

# RF 周波数スイープ法による遅い取り出しビームのエネルギー変動補正 ENERGY COMPENSATION OF THE SLOW EXTRACTED BEAM BY RF SWEEPING METHOD

藤本哲也<sup>#, A)</sup>, 山田聡<sup>A)</sup>, 金井達明<sup>A)</sup>, 想田光<sup>A)</sup>, 野田耕司<sup>B)</sup>

Tetsuya Fujimoto<sup>#, A)</sup>, Satoru Yamada<sup>A)</sup>, Tatsuaki Kanai<sup>A)</sup>, Hikaru Souda<sup>A)</sup>, Koji Noda<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Gunma University

<sup>B)</sup> National Institute of Radiological Sciences

## Abstract

Energy compensation of the slow extracted beam is being strongly required to realize the scanning irradiation with heavy ion at Gunma University. An extracted beam energy of Gunma's facility is a little shifting during extraction period, because RF frequency for beam acceleration is increased to excite 3<sup>rd</sup> order resonance. Amount of energy shift is around 4 MeV/n in accelerated energy of 400 MeV/n. This energy shift makes a range error of 2 mm in water. It is large to utilize for scanning irradiation, because small SOBP (Spread Out Bragg Peak) is required for scanning irradiation. In order to compensate this energy shift, we contrived to use the energy absorber. This principle is to utilize the energy loss that is occurred when the high energy particles pass in the scatter materials. Amount of the energy loss is controlled by rotating the absorber to change absorber thickness. As the experiment results, we succeeded to obtain constant beam energy.

## 1. はじめに

群馬大学重粒子線医学センターには普及型炭素線治療装置が設置され、平成 22 年から最大 400MeV/u のカーボンビームを使った治療照射を開始し、順調に治療人数を増やしている[1]。群馬大学では現在ワブラー電磁石を使った拡大照射法、積層原体照射法により治療照射を行うとともに、ペンシルビームを用いた 3 次元スキニング法による治療照射を目指した R&D が進められている。

本施設ではシンクロトロンから 3 次共鳴を利用した遅い取り出し法により約 1 秒かけてビームを取り出している。リング動作点は  $(Q_x, Q_y) = (1.68, 1.23)$  に設定され、4 台の共鳴用六極電磁石を使ってセパトリクスを形成している。ここで 3 次共鳴現象を引き起こすために有限のクロマチシティーのもとで RF 周波数を変化させる方法を採用している。この電場を利用した取り出し方法ではシンクロトロンからのビームオンオフを高速で行うことが可能となることから精密な線量の制御や呼吸同期照射が可能になり医学利用において優位な方法と言える。一方、シンクロトロンの加速周波数を変化させることからビームにエネルギー変動が生じる、すなわち水中飛程に時間変化を生じさせる。このエネルギー変動幅は現状のワブラー電磁石を使った拡大照射法に対して問題とされないレベルに抑えられている。しかしスキニング照射法では狭い SOBP を形成する必要があることから現状のエネルギー変動幅は大きな問題となる。RF 周波数パターンからエネルギー変動幅に換算するとビームエネルギー 400MeV/n に対して 2.68MeV/n 程度あり、これを電場で補正することは難しいことからエネルギーアブソーバーを使って

補正することを考案した。これはビームがある物質を通過した時に生じるエネルギーロスを利用したものである。連続的に変化するエネルギー変化に対してアブソーバーの回転角度を変化させることでエネルギーロス量をコントロールし一定のエネルギーを得ることを考えた。

## 2. エネルギー変動補正の原理

シンクロトロン RF 周波数のビーム取り出しパターンから取り出しビームエネルギー変動幅を求めると 400MeV/n から 402.68MeV/n 変化している。この間は RF 周波数パターンに沿ってエネルギーが変化するので、エネルギーに合わせてアブソーバーを回転させることでビームから見たアブソーバー厚を変化させることにする。

アブソーバーに散乱体にアルミ板を使用したとして、402.68MeV/n から 400MeV/n までエネルギーを落とすのに必要なアルミ板厚は Bethe-Bloch の式から求めることができ  $\Delta t = 1.38\text{mm}$  となる。アブソーバーにアルミ板を使用し、その回転角度上限を  $65^\circ$  とすればアブソーバー厚は 1mm となる。すなわち 400MeV/n の時は回転角  $0^\circ$ 、402.68MeV/n で回転角  $65^\circ$  にすることでビームから見た厚さを 2.38mm にする。これによりアブソーバー通過後のビームエネルギーは 398MeV/n で一定になる。このように 2MeV/n 程エネルギーが下がるが、2MeV/n 程度であればシンクロトロン BM 磁場で 0.4%程度なので群馬大学施設ではシンクロトロンでの調整が可能である。

