

# DEVELOPMENT OF REAL-TIME EMITTANCE MONITOR USING PEPPER-POT METHOD

山根浩義, 畑中吉治, 福田光宏, 依田哲彦, 盛田義弥, 鎌倉恵太, 植田浩史, 森信俊平, 齋藤高嶺  
永山啓一, 田村仁志, 安田裕介

Hiroyoshi Yamane, Kichiji Hatanaka, Mitsuhiro Fukuda, Tetsuhiko Yorita, Yoshiya Morita, Keita Kamakura  
Hiroshi Ueda, Shunpei Morinobu, Takane Saito, Keiichi Nagayama, Hitoshi Tamura, Yuusuke Yasuda  
RCNP, Osaka University

## Abstract

At Osaka University RCNP cyclotron facility, researches aimed at high-intensity and high quality of the proton beam have been carried out. In the current beam acceleration, there is one problem that the beam generated by the ion source is not injected to the AVF cyclotron downstream efficiently. This is due to the mismatch of acceptance of the AVF and the emittance of the ion source beam. Therefore, in order to realize the beam injection more efficient, it is necessary to measure and evaluate emittance and phase space distributions of the beam rapidly. In our facility, emittance measurements using a slit and a rotating profile monitor have been performed. Thus, the measurement time shortened from 30 minutes to 75 seconds. Thus, it becomes possible to adjust the parameters of the beam transport system and the ion source while the measure emittance, however, in order to improve the control of the beam further, we're aiming the development of real-time emittance measurement system using pepper-pot method. Since we moved a slit in the conventional emittance measurement system mechanically, it took a measurement time of 1 minute because it becomes rate-determining. On the other hand, since there is no mechanical drive in repeated measurements by using a MCP and pepper-pot mask drilled uniformly in pepper-pot method, significant shortening of measurement time is expected than the measurement time using a slit current.

## 1. はじめに

大阪大学 RCNP サイクロトロン施設では、陽子ビームの大強度化・高品質化を目指した研究が行われている。現状のビーム加速には、イオン源で生成されたビームが効率的に後段の AVF サイクロトロンへ入射されていないという問題がある。これはイオン源ビームのエミッタンスと AVF のアクセプタンスの不整合によるものである。したがって、より効率的なビーム入射を実現するため、ビームの位相空間分布及びエミッタンスを迅速に測定・評価する必要性が生じた。

これまで当センターでは、回転式プロファイルモニタとスリットを用いたエミッタンス測定の高速度化 [1] が行われ、測定時間は 30 分から 75 秒まで短縮された。これによりエミッタンスを測りながらイオン源及びビーム輸送系のパラメータを調整することが可能になったが、イオン源から取り出したビームの状態を決めている各パラメータに対する特性を評価し、より効率的なビーム入射を実現させるため、ペッパーポット法を用いたリアルタイムなエミッタンス測定システムの開発を目指している。

## 2. ペッパーポット法とは

ペッパーポット法 [2, 3] はスリット法の一つである。下記に概要を Fig 1 に示す。この方法では、ペッパーポットマスクと呼ばれる薄い金属板でビームの切り出しを行う。この板には直径数十ミクロンの

穴が数ミリ間隔で規則的に配列されており、このマスクにより切り出されたビームを後方のスクリーンに映し、CCD カメラ等を用い画像として取得し、ビームの広がりからエミッタンスを求める手法である。

ペッパーポット法のメリットとして、測定速度の速さが挙げられるが、ペッパーポットマスクの穴のピッチに測定精度が依存することがデメリットと考えられる。従って、穴を小さくしても解析できるビーム像の強度を得るためにマイクロチャンネルプレートを用い、測定精度を高くする工夫をした。

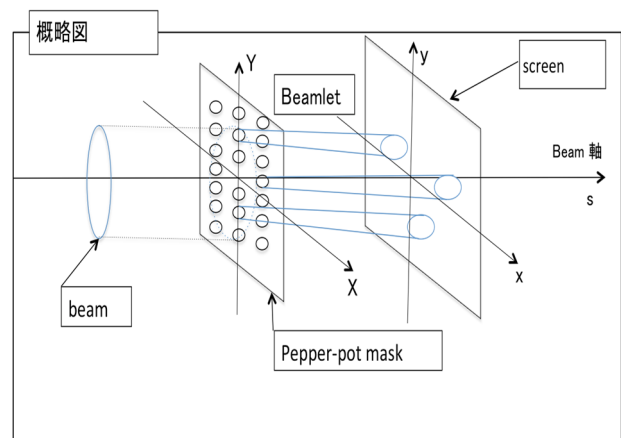


Figure 1: Schematic diagram of a pepper-pot method for the emittance measurement.

