

J-PARC MRにおける OTR と蛍光を用いた高ダイナミックレンジ2次元ビームプロファイルモニターの導入

INSTALLATION PLAN OF NEW 2D-BEAM-PROFILE-MONITOR BY OTR AND FLUORESCENCE AT THE J-PARC MAIN RING

佐藤洋一^{#,A)}, 橋本義徳^{A)}, 外山毅^{A)}, 魚田雅彦^{A)}, 堀洋一郎^{A)}, 酒井浩志^{B)}, 遠藤正之^{B)}, 佐藤究^{C)}
Yoichi Sato^{#,A)}, Yoshinori Hashimoto^{A)}, Takeshi Toyama^{A)}, Masahiko Uota^{A)}, Yoichiro Hori^{A)}, Hiroshi Sakai^{B)},
Masayuki Endo^{B)}, Kiwamu Sato^{C)}

^{A)}J-PARC / KEK

^{B)}Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd, Accel

^{C)}U-Tokyo, Physics

Abstract

A high-sensitivity two-dimensional beam profile monitor by Optical Transition Radiation (OTR) and fluorescence is going to be installed at the J-PARC main ring (MR). This monitor has the excellent ability to measure beam core and halo profile with the dynamic range of six order in magnitude, and two-dimensional beam profile including x-y coupling elements of the beam core. The original monitor has been operated in the injection-beam transport line (3-50BT) of the MR, to optimize the beam halo collimation of the high-intensity injection beam. In the MR, the beam core measurement will be performed for the first 20 turns after the injection, and the beam halo measurement will be performed not only injection period but acceleration period. The application plans of this new monitor in the MR are to diagnose the injected beam, to optimize beam halo collimation at the 3-50BT and MR collimators, and to beam halo formation during injection and acceleration. Its design, fabrication and characteristics of observing optics are needed improvements of the original monitor in 3-50BT.

1. はじめに

大強度陽子加速器 J-PARC 30 GeV 主リング (MR) では、バンチ当たり陽子数 3.3×10^{13} protons per bunch (ppb) の 3 GeV 陽子ビームを 2 バンチずつ 40 ms 間隔で 4 回入射した後、計 8 バンチのビームを 1.4 s で 30 GeV まで加速し、2.48 s サイクルの速い取り出し運転を行うことで、ニュートリノ実験に向けた 500 kW の利用運転を実現している[1]。近い将来には 1.32 ~ 1.16 s サイクルへの変更とバンチ当たり陽子数の増加 4×10^{13} ppb により 1.3 MW の利用運転を計画している[2]。MR では、この大強度陽子ビームのプロファイルモニターとして、既存の射影型モニター[3,4]に加え、新たに Optical Transition Radiation (OTR) と蛍光を用いた高ダイナミックレンジ 2 次元ビームプロファイルモニターの導入を予定している。これにより周回ビームのハロー形成を 2 次元的に把握し、XY 方向の相関を反映した大強度ビーム調整が期待できる。そのオリジナルであるモニターは、MR への入射輸送系 (3-50BT) で既に運用されており、6 桁程度までのハローを含むビーム形状診断を通して 3-50BT コリメータでのビームカットやビーム条件の選択に効力を発揮している[5,6]。今回 MR の直線部に導入する 2 号機は、入射から 10~20

ターン程度のビームコアと周回を重ねたハローの診断を可能とし、3-50BT と MR の 2 台の装置での同期測定を通しての 3-50BT と MR のコリメータバランス調整、そして 2 次元 XY カップリング成分も含めた入射ビームの横方向位相空間分布診断が期待できる。また、大強度陽子ビームは周回を重ねることでベータatron共鳴条件に抵触した粒子がハローを形成するが、本装置によるビームハローの 2 次元分布の時間発展測定で、ビームロスの起因となる抵触共鳴条件の同定も期待できる。現在、装置の製作はほぼ完了し、ターゲットや光学系の調整、インピーダンスの評価測定などが進展中である。本報告では、装置デザイン、本装置の測定対象と運用目的について述べる。

