

# 非線形集束におけるビームロス低減に向けたビーム入射・加速方法の検討

## INVESTIGATION OF BEAM INJECTION AND ACCELERATION METHODS FOR BEAM LOSS REDUCTION IN NONLINEAR FOCUSING

柏木啓次<sup>#</sup>, 湯山貴裕, 石坂知久, 宮脇信正, 百合庸介

Hirotsugu Kashiwagi<sup>#</sup>, Takahiro Yuyama, Nobumasa Miyawaki, Yosuke Yuri

Takasaki Advanced Radiation Research Institute, National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

### Abstract

In the formation of the uniform and hollow distributions using octupole magnets, converting the beam distribution to a Gaussian-like symmetrical one using a scattering foil and cutting out a beam halo using slits are necessary, respectively. However, these additional actions to the beam reduce the beam intensity. In this study, a method to obtain a Gaussian-like symmetrical beam by controlling the beam acceleration in the cyclotron, and a method to reduce a beam halo by controlling the phase-space region of the injection beam were investigated to improve the intensity of the uniform/hollow beam. The beam with a symmetrical profile was obtained by reducing the beam energy spread through the precise control of the acceleration phase of the cyclotron to separate the orbits. The measurement using the slits in the injection line of the cyclotron for beam halo reduction showed that the real-space distribution of the injection beam arriving at the beam halo part was different from that arriving at hollow beam part. Beam loss reduction is expected by properly matching the injection beam to the region reaching the hollow beam part.

### 1. はじめに

加速器で加速されたビームを試料等に照射する際は、照射条件に応じたビーム形状が求められる。ビーム形状の制御には、ビームの拡大・縮小が線形的に行える四重極電磁石やビームの中心軌道を偏向する双極電磁石及びビームの一部をカットするコリメータ等が用いられている。例えば、四重極電磁石を用いた単純な拡大・縮小による試料寸法に合わせた照射、四重極電磁石でビームの横方向の大きさを制御したビームをコリメータで必要な形状に切り出すことによる試料形状に合わせた照射、あるいは、コリメータでビームから小さなエミッタ成分を取り出して四重極電磁石でビームを集束して極小スポットを形成する高精度照射、四重極電磁石で集束したビームを双極電磁石で走査する均一密度照射等である。四重極電磁石は線形な集束である故に、例えば、位相空間でガウス分布のビームは寸法の異なるガウス分布にはできないが、ビームそのものの分布形状を変えることはできない。

一方、イオン穿孔膜生成や宇宙用半導体照射試験のために均一分布ビームや、ミュオン生成用に大強度のビームを円筒ターゲットの軸方向から円筒表面付近に照射するために中空ビーム[1]等が求められており、線形集束等の従来法ではなく、分布自体を変換する非線形集束の利用が考えられている。我々は多重極電磁石を用いてこれらの均一及び中空な分布を持ったビームを形成する技術の開発を通して、従来手法では実現困難な多様なビーム強度分布変換や照射野形成の実現を目指している。

均一ビームや中空ビームの形成は、理想的にはガウス分布のビームに4, 6, 8…無限極の電磁石が形成する

非線形力を適切に作用させることで可能となる[2, 3]。しかし、現実のビームはガウス分布でない場合が多く、また、電磁石の極数は有限である。我々は、これらの制約の中、TIARA AVF サイクロトロン施設において2つの8極電磁石により均一及び中空ビームを形成することが可能であることを実証している[3, 4]。しかし、この均一及び中空ビームを形成するための2つの工夫(散乱フォイルによる

