

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

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

豊田晃久[#], 青木和也, 上利恵三, 秋山裕信, 家入正治, 加藤洋二, 倉崎るり, 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, 森野雄平, 山野井豊, 渡辺丈晃

Akihisa Toyoda[#], Kazuya Aoki, Keizo Agari, Hironobu Akiyama, Masaharu Ieiri, Yohji Kato, Ruri Kurasaki, Yoshinori Sato, Shinya Sawada, Yoshihisa Shirakabe, Hitoshi Takahashi, Kazuhiro Tanaka, Erina Hirose, Michifumi Minakawa, Yuhei Morino, Yutaka Yamanoi, Hiroaki Watanabe
KEK

Abstract

The high-p beamline, which is a beamline currently under construction at the J-PARC hadron experimental facility, is a beamline that extracts and uses small amount of primary proton beams from the currently operating A-line. Since the beam line loses the beam at the extraction point, the radiation level is high, but the beam intensity is relatively low. Thus, a highly sensitive and radiation resistant profile monitor is required. To achieve this goal, we are developing a monitor that converts the ionized electrons generated by residual gas into light, efficiently transmits it to low radiation level area, amplifies the light and measures the profile. In this article, we will present evaluation of signal and background levels, design and test of electrodes for accelerating ionizing electrons, optimization of optical system to transmit light, and prospects.

1. はじめに

J-PARC[1]ハドロン実験施設[2]に現在建設中のビームラインである high-p ビームラインは、現在稼働中の A ラインから一部の一次陽子ビームを取り出して使用するビームラインである。このビームラインは取り出しでビームロスするため、放射線レベルは高いが、ビーム強度は比較的低いいため、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。そこで残留ガスで生じた電離電子をバックグラウンドの低い光に変換し、放射線レベルの低いところまで高効率で伝送し、光増幅してプロファイル測定するモニタを考案し実用化に向けて R&D を進めている。今回は信号量とバックグラウンド評価、プロトタイプ製作、および光学最適化について述べる。

2. 原理

Figure 1 に今回開発する検出器の概念図を示す。真空チャンバー中を陽子ビームが通過すると、真空中に残留するガスを電離する。その電離電子の分布はビームプロファイル情報を保持しているのので、それを X もしくは Y 方向に引き出すとプロファイルの射影情報が得られる。これが残留ガスイオンプロファイルモニタ(RGIPM)である。ハドロンビームラインは放射線場が強いため MCP やアンプなどの増幅装置がすぐ壊れてしまい、信号量確保が難しいが、真空度を 1 Pa 程度で運用することで十分な信号量が得られ、A ラインのプロファイルモニタとして 2009 年の運転開始以来使用している [3]。

A ラインのビーム強度は現在 5.5×10^{13} protons/spill で、運転サイクルは 5.2 秒、遅い取り出しスパル長さは約 2 秒である。それに対して high-p ビームラインのビーム強度は 1×10^{10} protons/spill 程度と A ラインに比べて 3 桁低いいため、真空度 1 Pa 程度では十分な信号量が得られない。そのため、ビーム調整時だけ真空度を悪化させてプロファイル測定する予定だが、連続運転中は実験バックグラウンド低減のために 1 Pa 程度に戻す必要がある。

そこで今回は電離電子を蛍光体に当てて、その発光を大立体角光学系とイメージ増幅器(IIT)を利用して信号増幅することで高感度 RGIPM(HSRGIPM)を実現する。IIT の発光をカメラで観測することでプロファイル射影の情報を得られる。放射線に比較的弱いカメラ系をビームラインから離すことで耐放射線性を確保する。

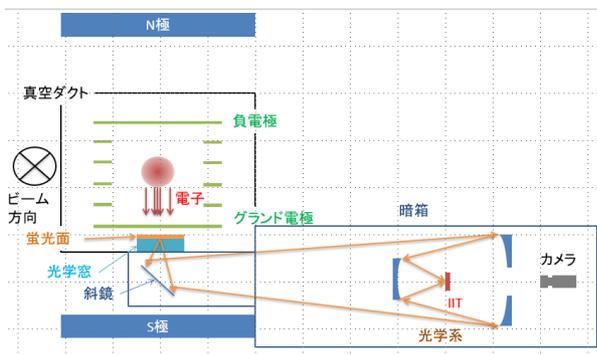


Figure 1: Schematic view of detector setup.

