

多重極電磁石を用いた大面積均一ビームと中空ビームの形成

FORMATION OF LARGE AREA UNIFORM BEAM AND HOLLOW BEAM USING MULTIPOLE MAGNETS

湯山 貴裕^{#, A)}, 百合 庸介^{A)}, 石坂 知久^{A)}, 柏木 啓次^{A)}, 福田 光宏^{B)}

Takahiro Yuyama^{#, A)}, Yosuke Yuri^{A)}, Tomohisa Ishizaka^{A)}, Hirotsugu Kashiwagi^{A)}, Mitsuhiro Fukuda^{B)}

^{A)} Takasaki Advanced Radiation Research Institute, National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

^{B)} Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

Abstract

The nonlinear magnetic fields of multipole magnets can focus the charged-particle beam into various transverse intensity distributions. We have developed the irradiation techniques of a large area uniform beam with octupole magnets at the TIARA cyclotron facility in QST Takasaki. In addition, we have experimentally demonstrated that an ion beam with a hollow transverse distribution can be formed using multipole magnets. In this paper, we describe the present status of a large area uniform beam and the experimental evaluation about the reduction of a hollow beam size. As a result, a large area beam of 19cm×19cm was formed, and a hollow beam was able to reduce the beam size in both the quadrupole magnets and the octupole magnets.

1. はじめに

加速器により高いエネルギーを付与された荷電粒子ビームを標的に照射する際には、照射野の形状や横方向におけるビーム強度分布などが任意に制御できることで、フルエンス量など照射条件の調整が容易となる。その照射手法のひとつとして、荷電粒子ビームを広範囲に照射する拡大照射が挙げられる。一般的な拡大照射であれば十分に集束したビームを走査することで達成することが多いが、指定された範囲全体を定フルエンス率で照射する、円環状の様な特定の範囲のみ重点的に照射を行うなどの特殊な要求があった場合、通常の線形磁場だけでそれを達成することは容易ではない。多重極電磁石が形成する非線形磁場は、ビームのガウス様分布の裾野部分を折りたたむことで均一な強度分布を形成することができる[1-5]。また、均一なビームのみならず、矩形や菱形状などの様々な照射野形状について実現する可能性を持つ。加えて近年、非線形磁場により水平及び鉛直方向について集束力の結合を図ることで、中空状の横方向分布を持つビームの形成が可能になった[6]。この開発を進めることで、円柱状標的の外周部を狙って高フルエンス照射を行うような、新たな応用へ期待がされている。

量子科学技術研究開発機構 (以下 QST) 高崎量子応用研究所 (以下高崎研) にあるイオン照射研究施設 TIARA では、K 値 110 の AVF サイクロトロン、3MeV シングルエンド加速器、3MeV タンデム加速器、400kV イオン注入器の 4 台の加速器が設置されており、様々なエネルギー及びイオン種を用いた実験が可能となっている[7]。特に、AVF サイクロトロンは、水平鉛直合わせて 14 のビームラインを有し、そのビームラインの一つに 6 極及び 8 極などの多重極電磁石と、それを使用した大

面積均一照射装置が設置されている (Fig. 1)。この多重極電磁石は 6 極電磁石 2 台、8 極電磁石 2 台で構成されており、Fig. 2 (a) の様に、2 連の 4 極電磁石をはさんでそれぞれ 1 台ずつ設置されている。また、大面積照射が可能な照射チェンバーについても、ビームラインターゲット位置に備えている (Fig. 2 (b))。これらを用いて、実験的に均一ビームの更なる大面積化と、中空化したビーム形成に関する技術開発を進めたので、これについて報告する。

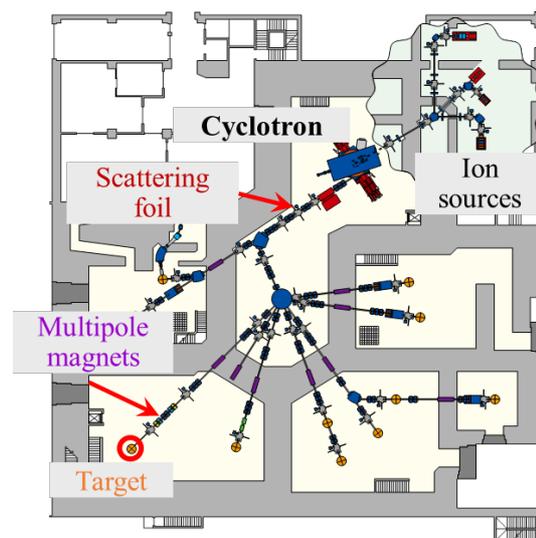


Figure 1: Schematic view of the TIARA AVF cyclotron facility. Multipole (sextupole and octupole) magnets have been installed in one of the beam lines for the large area uniform beam.

