

FORMATION OF A UNIFORM BEAM PROFILE USING MULTIPOLE MAGNETS

Yosuke Yuri, Tomohisa Ishizaka, Takahiro Yuyama, Susumu Okumura, and Ikuo Ishibori
Takasaki Advanced Radiation Research Institute, Japan Atomic Energy Agency
1233 Watanuki-machi, Takasaki, Gunma, 370-1292

Abstract

Large-area uniform irradiation is one of essential techniques for charged-particle beam applications. Recently, the *nonlinear focusing method* using multipole magnets has been widely receiving attention as an alternative uniform irradiation technique. Here, we have experimentally studied uniform beam formation using multipole magnets. A beam line was improved for uniform-beam formation using sextupole and octupole magnets at an accelerator complex of the Takasaki Ion Accelerators for Advanced Radiation Application (TIARA), Japan Atomic Energy Agency (JAEA). The transverse profile of the beam extracted from the JAEA azimuthally-varying-field (AVF) cyclotron was transformed into a uniform one by means of octupole nonlinear focusing. We have demonstrated the uniformization of an off-axis beam applying a sextupole force in addition to an octupole force. The characteristics of this method as a uniform-irradiation technique are also discussed, compared to the raster scanning method.

多重極電磁石を用いた均一ビームの形成

1. はじめに

日本原子力研究開発機構（原子力機構）高崎量子応用研究所のイオン照射研究施設TIARAのAVFサイクロトロン^[1]では、多重極電磁石がつくる非線形集束力によりビームの横方向強度分布が均一化されること^[2, 3]を利用した、新たな均一照射システム (MuPUS: Multipole-magnet beam profile uniformization system)の開発を行っている。本方式は、大面積の照射野全体を一定の粒子フルエンス率で均一に照射することが可能であるという点において、双極磁場を用いるスキャン方式や散乱体を用いる拡大方式の既存照射法より優れている。このような特徴から、主として材料科学分野における利用を目指している。

これまで、ビームプロファイルの均一化には八極電磁石等がつくる奇数次磁場が必要であることが知られていた^[2]。我々は均一照射システムの構築のため、ビーム均一化について一般的な非線形磁場を考慮した詳細な理論解析を行った。それにより、軸対称なガウス分布を有するビームのみならず、六極電磁石等がつくる偶数次磁場を奇数次磁場と併用することで、非対称なビームでも均一化が可能であることを明らかにした^[3]。この理論解析結果に基づき、六極および八極電磁石を用いた均一ビーム形成のためのビームラインを設計した。2008年1月までに多重極電磁石の設置や既存四重極電磁石の移設等のビームライン改作作業を完了し、ビーム試験を開始した。本稿では、非線形集束法による均一ビーム形成に関する最新の実験結果について報告する。

2. 均一ビーム形成のための条件

ビームに非線形力作用させることにより、実空間分布形状を変化させることが可能である。その後

の分布は初期分布とTwissパラメータ、ビームに作用した非線形力の強さによって決まる。ビーム輸送系において横方向強度分布を均一化するために必要となる非線形磁場強度、および、形成される均一領域の大きさが理論的に導かれている^[3]。

2.1 ガウスビームの均一化

ガウス分布を均一化するには、八極、十二極、十六極等の無限に高次までの奇数次磁場が必要である。最低次である八極磁場強度は、

$$K_{\text{oct}} = \frac{1}{\varepsilon\beta_0^2 \tan \phi}, \quad (1)$$

と表される。ただし、 β_0 は八極電磁石の位置におけるベータ関数、 ϕ は八極電磁石からターゲットまでのベータatron振動の位相進度、 ε はビームのRMSエミッタンスである。また、ターゲット上で形成される均一領域の全幅 $2w$ は、

$$2w = \sqrt{2\pi} \sqrt{\varepsilon\beta_1} |\cos \phi| \quad (2)$$

である。ただし、 β_1 はターゲットにおけるベータ関数である。

実際には無限に高次までの磁場を使用することはできない。奇数次磁場として最低次の八極磁場のみが用いられることが多い。この場合、式(1)で表される値よりも弱い八極磁場で近似的に均一化が可能である^[3]。

