

日米科学技術協力によるビームプロファイルモニターの開発とその輸出

○佐々木 知依^{A)}、橋本 義徳^{A)}

^{A)}高エネルギー加速器研究機構

1. はじめに

米国 Fermi National Accelerator Laboratory (FNAL) では陽子ビーム入射器のアップグレード(PIP-II^[1])が進んでいる。それに合わせて、8 GeV 陽子 Booster から Recycler Ring のビーム輸送路(図1)でのハロー測定とそのためのビームプロファイルモニターの開発が計画された。ハロー測定には、J-PARC で運用実績のある遷移放射光(Optical Transition Radiation: OTR)と蛍光(FL)の2種類の光を利用した6桁までの高感度なビームハローを診断する OTR/FL モニター^[2,3]の技術を FNAL に導入することである。日本で設計・製作された装置は2025年12月に船便で輸出された。2026年2月14日から3月1日にかけて日本メンバーが FNAL に出張し、開梱及び装置の組み立てと調整を行った。本報告では装置の概要を説明したのち、輸出前の寸法精度確認と FNAL での再組み立て、寸法精度の再確認の結果について述べる。



図1 FNALの加速器群とビームハローモニターの設置場所

2. ビームモニターの測定原理

測定原理は J-PARC で運用している OTR/FL モニター^[2,3]と同様である。装置にはチタンフォイルターゲットとアルミナセラミックターゲットが実装されている(図2)。陽子ビームがターゲットを通過する際に、チタンフォイルターゲットからはOTR、アルミナセラミックターゲットからは蛍光が放射される。これらの光は大口径のオフナーリレー光学系^[4]で集光され、ビーム直下に設けた拡散スクリーン上に結像される。その像を CMOS カメラで撮影することでビームプロファイルを得る。ビームコアの部分はOTR、コアと比較して微弱的なビームハローはア

ルミナセラミックターゲットの厚みを 0.5 mm としたときに OTR の約 1300 倍^[2]の発光量になる蛍光を用いることで、J-PARC ではおよそ 6 桁のダイナミックレンジを達成した。

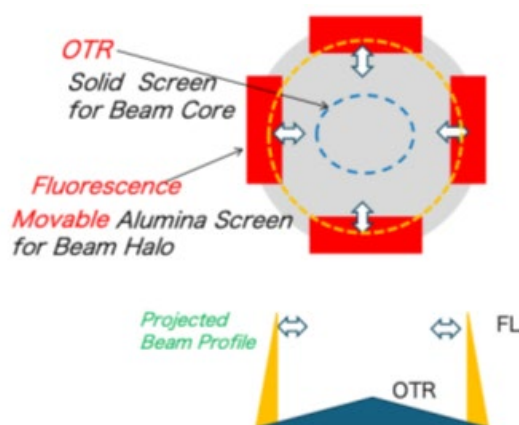


図2 ターゲットの配置

3. 装置の概要

装置は J-PARC の 3-50BT(RCS から MR へのビーム輸送ライン)で運用実績のある OTR/FL モニターの技術を、FNAL の 8 GeV 陽子ビーム用に再設計したものである。図3は本モニターの外観、図4は断面図である。L1135×W765×H873 mm の大きさの真空チャンバー内部に、ハローターゲット(水平/垂直)、OTR3連ターゲット、ターゲットステーション(TS)、ミラーユニットが収められている。TSはTS-HとTS-Vに大きく分けられる。水平ハローターゲット及び