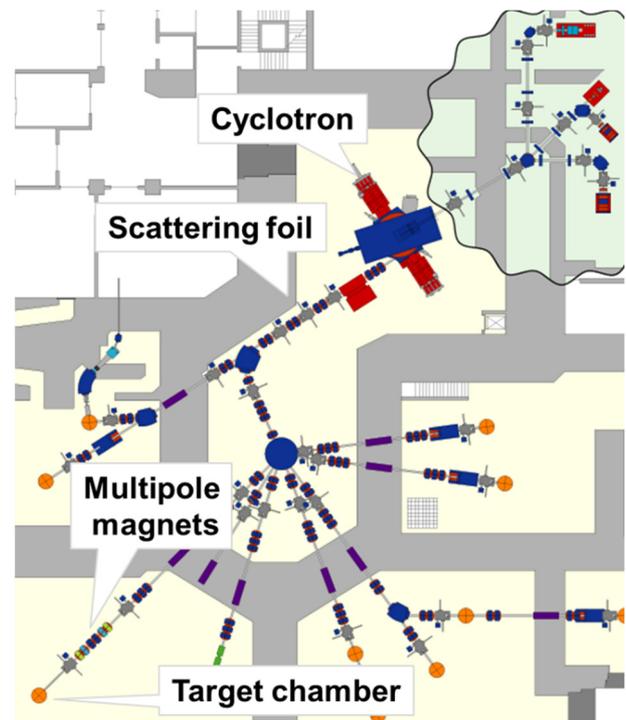


Figure 1: Layout of the cyclotron and the beamline for nonlinear focusing.

<sup>#</sup> kashiwagi.hirotsugu@qst.go.jp

るガウス様分布化、スリットによるビームハロの低減)がビーム強度を低下させる要因ともなっている。

- 散乱フォイルによるガウス様分布化(均一ビーム)

Figure 1 にサイクロトロン及び非線形集束用ビームラインを示す。均一ビームの形成は、強度分布が中心軸に対して対称な裾野を持つガウス様分布ビームを8極電磁石でその裾野を内側に折りたたむことによって実現する。我々は、サイクロトロンで加速された非対称な断面形状を持つビームを散乱フォイルに通過させてガウス様分布化することで均一ビーム形成を実現している。しかし、散乱の効果によりビームエミッタンスの増加、エネルギー幅の増加、及び重イオンビームではイオンの価数変化が生じることで、フォイルのない場合に比べビーム輸送に伴うビームロスが生じてビーム強度が半減することが問題となっている。

- スリットによるビームハロの低減(中空ビーム)

8極電磁石による非線形力は磁極中心からの距離の3乗で増大する。中空ビーム形成においては、中空形状に集束するビーム領域の外側により強い集束力を受けたビームが分布する不要な”ビームハロ”も形成される(Fig. 2(a))。このビームハロが周辺装置等の目的外の場所に照射されることを防ぐため、8極電磁石直前のスリットでビームをカットすることによりビームハロを低減している(Fig. 2 (b))が、これによりビーム電流が4-6割程度減少してしまうことが問題となっている。

