

散乱体を利用した遅い取り出しビームのエミッタンス整合

EMITTANCE MATCHING OF A SLOW EXTRACTED BEAM BY THE SCATTERER METHOD

藤本哲也^{#,A)}, 岩田佳之^{B)}, 松葉俊哉^{C)}, 藤田敬^{B)}, 佐藤真二^{B)}, 白井敏之^{B)}, 野田耕司^{B)}
Tetsuya Fujimoto^{#,A)}, Yoshiyuki Iwata^{B)}, Shunya Matsuba^{C)}, Takashi Fujita^{B)}, Shinji Sato^{B)}, Toshiyuki Shirai^{B)},
Koji Noda^{B)}

^{A)} Accelerator Engineering Corporation

^{B)} National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

^{C)} Hiroshima University

Abstract

An introduction of a heavy-ion rotating-gantry is in progress at Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba (HIMAC) to realize a higher precision cancer therapy with heavy ion. A scanning irradiation method will be applied to this gantry course with the beam energy from 430 MeV/u to 48 MeV/u. In the rotating gantry, a horizontal and vertical emittance is coupled by its rotation. To maintain the circular spot shape at isocenter without depending on the gantry angle, it is necessary to achieve the symmetric phase-space distribution for the horizontal and vertical at the entrance of the rotating gantry. Therefore, it is necessary to compensate the emittance, which has different size between the horizontal and vertical. We considered using a thin scatterer method to compensate the emittance. After consideration of the optical design for the emittance matching, the scatterer device was located in the high energy beam transport line. In the beam commissioning, we confirmed that the symmetrical spot shape is obtained at isocenter without depending on the gantry angle.

1. はじめに

放医研 HIMAC では 1994 年から拡大ビーム照射法による重粒子線治療を開始し、これまで 10000 人を超える治療照射を行ってきた[1]。2011 年からは更なる治療精度の向上、より複雑な形状の腫瘍への適用、正常組織への付与線量低減が期待される 3 次元スキヤニング法による治療照射を開始した[2]。そして現在、多門照射や重要臓器を避けた照射を可能とする重粒子線回転ガントリー[3]の設置が計画され、現在コミッションングが進められている所である[4]。放医研回転ガントリーは 10 台の超伝導偏向電磁石で構成され、そのうち 8 台は四極磁場発生用コイルが巻かれた機能結合型となっている[5]。回転ガントリーを有する治療室には HIMAC シンクロトロンから 430~48 MeV/u のビームが供給され、3 次元スキヤニング照射法により治療が行われる。

回転ガントリーではその回転により四極磁場が固定ラインから見てスキュー四極磁場となる。そのため水平・垂直のカップルが起り、アイソセンタースポットに傾きが生じる。ガントリー回転角度に依らずアイソセンタースポット形状を対称的な分布とするためには回転部入口で水平・垂直のビームパラメータを一致させる必要がある。しかし一般にシンクロトロンからの遅い取り出しビームのエミッタンスは水平・垂直で一致しておらず、HIMAC に於いても $\epsilon_x < \epsilon_y$ となっている。また遅い取り出し法では静電セプタム電極 (ESD) によりビームを削るように取り出すため水平方向はガウス分布をしていないが、アイソセ

ンターで対称的なスポットを実現するためにはこれも改善する必要がある。これらを同時に改善する手法として散乱体を利用したエミッタンス整合法を採用することとした[6]。本報告ではエミッタンス整合に関するオプティクス設計から粒子トラッキング計算による確認、そして回転ガントリービームコミッションングにおける検証についてまでを述べる。

2. 原理

2.1 エミッタンス整合

本整合法は高エネルギーイオンが散乱体を通じたときに生じる多重散乱を利用したものである。非常に薄い散乱体である仮定すると、散乱体通過前後のビームサイズは変わらず、散乱角のみが加わる。この場合散乱体前後での Twiss パラメータは以下の関係式で表わされる[7]。

$$\begin{aligned}\epsilon_2 \gamma_2 &= \epsilon_1 \gamma_1 + \theta_0^2 \\ \epsilon_2 \beta_2 &= \epsilon_1 \beta_1 \\ \epsilon_2 \alpha_2 &= \epsilon_1 \alpha_1\end{aligned}\quad (1)$$

