

Study of Beam Profile Modification for Beam Uniformization Using Multipole Magnets

Yosuke Yuri, Susumu Okumura, Takahiro Yuyama, Takashi Agematsu,
Nobumasa Miyawaki, Ikuo Ishibori, and Tomohisa Ishizaka

Takasaki Advanced Radiation Research Institute, Japan Atomic Energy Agency
1233 Watanuki-machi, Takasaki, Gunma 370-1292, Japan

Abstract

A Gaussian intensity distribution is required as an initial one for uniform-beam formation with use of multipole magnets, while the profile of the beam extracted from an accelerator is not always Gaussian. Therefore, we have experimentally studied on profile modification of the beam from the JAEA AVF cyclotron. Using a thin scattering foil, we transformed an initial asymmetric distribution into a Gaussian one. The degree of modification depends on the phase advance of the betatron oscillation from the scatterer to the profile monitor. In order to study the effects of multiple scattering on emittance increase, we also measured the transverse emittance, one of the important parameters for beam uniformization, by means of the quadrupole scan method.

多重極電磁石を用いた均一ビーム照射のための ビームプロファイルの改良に関する研究

1. はじめに

今日、荷電粒子ビームを試料に対して均一に照射する技術として、双極磁場を用いたビーム走査方式および散乱体を用いたビーム拡大方式が広く利用されているが、近年新たな均一照射技術として、多重極電磁石を用いる方法が注目されている^[1-5]。これは、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ガウス分布から均一分布へ変換されることを利用しており^[6]、均一化されたビームを試料全面に同時照射できるという特徴を有する。すなわち、大面積の照射野全体を一定の粒子フルエンス率で照射可能である。日本原子力研究開発機構イオン照射研究施設 (TIARA) のサイクロトロン施設^[7]においても、多重極電磁石を用いた均一照射システムの開発を進めている^[8]。主として材料科学分野での高度な均一照射に利用される予定である。

多重極電磁石が作る非線形磁場を用いてビームの横方向強度分布を均一化するには、初期分布としてガウス分布が必要である^[6, 8]。ところが、加速器から引き出されたビームの強度分布は一般にガウス型ではなく非対称である。そこで、薄膜の多重散乱を利用して、サイクロトロンから引き出されたビームの非対称な強度分布をガウス分布に近づける実験を行った。また、均一化において重要なパラメータであるエミッタンスをQスキャン法により計測し、薄膜散乱によるエミッタンス増大への影響を解析した。

2. 非線形磁場による分布の均一化

ここでは、多重極磁場によるビーム均一化について簡単にまとめる^[8]。ビーム輸送系に設置した多重極電磁石を用いてビームを集束すると、下流のある場所において横方向強度分布は均一化される。このとき、ビームの初期分布が理想的なガウス分布であれば、無限に高次までの奇数次多重極磁場が必要となる。実際には、最低奇数次である八極磁場があれば十分で、その積分磁場勾配は、 L_8 を電磁石の実効長とすると、

$$K_8 L_8 = \frac{1}{\varepsilon \beta_0^2 \tan \phi} \quad (1)$$

である。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。典型的には K_8 は 10^3 T/m^3 のオーダーであり、現実的に十分達成可能である。また、ターゲットで形成される均一領域の全幅は、

$$2r_1 = \sqrt{2\pi} \sqrt{\varepsilon \beta_1} |\cos \phi| \quad (2)$$

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。

2次元均一分布を形成するためには、非線形磁場による水平方向と鉛直方向の運動の結合をできるだけ弱め、2自由度を独立に制御できるように、八極電磁石が2台必要である。結合を弱めるためには、八極電磁石の設置位置でビーム断面が扁平になるようにビーム光学系を調整しなければならない。すなわ

