

非破壊型大電流ビームモニタの開発及び性能評価

DEVELOPMENT AND PERFORMANCE EVALUATION OF NON-DESTRUCTIVE HIGH-CURRENT BEAM MONITOR

足利沙希子^{#, A)}, 永嶋和也^{A)}, 青木孝道^{A)}, 関孝義^{A)}

Sakiko Asihkaga^{#, A)}, Kazuya Nagashima^{A)}, Takamichi Aoki^{A)}, Takayoshi Seki^{A)}

^{A)} Hitachi, Ltd.

Abstract

In order to achieve stable operation of high-current accelerators for neutron sources, we have developed a non-destructive beam monitor applicable to LEBT. The monitor can acquire various beam information, not only beam size and emittance, but also Twiss parameters by detecting fluorescence generated by interaction between the beam and residual gases. The monitor performance was evaluated with 30 keV H⁺ beam, and it turned out that the monitor can achieve sufficient beam size resolution smaller than 0.084 mm, and this performance is equivalent to the result by the slit-scan method. Furthermore, under the environment of vacuum pressure of 1.0×10⁻⁴ Pa or more and the beam current value of 11 mA or more, the monitor can detect the signals from the beam. According to these results, the developed monitor was shown to be fully functional in the LEBT of high-current accelerators.

1. 背景と目的

産業および医療用の加速器駆動型中性子源[1]では、大電流 CW(Continuous Wave)イオンビームが求められる。日立製作所は、ホウ素中性子捕捉療法や研究用加速器向けに 100 mA 級の CW ビーム引き出しを可能とするイオン源を開発してきた[2]。

数十 mA を超える大電流 CW ビームの測定においては測定器とビームが接触した場合、機器の発熱・帯電が問題となる[3]。この問題の解決手段の一つはビームを非破壊測定することである[4-6]。非破壊型のビーム測定には下流の加速器運転と測定を両立でき、加速器運転中のビームの常時監視も可能となる利点もある。しかしながら、特にビームのエミッタンス・Twiss パラメータ測定に関してはスリットスキャン法・ペーパーポット法等の破壊型測定法が主流であり、大電流 CW ビームでの測定・監視が困難であった。以上の理由から我々は加速器駆動中性子源のイオン源と下流の加速器をつなぐ低エネルギー輸送系(LEBT)でのビーム測定・監視を目的とし、ビームサイズ・エミッタンス・Twiss パラメータを非破壊で測定するビームモニタの開発を行った。

本稿では、開発したモニタを利用したビームパラメータ測定の実証試験、及び性能評価に基づく LEBT でのモニタ実用性の評価結果について述べる。

2. 残留ガス非破壊ビームプロファイルモニタ

2.1 モニタの検出原理及び構成

モニタの検出原理及びモニタ構成を Fig. 1 に示す。LEBT においてビームが通過する領域の真空度は 10⁻³ Pa 程度であり、ビーム軌道上には窒素等の残留ガスが存在する。ビーム通過時に残留ガスの構成原子はビームと相互作用し、一部が励起され、脱励起の際に可視光を放出する。本モニタは上記蛍光の分布からビームの空間分布の情報を取得する。蛍光の検出には CMOS

カメラ(IDS 社製 UI-3280CP-C-HQ Rev2.)を採用し、ダクト側面に設けられたビーム窓越しに測定を行う。本モニタ最大の特徴はビームの空間分布を軌道上の特定の点における断面としてではなく、軌道に沿ったエンベロープとして取得する点である。エンベロープからはエミッタンス及び Twiss パラメータの情報の取得が可能である。

