

## RCNPにおけるペッパーポット型エミッタンス測定装置のリアルタイム化

### REAL TIME-IZATION OF PEPPER POT EMITTANCE MEASURING DEVICE IN RCNP

森田泰之, 福田光宏, 依田哲彦, 神田浩樹, 畑中吉治, 安田裕介, 鎌倉恵太, 原周平, 山野下莉奈, Koay Hui Wen  
Yasuyuki Morita, Mitsuhiro Fukuda, Tetsuhiko Yorita, Hiroki Kanda, Kichiji Hatanaka, Yuusuke Yasuda, Keita  
Kamakura, Shuhei Hara, Rina Yamanoshita, Koay Hui Wen  
Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

#### Abstract

In order to improve the beam intensity, the beam development with the efficient measurement of ion beam emittance which should be matched to cyclotron acceptance is important. We aimed to obtain the emittance with the graph of the beam state by controlling and analyzing the Pepper Pot Emittance Measuring device (PPEM) with LabVIEW. As a result, it becomes possible to display the emittance with the graph of the beam state at 4 Hz and succeeded in speeding up. The emittance value are almost consistent with the existing emittance monitor.

#### 1. はじめに

大阪大学核物理研究センター(RCNP)サイクロトロン施設では大強度ミューオン源(MuSIC)や大強度中性子源開発のための陽子ビーム、二次 RI ビーム生成のための重イオンビームなどを供給している。これらの実験データの精度及び信頼性を向上させるためにサイクロトロンの大強度化が求められている。大強度化の方法の一つとしてサイクロトロンアクセプタンスにマッチした大強度ビームをイオン源から供給する必要がある。そのため、ビームのエミッタンスを測定し、パラメーターの調整をしなければならない。これまで RCNP では 18cps で動作するプロファイルモニターを利用し 70 秒でデータ取得可能な高速エミッタンスモニター(RapidEM) [1,2]やペッパーポット型エミッタンス測定装置(PPEM)の導入[3,4]など、エミッタンス測定の高速化に取り組んできた。PPEM については位相空間の粒子密度分布の表示とエミッタンスの導出を 10 秒で達成しており、また粒子密度分布の表示機能を省いた状態では最速 0.5 秒でエミッタンスの導出ができています。今回、PPEM の制御と解析を LabVIEW で行うことで、測定時間の高速化、即ちリアルタイム化を粒子密度分布の表示を伴った状態で実現することを目的とした開発を行った。この実現によりイオン源開発効率の更なる向上を目指す。

#### 2. エミッタンスモニターの概要

PPEM は銅の薄板に 3mm 間隔で格子状に直径 70 $\mu$ m の穴を開けたペッパーポットマスクを通過したビームがマスクから 50mm 下流のマикроチャンネルプレート(MCP)上に作る像から x, y 両方向の位相空間を同時に取得するものである[3,4]。MCP の像は表面反射鏡と CCD カメラにより取得する。使用した CCD カメラ SONY XCD-U-100 は IEEE1394b により高速データ転送が可能である。得られる画像データの画素数は 1600  $\times$  1200pixel で、各画素の強度は gray scale(0~255)の Windows Bitmap 形式で取得される。

得られた画像データより(x, x'), (y, y')の位相空間配列

を作る。ここで x'は

$$x' = \arctan\left(\frac{(p-i)\Delta x}{d}\right) \quad (1)$$

で求まる。ただし p はマスクでの穴の位置(pixel)、i はスクリーン上での pixel、 $\Delta x$  は 1 pixel あたりの長さ(mm)、d はマスクと蛍光板の距離(mm)である。y' に関しても同様に求めることができる。i 番目のデータ点が位相平面中で占有する面積、( $\Delta x(i) \times \Delta x'(i)$ )とその gray scale、G(i)の積 $\Delta Q(i)$ 、(ビーム量)を計算し、