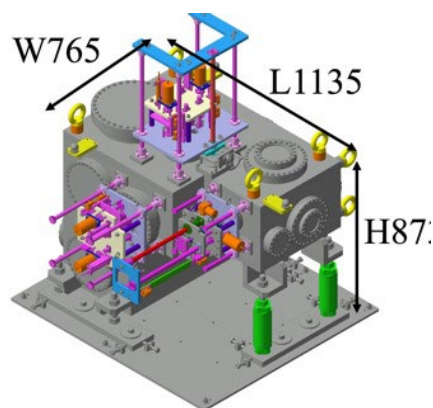


図3 装置の外観

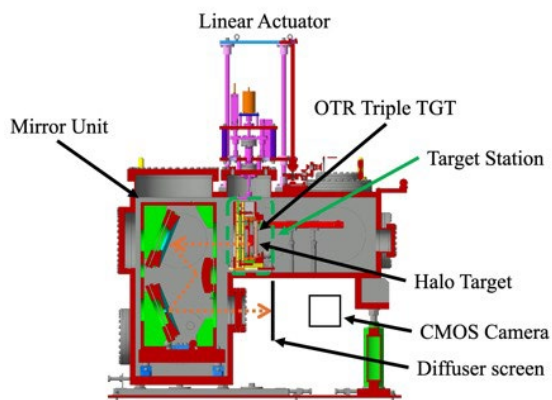


図 4 装置の断面図

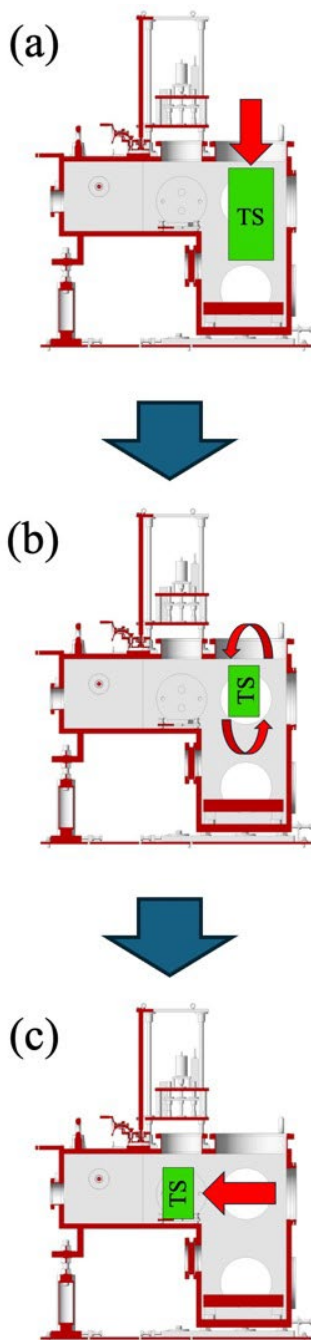


図 5 TS-H 取り付け手順

OTR 3 連ターゲットのスライドガイドを持つ TS-H と、垂直ハローターゲットのスライドガイドを持つ TS-V である。ミラーユニットは 2 つの凹面鏡と 1 つの凸面鏡から構成される。これら 3 枚のミラーはオフナーリレー光学系を構成し、ターゲットから放射される光をチャンバー下部の拡散スクリーンに結像する役割を担う。チャンバー外部には、各ターゲットを位置決めする直線導入機が取り付けられている。これら設計の詳細は過去に報告^[5,6]されている。

4. 組み立て手順

組み立てにおいては、ターゲットが組み込まれる TS と集光を担うミラーユニットの位置が輸出前の位置を再現することが特に重要である。

これを踏まえて、組み立ては以下の手順で行なった。

Step1 TS の取り付け

TS の取り付け作業にはメイン作業員 1 名と方向転換、ステージまでの移動に補助員 2 名が必要である。

1. チャンバートップの大フランジから TS-H をチャンバー内に入れる(図 4(a))。
2. 横のフランジから手を入れて 2 人でサポートしつつ、TS-H を 90°回転させる(図 4(b))。
3. ステージ上に TS-H を載せ(図 4(c))、押しボルト 1~3(図 5)に当たる位置まで移動させる。

