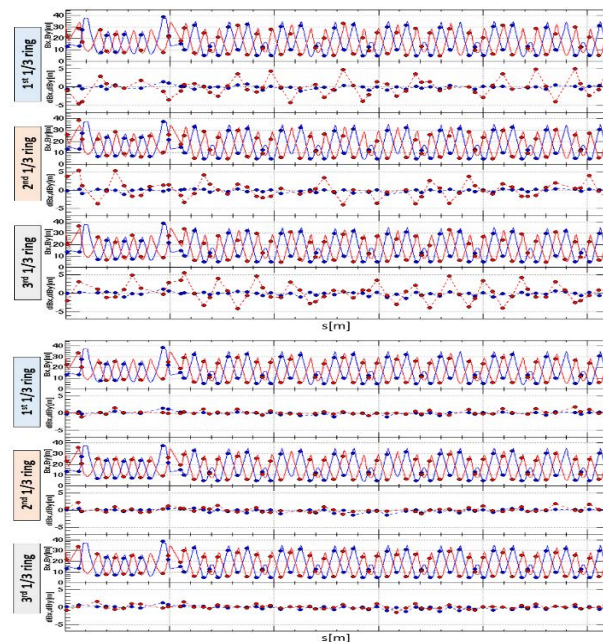


Figure 6: Measured beta functions and displacement from the ideal values (lines) without (top) and with (bottom) Trim-QCoil excitation at $(Q_x, Q_y)=(22.19, 20.54)$ and 3 GeV. B_x and B_y mean blue and red.

3.2 共鳴線の補正

現在FX利用運転では、Figure 3左図に見える、 $(Q_x, Q_y)=(22.40, 20.75)$ を動作点として採用してきた。大強度出力時に想定されるチューン広がり、様々な非構造共鳴に抵触しエミッタンス増大へと繋がりが、ビームロスを生じる。現在、2次共鳴線 $Q_x+Q_y=43$ 、3次共鳴線 $3Q_x=67$, $Q_x+2Q_y=64$ が、四極電磁石の回転誤差や異なる運転モード(SX)で使用する共鳴励起用六極電磁石の残留磁場によって大きく励起していると考えている。補正手順としては、チューンの動作点を共鳴線に近づけ、低電流ビームを入射しビーム生存率が高まるように、2次共鳴補正用の2台のねじれ四極電磁石^[10]や3次共鳴補正用の4台の六極電磁石トリムコイルの励磁量^[11]を各々求めた。各共鳴線補正に成功し、ビームロス低減・出力増強に大きく貢献した。その結果より補正手法は確立したと言える。また、Figure 3右図エリアにおいても3次共鳴線 $3Q_x=64$, $Q_x+2Q_y=64$ の補正に成功した^[11]。

3.3 共鳴線の回避

現在 MR において調整に取り組んでいるのは、Figure 3 に示す 2 箇所のチューン領域である。

動作点 1 (Figure 3 左図中)は、 $(Q_x, Q_y)=(22.40, 20.75)$ 近傍であり、2010 年の FX 利用運転開始以来使用してきた。この動作点では、ビームのチューン広がり半整数共鳴線 $Q_y=20.5$ に抵触し大強度化への壁となることがシミュレーションより予想されてきた。3.2 節で述べた共鳴補正対策を行った上で $Q_y=20.5$ 線の影響を大強度出力試験で調査したが、予想通りにビームロスが出力に依存して増加した。チューン広がりを抑えることが必須であるが、ビーム不安定性抑制に向けてクロマティック補正によるチューン広がり増加させる必要があり、バランスを取りながら調整を行った。RF 2 倍高調波の導入によりバンチ長を伸ばすことで空間電荷効果由来のチューン広がりの抑制、あるいは $Q_y=20.5$ 線への抵触を抑制でき、ビームロス低減・ビーム出力増強へと繋がった。さらなるバンチ長の引き伸ばしは、入射キッカー立ち上がり・反射波と周回・入射ビームとの時間構造の相関から上限が決まるため、補正キッカー導入を中心とした入射システムの改善が進んでいる^[12]。

