

# J-PARC MR 速い取り出しにおけるビームロス低減ビーム光学系 BEAM OPTICS FOR BEAM LOSS REDUCTION AT FAST EXTRACTION IN J-PARC MR

安居孝晃 <sup>\*,A)</sup>, 岩田宗磨 <sup>A)</sup>, 石井恒次 <sup>A)</sup>, 芝田達伸 <sup>A)</sup>, 佐藤洋一 <sup>A)</sup>  
Takaaki Yasui <sup>\*,A)</sup>, Soma Iwata <sup>A)</sup>, Koji Ishii <sup>A)</sup>, Tatsunobu Shibata <sup>A)</sup>, Yoichi Sato <sup>A)</sup>  
<sup>A)</sup> KEK

## Abstract

In the fast extraction (FX) operation of the main ring synchrotron (MR) of Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC), the residual radiation dose at the extraction septum magnet SM30 is very high, which can limit the beam power upgrade. This is due to the vertical beam halo scattering at the quadrupole magnet QDT155, which is located directly upstream of SM30. As a countermeasure, a beam optics with small vertical betatron function  $\beta_y$  at QDT155 has been developed to reduce the beam loss. By optimizing the tune to the extent that it does not cross resonances,  $\beta_y$  at QDT155 was made smaller, further reducing beam loss.

## 1. はじめに

大強度陽子加速器施設 (J-PARC) の主リング (MR) では、ニュートリノ実験とハドロン実験のために大強度陽子ビームを供給している [1-3]。両実験ともに陽子ビームは 3 GeV の運動エネルギーで入射され、30 GeV で取り出される。ニュートリノ実験ではビームは 1 周 (5  $\mu$ s) で取り出されるため速い取り出し (FX) と呼ばれ、ハドロン実験では 2 s かけてビームを取り出すため遅い取り出し (SX) と呼ばれている。現在 MR におけるそれぞれの運転モードの周期は 1.36 s と 4.24 s であり、ビームパワーは 830 kW と 92 kW を記録した。MR ではニュートリノ運転におけるビームパワーを 1.3 MW に上げる目標を掲げている [2,3]。

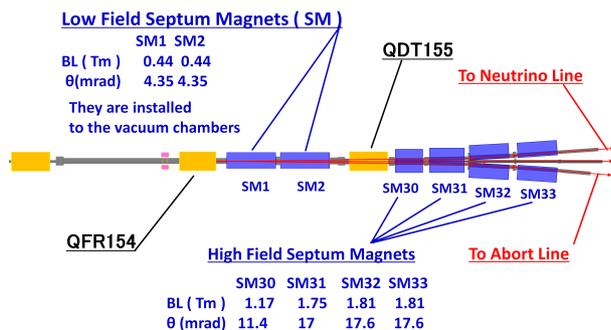


Figure 1: Layout of magnets in the FX area [3]. Blue and yellow rectangles show FX septum and main quadrupole magnets, respectively.

ビーム強度増強における制約の 1 つに、ビームロスによる機器の放射化がある。MR ではコリメータを用いることでビームロスを局所化し、非コリメータエリアにおける残留線量を手作業でのメンテナンスが可能なレベルに抑えている。FX 運転において、非コリメータエリアの中で最も残留線量が高くなる場所はビーム取り出し用パルス磁石が置かれているエリアである。特

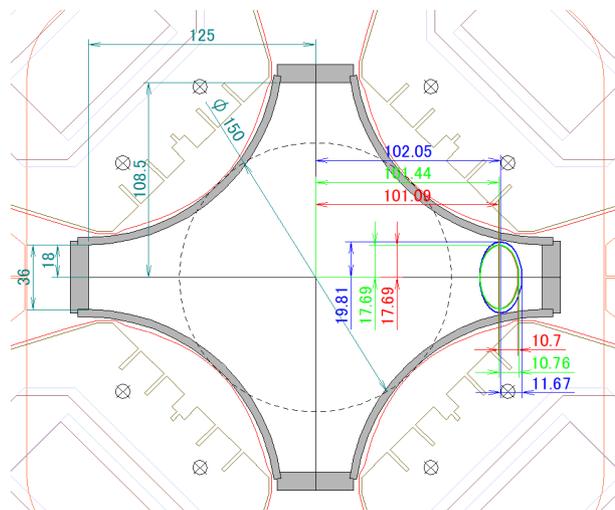


Figure 2: Cross section at QDT155 exit edge viewed from downstream. The blue ellipse shows beam envelope with the previous optics while the red and green ellipses show beam envelopes with the new extraction optics [4]. The units are [mm].