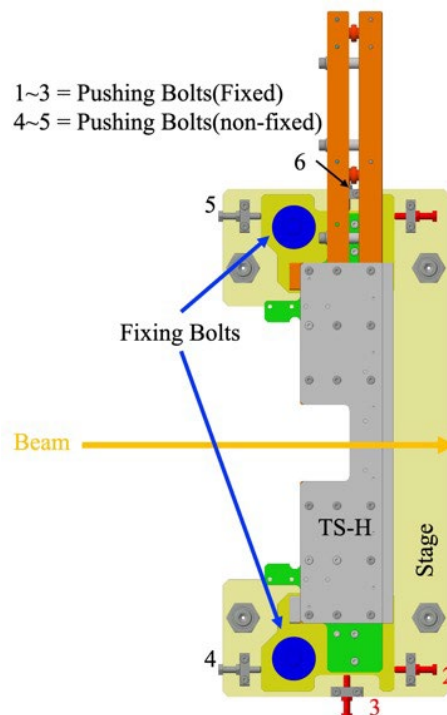


図 6 TS-H と押しボルト、固定ボルトの位置関係

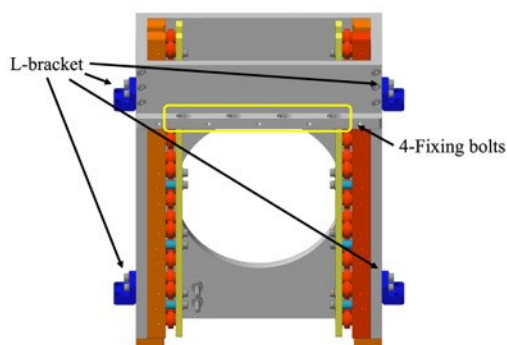


図 7 TS-V の L 字ブラケットと固定ボルト

4. 押しボルト 4～6 を TS-H に当て、ロックナットを締める。TS はアルミ製なので、強くボルトを当てないように注意する。押しボルト 1～3 は輸出前に正確にアライメントし、そのまま固定しておいた。これにより簡便かつ正確に位置合わせができた。
5. 固定ボルト 2 本(図 5)で TS を固定する。
6. TS-V を大フランジからチャンバー内に導入し、TS-H に載せる。
7. TS-V 側面の L 字ブラケットがツライチになる位置に調整し、ブラケットをボルト締結する。上部の 4 本の固定ボルトも締結する。

Step2 水平・垂直方向直線導入機取り付け

垂直方向直線導入機(LA-V)及び水平方向直線導入機(LA-H)を取り付ける。まず LA-V を取り付けてから LA-H を取り付ける。さらに、LA-V の垂直ハローターゲットが全開の位置でないと水平ハローターゲットを取り付けられない。この順番でないと、垂直ハローターゲットと水平ハローターゲットが干渉

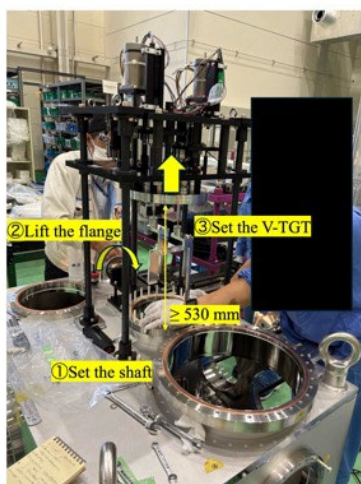


図 8 垂直方向直線導入機取り付け

するので注意する。また、直線導入機のガイドシャフトをシャフトホルダに固定する際は、ホルダ側面の貫通タップに真鍮製セットピースを入れた上で、芋ネジを占めて固定する。セットピースを入れ忘れやすいのでこの点についても注意して作業した。