以下では画像データからビームエンベロープ等のビーム情報を取得する方法を説明する。本稿ではビーム進行方向に z 軸、鉛直方向に y 軸を取る座標系を採用している。

2.2 ビームエンベロープの検出

本モニタでは、撮像した画像データを 2054×2456 の行列 M として扱う。ここで、データ行列 M の i 行 j 列成分 M_{ij} は空間座標 (z_j, y_i) の画素データである。ビーム軌道上の位置 z_j におけるビーム中心 $\langle y \rangle_j$ 及び RMS ビームサイズ σ_{yj} を式(1)、(2)により算出する。各 z_j において RMS ビームサイズを評価することでビームのエンベロープ σ_y を得る。

$$\langle y \rangle_j = \frac{\sum_{i=1}^{2054} M_{ij} y_i}{\sum_{i=1}^{2054} M_{ij}} \quad (1)$$

$$\sigma_{yj} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{2054} M_{ij} (y_i - \langle y \rangle_j)^2}{\sum_{i=1}^{2054} M_{ij}}} \quad (2)$$

2.3 エミッタンス・Twiss パラメータの抽出

円筒対称性を仮定すると、前項で検出したビームエンベロープ σ_y は次式のエンベロープ方程式を満たす。

[#] sakiko.ashikaga.zx@hitachi.com

$$\frac{d^2}{dz^2} \sigma_y(z) = \frac{\epsilon^2}{\sigma_y(z)^3} + \frac{\kappa}{4\sigma_y(z)} \quad (3)$$

ここで、 ϵ はビームの RMS エミッタンスであり、 κ は generalized perveance である。これらをパラメタとして数値計算を行い、式(3)の方程式の解で測定データをフィットすることでビームの RMS エミッタンスを抽出する。また、フィットの結果得たエンベロップ関数 $\sigma_y(z)_{sol}$ 及びエミッタンス ϵ_{sol} より Twiss パラメタ($\alpha(z)$, $\beta(z)$)を式(4), (5)の通り算出する。

$$\beta(z) = \sigma_y(z)_{sol}^2 / \epsilon_{sol} \quad (4)$$

$$\alpha(z) = -\frac{1}{2} \frac{d}{dz} \beta(z) \quad (5)$$

3. モニタの機能実証・性能評価試験

開発したモニタの原理実証及び性能評価を目的とし、イオン源からの引き出しビームを用いた試験を行った。原理実証試験では本モニタによりエンベロップ検出及びエミッタンス・Twiss パラメタ測定を行い、スリットスキヤン法の結果と比較することで測定の妥当性を検証した。

性能評価試験では LEPT に設置するモニタ機能のボトムラインをビームサイズの測定であると考え、ビーム監視実現にはモニタの性能として以下を要求した。

- シグナル-ノイズ比(S/N) ≥ 1
- ビームサイズの測定精度 $\leq 0.2\text{mm}$

本モニタの検出原理より、上記性能はビーム電流及びビーム通過領域の真空度に依存することが想定される。従って、モニタ性能のビーム電流・真空度依存性を評価し、LEPT 環境におけるモニタの実用性を調べた。

3.1 試験体系

試験体系の概要及び測定条件を Fig. 1, Table 1 に示す。イオン源で作成した 30keV の H⁺ビームを真空チャンバ内に引き出し、側面のガラス窓越しに蛍光の検出を行った。チャンバ内は光の反射・散乱を防ぐためにアルマイトフィルムによる反射防止措置を施してある。

試験においてはスリットスキヤン法による比較測定と条件を揃えるために、パルス幅 200 ms, duty 10% のパルスビームを使用した。そのため、今回取得したモニタの信号強度は CW ビーム測定時の 1/10 となっている。ビーム電流・真空度依存性の評価時はチャンバ上部のガス注入口から乾燥空気を入れることでチャンバ内の真空度を変え、ビーム電流はイオン源の RF 入力電力を変化させることで測定条件を変更した。今回の試験ではモニタにより y, z の 2 方向のビーム分布を取得した。

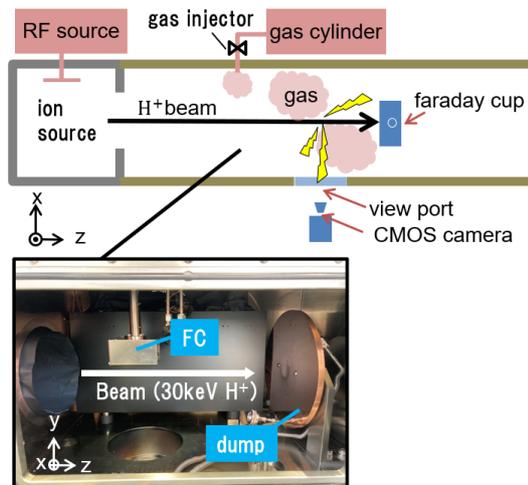


Figure 1: Schematic view of the experimental setup.

