

薄い散乱体を用いた水平・垂直エミッタンスの整合

MATCHING OF HORIZONTAL AND VERTICAL EMITTANCES USING A THIN SCATTERER

岩田佳之^{#,A)}, 藤本哲也^{B)}, 水島康太^{A)}, 原洋介^{A)}, 佐藤眞二^{A)}, 鈴木伸司^{A)},
古川卓司^{A)}, 白井敏之^{A)}, 野田耕司^{A)}

Yoshiyuki Iwata^{#,A)}, Tetsuya Fujimoto^{B)}, Kota Mizushima^{A)}, Yosuke Hara^{A)}, Shinji Sato^{A)}, Shinji Suzuki^{A)},
Takuji Furukawa^{A)}, Toshiyuki Shirai^{A)}, Koji Noda^{A)}

^{A)} Department of Accelerator and Medical Physics, National Institute of Radiological Sciences (NIRS)

^{B)} Accelerator Engineering Corporation (AEC)

Abstract

An isocentric superconducting rotating-gantry for heavy-ion therapy is being developed at NIRS. This rotating gantry can transport heavy ions having 430 MeV/u to an isocenter with irradiation angles of over ± 180 degrees, and is further capable of performing fast raster-scanning irradiation. In the treatment using the rotating gantry, it is important to obtain a circular beam spot at the isocenter independent of the gantry angle. To accomplish this, we initially determined phase-space distributions of extracted beams from the HIMAC synchrotron ring, and further, matching of horizontal and vertical emittances using a thin scatterer was performed. We report results of the phase-space measurements as well as the emittance matching.

1. はじめに

重粒子線がん治療の更なる高精度化のため、我々は超伝導回転ガントリーの開発を進めている[1]。この回転ガントリーはアイソセントリック型であり、患者が位置するアイソセンターに対し、核子あたり430 MeVの炭素ビームを0度から360度の何れの方向からでも照射可能である。ガントリーではビームラインが回転することから、回転角度に依らずアイソセンターにおいて円形のビームスポットを形成するため、シンクロトロンから得られるビームの水平・垂直ビームエミッタンスを整合する必要がある。このため、我々は薄い散乱体を用いてエミッタンス整合を行うことを計画している[2,3]。

放医研では治療高度化のためシンクロトロン1回転周期中に201種類の異なるエネルギーを持つビームを連続的に取り出す可変エネルギー運転法が開発され、今後、ガントリーでの実用化に向け試験が続けられている[4]。全エネルギー種のビームに対してエミッタンス整合を行うため、我々は先ずシンクロトロンから取り出される各ビームに対し、取り出しビーム位相空間分布の推定を行った。更に推定された位相空間分布に基づき、エミッタンス増大を最小限に抑えつつエミッタンス整合を実現するためのビーム光学設計及び、散乱体厚の最適化を行った。本稿では位相空間分布の推定及び、エミッタンス整合の試験結果について報告する。

2. 取り出しビーム位相空間分布の推定

可変エネルギー運転では201種類の短いフラットトップ領域を有するシンクロトロン運転パターンが

用いられる。各フラットトップは必要に応じて任意に時間幅が延長され、その間、RFKO法による遅い取り出しが行われる[5]。可変エネルギー運転法では、エネルギー変更のためにシンクロトロン運転パターンを切り替える必要が無いため、取り出しビームのエネルギーを高速に変更することが可能となる。

より正確なエミッタンス整合を実現するためにはシンクロトロンから取り出されるビームの位相空間分布を知る必要がある。一方、シンクロトロンから取り出されるビームの水平位相空間分布は一般にガウス形状を有さない。位相空間分布を求める手段としてはQスキャン法などが知られるが、ここでは水平位相空間分布を以下の様にモデル化し推定した。

HIMACシンクロトロン取り出しチャンネルに設置されている静電ディフレクタ1(ESD1)入り口における位相空間分布はFig. 1のような分布形状を有すると仮定する。このモデルでは初めに粒子の水平位置を $-w_x \leq X \leq w_x$ の範囲でそれぞれ確率1から f_x (< 1)として生成し、更にその位置から幅Dのガウス確率分布を持たせ、粒子の水平位置を決定する。