$$\Delta Q(i) = \Delta x(i) \times \Delta x'(i) \times G(i) \quad (2)$$

G(i)の値でデータを1~ $i_{\max}$ まで昇順に並べ替え、Q(k)を次のように定義する。

$$Q(k) = \sum_{i=1}^k \Delta Q(i) \quad (3)$$

ここで

$$\frac{Q(k_0)}{Q(i_{\max})} \equiv 0.1 \quad (4)$$

となる $k_0$ を定義すると全ビーム量の 90%が入る位相空間平面の面積 90%エミッタンスは次のように表される。

$$\varepsilon = \sum_{i=k_0}^{i_{\max}} \Delta x(i)\Delta x'(i) \quad (5)$$

また、ピークの 10%以上の gray scale を持つデータ点の位相空間平面中で占有する面積を足し合わせ、10%Peak エミッタンスを求める[3,4]。

#### 3. LabVIEW による制御・解析の高速化

これまで、PPEM は取得した画像を汎用機に即座に転送して解析したり、カメラに付属していた制御ソフトを C++によって改良した解析ソフトを使用したりすることでエミッタンス測定を行っていた[3,4]。今回、更なる解析の高速化・リアルタイム化をはかるため、LabVIEW による制御・解析プログラムを導入した。このプログラムのベースは理研のイオン源グループで開発されたもの[5,6,7]で、RCNP の PPEM 解析用 PC に移植して使用した。カメラを使用する際、IEEE1394 のドライバとして Texas

Instruments 1394 OHCI Compliant Host Controller を使用すると正常に動作しない可能性があるため 1394 OHCI Compliant Host Controller (Legacy) に設定した。このプログラムを単に移植しただけの状態では 0.5Hz が限界であった。その原因として画像を連続的に取得できない”Snap”という機能を使用していたことと画像を一度取得するたびにカメラとの接続を切り、また接続しなおして

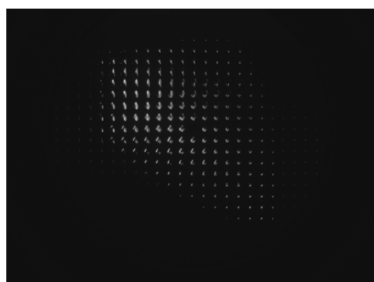


Figure 1: Image acquired with CCD camera.

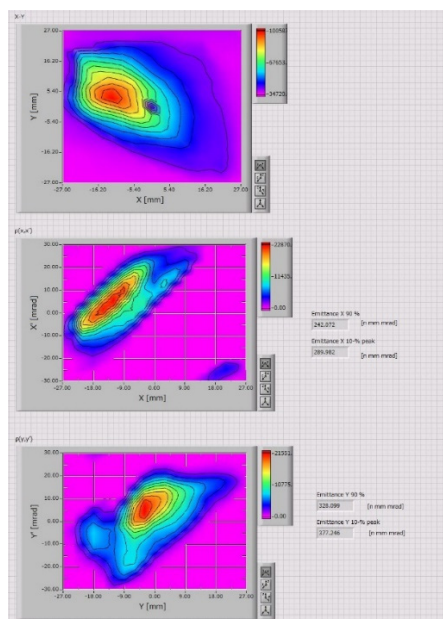


Figure 2: Particle density distributions in the transversal plane of(x,y), and the phase space of (x,x') and (y,y').

次の画像を取得していたため画像の取得に時間がかかっていた。そこで”Snap”の代わりに連続的に画像を取得できる”Grab”という機能を使用し、カメラとの接続はプログラムが止まるまで接続し続けるように改良することで画像の取得頻度を上げた。エミッタンスの表示頻度(Hz)と回数、それらの関係を表すチャートが表示されるため、解析速度が一目でわかるようになっている。また、ビームの状態が視覚的にわかるよう、x-y 平面、x-x'位相空間平面及び y-y'位相空間平面の粒子密度分布の表示が可能となっている。実際の画像データとその粒子密度分布を Figure1, 2 に示す。

ペッパーポットマスクの中心は位置確認のために穴をあけていないため、x-y 平面のプロットでは中心部分が欠落して見えるが、この一点の欠落がエミッタンス測定に及ぼす影響は非常に小さい。

#### 4. 性能評価

今回、PPEM を超電導 ECR イオン源(SCECR)のビームラインに設置し SCECR で生成された  $^{16}\text{O}^{5+}$ ビームを使用し、性能評価を行った。超電導 ECR イオン源から AVF サイクロトロン中心軸上方までのビームライン(LEBT: Low Energy Beam Transport)の概略図を Figure 3 に示す。ただし PPEM は本装置、RM は RapidEM、FC はファラデーカップである。