[#] yuyama.takahiro@qst.go.jp

2. 大面積均一照射の更なる大面積化

2.1 大面積均一照射技術の現状

QST 高崎研では、これまでに多重極電磁石を用いた新しい照射技術として、大面積均一照射技術の開発を進めてきた。大面積均一照射の形成は、まずイオンビームの横方向分布をガウス様分布にするために金属箔を用いて多重散乱させる。この散乱後ビームの水平及び鉛直成分それぞれに関して、非線形磁場により裾野部分を内側に折りたたむことで、端部にピークを持ちそれ以外が均一となる照射野を形成する。このピーク部分をビームスリットにより切り落とし、均一な領域のみにしたビームを実験等に提供している。これまで多重極電磁石を用いた大面積均一照射は、200cm² 程度の照射野において、10%以内の均一度を達成しており、半導体の耐放射線性評価や、機能性高分子多孔膜の開発などで使用されてきた[8]。

現在、20cm 角に近づく様な大面積の均一ビームについて、新たな利用の可能性が出てきたことから、従来のサイズを遥かに超える大面積均一ビーム形成に着手した。Figure 2 (b) に示す QST 高崎研にある均一照射チェンバーは内径が 40cm×40cm の空間をもち、最大 21cm 角のサンプルが取り付け可能な試料台を最大 22 枚、真空中で交換できる仕様となっている。これらを用いて、実験的に均一ビームの更なる大面積化を進めた。

2.2 大面積ビームの拡大と横方向分布評価

使用したイオンビームは Ne⁷⁺260MeV であり、イオン種の質量数が比較的多いため、多重散乱に用いる散乱体は現在インストールされている中で最も散乱効果の大きい Ti (t=1μm) を用いた。多重散乱後の価数は価数分離後に得られる粒子数が最も多い 10 価を選択している。形成したビーム形状は Ashland 社製のラジオクロミックフィルム線量計 Gafchromic フィルム(以下 Gaf フィルム)を用いて計測した。大面積均一照射のビーム面積に関

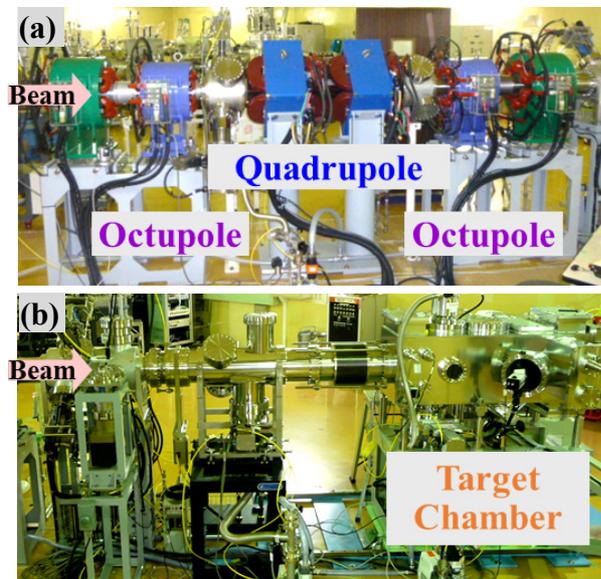


Figure 2: Photograph of the beam line with the multipole magnets (a) and target chamber for large area uniform beam using multipole magnets (b).

して、更なる拡大化を検討した結果、約 19cm×19cm の照射野を持つ均一ビームを形成する事ができた。Figure 3 に形成したビーム分布を示す。図中の(a)は Gaf フィルムにより得られたビームの 2 次元強度分布グラフである。(b)及び(c)は、(a)のグラフより得られた垂直軸上及び鉛直軸上の 1 次元強度分布グラフをそれぞれ示している。2 次元グラフの解析結果から、中心付近では 11%以下、全体では 20%以下の均一度となっている事がそれぞれわかった。また鉛直分布は非常に均一な分布を示しているのに対し、水平分布は端部に向かうほど、強度が強くなっている事が確認できる。これはビームサイズが大きくなったことにより、多重散乱の効果が相対的に小さくなり、大きな領域を均一化するため 8 極電磁石の水平成分に関する磁場強度がより高く要求されたためである。これを解決するためには、光学系の検討、散乱体