### 3. 実験装置

今回開発した測定装置はペッパーポットマスク、蛍光板付きマイクロチャンネルプレート (HAMAMATSU PHOTONICS)、CCD カメラ (SONY XCD-U100 白黒) が主な構成物である。ビームラインの上流から順に、ペッパーポットマスク、マイクロチャンネルプレート、蛍光板を設置し、真空外からミラーを経由し蛍光板に映った像を CCD カメラで撮影している。測定装置の内部構造を下記の Pic. 1 で示し、ペッパーポット型エミッタンス測定装置の設置位置を下記の Fig. 2 に示す。

ペッパーポットマスクの材質はリン青銅を用い、厚さ  $50\mu\text{m}$  の板に穴径  $70\mu\text{m}\Phi$  の間隔  $3\text{mm}$  で規則的に配列されているものを使用している。SCECR(18GHz 超伝導 ECR イオン源)で生成した約  $15\text{KeV}$  のビームで実験を行っているので厚さ  $50\mu\text{m}$  で完全にコリメート出来ていると考えている。また、解析を行う時のことを考慮し、ペッパーポットマスクの原点位置には穴を開けておらず、蛍光板に映し出した像がどの穴から出たものかを判別できる様に工夫している。

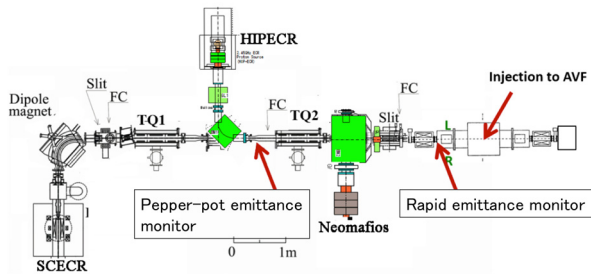


Figure 2: Location of the real-time Pepper-pot emittance measurement device. FC is Faraday cup, TQ is Triplet Quadrupoles.

### 4. 解析手法及び解析結果

#### 4.1 解析手法

CCD カメラで Windows Bitmap 形式で  $1600 \times 1200$  ピクセルサイズのデータを取得する。下記の図 3 に穴 1 つについての解析法を示す。図 3 に示した様に、ペッパーポットマスク上の穴  $(X, Y)$  と、蛍光板の像との対応が取れているため、ペッパーポットマスクと蛍光板の距離とペッパーポットマスクの穴の中心位置と蛍光板の像との差から  $x', y'$  を導出できる。ペッパーポットマスクの穴 1 つから水平方向  $X$ 、垂直方向  $Y$  の位置情報と水平方向の角度分散  $x'$ 、垂直方向の角度分散  $y'$  の関数としての光の強度  $\rho(X, Y, x', y')$  が得られる。

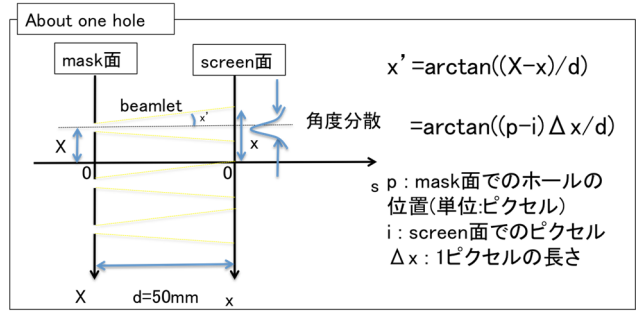


Figure 3: The analysis technique for one hole.

さらに、ペッパーポットマスク上の各穴から得られる強度分布  $\rho(X, Y, x', y')$  を各行・列について積分することによって位相空間分布や空間分布等の結果を得る事が出来る。例として、 $X-x'$  の位相空間分布  $\rho(X, x')$  を求める式は

$$\rho(X, x') = \iint \rho(X, Y, x', y') dY dy'$$

である。

#### 4.2 解析結果

実際に測定し、得られた結果の一例を下記の Fig. 4 に示す。Figure 4 の測定時のパラメータは MCP に掛けるバイアス電圧  $500\text{V}$ 、蛍光板に掛けるバイアス電圧  $2\text{KV}$  に設定しており、 $^{22}\text{Ne}^{6+}$  のビームを用い、下流のファラデーカップで  $100\mu\text{A}$  である。また、カメラのゲインやシャッタースピードは像がサチュレーションを起こさないよう気をつけて調整した。

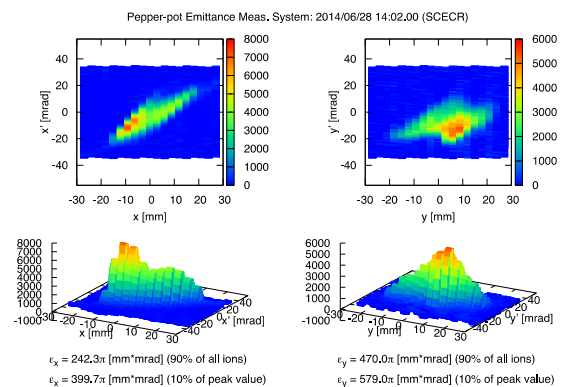


Figure 4: Particle distribution of  $^{22}\text{Ne}^{6+}$  beam in the phase space of  $(x, x')$  and  $(y, y')$ .