本研究では、これらのビーム電流減少を抑制して均一

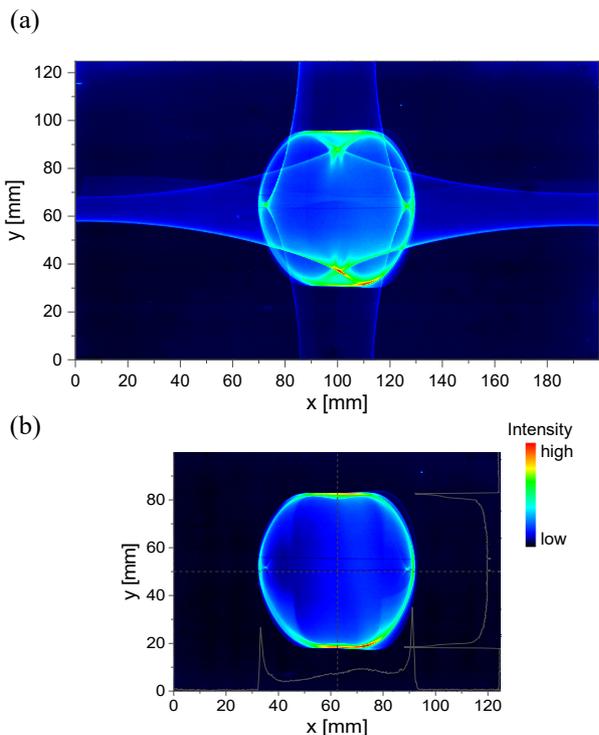


Figure 2: 2D Intensity distributions of 10 MeV proton hollow beams (a) with beam halo and (b) without beam halo using slits. The lower and right gray lines show the horizontal and vertical intensity profiles at the dashed lines, respectively.

及び中空ビームの強度向上を図るため、サイクロトロンでのビーム加速制御による散乱フォイルを用いないガウス分布化、サイクロトロンへの入射ビームの位相空間制御によるスリットを用いないビームハロ低減のそれぞれについて実験的に検討した。

## 2. ビーム加速制御によるビーム断面分布のガウス様分布化

AVF サイクロトロンではビームは渦巻軌道を描きながら加速され最外周付近の引き出し電極(デフレクター)に入ったビームが引き出される。ビームが加速されるにつれてビームの半径方向位置  $r$  が増加するとともに、ターンセパレーション  $dr$  は  $dr = m dE / (Z e B)^2 (1/r)$  により小さくなる( $m$ :イオンの質量、 $dE$ : 1 ターン当たりのビームエネルギーの増分、 $Z$ : イオンの価数、 $B$ : 磁束密度、 $e$ : 素電荷、本式は  $B$  一定( $dB/dr = 0$ )とした近似式)。加えて、ビームはエネルギー幅に応じた  $r$  方向の拡がりを持つため、最外周付近では隣り合う軌道が重なり合って半径方向に連続した分布となっていることが多い。この重なり合った軌道から成る連続した分布からデフレクターで切り出された部分を引き出していることが、加速ビームの非ガウス分布の一因となっている。そこで、ガウス様分布を持った加速ビームを実現方法として、ビームエネルギー幅を減少させて軌道を分離する方法を検討している。

軌道分離に必要なエネルギー幅減少には、「加速位相制御」を行う。加速位相制御はサイクロトロンの高周波加速電圧の変化が最小となる位相つまり、正弦波が極大となる位相でビームを加速する方法である。これにより、加速電圧差に起因するビームのエネルギー幅を最小化

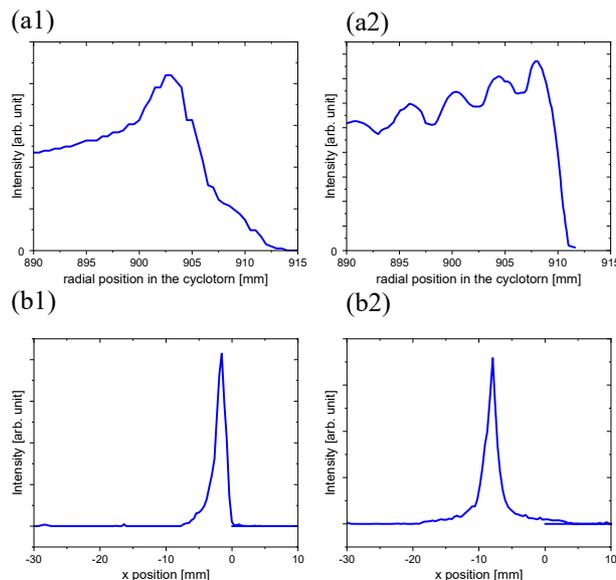


Figure 3: (a) Radial beam intensity distributions in the cyclotron and (b) horizontal intensity profiles of the accelerated beam, (1) with and (2) without acceleration phase control. The horizontal axis represents the radial position in the cyclotron (a) and the horizontal position at the profile monitor (b), and the vertical axis represents the beam intensity.