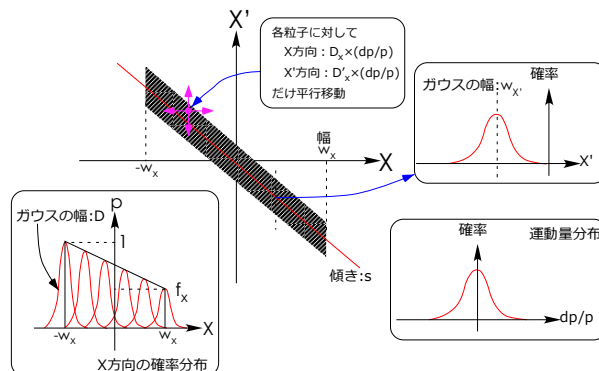


Figure 1: Horizontal phase-space model.

[#] y_iwata@nirs.go.jp

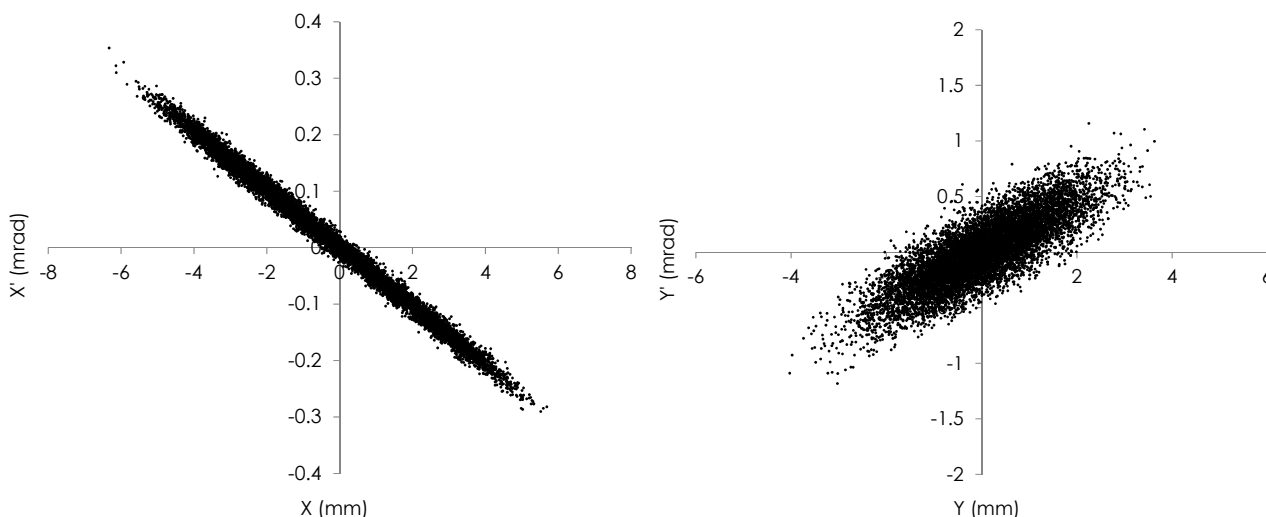


Figure 2: Phase-space distributions at the entrance of the electrostatic deflector, ESD1, as obtained by the optimization calculations for the beam energy of $E=430$ MeV/u. The calculated 2σ horizontal and vertical emittances are $\epsilon_x=0.0987$ $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ and $\epsilon_y=0.775$ $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$, respectively.

次に X' 方向の位置は、先に決めた X と図中の傾き s の直線との交点を中心として、 X' 方向に幅 $w_{x'}$ のガウス確率分布を持たせ、粒子の X' を決定する。更に水平ディスページョンの測定値 (D_x 及び $D_{x'}$) を用いて、その効果を含めた。また、粒子の運動量分布は HIMAC シンクロトン取り出しシミュレーションの結果を用いて、各粒子に運動量広がりを持たせた。以上、合計 5 パラメータ ($w_x, f_x, D, s, w_{x'}$) により水平位相空間分布をモデル化する。一方、垂直位相空間分布は 2 次元ガウス分布を仮定し、ツイスパラメータ ($\beta_y, \alpha_y, \epsilon_y$) を用いて記述する。以上、合計 8 パラメータが決定されると ESD1 入り口における位相空間上の粒子分布を生成することが出来る。各パラメータの決定は以下の手順で行った。まず、