ここで添え字 1 は散乱体通過前、2 は通過後を示している。また θ_0 は散乱体通過による散乱角を示している。Twiss パラメータの関係式を用いると(1)式は(2)のように書き換えられる。

$$\epsilon_{2x} = \epsilon_{1x} \sqrt{1 + \frac{\beta_{1x} \theta_0^2}{\epsilon_{1x}}}, \quad \epsilon_{2y} = \epsilon_{1y} \sqrt{1 + \frac{\beta_{1y} \theta_0^2}{\epsilon_{1y}}}\quad (2)$$

[#] t.fujimoto@aec-beam.co.jp

(2)式において $\varepsilon_{2x}=\varepsilon_{2y}$ となる条件がエミッタンス整合の条件となる。散乱体を利用したエミッタンス整合では少なからずエミッタンスの広がりが生じる。アイソセンターのスポットサイズをできるだけ絞るためにはエミッタンスの広がりをできるだけ小さく抑えることが重要である。Figure 1 は HIMAC 遅い取り出しビームのエミッタンスを示している。使用する全エネルギー範囲において $\varepsilon_{1x} < \varepsilon_{1y}$ となっている。よって散乱体通過後のエミッタンスをなるべく小さくする条件として、散乱体位置に於ける β_{1y} をできるだけ小さく、また散乱角をできるだけ小さくするために β_{1x} をできるだけ大きくするオプティクス設計が必要になる。

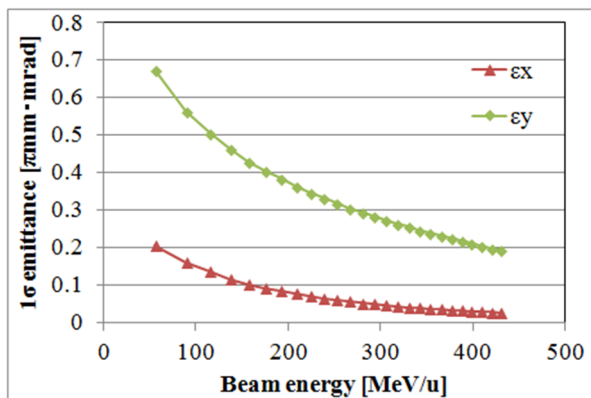


Figure 1: Beam emittance of the slow extracted beam from the HIMAC synchrotron.

2.2 フェーズアドバンス

シンクロトロンからの遅い取り出し法では ESD により削り出すように取り出しを行うため水平方向プロファイルはガウス分布をしていない。よって ESD から $\mu x = n\pi$ rad (n : integer) の位置では対称的なスポットにならない。HIMAC ではシンクロトロン偏向電磁石に起因する水平方向 50Hz 振動の影響が照射点で生じないようにアイソセンターまでの $\mu x = n\pi$ に調整する必要があることから、水平方向非対称分布を改善することが望ましい。この非対称分布は ESD から散乱体までのフェーズアドバンスを $\mu x = (n+0.5)\pi$ rad とすることで改善することが可能である[6]。

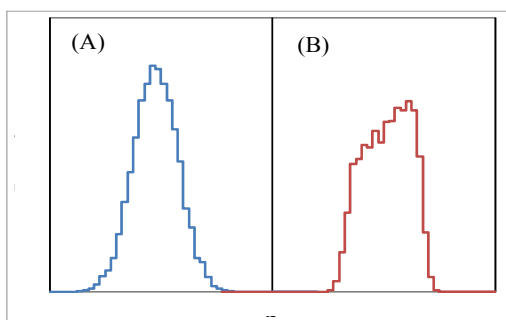


Figure 2: Horizontal beam profile at the phase advance of $n\pi$ rad from ESD. (A) and (B) show the profile after passage through the scatterer with $\mu x = (n+0.5)\pi$ rad and $\mu x = n\pi$ rad, respectively.