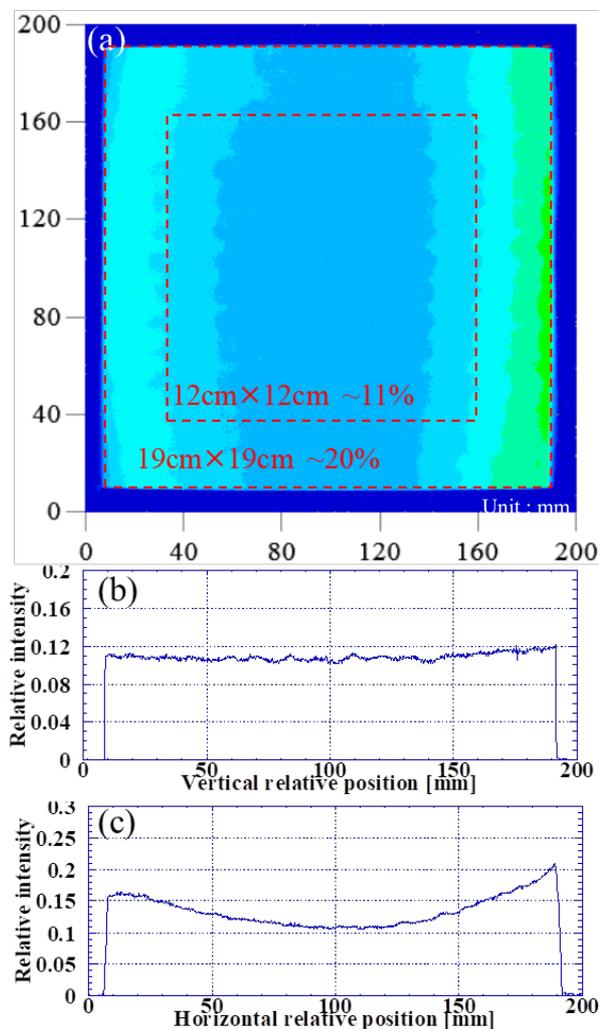


Figure 3: Spatial intensity distribution of the 260-MeV neon uniform beam using multipole magnets. (a) Two-dimensional intensity graph of the beam area at 19cm×19cm, (b) one-dimensional intensity graph on vertical axis and (c) one-dimensional intensity graph on horizontal axis. This beam uniformity was less than 20% at this all area. The vertical distribution is flat, while the horizontal distribution shows changes.

材質の変化(質量の大きな物へ変更)、ビームサイズをより広げ勾配のある領域を物理的に切り落とす、などが挙げられ、今後のパラメータ改善が期待される。

3. 多重極電磁石を用いた中空ビーム形成

3.1 中空ビームの実証と応用

8 極電磁石が生成する非線形磁場を用いた集束は、様々な形状のビームを形成できる可能性を持つ。従来の 4 極電磁石を用いた線形集束であれば、集束されたビームのベータatron振動は、水平及び鉛直それぞれ独立で考えられる 2 つの自由度を持つ。しかしながら、非線形磁場を用いた集束では、横方向のベータatron振動は結合してしまうため、各々の多重極電磁石において、ベータatron結合を考慮する必要がある。我々は、これを効果的に利用することで、ビームの中心部と周縁部で数倍の強度比をもつ中空状ビーム実現の可能性を見いだした。これについて理論解析と実証をすすめており、トラッキングシミュレーションを進めるとともに、イオンビームを用いた実験により、楕円形や菱形状の中空ビームが形成可能なことを明らかにした。[6]

この中空ビームはその特殊な強度分布から、新たな応用が期待されている。大阪大学核物理研究センターが進める連続時間構造を持つ大強度ミュオンビーム施設 (MuSIC) では、DC ミュオンビームの生成に用いるパイオンを得るために、パイオン生成標的である円柱状グラファイト(長さ 20cm、直径 4cm)の軸方向に向かって高エネルギー陽子ビーム(392MeV、1 μ A)を照射している[9]。この円柱状グラファイト標的の側面表面近傍で生成されるパイオンの生成量増加のために周縁部の強度が強い中空ビームの利用を提案しており、その可能性

から利用について検討が進められている。

上記を踏まえ、中空ビームを実用化するため、形状の良質化を図った上で、直径 4cm の中空ビーム形成及び、効率的な周縁部の高輝度化などの要求を達成するべく実験を進めた。