##### 4.1 解析時間

本装置では 90%エミッタンス、10%Peak エミッタンスを 4 Hz の更新速度で表示することに成功した。表示にかかる時間をコントロールできるようになっているが、4 Hz を超えて表示しようとする測定停止やパラメーター値の変更がスムーズにできなくなってしまう。これはセクション 2 で説明したエミッタンス値の計算を行うのに for ループを複数回重ねて計算する必要があり、処理に時間がかかることが原因であると考えられる。

##### 4.2 エミッタンス値

今回、slitを挟み、その幅を  $\pm 8$  mm,  $\pm 4$  mm,  $\pm 2$  mm と変え、エミッタンス値を本装置と RapidEM で測定し、比較することで本装置の性能評価を行った。各ス

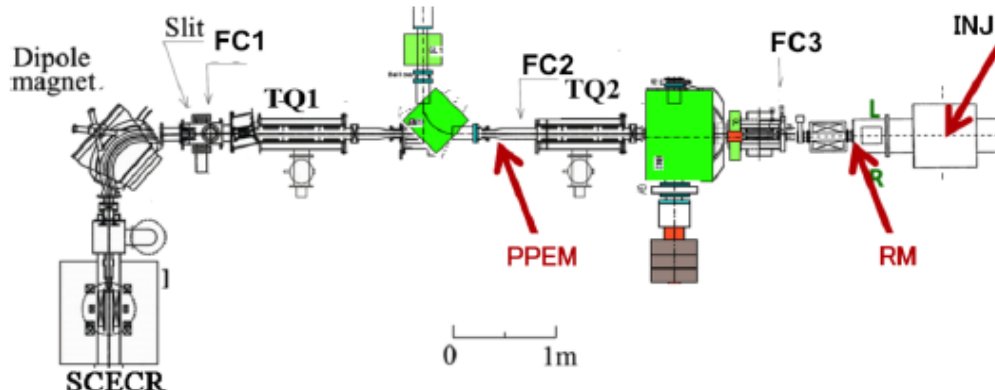


Figure 3: Layout of ion sources and their LEPT line.

リットの設定に対する FC1 と FC3 でのビーム量はスリットが  $\pm 8 \text{ mm}$  のとき FC1 が  $400 \mu\text{A}$ 、FC3 が  $350 \mu\text{A}$ 、 $\pm 4 \text{ mm}$  のとき FC3 が  $210 \mu\text{A}$ 、 $\pm 2 \text{ mm}$  のとき FC1 が  $110 \mu\text{A}$ 、FC3 が  $110 \mu\text{A}$  であり、いずれの場合もビームの透過率が 87.5%以上であり、RapidEM は PPEM の良い比較対象となる。この時 MCP バイアス電圧は gray scale がサチレーションを起こさないよう 740 V に設定した。MCP に電圧をかけていない状態であっても gray scale は 17 程度のペDESTAL を持つため、予め gray scale からペDESTAL の 17 を引く必要がある。本装置では解析プログラムの中ではペDESTAL を gray scale の閾値として設定し、閾値の値を差し引いている(online 処理)。この操作の妥当性を確認するために off line で先述の閾値を 0 から変化させていき、エミッタンス値と閾値の相関関係を二次元グラフでプロットし、閾値の高い領域で直線的に変化する領域に施した直線フィッティングの結果得られる直線において閾値を 17 とした場合に計算されるエミッタンス値をバックグラウンドの排除されたエミッタンス値として導出し[3]、online 処理で表示される値の評価を行う。プロット、フィッティングの例を Figure4 に示す。

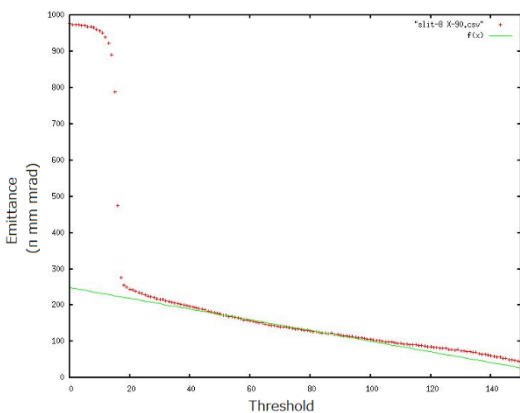


Figure 4: Correlation between emittance and threshold.