取得画像を即座に解析プログラムにかけることにより、Fig. 4 の様な解析結果が得られる。画像取得から測定結果の表示までの所要時間約 1 秒でこの結果が得られた。この解析結果の信頼性については今

後検証していかなければならないが、その点について5章で考察する。

## 5. 問題点

エミッタンスがMCPに掛けるバイアス電圧に依存していると思われる。下記の Fig. 5に MCP と蛍光板に掛けるバイアス電圧のみを変更した ${}^4\text{He}^{2+}$ ビームの結果を示す。左の結果が、MCP : 280V, 蛍光 : 2KV、右の結果が、MCP : 310V, 蛍光板 : 1KV を掛けた時の結果である。

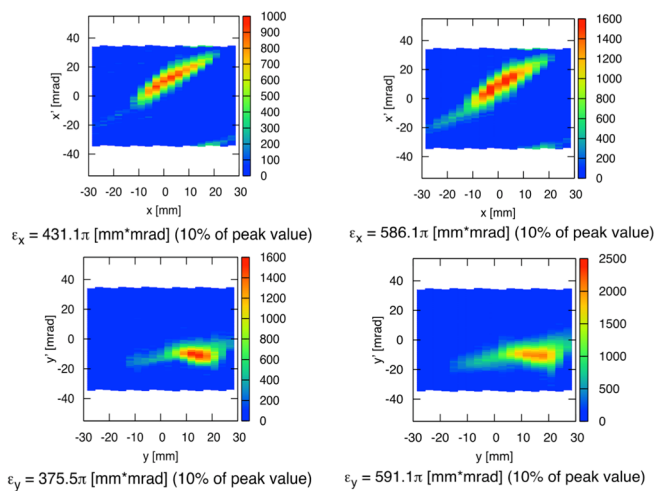


Figure 5: Variation of the particle distribution in phase space, depending on the MCP bias voltage.

同じビームにもかかわらず、 $x$  のエミッタンスがMCP310Vの場合の約1.36倍、 $y$  のエミッタンスは約1.57倍となっている。MCPに掛けるバイアス電圧にエミッタンスが依存性を持っている原因として、空間電荷効果ではないかと考えている。MCPの特性上、増幅率を上げる程、電荷が密になっていくため、エミッタンスに影響を及ぼしているのではないかと考えられる。

## 6. まとめと今後の課題

ペッパーポット法でのエミッタンス測定装置の開発を行い ${}^{22}\text{Ne}^{6+}$ や ${}^4\text{He}^{2+}$ のイオンビームを用いて、エミッタンス測定を行った。画像取得に引き続いて解析プログラムを実行することにより、約1秒で解析結果を出力する事が出来た。

今後の課題として

1. MCP 増幅率(設定電圧)エミッタンスの依存性の解明と測定条件の最適化
2. 取得時の画像のバックグラウンドに影響があるため、カメラの設定(shutter gain etc.)の最適化
3. 石英窓での反射によるバックグラウンドへの対策

上記の3点の課題に対して、MCPや蛍光板に掛ける電圧や、カメラの設定値を実験を繰り返して行う事によって評価していく。

さらに、既存のエミッタンスモニターとの比較による、ペッパーポット法でのエミッタンス値の絶対値の検証を行う。そのため、図2で示したように既存のRapid emittance monitorとペッパーポット法での互いのエミッタンス値を比較出来る様、Rapid emittance monitorとペッパーポット間のビーム輸送マトリックス計算を行い、ビーム輸送を見直す。

また、カメラ画像のリアルタイム取り込みを整備してほぼリアルタイムにエミッタンス値を導出可能にする。

## 参考文献

- [1] K.Kamakura et al., "Development of Rapid Emittance Measurement System", Proceedings of the 20<sup>th</sup> International Conference on Cyclotrons'13 (September, 2013, Vancouver, Canada).
- [2] H.R. Kremers, et al., "A pepper-pot emittance meter for low-energy heavy-ion beams", KVI, University of Groningen, Zernikelaan 25, 99747 AA Groningen, The Netherlands (Dated : January 16, 2013).
- [3] A. Pikin, et al., "Pepper Pot Emittance Meter" C-AD accelerator Physics Notes, BNL, C-A/AP/244, July 2006.