2. 装置デザインと運用上の留意点

2.1 装置デザイン

OTR と蛍光を用いた高ダイナミックレンジプロファイルモニターのコンセプトは、2 種類のスクリーンを用いることで、検出のダイナミックレンジを高めることである。チタンスクリーンからの OTR で、ビームコア (2 order 程度) を検出し、それより外側の部分をアルミナスクリーンからの蛍光で、ビームハロー (4 order 程度) を検出する (Fig. 1)。4 か所のアルミナスクリーンの位置は、それぞれ独

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

立した直線導入機によりセットする。

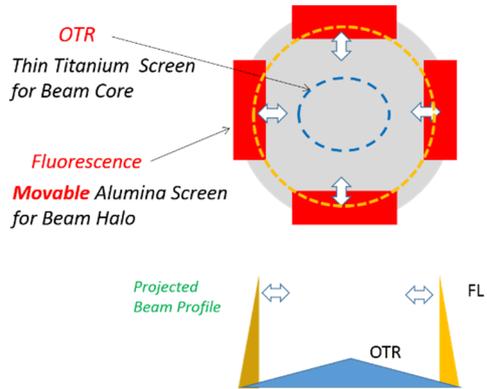


Figure 1: Conceptual screen layout for combination measurement with OTR and the fluorescence.

MR に設置するために、3-50 BT の装置から変更した点は、次の5点である。1) 遅い取り出しのセクションに設置するため、取り出しビームの軌道に制約を与えないようにミラーのビームホールの直径を 120 mm から 160 mm に大きくした。2) 装置が大きいため、ミラー用とターゲット用の真空チャンバーを分離した。3) 大きいビームホールによる光のロスを補うために凹面ミラーの直径を 300 mm から 350 mm に大きくした。4) 従来のミラーは、研磨したパイレックスガラスの全表面への純アルミ蒸着であり、放射線によるパイレックスガラスの強度劣化の不安があったため、純アルミ (A1050) を母材に機械加工で製作した。5) ミラーチャンバーを独立させることで、OTR の結像点を大気中に位置させた。結像点のイメージを近接した広角マクロ光学系を用いて検出することが可能になり、光量の収率向上に寄与する。

装置の構成と、集光光学系の構成をそれぞれ、Fig. 2,3 に示す。ターゲットで発生する OTR と蛍光をターゲットのほぼ直下の大気中まで転送させる光学系がミラーチャンバーに収まっている。直径 350 mm の上下の球面凹ミラーと直径 200 mm の球面凸ミラーで構成される Offner 光学系である[7]。Offner 光学系は、これら 3 枚の球面が同心球であり、大きな開口(F 値は約 0.8)を持つこと、諸収差が小さいことがその特徴である。MR に入射された 3 GeV 陽子ビームによる OTR の広がり角は 27 度 [5]であり、ミラーはその立体角をカバーする大きさになっている。これら球面ミラーはアルミニウム (A1050) を旋盤加工することで製作した。旋盤の芯振れが最終的な表面粗さを決めるが、空気ベアリング式の旋盤で芯振れを抑えることで、Ra 値で、6~60 nm 程度の表面精度とすることができた。波面精度は、 $\lambda/4$ 程度であった。製作した Offner 光学系は、グリッドパターンテストで、水平方向視野が、+70 ~ -70 mm (140 mm)、垂直方向視野が+70 ~ -30 mm (100 mm)の

大きさであった (Fig. 4)。場所による光透過率の違いは、レーザースポットをスイープして感度マップを作成し、それを用いてビームの測定データの補正することで対処する。

