

## マルチスクリーン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

### A TWO-DIMENSIONAL BEAM PROFILE MONITOR HAVING HIGH DYNAMIC RANGE BY USING MULTI-SCREEN

手島昌巳<sup>A)</sup>, 橋本義徳<sup>#,A)</sup>, 三橋利行<sup>B)</sup>, 大津 聡<sup>C)</sup>, 外山 毅<sup>A)</sup>  
 Masaki Tejima<sup>A)</sup>, Yoshinori Hashimoto<sup>#,A)</sup>, Toshiyuki Mitsuhasi<sup>B)</sup>, Satoru Otsu<sup>C)</sup>, Takeshi Toyama<sup>A)</sup>  
<sup>A)</sup> KEK/J-PARC, <sup>B)</sup> KEK, <sup>C)</sup> Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd.

#### Abstract

A two-dimensional beam profile monitor with a high dynamic range for 3-50 BT at J-PARC has been developed. For measuring the beam core and the halo alternatively, the monitor has three kinds of screens. The first one is titanium foil OTR screen (thickness of 10  $\mu\text{m}$ ) to measure a beam core, the second one is aluminum foil OTR screen (thickness of 100  $\mu\text{m}$ ) having a hole (50 mm diameter) in the center, and the last one is a pair of alumina fluorescent screen with a separation of 80 mm in horizontal to observe the beam halo in surroundings. We designed an optical system based on the Offner optics for the observation of fluorescence and OTR lights. This optical system has an entrance aperture of 300 mm and it can cover the large opening angle ( $\pm 13.5$  degree) of the OTR from 3GeV protons. A CID camera with an image intensifier (I.I.) was used to observe the profile. We have succeeded to observe a profile of beam halo to  $10^{-6}$  order to the peak of beam core by using proton beams of 3GeV,  $9.6 \times 10^{12}$  protons/2bunch by this multi-screen scheme.

#### 1. はじめに

ハロー領域までを含めたビームプロファイルモニターは、特に大強度加速器の運転においては、ビームコリメーションを診断し最適化を図ること、またロスを制御するなどの重要な診断の役割を受け持つ。そして2次元での測定ではさらに高度な情報を得ることができる。

我々は、J-PARCのMRへの入射路である3-50 BTのビーム診断装置として、まずOTR光を用いたビームプロファイルモニターを開発した[1, 2, 3]。このモニターでは、 $1e10$  p/bunch以上の強度のビームからの光を検出できることを確認した。ビームコア部の2次元プロファイルは、 $5e11$  p/bunch以上で有意に診断できた。3GeVのビームを感度を上げてOTR光で計測することはそれほど簡単ではない。ビームエネルギーが3GeVであるため、ビームの $\gamma$ に依存した角度広がり $\pm 13.5^\circ$ と大きいこと、さらに $\sigma$ が15mm程度のサイズの大きなビームであることなどのハンディキャップがあるためである。これらを克服するために、受光口径300mmの大きな凹面鏡を持つOffnerリレー光学系を採用して、OTR光の収率を上げる工夫を行ったことが、この成功の鍵となったと考えている。

現在、さらなる高感度化を目指しての開発を進めている。特にビーム周辺のハロー領域の計測がそのポイントである。検出器を高感度化する方法や、さらなるOTR光の収率を高める方法などの具体化も進めている。これらはOTR光だけを用いて高感度化を図る方法である。別の観点からのアプローチとして、ビーム周辺のハロー領域に限定して、OTR光

を使わずに、より発光量の高いスクリーンを用いる方法を今回採用した。特に $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}$  (アルミナ)のスクリーンは発光量も高く残光が長い時間に亘って続くためにその光量を積分することで収率を増やすことができるアドバンテージを持つ。同じ観点に立つての次のステップとしては、OTRターゲットとアルミナスクリーンを一緒にマウントしたターゲットを用いて、ビームコアとハローの同時試験を試みる予定であったが、夏前のスタディーでは時間切れであった。

#### 2. マルチスクリーンと測定光学系

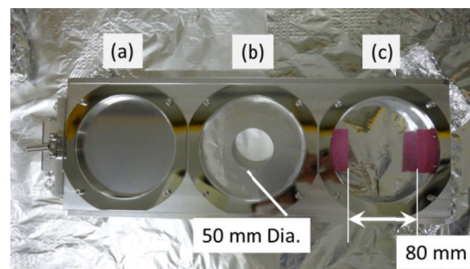


Figure 1: The multi screen. (a) Titanium foil of 10  $\mu\text{m}$  (TS). (b) Aluminum foil of 100  $\mu\text{m}$  having a hole of 50 mm dia. (50S). (c) Cr doped  $\text{Al}_2\text{O}_3$  screens of 0.5 mm (AS).