Figure 2 は ESD からのフェーズアドバンス $\mu x = n\pi$ rad におけるプロファイルを示している。それぞれ散乱体を $\mu x = (n+0.5)\pi$ rad および $\mu x = n\pi$ rad で通過した後の場合であるが、 $\mu x = (n+0.5)\pi$ rad で散乱体を通過させるとその後のプロファイルは常に対称的な分布となる。そこで散乱体を利用して $\varepsilon_{1x}=\varepsilon_{1y}$ を得るだけでなくフェーズアドバンスも最適化してビームプロファイルの改善も試みることにした。

2.3 エミッタンス整合装置

エミッタンス整合に必要な β 関数およびフェーズアドバンスが実現できる配置をオプティクス計算により求めた後、装置の製作およびビーム輸送ラインへの組み込みを行った。散乱体は低エネルギーにおいてはエミッタンスの広がりを抑えるために出来るだけ薄いことが望ましい。しかし低エネルギー側に合わせた薄い散乱体厚では、高エネルギー側で水平方向に大きくビームを広げる必要があるため整合を取ることが難しくなる。430 ~ 48MeV/u の広いエネルギー範囲に対して無理なく整合を取るために回転散乱体構造を採用することにした。これは散乱体を回転させることでビームから見た散乱体の実効厚を変化させるものである。オプティクス計算の結果散乱体として 15 μ m のカプトンシートを使用することとした。その他散乱体装置の仕様を Table 1 に示す。

Table 1: Specification of the Matching Device

Beam energy	430 – 48 MeV/u
Scatterer material	Polyimidefilm (Kapton)
Scatterer thickness	15 μ m
Rotation angle	0 – 60 degree
Rotation speed	100ms / each energy steps

2.4 トラッキング計算

検討したオプティクスおよび散乱計算を使って粒子のトラッキング計算を行いエミッタンス整合の確認を行った。トラッキング計算は全エネルギー範囲に対して行ったが、ここでは 430MeV/u の結果について示す。Table 2 に計算条件を示した。

Figure 3 は散乱体前後の位相空間分布を示している。計算に使用した散乱体(Kapton 30 μ m)では水平方向ビームサイズを大きく広げる必要があるが、ビーム輸送ラインのアーチャー(±28mm)に十分収まるサイズである。

Table 2: Calculation Conditions of the Particle Tracking

Beam energy	[MeV/u]	430
Scatterer material		Kapton
Scatterer thickness	[μ m]	30
Particle number		10000
($\varepsilon_x, \varepsilon_y$) at ESD	[π mm·mrad]	(0.106, 0.755)
(μ_x, μ_y) from ESD to scatterer	[rad]	(1.5 π , 3.5 π)

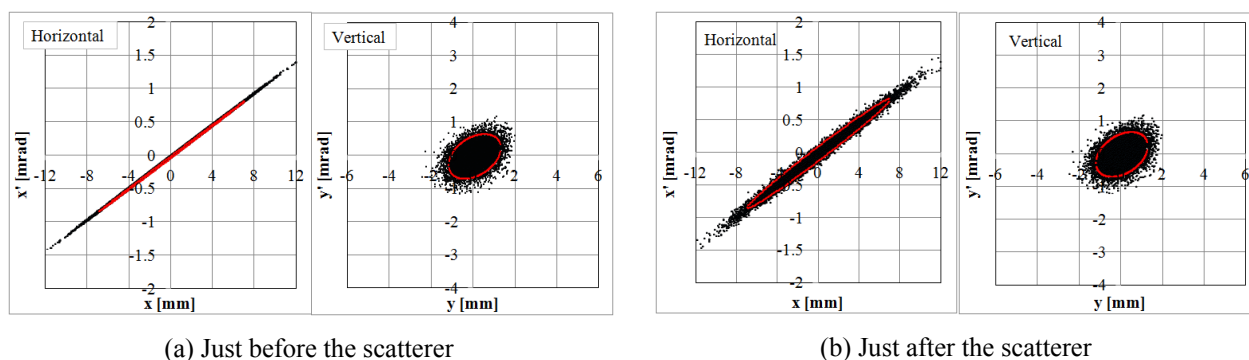


Figure 3: Phase space distribution just before and after the scatterer by the particle tracking calculation.