Table 1: Measurement Condition

Beam particle	H ⁺
energy	30 keV
current	18 - 32 mA
pulse length	200 ms
duty	10%
Vacuum level ($\times 10^{-3}\text{Pa}$)	1.5 - 10.2
Monitor exposure time	30 s

3.2 モニタの校正・ノイズ棄却

本モニタは事前に校正を行い、取得した画像データに対して補正及びノイズ棄却処理を行う。

校正は Fig. 2 に示す校正用ボードをビームライン上に設置し行った。校正用ボードには 5 mm 間隔でスリットが刻まれており、これをモニタで撮像し、Hough 変換[7]によりスリットを検出することでモニタデータの各画素とチャンバ内の位置の対応を得る。校正の結果、モニタデータの 1pixel の幅はビーム軌道上の 0.047 mm に対応している。

ノイズ棄却に関しては、ビーム OFF 時に取得した画像との差を取ることで測定環境起因のノイズの棄却を行った。また、CMOS カメラのセンサ起因のノイズに関しては、メディアンフィルタ[8]を用いた平滑化を行い、ノイズの影響の低減を図っている。メディアンフィルタでは画像の各画素に対し、周辺の 3x3 ピクセルの信号の中央値を変換後の画素としている。フィルタによる変換前後の測定画像を Fig. 3 に示す。図の左の変換前の画像では極端に明るい画素が点在しているが、右の変換後の画像ではノイズは目立たなくなっている。

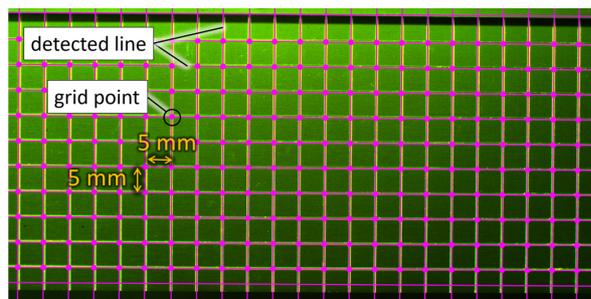


Figure 2: Calibration board and detected slit line.

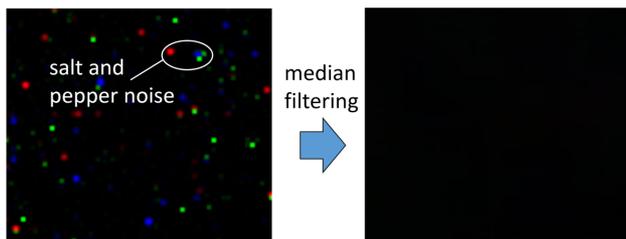


Figure 3: Before and after noise reduction filter.

3.3 ビーム軌道上の蛍光取得

開発したモニタにより撮像されたビーム軌道上の蛍光分布を Fig. 4 に示す。この時、ビーム電流値は 27 mA、チャンバの真空度は 1.5×10^{-3} Pa であった。ビームは紙面左から右方向に進行している。図内点線で示した位置における y 軸方向のビーム分布の測定結果を Fig. 5 に示す。青で示した分布は本モニタによるビーム分布の測定結果であり、橙色で示した分布はファラデーカップと幅 0.5 mm のスリットを用いた比較測定結果である。縦軸に関しては本モニタの測定結果をビーム中心の信号強度によりスケールし比較測定結果に合わせて表示している。

本結果より、モニタで取得したビームの y 軸方向分布はファラデーカップを用いた比較測定結果と測定誤差の範囲内で一致しており、軌道上の蛍光の分布からビーム形状を検出可能であることを確認できた。

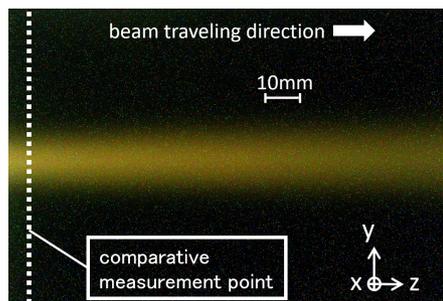


Figure 4: Detected fluorescence caused on the beam path.