に高磁場セプタム電磁石 SM30 における残留線量が非常に高い。

Figure 1 は取り出しエリアにおける電磁石のレイアウトを示している。SM30 は四極電磁石 QDT155 の直下流に位置している。SM30 における残留線量はこの QDT155 で散乱したビームハローに依るものではないかと考えられている [2,3]。

MR に設置されているビームダクトの大部分は断面が円形だが、四極電磁石 QFR154 と QDT155 のビームダクトはビームを取り出すために Fig. 2 に示すように特殊な形をしている (我々はこれを UFO ダクトと呼んでいる)。QDT155 のアパーチャは周回ビームについては十分にあるが、取り出しビーム (青楕円) については水平方向オフセットがあるため鉛直方向に狭い。取り出しビームの鉛直方向のハローが QDT155 のダクトで散乱し、SM30 での残留線量の原因となると考えられている。またさらに下流のニュートリノ (NU) ビームラ

\* takaaki.yasui@kek.jp

インにおいてもビームロスが観測されており、同じく QDT155 でのビームハロー散乱と考えられている。

そこで取り出し時のビームロスを減らすため、取り出しの際のビーム光学系を変え、QDT155 における鉛直ベータatron関数  $\beta_y$  を小さくした [4]。この先行研究においては、まずは「QDT155 での  $\beta_y$  を小さくすれば取り出しビームロスを低減させることができる」という仮説の検証に重点を置き、元々の設定と同じチューンで行った。この制約の下では QDT155 での  $\beta_y$  は元の光学系より 20.3% 減らすことができ、 $15\pi$  mm mrad の鉛直ビームエンベロープは 19.8 mm (Fig. 2 の青楕円) から 17.7 mm (Fig. 2 の赤楕円) へと縮小した。そしてビームロスモニター・残留線量の両測定結果ともビームロス低減を示し、仮説が正しいことが確認できた。さらに NU ビームラインにおけるビームロスも減少しており、QDT155 でのビームハロー散乱が原因であると示された。

本プロシーディングスでは、先行研究で設けていたチューン等の制約を緩め、より小さい QDT155 での  $\beta_y$  を実現しビームロスを検証した結果を記述する。

## 2. ビーム光学系

MR ではビームロスの多くは、入射直後から 230 ms 程度経つまでのビーム運動エネルギーが低い (3-5 GeV) 期間に観測されている。これは空間電荷効果が非常に強く、チューン拡がりが大きく、様々な共鳴の影響を受けるからだと考えられている。一方今回議論する取り出し時には、空間電荷効果は十分に弱くなっている。このことから、入射期間と取り出し時の最適なビーム光学系は異なることが分かる。先行実験においては入射期間のビーム光学系は変えずに取り出し時のビーム光学系を変更した。ビーム入射から 390 ms のタイミング (13.3 GeV) から四極電磁石の K 値を線形に変え始め、ちょうど取り出しのタイミングで K 値が取り出し用ビーム光学系になるような電磁石パターンを作成した。本研究においても同じ手法を踏襲した。

### 2.1 取り出しビーム光学系に対する制約

先行研究においては以下の制約・方針の下で取り出しビーム光学系を考案した。

1. QDT155 における垂直ベータatron関数  $\beta_y$  を小さくする。
2. QDT155 における取り出し軌道をより内側にする。
3. 元のビーム光学系からの四極電磁石の K 値の変化を  $\pm 5\%$  に抑える。
4. 直線部に dispersion 漏れが起きないようにする。
5. 光学系変更前と同じチューンを採用する。
6. リング全周のベータatron関数  $\beta_x, \beta_y$  の最大値が大きくなりすぎないようにする
7. Off-momentum 粒子についても上記の条件から大きく外れることがないように注意する。

