

# Development of an OTR Beam Profile Monitor for 3-50 Beam Transport Line in J-PARC

Masaki Tejima<sup>#,A)</sup>, Yoshinori Hashimoto<sup>A)</sup>, Mitsuhashi Toshiyuki<sup>B)</sup>, Satoru Otsu<sup>C)</sup>

A) KEK/J-PARC

2-4 Shirakata Shirane, Tokai, Naka-Gun, Ibaraki, 319-1195

B) KEK

1-1 OHO, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

C) Mitsubishi Electric System & Service Co.,Ltd

2-8-8 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-0045

## Abstract

A Beam Profile Monitor using the Optical Transition Radiation (OTR) in the beam transport line (3-50BT) between 3GeV Rapid-cycling synchrotron (RCS) and 50GeV Main ring (MR) has been planned in the J-PARC. The OTR monitor is conventionally used as a quasi-nondestructive, two-dimensional beam profile monitor for a beam having larger  $\gamma$  (above 10). Since the  $\gamma$  of beam is 4.2, opening angle the OTR is very wide in our case, and optics with extremely wide acceptance will be necessary for effective-extraction of the OTR from target. For this purpose, we placed a target (aluminum foil, 10 $\mu$ m thickness) normal to the beam orbit, and collecting the back emitted OTR by Offner type mirror system. The offner system is designed to collect 500mrad opening angle of OTR, and enough good field of 100mm x 100mm for large beam size (about 60mm in diameter). The summary of the plan of the OTR profile monitor and selection of it's location, and development of the Offner system are described in this paper.

## J-PARC 3-50BT の OTR ビーム・プロファイル・モニタの開発

### 1. はじめに

大強度陽子加速器施設 (J-PARC) の加速器は、Linac、3 GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS)、Main Ring (MR) から構成されている。RCS から輸送路 (3-50BT) を通って、MR に入射された陽子ビームは 30 GeV まで加速され、「遅い取り出しライン」によってハドロン実験施設へ、「速い取り出しライン」によって T2K 実験 (東海-神岡間長基線ニュートリノ振動実験) を行うニュートリノ実験施設へ送られる[1]。この 3-50BT には、図 1 に示すように 14 台のビーム位置モニタ、約 30 台のビームロスモニタ、6 台のマルチワイヤビームプロファイルモニタおよび 5 台のビーム電流モニタが既に設置されており、3-50BT のビーム軌道やビームロス、ビームサイズの測定などに有効に活用されてきた。しかし、今後 MR ビームの大強度化を目指すにあたって、ビームコアの 2 次元プロファイルとビームハローの 2 次元分布を測定することが要求されたため、遷移放射 (OTR) 光を光源に用いた光学的にビームの像を観測できる 2 次元プロファイルモニタを開発することになった。

### 2. OTR モニタ

J-PARC においては、MR における入射ビームの設計上の許容エミッタンスは、 $54\pi$  mm mrad であ

る。しかし RCS から取り出されるビームは  $216\pi$  mm mrad 程度のハローを持つため、MR でビームロスが発生し、MR トンネル全体が残留放射能で汚染され、保守点検作業が困難となる。そのため、RCS から取り出されたビームに付随してくるハローを 3-50BT の上流部に設置されたコリメータで除去して、MR にビームのコア部分のみ入射する設計になっている[2]。そのためにはビームの 2 次元プロファイル測定し、効率よくビームコアの部分のみを切り出す必要がある。そのビームプロファイル測定は、常時監視できることが望ましいので非破壊的に行う必要がある。

この目的のために耐熱、耐放射線性に優れた非破壊的ビーム・プロファイル・モニタが検討され、自

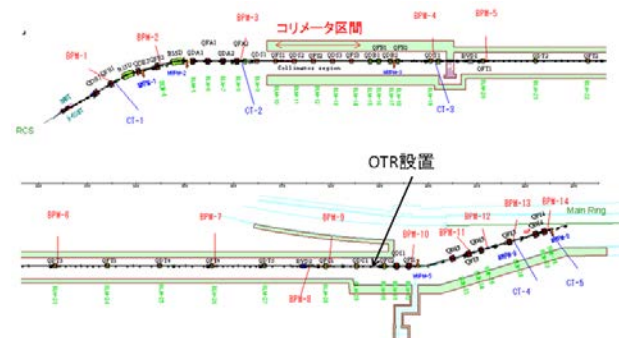


図 1 : 3-50BT の既存のビームモニタ装置

<sup>#</sup> masaki.tejima@kek.jp

身が発生するビームロスによる残留放射能を抑えて、ビームラインのメンテナンス性を損なわないようにすることも考慮した結果、そのようなビームモニタとして、金属薄膜をターゲットとするほぼ非破壊的なモニタである OTR 光を用いたビーム・プロファイル・モニタを開発することになった。