[#] akihisa.toyoda@j-parc.jp

3. 信号量とバックグラウンド評価

今回開発する高感度 RGIPM について、十分な収量および S/N が得られるか、耐放射線性能は十分かどうかを以下に評価する。設置位置は周辺の磁場の影響が少なく、ビームプロファイルが狭い場所を選んで high-p ビームラインの中流にあるコリメータ付近とした。

3.1 信号量評価

カメラで十分な光量が得られるために、以下の条件を満たす必要があることが評価された。

- 主鏡の直径が 250 mmφ。
- ビーム中心から主鏡までの距離が 1.5 m。
- 蛍光体の発光効率が 50 photons/電離電子。
- IIT ゲイン 10^6 。

第 1 項目、第 2 項目については、光学の他の要請も満たす必要がある。詳しくは第 5 節を参照されたい。第 3 項目については、P43 もしくは P22 蛍光体を利用し、電離電子を 5 keV まで加速すれば十分達成できる。第

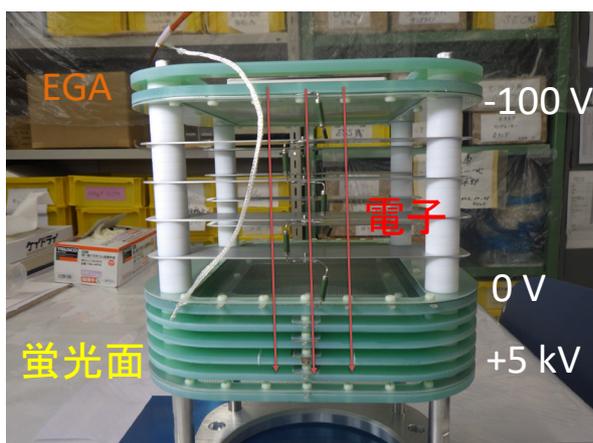


Figure 2: Picture of the prototype inner electrode.

4 項については 2 ステージ IIT で達成可能である。

3.2 バックグラウンド評価

まずバックグラウンドを評価する方法について述べる。ハドロンビームラインには 2009 年の運転開始以来稼働している実績のある OTR(Optical Transition Radiation)プロファイル検出器[4-6]がある。OTR 検出器の詳細は以下の通り。

- 主鏡の直径が 350 mmφ。
- ビーム中心から主鏡までの距離が 5 m。
- ビーム中心から窓までの距離が 50 cm。
- IIT ゲイン 10^6 。
- 設置位置は比較的ロスが大きい取り出し部下流。
- 運転開始以来、窓やカメラ系の放射線ダメージは小さく、一部のパーツを 5 年に一回交換する程度。

この OTR とバックグラウンド量を比較することで、機器の耐放射線性や S/N を評価する。

Table 1 に窓および IIT 位置でのバックグラウンド量の比較を示す。high-p ビームラインはまだ完成していないので、HSRGIPM の値は MARS[7]を用いた計算値、

OTR については実測値である。これによると窓および IIT 位置のいずれについても十分 OTR より小さい値になると予想されている。よって、窓や IIT、カメラ系の耐放射線性に問題ないと評価された。バックグラウンドについても同様で OTR 位置より 1/10 程度もしくはそれ以下のバックグラウンドになる。実際、OTR において IIT ゲイン最大でダイナミックレンジの最大 13 %のバックグラウンドが観測されているが、HSRGIPM ではその 1/10 程度になると見積もっているので 1 %程度まで低減すると予想される。よって耐放射線性およびバックグラウンドに問題はないと評価している。

Table 1: Position Dependence of the Background Amount for the OTR and HSRGIPM. Each Data is Normalized by the OTR Value.

