

ペッ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 ANALYSIS OF THE BEAM INJECTION SYSTEM OF RIKEN AVF CYCLOTRON BY USING PEPPER-POT EMITTANCE MONITOR

小高康照^{#,A)}, 大城幸光^{A)}, 山口英斉^{A)}, 今井信明^{A)}, 武藤英^{B)}, 長友傑^{C)}
加瀬昌之^{C)}, 後藤彰^{C)}, 大西純一^{C)}, 畑中吉治^{D)}, 下浦享^{A)}

Yasuteru Kotaka^{#,A)}, Yukimitsu Ohshiro^{A)}, Hidetoshi Yamaguchi^{A)}, Nobuaki Imai^{A)}, Hideshi Muto^{B)}
Takashi Nagatomo^{C)}, Kase Masayuki^{C)}, Akira Goto^{C)}, Jyun-ichi Ohnishi^{C)}, Kichiji Hatanaka^{D)}, Susumu Shimoura^{A)}

^{A)} CNS, University of Tokyo

^{B)} Tokyo University of Science, SUWA

^{C)} RIKEN Nishina center

^{D)} RCNP, Osaka University

Abstract

In order to improve the beam injection efficiency of RIKEN AVF Cyclotron, the analysis of the beam orbit is necessary. Since some solenoid coils as focusing elements are in the beam injection line, the beam orbit calculation of solenoid coil needs the four-dimensional emittance (x, x', y, y'). Using the four-dimensional emittance measured by the pepper-pot emittance monitor, we calculated some beam orbits. In this calculation, we adopt the calculated magnet field for solenoid coil and quadrupole magnet as focusing elements and the correction for edge-focus of dipole magnet. As a result, the calculated beam orbit of low intensity beam is nearly consistent in comparison with other diagnostics. However, the calculated beam orbit of high intensity beam does not fit. Therefore, considering the space charge effect, the calculated beam orbit of high intensity beam approaches the real beam orbit.

1. はじめに

理研 AVF サイクロトロン的高度化を東京大学原子核科学研究センター(CNS)と理研仁科加速器研究センターが共同研究として進めている。その一つがビーム強度の増強である。その手段の一つとして、我々はAVFサイクロトロンへのビーム入射量の増強に注目した。イオン源で生成したビームがAVFサイクロトロンに入射する割合は平均19%と低く、全体的に見て、ここでの損失が最大だからである。ビーム入射量を増強するためには、ビーム入射輸送系のビーム軌道の最適化が必要である。そのために入射ビームのエミッタンスを測定し、ビーム軌道計算を行い、ビーム軌道を把握する必要がある。

AVFサイクロトロンに入射輸送系にはソレノイドコイルが存在するためビームの水平成分(x)と鉛直成分(y)が結合する。この場合、ビーム軌道計算には4次元エミッタンス(x, x', y, y')が必要である。そこで4次元エミッタンスが測定可能なペッパーポット型エミッタンス測定器を開発し、測定された4次元エミッタンスを初期条件としてビーム軌道計算を進めている。

2. AVF サイクロトロン入射ビーム輸送系

Figure 1 に AVF サイクロトロン入射輸送系を示す。AVF サイクロトロンイオン源の一つが CNS の 14GHz 電子サイクロトロン共鳴イオン源 (HyperECRIS) であり、本文は、その生成ビームの入射軌道計算を対象とする。

HyperECRIS は 2001 年に設置し、同時に垂直偏向電磁石(DMI23)までのビーム輸送系を新たに建設した[1]。

HyperECRIS から引き出されたビームは分析電磁石で90度偏向し、目的のイオンビームに選別される。分析電磁石の焦点面にプロファイルモニタ(PF_IH10)、その250mm 下流にペッパーポット型エミッタンス測定器(PEM_IH10)がある。さらに下流に第1ソレノイドコイル、DMI23 入口にビューワー(I23viewer)がある。DMI23 によりビームは鉛直下方に偏向される。DMI23 出口にプロファイルモニタ(PF_I30)、その下流に第2ソレノイドコイル、4つの四極電磁石、第3ソレノイドコイル、スリット型エミッタンス測定器(EM_I36)がある。その真下でビームはAVFサイクロトロンのヨーク内部に入り、グレーザーコイル2台を通過してAVFサイクロトロンの中心にあるインフレクターに達する。

