

## J-PARC ハドロン high-p ビームライン用 高感度残留ガスプロファイルモニタの開発(3)

### DEVELOPMENT OF HIGH SENSITIVITY RESIDUAL GAS IONIZATION PROFILE MONITOR FOR J-PARC HADRON HIGH-P BEAMLINE(3)

豊田晃久<sup>#</sup>, 青木和也, 上利恵三, 秋山裕信, 家入正治, 加藤洋二, 倉崎るり, 小松雄哉, 里嘉典, 澤田真也,  
白壁義久, 高橋仁, 田中万博, 広瀬恵理奈, 皆川道文, 武藤史真, 森野雄平, 山野井豊, 渡辺丈晃  
Akihisa Toyoda <sup>#</sup>, Kazuya Aoki, Keizo Agari, Hironobu Akiyama, Masaharu Ieiri, Yohji Kato, Ruri Kurasaki,  
Yuya Komatsu, Yoshinori Sato, Shinya Sawada, Yoshihisa Shirakabe, Hitoshi Takahashi, Kazuhiro Tanaka,  
Erina Hirose, Michifumi Minakawa, Fumimasa Muto, Yuhei Morino, Yutaka Yamanoi, Hiroaki Watanabe  
KEK

#### Abstract

A B-line (high-momentum beamline) is a beamline split from an A-line, the primary proton beamline of the J-PARC Hadron Experimental Facility. This beamline has a high radiation level because of the beam loss at the branch point, and the B-line beam intensity is relatively low, so that a profile monitor with both high sensitivity and radiation tolerance is required. For this requirement, we now develop a monitor that measures the profile by converting the ionized electrons generated in the residual gas by the beam passage into light and amplifying the light. We are currently working on R&D for practical use. In this presentation, we will present the design of optics that captures the light, the construction of an optical system, and the result of optical tests.

#### 1. はじめに

J-PARC[1]ハドロン実験施設[2]の B ライン(高運動量ビームライン)は、A ラインの一次陽子ビームの一部を分岐させ使用するビームラインである。このビームラインは分岐部でビームを削り出すのでビームロスがあり、放射線レベルは高い。しかし、輸送するビーム強度は比較的低い。高感度でかつ放射線耐性の高いプロファイルモニタが必要となる。そこでビーム通過により残留ガスで生じた電離電子を光変換し、光増幅してプロファイル測定するモニターを考案した[3]。以降実用化に向けて R&D を進めている[4,5]。今回は電離電子が蛍光板に当たって生じる蛍光をとらえる光学の設計、光学システムの構築および光学テストの結果について報告する。

#### 2. 光学設計と光学計算

蛍光板からの光は指向性がないため、できる限り大立体角の光学で集光する必要がある。また光量確保するために IIT(Image Intensifier)に一度集光し、増倍した光を再度 Point-to-Point 光学でカメラに集光する必要がある。IIT にバックグラウンド荷電粒子がヒットすると S/N が悪化することがビームラインシミュレーション計算で分かっているので、バックグラウンド源のビームラインからは 1 m 程度離す必要がある。また IIT からカメラまでの光学はコスト削減と収差低減のため BK7 などの通常の光学レンズを使用するため、放射線にそれほど強くない。よってこれらの光学レンズもビームラインから 1 m 程度離すことでメンテナンス頻度を低く保つ。メンテナンスコストを下げ、主光学は表面鏡を利用した反射光学とし、カメラは Thermo Fisher Scientific 社の耐放射線 CID カメラを利用する。

<sup>#</sup> akihisa.toyoda@j-parc.jp

Table 1: Optical Properties

光学候補	倍率	分解能(mm) on target
光学 1	5.6	1.1
光学 2	1	0.4
光学 3	6	3.6

光学の条件としては以下の通りである。

- 必要視野は直径 100 mm とする。IIT の入口直径が 18 mm なので必要倍率は約 6 倍である。
- IIT から CID カメラまでの光学はできる限り明るい光学で倍率約 2 倍光学とする。



Figure 1: Optical system.