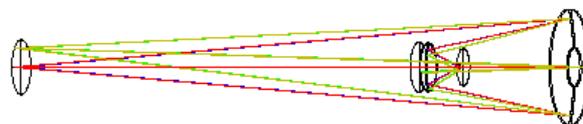
	窓	IIT
OTR	1	1
HSRGIPM	0.111	0.05

3.3 S/N の蛍光体厚さ依存性

Table 2: Thickness of Each Phosphor Screen with S/N of 1

	P43	P22
S/N=1 の厚さ	80 μm	140 μm

他に懸念されることとしては、蛍光体にダイレクトヒットして生ずるバックグラウンドである。そこで Table 2 にそれぞれの蛍光体に対する S/N=1 になる厚さを示した。これも MARS を用いた計算値をスケールして評価している。これによると十分薄い(例えば 20 μm など)蛍光体を利用すれば十分な S/N が確保できることが分かる。



i.

Figure 3: 3d layout of the optical design.

4. 内部電極プロトタイプ

蛍光体の発光効率の電離電子エネルギーおよび厚さ依存性については、特にエネルギーが低く、蛍光体が薄い領域についてはデータがほとんどない。よって、Fig. 2

に示すような内部電極プロトタイプを製作して試験することにした。電離電子を模擬するために、今回は PHOTONIS 社[8]の EGA(Electron Generator Array)を利用する。EGA で発生した矩形の電子が内部電極で加速されて蛍光体に入射し発光する。この発光をカメラで裏面および表面から観測して収量を評価する。試験項目としては以下の内容を考えている。

- 高電圧がかかるかどうか。
- 発光量の電圧依存性。
- 発光分布の一樣性。発光体が薄すぎると一樣性が低くなると予想される。
- 発光量の蛍光体厚さ・種類依存性。発光体が不透明なため、遮光の効果があり、厚くしすぎると不利になると予想される。
- 電圧分布の一樣性。発光部のエッジの様子を観測することで電圧分布の一樣性が評価できると考えている。

5. 光学最適化

Table 3: An Optical Parameters Summary of Target Values and Simulation Results are Presented. The Simulation Results are for the Hyperbolic Mirror and the Polynomial Mirror.

	作動距離 (m)	主鏡直径(mm)	倍率	分解能 (mm)
目標値	1.5	250	1/5.5	1.0
双極面鏡	1.5	250	1/5.6	0.8
多項式鏡	1.5	250	計算中	計算中

Figure 3 に今回採用予定の光学の 3 次元レイアウトを示す。様々な光学を検討した結果、今回は OTR 検出器でも実績のある凹面鏡 2 枚で構成された光学を採用する予定である。OTR 検出器でもそうだが、近軸光線に最適化すると周辺の性能が下がるので、全体の性能を向上するようにシミュレーション条件を変えて計算した。必要な分解能と倍率を達成できるような光学をサーベイした結果が Table 3 である。現時点で主鏡に双極面鏡を採用した光学で必要な性能が出せることを確認している。鏡の作りやすさを重視して主鏡と副鏡を多項式鏡にした場合を現在計算しているところである。

6. まとめ

J-PARC ハドロン実験施設の新規ビームライン high-p ビームライン用常時プロファイルモニタを開発中である。そのためには耐放射線性能が高くかつ効率も高い必要がある。今回、残留ガスの電離電子を光変換することでバックグラウンドを低減しつつ高ゲインで検出できると評価した。現在プロトタイプを用いた内部電極の試験を実施しつつある。また大立体角の光学を現在シミュレーション中である。今後は上記試験結果を受けて実機を製作し、high-p ビームラインにインストールしてビームを用いた性能評価をおこなう予定である。

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] Y. Sato *et al.*, “Profile Measurements of Proton Beam with Residual Gas Ionization Profile Monitors at J-PARC Hadron Facility”, 第 8 回日本加速器学会年会プロシーディングス, pp. 485-487.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] A. Toyoda *et al.*, “Development of OTR beam profile monitor for J-PARC hadron beamline (3)”, 第 5 回日本加速器学会年会プロシーディングス, pp. 304-306.
- [7] MARS Web page; <https://mars.fnal.gov>
- [8] PHOTONIS inc. Web page; <http://www.photonis.com>