マルチスクリーンは、Fig.1のように円形の3連で構成されており、リング内径は120 mm、スクリーンのピッチは150 mmである。これらは一つのフレームに収められており、水平方向にステップモータにより直線導入され、ビームコアからテールのハロー領域までを切り替えて使用する。また図(b), (c)のスクリーンのエッジをビームに対して任意の

# yoshinori.hashimoto@kek.jp

位置にセットすることができる. 図(a)の  $10 \mu\text{m}^2$  チタンフォイルのソリッドスクリーン(TS)の非平坦性は,  $22(\pm 7.5) \mu\text{m}$  である[4]. 同図(b)の  $50 \text{ mm}$  直径の穴あきターゲット(50S)は, ビーム周辺を OTR 光で計測し, 同図(c)のアルミナスクリーン(京セラ A486: AS)では, 蛍光(Fluorescence Light: FL)を用いて, さらに周辺のハローを高輝度で計測する役割を持つ.

光学系は  $3\text{GeV}$  陽子ビームからの OTR 光を前提に設計してある. OTR 光は, ビームの速度に関するパラメータ  $\gamma$  に強く依存した特性を持つ. 放出光子数は, OTR 光の波長領域( $\omega_1, \omega_2$ )の関数として, 次式で表される[5].

$$N = \frac{2e^2}{\pi\hbar c} \left| \ln(2\gamma) - \frac{1}{2} \ln \frac{\omega_2}{\omega_1} \right| \quad (1)$$

$3\text{GeV}$  陽子で可視域の光の放出光子数は,  $2.5 \times 10^{10}$  photons/ $10^{13}$  protons となる[1,3]. また OTR 光の放出角度分布は, 光速比  $\beta$  を用いて次式となる[5].

$$I(\theta) = \frac{1}{\gamma^2} \left| \frac{-\sin(\theta)}{1 - \beta \cos(\theta)} \right|^2 \quad (2)$$

$3\text{GeV}$  の場合の放射角分布(Fig.2)は, 放射角ピークが  $\pm 13.5^\circ$  となり大きな広がり角を持つ.

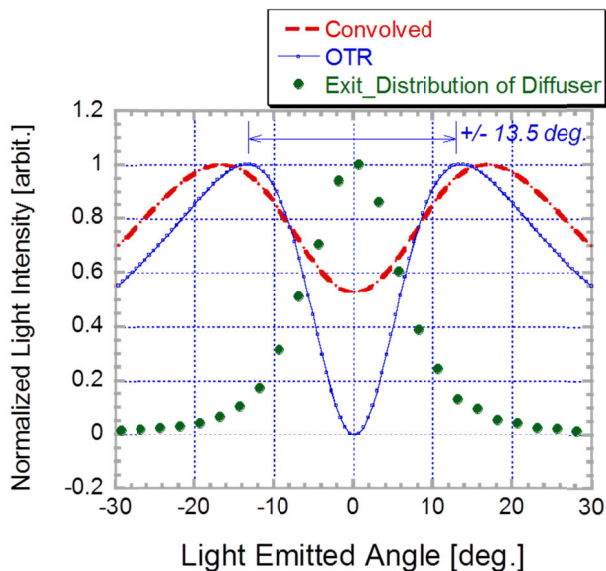


Figure 2: Calculated emitted OTR angle distribution ( $I(\theta)$ ) with  $3\text{GeV}$  Proton (blue thin solid line). Green point marker means measured exit angle distribution of the diffuser screen. Red dotted curve means their convolved value.

また, OTR 設置位置でのビームサイズは,  $15 \text{ mm}$  ( $\sigma$ )程度であり, ビームテールのハロー領域は  $100\text{mm}$  近いと予想された.