本装置で閾値を 17 に設定した場合に online 処理で表示される値と off line でバックグラウンドの処理をした値、そして RapidEM での値をそれぞれ Table 1, Table 2, Table 3 に示す。

どの結果でも slit を狭めるとエミッタンス値が減少するという傾向の一致がみられる。online 処理での絶対値は RapidEM の値に比べ、x-x' 位相空間では 1~2 割ほど大きく、y-y' 位相空間では倍程度の値が表示される。offline で処理を施すと、RapidEM の値に近い値が得られるため、online 処理の方法を改善する必要がある。エミッタンス値が RapidEM と異なる原因として、バックグラウンド以外に、カメラの範囲外にもマスクの穴が存在することやフィッティング範囲の問題、CCD カメラの感度依存、MCP バイアス電圧による影響などが考えられる。そこで gray scale の最大値がおおよそ 100 になるように MCP バイアス電圧を 700 V に変更してスリット幅  $\pm 2 \text{ mm}$  で測定を行い、off line でバックグラウンドを処理したエミッタンス値を Table 4 に示す。

この検証でバイアス電圧が小さくなるとエミッタンス値が減少する傾向がみられる。

Table 1: Emittance in PPEM (threshold=17)

		Slit (mm)		
		8	4	2
Emittance ( $\pi$ mm mrad)	X-10%	309.6	179.4	133.9
	X-90%	275.2	165.9	125.3
	Y-10%	18.3	247	201.5
	Y-90%	303.5	244.5	207.7

Table 2: Emittance in PPEM (offline analysis)

		Slit (mm)		
		8	4	2
Emittance ( $\pi$ mm mrad)	X-10%	254.7	144.6	105.1
	X-90%	223.6	124.9	96.34
	Y-10%	269.7	188.9	136.1
	Y-90%	243.9	166.2	148.9

Table 3: Emittance in RapidEM

		Slit (mm)		
		8	4	2
Emittance ( $\pi$ mm mrad)	X-10%	231.4	162.3	116.2
	X-90%	228.9	147.1	107.6
	Y-10%	229.2	117.5	96.8
	Y-90%	205.9	136.2	107.9

Table 4: Relationship between Emittance and Bias Voltage

		Applied Voltage (V)	
		740	700
Emittance ( $\pi$ mm mrad)	X-10%	133.9	126.6
	X-90%	125.3	114.3
	Y-10%	201.5	185.6
	Y-90%	207.7	175.7

## 5. まとめ

ペッパーポット型エミッタンス測定装置を LabVIEW を用いて制御・解析することでリアルタイム化を図り、4 Hz の頻度でエミッタンス値と粒子密度分布を表示することに成功した。4 Hz という数字はリアルタイムと呼ぶに十分な速度であり、イオン源のビーム調整の効率が格段に向上することが期待される。今後、解析速度を保った状態での確からしいバックグラウンド処理方法の確立や MCP バイアス電圧によるエミッタンス値への影響、CCD カメラの感度依存などを調べることにより PPEM と RapidEM によるエミッタンス値の違いについて詳細に検討し、信頼度の高いエミッタンスモニターの構築を目指す。

## 参考文献

- [1] Keita Kamakura *et al.*, "Development of a Rapid Beam Emittance Measurement System using a Real-Time Beam Profile Monitor", IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. 63, NO. 3, JUNE 2016.
- [2] Keita Kamakura *et al.*, "DEVELOPMENT OF AUTOMATIC EMITTANCE MEASUREMENT",

Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan WEPS075.

- [3] Tetsuhiko Yorita *et al.*, “Developments of fast emittance monitors for ion sources at RCNP”, Rev. Sci. Instrum., vol. 87, pp. 02B928, 2016.
- [4] 山根浩義, “ペーパーポット型リアルタイムエミッタンス測定装置の開発”, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan SAP079.
- [5] 小高康熙 *et al.*, “ペーパーポット型エミッタンス測定器を用いた理研 AVF サイクロトロン入射系の解析”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan PASJ2016, TUP075.
- [6] V. Tzoganis *et al.*, “EMITTANCE MEASUREMENTS AND OPERATION OPTIMIZATION FOR ECR ION SOURCES”, Proceedings of IPAC2016, MOPMR048.
- [7] V. Tzoganis *et al.*, “DEVELOPMENT OF AN ONLINE EMITTANCE MONITOR FOR LOW ENERGY HEAVY ION BEAMS”, Proceedings of HIAT2015, WEPB24.