- 主鏡の直径は最低限必要な立体角と価格との兼ね合いで 250 mm とする。
- 主光学の必要分解能は約 1 mm on target とする。
- IIT から CID カメラまでの副光学の必要分解能はイ

メージ面で約  $100\ \mu\text{m}$  とする。

上記の条件を満たす可能性のある光学として以下の3つを評価した。

- 光学 1: Schwartzschild-Couder 光学をベースにした光学
- 光学 2: Offner 光学
- 光学 3: Newtonian 光学をベースにしたカタディオプトリック光学

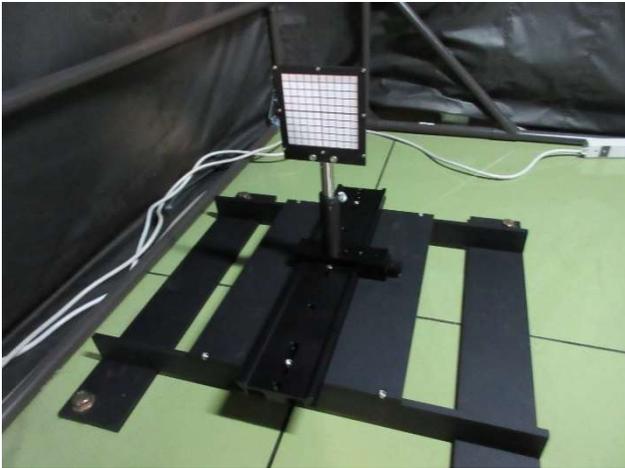


Figure 2: Optical target.

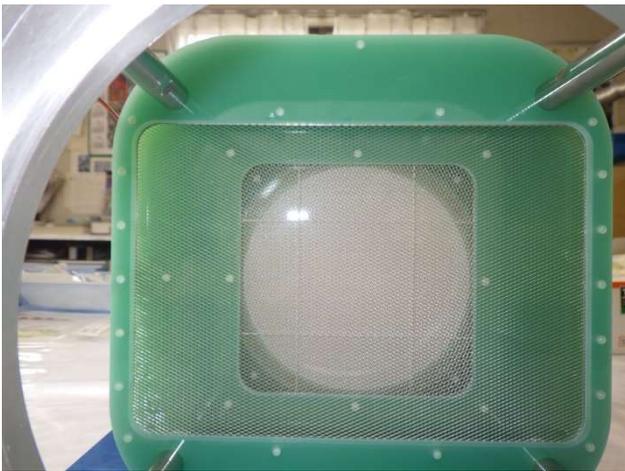


Figure 3: Fluorescent screen.

Table 1 に光学計算ソフト ZEMAX で最適化した結果を示す。

まず光学 3 については、倍率は十分高いが分解能がでないので採用できない。光学 2 については、分解能は十分だが倍率が低いので、別途白色スクリーンで受けて再度集光し倍率を稼ぐ必要がある。また副光学で 6 倍近くの倍率を出すのは簡単ではない。光学 1 については倍率、分解能ともに十分出ているのでこちらを採用する。

ちなみに光学 1 については入手性を考慮し主鏡を放物面、副鏡を球面にしている。副鏡だけが球面のためコマ収差が大きくなるため、対策として 2 面の鏡の曲率中心を近づけることでアプラナティック光学に近い光学にして収差を抑えている。主鏡はアルミの機械加工で製作し、副鏡はパイレックススペースのアルミ蒸着研磨鏡を採用し

た。また Schwartzschild-Couder デザインそのままだと副鏡のけられが大きすぎるので、条件から外して立体角を稼ぐ方向で設計している。

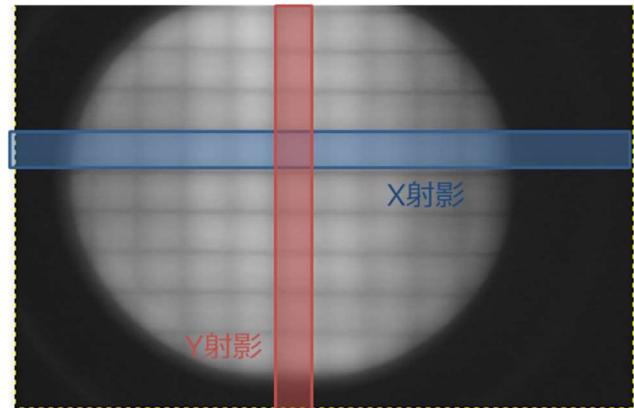


Figure 4: Captured image for the optical target.

