

Development of OTR beam profile monitor for J-PARC hadron beamline(3)

Akihisa Toyoda^{1,A)}, Keizo Agari^{A)}, Masami Iio^{B)}, Masaharu Ieiri^{A)}, Yohji Kato^{A)}, Akio Kiyomichi^{A)}, Yoshinori Sato^{A)}, Shinya Sawada^{A)}, Yoshihisa Shirakabe^{A)}, Yoshihiro Suzuki^{A)}, Minoru Takasaki^{A)}, Hitoshi Takahashi^{A)}, Kazuhiro Tanaka^{A)}, Megumi Naruki^{A)}, Hiroyuki Noumi^{C)}, Erina Hirose^{A)}, Toshiyuki Mitsunashi^{A)}, Michifumi Minakawa^{A)}, Ryotaro Muto^{A)}, Yutaka Yamanoi^{A)}, Hiroaki Watanabe^{A)},

^{A)} KEK

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{B)} RIKEN

2-1 Hirosawa, Wako, Saitama, 351-0198

^{C)} RCNP

10-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047

Abstract

J-PARC hadron beamline under construction at Tokai site will provide high-intensity (750 kW) slow extraction proton beam, which enables to perform various particle and nuclear physics experiments especially requiring high statistics. We are currently in the progress of developing the OTR beam profile monitor to measure a beam profile at such high intensity beamline. At the previous report, we developed an OTR monitor with optical fiber system, and found that the background contaminating OTR signal comes from the Cerenkov radiation from lenses around the beam line. To overcome the OTR background and radiation damage to camera system simultaneously, we design and develop a new optical system based on the Newtonian telescope, and check whether the system satisfies requirements such as low background, high radiation tolerance, large solid angle, and so on.

J-PARCハドロンビームライン用OTRビームプロファイルモニタの開発(3)

1. はじめに

現在茨城県東海村に建設中のJ-PARC^[1]ハドロンビームライン施設では、大強度陽子ビーム(750 kW, 50 GeV 15 μ A)を利用した様々な原子核素粒子実験がおこなわれる予定である。陽子ビームは1スピル3.4秒周期で繰り返し加速され、約1秒間かけてゆっくりと取り出される(遅い取り出し)。取り出されたビームはT1標的(30 %ビームロス)に導かれ、残りのビームはビームダンプによって安全に処理される。

このような大強度ビームを安定して供給するためには、ビームプロファイルの正確な測定が不可欠である。その際に問題になる点が大きく分けて二つある。一つが測定におけるビームロスの問題で、もう一つが機器の放射化および熱ダメージの問題である。

これらの問題を解決するモニタの一つにOTR(Optical Transition Radiation)モニタがある。OTRが大強度プロファイル測定に向いている理由としては、以下の二点があげられる。

1. シグナル強度が標的の反射率のみに依存する。これにより標的を限りなく薄くすることができ、ビームロスおよび熱放射線の影響を最低限に抑えられる。
2. 指向性があり(50 GeVで2.1度)、S/Nを稼ぐことができる。

よって我々はOTRモニタをプロファイルモニタとして利用するために開発を進めてきた。

2. 前回までの結果

まず、OTR光の特性を理解するために、プロトタイプOTRモニタを製作し、KEK-PS (12 GeV, 2×10^{12} protons / spill, 4秒周期)においてビームテストを行った^[2]。図1に典型的なイメージを示す。このテスト実験において、我々はリファレンスモニタとして用意したSPIC(Segmented Parallel Plate

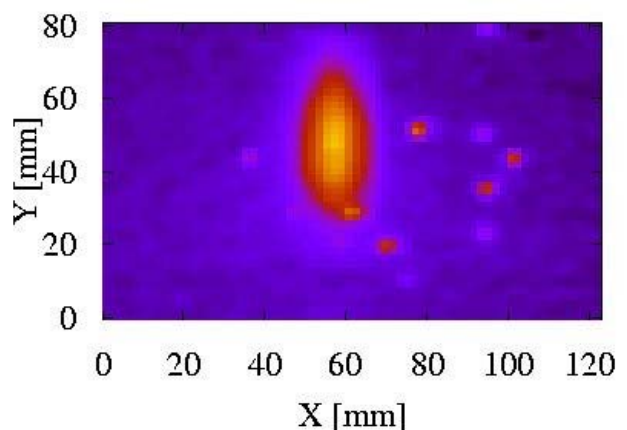


図1 : KEK-PSで観測されたOTR光

¹ E-mail: akihisa.toyoda@j-parc.jp

Chamber)^[3]と矛盾しないプロファイルを観測することに成功した。しかし図に示すようにシグナルの周辺に星状のバックグラウンドが点在し、プロファイル観測が妨げられる現象が見られた。また他の問題点としては、レンズやIIT(Image Intensifier)、カメラが放射線によって短期間にダメージを受け使用不能になると予想されることがあげられる。