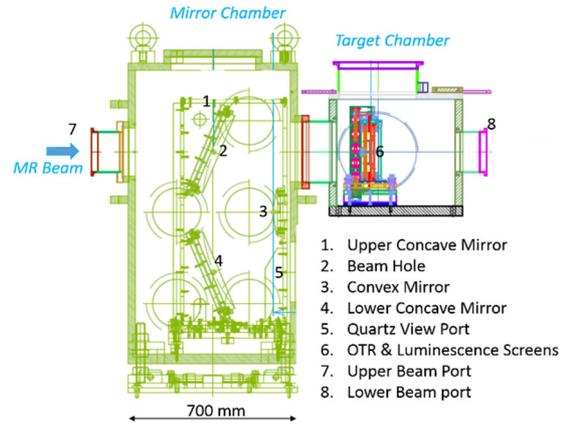


Figure 2: Layout of the device apparatus.

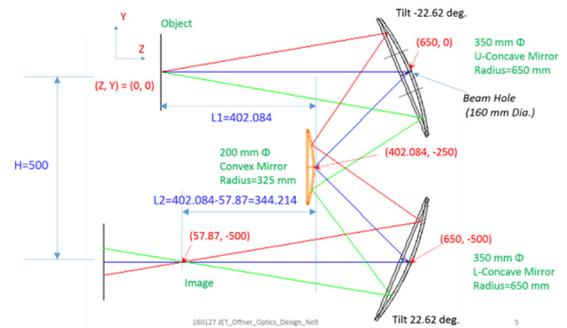


Figure 3: Layout of Offner relay optics.

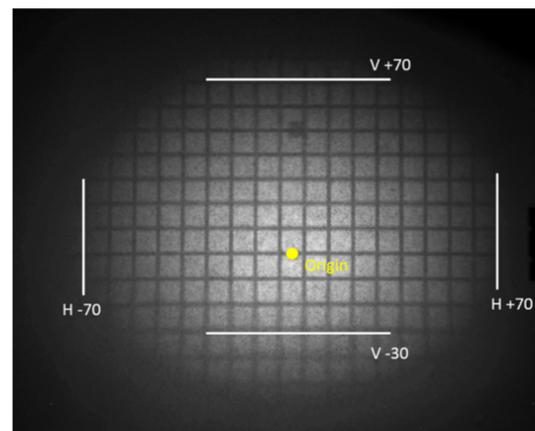


Figure 4: Grid pattern test.

ターゲットチャンバーのレイアウトを Fig. 5 に示す。図は、ビーム下流から上流を見たものである。中央部の円が、厚み 5 μm のチタンフォイルスクリーンであり、その上下左右に位置するある赤の矩形が、ビームハロー部の蛍光を発生させる厚み 0.5 mm のアルミナスクリーンである。大強度ビームに対するこれらの物質でのロスを Table 1 にまとめる。チタン

フォイルの耐久性は、 7.6×10^{13} proton / 2bunch のような大強度ビームを、100 turn 程度周回（周回周期 5.3 us）させた場合でも問題無いことを、MR の入射点にある 2 次電子を用いたビームプロファイルモニター（MRPM）のチタンフォイルで確認済みである[8]。表のアルミナの総エネルギーロスの値は、チタンのおよそ 100 倍であるが、アルミナターゲットでの陽子密度は、ビームコアの 10^{-3} 以下（ビームハロー部）であるため、使用時の実質的な総エネルギーロスは、チタンの 1/10 以下となり、特段の問題は発生しない。

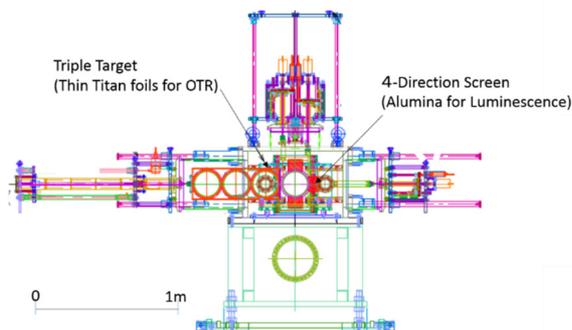


Figure 5: Layout of the target chamber.

