

非線形集束によるビーム強度分布の変換とその利用

TRANSFORMATION OF THE BEAM INTENSITY DISTRIBUTION BY MEANS OF NONLINEAR FOCUSING AND ITS UTILIZATION

百合庸介, 湯山貴裕, 吉田健一, 石坂知久

Yosuke Yuri, Takahiro Yuyama, Ken-ichi Yoshida, and Tomohisa Ishizaka

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

Abstract

It is possible to transform the transverse intensity distribution of a charged-particle beam by applying the nonlinear force of multipole magnets in a properly-designed beam transport line. We have developed a system to make the ion-beam distribution approximately uniform with octupole magnets at the TIARA cyclotron facility in QST Takasaki. In these proceedings, the latest R&D results are described on the beam measurement for the utilization of the uniform beam irradiation. Moreover, it is demonstrated, by particle tracking simulations, that the combined use of octupole and dodecapole magnets is effective for the improvement of the uniform intensity distribution.

1. はじめに

一般に多重極電磁石で荷電粒子ビームを集束すると、粒子に及ぼされる力の非線形性およびベータatron振動の結合のために、ビームは複雑に振る舞う。しかしながら、ビーム光学系を適切に設計することで、多重極電磁石を用いてビームの横方向強度分布を目的に応じて適切に変換することが可能となり、4極電磁石等の線形集束のみでは達成できない強度分布が実現可能である。

この非線形ビーム集束に基づき、量子科学技術研究開発機構高崎量子応用研究所(量研高崎)のイオン照射研究施設TIARA[1]では、サイクロトロンから引き出されたイオンビームを、主として8極電磁石を用いて均一化する手法を構築[2]し、非走査での効率的な大面積均一照射による機能性材料開発や耐放射線性試験等での利用を進めている[3]。

本発表では、均一ビームの利用に係るビーム電流やフルエンス分布の連続測定技術の開発を報告する。さらに、より理想的な均一ビーム照射野の形成のため、12極電磁石を用いたビーム強度分布変換のシミュレーション結果を示す。

2. 多重極電磁石による横方向強度分布の変換—理論的背景—

非線形力によるビーム強度分布の均一化は、位相空間において、初期の粒子分布が作る楕円がS字型のように曲げられることにより、実空間分布の裾が内側へ折りたたまれることとして解釈される。横方向1次元の理論解析によれば、ビーム輸送系において極数 $2n$ ($n \geq 3$) の多重極電磁石で非線形集束されたビームの実空間強度分布は近似的に以下のように表すことができる[2]:

$$\rho_t \approx \frac{\rho_0}{\sqrt{\beta_t} \cos \theta - \sqrt{\beta_0 \beta_t} \frac{K_{2n}}{(n-2)!} x_0^{n-2} \sin \theta} \quad (1)$$

ここで、 K_{2n} は $2n$ 極電磁石の積分磁場勾配、 ρ はビームの実空間分布関数、 β はベータ関数である。添え字 0 お

よび t は多重極電磁石入口(初期値)および標的位置に対応する。また、 θ は多重極電磁石から標的までの線形光学系におけるベータatron振動の位相進度である。

ここで、初期分布 ρ_0 がガウス分布であるビームを均一分布に変換する場合を考えると、Eq. (1)より、8極、12極、16極、...という無限に高次までの奇数次非線形磁場の組み合わせが必要であることが導かれる[2]。このときの8極および12極電磁石の積分磁場勾配は次の通りである:

$$K_8 = \frac{1}{\varepsilon \beta_0^2 \tan \theta} \quad (2)$$

$$K_{12} = -\frac{3}{\varepsilon \beta_0} K_8 \quad (3)$$

ただし、 ε はビームの二乗平均(RMS)エミッタンスである。また、このとき形成される均一分布の全幅は、

$$W = \sqrt{2\pi \varepsilon \beta_t} |\cos \theta| \quad (4)$$

と表される。実際には、最も寄与の大きい、最低奇数次である8極電磁石が用いられる[4-8](後に5節で示すように、8極電磁石の替わりに12極電磁石を用いて近似的な均一分布は形成可能であるが、高磁場が必要になるとともに、大きなビームロスも生じることから、実用上は問題がある)。

多重極電磁石を励磁すると、横方向2自由度の間には、ベータatron振動の結合が生じ、運動は複雑化するとともに均一化が妨げられる。適切な均一化のためには、この結合が抑制されるよう、多重極電磁石の設置位置において、ある方向のベータ関数が他方向のそれよりも十分大きくなるように光学系を設定する。その結果、2方向の分布変換をほぼ独立に行うことが可能となるとともに、上記の理論解析を適用することができる。

