

横方向電場を組み合わせた遅い取り出しビーム運動量変化の低減

REDUCTION OF MOMENTUM VARIATION OF A SLOW EXTRACTED BEAM COMBINING WITH TRANSVERSE RF FIELD

藤本哲也^{#,A),B)}, 山田聡^{A)}, 金井達明^{A)}, 想田光^{A)}, 田久保篤^{B)}, 野田耕司^{C)}

Tetsuya Fujimoto^{#,A),B)}, Satoru Yamada^{A)}, Tatsuaki Kanai^{A)}, Hikaru Souda^{A)}, Atsushi Takubo^{B)}, Koji Noda^{C)}

^{A)} Gunma University Heavy Ion Medical Center

^{B)} Accelerator Engineering Corporation

^{C)} National Institute of Radiological Sciences

Abstract

High energy heavy ions for medical use are extracted by slow extraction method with sweeping an acceleration frequency at Gunma University Heavy Ion Medical Center. This method can terminate the extracted beams rapidly, although extracted beam's energy and extraction angle vary with time. In order to obtain higher beam qualities for scanning irradiation, which is under developing in the experimental irradiation room, we are investigating to apply transverse RF field supplementary before extraction process. Because there exists the spread in the horizontal tunes of the circulating beam almost 30 % reduction of the time variation of the extracted beam energy was obtained in our simulation. Further improvement of the energy variation will be performed with rotating scatter located in the high energy beam transport line.

1. はじめに

群馬大学重粒子線医学センターでは平成 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ている[1]。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 台の共鳴六極電磁石により 3 次共鳴を励起している。この共鳴現象により形成されるセパトリクスを狭めていくことでビームの取り出しを行うが、その方法として有限のクロマテシティー (ξ_x) のもとシンクロトロンの RF 周波数を変化させる方法を採用している。この方法では RF 電場の変化を利用しているため、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である。これにより精密な線量の制御や呼吸同期照射が可能になるため医学利用において非常に優位な方法と言える。

一方、シンクロトロンの RF 周波数を変化させることから取り出しビームのエネルギーおよび出射角度が時間とともに変化し、これらは照射点における位置変動、レンジ変動の原因となる。これらの変動量は現状のワブラー電磁石を使った拡大照射法や積層原体照射法においては問題とならないレベルであるが、現在群馬大学重粒子線医学センターで取り組んでいるペンシルビームを用いたスキャニング照射においてはこれらの変動は大きな問題となる。そこで遅い取り出しビームの位置およびエネルギー変動を低減する研究に取り組んでいる。

ここではビーム取り出しのための RF 周波数掃引幅を低減するために、シンクロトロン内で周回するビームに対して横方向に Q_x の小数部分(ΔQ)×周回周

波数(frev)となる周波数の電場を印加し、位相空間上でホーロー状分布を形成してから、RF 周波数掃引による取り出しを行うことを検討している。その他 HEBT において散乱体を利用したビームエネルギー補償装置についての検討も行っている。

2. 横方向電場による RF 周波数掃引幅の低減

シンクロトロンを周回するビームに対して横方向に $\Delta Q \times \text{frev}$ となる周波数の RF 電場を印加するとビームの振幅は共鳴的に増大していく。すなわち RFKO の原理でありチューンの測定に利用される。ここでは図 1 に示したように共鳴六極電磁石を励磁した時に形成されるセパトリクス内のチューンの違いを利用して、リング中心付近の粒子のみ振幅を増大させる検討を行った。

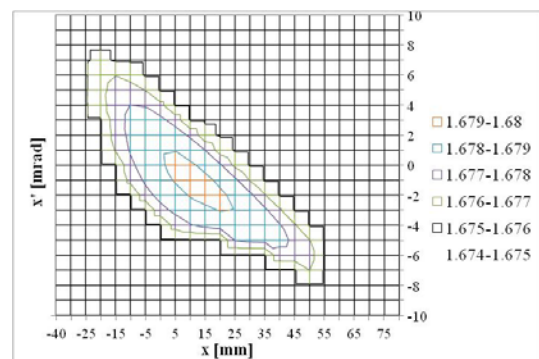


Figure 1: Horizontal tune deviation in the separatrix.

t.fujimoto@aec-beam.co.jp

取り出し時の RF 周波数掃引幅を出来るだけ低減するためには出来るだけ大きなホロー分布を形成することが望ましい。そのため、

- (1) 共鳴六極電磁石の励磁量を通常の取り出し時から半分程度にしてセパトリクスサイズを広げる。
- (2) 印加する FM の deviation を小さく与え、セパトリクス中心付近の粒子に対して大きい摂動を与える。
- (3) 振幅が増大するとチューンが変化し、RF field との位相差が生じてくることからそのうち振幅が収束に転じる。その前にホロー分布を形成するようになるべく高い電圧を短時間で与える。