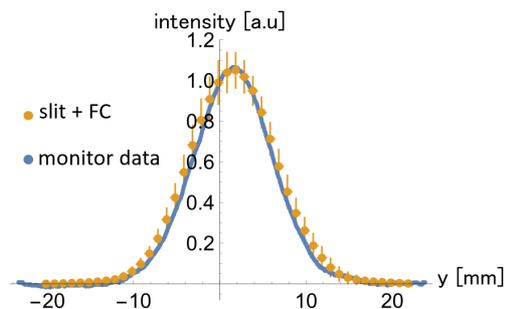


Figure 5: Measured beam distribution.

3.4 ビームエンベロープの検出及びパラメタ評価結果

Figure 4 の測定データよりビームエンベロープを評価した結果を Fig. 6 に示す。青で示したプロット点がビーム軌道上の各位置において評価されたビームサイズであり、上流から下流に向かって増大する様子が確認できる。赤の実線で示されているのがエンベロープ方程式の解によるフィット結果で、パービアンズ $\kappa = 1.27 \times 10^{-5}$ 、RMS エミッタンス $\epsilon = 11.71 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ を得た。スリットスキャン法による比較測定の結果、RMS エミッタンスは $\epsilon = 12.12 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ であった。双方の測定結果は約 4.5% の精度で一致している。

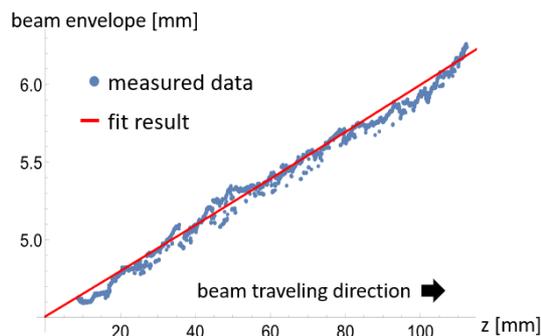


Figure 6: Detected beam envelope.

さらに、エンベロープのフィット結果より算出した Twiss パラメタ ($\alpha(z), \beta(z)$) をそれぞれ Fig. 7 及び Fig. 8 に示す。黒で示した点はエミッタンスと同様にスリットスキャン法により取得した Twiss パラメタである。 α に関しては 1.7%、 β は 6.7% の精度で本モニタによる測定結果は比較測定と一致している。

以上により、本モニタのデータからエミッタンス及び Twiss パラメタ ($\alpha(z), \beta(z)$) が算出可能であり、スリットスキャン法と遜色ない結果であることが実証された。

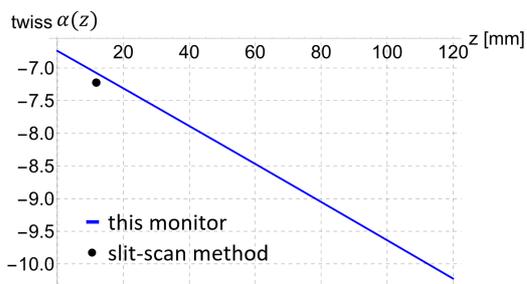


Figure 7: Extracted Twiss parameter $\alpha(z)$.

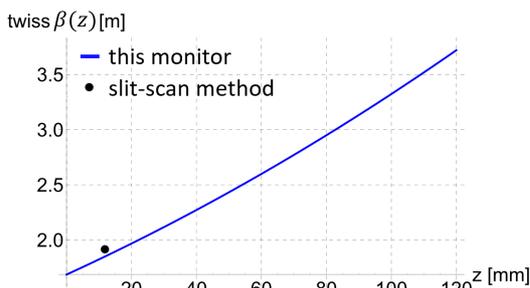


Figure 8: Extracted Twiss parameter $\beta(z)$.