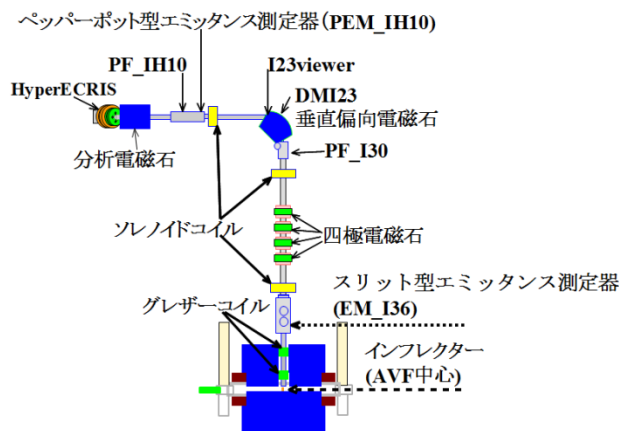


Figure 1: The beam injection line of AVF Cyclotron and diagnostics.

[#] kotaka@cns.s.u-tokyo.ac.jp

3. 入射ビーム輸送系の最適化の経緯

入射ビーム輸送系の最適化は、HyperECRIS 及び新ビーム輸送系の設置以降進められてきた。当初は x と y 方向の 2 次元エミッタンスを独立に仮定して、ビーム軌道計算コード WinAgile[2]を用いて解析していた。

しかし、入射ビーム輸送系は 4 次元エミッタンスを使用しなければ真に計算できない。そこでプラズマイオン源解析コード IGUN[3]により HyperECRIS 引出ビームの 4 次元エミッタンスを計算し、その結果を WinAgile の初期値とした入射ビーム軌道計算を開始した[4]。これと並行して、測定した 4 次元エミッタンスを用いて入射ビーム軌道計算をし、比較検証する必要があると考えた。4 次元エミッタンスを測定する手段としてペッパーポット型エミッタンス測定器[5]がある。我々はその開発を行った。

4. ペッパーポット型エミッタンス測定器

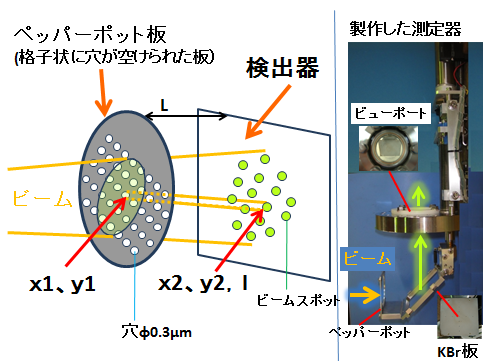


Figure 2: The left picture is the measurement concept of the pepper-pot emittance monitor. The right picture is PEM_IH10 developed by us.

ペッパーポット型エミッタンス測定器の原理を Figure 2 の左側に示す。格子状に穴の空いたペッパーポット板をビームに対し垂直に置く。それを通り抜けて分離した各ビームスポットの位置とビーム強度を L(m)後方の検出器で測定する。ペッパーポット板の各穴(x1,y1)と各ビームスポット(x2, y2)を 1 対 1 に対応させ、角度(x', y')を計算できる。Figure 2 の右側に開発した測定器[6]を示す。ペッパーポット板は径 0.3mm の穴を 3mm 間隔で開けた。検出器は臭化バリウム(KBr)を塗布した蛍光板とし、ビームに対し 45 度傾けて設置した。蛍光板でビーム強度に応じた発光量で得られるビーム像は、ビューポートを通してデジタルカメラで記録される。L は 55mm とした。

5. ビームテストによる性能評価

今回は EM_I36 までのビーム軌道計算を報告する。

ソレノイドコイル及び四極電磁石のビーム軌道計算は、各々 磁場解析コード(FEMM, OPERA-3D/TOSCA)によって計算された磁場分布を用いて、ルンゲクッタ法で行った。その理由は、使用している電磁石の磁場分布がハードエッジモデルで近似できないからである。

DMI23 は、電磁石境界がビーム軸に対し直角から 30 度回転しているため、エッジフォーカスが生じる。エッジフォーカスについては、TRANSPORT[7]が述べている Square-edged Magnet 補正を用いた。また DMI23 の二極