できる。加速位相制御は以下の手順で行う。1)サイクロトロンRF周波数を加速基準周波数から $\pm 0.01\%$ オーダーで変化させて、周波数と最外周軌道のビーム電流との相関を測定する。2)ビーム電流が半減した2つのRF周波数(基準周波数から増加、減少させた場合)から現在のビーム位相と加速最適位相との差を求める(詳細は[5]を参照)。3)ビーム位相と最適加速位相との差を0に近づけるようにサイクロトロン中心部の磁場をトリムコイルによって調整する。4)最適な加速位相となるよう1~3を繰り返す。

本方法の有効性を確かめるため、10 MeV陽子ビームを用いた実験を行った。加速位相制御有り無しの場合におけるサイクロトロン半径方向のビーム分布をFig. 3(a1)(a2)に示す。加速位相制御を行うことにより加速位相制御前(通常の調整)では確認できない個々の軌道のピークが確認できる程度に分離できた。また、それぞれの場合についてプロファイルモニターで測定した加速後のビームの水平方向プロファイルを図3(b1)(b2)に示す。加速位相制御無しの場合、非対称で片側に裾野が無い分布であったが、加速位相制御後は左右に裾野を持つ対称な分布が得られた。今後、より精密な加速位相制御によって軌道分離をすることでガウス様分布のビームの引き出しができるかを検証する。

### 3. 入射ビームの位相空間制御によるビームハロー低減

中空ビーム形成では加速ビームのうちビームハローとなる部分をスリットでカットしているが、そもそも加速ビームのうちのビームハローとなる部分が無ければ、ほぼすべての

の加速ビームを目的とする中空ビームとして用いることができると考えられる。これを実現する方法として、サイクロトロンへのビーム入射の位相空間制御を検討している。

この方法は、サイクロトロンに入射するビームの位相空間領域のうち中空ビーム部とビームハロー部にそれぞれ到達する領域が異なれば、中空ビーム部に到達する領域にのみビームを集中的に入射することにより、加速したビームの大半を中空ビームに到達させることができるという考え方に基づいている。今回、位相空間領域のうち、水平・鉛直の実空間領域について、中空ビーム部とビームハロー部に到達する領域が異なるかを10 MeV陽子ビームを用いて検証した。この測定には、サイクロトロンへのビーム入射ラインに設置してある位相空間制限用の水平・鉛直2対のスリットシステム(位相空間コリメータ)[6]の実空間制限用スリットを用い、以下の手順で実施した。このスリットで3.1 keVのビームから任意の水平・鉛直座標の微小領域を持つビームを切り出してサイクロトロンに入射して加速した。実空間領域内でこの微小ビームの座標を走査すると同時に、中空ビーム部が到達するファラデーカップとビームハローをカットしているスリットの電流を測定することで、中空ビーム部及びハロー部に到達する実空間領域を求めた。

Figure 4(a), (b), (c)に、ハローカット用スリットとファラデーカップの位置関係、位相空間コリメータ位置での入射ビームの分布、そして得られた透過率分布を示す。これによりファラデーカップとハローカット用スリットに到達する透過率の分布は重複する領域もあるが、異なる形状となることがわかった。従って、入射ビームの光学系を制御して中空ビーム部へ到達する領域に重点的にビーム