### 3. 3-50BT における OTR について

#### 3.1 OTR 光の強度と放射角について

光学的遷移放射、OTR 光は超相対論的な荷電粒子が金属箔などのターゲットを通過する際に真空と物質の境界面で放射される[3]。ビームが金属ターゲットに垂直に入射されるときには、ビームの軸方向に鋭い放射角にラディアル偏光で放射され、放射強度の最大方向は、ほぼ  $1/\gamma$  である。OTR の放射の角度広がり

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

で与えられる[4]。3-50BT の陽子ビームは 3 GeV のエネルギーに加速されており、 $\gamma$  は 4.2 になる。図 2 に  $\gamma$  が 4.2 の場合について OTR の放射角を計算したものを示す。

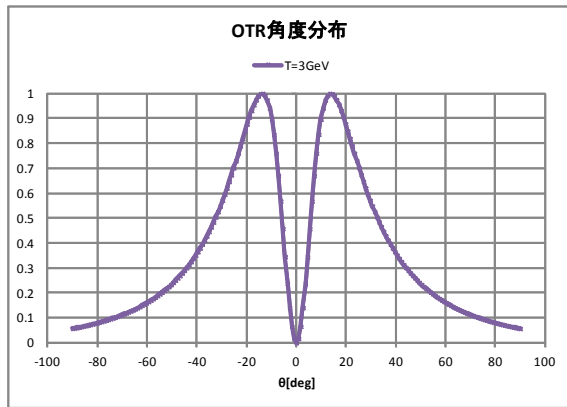


図 2 :  $\gamma=4.2$  の OTR 放射角

$\gamma$  が小さいのに伴って OTR の放射強度が最大になる角は  $\pm 13.5$  度である。したがって、今回の場合のように、3 GeV 陽子ビームよりの OTR を光源に用いてビームプロファイルを光学的に観測するためには、この大きな放射角に対応することが重要になる。

#### 3.2 OTR の可視光における強度

OTR のスペクトルは長波長から短波長まで伸びているが、結像系に使用するには可視光の部分を使うのが便利である。スペクトルの周波数  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  の

間に陽子 1 個から放射される OTR の光子数  $N$  は、次式で与えられる[5]。

$$N(\gamma) = \frac{\alpha}{\pi} \left| \ln(2\gamma) - \frac{1}{2} \ln \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} \right) \right|$$

ここで  $\alpha$  は微細構造定数である。この式を用いて、アルミニウムターゲットから放射される OTR の波長領域 400nm 800nm の範囲について積分した OTR 強度の  $\gamma$  依存性を  $\gamma$  が 2 から 100 までの範囲について計算した結果を図 3 に示す。この図から判るように、 $\gamma$  が 4 から 13 (1.2 GeV PS に相当) まで変化しても OTR の強度は 2 倍ほどしか変化しない。OTR が  $\gamma$  の比較的小さい陽子加速器において光学式のプロファイルモニタとして用いられるのはこのためである。