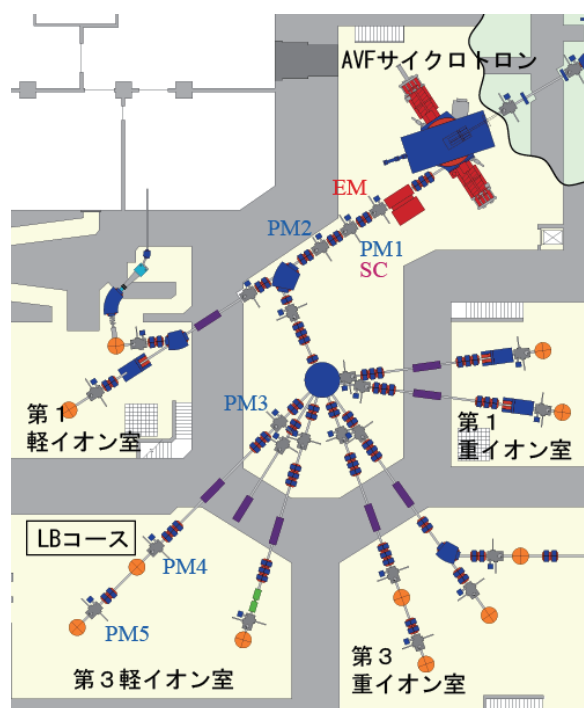


図1：TIARAのAVFサイクロトロン（K値：110MeV、最大磁気剛性：1.5Tm）とビームラインの概略図。EMはエミッタンスモニタ（スリットワイヤ方式）、PM1～PM5はプロファイルモニタ（3線式）、SCは散乱体を指す。本実験では、ビームをLBコースへ輸送した。

ち、水平（鉛直）方向均一化用八極電磁石の位置では、鉛直（水平）方向ビームサイズを十分小さくしなければならない。

3. 散乱体によるプロファイルの改良

多重極電磁石を用いたビーム均一化には、ビームの初期分布が中心軌道に対して対称なガウス分布である必要がある^[8]。シミュレーションによれば、初期分布がガウス分布からずれるほど、ビーム強度分布の均一性が損なわれる。そこで、薄膜散乱体を用いてビームプロファイルを改良する実験を行った。個々の粒子が薄膜を通過する際の多重散乱による運動量変化はランダムで等方的であるとみなせるので、薄膜通過後の分布がガウス分布に近づくことが期待される。TIARAのAVFサイクロトロン（図1参照）から引き出された10MeV H^+ および100MeV $^{16}O^{4+}$ のビームを薄膜散乱体（図1のSC）に透過させ、下流のプロファイルモニタ（図1のPM2～PM5）で強度

表1：薄膜の多重散乱による、10MeV H^+ ビームの平均散乱角^[9]と運動エネルギー損失率^[10]。

	Al薄膜 ($t=0.8\mu\text{m}$)	C薄膜 ($t=0.2\mu\text{m}$)
平均散乱角	0.93mrad	0.26mrad
エネルギー損失	0.07%	0.02%