2.2 非対称ビームの均一化

奇数次と偶数次の多重極磁場を組み合わせることによって、非対称な強度分布を有するビームの均一化が可能である^[3]。例えば、ビームが設計中心軸に対して精度よくアライメントされていない“蛇行ガウスビーム”を均一化するには、あらゆる次数の多

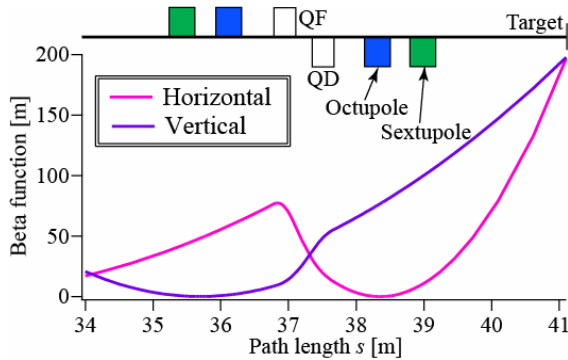


図1：均一ビーム形成のためのビームラインの光学系と電磁石の配置。QF (QD) は水平方向集束（発散）四重極電磁石を示す。横軸はサイクロトロン出口からの距離である。ベータトロン結合を低減するためにビーム断面が扁平となる位置に多重極電磁石が設置されている。

重極磁場が必要となる。2.1節と比べると、奇数次磁場には蛇行を補正する効果があると解釈できる。その最初の2項（六極および八極磁場強度）は、

$$K_{\text{SXT}} = -\frac{1}{\beta_0 \tan \phi} \frac{\delta x}{\sigma_1^2}, \quad K_{\text{OCT}} = \frac{1}{\sigma_1^2 \beta_0 \tan \phi} \left(1 - \frac{\delta x^2}{\sigma_1^2}\right) \quad (3)$$

と表される。ただし、 δx および σ_1 は多重極電磁石位置におけるビーム重心位置のずれおよびRMSビームサイズである。形成される均一領域の大きさは、

$$2w = \sqrt{2\pi} \sqrt{\varepsilon \beta_t} |\cos \phi| \exp\left[\delta x^2 / 2\sigma_1^2\right] \quad (4)$$

と表される。式(2)の蛇行のない場合と比べて、係数 $\exp[\delta x^2 / 2\sigma_1^2]$ の分だけ均一領域が大きくなる。

2.3 ベータトロン結合の低減

一般に、 $n-1$ 次の電磁石 ($n=2$: 四重極電磁石、 $n=3$: 六極電磁石、 $n=4$: 八極電磁石、...) がつくる磁場中における荷電粒子の横方向 (x : 水平方向、 y : 鉛直方向) の運動は、以下の微分方程式で表される：

$$\begin{cases} x'' + \frac{K_{2n}}{(n-1)!} \text{Re}\left[(x+iy)^{n-1}\right] = 0, \\ y'' + \frac{K_{2n}}{(n-1)!} \text{Re}\left[i(x+iy)^{n-1}\right] = 0, \end{cases} \quad (5)$$

ただし、 K_{2n} は $n-1$ 次の集束力の強さを表す。明らかに、多重極磁場 ($n \geq 3$) の場合、水平方向と鉛直方向の運動は不可避免的に結合してしまう。実際の均一ビーム形成では、2方向の均一化の調整が独立に行える必要があるため、この結合は避けられなければならない。そこで、不要なベータトロン結合をできる限り弱めるため、多重極電磁石の設置位置でビーム断面が扁平となるような光学系を組む。すなわち、水平方向を均一化するための多重極電磁石位置では、水平方向ビームサイズに比べて鉛直方向ビームサイズは十分小さくしなければならない。鉛直方向を均一化する場合も同様である。

表1：多重極電磁石の主なパラメータ。

	六極電磁石	八極電磁石
磁極長 (機械長)	0.30 m	0.30 m
(実効長)	0.33 m	0.33 m
ボア半径	57.5 mm	57.5 mm
最大磁場勾配	300 T/m ²	13000 T/m ³
最大コイル電流	350 A	320 A