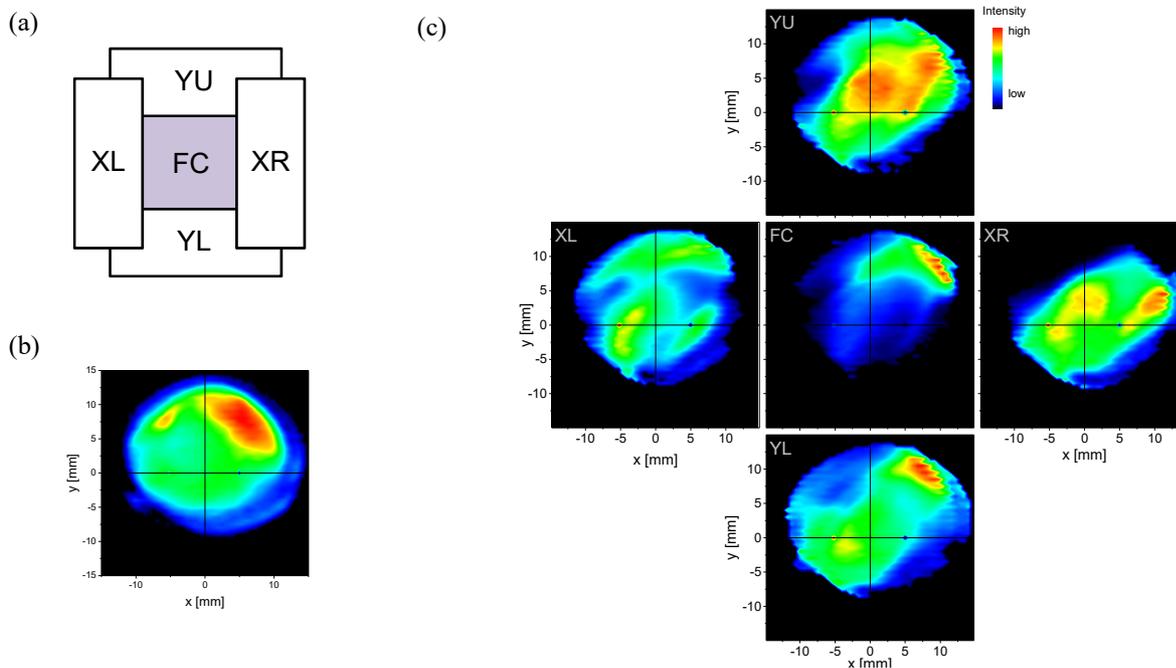


Figure 4: (a) Configuration of the halo-cut slits (XL, XR, YU, YL) and the Faraday cup for hollow beam detection (FC), (b) real-space intensity distribution of the injection beam (3.1 keV protons) at the phase space collimator, and (c) real-space transmission distribution of the beam arriving at the slits and the Faraday Cup. The  $x$  and  $y$  in (b) and (c) represent the horizontal and vertical coordinates at the phase space collimator, respectively. The accelerated beam energy is 10 MeV.

を入射することでハロ部のビームを低減し、中空ビーム部のビーム強度増加が期待できることがわかった。今回は、実空間分布のみの測定であったが、今後は発散角制限スリットを用いた位相空間上での測定を行った上で、入射ビーム位相空間制御によるビームハロ低減の実証を行う。

## 謝辞

本研究は、JSPS 科研費 (JP18K11934) および JST 産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム (JPMJOP1721) の助成を受けて実施したものです。

## 参考文献

- [1] Y. Yuri, M. Fukuda, and T. Yuyama, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2019, pp.112-115.
- [2] Y. Yuri, N. Miyawaki, T. Kamiya, W. Yokota, K. Arakawa, and M. Fukuda, Phys. Rev. ST Accel. Beams 10 (2007)104001.
- [3] Y. Yuri, M. Fukuda, and T. Yuyama, Prog. Theor. Exp. Phys. 2019 (2019) 053G01.
- [4] Y. Yuri, T. Yuyama, T. Ishizaka, I. Ishibori and S. Okumura, Plasma and fusion research 9 (2014) 4406106.
- [5] S. Kurashima, T. Yuyama, N. Miyawaki, H. Kashiwagi, S. Okumura and M. Fukuda, Rev. Sci. Instrum. 81 (2010) 033306.
- [6] H. Kashiwagi, N. Miyawaki, S. Kurashima and S. Okumura, Rev. Sci. Instrum. 85 (2014) 02A735.