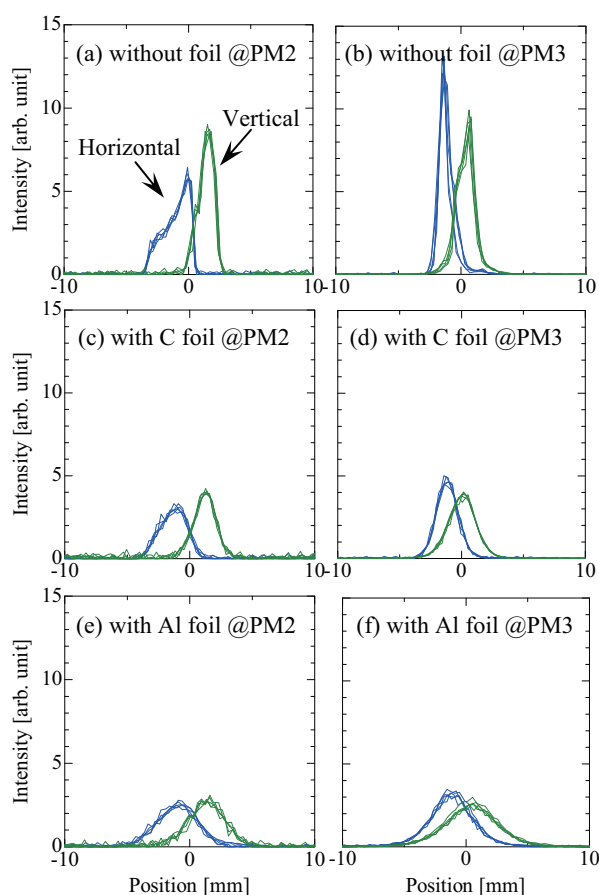


図2：サイクロトロンから引き出された H^+ ビーム（ビーム電流値 $\sim 0.1\mu\text{A}$ ）の横方向強度分布。上段から散乱体なし、炭素薄膜（厚さ $0.2\mu\text{m}$ ）あり、アルミニウム薄膜（厚さ $0.8\mu\text{m}$ ）ありの場合の強度分布である。また、左側の図はPM2での、右側の図はPM3での強度分布である。分布計測の統計誤差を減らすために、複数回の計測結果を重ねてプロットした。

分布を計測した。本稿では主に H^+ ビームの結果について述べる。

散乱体を用いない場合の横方向強度分布を図2(a)および(b)に示す。サイクロトロンから引き出されたビームの形状は明らかにガウス分布でなく非対称である。ビームを散乱体に透過させた場合、図2(c)～(f)に示すように、分布はほぼガウス分布に変換された。表1に示すように、薄膜の種類と厚さで決まる平均散乱角が大きいくほど、散乱後のビームサイズも大きい。なお、今回使用した薄膜による10MeV H^+ ビームの運動エネルギーの減少率は十分小さく、価数も変化しないため、電磁石の励磁電流を変更することなくビーム輸送が可能であった。多重散乱による電流損失も見られなかった。

多重散乱によるガウス分布化に対してビーム光学系パラメータが及ぼす影響を調べるため、四重極電磁石の励磁電流を調整しベータatron振動の位相進

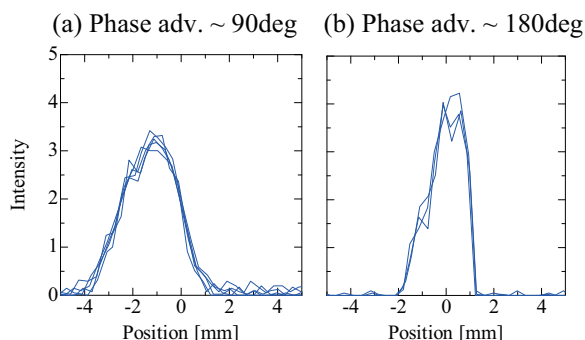


図3：厚さ0.2 μm の炭素薄膜により散乱された H^+ ビームのPM2での水平方向強度分布。SCからPM2までの水平方向ベータトロン位相進度が(a)約90度、(b)約180度となるよう四重極電磁石の集束力を調整した。散乱体以外の実験条件は図2と同一である。

度を変化させてプロファイルを計測した。散乱体からプロファイルモニタまでのベータトロン振動の位相進度が約90度および約180度である場合の結果を図3に示す。薄膜透過直後の位相空間分布は、多重散乱のために角度分布がガウス分布化される（薄膜は十分薄いため、実空間分布の変化は無視できるほど小さい）。その後、ビームはベータトロン振動の位相進度に従って位相空間内で回転する。図3(a)の分布は、その回転角度が90度であるため、実空間分布がガウス分布となる。他方、180度の場合、散乱体位置での分布が（拡大率は別として）反転するのみで、実空間分布はガウス分布とはならない。実際、図3(b)の分布は、SC近傍のPM1での強度分布を反映している。