Table.1 はエネルギー補正に必要なアブソーバー厚をエネルギー毎に計算した結果である。

<sup>#</sup> t.fujimoto@aec-beam.co.jp

Table 1: Calculated Absorber Thickness

		400MeV/n		290MeV/n		140MeV/n	
		start	end	start	end	start	end
Beam energy	[MeV/n]	400	402.68	290	292.02	140	141.05
Scatter thickness	[mm]	1.155	2.523	1.155	2.031	1.015	1.295
Scatter rotation angle	[degree]	30.00	66.64	30.00	60.50	10.00	39.46
Energy after scattering	[MeV/n]	397.8	←	287.2	←	134.7	←

アブソーバーを回転させる方法では連続的にエネルギー補正が可能だけでなく、アルミ板の回転角度幅を調整することで様々なエネルギーに対応可能であるメリットがある。これは装置の小型化に寄与する。

本エネルギーアブソーバーをスキヤニング照射に利用する場合、エネルギー変動を抑えるだけでなく Emittance growth を出来るだけ小さくする、また照射中のビームサイズ変動がないことが重要となる。これらの条件を満たせるようにアブソーバーの最適な位置、および高エネルギービーム輸送ラインのオプティクスを検討を行った。

非常に薄いアブソーバーであると仮定するとアブソーバー通過前後のエミッタンスは(1)式で表わすことができる。

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 \sqrt{1 + \frac{\beta_1 \theta_0^2}{\varepsilon_1}} \quad (1)$$

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  $\theta_0$  は散乱角であり、Highland の式から求めることができる。[2]この関係式からアブソーバー位置での  $\beta$  関数を小さくすれば Emittance growth を小さくすることができることが分かる。

次にアイソセンターのビームサイズについて検討する。本装置では連続的に変化するビームエネルギーを補正するためにアブソーバー厚を連続的に変化させるため散乱角が時間とともに変化する。即ちエミッタンスが時間とともに変化するようになる。

アブソーバーとアイソセンター間の輸送行列について Twiss パラメータを使ってあらわすと各要素は(2)式で表わされる。

$$\begin{aligned} m_{11} &= \sqrt{\frac{\beta_{e0}}{\beta_{s0}}} (\cos \psi + \alpha_s \sin \psi) \\ m_{12} &= \sqrt{\beta_{s0} \beta_{e0}} (\sin \psi) \\ m_{21} &= -\sqrt{\frac{1}{\beta_{s0} \beta_{e0}}} ((\alpha_e - \alpha_s) \cos \psi + (1 + \alpha_e \alpha_s) \sin \psi) \\ m_{22} &= \sqrt{\frac{\beta_{s0}}{\beta_{e0}}} (\cos \psi - \alpha_e \sin \psi) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで添え字 s0 はアブソーバー位置、e0 はアイソセンターにおける初期 Twiss パラメータ(アブソー

バー角度  $0^\circ$  時に決めた Twiss パラメータ)を示している。 $\psi$  はベータatron振動の phase advance であるが、これを  $n\pi$  ( $n$ : Integer)、またアブソーバーおよびアイソセンターでの  $\alpha=0$  になるようにオプティクスを作ることができると(2)式は、

$$\begin{aligned} m_{11} &= \sqrt{\frac{\beta_{e0}}{\beta_{s0}}} \\ m_{12} &= 0 \\ m_{21} &= 0 \\ m_{22} &= \sqrt{\frac{\beta_{s0}}{\beta_{e0}}} \end{aligned} \quad (3)$$

となる。ここで Twiss パラメータの変換則式にあてはめて  $\beta$  について求めると

$$\beta_e = (m_{11}^2 \times \beta_s) \quad (4)$$

すなわち  $\beta_e$  と  $\beta_s$  は初期 Twiss パラメータと同じ比になる。非常に薄いアブソーバーであるとするアブソーバー前後のビームサイズは同じとすることができるので、

$$\beta_1 \times \varepsilon_1 = \varepsilon_2 \times \beta_s = \frac{1}{m_{11}^2} \times \varepsilon_2 \times \beta_e \quad (5)$$