3.2 中空ビーム形成とサイズ変更に関する評価

前述の通り、QST 高崎研では、中空ビームの原理実証を進めてきたが、形成したビームを実際に利用するためには、中空ビームの断面形状の良質化、サイズ可変性の向上、ビーム周縁部と内部とのコントラストの強さ、横方向強度分布の評価など、いくつかのパラメータに関して最適値が得られるよう改良を進めていく必要がある。そこで、今回は中空ビームのサイズ可変性について、4 極及び 8 極電磁石それぞれを用いて、ビームサイズの縮小化について評価した。

Figure 4 に形成した中空ビームに関する 2 次元及び 1 次元の横方向強度分布を示す。中空ビームの形成には荷電変換が無くビームの取り回しの良い 10MeV Proton ビームを使用し、ビーム横方向の強度分布は Gaf フィルムを用いて計測した。図中において、(a)は基準となる中空ビームの計測結果を示している。このビームは形状を優先し円環状に近づくようなパラメータを選定している。(b)は(a)のビームパラメータをもとに、Fig. 2 にある 2 連の 4 極電磁石を用いてビームサイズを縮小し、8 極電磁石で微調整をする事で形状を整えている。(c)は(a)のビームパラメータをもとに 8 極電磁石のみを用いてサイズを集束している。

結論として、4 極電磁石による集束及び 8 極電磁石による集束ともに、ビームサイズの縮小が可能であることを示した。しかしながら、(b)に示されている 4 極電磁石を

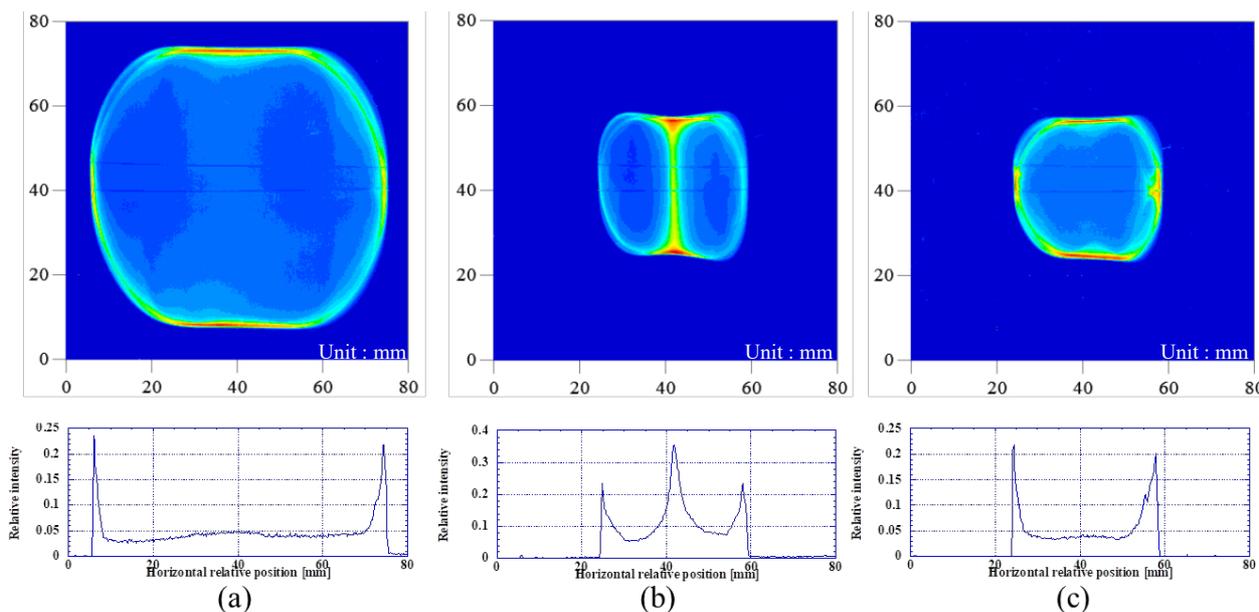


Figure 4: Spatial intensity distribution of the hollow beam (10-MeV proton) formed using multipole magnets. (a) A hollow-beam set to standard conditions at this experiment. (b) Beam size reduction using by quadrupole magnets and adjustment of octupole magnets. (c) Beam size reduction using by octupole magnets. Both (b) and (c) could be reduced sufficiently about beam size. However, (b) showed a high intensity peak around 40 mm. In this case beam size focused waist on target.