Table 1: Energy Loss in the Screen Materials

	Energy Loss [keV/proton]*	Total Energy Loss [J/bunch]**
Titanium Foil of 5 μm thick	3.4	4.9e-3
Alumina of 0.5 mm thick	330	4.7e-1

* 3GeV Proton, ** 1e13 proton/bunch

2 次光学系は、ターゲット直下に鉛シールドを置きその内部に構成される。装置をインストールする地点の鉛シールド内での被ばく量は、OSL チップ[9]を用いて、大強度ビームの運転時に予備測定が行われ、500 -1000 mGy/week 程度であった。これは、3-50 BT の実機での放射線環境と同じであり、CMOS カメラなどには特段の問題が発生しない値である。2 次光学系の構成要素は、Offner 光学系の結像点に設置する、OTR を散乱光に変換するための石英製の拡散板と、光収量を取るための近接の広角マクロ光学系で構成される。基本測定系は、イメージインテンシファイアに CMOS カメラをセットして用いる。

本装置は、今秋に MR にインストール予定している。周回ビームへの影響の確認のため、ビームから見たインピーダンスの測定 [10] を準備中である。

2.2 運用上の留意点

本装置では、MR に入射された大強度 3 GeV 陽子ビーム（ビーム強度： $\sim 4 \times 10^{13}$ ppb）の 10~20 turn に

およぼビームプロファイルを見ることを想定している。そのときのスクリーンの物質によるビーム散乱での広がり、ビームコア部のチタンフォイルで、1 % / 10 turn 程度、ビームハロー部のアルミナでは、50 % / 10 turn と見積もられている。実際に測定されたビーム形状を評価するにあたっては、特にビームハロー部において、この散乱の効果を考慮しなければならない。

測定の時間分解能としてはバンチ毎もしくはバンチを分割したものを考えている。シャッタータイミングは 100 ns 程度で立ち上がるが、ショット毎にタイミングをずらして時間構造を追う。そのためにはショット間でのビーム性質が一定でなければならない。

機器保護の観点からはビームコア部のチタンフォイルに対しては、負荷を抑えるため、ビームを入射から最大 20 ターンで取り出す制限を設ける。ビームハロー部のアルミナスクリーンは上記の散乱効果はあるものの、入射時間帯だけでなく、加速中の測定も行って $\sim 40 \pi$ mm mrad を超えるビームハロー成長を捉えることも念頭に置いている。このため、ビームコアまで届かないよう可動制限を設ける。

3. 測定対象と運用目的

本装置で測定可能となる、MR 入射 10~20 ターンの 2 次元ビームコアプロファイルと、入射から加速までのビームハロープロファイルにより得られるビーム特性、それに基づく大強度運転における運用目的について述べる。

3.1 2 次元ビームコアプロファイルでの入射ビーム診断

入射ビームの水平・鉛直方向エミッタンスをバンチ内の進行方向位置に応じて把握することは、ビームダイナミクスシミュレーションの初期条件に正確性を与え、大強度運転における空間電荷効果の影響評価を可能にする。特にビームコアを 2 次元的に捉えることで、射影プロファイルでは測定不能であった、水平方向 (x 方向) 鉛直方向 (y 方向) のカップリング成分の測定も可能となる。

2 次モーメントに絞った議論から、リング内で xy カップリング 2 次モーメント $\langle xy \rangle$ を測定すれば、最小 4 ターンで全ての 2 次モーメントが導出できる。まず、 (x, x', y, y') の位相空間において A 点から B 点までの転送行列 $[M_{AtoB}]$ を

$$\begin{pmatrix} x \\ x' \\ y \\ y' \end{pmatrix} \Big|_B = [M_{AtoB}] \begin{pmatrix} x \\ x' \\ y \\ y' \end{pmatrix} \Big|_A \quad (1)$$

$$[M_{AtoB}] = \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} M_{x11} & M_{x12} \\ M_{x21} & M_{x22} \end{pmatrix} & R_U \\ R_D & \begin{pmatrix} M_{y11} & M_{y12} \\ M_{y21} & M_{y22} \end{pmatrix} \end{pmatrix} \quad (2)$$