我々は, このような広がりを持った OTR 光の計測のために, 受光口径  $300\text{mm}$  (受光角  $\pm 15^\circ$ ) の

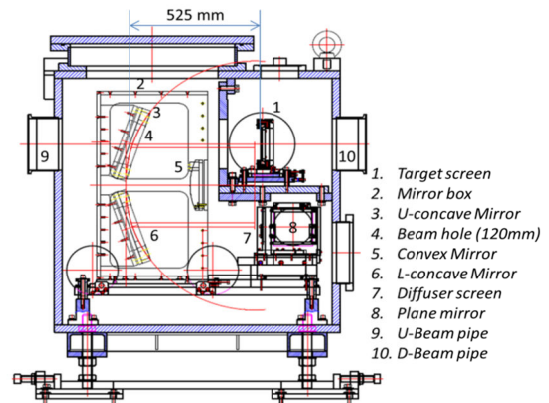


Figure 3: The OTR chamber containing the Offner optical relay system.

Offner 光学系をもつ装置を製作した(Fig.3, [1,2,3]). Offner 光学系の焦点面には, 拡散板スクリーン (Diffuser Screen: DS, 厚み  $5\text{mm}$ : 研磨#300, 砂ずりの粒径  $100 \mu\text{m}$  以下, 合成石英) を置き, OTR 光の指向性を緩和させる. DS での拡散面からの出射角分布は, 波長  $650 \text{ nm}$  の半導体レーザー光を用いてテストベンチで計測した結果, FWHM は  $14^\circ$  であった(Fig.2). この DS の出射角分布と OTR の放射角分布とのたたみ込み積分した結果を Fig.2 にプロットした. 大気側の計測器 (光学系) は DS に焦点を合わせてこのカーブの角度分布をもつ光を検出する.

OFFNER 光学系の特性をテストベンチで測定した. 焦点深度は,  $\pm 10 \text{ mm}$  程度であった. 垂直と水平方向での焦点位置が  $3\text{mm}$  程度異なるアスティグマティズムが見られた.  $10 \text{ mm}$  ピッチのグリッドスクリーンを用いた評価(Fig.4)では, 水平方向  $\pm 100 \text{ mm}$ , 垂直方向  $+30/-60 \text{ mm}$  の範囲で良い結像を見た. 中心部では,  $0.2 \text{ mm}$  程度の空間分解能を持つ. 垂直上方方向 (反転) の領域が狭くなるのは, 中央の凸面鏡で視野を削っていることの影響である.

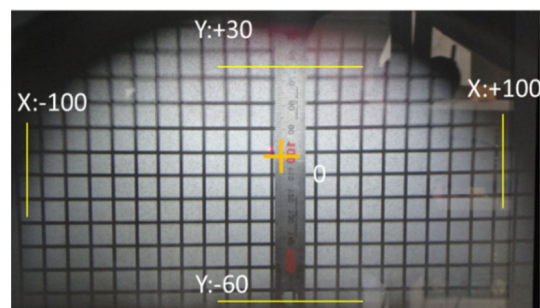


Figure 4: A result of focusing test on the actual Offner optics at a test bench.

### 3. 測定装置

測定装置は, 集光レンズ, Image Intensifier (I.I.) をリレーレンズで CID (Charge Injection Device) カメラに接続する構成である. CID カメラのビデオ出

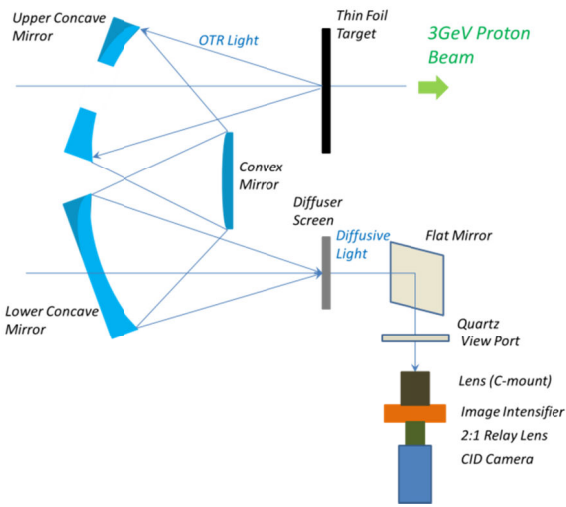


Figure 5: Detector setups. The path length from the thin foil target to the front of the detection lens was almost 2300 mm.