表2：均一ビーム形成実験の主なパラメータ。

イオン種	H ⁺
運動エネルギー	10 MeV
磁気剛性	0.458 Tm
ビーム電流	< 1 μA

3. 均一ビーム形成実験

均一照射用ラインの構築のため、上述の理論解析に基づきTIARAサイクロトロンのビームラインを改造し、均一ビーム形成実験を実施した。図1にその光学系を示す。2台の八極電磁石のほか、蛇行補正用および偶数次磁場のみによるビーム均一化^[3]のために六極電磁石を設置した。ビーム重心が偏る方向 (式(3)における δx の符号) は調整に依存するため、六極電磁石の極性は反転可能である。多重極電磁石の主なパラメータを表1にまとめた。また、主な実験条件を表2に示す。

3.1 散乱体によるガウス分布化

前節での議論に基づき均一なビームを形成するには、前提条件としてプロファイルがガウス分布である必要がある。ところが、サイクロトロンから引き出されたビームの分布は通常ガウス分布ではなく非対称である。このようなビームでは高精度の均一化は困難である。そこで、引き出されたビームの分布をガウス分布に近づけるための多重散乱用Al薄膜 (厚さ: 0.8~1.5 μm) を多重極電磁石の上流に導入した。このとき、均一ビームライン末端のターゲット上でガウス分布を得るためには、散乱体からターゲットまでのベータトロン振動の位相進度が90度の奇数倍である必要がある。また、散乱によりエミッタンスが数倍大きくなることで^[4]、式(1)~(4)に示されるように、均一領域の面積化および必要な多重極磁場強度の低減が可能となる。

3.2 八極電磁石を用いた均一ビームの形成

ビームの蛇行が十分小さければ、八極電磁石のみを調整することで2次元均一ビームの形成が可能である。ターゲット上での2次元強度分布のモニタにはDRZ蛍光板 (化成オプトニクス) を用いた。蛍光物質としてGd₂O₂Sを含むDRZは、一般的に使われているアルミナ蛍光板に比べて、発光の減衰時間が極めて短いため、リアルタイム計測に有用である。また、十分な発光強度を得るのに必要となるビーム強度が低いのも特徴のひとつである。

より高精度な2次元強度分布の計測には、フィルム線量計 (GAFCHROMICフィルム、ISP) を用いた。

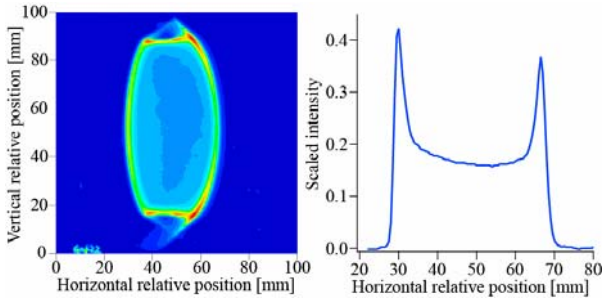


図2：GAFCHROMICフィルム（HD-810）を用いて計測した、ターゲット上におけるビーム強度分布。ビームはターゲット直前で大気中に取り出され、フィルムへ照射される。右図は左図の鉛直方向位置50mmに沿った断面の分布である。

ビーム照射によりフィルムは青色に着色する。これを汎用文書スキャナで読み取った光学濃度から相対強度分布を得ることができる^[5]。図2にターゲット上で形成された二次元強度分布の一例を示す。ガウス分布のテイルが折りたたまれているため、分布の縁では強度が高くなっている。その“壁”に囲まれた内側に、約3cm×6cmの均一領域が形成されているのが分かる。光学濃度から見積もられる均一度は、均一領域の中心付近で約2%であった。均一領域の外側を含むほど均一性が低下する傾向がある。これまでに、最大6cm×6cmの照射野で6%の均一度を得た。なお、ターゲット位置をより下流へ移すことにより、さらなる大面積化が可能である。