3. 8極電磁石を用いた均一ビーム形成

前節の議論に基づいて、非線形力によるビーム強度分布変換および均一ビーム形成とその利用を目的として、TIARAサイクロトロン施設に多重極電磁石(6極電磁石および8極電磁石が各2台)を備えたビームラインを構築

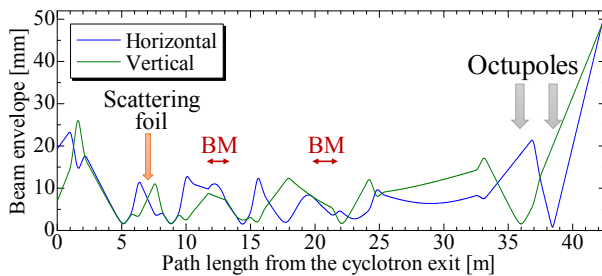


Figure 1: Example of the beam envelope calculation for the large-area uniform beam formation by means of octupole magnets. An rms emittance of 10π mm·mrad has been assumed in both transverse directions. The effective axial length and the maximum field gradient of the octupole magnets are 0.33 m and 1.3×10^4 T/m³, respectively.

[6]し、均一ビームの形成手順を確立した[9]。ビームラインの横方向エンベロープの設計例を Fig. 1 に示す。

位相空間形状や電流値等、サイクロトロンから引き出されたビームが有する特性は、イオン源の運転履歴が異なることや調整時間が限られていること等のために、マシンタイム毎に必ずしも一定していない。均一性の高いビームを再現性良く形成するため、サイクロトロンから引き出されたビームを薄膜に透過させ、多重散乱によりガウス様分布へと“初期化”する。標的位置で実空間分布が十分にガウス分布に近づくよう、薄膜の設置箇所は、ビームエンベロープが極小でない位置とし、薄膜位置から標的までのベータトロニ位相進度が $m\pi$ rad (m : 整数) からずらすよう設定した[10]。

一方で、フルストリップで十分に速度の速い場合を除いて、多くの重イオンビームの場合、多重散乱によりイオンの価数は変化する。特定の価数を有する粒子のみを選択して標的まで輸送するため、標的に利用可能なビーム強度が限られる。均一性を多少犠牲にしても標的でのビーム強度を高めたい場合には、ガウス様分布化のための多重散乱を経ることなく、均一ビームを形成した。このとき、サイクロトロン等の等時性磁場形成に係るトリムコイルやターンセパレーション調整に係るハーモニックコイルを微調整することで、強度分布の非対称性や斑のある程度は修正できることが分かった。

Figure 2 に形成した均一ビームの横方向強度分布を示す。運動エネルギー27MeV/n の炭素イオンビーム(磁気剛性:1.5Tm)を厚み $1\mu\text{m}$ の Ta 箔で多重散乱(平均散乱角:1.3mrad [11])させた後、2台の8極電磁石(磁場勾配: -5700m^4 , 2700m^4)で集束した。ビームをラジオクロミックフィルム(Gafchromic Film, HD-V2)に照射し、フィルムの着色に伴う吸光度変化から相対強度分布を求めた[12, 13]。ガウス様分布の裾が折りたたまれたことで、中心付近の強度分布が広くほぼ均一化されているのが分かる。12cm×11cm の領域における均一度(相対強度のばらつき)は、9%であった。一方、均一領域の外側には、8極磁場によって強くキックされた粒子により強度の高い領域が形成される。通常は、ビームライン上流のスリットを用いて、この縁辺部のピークを除去し、形状を整えて均一照射に利用している。