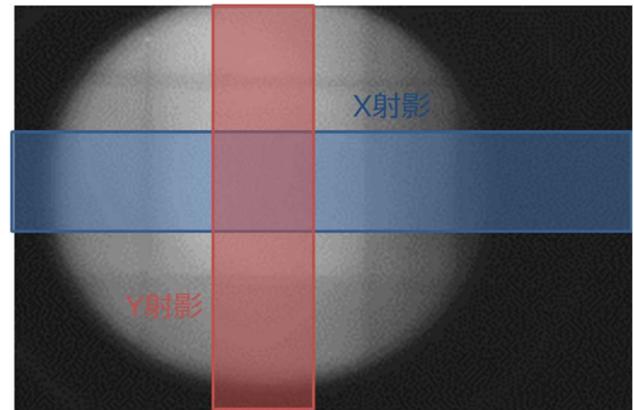


Figure 5: Captured image for the fluorescent screen.

副光学については、入手しやすいアクロマティックレンズで直径が大きい D75 のレンズを組み合わせた光学で倍率約 2 倍、分解能  $160\ \mu\text{m}$  の光学を採用した。目標分解能に少し届いていないが実際の光学調整で十分対応可能だと考えた。

### 3. 光学構築

Figure 1 に実際に構築した光学を示す。写真はビームライン下流側から光学を写したものである。光学はモニターチェンバーの下方に設置されている。蛍光面はモニターチェンバー内にあり、蛍光を集光する主鏡は床面上に設置された暗箱の最底面に設置されている。主鏡からの光は写真上方の副鏡でさらに集光され写真中央あたりの IIT に結像する。IIT 出口から放出される増倍された蛍光は斜鏡で写真右方向に反射され、ダブルレットレンズによって写真右手の CID カメラに集光される。

### 4. 光学分解能測定とその結果

#### 4.1 光学分解能測定セットアップ

前節で構築した光学の分解能を評価するために、Fig. 2 で示すような光学標的を用意して暗室内で分解能測定を目的とした画像取得を行った。またモニター本体に光

学を接続した状態での分解能を確認する目的で Fig. 3 に示すように蛍光板の手前に白糸を井桁状に張っており、この画像を取得した。画像取得には IO DATA 社の USB ビデオキャプチャ GV-USB2 を利用した。

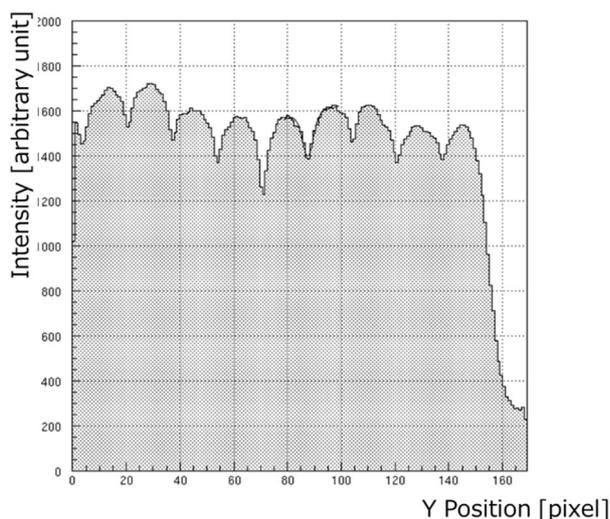


Figure 6: Typical projected histogram for the optical target.