以上の二つの問題を解決する目的でファイバーを用いた光学システムを開発し、ビームテストを行った^[4]。この光学ではカメラの位置をビームラインから遠ざげられることができる。これによりIITやカメラ部のビームロスが激減していることが確認され、機器の寿命の問題は解決された。しかしバックグラウンドに関してはカメラ位置のビームロスに比べて減少率が小さいということが判明した。そこで対物レンズ位置を変えたバックグラウンド量の評価を行った結果、バックグラウンドの起源はおそらく対物レンズ自身、もしくは光学窓で発生したチェレンコフ光であると推定された。

3. 光学システム

3.1 新規光学の設計

上記の光学で解決できなかったバックグラウンドの問題を解決するために新規光学を光学計算ソフトZEMAX²を利用して設計した。光学の条件を挙げると以下ようになる。

1. レンズやIIT、カメラといった放射線に弱い機器をビームラインから遠ざけること。
2. チェレンコフバックグラウンドを低減するために、ビームライン近傍からレンズ類を極力排すること。
3. OTR光は50 GeVで2.1度の広がりを持つ。よって、この広がりを十分カバーするだけの立体角を持つこと。
4. 100 mm x 100 mmの大きさのスクリーン全面を観測できる倍率を持つこと。
5. ビームプロファイルを1 mmの分解能で観測できること。

これらの条件を満たしつつコストが抑えられる光学としてニュートン型望遠鏡を利用した光学が候補

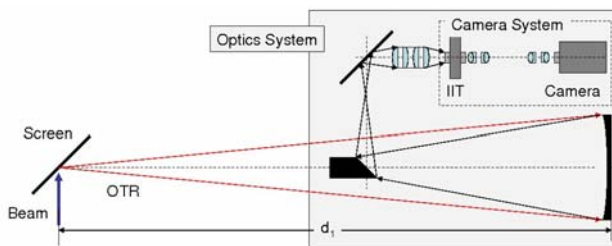


図2：ニュートン型光学の概略図

に挙げられた。図2にその概略図を示す。

まず、条件5から許容錯乱半径とビームライントンネルの幅(8 m)、および放射線レベルを考慮して、作動距離を5 mと決定した。次に、条件3を考慮に入れて、主鏡の大きさを350 mmφとした。さらに条件4を満たすために、主鏡の焦点距離を許容収差の範囲内で可能な限り短く(1000 mm)設定した。この明るい主鏡のため、集光系には放射線に弱い複合レンズを用いる必要がなくなり、シンプルな平凸レンズ4枚の組み合わせで十分な倍率を出すことができた。IIT面に集光した後に生じる蛍光は平凸レンズ2枚とアクロマートダブルレットレンズ2枚をリレーレンズに組んでチューブカメラに導入している。

以上の光学計算に基づいて製作したOTR光学を図3に示す。



図3：OTR光学システム

3.2 光学調整および性能試験結果

続いてレーザーを用いて光学調整を行った。光学ベースの高さおよび位置調整の後に、主鏡の調整を行い、その後にレンズ、IIT、カメラの位置を調整した。その後OTRスクリーンと同じサイズである141 mm x 100 mmのテスト標的を45度傾けて設置した。このテスト標的には分解能の評価のために格子状に1 mm幅もしくは3 mm幅の線を入れた。

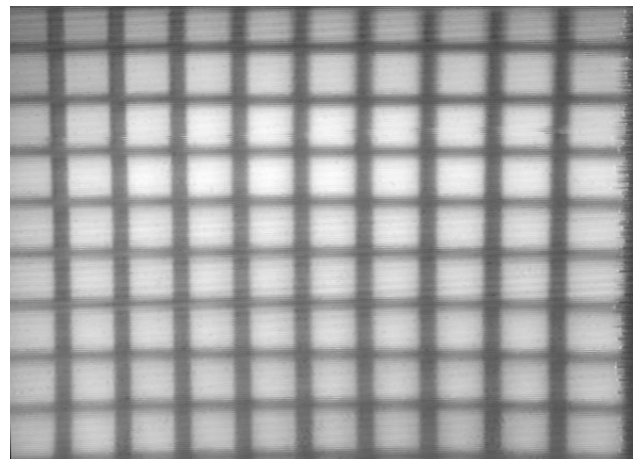


図4：IIT面でのテスト標的のイメージ

図4はIIT面にカメラを置いて観測したテスト標的

² <http://www.zemax.com/>

(3 mm幅線)の像である。若干の歪曲が認められるが、これは後の画像処理で対処可能である。また、上端、下端近辺が若干分解能が劣化しているのは、スクリーンが斜めであることにより許容錯乱半径が大きくなっているためである。