一方、動作点 2 (Figure 3 右図)の領域は、3 次共鳴補正が十分であれば動作点 1 よりも、共鳴線を回避しながら大きいチューン広がりを許容できることが、シミュレーションより予測された。次章に紹介するように、この領域でのビーム大強度化はかなり有望であると考えている。

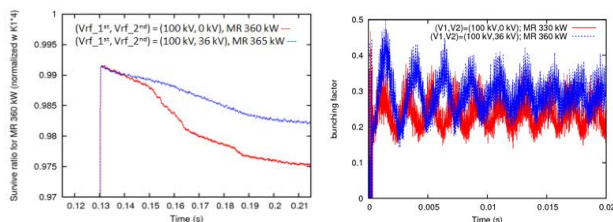


Figure 7: Effect of 2nd harmonic RF at $(Q_x, Q_y)=(22.40, 20.75)$. The left figure shows the survival ratio, and the right figure shows the bunching factor. Blue lines are for $V_{RF_2nd}=36$ kV, and red lines are for $V_{RF_2nd}=0$.

4. 大強度調整結果

4.1 動作点 1 $(Q_x, Q_y)=(22.40, 20.75)$

動作点 1 $(Q_x, Q_y)=(22.40, 20.75)$ では、第 2 章、第 3 章の対策を行った結果、ビームロスを許容値内に抑えた上で、RF 基本波のみ使用の場合で 330 kW、RF 2 倍高調波導入後で 360 kW の利用運転を行っている。これは RF 2 倍高調波導入後のバンチングファクター平均値の増加 (0.25 から 0.30) による共鳴ライン $Q_y=20.5$ の影響回避と対応する (Figure 7)。さらなるバンチ形状の平坦化や共鳴補正の高精度化などを行うことで、出力 380 kW を超える利用運転も視野に入りつつある。

4.2 新たな動作点 2 の開発とチューンサーベイ

より広いチューン領域を求め動作点 2 (Figure 3 右図)の開発を進めている。動作点 1 での調整と同様に、第 3 章で議論した対策を行った上で、大強度ビームによるチューンサーベイを行った。オプティクス変更時にコリメータアパーチャを 60π mm mrad に設定し、チューンごとのビーム生存率を調査した。Figure 8 は $Q_y=21.41$ を固定し Q_x のみを変化させた時の 3 GeV 待ち受け周回時のビーム生存率である。条件は 2 つ用意し、

1. 利用運転の 1.2 倍相当の強度 ($5.2e13$ protons per 2 bunches)、 $3Q_x=64$ の補正適用あり
2. 利用運転の 1.6 倍相当の強度 ($7.0e13$ protons per 2 bunches)、 $3Q_x=64$ の補正適用なし

とした。条件 1、2 でのチューンに対する生存率をそれぞれ青点、赤点で示す。図中①で示すように $Q_x > 21.33$ で条件 2 の生存率が高いのは $3Q_x=64$ 補正効果のため、図中②で示すように $Q_x < 21.2$ で条件 2 の生存率が低いのは、ビーム強度が強くチューンが広がったことで整数共鳴 $Q_x=21$ の影響が強くなったためと考えられる。さらに、 $Q_x=Q_y$ に近づけることで水平と垂直方向のエミッタンスの混在が促され、ロス抑制が可能であると予想された。Figure 9 で示すように、条件 2 の元で $(Q_x, Q_y)=(21.24, 21.41)$ に対して COD 補正を行った後、 Q_y のみスキップした結果、生存率 99.5% の動作点 $(Q_x, Q_y)=(21.24, 21.31)$ を得た。また、 $(Q_x, Q_y)=(21.24, 21.41)$ と $(21.24, 21.31)$ で垂直方向のビームプロファイル測定した^[13]。入射後 10 ms と 110 ms で測定したビームプロファイルを Figure 10, 11 に示す。入射ビーム強度が少し異なるが、 $(21.24, 21.41)$ でのプロファイルはガウス分布に相似しているが、 $(21.24, 21.31)$ ではガウス分布から離れ釣鐘型のプロファイルとなっており、横方向でのエミッタンスの混在の予想を示唆する結果が得られた。

