

J-PARC 3-50 BT の OTR ビームプロファイルモニター装置の製作

FABRICATION SUMMARY ON THE EQUIPMENT OF AN OTR BEAM PROFILE MONITOR FOR THE J-PARC 3-50BT

手島昌己^{A)}, 秋野英之^{C)}, 橋本義徳^{A)}, 堀洋一郎^{A)}, 三橋利行^{B)}, 大森雄基^{C)}, 大津 聡^{#,C)}, 佐藤吉博^{A)},
嶋本真幸^{A)}, 外山 毅^{A)}, 鶴田秀範^{C)}, 魚田雅彦^{A)}
Masaki Tejima^{A)}, Hideyuki Akino^{C)}, Yoshinori Hashimoto^{A)}, Yoichiro Hori^{A)}, Toshiyuki Mitsuhashi^{B)},
Yuki Omori^{C)}, Satoru Otsu^{#,C)}, Yoshihiro Sato^{A)}, Masayuki Shimamoto^{A)}, Takeshi Toyama^{A)},
Hidenori Tsuruta^{C)}, Masahiko Uota^{A)}

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 two-dimensional beam profile monitor for 3-50 beam transport line in J-PARC was fabricated and installed in 2012. Then beam profile measurement by using OTR lights has been started in the beginning of 2013. Adding a measurement using fluorescence light has been run from May in 2013, the equipment has worked all right. In this manuscript, designing and fabrication on this equipment which has relatively large inner volume of about 550 liters for employing precise optical system built-in, are summarized and discussed as below: (1) construction design for chamber having built-in OFFNER optical system, (2) a sliding triple-target, (3) applying thin metal foil to a target frame, (4) an in-situ optical system and glass view, (5) optical devise alignment in the chamber, and (6) vacuum evacuation characteristics.

1. はじめに

3GeV の大強度陽子ビームでのターゲットからの OTR 光は、 ± 13.5 度という大きな広がり角をもつ。また、ビームサイズが $\sigma = 15\text{mm}$ 程度と大きいことも相まって、大きな受光サイズの光学系が必要である。このため直径 300 mm の凹面鏡をもつ OFFNER 光学系を採用した[1,2,3]。またビームターゲットは、120 mm ϕ の有効径を持ち 3 連の構成とし、3 種類のターゲットを直線導入機で切り替えて使用することができる。

真空容器内には、これらのターゲット、OFFNER 光学系、及び OFFNER 光学系で結像した像を生成するスクリーンを含む 2 次光学系を配置している。真空容器の容積は、およそ 550 L と大きなものである。

2. 真空容器の構造

真空容器の製作に当たって特に留意した点は、OFFNER 光学系とターゲットのアラインメント方法及びメンテナンスの容易さ、そして構造的な安定性である。Fig.1 に装置の外観写真と Fig.2 にその構成を表す断面図を示す。真空容器の外形サイズは、 $(1100^L-1259^H-620^D)\text{mm}^3$ である。内部の部屋は、(1) ターゲットルーム、(2) OFFNER リレー光学系ルーム、(3) 2 次光学系ルームの 3 室から構成されている。

オフナー光学系と 2 次光学系は、Optical Stage に載せてある。OFFNER 光学系は、装置上部の直径 780 mm の大フランジを持つポートから吊下して装

z-sohtsu@post.j-parc.jp

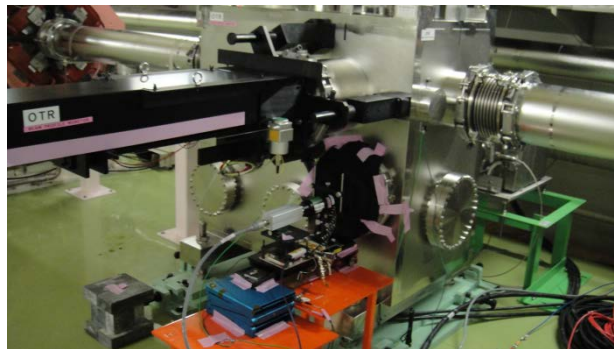


Figure 1: A photo of the OTR vacuum chamber. A black box on the left side is the linear motion system of the target, and right down there is a CID camera attached an image intensifier.