各パラメータを適当に決めると、乱数を用いて ESD1 入り口における位相空間上の粒子分布を生成することが出来る。次に、この位相空間分布からマトリクス計算法を用いて 1 粒子毎にトラッキング計算を行い、シンクロトンリングから各治療室へ至る途中に設置されている合計 24 台の各ビームプロファイルモニタ位置での 2 次元ビームプロファイルを計算する。計算されたビームプロファイルと測定されたプロファイルの差を定量的に評価するため、2 次元プロファイル差分を表現するカイ二乗を定義する。全プロファイルに対してカイ二乗を合算し、合計カイ二乗が最小となるよう、多次元シンプレックス法を用いて 8 パラメータの最適化を行った。

以上の最適化計算結果の一例として、ビームエネルギーが 430 MeV における ESD1 入り口におけるビーム位相空間分布を Fig. 2 に示す。また、計算結果の正しさを検証するため、代表的な 2 台のプロファイルモニタにおける測定プロファイルと計算プ

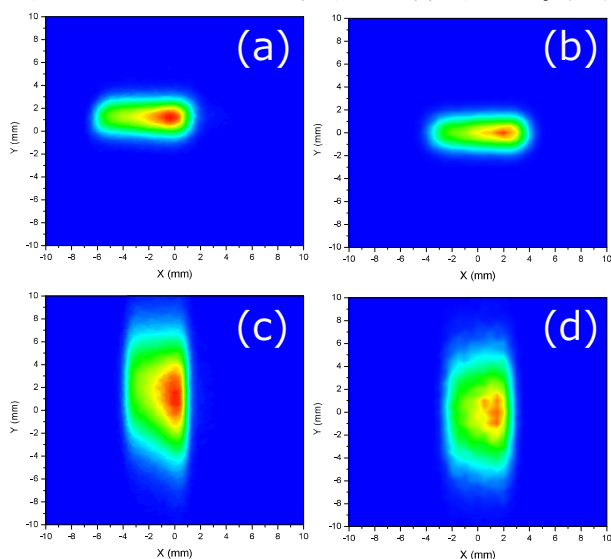


Figure 3: (a) Measured and (b) calculated 2D beam profiles, measured with the profile monitor, SCN211. Similarly, (c) measured and (d) calculated 2D beam profiles, measured with the profile monitor, SCN214.

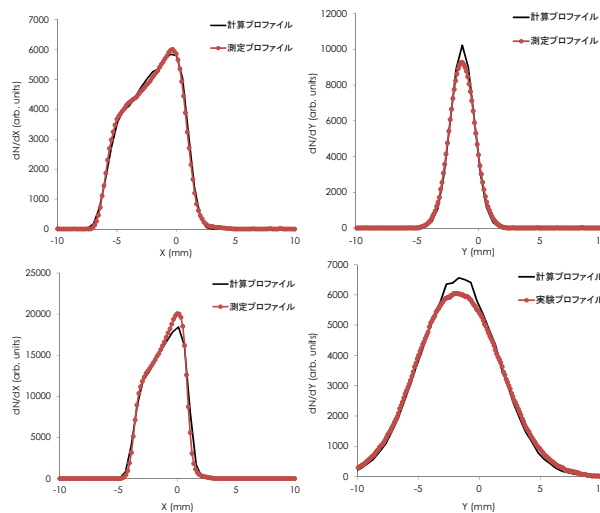


Figure 4: Projected beam profiles for the profile monitors, SCN211 (upper) and SCN214 (lower).