1. は今回の基本方針であり、2. もビームロス低減効果が期待できる。3. は、K 値が現在の値から大きく変わる場合新たに通電試験が必要となってしまうために設けた。4. について、MR では曲線部の水平位相進みを  $6 \times 2\pi$  と

achromat にすることで直線部に dispersion が現れないようにしている。直線部の四極電磁石の強さのみ変更して取り出し光学系を考えることでこの条件を満たした。5. については前述の通り、QDT155 の  $\beta_y$  を小さくする効果の検証に重きを置くために設定した条件であった。6. は、運動エネルギーが低くエミッタンスが大きい入射期間においては重要なビーム光学系への制約であり、変更前の光学系の最大値は  $(\beta_x, \beta_y) = (40.66 \text{ m}, 36.26 \text{ m})$  である。7. もビームロス 1% が問題となる MR においては重要な条件である。

本研究においては上記の制約をいくつか撤廃することでより QDT155 における  $\beta_y$  を小さくし、取り出し時のビームロス低減を目指した。具体的には 1.-4. のみ残した。6. はエミッタンスの小さい取り出し時には影響が少ないと期待される。詳細は後述するが、制約を外して考案した光学系の最大値は  $(\beta_x, \beta_y) \sim (45 \text{ m}, 60 \text{ m})$  程度になった。7. についても、6. を外したため、4. を保っている範囲ではビームロスに悪影響はないのであまり考慮する必要はない。

### 2.2 取り出しビーム光学系のチューン、ベータ

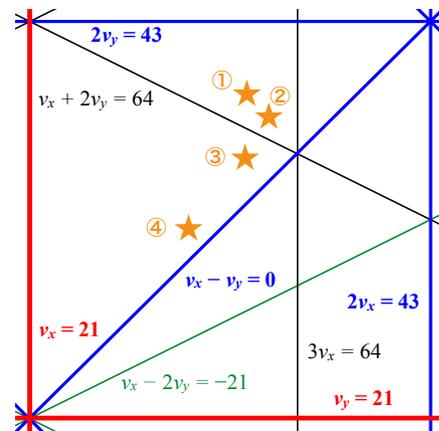


Figure 3: Major resonance lines in FX operation and working point of each optics (yellow stars).

Figure 3 は FX 運転における主な共鳴線を示している。この領域で最も強い共鳴は  $\nu_x = 21, \nu_y = 21$  である。これらは単に整数共鳴であるだけでなく、J-PARC MR は 3 回対称のシンクロトロンであるため空間電荷効果が励起する構造共鳴でもあるからである。取り出し時における動作点は  $(\nu_x, \nu_y) = (21.270, 21.409)$  であり、図中では黄色の星①に対応している。この動作点の周りには半整数共鳴  $2\nu_y = 43$  と 3 次非構造共鳴  $3\nu_x = 64, \nu_x + 2\nu_y = 64$  がある。  $3\nu_x = 64$  と  $\nu_x + 2\nu_y = 64$  は非構造共鳴ではあるが、入射期間において非常に多くのビームロスを引き起こすことが測定で分かっている。そこで六極電磁石に巻かれたトリムコイル 4 台に対して独立電源で通電することで、入射期間においてはこれらの共鳴の同時補正を実現している [2,3]。加速開始後についてはこれらの共鳴の補正パラメータの最適化はできていないが、空間電荷効果が弱くなりチューン拡がり狭まるので、共鳴を避ける