4. 多重散乱によるエミッタンス増加

式(1)および(2)に示されるように、多重極電磁石を用いたビーム均一化では、エミッタンスは重要なパラメータである。そこで、散乱体下流において、Qスキャン法^[11]によるエミッタンス計測を実施した。図4に示すように、平均散乱角のより大きな薄膜ほどエミッタンスの増加量は大きい。散乱体透過後の増大したエミッタンスは、輸送系のアクセプタンス（16 π mm.mrad）よりも依然として小さく、許容できる。散乱体上流のエミッタンスモニタ（EM）で計測した位相空間分布を基にした単粒子トラッキングでも、多重散乱によるエミッタンス増加が図4と同様の傾向となることを確認した。

5. まとめ

多重極電磁石を用いて均一ビームを形成するには、ビームの初期分布がガウス分布である必要がある。そこで、薄膜の多重散乱を利用して、サイクロトロンから引き出されたビームの非対称な横方向強度分

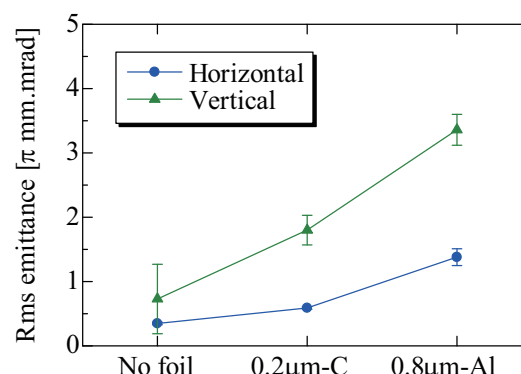


図4：Qスキャン法で計測した H^+ ビームのRMSエミッタンス。散乱体のない場合、厚さ0.2 μm の炭素薄膜、厚さ0.8 μm のアルミニウム薄膜を導入した場合について計測した。プロファイルモニタPM2とその直前の四重極電磁石を用いた。

布をガウス分布へ改良する実験を行った。多重散乱によるエミッタンスの増加は許容範囲内であった。ガウス分布化の度合いは、薄膜の種類や厚さのみならず、散乱体から観測地点までのベータトロン振動の位相進度にも依存する。したがって、多重極電磁石を用いた均一ビーム形成には、散乱体から多重極電磁石設置位置まで、あるいは、ターゲットまでの位相進度を適切に選ばなくてはならない。

100MeV $^{16}\text{O}^{4+}$ ビームによる同様の実験では、多重散乱による荷電状態の変化が観測された。全電流のうち約85%が+8価へ、残りの約15%が+7価へと変化した。これは平衡電荷分布の理論^[12]とよく一致する。光学系を調整することで、+8価のビームの選択的な輸送およびプロファイルのガウス分布化が可能であることを確かめた。

参考文献

- [1] N. Tsoupas *et al.*, Phys. Rev. STAB **10** 024701 (2007).
- [2] C. Ronsivalle *et al.*, Proc. 10th European Particle Accelerator Conference EPAC'06, 2316 (2006).
- [3] W. P. Jones *et al.*, Proc. 2005 Particle Accelerator Conference PAC'05, 1704 (2005).
- [4] R. Duperrier, J. Payet, and D. Uriot, Proc. 9th European Particle Accelerator Conference EPAC'04, 2032 (2004).
- [5] S. Richter and W. Barth, Proc. 8th European Particle Accelerator Conference EPAC'02, 1181 (2002).
- [6] P. F. Meads, IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-30, 2838 (1983).
- [7] K. Arakawa *et al.*, Proc. 13th Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications, Vancouver, Canada, 119 (1992).
- [8] Y. Yuri *et al.*, Proc. 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 31st Linear Accelerator Meeting in Japan, 913 (2006).
- [9] A. Maier, CERN/PS 98-061 (DI).
- [10] <http://www.srim.org/>
- [11] H. Wiedemann, *Particle Accelerator Physics I*, Springer-Verlag, 1993.
- [12] Y. Baudinet-Robinet, Nucl. Instrum. Methods **190**, 197 (1981)