

## High-speed Screen Beam-Profile-Monitor System for High-Energy Beam-Transport Line at the HIMAC

#N. Saotome<sup>1,2</sup>, T. Furukawa<sup>1</sup>, Y. Iwata<sup>1</sup>, T. Shirai<sup>1</sup>, T. Inaniwa<sup>1</sup>, S. Sato<sup>1</sup>, A. Nagano<sup>1</sup>, E. Takeshita<sup>1</sup>, T. Kohno<sup>2</sup>, T. Kanai<sup>3</sup> and K. Noda<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Research Center for Charged Particle Therapy, National Institute of Radiological Sciences,  
4-1-9, Anagawa, Inage-ku, Chiba 263-8555, Japan

<sup>2</sup>Department of Energy Science, Tokyo Institute of Technology,  
4259 Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama, 226-8503, Japan

<sup>3</sup>Gunma University Heavy Ion Medical Center  
3-39-22 Showa-Machi, Maebashi, Gunma 371-8511, Japan

### Abstract

A screen monitor system was developed for beam profile monitors at the new High-Energy Beam-Transport (HEBT) section out the HIMAC. This monitor consists of the very thin fluorescent screen and the high-speed CCD camera. In addition to perform high-speed and high-resolution, this monitor does not almost destroy the beam.

## 高速準非破壊スクリーンビームモニタの開発

### 1. はじめに

現在、放射線医学総合研究所（放医研）では、新治療棟の建設を行っている<sup>[1]</sup>。新高エネルギービーム輸送系（HEBT）では、高分解能のビームプロファイルモニタが必要とされる。また、照射ポートにおいては、照射中にビーム条件を監視するオンラインモニタが必要とされる。そこで我々は、蛍光膜とCCDカメラで構成されるスクリーンビームプロファイルモニタ（SCN）を設計・試作した。このスクリーンモニタは、高速に高位置分解能の測定が行え、且つ測定ビームにほとんど影響を与えないことから、ビームアライメント及び、ビーム監視を一台のモニタで行うことができる。

### 2. スクリーンビームプロファイルモニタ

放医研では、新しいプロジェクトとして新治療棟の建設を行っている。新治療棟では、HIMACの既存ビームラインを延長した水平・垂直固定照射ポートを備える2室の治療室と、回転ガントリー照射ポートを備える1室の計3治療室を予定している。各照射ポートでは、スキヤニング照射法を採用する。

#### (1) ビームプロファイルモニタ

新高エネルギービーム輸送系（新HEBT）では、30台程度のビーム調整用ビームプロファイルモニタの設置を予定している。効率的なビーム輸送を行うために、新HEBTでのビームプロファイルモニタは複数台のモニタと電磁石群を組み合わせ、自動的にビームアライメントが行えることが求められる。

#### (2) オンラインモニタ

一方、新照射ポートにおいては、採用されるスキヤニング照射法のために、治療照射中のビーム条件（強度、位置、径）の安定性が計画通りの照射野を形成する上で重要な事項となる。そこで、照射中

のビーム条件を常に監視し、ビーム条件が規定範囲から外れた際には、高速にビームを遮断するためのモニタが求められる。さらに、スキヤニング照射技術の向上のために、ビーム条件が規定範囲を超えた場合、どのように基準から外れたのか、エラーが起る傾向を記録できることが期待される。

HIMACで現在使われているビームプロファイルモニタはマルチワイヤ型比例計数管（MWPC）<sup>[4]</sup>を用いている。同じものを採用すれば、規格の統一化、予備品の削減などのメリットが挙げられる。しかし一方、既存MWPCは測定分解能が2mmと悪く、ビームが検出器を通過する際に大きく散乱されてしまう、また、検出器及び処理回路の作成に多大なコストがかかるというデメリットも持ち合わせている。