Table 3 は 430MeV/u と 56MeV/u についての散乱体前後ビームパラメータを示している。430MeV/u は散乱体角度 60° 、55MeV/u は 0° での計算結果であるが、それぞれエミッタンス ϵ_y の増大は 1.6%、8.5%に収まっている。

Table 3: Beam Parameters Before and After the Scatterer

430 MeV/u	Before SCT	After SCT
(β_x, β_y) [m]	(461.0, 2.0)	(62.30, 1.97)
(α_x, α_y)	(-54.76, -0.41)	(-7.34, -0.41)
(ϵ_x, ϵ_y) [$\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$]	(0.106, 0.775)	(0.787, 0.787)
55 MeV/u	Before SCT	After SCT
(β_x, β_y) [m]	(39.2, 2.0)	(11.0, 1.84)
(α_x, α_y)	(-2.48, -1.11)	(-0.69, -1.02)
(ϵ_x, ϵ_y) [$\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$]	(0.82, 2.70)	(2.93, 2.93)

Figure 4 はトラッキング計算により散乱体を通させた後、フェーズアドバンス μ_x を 36° ステップで回転させた時の水平方向プロジェクションプロファイルを示している。計算では ESD から散乱体までのフェーズアドバンス $\mu_x = 1.5\pi$ rad としているが、 $\mu_x = (n+0.5)\times\pi$ rad の条件であれば位相を回転させても常にプロファイルはガウス分布となることを確認することができる。

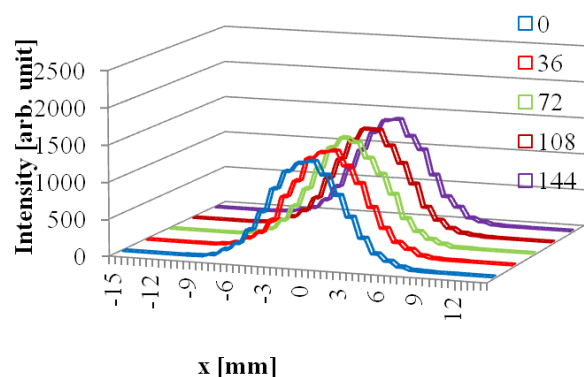
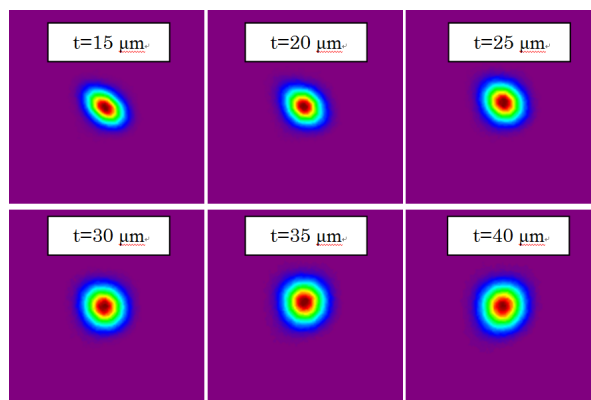


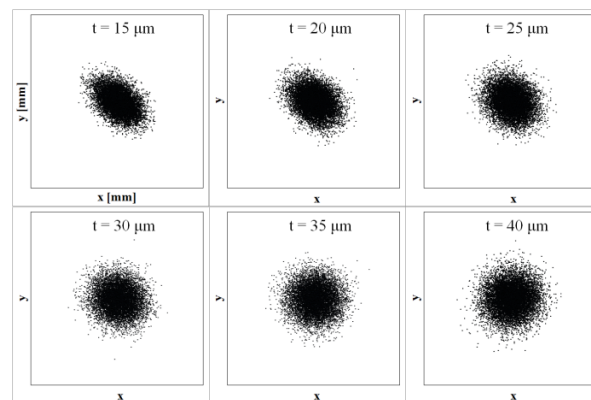
Figure 4: Horizontal beam profile with various phase advances from the scatterer.

3. ビーム試験

粒子分布のトラッキング計算によりエミッタンス整合が可能であることを確認した後、ビームによる試験を行った。ビームによる確認はガントリーコースで行った。ガントリー角度が付いている場合、エミッタンス不整合があるとアイソセンターでビームに傾きが生じる。また、回転部取り合いで Twiss パラメータに不一致があっても同様にビームに傾きが生じる。



(a) Measured result



(b) Tracking calculation result

Figure 5: Transition of spot shapes at iso-center by changing the scatterer thickness. Gantry angle is set to -45 degrees.