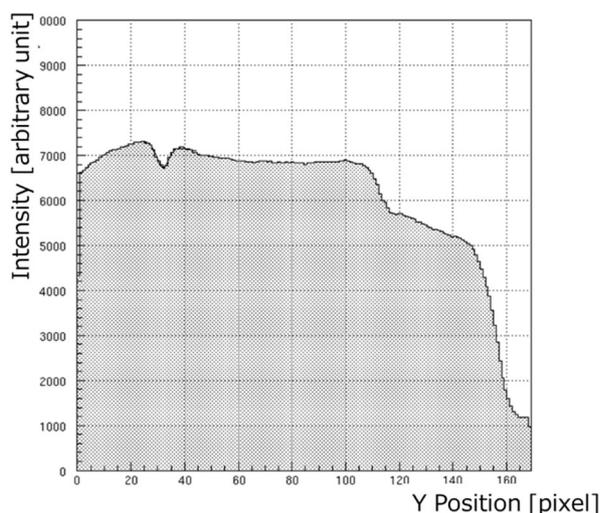


Figure 7: Typical projected histogram for the fluorescent screen.

#### 4.2 画像解析と解析結果

Figure 4 に Fig. 2 で示した校正標的に微弱光を当てて画像取得した図を示す。この図はキャプチャした映像を 50 frame 分平均化して得られたものである。画像解析では python imaging library を利用することで映像平均化、および範囲指定した 1 次元射影を行っている。図中の青枠が X 射影して X 方向の分解能を評価するのに使用した射影範囲、赤枠が Y 射影して Y 方向の分解能を評価するのに使用した射影範囲である。Figure 5 は Fig. 3 に示した蛍光板に微弱光を当てて画像取得した図である。青枠と赤枠の定義は Fig. 4 と同じである。Figure 6 に Fig. 4 を射影した典型的なヒストグラムを示す。Figure 7 に Fig.

5 を射影した典型的なヒストグラムを示す。それぞれの図中に示したようにガウシアン+バックグラウンドの 1 次多項式でフィッティングして分解能を評価する。フィッティングには CERN library の paw を利用した。

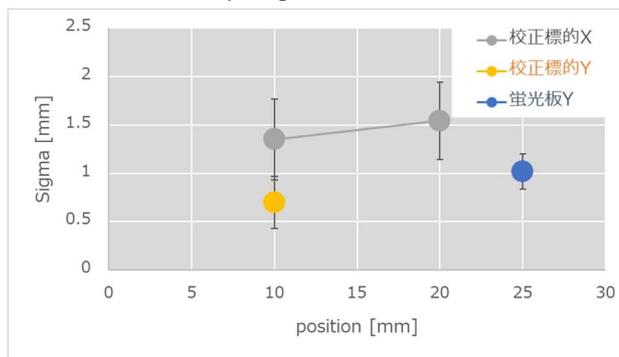


Figure 8: Estimated optical resolution.

Figure 8 に画像解析で得られた光学分解能のスクリーン中心からの距離依存性を示す。蛍光板の X 方向射影については光の当て方が十分一様ではなくバックグラウンド除去が難しかったので評価できなかった。それ以外の校正標的 X、校正標的 Y、蛍光板 Y についてはバックグラウンド除去ができ分解能を評価することができた。この図においては、それぞれの Intrinsic resolution は除去済みとなっており、直接計算値と比較できる値になっている。まず一つ言えるのは、分解能の場所依存性が小さく、周辺領域の大きな分解能悪化は見られないことである。また事前に光学計算で評価された 1.1 mm の分解能と矛盾しない結果が得られたと言える。

#### 5. まとめ

高感度残留ガスプロファイルモニター用光学を設計、製作し、分解能を測定した。測定結果は光学計算結果と矛盾せず必要な分解能を達成できていることが確認できた。今後はビーム試験を実施してモニターとしての性能を確立する予定である。

#### 謝辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費基盤研究 (B) (18H01238)を受けてなされた。

#### 参考文献

- [1] J-PARC Web page; <http://www.j-parc.jp>
- [2] K. Agari *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys., 2012, pp 02B009-1 – 02B009-16.
- [3] A. Toyoda *et al.*, “第 16 回日本加速器学会年会プロシーディングス”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, July, 31-Aug. 3, 2019, pp. 498-500.
- [4] K. Agari *et al.*, “第 18 回日本加速器学会年会プロシーディングス”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Japan, Aug. 9-Aug. 12, 2021, pp. 675-678.
- [5] A. Toyoda *et al.*, “第 18 回日本加速器学会年会プロシーディングス”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Japan, Aug. 9-Aug. 12, 2021, pp. 866-869.