磁場は一律と仮定した。

PEM_IH10 の測定結果を Figure 1 に示した 2 台のプロファイルモニタ(PF_IH10, PF_I30)、ビームビューワー(I23viewer)及びスリット型エミッタンス測定器(EM_I36)の測定結果と比較し、ビーム軌道計算方法を検証する。

プロファイルモニタは、ビーム軸に垂直な任意の x-y 平面のビーム強度分布の x または y 方向への射影を測定する。ビームビューワーは KBr 蛍光板を使用し、任意の x-y 平面のビーム強度分布を測定する。スリット型エミッタンス測定器は、2 次元エミッタンスを測定する。幅 0.1mm の単スリットを通過したビームをプロファイルモニタで測定し、ビームの位置、角度の相関を得る。

先に述べたビーム軌道計算方法の検証のため、空間電荷効果が無いと見なせるビーム強度 $5\mu\text{A}$ の ${}^4\text{He}^{2+}$ イオンビーム(運動エネルギー 25.42keV)でテストした。

まず PF_IH10 との比較を Figure 3 に示す。左図が PF_IH10 測定 of x(青), y(赤)方向のビームプロファイルである。右図が PEM_IH10 測定 of 4 次元エミッタンスを PF_IH10 の位置に転送し x(青), y(赤)方向へ射影したプロファイルである。比較すると形状はほぼ一致している。

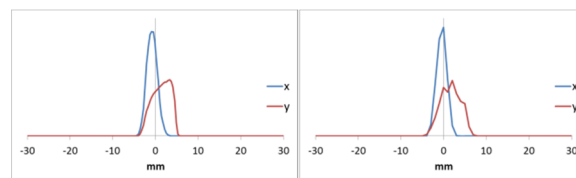


Figure 3: The left image is beam profiles measured by PF_IH10. The right image is beam profiles calculated using the measured result of PEM_IH10.

次に I23viewer との比較を Figure 4 に示す。左図が I23viewer 測定 of ビーム強度の x-y 分布であり、右図が PEM_IH10 測定 of 4 次元エミッタンスを I23viewer の位置に転送し、ビーム強度を x-y 分布にしたものである。形状はほぼ一致している。これはソレノイドコイルのビーム軌道計算が正しいことを示している。ただし、診断器、あるいはビーム輸送系のアライメントの影響により位置ずれが数 mm 程度ある。

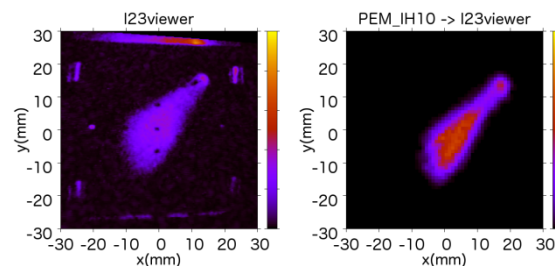


Figure 4: The left image is x-y distribution measured by I23viewer. The right image is x-y distribution calculated using the measured result of PEM_IH10.

第 3 番目に、PF_I30 との比較を Figure 5 に示す。左図が PF_I30 測定 of x(青), y(赤)方向のビームプロファイルである。右図が PEM_IH10 測定 of 4 次元エミッタンスを PF_I30 の位置に転送し x(青), y(赤)方向へ射影したプロファイルである。形状はほぼ一致しており、エッジフォーカス補正は効果があったと考える。位置を比較す

ると x も y も差がある。これもアライメントの影響と考える。

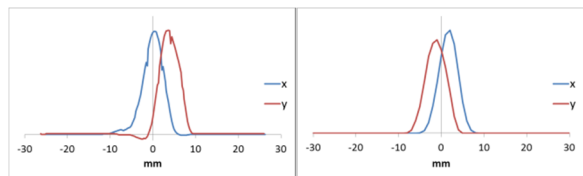


Figure 5: The left image is beam profiles measured by PF_I30. The right image is beam profiles calculated using the measured result of PEM_IH10.