として表現する。A 点 B 点それぞれの $[\sigma]$ 行列は

$$[\sigma]_B = [M_{AtoB}] [\sigma]_A [M_{AtoB}]^\dagger \quad (3)$$

$$[\sigma] = \begin{pmatrix} \sigma_x & \begin{pmatrix} \langle xy \rangle & \langle xy' \rangle \\ \langle x'y \rangle & \langle x'y' \rangle \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} \langle xy \rangle & \langle x'y \rangle \\ \langle xy' \rangle & \langle x'y' \rangle \end{pmatrix} & \sigma_y \end{pmatrix} \quad (4)$$

と関係づけられる。簡単のため、 2×2 行列 $R_U = R_D = 0$ の場合を考えると、B 点での $\langle xy \rangle$ は

$$\langle xy \rangle_B = M_{x11} \langle xy \rangle_A M_{y11} + M_{x11} \langle xy' \rangle_A M_{y21} + M_{x12} \langle x'y \rangle_A M_{y11} + M_{x12} \langle x'y' \rangle_A M_{y21} \quad (5)$$

と表現できる。このとき、 4×4 行列の 1 ターン転送行列 $[M]$ のべき乗からなる 4 つの行列が互いに独立であれば、行列 $[M_{AtoB}]$ として

$$[M_{AtoB}] = [M], [M]^2, [M]^3, [M]^4 \quad (6)$$

を採用し、式(5)に適用した 4 種の観測点 B 点に対する 4 連立方程式を解くことで A 点での全ての 2 次モーメントが導出できる。射影成分については省略したが、3 ターンでも同定できる。べき乗行列の互いの独立性はチューンに依る。

3-50BT での OTR 測定点における MR への入射ビームは $\langle xy \rangle = 0$ となっている[6]。上流側四極電磁石を操作した上での $\langle x'y \rangle, \langle xy' \rangle, \langle x'y' \rangle$ 測定は行っていないが、上流条件には、3-50BT 電磁石の偏向電磁石 B15D における今春の特殊条件[11]を除き、Skew 成分が問題となる要素は特にはない。このため、MR ラティスで $R_U = R_D = 0$ であれば、ビームに目立つカップリング成分はないと考えている。しかし、MR のオペレーションポイントによっては、Skew 四極電磁石によるビームロス抑制が出来、ビームロス量を見ながらパラメータスキャンを通して最適化されている[12]。 R_U, R_D 成分がラティスにあるこのような場合、本装置を用いれば、 $\langle xy \rangle$ の成長測定を通して、MR ラティスのカップリング要素 R_U, R_D を評価できる。ただし、 R_U, R_D が弱く、 $\langle xy \rangle$ の成長が緩やかな場合は、20 ターンを大幅に超えてビームハロー成分のみで議論する。その場合、セクション2.2 で述べた散乱影響に留意する必要がある。

3.2 コリメータによるビームハロー除去評価

MR では、入射直線部下流を放射線対策強化区域(コリメータエリア)とし、5 つのコリメータを設置し、この区域にビームロスを局所化させることで、区域外の機器の放射化を抑えている。MR の物理口径はコリメータエリアを除き $> 81\pi \text{ mm mrad}$ 以上で設計されている。コリメータ運用の基本思想は、