上記の条件を満たすために、我々は新HEBTでのビームプロファイル測定及び、照射中のビーム監視を一台でこなす測定器として、蛍光膜とCCDカメラを用いた方式を採用することにした。本稿では、この測定器をスクリーンモニタ（SCN）とする。検出器として市販のCCDカメラを用いることで、2次元の測定を簡便に高速で行うことができ、MWPCと比較してコストを大幅に削減することができる。また、蛍光膜を十分に薄くすることで、準非破壊モニタとして照射中に使用することができる。

### 3. スクリーンモニタの仕様

新HEBTでは、炭素ビームを治療にのみ用いるため、既存HIMACのHEBTと比較してビーム強度、エネルギーは限定的となるため、その対応は比較的容易である（表1）。そして、測定分解能に関しても、CCDカメラで測定を行うため、十分な分解能に達することができる。しかし、ビーム重心、径は画像処理で求めるため、その処理で時間がかかることが想定されたが、本モニタでは患者に致死的な線量を与

えてしまうことを十分に避けるために、オンラインモニタの測定間隔を10 msec以下にすることを当初の開発目標とした。これは、CCDカメラによる測定時間を5 msecとすると、残りの5 msecで画像転送、画像処理、結果出力を行うことになる。

本モニタでは、ビーム座標系に置けるビームの位置を正確に測定することが求められる。そこで、チャンバの加工、設置、CCDカメラ座標とビーム座標の一致を含めた中心位置の製作精度を0.1 mm以下を目標とした。

表1：スクリーンモニタの仕様

核種	炭素
エネルギー	200~400 MeV/n
ビーム強度	1x10 <sup>7</sup> ~1x10 <sup>9</sup> pps
測定範囲	60 x 60 (mm)
分解能	1 mm以下
測定間隔	200 msec 以下 (オンラインモニタ：10 msec以下)
中心位置精度	0.1 mm 以下

#### 4. スクリーンモニタのデザイン

HIMACの物理汎用照射室PH1コースにスキャニング照射試験ポートを設置して、新治療室で行う照射法の確立のため、照射実験を行っている<sup>[2,3]</sup>。この一環として、図1に示すSCNを図2の様にアイソセンターから約6 m、9 m上流位置に配置し、SCNの照射実験を行っている。このうち上流のSCN(SCN01)はスキャニングマグネット直上流に配置され、照射中に、照射野形成装置部に安定したビームが供給されていることを確認するオンラインモニタの目的も兼ねている。

蛍光膜はビームラインに対して45度傾けて設置し、CCDカメラは垂直下方向に設置した。また、放射線によるCCD素子へのダメージを減少させるために、なるべくCCDカメラとビームラインの距離を離れた。ビーム中心位置からCCDカメラまでの距離が650 mmである。

モニタチャンバ内には、ビームライン水平方向に動作する二段圧空式のシリンダにより、校正用ボード、蛍光膜及び、対比状態の3段階に移動する。事前に校正用ボードの位置を、ビーム座標系と合わせておく。そして、その校正用ボードをCCDカメラで撮像することにより、CCDカメラから得られる画像とビーム座標を結びつけることができる。この作業は、放射線ダメージ等の理由でCCDカメラを交換した際に必ず行う必要がある。本モニタでは、このCCDキャリブレーションを画像処理によって自動で行うことを想定しているが、現在は手動で行っている。

