

# RIBBON TARGET ASSEMBLY USING CARBON GRAPHITE FOR SECONDARY EMISSION TYPE BEAM PROFILE MONITOR

Satoru Otsu <sup>#,A)</sup>, Yoshinori Hashimoto <sup>B)</sup>, Takeshi Toyama <sup>B)</sup>, Suguru Muto <sup>B)</sup>, Minoru Mitani <sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd, 2-8-8 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-0045, Japan

<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 1-1 Oho, Tsukuba Ibaraki, 305-0801

<sup>C)</sup> Minotos Engineering, 1-16-28 Naka, Kunitachi, Tokyo, 186-0004

## Abstract

We developed a secondary emission type beam profile monitor with graphite ribbons as a beam target. The graphite is excellent in endurance against heat load, and that they are thin as 1.6-2.0 micron and low  $z$  ( $=6$ ) is advantage for reducing beam loss. Furthermore, since ribbons emits larger amount of electrons than ordinal metal wires because of larger surface, the monitor has higher sensitivity. On the other hands, in case of multi-ribbon type, uniformity of secondary electron emission is required for accurate measurement. For the uniform emission, not only surface homogeneity, but also evenness for each ribbon width is needed. A suitable manufacturing method to make ribbon target from graphite-foil, and emission uniformity has been studied.

## カーボングラファイトを用いた二次電子放出型ビームプロファイルモニターのためのリボン状ターゲットアセンブリ

### 1. はじめに

大強度陽子加速器 J-PARC Main Ring(MR) のビームトランスポートで使用している MRPM (Multi Ribbon Beam Profile Monitor)<sup>[1]</sup>では、グラファイトリボンからの2次電子を用いて、ビーム強度 $1.5e13$  ppbのプロファイルをクリアに計測している<sup>[2]</sup>。また通常のワイヤータイプに比べてリボンの表面積が大きいので、大強度ビームのビームコアだけでなく、ビームテールもクリアに計測することができる<sup>[2]</sup>。このようなマルチリボンを用いた測定においては、各リボンにおける2次電子放出率の一様性が要求される。そのためにはグラファイト表面状態の一様性だけでなく、リボン幅も一定にする必要がある。特にグラファイトシートのたわみは、一様なリボンにレーザーカットする際のエラーとなるために、 $100\mu\text{m}$ 以下に小さくする必要がある。

今回の報告では、特に均一な電子エミッション確保のためのリボンターゲット製作のための基本的な試験：(1) ターゲットのたわみを減じるためのテンションをかけた貼り方とレーザーカットした時のリボン幅の相関、(2) 2次電子放出率のエミッションの



図2:  $1.6\mu\text{m}$ 厚みのグラファイト

計測、(3) リボンの引っ張り破断試験についてを中心に、また新規に $2\mu\text{m}$ 厚みのグラファイトフォイル<sup>[4,5]</sup>の製作R&Dを進めており、その進展状況も合わせて報告する。また、2011年3月の東日本大震災での震度6の罹災であり、8台の既設の実機のターゲットの被害が心配されたが皆無であった。

### 2. グラファイト

実機に使用した厚み $1.2\sim 2.0\mu\text{m}$ のグラファイトフォイル(GF)は、本ターゲット用に特別に大型化(サイズ： $300\text{mm}^L$  max, $180\text{mm}^W$  max)して製作されたものである<sup>[3]</sup>。図1に、SEMによる断面写真を示す。グラファイトは、結晶子が大きく靱性を持つ(図2)。また、焼成温度は $2600\sim 3000^\circ\text{C}$ であり耐熱性が高い。

また、グラファイト( $z = 6$ )は、質量密度が $2.0[\text{g}/\text{cm}^3]$ と小さいため、薄いことと相まってビームロスが小さい<sup>[2]</sup>。ターゲットの温度上昇は、ビームサイズに依るが、ANSYSでの計算から最大 $200^\circ\text{C}$ と予想されている<sup>[2]</sup>。実機への使用においては高い耐久性が要求されるため、2つの試験を行った(図3)。