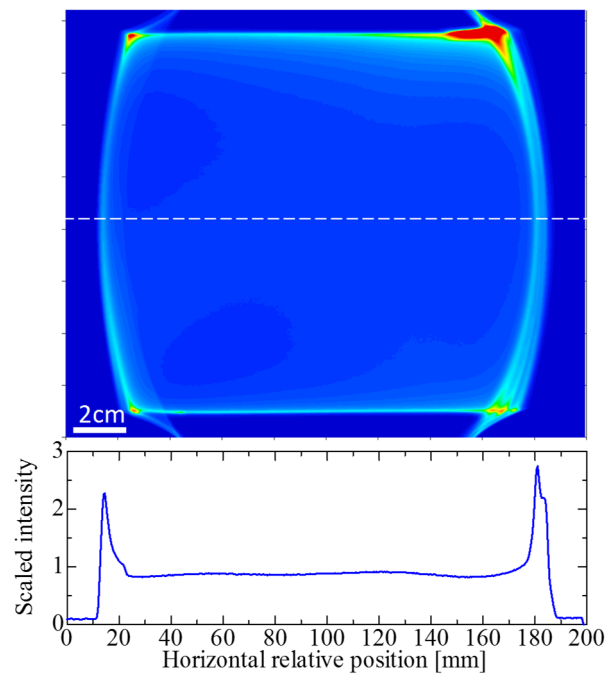


Figure 2: Two-dimensional intensity distribution of a 27-MeV/n $^{12}\text{C}^{6+}$ ion beam nonlinearly focused with two octupole magnets. A Gafchromic HD-V2 film was irradiated with the beam of the order of nA for 1 min. The lower panel shows the one-dimensional distribution along the horizontal axis (dashed line in the upper panel).

4. 均一ビーム利用におけるビーム計測

Figure 2 のような大面積均一ビームを様々なイオン種で形成し、これまでに、イオン穿孔膜等の材料創製研究[14]、宇宙用太陽電池[15]やビーム蛍光体[16]の耐放射線性試験等のビーム利用研究に提供してきた。

耐放射線性試験等では、試料への照射の間、ビーム電流の変動の有無や程度を連続して追跡することが必要である。そこで、ビームライン途中のスリット(前述のとおり、最終的なビーム整形に使用。厚さ 19mm の銅、水冷)および標的近傍に張ったワイヤ(J-PARC の大強度陽子ビームでの使用実績[17]がある、直径 0.1mm の SiC と W の複合ワイヤ等)でビームの一部を捕捉し、微小電流計を用いて電流を測定した。スリットでの計測では、ビーム(1~10nA 程度で数 MeV/n の Ar や Xe イオン)が十分に安定に調整された場合には、相対的な電流値の変動が 1~2%程度と非常に小さいことを観測することができた。他方、ワイヤを用いる場合には、ビームのごく一部が捕捉されることから、測定値が小さく相対的にばらつきが大きい、数 10nA の Ar イオンビームの電流変動を十分に追跡することができた。さらに、多数回のマシンタイムでの使用を経ても、ワイヤはたわむことや破断することもなく、長期間安定に繰り返し測定できることを確認した。

イオン穿孔膜の量産を目指したイオン照射技術開発[18]では、幅 10cm×長さ 100m 程度の高分子フィルムを連続で均一に照射するため、8極電磁石を用いて幅 10cm×高さ 1cm 程度の水平方向に扁平で均一な強度