用いた集束では、元のビーム形状では円形に近かった分布が矩形に近づくなど全体的に形状が崩れてきている。また水平方向分布の中心部(グラフ中 40mm の位置)に強いピークが確認されている。それに対し、(c)の 8 極電磁石を用いた集束では大きな形状および強度分布の変化を生じずに縮小が可能となっている。

この現象について考察すると、8 極電磁石による 3 次の非線形磁場は、電磁石中心からの距離に対して指数関数的に変化するため、8 極電磁石の位置においてビームサイズが小さくなると 8 極の集束効果が小さくなり、鉛直成分との結合が弱くなることが考えられる。つまり 4 極電磁石による集束では、ターゲット位置のビームサイズを縮小する過程で 8 極電磁石の位置における水平方向のビームサイズが小さくなり、中空ビームを形成するために必要な集束力の結合が満たせず、ビームの分布形状が変化していると考えられる。また、水平の集束が強くなることで、ターゲット位置において水平分布がウエストとなり、中心付近にピークが表れたのだといえる。

8 極電磁石による集束では、4 極電磁石の集束と異なり、元の形状を維持したまま、サイズの縮小が可能となっている。この時、8 極電磁石 2 台の電流比を保つことで、形状をほぼ維持できることが確認できている。しかし、こちらの条件は集束に要する電流値が現状、集束前と比較して 4 倍程度を必要としている。また、8 極電磁石の持つ非線形磁場の仕様上、サイズの縮小は指数関数的に効果が出ていくことが想像される。そのため、より効果的な集束の為にビーム形状の決定に起因する電磁石の更なる下流側に集束用電磁石が設置できることが最も望ましいと考える。それとともに、電磁石増設によらないパラメータ探索を進めるとともに、ビーム形成自体のパラメータ最適化について、引き続き検討を進める。

4. まとめ

多重極電磁石を用いた大面積均一照射に関して、これまでの実績値を大きく上回る、19cm×19cm の均一ビームを形成し、その全体の均一度は 20%以下であった。中空ビームの形成及びビームサイズの縮小化を進め、基準となるビーム形成後、4 極電磁石による集束及び、8 極電磁石による集束ともにビームサイズの縮小化に成功した。ただし、4 極電磁石による集束では、2 台目の 8 極電磁石位置における水平方向のビームサイズ及び、ターゲット位置における水平方向ビームサイズが小さくなり、形状及び強度分布が大きく変わる事がわかった。それに対し、8 極電磁石による集束では、サイズ縮小に必要な励磁電流が大きい、2 台の 8 極電磁石の励磁比率を合わせることで、形状を比較的維持したままサイズ縮小が可能であることが確認できた。更に縮小及び円滑なサイズ変更の為に、ビーム形状の決定に関係の少ない電磁石で集束させた方が望ましい。

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(OPERA)「安全・安心・スマートな長寿社会実現のための高度な量子アプリケーション技術の創出」の助成を受けて実施したものです。

参考文献

- [1] N. Tsoupas *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 10 (2007) 024701; <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.10.024701>.
- [2] A. Bogdanov *et al.*, Proceedings of the 2007 Particle Accelerator Conference, Albuquerque, USA, 2007, pp. 1748-1750; http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/p07/PAPERS/TUPA_S046.PDF
- [3] Y. Yuri, T. Ishizaka, T. Yuyama, I. Ishibori, S. Okumura and K. Yoshida, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 642 (2011) 10; <https://doi.org/10.1016/j.nima.2011.03.055>
- [4] S. Meigo, M. Ooi, K. Ikezaki, A. Akutsu, and H. Fujimori, Proceedings of the 5th International Particle Accelerator Conference, Dresden, Germany, 2014, pp. 896-898; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2014/papers/mopri116.pdf>
- [5] H. Kobayashi *et al.*, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2014, pp. 14-18; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2014/proceedings/PDF/SAOL/SAOLP4.pdf
- [6] Yosuke Yuri *et al.*, ; Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2019, Issue 5, May 2019, 053G01; <https://doi.org/10.1093/ptep/ptz024>
- [7] S. Kurashima, T. Satoh, Y. Saito, and W. Yokota, Quantum Beam Sci. 1 (2017) 2; <http://dx.doi.org/10.3390/qubs1010002>
- [8] 百合庸介, 倉島俊, 応用物理, 86 (2017) pp. 881-886; <https://www.jsap.or.jp/ap/2017/10/ob860881.html>
- [9] D. Tomono *et al.*, JPS Conf. Proc. 21 (2018) 011057; <https://doi.org/10.7566/JPSCP.21.011057>