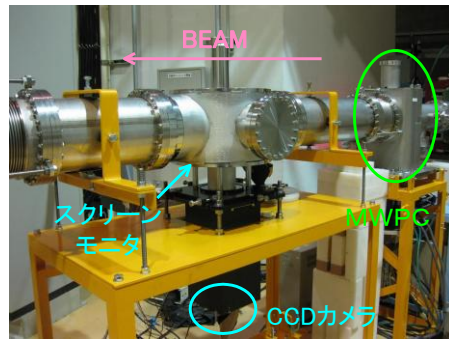


図1：スクリーンモニタ02とMWPC

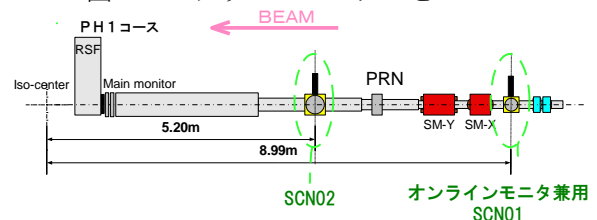


図2：スキャニング照射試験ポート上のスクリーンモニタ

#### 4.1 高速画像収集システム

画像処理システム (Type XG-7500, KEYENCE, Japan)はCCDカメラ及び、専用画像収集システムから構成される。このCCDカメラでは、最大200 Hzでの測定が可能である。実用的には、画像処理時間や、測定の積分時間を考慮して、100 Hz程度での測定の仕様となる。この高速画像収集システムを用いることにより、オンラインモニタとしての使用が可能になる。つまり、治療中にビームのサイズや位置が規定値を超えて変動した場合、インターロック信号を出し、ビームを即座に遮断することができる。

画像処理システムで測定された値はCC-LINK<sup>[5]</sup>もしくは、PLC-Linkを用いて制御PLCに送られる。PLCと直接接続することで、電磁石群と併せた制御系を簡単に作ることができる。

#### 4.1 画像処理

本モニタは (1) プロファイルモニタ及び、(2) オンラインモニタの二つの使い方があがるが、どちらも画像処理によりビーム中心及び、ビーム径を求める。オンラインモニタでは、高周期でビームを監視することが求められている。そこで、図3に示す、高速な画像処理によって対応した。

(1) プロファイルモニタでの画像処理では、次の測定を行うまでに数百 msecの時間がある。そこで、下式で表せるビーム重心を求める式によってビーム中心を計算している。

$$x_c = \frac{\sum_i B_{i,j}}{\sum_{i,j} B_{i,j}}, y_c = \frac{\sum_j B_{i,j}}{\sum_{i,j} B_{i,j}} \quad (1)$$

ここで、 $x_c$ 、 $y_c$ はそれぞれ、ビーム中心、 $B_{i,j}$ はCCDカメラで測定された位置(i, j)における輝度値である。

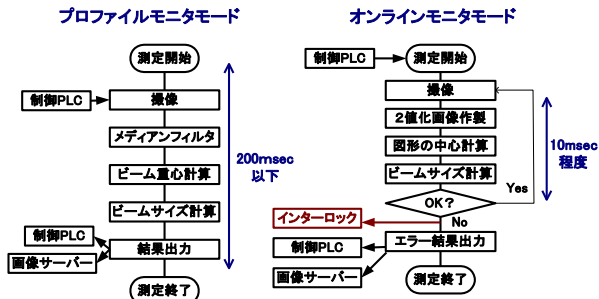


図3：画像処理のフロー

ビームサイズは、計算されたビーム中心位置を通る水平、垂直及び斜め45度の4方向について、輝度値の標準偏差を計算することにした。

これらの処理を行う前に、放射線によるCCD素子のホットピクセルの影響を減少させるために、メディアンフィルタ等の前処理が必要となる。

(2) オンラインモニタの画像処理は10 msec程度の時間で繰り返し測定を行う必要がある。そのうち、撮像時間が5 msec程度かかってくるため、画像処理の時間は少しでも短縮させたい。そこで、この画像処理システムに内蔵の画像処理であるプロブユニットを用いてビーム中心を求めた。内蔵のユニットを用いると処理にかかる時間を大幅に短縮することができる。このプロブユニットでは、予め決めた閾値を基準に2値化する、2値化により得られた画像の中心点を算出する画像処理である。この処理では、閾値以上の輝度値を持った面積の中心点をビーム重心点とするため、RF-knockout遅い取り出しを行った際のhorizontal方向のビーム形状のようにガウシアン形状から外れた場合、中心位置の誤差が生じる可能性がある。しかし、オンラインモニタでは、絶対位置以上に、相対位置の変化及び、高速測定が重要視されるため、このプロブユニットでの画像処理を採用した。