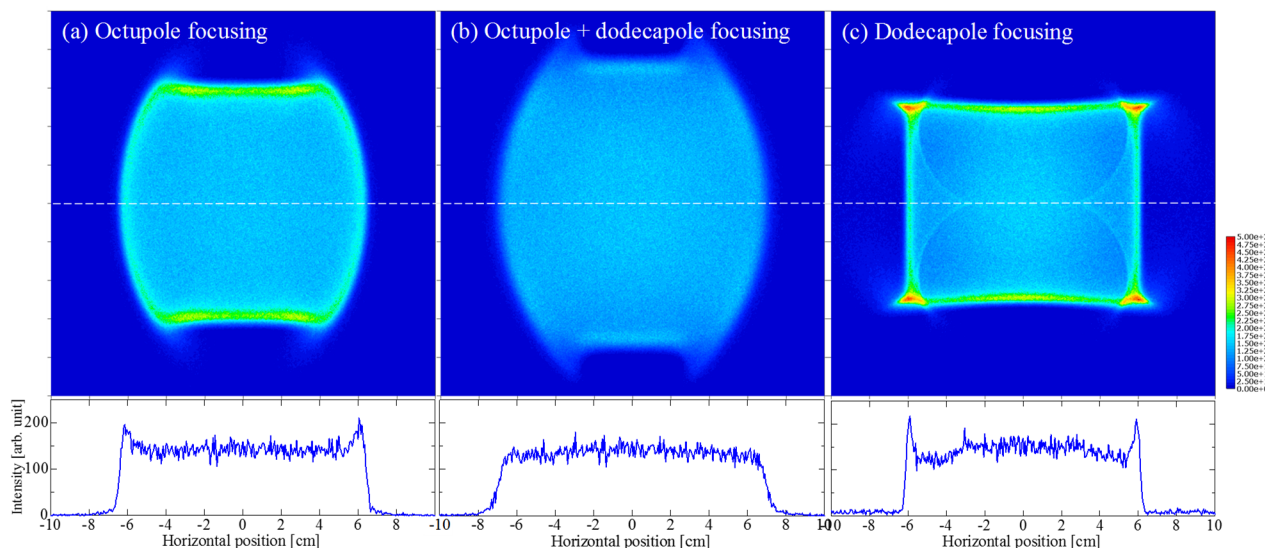


Figure 3: Tracking simulation results of nonlinear focusing for the uniform-beam formation. (a) Focusing with two octupole magnets (field gradient: -3800 m^{-4} and 3500 m^{-4}). (b) Focusing with two octupole (field gradient: -3500 m^{-4} and 3600 m^{-4}) and two dodecapole magnets (field gradient: $8.0 \times 10^6 \text{ m}^{-6}$ and $1.2 \times 10^7 \text{ m}^{-6}$). (c) Focusing with two dodecapole magnets (field gradient: $-3.0 \times 10^8 \text{ m}^{-6}$ and $-7.0 \times 10^7 \text{ m}^{-6}$). The linear beam optics is the same as in Fig. 1 in all three cases. The lower panels show the one-dimensional distribution along the horizontal axis (dashed line in the upper panel).

分布を有する“リボン状均一ビーム”を形成した。長尺試料を連続搬送するために開発したロール to ロール (RtoR) 搬送装置で連続的かつ均一に照射が行えることを確認するため、リボン状均一ビームを RtoR 搬送させたラジオクロミックフィルムに照射し、フルエンスの相対分布を測定した。幅(水平)方向の均一度は、リボン状ビームの均一度(数%)と同等であった。他方、搬送(鉛直)方向ではフルエンスのばらつきは 1~2%程度と非常に小さく、開発した均一ビームと RtoR 照射装置で均一性の良い重イオンビーム連続均一照射が行えることが実証された。なお、ワイヤを用いた電流測定では、ワイヤが RtoR 試料の比較的近傍(距離: 約 60cm)に設置されているため、絶縁体である高分子フィルムの搬送に伴う帯電や放電のノイズの影響を受け、十分な精度が得られない場合があることが分かった。

5. 12極電磁石を用いたビーム強度分布の改良

非線形力に基づくビーム強度分布の均一化では、2節で述べたように最低奇数次である、3次の非線形磁場を発生させる8極電磁石がこれまで主として利用されてきた。しかし、Fig. 2 に示したように、8極電磁石による集束では、初期のガウス様分布を完全な均一分布へ変換することはできず、均一領域の周りには高強度部分が形成される。つまり、ビーム全体を均一照射に利用できないという点が課題である。

これまでの理論的な研究により、より高次あるいは複数の非線形磁場を適切に組み合わせることで、より理想的なビーム強度分布の形成が期待できる。そこで、ここでは5次の非線形磁場を発生させる12極電磁石に着目して、2次元ビーム強度分布の均一化について単粒子トラッキングシミュレーションを実施した。シミュレーションで

は、ビームの初期分布はガウス分布とし、RMS エミッタンスは水平・鉛直方向ともに $10 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ とした。線形ビーム光学系は Fig. 1 に示すものを採用し、簡単のため、ビームの運動量広がりは無視し、横方向2自由度のみを取り扱った。12極電磁石は既存の6極電磁石位置(8極電磁石の近傍)に想定した。また、強度分布を十分な精度で得るために、 10^7 個の粒子をトラッキングした。

Figure 3 にシミュレーション結果を示す。Fig. 3(a)は、非線形力として、従来通り8極電磁石(2台)を用いた場合、Fig. 3(b)は8極電磁石(2台)と12極電磁石(2台)を併用した場合、Fig. 3(c)は12極電磁石(2台)を用いた場合である。上段には2次元相対強度分布を、下段には水平方向中心軸(図中の破線)上の1次元相対強度分布をそれぞれ示す。8極電磁石で均一化した場合には、Fig. 2 と同様に縁辺部に強度の高い領域が形成されたが、12極電磁石を併用して集束することで、その高強度部分が均され、ビーム全体をほぼ平坦化するとともに均一領域の面積を拡大することができた。このとき必要な12極磁場勾配は、Eq. (3)で表されるように、8極磁場勾配とは逆向きになる。つまり、粒子は8極磁場の場合とは逆方向にキックされ、端部の高強度部分が低下するものと解釈できる。この磁場強度は、ビームの磁気剛性が 1.5 Tm の場合、磁場中心から 6 cm の距離で 0.1 T オーダーと見積もられ、十分に実現可能な値であると考えられる。12極電磁石のみを用いた場合には、ビームの端部は急峻で、断面はより矩形に近い形状となったが、必要な12極磁場勾配は Fig. 3(b)の場合よりも1桁程度高く、イオン種やエネルギーによっては、常伝導磁石では実現できない可能性がある。また、矩形ビームコアの内側には円弧状の筋が、外側にはハローが生成されている。これらはベータatron結合に起因するものと考えられる。