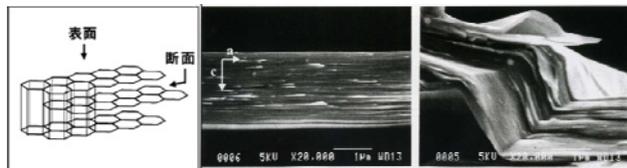


図1: グラファイトの構造。配向によりベンゼン環が面内に整然と並ぶ。 $2\mu\text{m}$ 厚みのものの断層写真

# z-sohtsu@post.j-parc.jp

一つはロングラン試験である(a). KEK-NMLのシャットダウンまでの11か月連続して、500 MeVの陽子ビーム(強度 $2e12$  ppb, サイズ $45^H \times 15^V$  mm<sup>2</sup>)を20 Hzで総粒子数 $5e20$ を照射し健在であった。また、東工大バンデグラフにおいて、3.2 MeVのNe<sup>+</sup>ビーム(DC, 3.0  $\mu$ A, 8 mm $\phi$ )を照射した(b). 放射温度計(精度 $\pm 100^\circ\text{C}$ )で計測したターゲットフォイルの温度は $1400^\circ\text{C}$ であった。67分間にわたり健在であった。このような試験を通してビームロスでの発熱に対しての高い耐久性を確認した。

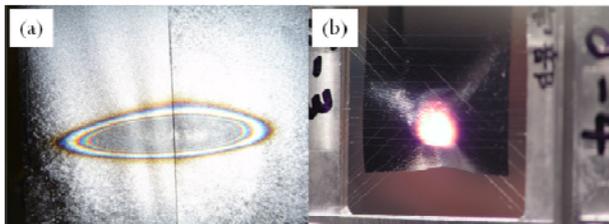


図3: (a)  $5e12$  p の照射後, フォイルにはニュートンリングのようなカラーパターンが付いた. 厚みの減少を示している. (b)  $1400^\circ\text{C}$ でのビーム照射時.

### 3. ターゲットの製作に関するいくつかの基本的な試験

各リボンにおいて均一な2次電子のエミッションを得るには, たわみを小さくし, リボンの幅が揃っていることがポイントである. フォイルをフレームに貼り付けるときにたわみが発生するとレーザーカット時に, レーザーの光学焦点位置に対するズレが生じ, ビームウェストではなく, レーザービームが広がった位置でカットすることになるからである.

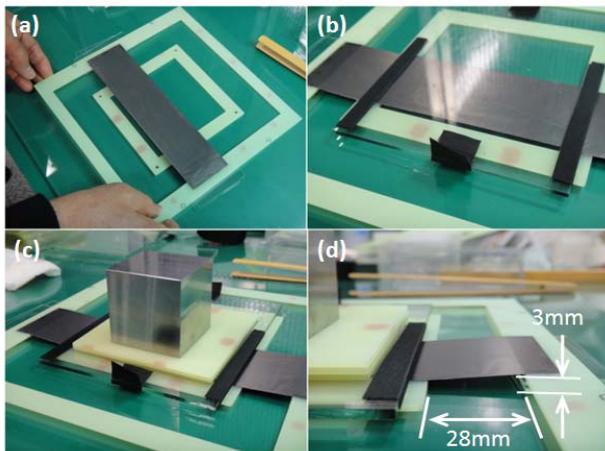


図4: フレームへのフォイルアプライ過程 (試験用ターゲット: 内寸 $100 \times 100$  mm<sup>2</sup>: 読出電極無し, 仮貼り用ターゲット: 内寸 $186 \times 198$  mm<sup>2</sup>)

#### 3.1 フレームへのフォイルアプライ方法

薄くて固いグラファイトフォイルはハンドリングが難しく, たわみを残さない貼り方について試行錯誤してきたが, 実機のターゲットに採用した方法の, 貼り付けの過程(図4)と, フォイルにテンション

をかける方法(図5)を示す. 実機7台では, この方法によりたわみの少ないターゲットを作成しているが十分な定量化がなされていなかった. そこで, 作成方法の確認やたわみ量などの基本的な測定と試験を行うことにした.