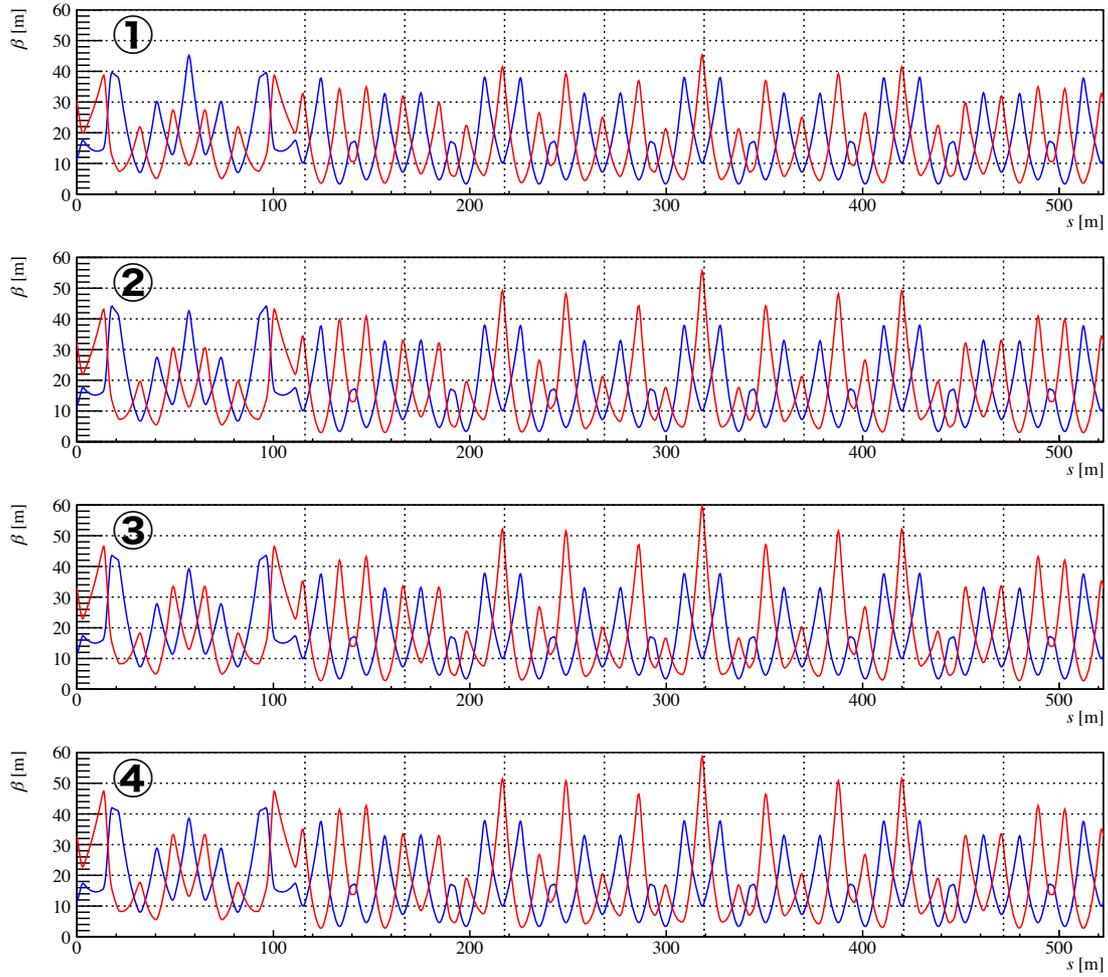


Figure 4: Horizontal (blue) and vertical (red) betatron functions in a superperiod for each optics.

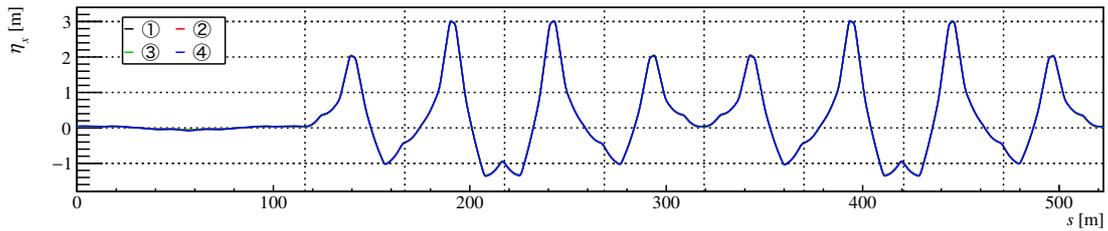


Figure 5: Horizontal dispersion functions in a superperiod for each optics.

ことによって対処している。

Table 1: Tune ( $\nu_x, \nu_y$ ), vertical betatron function  $\beta_y$  and  $15\pi$ -mm-mrad beam envelope  $\sigma_y$  at QDT155 for each optics.

	$(\nu_x, \nu_y)$	$\beta_y$	$\sigma_y$
①	(21.270, 21.409)	20.87 m	17.69 mm
②	(21.298, 21.380)	18.57 m	16.69 mm
③	(21.268, 21.328)	17.45 m	16.20 mm
④	(21.198, 21.239)	16.91 m	15.92 mm