1. LA-V をクレーンで吊り、ガイドシャフトをシャフトホルダにセットする(図 8 ①)。
2. ハンドルを回し、フランジ間距離が 530 mm 以上になるまでフランジを持ち上げる(図 8 ②)。
3. 垂直方向ターゲット(V-TGT)を取り付ける(図 8. ③)。
4. LA-H をクレーンで吊り、ガイドシャフトをシャフトホルダにセットする。
5. LA-H を全開にし、水平方向ハローターゲットを取り付ける。
6. LA-H を押し込み、最終締め付けトルク 9 Nm で締結する。
7. LA-V のフランジを押し込み最終締め付けトルク 9 Nm で締結する。

Step3 OTR 用直線導入機(LA-OTR)の取り付け

1. LA-OTR をクレーンで吊り、ガイドシャフトをシャフトホルダにセットする(図 9 ①)。
2. LA-OTR を押し込み、最終締め付けトルク 9 Nm で締結する(図 9 ②、③)。
3. OTR 3 連ターゲットをチャンバー側面のサービスポートから TS に挿入する。
4. OTR 3 連ターゲットとアームを接続する。接続部は 4 面嵌合になっているので、面を合わせてビス止めするだけで再現性よく固定することができる(図 10)。
5. コネクティングロッド(LA-OTR)とアームを M20 ナットで締結する(図 11)。

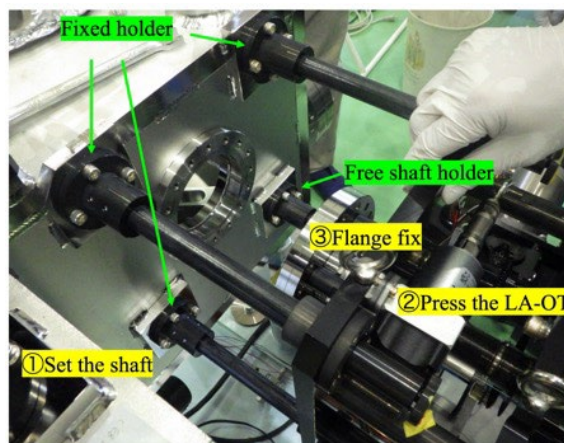


図 9 OTR 用直線導入機取り付け

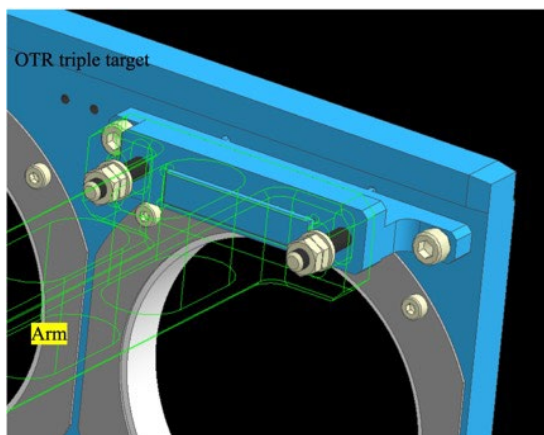


図 10 OTR 3 連ターゲットとアームの固定

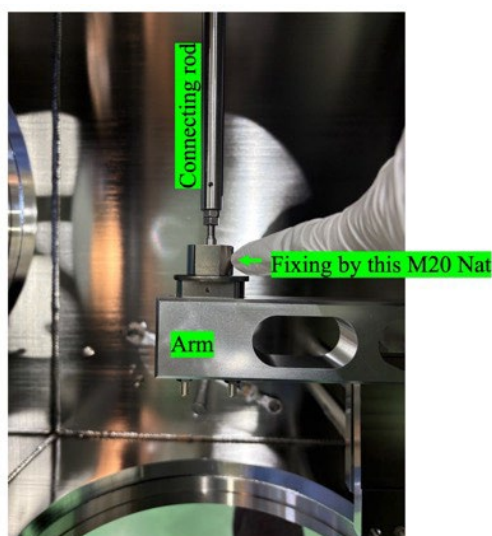


図 11 OTR 3 連ターゲットとアームの固定

Step4 ミラーユニットの取り付け

1. 図 12 のようにミラーユニットの 2 分割する。
2. 凸面鏡サポートをミラーベースに乗せ、固定ボルト 2 本で固定する。ミラーベースには位置決めピン(図 13)が設けられており、簡便してかつ再現性のよい取り付けが可能である。
3. 凹面鏡サポートをミラーベースに乗せ、固定