置内に配置される。

構造に関するたわみと変形の問題については、チェンバーを構成する材料を SUS316L とし板厚を 30 mm に選ぶことにより四方からの変形を極力減らした。さらに、(1)のターゲットルーム底板はターゲットのステージを載せるために設けてあるが、材料を SUS316L 厚み 30 mm とすることで強度を増し、さらに(2)との境界にも同材料の仕切りを設けて構造を補強した。この 2 枚の板の突合わせ部は、容器の側面板と溶接している。これらの構成での真空排気時の ANSYS [4] による構造の強度計算結果を Fig.3 に示す。変形は補強の手薄な部分に僅かに生じているが、その値は 0.11 mm であった。光学系のズレは、真空中に排気した状態と大気での状態の比較から、0.3

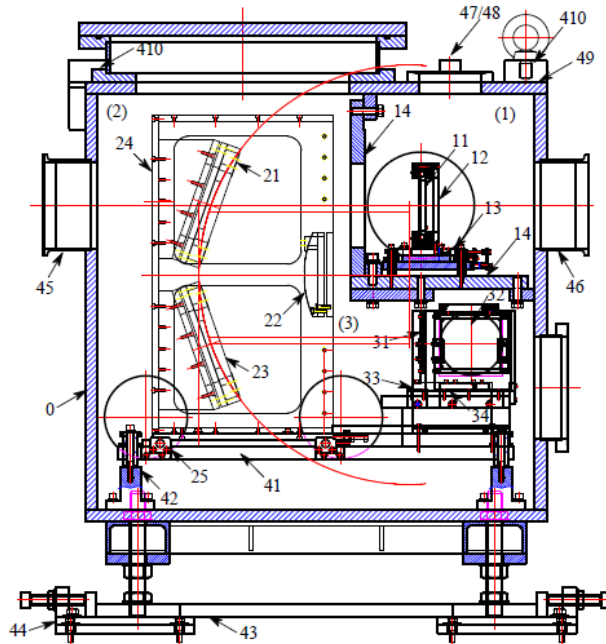


Figure 2: Whole constitution with vertical sectional view. (1) Target room : 11 Target, 12 Frame guide, 13 Target base, 14 Partition structure, (2) OFFNER mirror room : 21 Upper concave mirror, 22 Convex mirror, 23 Lower concave mirror, 24 Mirror holder, 25 positioner, (3) 2nd Optics room : 31 Screen, 32 Planer mirror, 33,34 Positioner, (4) Others : 41 Optical stage, 42 Positioner, 43 Chamber base, 44 Footstool, 45 Upstream beam-pipe, 46 Downstream beam-pipe, 47-49 Pin nest mount for Laser Tracker, 411 Tap hole, 0 Vacuum Chamber

mm 以内に十分収まることわかった。構造用仕切り板の接続部の溶接での応力最大 22 MPa 程度であり、これは JIS 規格の SUS316L 材の許容応力である 138 MPa の 1/5 以下の値である。

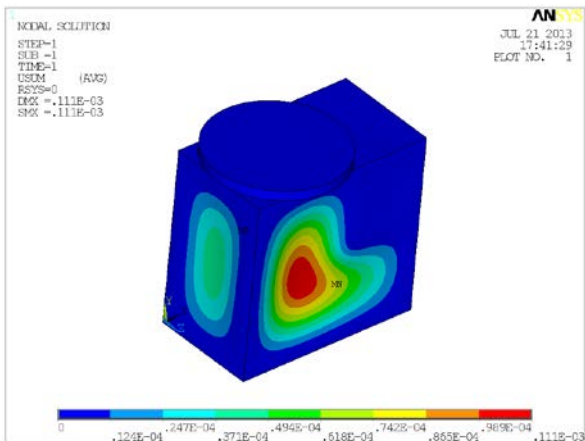


Figure 3: A result of structural calculation when evacuated of the vacuum chamber.