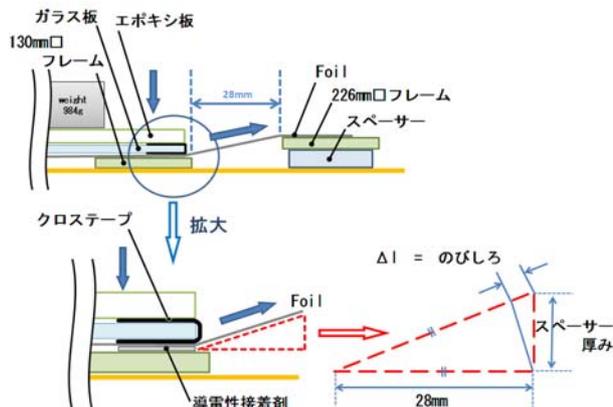


図5: テンション印可のための荷重

図4では, まず(a)ターゲットより少し大きめの仮貼り枠(内寸186 mm, ターゲットフレームに対して片側28 mm広い)にフォイルをウレタン系の接着剤で固定しておき, その内側にターゲットフレームを配置する. このとき, 仮貼り枠は印加するテンションに合わせて例えば3mm程度高くなるようにスペーサーを入れる. (b)ターゲット表面の読み出し電極には, 耐放射線性の導電性接着剤<sup>[7]</sup>を $10 \mu\text{m}$ 厚み程度にスクリーン印刷しておき, その直後の3分程度(接着剤の表面が乾かない)の時間内に, 仮貼り箔(枠)とガラス板を乗せる. ガラス板のエッジには, Rをつけ, 滑りのよい樹脂テープ(アセテート)を貼り付けておく. (c)ガラス板の上に, 1 kg程度のウェイトを乗せる. (d)このとき, 仮貼り枠からターゲットフレームの段差(この場合は3mm)により, フォイルにテンションをかけた状態で接着剤の固化(12hr程度)を待つ. 導電性接着剤と読み出し電極間は $5 \mu\text{m}$ 程度に圧着させる必要があるためにフォイル面の法線方向からの荷重と, フォイルのたわみを減じ平坦性を確保するためにフォイル面の接線方向への張力を同時に印可させる(図5)ことがポイントである.

#### 3.2 3.1の方法でのたわみ除去効果の測定

仮貼り時におけるたわみ深さとたわみ長の測定を実体顕微鏡( $\times 60$ )のピント合致位置を用いて測定した(図6). たわみ深さは, 鉛直方向のたわみの深さをたわみがないとした場合の理想平面からの距離で示し, たわみ長さは両側の固定端の内側にあるフォイルの長さとして定義する. 実機のターゲットフレームは,  $350 \times 350$  mm<sup>2</sup>のような大きなサイズであるため, ストローク( $250$  mm<sup>H</sup>,  $80$  mm<sup>Z</sup>)の大きなユニバーサルスタンドに実体顕微鏡とCCDカメラがマウントされている. 図のA, Bでは, ターゲットリ

ボンの位置と深度を測定するための目盛刻み $10\mu\text{m}$ のダイヤルゲージを付けた。焦点深度が浅いため、リボンなどのエッジにピントを合わせる場合のAによる測定位置の再現性は50回の統計で標準偏差が $8\mu\text{m}$ であり、これをたわみ深さの測定誤差とした。また、カメラの解像度は、60倍の倍率のとき、 $0.9\mu\text{m}$ であり十分に高い。また、撮像画面内のリボン幅の測定精度は、ピント合わせの再現性を含めて、50回の統計において $2\mu\text{m}$ であった。これをリボン幅測定の誤差とした。



図6: ユニバーサルスタンド付実体顕微鏡

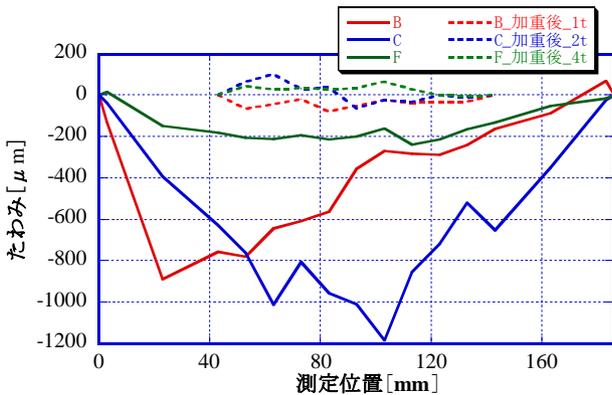


図7: 仮貼り時(実線)と荷重後(破線)のたわみの比較

ターゲットリボン幅  $5\text{ mm}$  のテストターゲットを作成して、たわみを測定することにより貼り付け時の荷重の効果を調べた。仮貼り枠に入れたスペーサが  $1, 2, 4\text{ mm}$  の場合の比較を図7に示す。最大 $1200\mu\text{m}$ あったたわみ深さは、レーザーカットの焦点範囲から要求される $100\mu\text{m}$ 以下に収まる。また、平均 $1500\mu\text{m}$ 程度あったたわみ長さは、平均 $380\mu\text{m}$ まで小さくなった。短縮できるたわみ長さは、仮貼り時のたわみに依存すると考えられる。今回は、仮貼り時のリボンへの張力は特に与えていないため、仮貼り時のたわみ長さのばらつきが大きくなっている。このばらつきを小さくすることで画一したテンションの与え方が決まるはずである。今後は、後述のR&Dしているフォイルについて、詳細な試験を行う予定である。