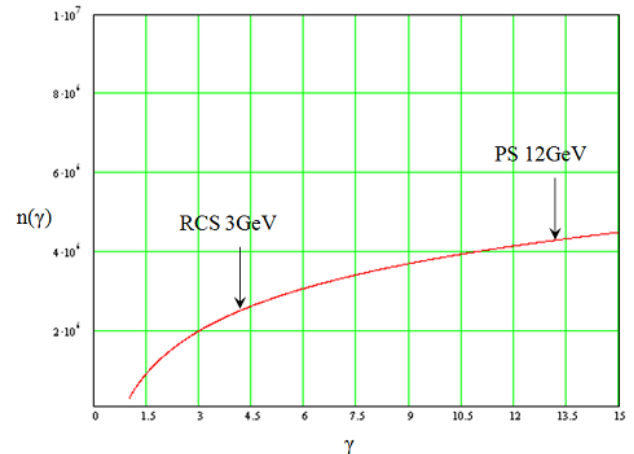


図 3 : OTR 強度の  $\gamma$  依存性

#### 3.3 金属ターゲットにおけるビームロス

3 GeV 陽子ビームの OTR に使用する金属ターゲットは、厚さ数 10 ミクロンのアルミ箔とチタン箔を選択する。この金属ターゲットに陽子ビームが入射され通過するときビームのエネルギー・ロスを起こす。

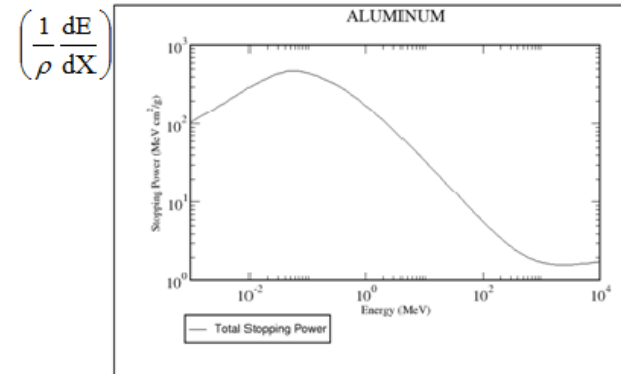


図 4 : 陽子ビームの stopping power

その大きさを National Institute of Standards and Technology (NIST)のホームページ[6]で公開されている計算コードとデータベースに基づいて計算し、図4に示す。図はアルミニウムに数 keV~10GeV の陽子ビームを照射した場合の stopping・パワーのプロットであるが、3 GeV の陽子ビームの場合、Stopping Power を図4から読み取ると、

$$\left(\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dX}\right) = 1.619 [\text{MeVcm}^2 / \text{g}]$$

となり、アルミニウムの比重が 2.69g/cm<sup>3</sup> で上の値を割ると、

$$\frac{dE}{dX} = 0.436 [\text{keV} / \mu\text{m}]$$

となる。厚さ 10 ミクロンのアルミ・ターゲットに対して 陽子ビーム 1 個当たりのエネルギー・ロス は、約 4.36 keV になる。これは 4x10<sup>13</sup> 個の陽子ビームに対して 2.2 nW のパワー・ロスに相当する。この程度のパワー・ロスであるならば、放射化と熱変形に対して心配はないと思われます。チタンの場合も同様の結果を得た。

#### 4. ターゲットの配置とオフナー光学系の設計

##### 4.1 ターゲットの配置

前節に述べたように、ターゲットとしてはアルミニウムの薄膜を用いるが、今までの OTR モニタによく見られるような、ビーム軸に対して 45° ターゲットをかたむけて、OTR をビーム軸に対して 90° の方向から観測するように配置すると、ビームサイズが 60mm と大きいのと、ハローまで観測するように広い視野 (100mm x 100mm 程度) を取ろうとすると、テレセントリック光学系を用いない限り、ビームの像を被写界深度の中に入れることが出来ないで、今回はターゲットをビーム軸に対して直角に配置することとした。

##### 4.2 OTR 取り出しのためのオフナー光学系

図-2 に示すような大きな発散角を持った OTR を有効に取り入れるためには、45°傾けた平面鏡により OTR を有効に取り出すことは難しい。一方で軸はずし放物面ミラー、または回転楕円面ミラーがによって OTR を取り出すことは可能であるが、視野が広いので収差が問題となる。そこで、比較的大口径においても収差の補正がある程度可能なオフナー光学[7] による OTR 取り出し光学系をデザインした。図5にオフナー光学系のミラー配置を示す。

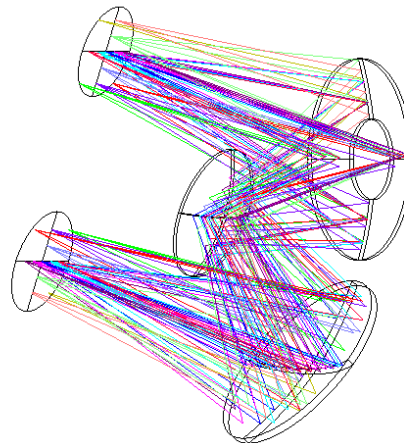


図5： 大広角オフナー・リレー・システム

オフナー光学系はダイソンの光学系[8]を反射光学系に置き換えたもので、単純な 2 枚の同心球面鏡から構成される(実用上は凹面鏡が大きくなるのを防ぐために凹面鏡を必要な面積の 2 枚に分けることが多い)。上下左右の非対称配置から生じる非点収差が大口径では気になるが、これについては凹面鏡と凸面鏡の距離を同心からはずすことにより実用上問題のない程度に軽減することが出来る。今回設計したシステムでは開口径が 300mm で F=0.75 である。また、第一の凹面鏡には陽子ビームを通すための 120mm の穴を設けている。図6に 100mm x 100mm のグリッドパターンについてレイトレースした結果を示す。これを見ると視野全面に渡って、非点収差は補正されており、ほぼ平坦な像が得られることがわかる。