3. 3連スライド式ターゲット

装置の製作当初は、金属フォイルからの OTR 光を用いて 3つのビーム領域を計測することを考えた。3つの領域とは、ビームコア領域、そして直径 50 mm の丸穴の外側の部分のビームテール部、さらには 90 mm の丸穴の外側部分のビーム最外周部分である。これらの領域に対してそれぞれイメージインテ

ンシファイア(I.I.)の感度を最適化して計測する[1, 2, 3]。このために、直線導入機をパルスモータによりスライド動作させ、3つのターゲットを切り替える機構を用意した。

スライド動作のために、中空の金属性カムフォロワーによる転がり接点をもつフレームガイドを用いた(Fig.4)。このフレームガイドの中を3連のターゲットフレームが移動する。中空のリン青銅製のカムフォロワーは全部で 24 枚使用しており、アルミ製のターゲットフレームとその接点の隙間距離は 150 μm のシクネステープを用いて調整した。その結果、極めて軽く直線移動することができた。このようにスムーズな動作ができるために、直線導入機からの駆動の伝達は直径 8 mm のロッドであり、ストロークは 450 mm である (Fig. 5)。直線導入機は耐放性パルスモータ(Empire MagneticsRHU23: 1 N.m)で動作させ、穴あきなどのエッジを持つターゲットの位置を 50 μm 以下の精度で決定することができる。直線導入のロッドとターゲットフレームの連結部



Figure 4: (a) A Frame guide attached a sliding-triple-target frame, (b) gaps between cam-followers and the frame were adjusted by using a 150 μm thickness tape.

は、ロッドの先端を半球型に加工し押し当てる構造であり、その両脇にそれぞれスプリングを用いて両者を引き合う構造にしてある。地震対策としてスプリングの脱落防止機構もつけてある(Fig. 5 (a)). ターゲット交換などのときには、この連結部のスプリングを外してやるだけで良い。この作業のためには、直線導入機は、100 mm 程度後方にスライドして退避できるように、チェンバーから3本のサポートロッドを設けてある(Fig. 5 (b)).

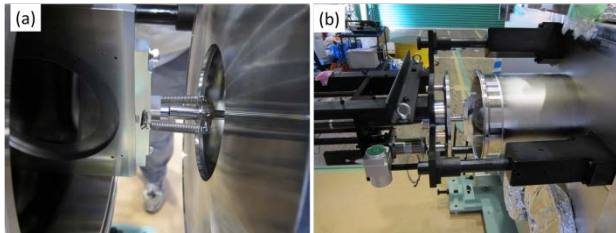


Figure 5: (a) A joint part of a rod and the target frame. Two springs are pulling each other adequately. (b) Black triple rods mounted on the wall of the vacuum chamber assists to slide the linear motion equipment for connecting or dis-connecting the joint.

4. ターゲット

OTR 光発生のためのターゲットとしては、金属製の平坦でかつ良好な反射体であることが要求される。それは金属界面で発生した OTR 光を界面で吸収することなく放射させることが目的となるためである。ターゲットの直径は 120 mm である。ビーム全体を計測するためには、厚み 10 μm のチタン箔(ST: solid target), コア周辺のビームテールを計

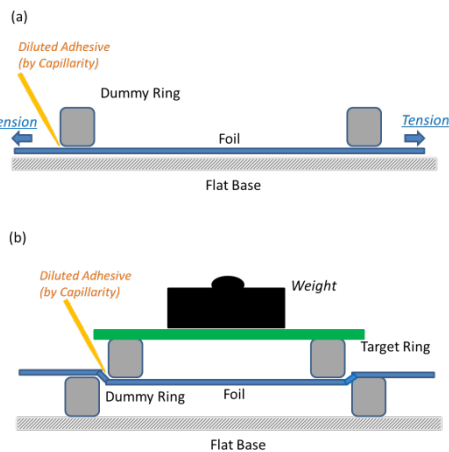


Figure 6: A procedure of foil applying to the target ring. (a) First, a dummy ring was put on a foil tensioned horizontally, and diluted adhesive was dropped at the fringe of the dummy ring. (b) Second, the target ring was put on the foil bonded dummy ring which was transposed up and down. Further, a plate and some weight were put on the target ring for tension. Finally, diluted adhesive was dropped at the fringe of the ring.