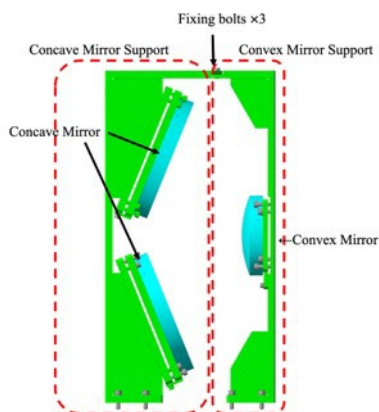


図 12 ミラーユニットの構造

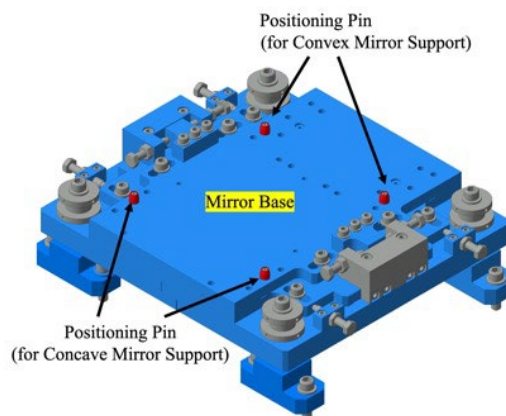


図 13 ミラーベースと位置決めピン

ボルト 2 本で固定する。凸面鏡サポートの取り付けにはクレーンが必要である。

4. 凹面鏡/凸面鏡サポート上部の固定ボルトでミラーユニットを連結する。

5. 測定の基準点

図 14 は測定の基準点とその設計位置である。上流側ビームポートフランジの中心を原点とし、鉛直方向を Y 軸、上流側ビームポートフランジから下流側ビームポートフランジを結ぶ直線を Z 軸とする座標系である。チャンバー外側に取り付けた基準板 ref_1~3 と TS 表板開口部の中心 ref_TS の座標を測量し、輸出前後で変化がないか確認した。

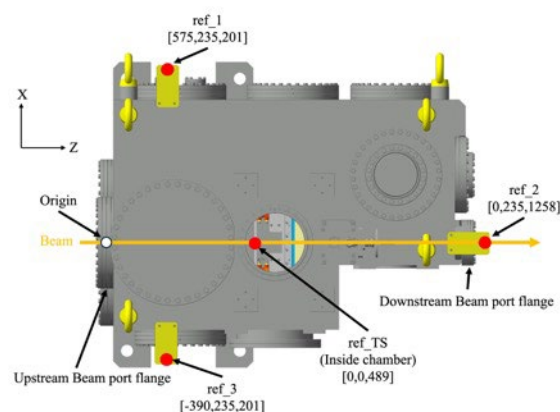


図 14 基準点とその設計位置

6. 輸出前の寸法精度確認

寸法精度の確認では、レーザートラッカー(LT)を用いて各基準点の座標の測量を行った。

ビームポートフランジの中心はフランジの円周を測定することによって定義されるが、1 台の LT では上下流両方のビームポートフランジの円周測定をすることができない。そこで、2 台の LT を使い、それらに共通の測定点を持たせることで座標系を統合する手法をとった。共通の測定点を設ければ、LT1 台でも測量可能であったが、2 台の LT を用いることで

作業時間を短縮できた。

測定結果を表1に示す。測定は3回の平均であり、そのばらつきは最大 30 μm であった。LT の公称精度の $\pm 50 \mu\text{m}$ より小さい値に収まった。