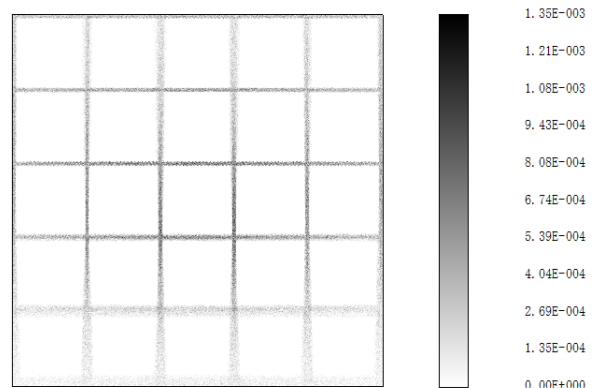


図6： 100mm x 100mm のグリッドパターンについてレイトレースした結果

ピントは大口径でもあるので、かなり甘く、空間分解能は 1mm 程度以上は期待できないが、陽子ビームハサイズが大きいので、これで十分である。

##### 4.3 ハロー・モニタ

3-50BT で輸送する陽子ビーム・バンチの粒子数

は、最大で  $4 \times 10^{13}$  / bunch の陽子数である。MR へは通常 8 個のバンチを入射する。そのビームサイズは OTR モニタ設置場所で直径が約 60 mm の断面になる。ビームハローはビームコアの粒子数に対して 1% 以下になると仮定すると、ビームハローの検出感度は少なくとも、その 10 分の 1 以下、即ちビームコアの 0.1% 以下で測定する必要がある。

そのような感度で測定するために、ビームハローのみの OTR を発生するように、コロナグラフのアイデアからヒントを得て、穴開きターゲットを採用することにした (図 7)。この場合、オフナー光学システムの視野が広いことが条件になるが、ベンチ試験 [9] では、水平に約  $\pm 100$  mm、垂直に  $+50$  mm ~  $-60$  mm と広いため、ビームハローを視野に入れることができる。

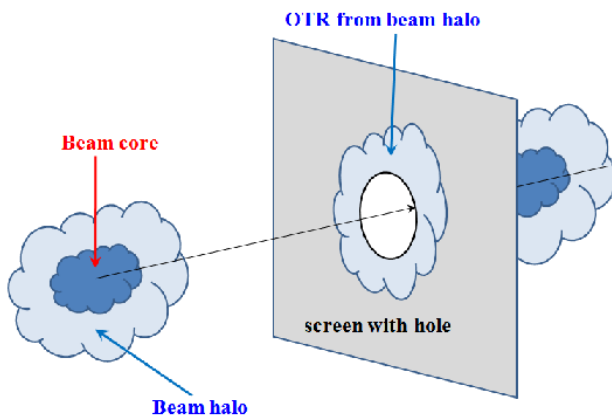


図 7 : ハローモニタ用の OTR ターゲット

## 参考文献

- [1] “Accelerator Technical Design Report for J-PARC”, KEK-Report 2002-13 and JAERI-Tech 2003-044.
- [2] M. J. Shirakata, T. Oogoe, Y. Takeuchi and M. Yoshioka, Proceedings of EPAC 2006, Edinburgh, Scotland
- [3] I. Frank and V. Ginzburg, J. Phys. USSR 9, 353 (1945).
- [4] J. Bosser, J. Mann, G. Ferioli, and L. Wartski, NIM, A238, p45 (1985).
- [5] L. Wartski, S. Roland, J. Lasalle, M. Bolore, and G. Filippi, J. Appl. Phys. Vol46, No.8, p3644 (1975).
- [6] <http://www.nist.gov/pml/data/star/index.cfm>
- [7] A. Offner, 1975 “New Concepts in projection mask aligners” Opt. Eng. 14: 131
- [8] J. Dyson, 1959 “Unit-magnification optical system without Seidel aberrations” J. Opt. Soc. Am. 49: 713
- [9] S. Otsu, et al., These Proceedings

## 5. OTR プロファイルモニタ設置場所

OTR プロファイルモニタの光学システムが大型になるため、真空容器も必然的に大きくなる。そのため、設置場所はクレーンなどの移動用重機が使える場所に限定される。また不要なビームロスを避けるため 3-50BT のビームオプティクス上の  $\beta_x$ 、 $\beta_y$  と  $\eta_x$ 、 $\eta_y$  が小さい場所を選択した。図 8 の矢印 (QDC1 と QFC2 の間) に設置する予定である。その場所は他に比べ加速器運転で受ける被ばく線量が小さい (21 mGy / month) 場所であることを確認した。

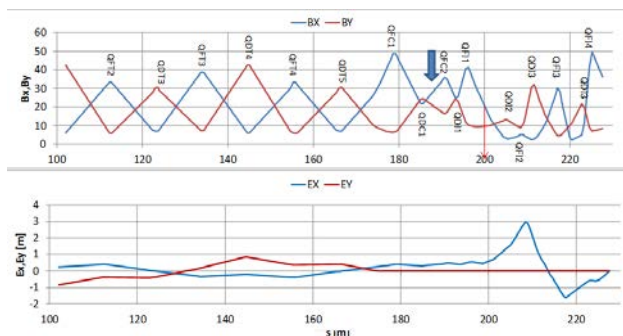


図 8 : 3-50BT の  $\beta$ -function x と  $\eta$ -function