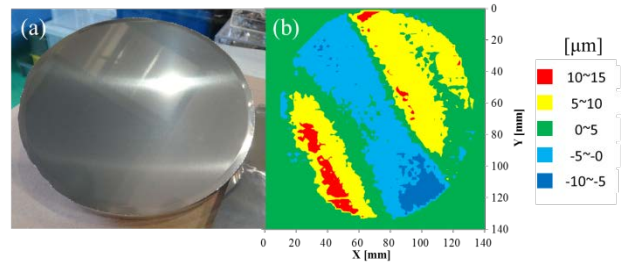


Figure 7: A solid titanium target with a thickness of 10 μm . (a) a photo, (b) un-flatness of its surface was about within 25 μm .

測するために、中央部に丸穴 50 mm (H50: 50 mm hole target) と 90 mm(H90: 90 mm hole target)を持つ厚み 100 μm の純度 99.999%のアルミ箔をそれぞれ用意した。ビーム周辺部を計測する場合には計測用カメラに取り付けられたシングルステージの I.I. (浜松ホトニクス V2697U) が適切な感度となるように内蔵する MCP のゲインをリモートで調整してやる。尚、アルミとチタンの可視域における代表的な反射率は、それぞれ 92.5, 53%である[5, 6].

ST は Fig. 6 に示す簡便な 2 段階の貼付け方法[2]で、ターゲットリング(直径 140 mm, アルミ製)へエポキシ系接着剤を用いて取り付けした。完成したターゲットの表面をレーザー変位計(Keyence IL-S025)を用いて 2 mm ステップで変位分布を測定した結果、非平坦度は 22 μm (測定誤差 $\pm 7.5 \mu\text{m}$)であった(Fig.7). 測定するビームサイズの σ は 15 mm 程度であるために、ターゲットの非平坦性は 100 μm 程度以下であればよく、十分に平坦性を有することを確認した。H50 と H90 は、YAG レーザー [7] により穴加工を行った。小さなパルスパワーで繰り返しなぞるように切断を行った結果、切断部のエッジの乱れは、10 μm 程度に収まっている。

尚、現在は、OTR 光よりも単位時間、単位面積あたり 10 倍以上の発光強度をもつ酸化クロムをドープしたアルミナスクリーン(AS: Alumina Screen: 京セラ 486: 厚み 0.5 mm) を H90 に代えて導入しており(Fig.8), ビームテールの光をピークの光強度に対して、 1×10^{-6} 程度以下までを高感度に計測することができるようになっている[8]

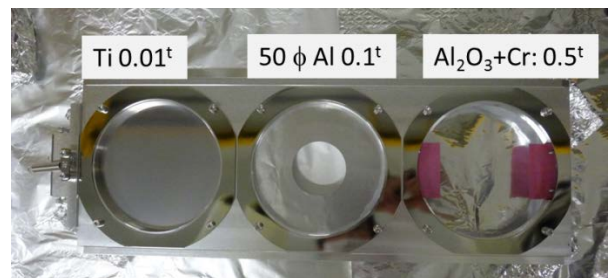


Figure 8: The triple target. Each inner diameter of the ring was 120 mm.