以上を考慮しながら横方向電場のパラメータを最適化した。シミュレーションの結果、図 2 のようにホロー分布が形成できることを確認することができた。またこの状態でビーム取り出しシミュレーションを行うと取り出しビームのエネルギー変動を 30% 程度低減できていたことが確認できた。

Table1: Transverse RF conditions for obtaining hollow distribution in the separatrix

Frequency	center	1089790	Hz
	Deviation	500	Hz
	Repetition	168	Hz
Voltage		3000	V0-p
RF supplied time		2	ms

3. 散乱体を利用したエネルギー補正

横方向電場を利用した取り出しにより RF 周波数掃引幅を減らせても、取り出しビームの 1MeV/n 以上のエネルギー変動は残る。このエネルギー変動を電場で補正することは難しく、ここでは散乱体を通じた時のエネルギーロスを利用して補正することを検討している。

ビームエネルギーは 1 秒間の取り出し中連続的に変化している。これに対応するため、散乱体を回転させることによりビームから見た散乱体厚を連続的に変化させ、エネルギーロスをコントロールする方法を考えている。図 3 は回転散乱体の原理を示している。取り出しビームのエネルギー増加に合わせて散乱体を回転させる、すなわちエネルギーロスを増やすことで取り出し区間中のビームエネルギーを一定にすることが可能になると考えられる。まず最大エネルギーである 400MeV/u で計算を行った。

取り出し区間の RF 周波数掃引幅 $\Delta f=3.9\text{kHz}$ 、フェーズスリップファクター $\eta=-0.146$ より $\Delta T=2.68\text{MeV/n}$ が得られるため、このエネルギー変動幅が補正できるか計算を行ったところ、散乱体厚 1.38mm、最大回転角度 60° という結果が得られ、1 枚の散乱体で取り出し区間のエネルギー変動を補正できる結果が得られた。

ビームをスキヤニング照射で利用する場合、エネルギーが一定であることと同様に照射点において数 mm 程度のスポットを形成できるということ、またスポットのサイズが時間により変動しないことも重要である。そのために散乱体によるエミッタンス増大をできる限り小さくすること、HEBT オプティクス一定でスポットサイズの変動が小さいことが要求される。

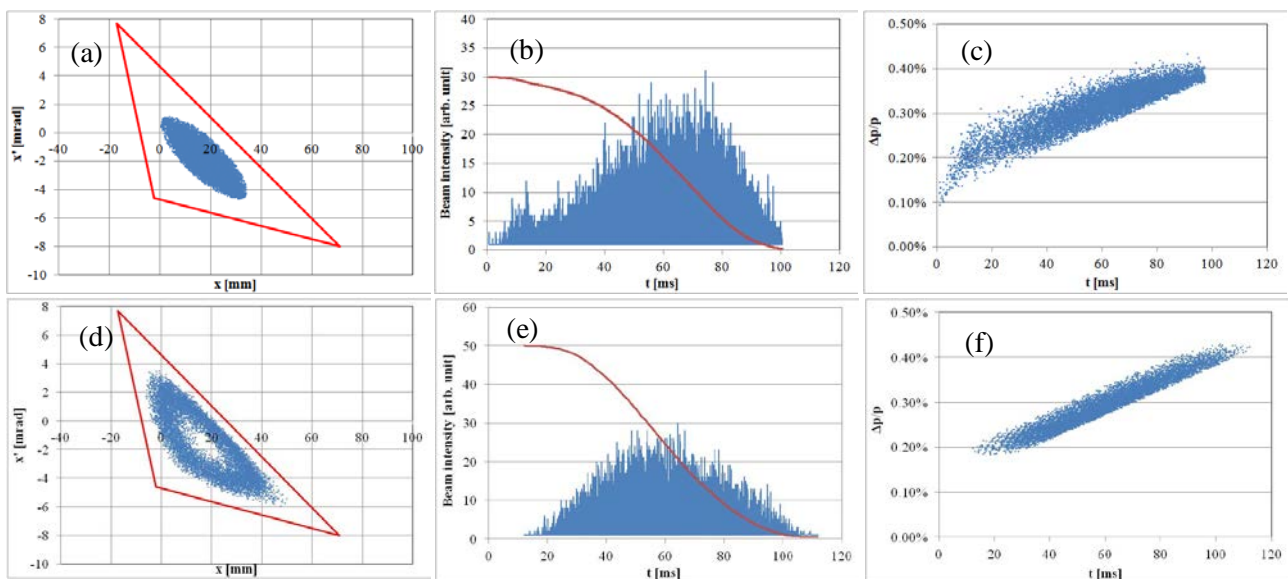


Figure 2: Simulation results before (upper) and after (lower) supplying transverse RF field. (a) and (d) show the particle distribution with the separatrix, (b) and (e) show the spill structure of the extracted beam, (c) and (f) show the time variation of the momentum of the extracted beam.