### 3.3 引っ張り試験

グラファイトはその構造から伸びの無い材料である。また適度なフレキシビリティはあるものの、硬く、特に配向面の法線方向からの刺激には脆い。

フォイル貼り付け時の印可できるテンションの限界を知るために、配向方向について荷重による引張り試験を15回行った(図8)。その結果、 $10\text{mm}$ 幅のリボンでは、 $39\text{gw}$ で破断するものがあった。平均は $59.6\text{gw}$ であり、配向方向の強度は比較的高いことがわかった。

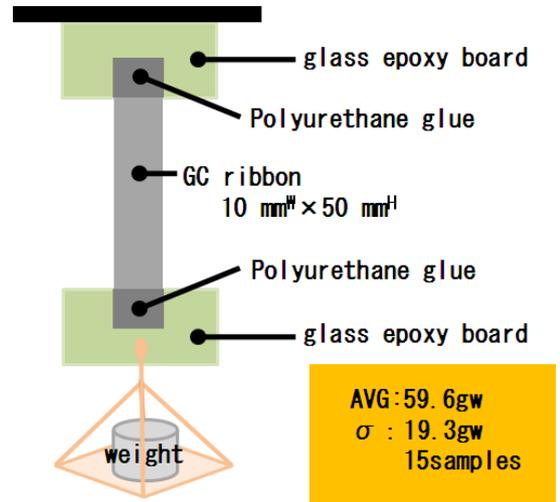


図8: グラファイトフォイルの引っ張り試験

## 4. R&Dフォイルのレーザーカットとビーム照射試験

### 4.1 フォイル

ビーム照射試験用ターゲットの製作及び試験には、a:  $2\mu\text{m}$  ミクロンフォイル (R&D), b: 現行 $2\mu\text{m}$  ミクロンフォイル, c:  $5\mu\text{m}$  ミクロンフォイル (R&D) の3種類を用いた。aでは、テンションにより面上のシワやクラックなどが破断することがあったため $200\mu\text{m}$ 程度程度の局所的な垂み(変形)が生じた。これは、(イ)高配向性のため結晶子(図1)と称するグラファイト片がかなり大きく硬すぎることで、(ロ)焼成時の問題で凹凸及び小さなシワやクラックが発生していること(図9)が原因であり現在改善中である。b, cのフォイルでは、指でしわを伸ばす程度のテンションをかけただけで、ターゲットの製作を行った。

### 4.2 レーザーカット

試験用ターゲットのサイズは、 $34^{\text{H}} \times 42^{\text{V}}\text{ mm}^2$  (inside)であり、リボンは $1\text{ mm}$ 幅で $2\text{ mm}$ ピッチにYAGレーザー(波長 $1096\text{ nm}$ )で切断した。レーザービームの加工ステージ上の位置精度は $10\mu\text{m}$ であった。切断部のエッジを滑らかにするため、複数回のスイープにより漸く切断できる程度までレーザーパワー密度を十分に落とし、レーザー衝撃を避けたが、カットのエッジ部には小さなギザギザが残った(図10)。これは、テンションをかけない貼り付け方であったため、各フォイルにたわみが残り、レーザーカット時の衝撃でフォイルが振動してしまったためであると、いままでの経験から推察している。

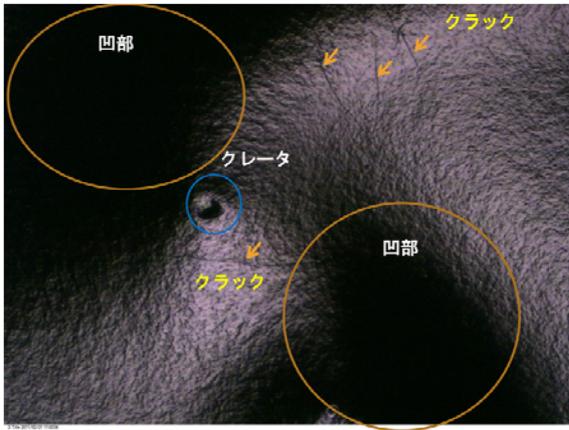


図9: aタイプの表面.凹凸や小さなクラックがみられる.