4.3 新たな動作点 2 と大強度ビーム加速

動作点 2 領域で極大の生存率であった $(Q_x, Q_y)=(21.24, 21.31)$ で加速試験を行い、バンチあたり陽子数 $3.5e13$ ppb の 2 バンチビームの 30 GeV 加速に成功した。ビーム電流モニタ (DCCT) の出力を Figure 12 に示す。2 バンチでの出力は 132 kW で、8 バンチ入射の場合には 520 kW 相当を超えるビーム強度となる。加速序盤のビームロス (図中、赤丸) はビーム不安定性によって誘起された振動によるもので、その後の調整で加速中の横方向フィードバック適用が成功しており、十分抑制可能である。第 2 章、第 3 章で述べたすべての調整手順や共鳴補正などを新たな動作点においても適用することによって、利用運転出力を大きく上回るビーム出力を達成したと言える。しかし、この領域は設計段階で想定しておらず、四極電磁石電源の電流・電圧容量、全周の物理アパーチャ、コリメータ設定領域、取り出し軌道に大きな制限がある。今後利用運転に使用するための課題の同定や対策が必要である。加えて、ビームシミュレーションを用いて実験結果の再現を行い、大強度ビームの振る舞いの理解を目指す。

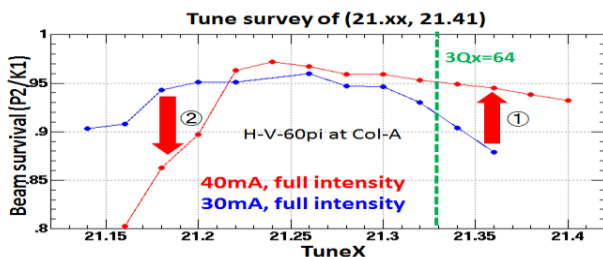


Figure 8: Tune survey of $(Q_x, Q_y)=(21.** , 21.41)$.

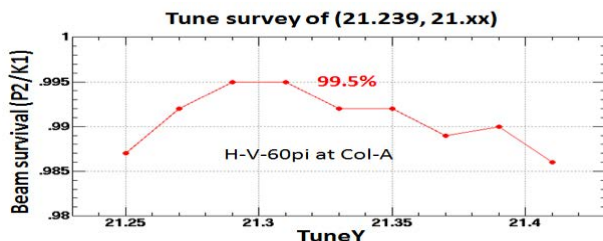


Figure 9: Tune survey of $(Q_x, Q_y)=(21.239, 21.**)$.

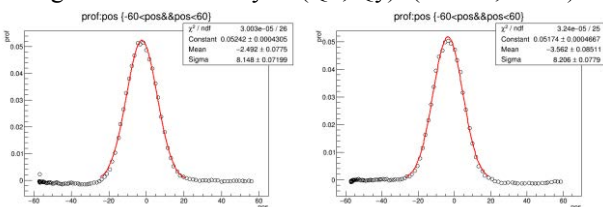


Figure 10: Measured vertical beam profiles at $(Q_x, Q_y)=(21.24, 21.41)$ and 2.96×10^{13} ppb. The left and right are at 10 and 110 ms after MR injection. Red lines are fitted by Gaussian function.

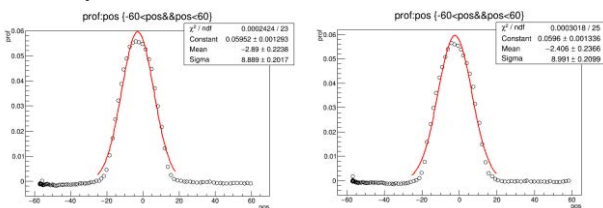


Figure 11: Measured vertical beam profiles at $(Q_x, Q_y)=(21.24, 21.31)$ and 3.50×10^{13} ppb. The left and right are at 10 and 110 ms after MR injection. Red lines are fitted by Gaussian function.