3.5 シグナル-ノイズ比の測定環境依存性

ビーム起因の信号強度は以下の手順で算出する。まず、ビーム軌道上の位置 z_j のビーム分布をガウス関数 $f_j(y) = a_j e^{-(y-c_j)^2/2b_j^2}$ でフィットし、フィットパラメタ a_j を位置 z_j における信号強度とする。今回の試験では比較測定の都合上 duty10%のパルスビームを使用しており、CW ビームに対して測定を行った場合、10 倍の信号強度が見込まれる。従って、 a_j の平均値 $\langle a_j \rangle$ に対して、 $10\langle a_j \rangle$ を各測定条件におけるビーム起因の信号強度として採用した。ノイズレベルはビームがない条件での測定データの分散より算出している。

ビーム電流及びチャンバの真空度を変化させ、各測定条件においてシグナル-ノイズ比を評価した結果得られた依存性をそれぞれ Fig. 9、10 に示す。真空度依存性の測定は 27 mA のビーム電流、ビーム電流依存性は真空度 1.5×10^{-3} Pa において取得した結果である。図中の赤の実線は一次関数でフィットした結果であり、チャンバ真空度及びビーム電流に対しモニタ信号のシグナル-ノイズ比は線形であることが明らかとなった。上記の測定結果より、

- ビーム電流 27 mA において圧力 1.0×10^{-4} Pa 以上
- 圧力 1.5×10^{-3} Pa においてビーム電流 11 mA 以上

であれば本モニタでシグナル-ノイズ比(S/N) ≥ 1 を達成し、信号検出が可能である。

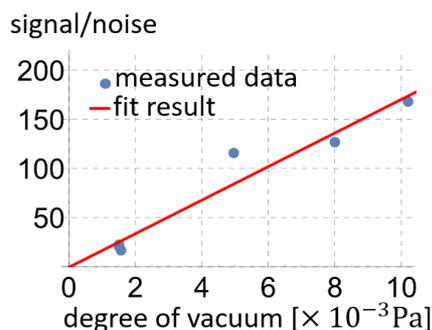


Figure 9: Vacuum level dependency of signal/noise.

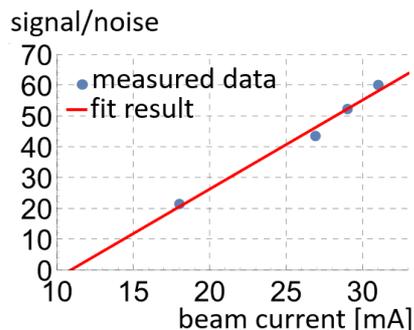


Figure 10: Beam current dependency of signal/noise.

3.6 ビームサイズの測定精度の評価

ビームサイズの測定精度をビームエンベロープの測定結果の揺らぎから評価することを考える。測定精度 σ_{error} はモニタによる各 z 位置でのエンベロープ測定データ σ_y に対し、式(6)により 3.4 で算出したエンベロープ方程式の解によるフィット結果 $\sigma_y(z)_{sol}$ からの残差 dy_j の平均二乗平方根を取り評価した。

$$\sigma_{error} = \sqrt{\sum_{j=1}^{2456} (\sigma_y(z_j)_{sol} - \sigma_{yj})^2} \quad (6)$$

各測定条件において測定精度を評価した結果、測定精度と測定環境の間に有意な相関を認めることはできなかったが、いずれの測定点においても 0.084 mm 以下の測定精度を達成した。これは LEBT 設置のモニタに求める測定精度 0.2 mm を十分下回る。また、3.2 のモニタ校正の結果から測定精度の内 0.047 mm は画像のピクセルサイズ起因の誤差であると推定されるため、今回算定した測定精度はカメラの画素数及び測定対象との距離の影響を受けていると推察できる。

3.7 モニタの測定可能条件

前項までの検討により、本モニタによる測定はモニタ信号のシグナル-ノイズ比により制約を受けることが明らかとなった。試験の結果得たモニタによるビーム測定が可能なる真空度及びビーム電流の条件を Fig. 11 に緑色で示す。図中に橙色で示した領域は大電流加速器の LEBT において想定される条件である。