となる。すなわちアブソーバー直前のビームサイズが変化しない限りアイソセンターのビームサイズが一定に保たれることが分かる。

Figure 1 は上記条件を満たすように検討したオプティクスであり、図中に示した位置にアブソーバーを配置することで、

$$\begin{aligned} (\beta_x, \beta_y) &= (1.62\text{m}, 0.758\text{m}) \\ (\alpha_x, \alpha_y) &= (0, 0) \\ (\mu_x, \mu_y) &= (2\pi, 6\pi) \end{aligned}$$

が実現できている。

Table 2 は 400MeV/n、290MeV/n、140MeV/n について 1 秒間のビーム取り出し区間の最初と最後のビームパラメータを計算した結果である。全エネルギーについて Figure 1 のオプティクスを使用しているがアイソセンターでのビームサイズが変化しない結果が得られている。

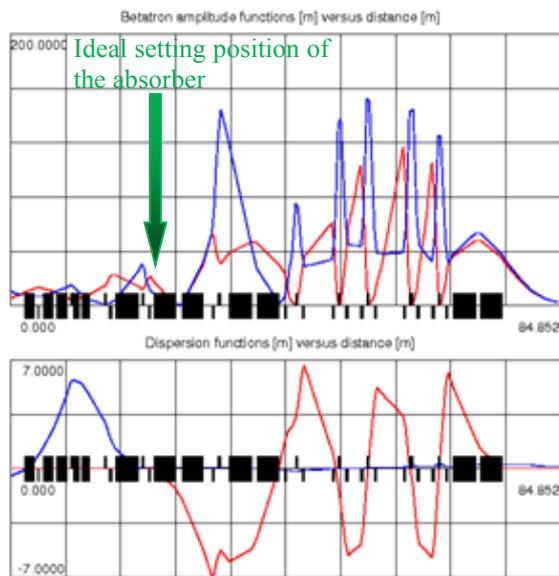


Figure 1: Optimized beta function (upper) and dispersion function (lower) for a utilization of the energy absorber.

Table 2: Calculated Beam Parameters at Start and End of the Extraction Period

400MeV/n		ext.-start	ext.-end
T from synchrotron	[MeV/n]	400	402.68
T after scatter	[MeV/n]	398	398
Scatter thickness	[mm]	1	2.38
Horizontal $1\sigma$ -emittance	[ $\mu\text{mm}\cdot\text{mrad}$ ]	0.602	0.920
Vertical $1\sigma$ -emittance	[ $\mu\text{mm}\cdot\text{mrad}$ ]	0.729	0.992
$\beta_x$ at iso-center	[m]	3.64	2.40
$\beta_y$ at iso-center	[m]	3.36	2.47
x-size at iso-center	$\pm$ [mm]	3.0	3.0
y-size at iso-center	$\pm$ [mm]	3.1	3.1
Energy spread	[%]	0.101	0.102
290MeV/n		ext.-start	ext.-end
T from synchrotron	[MeV/n]	290	292.02
T after scatter	[MeV/n]	287.7	287.7
Scatter thickness	[mm]	1	1.879
Horizontal $1\sigma$ -emittance	[ $\mu\text{mm}\cdot\text{mrad}$ ]	0.770	1.061
Vertical $1\sigma$ -emittance	[ $\mu\text{mm}\cdot\text{mrad}$ ]	0.978	1.247
$\beta_x$ at iso-center	[m]	2.86	2.09
$\beta_y$ at iso-center	[m]	3.00	2.36
x-size at iso-center	$\pm$ [mm]	3.0	3.0
y-size at iso-center	$\pm$ [mm]	3.4	3.4
140MeV/n		ext.-start	ext.-end
T from synchrotron	[MeV/n]	140	141.05
T after scatter	[MeV/n]	136.3	136.3
Scatter thickness	[mm]	1	1.276
Horizontal $1\sigma$ -emittance	[ $\mu\text{mm}\cdot\text{mrad}$ ]	1.445	1.646
Vertical $1\sigma$ -emittance	[ $\mu\text{mm}\cdot\text{mrad}$ ]	2.055	2.295
$\beta_x$ at iso-center	[m]	1.55	1.38
$\beta_y$ at iso-center	[m]	2.15	1.93
x-size at iso-center	$\pm$ [mm]	3.0	3.0
y-size at iso-center	$\pm$ [mm]	4.2	4.2