力信号は、約 400m 遠隔の電源棟まで、5D サイズの同軸ケーブルで転送し、10 bit Video ADC でデジタル化している。測定装置のセットアップを Fig. 5 に示す。DS からレンズフロントまでの距離は 560 mm であり集光レンズの開口角は  $2.7^\circ$  である。この集光角では、Fig.2 の Convolved カーブを見ても明らかのように、大きな放射角分布をもつ OTR 光に対しての収率が悪い。OTR スクリーンで発生した全光子の  $10^{-5}$  程度の検出率となる。測定装置の主要なスペックは Table 1 にまとめる。

Table 1: Specifications of the detecting devices.

Device	Item	Specification
Focus Lens [YakumoYMV2595N]	Focal Length	17 mm
	F number	0.95
	Image Format	1" (16 mm dia.) 12.8×9.6
	Front Aperture	26.8 mm
Image Intensifier [HPK V2697U]	MCP	Single Stage aperture 18 mm
	Luminous Gain	12000[lm/m <sup>2</sup> /lx] at MCP 900V
	Resolution	30 [lp/mm]
	Phosphor Screen	Persistence: ~1ms
Relay Lens	Magnification	0.5
CID Camera [ThermoFisher8725D]	Radiation Tolerance	300kGy
	Image Format	1"
	Sensitivity	0.1 lx

また I.I.のゲインカーブを Fig.6 に示す。I.I. のゲインを変えて、同じ条件のビームプロファイルを計

測しその光量を 10bit ADC で計測して 2 点の比を求める方法により、カーブとしてつないだものである。実際のビーム計測時には、ゲインを変えても計測したビーム幅が変化しない電圧範囲を求め、その中心値に MCP 電圧をセットしている。

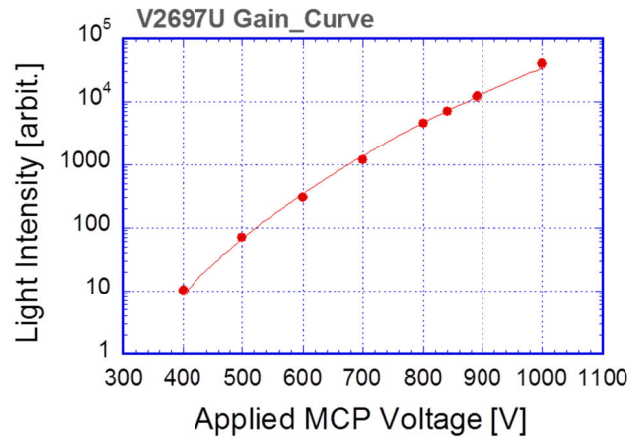


Figure 6: The gain curve of the image intensifier (Hamamatsu V2697U). Plotted data were measured with light quantity by beam profiles.

## 4. ビームプロファイルの測定

### 4.1 OTR 光による大強度ビームの測定

将来のために現在の営業運転時の 3e13/2bunch よりも高い強度である 4.2e13/2bunch のビームによる加速器スタディーが行われ、OTR ターゲットでのビームプロファイルをシングルショットで計測した結果を Fig.7 に示す。

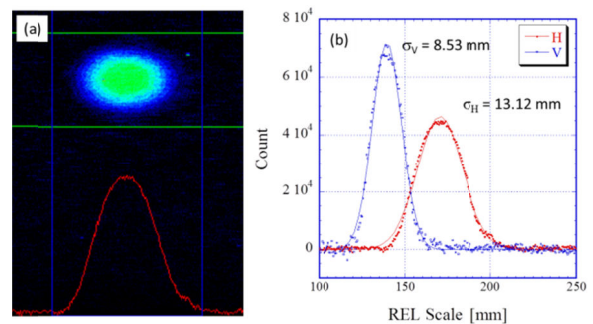


Figure 7: An one-shot beam profile by OTR light with a two bunches their total intensity was 4.2e13 protons. (a) The image data. (b) Projected data. Each fitted line is Gaussian.