最後に EM_I36 との比較を Figure 6 に示す。左側の列が、EM_I36 測定 の 2 次元エミッタンスである。座標系 (u, w) は、座標系 (x, y) を 45 度回転した座標系である。上側の図が u-u' 面、下側の図が w-w' 面の 2 次元エミッタンスを各々示している。右側の列が PEM_IH10 測定 の 4 次元エミッタンスを EM_I36 の位置まで転送し、ビームの (x, x', y, y') 成分を (u, u', w, w') 成分に変換し、u-u' 面(上側の図)、w-w' 面(下側の図)へ射影した 2 次元エミッタンスである。両者の形状はだいたい一致している。

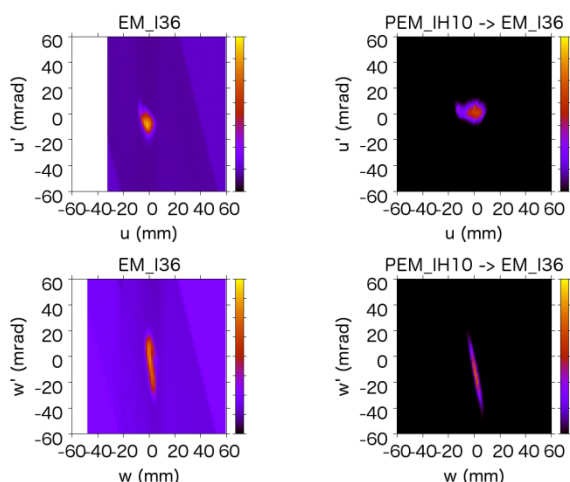


Figure 6: The images of the left column are 2-D emittances measured by EM_I36. The images of the right column are 2-D emittance calculated using the measured result of PEM_IH10. The upper and lower rows indicate (u, u') distribution and (w, w') distribution, respectively.

これらの比較の結果、プロファイル、ビューワーに見られるビーム形状や、2次元エミッタンス空間での分布の形状はほぼ一致している。これらからビーム軌道計算はこの程度に正しく行っていることが確認できた。位置、角度の差はアライメントの修正により改善が可能と考える。

さらに高強度ビームテストを行った。ビーム強度が 240eμA の ⁴He²⁺イオンビーム(運動エネルギー15.38keV)を使用した。後述するが、この結果は他の診断器 I23viewer、PF_I30、EM_I36 との比較で一致しなかった。この原因は空間電荷効果を考慮していないためと推測した。そこで空間電荷効果を考慮したビーム軌道計算を行い、この推測を検証した。

空間電荷効果を考慮したビーム軌道計算は様々あるが、第一段階として簡単なモデルを使用した。それは、

ビーム軸方向に一様分布し、ビーム断面が円型且つその円内で一様分布するビームの空間電荷効果モデルである。その水平方向運動方程式は式(1)ようになる[8]。

$$\frac{d^2x}{ds^2} = \frac{2\lambda r_p}{a^2 \beta^2 \gamma^3} x \quad (1)$$

$$r_p = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 m c^2} \quad (2)$$

式(1)の s はビーム軸の位置、x は水平方向の位置(鉛直方向運動方程式はこれを y と置き換える)、λ は線密度、a がビームの半径、β、γ はローレンツファクター。r_p は式(2)に示すとおりで、q がイオンの電荷、m が静止質量、c は光速、ε₀ は真空中の誘電率である。

実際のビーム断面は一様な円分布では無いので a を仮定する。任意の s におけるビーム断面(x-y 平面)でのビーム分布の重心からの標準偏差を 1.7 倍し、それを a とした。これは倍率を様々に変えてビーム軌道計算し、他の診断器と比較して、近くなるところで決めた。

ドリフト、ソレノイド、二極電磁石、四極電磁石のビーム軌道計算の運動方程式の右辺に式(1)の右辺を加算し、ルンゲクッタ法でビーム軌道計算し、低強度ビームテストと同様にして他の診断器と比較をした。

Figure 7 の左列は、I23viewer 測定 の x-y 平面におけるビーム強度分布である。右列は PEM_IH10 測定 の 4 次元エミッタンスを I23viewer の位置に転送し、x-y 面に射影し、ビーム強度分布としたものであり、その上側が空間電荷効果無し、下側が有りである。