真空光学系

真空内には Offner リレー光学系(Offner Relay

Optical System: OO: Fig.9)とその焦点面以降の2次光学系(Secondary Optical System: SO: Fig. 10)が収められている。OO は3つの球面ミラーで構成されており、Fig.9 (b)に示すように同心の R500 と R250 にそれぞれ凹面鏡と凸面鏡を配置してある。30 mm 厚みの Pyrex ガラスを球面研磨し球面以外の全ての外表面全体をアルミ蒸着した。各ミラーは直接アルミ製の調整ベースに取り付けることにより帯電しない構造である。Fig.9 (a)に示すようにアルミのハウジングに全ての光学要素が収められており、その重量は約 70 kg である。SO では、OTR 光のもつ放射角度分布を除去するために、OO の焦点面に、サイズ $140^W \times 140^H \times 5^T$ mm³ の石英製の Diffuser Screen (DS) を置いている。#300 (最大粒径 100 μm) の砂ざり研磨で拡散表面を製作した。このスクリーンの下流には Pyrex ガラス製のアルミ蒸着平面ミラーを配置し、45° 曲げて光を取り出している(Fig.10)。SO では周囲の電解研磨されたチェンバー内表面からの拡散光の反射による迷光が生じやすいと考えられる。このため NiP コート (Phosblack III 可視域反射率: 2~5%: [9]) したこれらの拡散スクリーンと平面ミラーのシェードを用意してあり、今秋装着する予定である。他のチェンバー内表面などはすべて電解研磨した高反射率面となっているが、光計測のバックグラウンドの増大などの特段の支障は今のところ見られ

ていない。SO の後、光は合成石英ビューポート(窓内直径: 134 mm, ガラス厚み 30 mm: Fig.11)を通して大気中での I.I.とカメラで構成される計測器に導かれる。このビューポートは図にあるようにガラスの両面にヘリコフレックスを当てて 20 本の M8 SUS ボルトを 5 N.m のトルクで締結してある。これは KEK-PF や KEKB で実績のある方法であり、それらでは直径 100 mm のガラスの波面でのエラーを $\lambda/20$ 以下に抑えている報告がある[10]。

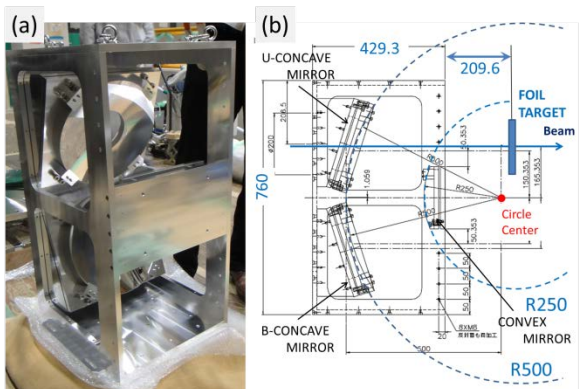


Figure 9: The Offner relay optical system. (a) All components were mounted a housing made of aluminum. The upper convex mirror has a beam hole which diameter of 120 mm. (b) The geometry between beam target and OO.

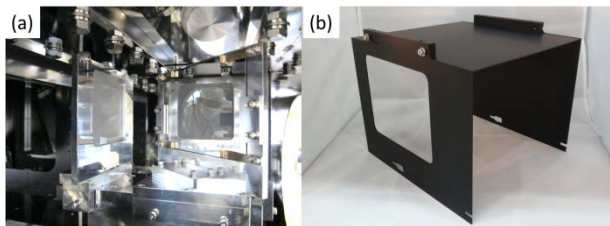


Figure 10: The second optical system: (a) the diffusion screen at the left and the planar mirror at the right with a distance of 120 mm, (b) a shade for anti-reflection which was coated with NiP (it will be planned to install this autumn).

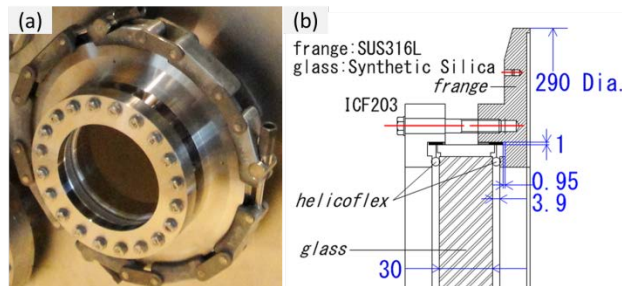


Figure 11: A quartz view port sealed with a metal seal of Helicoflex. (a) a whole image, (b) cross sectional view.