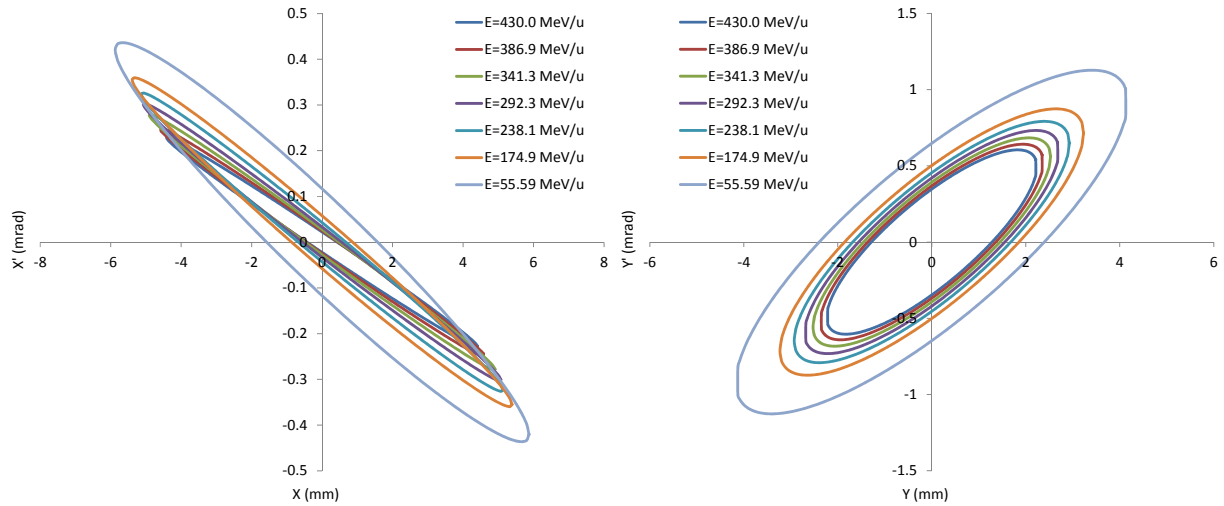


Figure 5: Phase-space distributions at the entrance of ESD1 for the representative beams having seven energies. The ellipses for the respective beam energy were obtained by fitting the calculated particle distributions in phase space.

ロファイルの比較を Fig. 3 に示した。図中、各モニタに関して、左が測定プロファイルで右が計算プロファイルである。分布形状を含め、計算は実測プロファイルを良く再現していることが判る。より詳細な分布比較のため、2次元プロファイルを水平及び垂直軸へ射影した1次元プロファイルを Fig. 4 に示す。射影プロファイルに関しても、計算は実測を良く再現している。

可変エネルギー運転法を用いた治療ビーム供給で用いられる 201 種類のビームエネルギー (E=430~56 MeV/u) のうち、上記測定及び解析を 26 種類のビームエネルギーに対して行った。そのうち代表的なエネルギーに対して ESD1 入り口における位相空間分布を 2 σ 楕円フィットし、得られた結果を Fig. 5 にプロットした。水平成分は傾きが変化し、また垂直成分では断熱的にエミッタンスが大きくなっている様子が見える。得られた 2 σ エミッタンス値は、ビームエネルギーE=430~56 MeV/u に対して、水平で $\varepsilon_x=0.0987\sim 0.687 \pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 、垂直で $\varepsilon_y=0.775\sim 2.70 \pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ であった。

3. エミッタンス整合

カプトン膜などからなる薄い散乱体をビームライン上に設置し、その散乱を利用して水平・垂直エミッタンスの整合を行う。エミッタンス増大が最小となるような散乱体厚及び、散乱体位置でのツイスパラメータは以下の様に求める。

ビームが十分薄い散乱体を通る際、散乱体前後におけるツイスパラメータの関係は文献[2]より

$$\varepsilon_2\gamma_2 = \varepsilon_1\gamma_1 + \pi\theta_0$$

$$\varepsilon_2\beta_2 = \varepsilon_1\beta_1$$

$$\varepsilon_2\alpha_2 = \varepsilon_1\alpha_1$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 \sqrt{1 + \pi \frac{\beta_1 \theta_0^2}{\varepsilon_1}}$$