### 4.3 準非破壊蛍光膜

蛍光膜は通過するビームの多重散乱の影響を少なくするため、できるだけ薄いことが求められる。また、発光波長が光測定器の有感波長に合っていること及び、発光強度が強いことが重要になる。それらの条件を満たすため、我々は蛍光膜として、酢酸セルロースにZnS:Agを塗布した蛍光体 (2 mg/cm<sup>2</sup>) を使用した。この蛍光膜の水等価厚は46.8 mmで、<sup>12</sup>C350 MeV/nビームに対しての散乱角は0.1 mrad以下である。またZnS:Agの最大発光波長は450 nmでCCDカメラの有効感度によく対応している。

この蛍光膜に<sup>12</sup>C350 MeV/uを2 x 10<sup>8</sup> ppsの強度で50時間以上照射しているが、変色等の変化は見られていない。長時間の照射においても、変化が少ないことが期待される。

## 3. ビーム試験結果

図4に示した画像処理のオンライン画面で、二次元のビームプロファイルを確認することができる。

ビームの中心とサイズを測定して、その値を制御系に送信する。

図5は水平方向及び垂直方向のビームプロファイルを、既存MWPCビームプロファイルモニタの測定結果と比較した結果である。このとき、SCNのシャッター時間は20msで測定を行った。SCNはMWPCと比較して、高分解能の測定結果を示す。これにより、水平方向のビームプロファイルはガウシアン形ではなく、台形に近い形状をしている<sup>[6]</sup>ことを測定可能である。

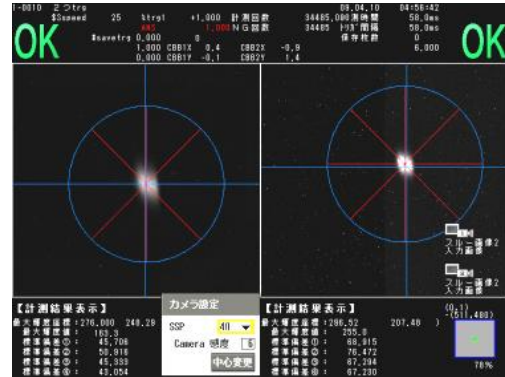


図4：画像処理システムのオンライン画面

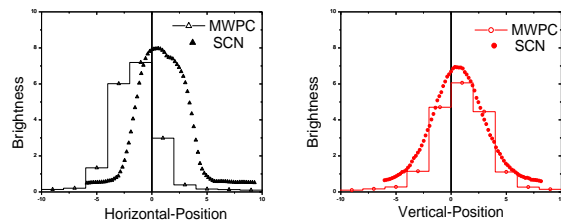


図5：MWPC及び、SCNによるビームプロファイルの比較

## 4. まとめ

以下の特徴を持つ、高速・高分解能のスクリーンモニタシステムを開発した。

- \*測定ビームに影響の少ない準非破壊測定が可能。
  - \*0.2 mm程度の高位置分解能測定が可能。
  - \*2次元の測定が可能。
  - \*最大100Hzでビーム中心、径の測定が可能。
- この結果、複数のモニタと電磁石群を組み合わせた高速ビームアライメント、また、照射中のビーム条件監視を行うことができる。今後、画像処理を工夫し、ビーム中心計算の精度を向上させていきたい。

## 参考文献

- [1] K.Noda et al, EPAC'08, 2008, TUPP125, p.1818
- [2] T.Furukawa et al, Med. Phys. 34 (2007) 1185
- [3] K.Furukawa et al, 302, in this proceedings
- [4] M.Torikoshi et al, Nucl. Instr. Meth. A 435(1999)326
- [5] CC-Link Patner Associationhttp; http://www.cc-link.org/
- [6] T.Furukawa et al, Nucl. Instr. Meth. A 560(2006)191