8極電磁石を用いたビーム形成は、J-PARC の核破砕

中性子源[7]等いくつかの大強度加速器施設において既に利用あるいは導入の検討がなされているが、非線形力に起因するビームロスの抑制が課題とされている[19]。そこで、上記のシミュレーション結果に関して、ビームロスの評価した。ビームロスの割合は、8極集束の場合に 1% 程度あったが、12極磁場を併用することで1桁程度減少することが分かった。すなわち、12極電磁石を併用した非線形集束により、8極集束で生じたビームロスを低減できる可能性がある。他方、12極電磁石のみを使用した場合には、より強い非線形性のために 10% 台の高いロスが生じた。

6. まとめ

量研高崎では、TIARA のサイクロtron施設において、多重極電磁石により形成した大面積均一ビームの照射利用のため、関連する計測技術の開発を進め、安定な均一照射が可能であることを確かめた。さらに、12極電磁石を8極電磁石と併用してビームを集束することで、ビーム全体をほぼ平坦化できることをシミュレーションにより示した。次数の異なる多重極電磁石を適切に組み合わせることで、より理想的なビーム強度分布変換が行えるとともに、非線形力に起因するビームロスを抑制できる可能性がある。

参考文献

- [1] S. Kurashima, T. Satoh, Y. Saito, and W. Yokota, *Quantum Beam Sci.* **1** (2017) 2; <http://dx.doi.org/10.3390/qubs1010002>
- [2] Y. Yuri, N. Miyawaki, T. Kamiya, W. Yokota, K. Arakawa, and M. Fukuda, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **10** (2007) 104001; <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.10.104001>
- [3] 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>
- [4] N. Tsoupas *et al.*, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **10** (2007) 024701; <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.10.024701>
- [5] A. Bogdanov *et al.*, *Proc. 2007 Particle Accelerator Conference*, Albuquerque, USA, 2007, pp. 1748-1750; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/p07/PAPERS/TUPA5046.PDF>
- [6] 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>
- [7] 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>
- [8] 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
- [9] Y. Yuri, T. Yuyama, T. Ishizaka, I. Ishibori, and S. Okumura, *Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, 2014, pp. 862-865; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2014/proceedings/PDF/SAP1/SAP119.pdf
- [10] Y. Yuri, T. Ishizaka, T. Yuyama, K. Yoshida, I. Ishibori, and S. Okumura, *proc. 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, 2013, pp. 138-142; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj10/proceedings/PDF/SUOT/SUOT05.pdf
- [11] J. Beringer *et al.*, (Particle Data Group) *Phys. Rev. D* **86** (2012) 010001; <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.86.010001>
- [12] Y. Yuri, T. Ishizaka, T. Agematsu, T. Yuyama, H. Seito, and S. Okumura, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B* **406** (2017) 221; <http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2017.02.047>
- [13] 石坂知久, 百合庸介, 上松敬, 湯山貴裕, 清藤一, 奥村進, *Radioisotopes* **66** (2017) 251; <http://doi.org/10.3769/radioisotopes.66.251>
- [14] A. Kitamura *et al.*, to be submitted to *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B*.
- [15] M. Imaizumi, Y. Yuri, P.R. Bolton, S. Sato and T. Ohshima, *Proceedings of the 38th IEEE Photovoltaic Specialist Conference*, Austin, USA, 2012, pp. 2831-2834.
- [16] S. Meigo, H. Matsuda, T. Yuyama, and Y. Yuri, *QST Takasaki Annual Report 2016*, QST-M-8 (2018) p. 67.
- [17] S. Meigo *et al.*, *Proceedings of the 57th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High-Intensity and High-Brightness Hadron Beams*, Malmö, Sweden, 2016, pp. 391-396; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/hb2016/papers/wepm2x01.pdf>
- [18] Y. Yuri, T. Yuyama, K. Yoshida, T. Ishizaka, I. Ishibori, and H. Yamamoto, *Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, 2017, pp. 720-723; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2017/proceedings/PDF/TUP1/TUP125.pdf
- [19] H. D. Thomsen and S.P. Møller, *Proceedings of the 57th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High-Intensity and High-Brightness Hadron Beams*, Malmö, Sweden, 2016, pp. 427-432; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/hb2016/papers/wepm7y01.pdf>