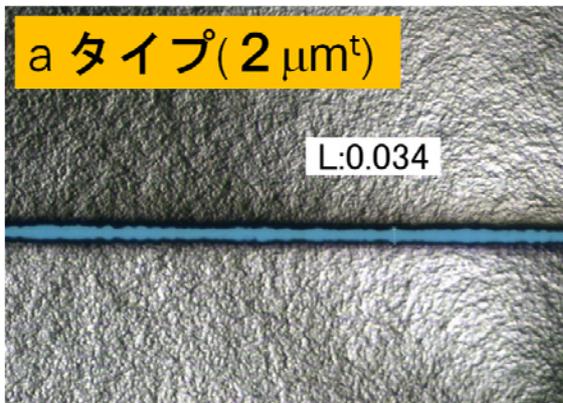


図10: aタイプのカットの線幅は端部では34 μm程度, 垂み部分では50 μm程度になった.

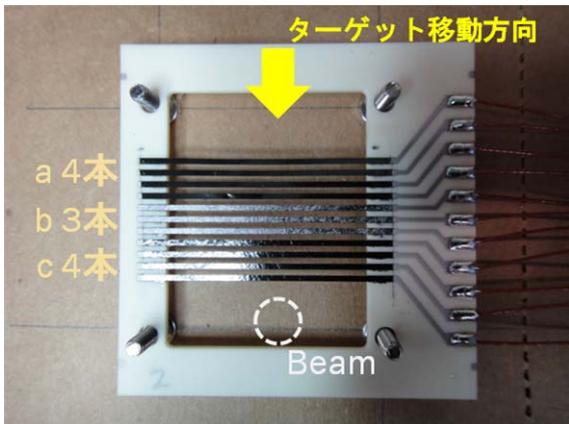


図11: 試験用ターゲット. ビームを横切るようにターゲットをスイープする.

ビーム試験には, 放射線医学総合研究所のエネルギー6MeV/nの $O^{8+}$ を用いた. ビーム形状が安定と仮定し, ビーム断面に対して図11のターゲットを空間的にスイープさせ, 各リボンでの二次電子放出量をエレクトロメータ(Keithley6517A)で計測した. 0.5 mm ステップで, 各点10パルスの積分した電子量を

得, 同時刻のファラデーカップでの $O^{8+}$ 電荷量で規格化した. 図12に, 各測定点で得られた規格化した二次電子量をプロットすることにより, 得られた $O^{8+}$ のビームプロファイルを示す. ビームプロファイルは, 一次関数+ガウシアンでフィットし, 標準偏差 $\sigma$ で評価した. 一次関数は, 特に図12で左右不均一なテールを持つために付加したが, この測定時に使用したエレクトロメータ用スキャナーのオフセットが原因であった. このためフィッティングはピークの5%程度以下のテール部は, カットしておこなった. 結果を表1に示す. MRPM実機では $\sigma$ のバラつきは1%以下が条件である. 実機使用2 μm<sup>t</sup>のbタイプは, 1.4 %, 5 μm<sup>t</sup>のcタイプは, 1.1 %であった. 今後の実機に用いる予定のaタイプは, テンションがかけられず3.0 %と悪かった. これはリボン幅が一定でないことに起因していると考えられる. 尚, すでにインストールした実機のターゲット製作時にも同様の試験を行っているが, テンションをかけることで,  $\sigma$ のバラつきは, 0.2%以内に収めることができた<sup>[2]</sup>.