MR 大強度運転でビームロスをコリメータ容量以下に十分に抑えた条件下で、メンテナンス性維持への影響が厳しくなる陽子数 1%程度のビームロスに相当するハロー成分を如何にコリメータエリアで回収するかにある。MR 500 kW 運転では、MR コリメータの口径を $\sim 65\pi \text{ mm mrad}$ に設定しており、MR 内のビームロスの大部分はコリメータエリアに局所化され、区域外のメンテナンス性が確保されている[13]。また、MR 上流の 3-50BT においても 12 のコリメータから成るコリメータエリアを設け、MR への入射前にビームハローの一部を予め除去している。

ビームハロー成分の効率的除去能力の評価は、3-50BT コリメータに対しては 3-50BT にある先行装置により実施され、ハロー除去に成果を上げてきた[6]。本装置の運用においても同様に、ビームコアプロファイル測定とハロー部測定を組み合わせ、3-50BT コリメータと MR コリメータによる入射ビームハロー成分の効率的除去能力を評価する予定である。具体的には、コリメータバランスを変更した際、ビームコア分布が変更前と変わらないことを確認しながら、ハロー部分分布のみが応答することで行う。ただし、この手法は、ビームコアプロファイル測定が 20 ターン周回に留まるため、入射直後のビームハローに対するコリメータ影響を評価するために用いる。また、3-50BT と MR を結ぶ入射システムのビームハローへの影響は先行装置と本装置の組み合わせで評価する。

3.3 ビームハロー時間発展測定

ビームハロー測定は入射時の分布だけでなく、加速中のビームハローの時間発展を捉えることも目的としている。ビームハローは入射時にのみ存在するわけではなく、3 GeV での周回時間帯並びに加速にかけてもチューン広がりやベータトロン振動共鳴条件に抵触するため、徐々にビームハローは成長する。もちろん、加速が進むにつれビームエミッタンスおよびチューン広がりや圧縮され、ビームハロー成長は加速初段で止まり、それ以降は加速が進むにつれ縮小する。Figure 2 に MR 500 kW 運転での 8 バンチ入射時間から加速中盤までのビームロスモニター信号(MR コリメータエリアのビームロスモニター信号の総計)の時間発展を示す。入射後から 0.12 s までの 4 回のロスピークは、入射直後のビームハロー除去に対応している。先に述べたように MR コリメータの設定口径を $\sim 65\pi \text{ mm mrad}$ にしているため、ビームロスは MR コリメータエリアに大部分が集中している。コリメータ設定は入射・加速時も固定であり、ビームロスの時間発展は $65\pi \text{ mm mrad}$ に届くまで成長したビームハローの時間発展と対応している。このため、ビームハローの成長は、入射から加速初段($t = 0 \sim 0.16 \text{ s}$)、および加速中盤($t = 0.3 \sim 0.35 \text{ s}$)に生じていると言える。これはベータトロン

振動共鳴条件にビームが抵触しているためと考えられる。Figure 6 の結果は、ビームロスモニターの応答を見ながら共鳴補正やチューントラッキング調整を行って、利用運転に適用できるまでビームロス抑制条件を最適化した結果である。本装置の導入により、ビームハロー成長の方向性を判断できるため、抵触共鳴条件がより明確になることを期待している。ただし、この場合も定量的な議論に発展させるにはセクション 2.2 で述べた散乱影響に留意する必要がある。

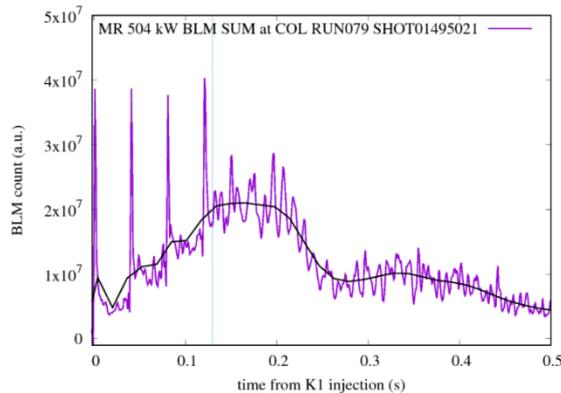


Figure 6: Improved MR beam-loss in 500 kW user operation. The beam loss count is the sum of beam loss signals in the MR collimator area. 2 bunches are injected 4 times with 40 ms intervals at $t = 0.00, 0.04, 0.08, 0.12$ s. Acceleration process starts at $t = 0.13$ s. Black line is the smoothed line of the beam loss count.