本結果より、中性子源用大電流加速器の LEBT において本モニタによるビーム測定・監視が可能であることが確認できる。

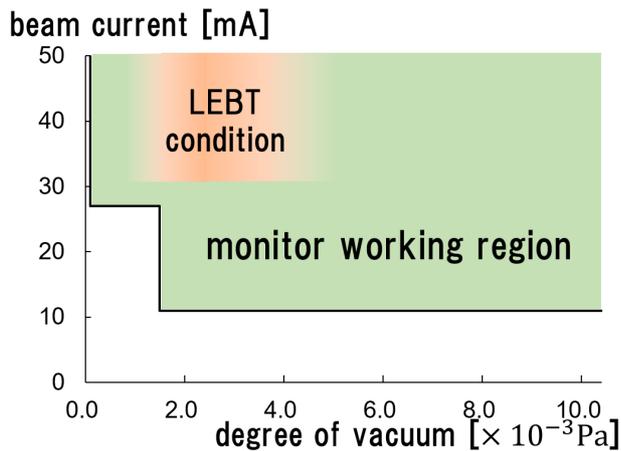


Figure 11: Comparison of Working region of the monitor and LEBT environment.

4. まとめ

中性子源用大電流加速器の LEBT に適用可能なビームのサイズ・エミッタンス・Twiss パラメタを測定する非破壊型ビームモニタの開発を行った。ビーム軌道上の残留ガスを利用した非破壊測定により、測定機器での発熱や帯電の問題を克服し、大電流 CW ビームの測定が可能である。

開発したモニタによるビームサイズ及びエミッタンス、Twiss パラメタ測定の実証試験を行い、いずれもスリットスキャン法による測定と 5%前後の精度で一致する結果を得た。

また、モニタ性能の測定条件依存性評価の結果、シグナル-ノイズ比に関してはビーム電流・チャンバの真空度に対して線形であり、真空度として圧力 1.0×10^{-4} Pa 以上、ビーム電流値は 11 mA 以上であればビーム起因の信号を検出可能であることが明らかとなった。ビームサイズの測定精度に関してはビーム電流・チャンバの真空度に依らず 0.084 mm 以下を達成した。これは LEBT でのビーム監視に十分な精度である。

以上の結果をもって、本モニタによる大電流 CW ビームのエミッタンス、Twiss パラメタの非破壊測定を実証し、中性子源用大電流加速器の LEBT におけるビーム測定・監視が可能であることを示した。

今後、開発したモニタをビーム調整及び監視に活用し、加速器の調整時間短縮及び安定稼働を実現する。

参考文献

- [1] 「加速器」 Vol. 13, No. 4, 2016 (253 -258).
- [2] M. Tanaka *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 79, 02B317 (2008).
- [3] Strehl, P. (2006). Thermal Aspects. In: Beam Instrumentation and Diagnostics. Particle Acceleration and Detection. Springer, pp71-104.
- [4] P. Forck, A. Bank, “Residual gas fluorescence for profile measurements at the GSI UNILAC.” Proceedings of 6th European Workshop on Beam Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerators, p137, (2002).
- [5] J. Pozimski, O. Meusel *et al.* “Non destructive determination of beam emittance for low energy ion beams using CCD camera measurements”. 7th European Particle Accelerator Conference, Vienna, Austria, Jun 2000, pp. e-proc. p1800.
- [6] I. Yamada *et al.*, “Non-destructive beam spatial profile measurement using a gas sheet monitor for a high-intensity ion beam”, Proceedings of 19th International Conference on Ion Sources, Sep 2021, p.012077_1 - 012077_6
- [7] D.H. Ballard, “Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes”, Pattern Recognition, Volume 13, Issue 2, 1981, Pages 111-122.
- [8] Wolfram Language. 2008. "Median Filter." Wolfram Language & System Documentation Centre. Wolfram Research. Last Modified 2016.
<https://reference.wolfram.com/language/ref/MedianFilter.html>