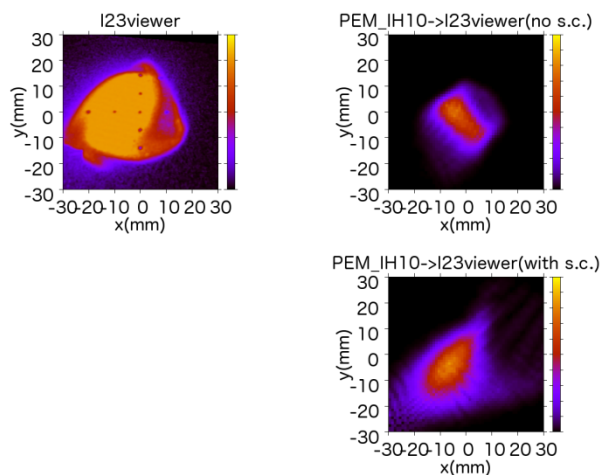


Figure 7: The left image is x-y distribution measured by I23viewer. The upper image of the right column is x-y distribution calculated without space charge effect using the measured result of PEM_IH10 and the lower is x-y distribution calculated with space charge effect.

Figure 8 の左列は PF_I30 測定 の x(青)、y(赤)方向のビームプロファイルである。y 方向の ±20mm より外側にビームが無いのは、PF_I30 の 120mm 上流に y 方向に ±20mm に開いたスリットが存在し、ビームがそこで損失しているためである。右列が PEM_IH10 測定 の 4 次元エミッタンスを PF_I30 の位置に転送し、x(青)、y(赤)方向へ射影したプロファイルである。その上側が空間電荷効果無し、下側が有りである。スリットによるビーム損失は考慮して計算している。

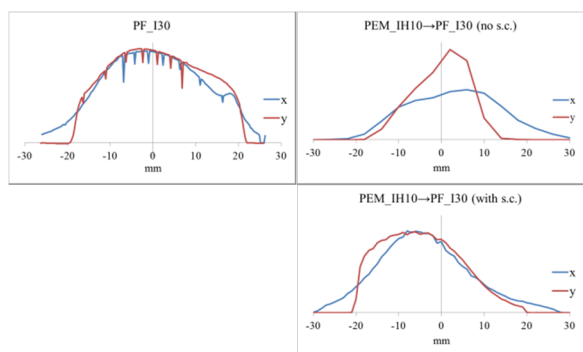


Figure 8: The left image is the beam profile measured by PF_I30. The upper image of the right column is the beam profile calculated without space charge effect using the measured result of PEM_IH10 and the lower is the beam profile calculated with space charge effect.

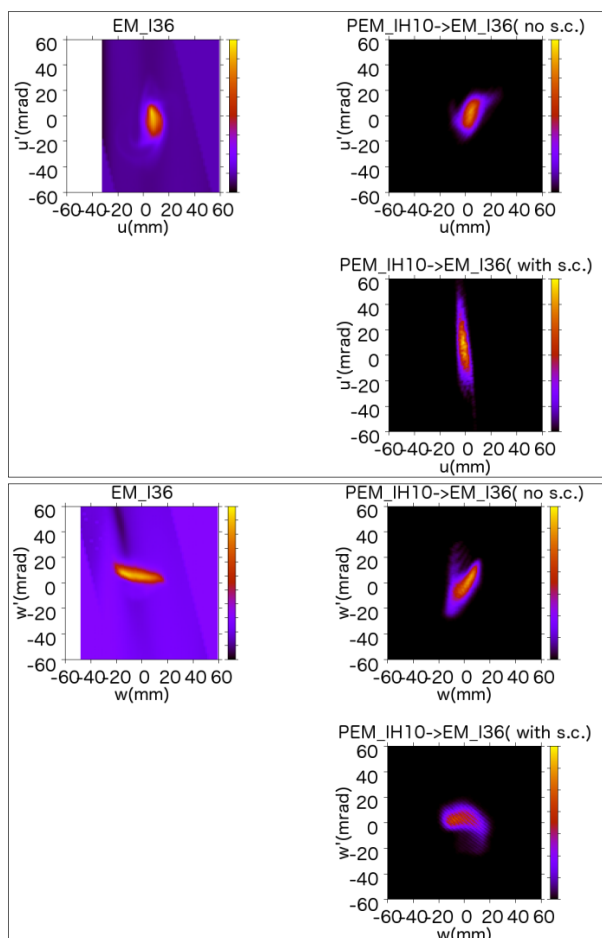


Figure 9: the upper and lower squares show 2-D emittances in the (u, u') and (w, w') system, respectively. In each square, the left column is 2-D emittances measured by EM_I36. The upper image of the right column is 2-D emittance calculated without space charge effect using the measured result of PEM_IH10 and the lower is 2-D emittance calculated with space charge effect.