測定時の I.I. の MCP 電圧は 850V であった。図のように S/N の良いほぼ Gaussian に近いプロファイルが得られた。大強度ビームではテール部が目されるが、水平(H)では右側テールに小さなコブが見られ、左側テールでは細くなっているなどのアンバランスが見られた。

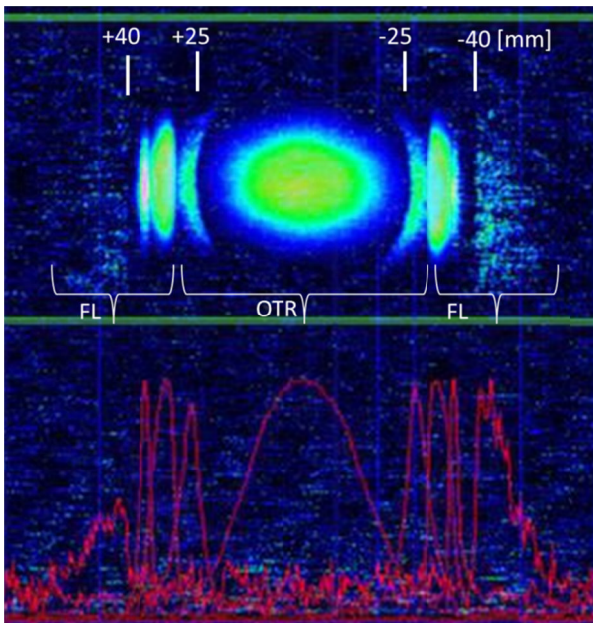


Figure 8: A superimposed data measured with OTR and fluorescence lights.

#### 4.2 OTR 光と FL 光を用いた高感度測定

ビームコアからハロー領域のビームテイルまでを、やや低めのビーム強度である遅い取出しの営業運転モードの  $9.6e12/2bunch$  において計測した。測定には、Fig.1 の 3 種類のスクリーンを用いた。それぞれの測定では、I.I.のゲインを光量に応じて最適化している。また I.I.ゲート時間を  $10 \mu s$  にセットし、 $2 bunch/shot$  で、平均化するために連続する 5 ショットを取得した。またデータからビーム不在時のバックグラウンドを差引いている。

測定データをスーパーインポーズした図を Fig.8 に示す。中央のビームコアは TS により、そのすぐの外側の三日月型のテイル部は 50S により、共に OTR 光を測定した。さらに外側の左右それぞれ 3 つのプロファイルは、AS からの FL 光によるものである。図の下の水平方向に射影したプロファイルはピーク値でノーマライズしたものである。尚、以下の解析は、全て水平(H)方向に射影したプロファイルを用いて行った。

#### 4.3 OTR 光と FL 光の光量比

これらのプロファイルデータをつないでひとつながりの空間分布を作成するためには、次が必要である。

- i) OTR 光と FL 光の収量比
- ii) I.I. のゲインカーブ

ii)は、Fig.6 で求まっているので、i)を測定するために、 $\pm 25mm$  にセットした AS からの FL 光を用いたプロファイルと 50S からの OTR 光のプロファイルの比較を行った(Fig.9)。この測定時の I.I.の MCP 電圧は、OTR 光計測のとき  $1000 V$ 、FL 光測定するとき  $500V$  であった。

図の(c), (d) に赤と青のマークでそれぞれ OTR, FL のプロジェクションを示す。FL/OTR の収量比を求めるには、まず測定データの面積(カウント)比を求め、次に MCP ゲインの補正を行う 2 段階の手順を行った。