ここで α, β, γ はツイスパラメータ、 ε はエミッタンス、 θ_0 は散乱角である。添字 1, 2 は散乱体前後を示す。水平および垂直について書くと

$$\varepsilon_{2x} = \varepsilon_{1x} \sqrt{1 + \pi \frac{\beta_{1x} \theta_0^2}{\varepsilon_{1x}}} = n_x \varepsilon_{1x}$$

$$\varepsilon_{2y} = \varepsilon_{1y} \sqrt{1 + \pi \frac{\beta_{1y} \theta_0^2}{\varepsilon_{1y}}} = n_y \varepsilon_{1y}$$

水平、垂直エミッタンスが整合するためには

$$\varepsilon_{2x} = \varepsilon_{2y} = n_x \varepsilon_{1x} = n_y \varepsilon_{1y} = \varepsilon$$

を満たす必要がある。ここで $\varepsilon_{1x} = \varepsilon_0$ 、 $\varepsilon_{1y} = k\varepsilon_0$ ($k>1$) とおくと

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sqrt{1 + \pi \frac{\beta_{1x} \theta_0^2}{\varepsilon_0}}$$

$$\varepsilon = k\varepsilon_0 \sqrt{1 + \pi \frac{\beta_{1y} \theta_0^2}{k\varepsilon_0}}$$

と書き換えられる。上式から

$$\varepsilon_0 \sqrt{1 + \pi \frac{\beta_{1x} \theta_0^2}{\varepsilon_0}} = k\varepsilon_0 \sqrt{1 + \pi \frac{\beta_{1y} \theta_0^2}{k\varepsilon_0}}$$

$$1 + \pi \frac{\beta_{1x} \theta_0^2}{\varepsilon_0} = k^2 \left(1 + \pi \frac{\beta_{1y} \theta_0^2}{k\varepsilon_0} \right)$$

$$\beta_{1x} - k\beta_{1y} = \frac{\varepsilon_0 (k^2 - 1)}{\pi \theta_0^2}$$

を得る。ここで $\theta_0 \neq 0$ の条件を用いた。この式から、散乱角(散乱体厚)を最小限にするためには $\beta_{1x} - k\beta_{1y}$ を大きくとる、つまり $\beta_{1x} \gg \beta_{1y}$ を選べば良いことがわかる。また、散乱体通過後のエミッタンスを最小にするためには

$$n_x = \sqrt{1 + \pi \frac{\beta_{1x} \theta_0^2}{\epsilon_{1x}}}$$

を最小に取ればよい。つまり

$$\pi \beta_{1x} \theta_0^2 \approx \frac{\beta_{1x}}{\beta_{1x} - k \beta_{1y}}$$

を最小にすればよい。簡単のため逆数を考えると

$$\frac{1}{\pi \beta_{1x} \theta_0^2} \approx \frac{\beta_{1x} - k \beta_{1y}}{\beta_{1x}} = 1 - k \frac{\beta_{1y}}{\beta_{1x}}$$

を最大にすればよいので、最終的には β_{1y} / β_{1x} を最小にすればよい。

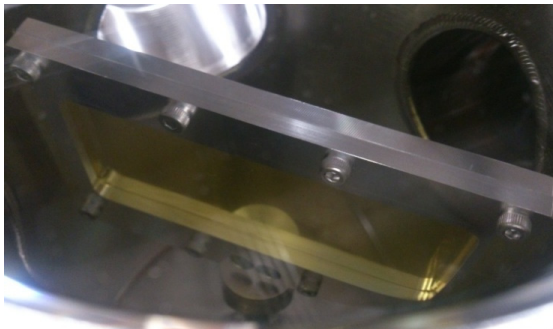


Figure 6: Rotatable foil holder, as installed in the beam line. Kapton foil having thickness of 15 μm was attached.

回転角が遠隔操作できるフォイルホルダをビームライン上に設置し (Fig. 6 参照)、そのホルダにカプトン膜を取り付ける。ホルダを回転させることで、散乱体の実効厚を変化させる。前述の計算式より、各エネルギーにおいてエミッタンス整合し、且つエミッタンス増大が最小となるような散乱体の設定角度を求める。ここで散乱体の回転のみにより全エネルギー範囲に渡り最適な散乱体実効厚が得られるよう、15 μm 厚のカプトン膜を選んだ。結果、元々、水平エミッタンスより値が大きい垂直エミッタンスと比較し、整合後のエミッタンス増加率は概ね 3~5%程度に抑えることができ、また最低エネルギー側においても 7%程度となる見込みである。