6. 光学部品設置とアライメント

OO のハウジングは、チェンバー天井の大ポートより吊下して、チェンバー内の Optical Stage (Fig.2) 上に設置する。位置調整は、チェンバー側面の下側の両サイドにそれぞれ 2 つずつあるポート(Fig.1:

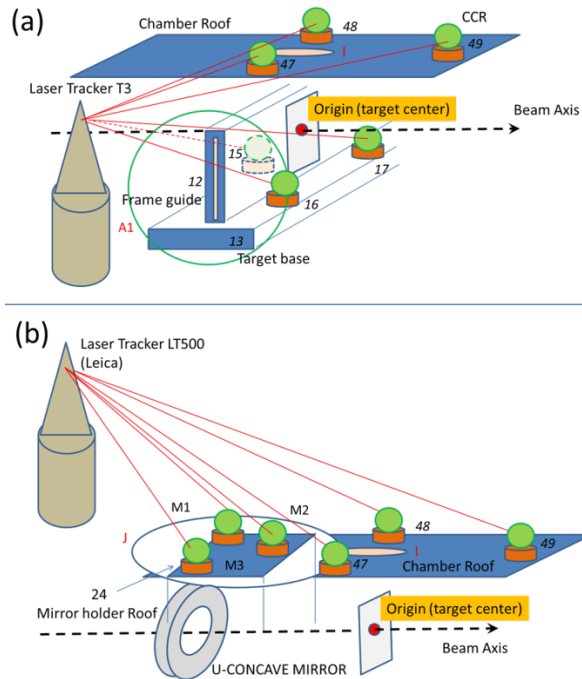


Figure 12: The arraignment procedure with laser tracker. (a) Positional relation between the target and three standard points at chamber roof were measured. (b) OO position was aligned with positions of three points at OO's housing roof against standard points.

ICF203)を開けて行う。

OO とターゲットの位置関係は極めて重要である。アラインメントはレーザートラッカー(LT)を用いて行った(Fig.12)。まず、あらかじめターゲット移動軸が直線導入ポートの中心に一致するようにレーザーセオドライトでターゲットベースを調整しておく。この精度は 50 μm 程度であった。次にターゲットベース上の3点と、チェンバールーフ上の3つの基準点の関係を LT を用いて測量する。最後にその基準点を参照しながら、OO のハウジングのルーフの3点を設計位置になるように、位置調整を行った。OO とターゲット中心との位置関係の調整後の精度は、100~200 μm であった。SO は、OO との位置関係をレール上を移動することで調整できるようにしてあるため、ターゲットの端部に取り付けられたスケールをカメラで測定しながら、DS の位置を調整した。調整後のスケールの画像を Fig.13 に示す。最小の 1 mm 刻みのラインの線幅は 0.2 mm であるが、そのラインまで結像していることを確認した。

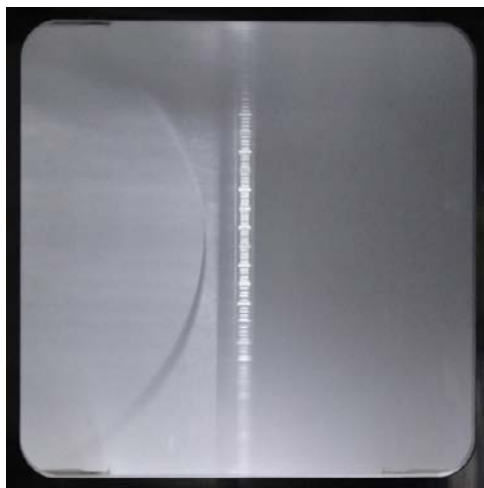


Figure 13: A screen image of reference scale positioned at the edge of target frame.