チューンを調査したところ、 $y$  方向のチューン  $\nu_y$  を下げた方が良い解があることが分かった。そこで  $\nu_y$  を下げた取り出し光学系を 3 つ新たに考案した。これらのチューンは Fig. 3 中の黄色の星②③④で示されている。また各光学系のチューンと QDT155 での  $\beta_y$ ,  $15\pi$  mm mrad ビームエンベロープ  $\sigma_y$  は Table 1 にまとめられている。番号が増すごとに  $\nu_y$  は下がり、QDT155 での  $\beta_y$  は小さくなっている。Figure 3 に描かれているどの共鳴にも抵触しない範囲で  $\nu_y$  を下げたのが②である。一方③④は加速の途中で 3 次非構造共鳴  $\nu_x + 2\nu_y = 64$  を横切るが、その分より小さい QDT155 での  $\beta_y$  を実現している。QDT155 での  $\beta_y$  を小さくす

本研究において、QDT155 での  $\beta_y$  を小さくできる

る効果と共鳴を横切ることによるビームハロー増大効果のどちらの影響が大きいのかは自明ではないため、後述するようにビームロスモニター (BLM) を用いた測定で比較実験を行った。

Figure 4 は各ビーム光学系ごとの 1/3 周のベータatron 関数である。直線部は  $s = 0-116.1$  m、曲線部は  $s = 116.1-522.5$  m である。QDT155 の中心は  $s = 81.87$  m に位置する。本研究においてはビーム光学系を考案する際に直線部と曲線部の間の Twiss パラメータを固定する “Twiss matching” を行っていないため、曲線部の四極電磁石の強さを変えてはいないものの、曲線部のベータatron 関数も変化している。よって厳密には曲線部の位相進みも変化する。しかし今回の場合は主に  $y$  方向の変更であったため、 $x$  方向の曲線部の位相進みの変化はほとんどない。実際 4 つのビーム光学系の dispersion は Fig. 5 に示されているが、ほとんど同じであり、直線部への dispersion 漏れはいずれも問題ない。曲線部の  $y$  方向の進みは  $2\pi \times 5.77-5.81$  と少し変化していたが、これによって生じる問題はないと考えられる。制約をなくしたため  $\beta_y$  の最大値は大きくなり、①では 45.29 m であったが、②では 55.65 m、③では 59.54 m、④では 58.65 m となった。

### 3. ビームロス測定

4 つのビーム光学系についてそれぞれ MR と NU ビームラインに設置されているビームロスモニター (BLM) を用いてビームロス測定を行った。取り出しビーム強度は  $2.27 \times 10^{14}$  protons per pulse (ppp) で行った。これは 1.36 s 周期では 800 kW に相当する。ビームをアポートダンプに打つと NU ビームラインのビームロスが分からないだけでなく、アポートダンプからの照り返しで MR の BLM のカウントが増えてしまう問題がある。よって本研究では NU ターゲット行きで、NU ビームラインの破壊型プロファイルモニターを全て抜いた上でビーム試験を行った。ビーム光学系を変化させると、取り出しビーム軌道は四極電磁石の中心を通らないため、偏向磁場を感じて軌道が変化する。よって 4 つのビーム光学系それぞれに対して MR と NU ビームラインの軌道を調整し、さらに利用運転に用いることができるよう NU ビームラインではそれぞれ Twiss matching を行った。

MR では BLM は四極電磁石の肩に取り付けられている。Figure 6 は各四極電磁石の位置 (address) に設置された BLM での測定結果である。QDT155 で散乱したビームハローは下流の BLM で検出され、特に address 156 で感度が良い。ここでのビームロスは②、③、①、④の順に少なかった。一方 Fig. 7 は NU ビームラインに設置された BLM での測定結果である。特にビームロスが問題となるのは最上流の No. 1 であり、ここでのビームロスは②、①、④、③の順に少なかった。このことから共鳴を跨がない範囲で QDT155 での  $\beta_y$  を小さくした②が MR・NU ビームラインの両方でビームロスを最も抑えられることが分かった。BLM のカウント値で考えると、MR の address 156 では 4%、NU ビームラインの BLM No. 1 では 5% 減少した。③④でのビームロスが②より多かった今回の結果は、3 次非構造共鳴

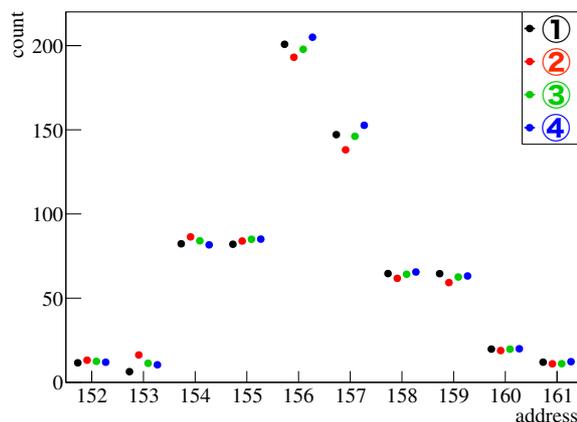


Figure 6: BLM counts in the MR FX area for four optics. The horizontal axis denotes the address which is assigned based on the positions of the quadrupole magnets.