続いてIIT蛍光面にIIT面のテスト標的像と同じ大きさの標的を設置してカメラ面での像を確認したのが図5である。

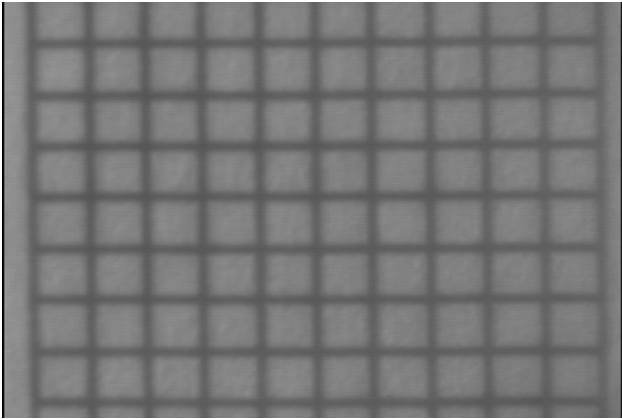


図5：IIT像をカメラで観測したイメージ

分解能、各種収差ともに問題がないことがわかる。最後にIITを稼働してテスト標的像(1 mm幅線)をカメラで観測したのが図6である。

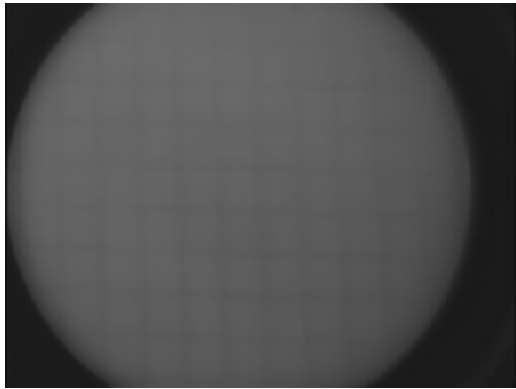


図6：テスト標的像

主光学部の歪曲の影響がでていいることが分かる。またこの図からも分かるように十分な倍率が出ている、つまり条件4を満たすことが分かる。

続いてこの図を一部切り出してX射影およびY射影したヒストグラムを解析することで分解能を評価した。図7に典型的なフィットの様子を示す。この評価を中央近辺および周辺部においてそれぞれ評価し平均化を行った結果、X方向の分解能は平均1.03 mm、Y方向の分解能は平均1.13 mmとなった。分解能劣化の最も主要な原因はIITの分解能である。これにより条件5を満たすことが確認できた。

最後に周辺減光の評価を行った。これは、図6を標的のイメージ分布で規格化することによって評価した。その結果、周辺減光は5%未満であることが確認され、プロファイル測定に問題がないことが確認された。

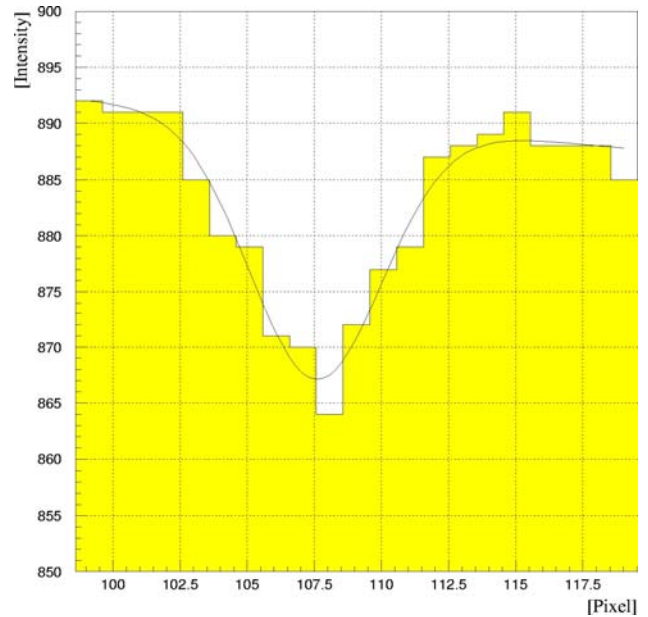


図7：X射影したヒストグラム

4. 結論

前回のファイバー光学で判明したバックグラウンドの問題を解決するために、ニュートン型望遠鏡を基にした光学を新規に設計開発した。これは非常に放射線が強く、バックグラウンドの多い環境でも利用できる光学として有用である。この光学とOTRチャンバーを組み合わせるにより、J-PARCハドロンビームラインの取り出し部近辺のプロファイル測定が可能となった。

5. 謝辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費基盤研究(A)(15204024、17204019)、若手研究(B)(17740169、20740155)を受けてなされた。

参考文献

- [1] <http://www.j-parc.jp/>
- [2] A. Toyoda et al, "Development of OTR beam profile monitor for J-PARC hadron beamline", 第2回日本加速器学会年会プロシーディングス, pp. 763-765
- [3] K.H. Tanaka et al, "Improvement in the profile and emittance measurement system of the KEK-PS external beamline", KEK preprint 91-27
- [4] A. Toyoda et al, "Development of OTR beam profile monitor for J-PARC hadron beamline(2)", 第3回日本加速器学会年会プロシーディングス, pp. 478-480