### 3. エネルギー変動補正実験

実験はまずエネルギー変動補正が計算通り可能か確認するためにアイソセンター上流にアブソーバーを配置して行った。Table 3 に実験条件を示す。

Table 3: Experimental Conditions

Beam energy	290MeV/n
Absorber	Aluminum of 1mm thickness
Rotation angle	30-60.5 degree

エネルギー変動およびその補正の確認のためにアイソセンターでブラッグピークを測定することとした。Figure 2 はブラッグピークの測定結果である。ここではエネルギー変動および補正を確認するために 1 秒間の取り出し区間の最初、中間、最後の 100ms について測定を行っている。

アブソーバーを使用しない場合はブラッグピークの位置が時間とともにシフトするのが分かるが、アブソーバーを使用することで一定のブラッグピーク位置が実現できている。これは計算通りエネルギー変動を抑制できていることを示している。またレンジからエネルギーロス量も計算できるがこれについても計算通りの結果が得られている。

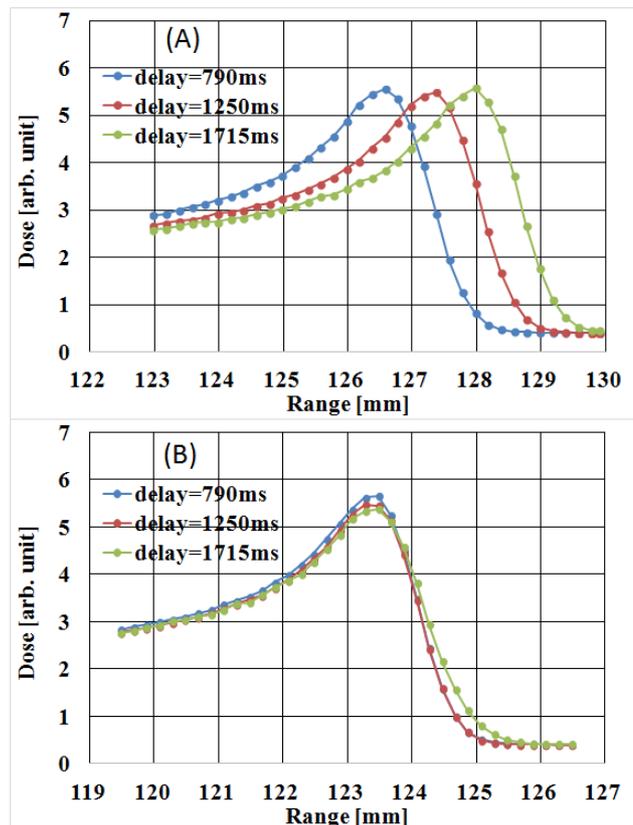


Figure 2: Bragg peak with shifting the measurement timing. (a) is the result by ordinary beam and (b) is the result by applying energy absorber.

#### 4. まとめ

群馬大学重粒子線医学センターでは 3 次元スキヤニング照射を目指した R&D が行われているが、取り出しビームのエネルギーシフトが原因で 2 次元までの試験しかできていなかった。このエネルギーシフトを抑制するためにエネルギーアブソーバーを使用した研究に取り組んできた。スキヤニング照射でこのアブソーバーを使用するためにはエネルギー変動を抑制するだけでなく

- (1) エミッタンスの広がりを抑えてアイソセンターにおける小さいスポットサイズを実現する。
- (2) アイソセンタースポットサイズが照射中変化しないようにする。

ことも重要である。これらについては高エネルギービーム輸送ラインのオブティクスを以下の条件で作成することで解消出来ることを計算により確認することができた。

- (1) アブソーバーとアイソセンター間のベータトロロン振動の位相( $\mu_{x,y}$ )を  $n \times \pi$  の関係にする。
- (2) アブソーバー位置の  $\beta$  関数を出来るだけ小さくする。
- (3) アブソーバーおよびアイソセンターの  $\alpha$  を 0 にする。

今回の実験によりエネルギー変動の抑制が可能なことを確認できたが、アイソセンタースポットサイズを出来るだけ小さく絞れるように出来るようにエミッタンスグロスを更に改善することが今後の課題である。

#### 参考文献

- [1] H.Souda, et al., in this proceedings, FSP003
- [2] V. L. Highland, Nucl. Instr. Meth. 129 (1975) 497-499