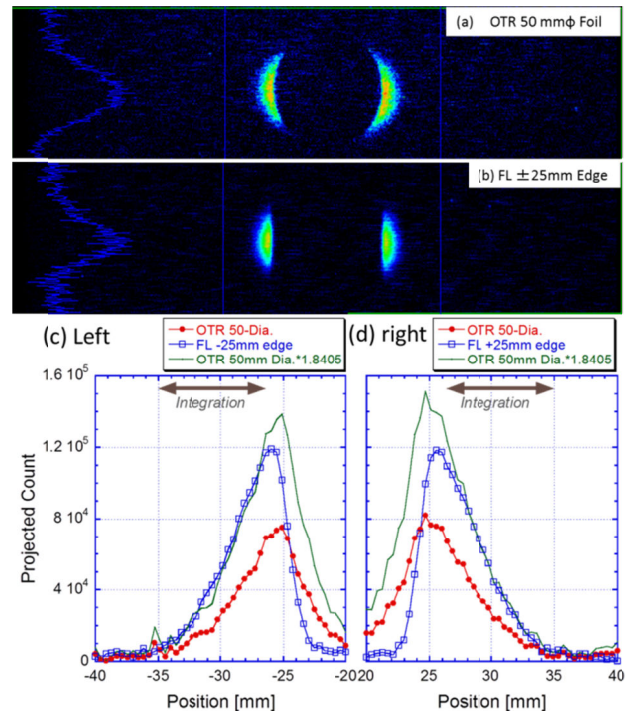


Figure 9: Comparison of beam profiles of by OTR light with by fluorescence light. (a) and (b) are profile images, (c) and (d) are their projected profiles. In (c) and (d), green solid lines are both corrected OTR's curve by light quantity ratio of FL/OTR. Both the corrected lines agree with FL curves.

まず、図中の両矢印の領域である  $[-35, -26.5] mm$  及び  $[26.5, 35] mm$  の範囲で、カーブを積分して、FL と OTR の面積比を求めた。ビーム左側の(c)のプロファイルでの比の値は  $1.908$  であり、右側の(d)のプロファイルでの比の値は  $1.773$  であった。これらから左右の比の平均として、面積比  $FL/OTR=1.84 (\pm 3.7\%)$  となった。(c), (d)で、元の OTR のデータを  $1.84$  倍したものを、それぞれに緑のマークでプロットした。これと FL(青)は、スロープの部分でよく一致していることを確認した。

次に、OTR データ取得時の MCP 電圧  $1000V$  と FL の  $500V$  での収量比を補正するために、Fig.6 のカーブから、ゲイン比  $MCP1000V/MCP500V$  を求めると  $5.0e4/7.0e1=714.3$  である、したがって、面積比  $FL/OTR$  にこのゲイン比を乗じて、収量比  $FL/OTR=1.84 \times 714.3=1314.6$  となった。

ただし、この値は次の 2 つの条件を考慮すべきものである。一つは、測定時の I.I. のゲートが  $10 \mu s$  であり、これが FL 光に積分効果をもたらすことである。発光時間が正味の 2 バンチのビーム時間幅 ( $200ns \times 2 bunch$ ) だけの OTR 光に対し、FL 光の残光

時間は長く、数 100ms 以上であるために、ゲート時間全ての発光であったことである。このため正味の積分時間比は、FL/OTR=10 $\mu$ s/400ns $\sim$ 25 程度と見積もることができる。この値は今後、I.I.ゲート時間を変えて正確に測定する予定である。二つ目は、光の放出角分布が、OTR 光と FL 光では異なることである。OTR 光が Fig.2 に示す放出角分布を持つのに比べ、FL 光は等方に分布している。このことは DS での拡散を含めた Offner 光学系と 2 次光学系を合わせた全体の透過光収率に差が生じることになる。これらの定量的な評価は計算も含めて今後の課題である。

#### 4.4 OTR 光と FL 光を用いた高感度測定への解析

さて、上記のようにして実測の光量値で補正することにより FL 光相当の OTR 光のプロファイルを求めることができた。同じ方法により、残りのデータである TS からの OTR 光と FL 光の測定データを全て FL 光相当で、かつ同じ I.I. ゲイン相当の値に補正した。それら全ての補正データをプロットしたものを Fig. 10 に示す。