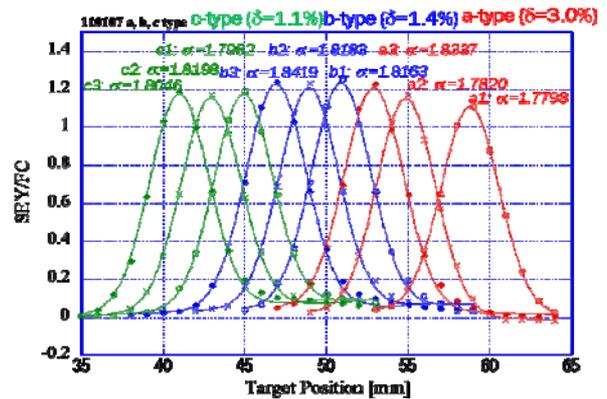


図12: テンションなしのa, b, cタイプそれぞれ3本によるビームプロファイルの計測結果

表1: ガウスフィットによる $\sigma$ とそのバラつき

| Type | $\sigma$ (Avg.:mm) | (Dev.) |
|------|--------------------|--------|
| a    | 1.7985             | 3.00 % |
| b    | 1.8255             | 1.40%  |
| c    | 1.8075             | 1.10%  |

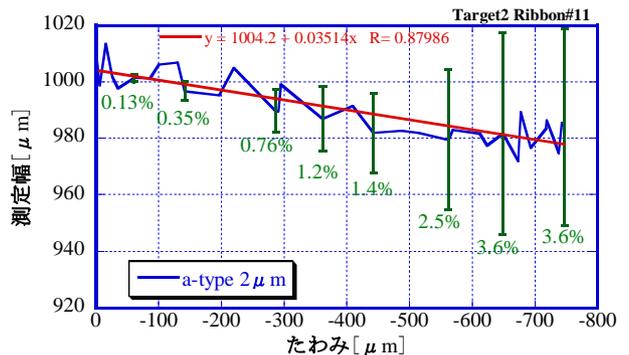


図13: ビーム試験用ターゲットのたびみとリボン幅の相関: aタイプのリボン.

この実験結果から推測されるテンションがかけられないために、たわみが発生する問題を調べた。3.の測定方法により、ビーム試験用ターゲット(図11)のたわみとリボン幅の相関を調べた結果を図13に示す。特にばらつきの大きいaタイプのリボンの測定結果であるが、最大700  $\mu\text{m}$ 程度のたわみがあり、これにより1mmを基本幅とするリボンは、20 $\mu\text{m}$ 程度減少してしまうことが明らかになった。これはたわみ位置では、レーザーカットが、ビームウエストよりも下方のビームが広がっている位置での切断になるためである。

## 5. まとめ

均一なリボンの製作に向けて、テンションをかける方法やビーム試験を通しての品質向上に向けた基本スタディーを行った。開発中の2ミクロンのグラフィトリボンからの2次電子放出量のバラつきは、3.0 %程度だった。面の不平坦性によりはりつけ時にテンションがかけられなかったために、レーザーカットの線幅が一定にならない問題である。グラフィートには適度な結晶子の大きさを持たせ、靱性と同時に柔軟性を持たせることがポイントである。

今回、たわみとレーザーカット後のリボン幅の関係などを明らかにした。また、たわみやリボン幅の自分たちの測定系を用意することができた。今後は、新しいR&Dフォイルを実機に使用するために、仮貼り時のテンションのかけ方を一定にする方法を完成させ、安定したターゲットの製作に結びつけたい。

尚、現実機のフォイルに宇部興産・大矢修生氏、接着剤には、シチズン電子・赤尾祐司氏、レーザーカットには、弘陽精工・中澤繁雄氏、松本義明氏、セラミックフレームには、有明マテリアル・岩永鉄平氏、フォイルR&Dには、カネカ・西川泰司氏、稲田 敬氏にお世話になった。ビーム試験では、放射線医学総合研究所のHIMAC並びに中エネルギー照射コースのみなさまにお世話になった。東工大でのビーム耐久試験は、KEK・菅井 勲氏、武田康弘氏に行っていた。

## 参考文献

- [1] 特許出願公開番号 特開2007-101367 (査定済).
- [2] Y. Hashimoto, et al., "Multi-Ribbon Profile Monitor using Carbon Grafite Foil for J-PARC", Proceedings of HB2010, Morschach, Switzerland, 2010, P.429-433.
- [3] 特許出願公開番号 特開2002-308611.(宇部興産)
- [4] 西川泰司(カネカ), 月刊ディスプレイ, 2009年6月号
- [5] 西川泰司(カネカ), JETI, Vol.57, No.7(2009)
- [6] J. Kusano, Ed., "Collection of Radiation Irradiation Study Reports for the Candidate Materials and Instruments in the J-PARC", JAEA-Review 2008-022, 2008, P.24.