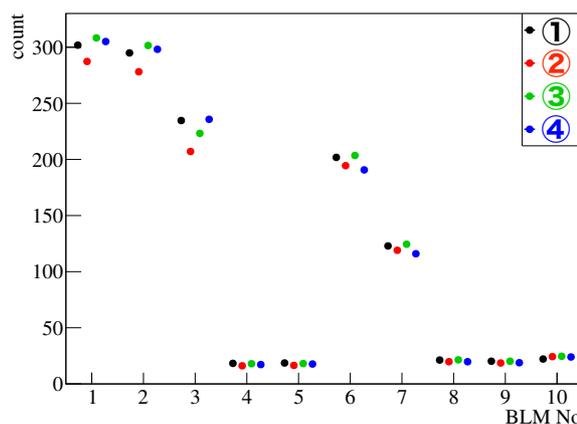


Figure 7: BLM counts in the neutrino beamline for four optics. The BLM with the smaller number is installed upstream.

$\nu_x + 2\nu_y = 64$  は加速中は一定の強さを持ち、横切ってしまうと無視できない程度にハロー形成が進んでしまうことを示している。本試験は 2024 年 12 月に行ったが、この試験後のニュートリノ利用運転では早速②を取り出し光学系として採用した。

### 4. まとめ・今後の展望

J-PARC MR の FX 運転において、非コリメータエリアで最も線量が高い場所は高磁場セプタム SM30 である。これは取り出し時に直上流の四極電磁石 QDT155 にてビームハローが鉛直方向に当たって散乱することが原因であるため、QDT155 における  $\beta_y$  を小さくしビームロス低減を目指した。先行研究ではチューンを固定としたが、本研究ではチューンを変え新たに 3 つのビーム光学系を考案し、実際にビームロスを測定し比較を行った。結果としては共鳴を横切らない範囲で QDT155 での  $\beta_y$  を小さくした②のビーム光学系が最もビームロスが少なかった。取り出しビーム光学系のさらなる追究としては、曲線部の K 値も変化させることや、電磁石の通電試験を行いさらにダイナミックに K

値を変更する等が考えられる。

本研究は取り出し時のビームロスに注目したが、取り出し以外ではFX運転においてはビームロスは空間電荷効果が強い低エネルギー期間に観測される。この対策として入射期間のビーム光学系を変更する予定である。一部の四極電磁石のK値は現在のものから大きく変わるため、取り出し時のビーム光学系もまたそれに伴い変更が必要になる。取り出しビーム光学系を考え直す際には今回の知見をそのまま活かすことができる。

## 謝辞

本実験を行うにあたり J-PARC ニュートリノビームライングループにはビーム試験へのご協力及び BLM データをご提供いただき、感謝の意を表します。また J-PARC MR のメンバーにもビーム試験へのご協力感謝

致します。

## 参考文献

- [1] T. Koseki *et al.*, “Beam commissioning and operation of the J-PARC main ring synchrotron”, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, vol. 2012, p. 02B004, Dec. 2012. doi:10.1093/ptep/pts071
- [2] S. Igarashi *et al.*, “Accelerator design for 1.3-MW beam power operation of the J-PARC main ring”, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, vol. 2021, p. 033G01, Feb. 2021. doi:10.1093/ptep/ptab011
- [3] J-PARC MR Group, “Accelerator technical design report for 1.3 MW operation at J-PARC main ring”, KEK Report 2021-2, June 2021.
- [4] T. Yasui, S. Iwata, K. Ishii, T. Shibata, and Y. Sato, “Beam Loss Reduction at Fast Extraction by a New Beam Optics in J-PARC MR”, in *Proc. the 4th J-PARC Symposium*, Mito, Japan, Oct. 2024, P-217, to be published.