Figure 5 はガントリー角度 -45° における散乱体厚を変化させた時のアイソセンタースポット形状(a)とトラッキング計算(b)の比較を示している。散乱体 $t=30\mu\text{m}$ でエミッタンス整合が取れる計算であるが、おおよそ丸いスポット形状が得られている。散乱体厚を変化させることでエミッタンス不整合 ($\epsilon_x \neq \epsilon_y$) が起こり、ビームが傾いてくることも確認できた。トラッキング計算と比較してもおおよそ似た傾向が得られている。以上の結果からエミッタンス整合およびガントリー回転部取り合い点での Twiss パラメータ整合がほぼ計算通り実現できていることが分かる。

Figure 6 はガントリーを回転させた時のアイソセンタースポット形状を示している。回転ガントリーではその回転により電磁石の配置に変位が生じ、回転角度毎に異なるエラー軌道が生じる。本ガントリーの四極電磁石は偏向電磁石との機能結合タイプで曲率を持っているためエラー軌道によりビームが受ける GL 積が変化する。この GL 変化によるスポット形状の変形を補正するために 1 台の四極電磁石励磁量を微調整しているが、 $\Delta I/I < \pm 0.2\%$ 程度であった。

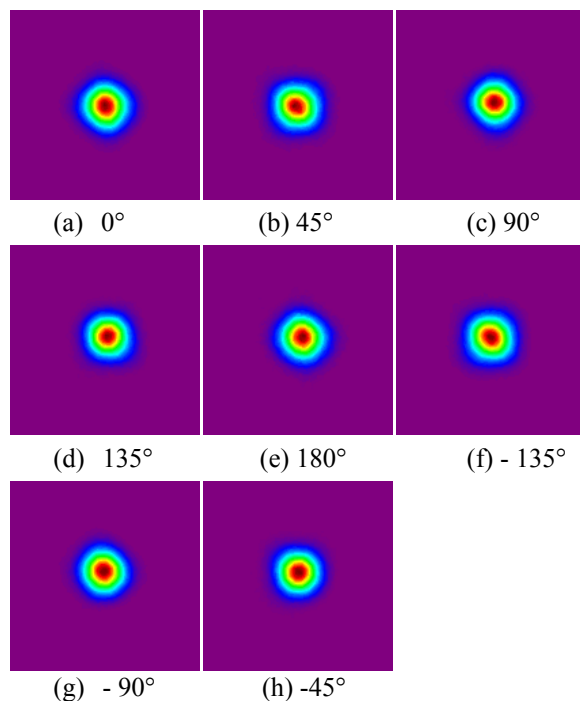


Figure 6: Iso-center spot shape with various gantry angles. Average spot size is about 1.75 mm at 1σ in case of 430 MeV/u.

4. まとめ

放医研 HIMAC では超伝導回転ガントリーを用いた重粒子線治療の実現に向けてコミッションングを進めている。ガントリーを有する治療室では 3 次元スキャニング照射が適用されることから精密なスポットサイズコントロールが要求される。回転ガントリーでは、その回転によりスポット形状に変形を生じさせないために、回転部入口において水平・垂直方向の Twiss パラメータおよびエミッタンスを一致させる必要がある。そこでエミッタンス整合 (ϵ_x

$=\epsilon_y$) を実現するために散乱体を利用した方法を採用し、トラッキング計算による確認を行った後、ビーム試験をガントリーコースで行った。その結果、ガントリー回転角度に依らずスキャニング照射に利用可能な丸いスポットが得られることを確認することができた。

今後スキャニング照射の実現に向けて、より細かいガントリー角度でスポット調整、確認を行っていく予定である。

参考文献

- [1] <http://www.nirs.go.jp/rd/cpt/index.html>
- [2] T. Furukawa *et al.*, Med. Phys. 34, 2007, pp. 1085-1097.
- [3] Y. Iwata *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. B 317, 2013, p. 793.
- [4] S. Matsuba *et al.*, 炭素線治療用超電導回転ガントリーのビームコミッションング, in this proceedings.
- [5] Y. Iwata *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. , 24, 2004, 4400505.
- [6] T. Furukawa *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A 565, 2006, pp. 430-438.
- [7] A. Maier, CERN/PS 98-061 (DI).