MR の既存のビームハローモニターとしては MR コリメータエリア上流の可動式薄板散乱体とその近傍に設置したシンチレーターがあり、ターン毎の時間発展も追える時間分解能を持って加速中のビームハロー成長について観測している[14]。このモニターは元々コリメータシナリオ開発の試験機として開発したものをエミッタンスモニター・ビームハローモニターとして兼用させたものであり、放射化の厳しいコリメータエリアにある。長期停止期間中のみメンテナンスや改良が可能である。一方、本装置は低放射化領域に位置するため、メンテナンス性が高いことも導入の動機の一つとなっている。既存ビームハローモニターと、本装置のビームハロー測定機能との対比を進めることで、より積極的にビームハロー成長因子の同定および成長抑制条件の最適化を進めたい。

4. まとめ

J-PARCMR に本年導入する高ダイナミックレンジ 2 次元ビームプロファイルモニターにより、

- 入射ビームのバンチ内の時間分解能を持った射影成分・カップリング成分の把握
- コリメータ操作に応じたビームハローの応答測定
- 入射から加速までのビームハロー時間発展の測定

が可能となる。本装置の運用により、MR 大強度化を目指すために今後益々重要となる調整：

- 初期条件としての入射ビーム条件の同定によるビームダイナミクスシミュレーションの高度化
- ビームロス局所化のためのコリメータ設定の最適化
- ビームハロー応答を通じた共鳴抑制調整の最適化および、手法開発

が進展すると考えている。装置の準備状況としては、現在、製作済の部分毎に、インピーダンス測定、真空排気を行い、本年 11 月の運用開始を目指している。

本研究は特別推進研究科研費 JP16H06288 の助成を受けたものである。本装置の導入に協力して頂いた J-PARC 主リング加速器グループとニュートリノグループに謝意を表す。

参考文献

- [1] S. Igarashi, Proc. HB2018, Daejeon, Korea, Jun. 2018, pp147-152.
- [2] T. Koseki, Proc. IPAC2018, Vancouver, BC, Canada, May. 2018, paper TUPAK005.
- [3] K. Satou *et al.*, Proc. IBIC2016, Barcelona, Spain, Sep. 2016, WEPG69, pp811-814.
- [4] Y. Hashimoto *et al.*, Proc. HB2010, Morschach, Switzerland, Sep. 2010, WEO2A01, pp429-433.
- [5] Y. Hashimoto *et al.*, Proc. IBIC2013, Oxford, UK, Sep. 2013, pp338-341.
- [6] Y. Hashimoto *et al.*, Proc. HB2014, East-Lansing, USA, Nov. 2014, pp187-191.
- [7] A. Offner, "New concepts in projection mask alignment", Optical Engineering, Vol. 14, No.2, 1975, p.130-132.
- [8] Y. Hashimoto *et al.*, in these proceedings.
- [9] T. Okazaki *et al.*, Proc. 15th PASJ annual meeting, Nagaoka, 2018, pp1256-1259.
- [10] T. Toyama, "Beam instrument", OHO 2009 text.
- [11] M. Shirakata *et al.*, in these proceedings, THOH06.
- [12] J. Takano *et al.*, Proc. J-PARC symposium 2014, JPS Conf. Proc. 8, 012022 (2015).
- [13] M. Shirakata *et al.*, Proc. HB2016, Malmo, Sweden, Jul. 2016, THAM4Y01.
- [14] Y. Sato *et al.*, Proc PASJ2017, Sapporo, Japan, Aug. 2017, WEOL03, pp90-94.