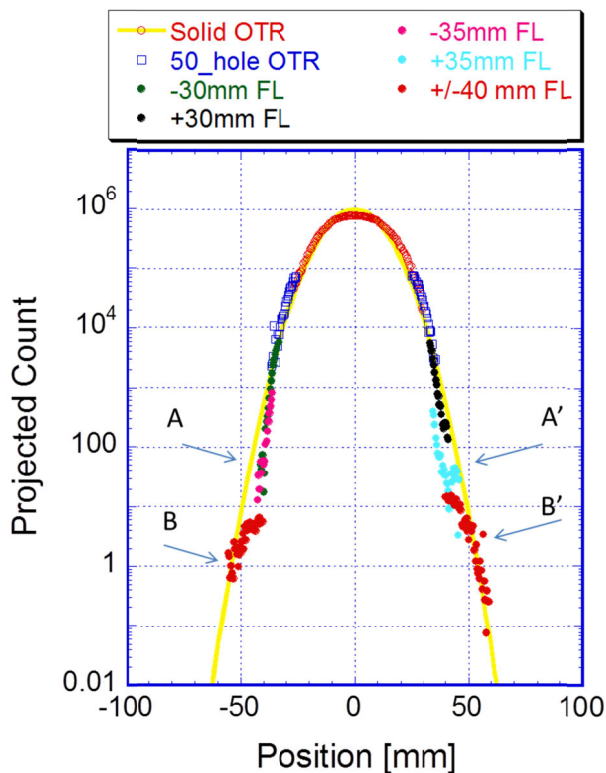


Figure 10: A summarized projection data measured with OTR and fluorescence lights. Each data was corrected with the gain of the image intensifier and ratio of light quantity of fluorescence and OTR lights.

全体のデータがほぼ素直な形につながり、ピークに対して 10<sup>6</sup> 以下までのデータを得たことがわかった。黄色の実線は、ビームコアの計測の TS からの OTR 光のデータだけを使った Gaussian フィットのカーブであり、その  $\sigma$  は 10.3 mm であった。また

ビーム領域は 100mm 以上にまで及んでいることがわかる。さらに、その形状に注目すると、図の A, A' の領域は、FL 光を  $\pm 35$  mm の位置にエッジをセットして計測したデータであるが、Gaussian カーブから内側に寄っている。このことは計測地点の 122 m 上流に位置するビームコリメータでのビームテイルのカットの形状を示している可能性がある。また逆に、図の B, B' の領域では再び広がっており、ほぼ Gaussian カーブに乗っているが、これはカットされたビームが新たなハローを生成している可能性もある。今後、ビームコリメータでのカット位置を変えて、ビームハローの形状との相関をスタディーする予定である。

## 5. まとめと今後の課題

OTR 光と蛍光でのプロファイル測定を組み合わせることで、ビームの横方向の空間分布を 6 桁程度の光強度比で測定した。Cr をドーピングした Alumina Screen を用いるメリットは、残光時間が長いことである。時間積分により大きな光量を得ることができることである。今回の測定に用いた I.I. ゲート時間の 10  $\mu$ s よりもさらに時間を伸ばすことで、現在よりも下の桁までの測定が可能になると考えている。ビームから見て Alumina Screen を OTR の Solid Screen の直前のハロー領域にセットすることで、OTR 光と蛍光を同時に計測できるターゲットシステムの設計を行っている。これにより、ビームコアからハローまでをワンショットの計測で行うことができると考えている。

今回は、限られたスタディー時間での最初のハロー計測のデータとその解析を報告した。今後はシステムの特性を含めてさらに高精度な測定装置として完成度を高めてゆきたい。

最後に謝辞を記す。本装置の設計、製作、設置に関して、MR 真空グループの堀洋一郎、魚田雅彦、嶋本真幸、佐藤吉博の各氏には大変お世話になった。設計の詳細は、清和製作所の齊藤 齊氏にお世話になった。また、三菱電気システムサービスの大森雄基、秋野英之、鶴田秀範の各氏にご尽力いただき緻密な測定ができた。

## 参考文献

- [1] M. Tejima, et al., "Development of an OTR Beam Profile Monitor for 3-50 Beam Transport Line in J-PARC", Proc. 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2012, p.590-593.
- [2] S. Otsu, et al., "Target Manufacturing and Evaluation of The Optical System for The J-PARC OTR Beam Profile Monitor", Proc. 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2012, p.577-580.
- [3] M. Tejima, et al., "Development of Offner Relay Optical System for OTR Monitor at 3-50 Beam Transport Line of J-PARC, Proc. IBIC 2012, Tsukuba.
- [4] M. Tejima, et al., "Fabrication Summary on the Equipment of an OTR Beam Profile Monitor for the J-PARC 3-50BT", these proceedings.
- [5] J. Bosser, J. Mann, G. Ferioli, and L. Wartski, NIM, A238, p45(1985).