薄い散乱体によるエミッタンス整合を検証するため、ビーム試験を実施した。Fig. 7 は散乱体通過後、エミッタンス整合されたビームをプロファイルモニタ (SCN253) 上で円形のビームスポットを生成した結果である。上段より 1σ ビームサイズを水平・垂直共に 1.0 mm、1.5 mm、2.0 mm に設定したオプティクスとしている。本試験からビームスポットは水平・垂直共にほぼガウス分布を有し、且つエミッタンス整合が正しく行われていることが確認できる。

4. まとめ

シンクロトロン取り出しビームの位相空間分布を推定し、薄い散乱体を用いて垂直・水平エミッタンスの整合を行った。今後、今年度中に整備される超伝導回転ガントリービームラインにおいて本エミッタンス整合法を適用する予定である。

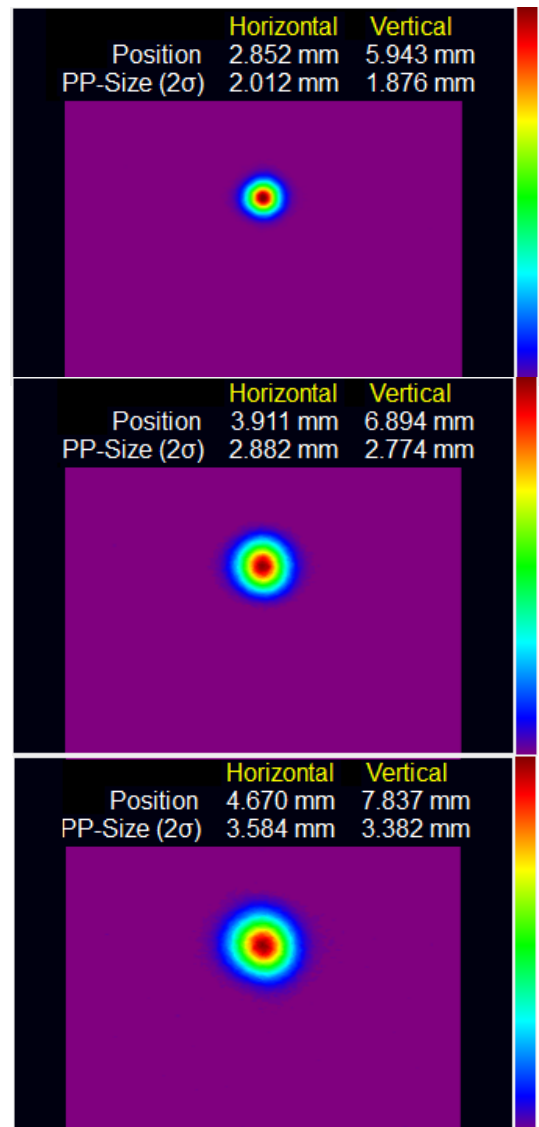


Figure 7: 2D beam profiles after the emittance matching, as measured with the profile monitor, SCN253. Beam optics was tuned so as to obtain 1σ beam size of 1.0 mm (upper), 1.5 mm (middle), and 2.0 mm (lower). A beam energy is $E=430$ MeV/u.

参考文献

- [1] Y. Iwata et. al., "Design of a superconducting rotating gantry for heavy-ion therapy", Phys. Rev. ST Accel. Beams 15 (2012) 044701.
- [2] Andrew Maier, "THICK SCATTERERS SEEN THROUGH THE TWISS FUNCTIONS", CERN/PS 89-061 (DI).
- [3] T. Furukawa and K. Noda, "Compensation of the asymmetric phase-space distribution for a slowly extracted beam from a synchrotron", Nuclear Instrum. and Meth. In Phys. Res. A565 (2006) 430-438.
- [4] K. Mizushima, et al., "Experimental studies of systematic multiple-energy operation at HIMAC synchrotron", Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. B 331 (2014) 243-247.
- [5] M. Tomizawa, et al., "Slow beam extraction at TARN II", Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. A326 (1993) 399-406.