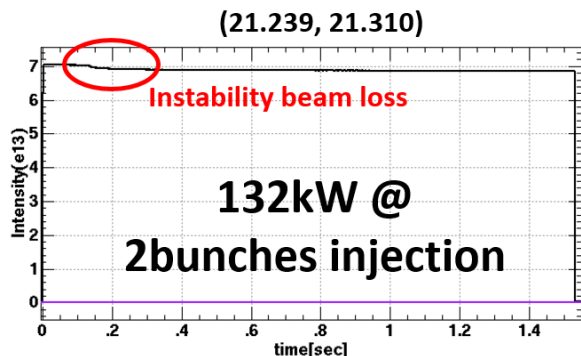


Figure 12: The time structure of beam current monitor's output for MR 132 kW, 2 bunches, from 3 to 30 GeV.

5. 今後の課題と展望

今夏のハードウェアの増強とソフトウェアの開発を受けて、今秋以降のMR FX調整では

- RF システム増強とビーム強度増強に対応した大強度ビームローディング補償
- SX 運転取り出し時、3次共鳴励起用六極電磁石の残留磁場の消磁と3次共鳴線補正の最適化
- MR コリメータ改良に伴う、ビームロスのコリメータ部局所化と改良方針の評価
- 補正キッカーの改良による入射キッカー反射波の影響抑制、入射キッカー立ち上がり時間とパンチ長の最適化
- 加速中オブティクス補正の高度化
- 加速中横方向フィードバックの高度化
- 新開発の動作点の利用運転への適応条件の検討

を中心に、利用運転の大強度化と今後の大強度化シナリオの構築を進める。特に新規開発の動作点を利用運転に適用するためには、アパーチャの狭い領域生じたビームロスのコリメータ部での回収、取り出し軌道の調整、ニュートリノ標的へのビームラインの調整といった方針確立が不可欠であり、十分な調整時間が必要と考えている。また、FX 運転大強度化での知見は、SX 運転大強度化にも直結するものであり、今後の統合的な調整を検討している。

また、空間電荷力を加味した3次元のビームシミュレーションを用いて実験結果の再現を行い、大強度ビームに各粒子の振る舞いを理解しながらビームロス起源の同定を行うことがさらなる低ビームロス化や大強度出力化には必須となる。

6. まとめ

MR FX 調整では、ハードウェア、ソフトウェアともに改良を重ねた結果、1年間で利用運転ビーム強度が1.5倍になった。また、更なるビーム強度増強を見据えた動作点の新規開発も順調に進んでいる。この1年間で得た大きな研究成果は、J-PARC全加速器とニュートリノグループの全面的な協力の下、MR 全メンバーの積極的な研究活動や研究結果により得られたものである。今後も密接な協力関係の下、MR メンバーが一丸となって更なる大強度化の達成を目指す。

参考文献

- [1] Y. Hashimoto, et al., Proc. of HB2014, 187-191.
- [2] H. Harada et al., Proc. PASJ10, Nagoya, Japan, 2013, p39.
- [3] S. Hatakeyama et al., in this proceedings, WEP096.
- [4] F. Tamura et al., PRST-AB 16, 051002 (2013).
- [5] T. Toyama et al., in this proceedings, WEP091.
- [6] Y. Sato et al., Proc. PASJ11, Aomori, Japan, 2014, p245.
- [7] K. Nakamura et al., in this proceedings, THP016.
- [8] K. Satou et al., Proc. PASJ10, Nagoya, Japan, 2013, p688; T. Toyama et al., in this proceedings, WEP089.
- [9] T. Toyama et al., Proc. PASJ11, Aomori, Japan, 2014, p739.
- [10] J. Takano, et al., Proc. PASJ9, Osaka, Japan, p391.
- [11] S. Igarashi et al., in this proceedings, WEP015.
- [12] T. Sugimoto et al., in this proceedings, THOM01.
- [13] S. Igarashi et al., Proc. IPAC2011, San Sebastian, Spain, 2011, p1239.