表1 日本での測量結果

	X	Y	Z
ref_1	574.217	234.743	200.187
ref_2	0.297	235.010	1256.103
ref_3	-389.527	234.747	200.360
ref_TS	-0.09	0.19	488.8

7. FNAL での再組み立て及び寸法精度の再現性確認

日本メンバーが FNAL に出張し、4 節で説明した手順で再度組み立てを行った。また、FNAL のアライメントチームと協力して測量を行った。FNAL では、10 点の共通測定点を、チャンバー周辺の壁や床に設け、LT1 台で測量を行った。その結果を表2に示す。日本での結果との差は最大である点は ref_1 の Y 座標で 200 μm であったが、そのほかの点は概ね 100 μm 程度以下に収まった。Y 座標での差が大きい傾向になったが、その原因として水平アライメントが不十分だった可能性がある。FNAL では時間短縮のため最低限のアライメントしか行わなかった。輸出前の測量時と同等の水平アライメントを行えば、差はより小さくなると考えている。

表2 FNAL での測量結果

	X	Y	Z
ref_1	574.279	234.538	200.188
ref_2	0.347	234.955	1256.090
ref_3	-389.436	234.863	200.372
ref_TS	-0.106	0.09	488.696

表3 輸出前後の測量結果の差

	X	Y	Z
ref_1	-0.062	0.205	-0.001
ref_2	-0.050	0.055	0.013
ref_3	-0.091	-0.116	-0.012
ref_TS	0.016	0.100	0.104

8. まとめ

日米科学技術協力事業で FNAL の 8 GeV 陽子ビーム用のビームプロファイルモニターの開発を進めている。装置は完成し、FNAL への輸出は完了してい

る。2026 年 2 月には現地に出張して組み立てを行い、日本での組み立て時と同様の高い精度で組み上がったことを確認した。本報告を執筆した 2026 年 2 月 20 日時点で、FNAL での組み立て調整は進行中であり、現時点で完了したところまでを記載した。次のステップは、加速器へのインストールである。インストール作業の際には日本メンバーも参加する予定である。その後、早ければ秋のビーム運転において運用が始まる。

謝辞

株式会社トヤマ殿には本モニターの製作において多大なる貢献をいただいている。

参考文献

- [1] The PIP-II Reference Design Report”, Fermilab, Batavia, IL, USA, Rep. FERMILAB-DESIGN-2015-01, Jun. 2015.
doi:10.2172/1365571
<https://lss.fnal.gov/archive/design/fermilab-design-2015-01.pdf>
- [2] Y. Hashimoto et al., “A Development of High Sensitive Beam Profile Monitor using Multi-Screen”, in Proc. IBIC'13, Oxford, UK, Sep. 2013, paper TUCL2, pp. 3
- [3] Y. Hashimoto et al., “Two-Dimensional and Wide Dynamic Range Profile Monitor Using OTR / Fluorescence Screens for Diagnosing Beam Halo of Intense Proton Beams”, in Proc. HB'14, East Lansing, MI, USA, Nov. 2014, paper TUO2AB04, pp. 187-191.
<https://accelconf.web.cern.ch/HB2014/papers/tuo2ab04.pdf>
- [4] A. Offner, “New concepts in projection mask alignment”, Optical Engineering, Vol. 14, No.2, 1975, p.130-132.
- [5] Y. Hashimoto et al., “A Wide Dynamic-Range Halo Monitor for 8 GeV Proton Beams at FNAL” in Proc. NaPAC2022, NM, USA, Aug. 2022, paper MOPA14, pp. 75-78.
<https://www.jacow.org/proceedings/napac2022/papers/mopa14.pdf>
- [6] Y. Hashimoto et al., “A Development of Wide Dynamic-Range Halo Monitor for 8 GeV Proton Beams at FNAL” in Proc. IBIC2024, Beijing, China, Sep. 2024, paper WEP12, pp. 274-278.
<https://accelconf.web.cern.ch/ibic2024/pdf/WEP12.pdf>