7. 真空排気特性

チェンバー内表面(主として SUS316L)は全て 5 μm 程度の電解研磨を行っている。OO などのハウ

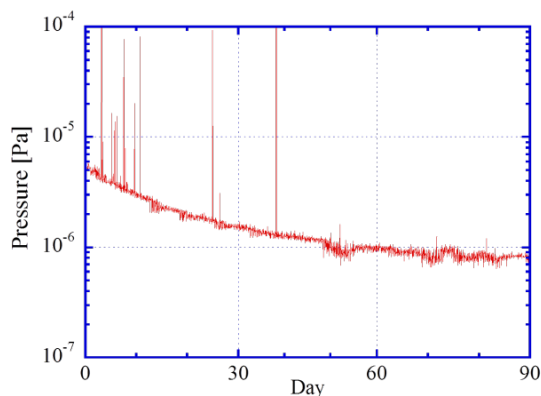


Figure 14: Evacuation curve after installation.

ジングや光学部品に使用されている AL5052 に対してはアルピカ処理[11]を行った。また特にベーキング処理は行っていない。真空排気ポートは、Fig.1 のカメラのあるポートの反対側(裏面)にあり、500 L/s のイオンポンプが取り付けられている。ビームラインにインストールしてからの真空圧力のトレンドを Fig.14 に示す。凡そ 70 日で 10^{-7} Pa 領域に入った。圧力カーブに見られるいくつかのスパイクは他の箇所での放電などによる変動である。

8. まとめ

装置は、特段の問題もなく安定に稼働し Fig.15 に示すような大強度ビームのプロファイルを計測することができるようになった。清和製作所の齊藤齊氏には装置の設計及び製作にご尽力いただいた。また装置のインストールは年末の加速器停止時のわずかな時間に集中して行い、MR システムコミッショニンググループの瀧山陽一氏はじめ諸氏にお世話になった。

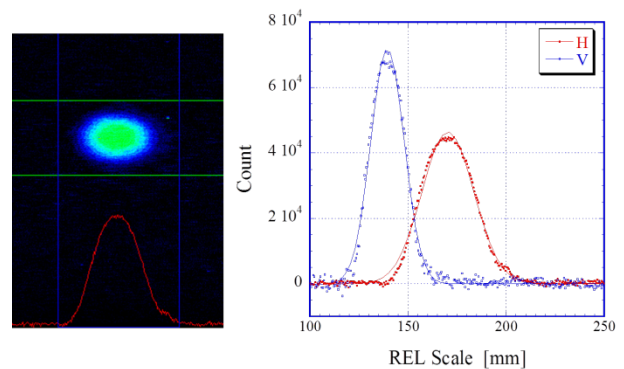


Figure 15: Typical beam profile with OTR. In this case beam intensity was 4.2×10^{13} p/2bunch. Left side is a measured beam image. Right curves are projected profile in horizontal (H) and vertical (V).

参考文献

- [1] M. Tejima, et al., Proc. 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2012, p.590-593.
- [2] S. Otsu, et al., Proc. 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2012, p.577-580.
- [3] M. Tejima, et al., Proc. IBIC 2012, Tsukuba.
- [4] ANSYS: <http://www.cybernet.co.jp/ansys>.
- [5] F. A. Jenkins, H. E. White, McGraw Hill, 1957, P.522.
- [6] 櫻井信之, 東京大学, 修士論文, 1992, P.79.
- [7] 弘陽精工: <http://www.koyo-laser.co.jp>.
- [8] M. Tejima, et al., these proceedings.
- [9] PhosBlack: 株式会社旭プレジジョン: <http://www.akg.jp/puresijyon/pb3.htm>
- [10] T. Mitsuhashi, K. Kanazawa, and S. Hiramatsu, Proc. 13th Sym. on Accel. Sci. and Tec., p.387(2001).
- [11] アルピカ: 三愛プラント工業: http://www.san-ai-plant.co.jp/clean_technology/chemical_polishing/aluminum_cp/