Figure 9 は EM_I36 の 2 次元エミッタンスとの比較であ

る。上側四角枠の全図は $u-u'$ 面の、下側四角枠の全図は $w-w'$ 面の 2 次元エミッタンスを各々示している。各四角枠の左列は EM_I36 の測定結果である。右列は PEM_IH10 測定の 4 次元エミッタンスを EM_I36 の位置まで転送し $u-u'$ 面または $w-w'$ 面へ射影した 2 次元エミッタンスである。そして各四角枠の右列上側が空間電荷効果無し、右列下側が有りである。

I23viewer、PF_I30、EM_I36 の結果を全体的に見ると、明らかに空間電荷効果無しのビーム軌道計算結果は他の診断器の測定結果と異なっている。一方、空間電荷効果有りの場合、ビーム軌道計算結果は他の診断器の測定結果に形状が近づいている。例を上げる。I23viewer の空間電荷効果有り(Figure 7 右列下側)のビーム強度の強い部分(橙色)は、実際の測定結果(Figure 7 左列)に形状に近い。PF_I30 の空間電荷効果有り(Figure 8 右列下側)は、PF_I30 の測定結果(Figure 8 左列)に形状に近い。ただし、アライメントの影響でビーム損失部分が一致していない。EM_I36 の 2 次元エミッタンス分布の形状を楕円と見なせるとすると、空間電荷効果有りの $u-u'$ 面の 2 次元エミッタンス(Figure 9 上側四角枠右列下側)は楕円の長径が長い、回転角はほぼ EM_I36 の測定結果(Figure 9 上側四角枠左列)と一致している。空間電荷効果有りの $w-w'$ 面の 2 次元エミッタンス(Figure 9 下側四角枠右列下側)の楕円の回転角は空間電荷効果無し(Figure 9 下側四角枠右列上側)に比べて、EM_I36 測定結果(Figure 9 下側四角枠左列)にかなり近くなっている。これらの結果から、空間電荷効果を考慮すると実際のビーム軌道に一致する解があると考えられる。

6 まとめ

PEM_IH10 で測定した 4 次元エミッタンスを用いて AVF サイクロトロンの上の EM_I36 までビーム軌道計算した。収束要素のソレノイドコイル、四極電磁石のビーム軌道計算には計算磁場を用いた。DMI23 は一様な二極磁場を仮定し、エッジフォーカスは Square-edged Magnet 補正を加えた。この結果、低強度ビームに対しては他の診断器の測定結果にほぼ一致したビーム軌道計算ができた。一方、高強度ビームの場合は他の診断器の測定結果と異なるビーム軌道計算結果となった。この原因を空間電荷効果と推測し、円型一様分布ビーム近似の空間電荷効果を導入したところ、実際の軌道に近づいた。今後は空間電荷効果を考慮したビーム軌道計算の最適化を進める。

参考文献

- [1] Y. Ohshiro *et al.*, RIKEN Accel. Prog. Rep. 35 (2002) 256.
- [2] P. J. Bryant, WinAgile (WINDOWS Alternating Gradient Interactive Lattice dEsign) USER'S GUIDE, Ver.4.0, Release 9, January 2013.
- [3] R. Becker, Rev. Sci. Instrum. 63 (1992) 2756.
- [4] S. Watanabe *et al.*, CNS-Rep-92 (2014) 63.
- [5] T. Hoffmann *et al.*, Proc. 9th BIW 2000, Cambridge, USA, pp. 432-439.
- [6] Y. Kotaka *et al.*, CNS-Rep-94 (2016) 61.
- [7] D.C. Carey, K.L. Brown and F. Rothacker, FERMILAB-Pub-98/310.
- [8] 町田慎二, "空間電荷効果", OHO'00(2000).