3.3 六極電磁石と八極電磁石の併用による蛇行ビームの均一化

サイクロトロンから引き出されたビームはターゲットまで約40m輸送される。このとき、あらゆる場所でビーム重心を中心軸上にアライメントすることは容易でない。ターゲット上でのスポット位置が十分にアライメントされていたとしても、輸送系の途中では、多少なりともビーム重心のミスアライメントがありうる。すなわち、ビームは蛇行している。八極電磁石の位置における蛇行が大きい場合、図3(a)のようにターゲット上の分布は均一ではなく非対称に傾く。2.2節で述べたように、六極磁場を付加することで蛇行ビームによる均一性の低下を補正することができる。実際、図3(b)に示すように、八極磁場と六極磁場の併用により均一領域が形成できることを確認した。

4. 均一照射法としての特徴

ラスタースキャン方式による均一照射では、2方向に異なる周波数で双極磁場を変化させスポットビームを掃引する（TIARAでは、水平方向：50Hz、鉛直方向：0.25~5Hz）。スキャンの開始時と終了時のビーム位置の差を考慮しない場合、必要とする均一度とスキャン周波数に依存して照射時間の下限が決まる。例えば、掃引回数差に起因する均一度を1%に抑えるためには、低いほうの周波数が1Hzの場

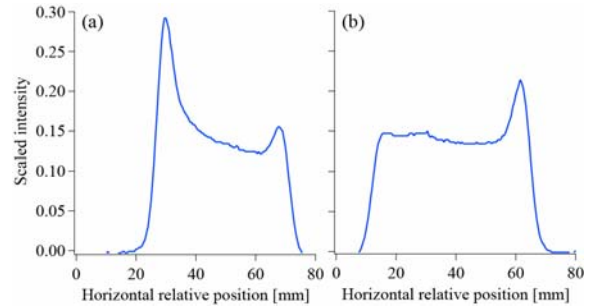


図3：GAFCHROMICフィルムを用いて計測した、ビームが蛇行している場合のターゲット上におけるビーム強度分布。(a)八極磁場のみ励磁した場合。(b)八極磁場に加えて六極磁場を付加した場合。

合、少なくとも100秒の照射時間が必要となる。高い均一性を保ちつつ粒子フルエンスを低くすることは難しい。ラスタースキャン方式は短時間の照射には不向きである。

一方、非線形集束法による均一照射の場合、ビームが均一化されているため、スキャン方式に比べて短時間の照射が可能である。パルス電場によるビームチョッピングを利用し、1秒程度の均一照射が可能であることを確認した。より短時間の照射も十分可能である。

また、ビーム強度を広範囲にわたって変化させることができる金属製メッシュ型のビームアテネータ^[6]を用いて、フルエンス率を下げた照射が可能である。これを利用し、低フルエンスの均一照射が可能であることも確認した。

5. まとめ

原子力機構TIARAでは、多重極電磁石を用いた均一照射システムMuPUSを構築し、均一照射装置としての共用化に向けた研究開発を行っている。八極電磁石を用いたガウスビームの均一化、および、六極電磁石と八極電磁石の併用による蛇行ビームの均一化に成功した。ラスタースキャン方式と比べて、本方式はより短時間の照射や低フルエンスの照射が可能である。

なお、この非線形集束法は、均一ビーム形成や拡大照射に限られたものではなく、一般的なビームプロファイル制御へも応用可能である。

参考文献

- [1] K. Arakawa et al., Proc. 13th Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications, Vancouver, Canada, 119 (1992).
- [2] P. F. Meads, IEEE Trans. Nucl. Sci., **30**, 2838 (1983).
- [3] Y. Yuri et. al., Phys Rev. ST Accel. Beams **10**, 104001 (2007).
- [4] Y. Yuri et. al., in Proc. Annual Meeting of 4th Particle Accelerator Society of Japan and the 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan 607 (2007).
- [5] T. Agematsu et al., Radioisotopes **57**, 87 (2008).
- [6] T. Yuyama et. al., in these proceedings, WP004.