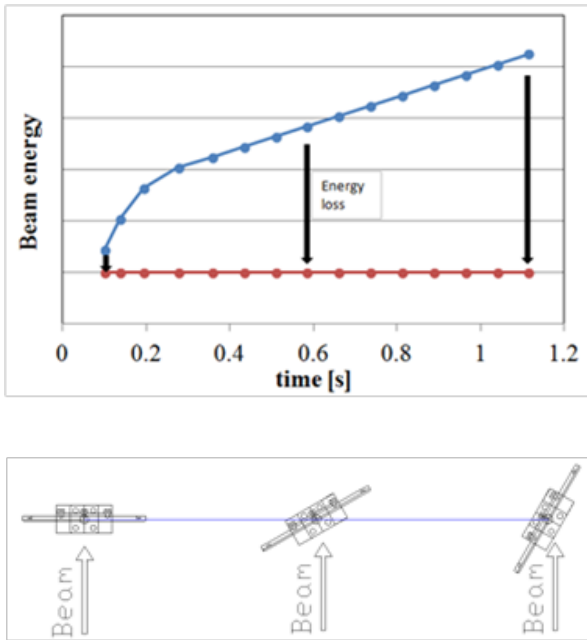


Figure 3: Principle of the rotating scatter.

散乱体通過前後のエミッタンス(ϵ)の関係は

$$\epsilon_2 = \epsilon_1 \sqrt{1 + \frac{\beta_1 \theta_0^2}{\epsilon_1}} \quad (1)$$

で表わされる[2]。ここで θ は散乱角、 β_1 は散乱体位置での β 関数を示している。よって散乱体位置での β 関数を小さくすることでエミッタンスの増大を小さくすることができる。また、散乱体による twiss パラメータの変化は散乱体前後のエミッタンスの比 (ϵ_1/ϵ_2) に比例するため、エミッタンス growth を小さくできればオプティクスの変化も小さくなる。

群馬大学重粒子線施設におけるスキヤニング照射実験室までのビームラインについてオプティクス検討を行った結果を図4に示す。x、y方向とも β 関数を絞ることが可能な位置があり、 $\beta_x=1.85\text{m}$ 、 $\beta_y=0.55\text{m}$ が得られている。400MeV/n における取り出し区間の最小、最大エネルギーについて散乱計算を行った結果を表2に示す。取り出し区間中に散乱体厚を2倍に変更するがスキヤニングビームラインの照射点 (iso-center) におけるビームスポットサイズはほとんど変化しないことが分かる。140MeV/u についても同様の計算を行ったところ照射点におけるビームサイズは散乱体の厚さにより変化しないことが確認できた。

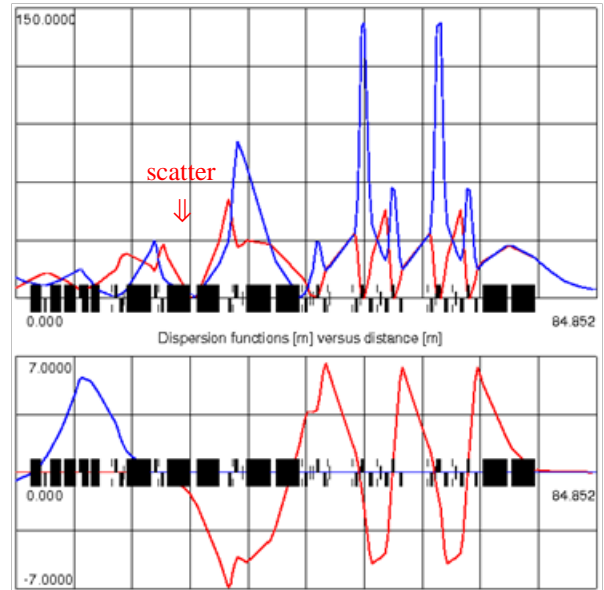


Figure 4: Beta-function (upper) and Dispersion (lower) of a scanning beam line for inserting a rotating scatter.

Table2: Calculation result of the beam condition during extraction.

T	400	402.68	MeV/u
T after scatter	397.3	397.3	MeV/u
Scatter thickness	1.38	2.76	mm
ex after scatter	1.723	2.286	$\pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$
ey after scatter	2.278	2.560	$\pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$
β_x at iso-center	6.398	5	m
β_y at iso-center	5.496	5	m
x-size at iso-center	3.320	3.380	mm
y-size at iso-center	3.538	3.578	mm
Scatter angle	0	60	degree

4. まとめ

群馬大学重粒子線医学センターにおいてシンクロトロンから取り出されるビームのエネルギー変動を抑制する研究を行っている。ビームに対して横方向に加える電場のパラメータを最適化することで、エネルギー変動を低減できるシミュレーション結果を得た。また取り出した後、散乱体によるエネルギーロスを利用したエネルギー補正についても良好な計算結果が得られた。スキヤニング照射の実現に向けて、今後これらの計算結果について実験により検証する予定である。

参考文献

- [1] H.Souda, et al., in this proceedings, SSFP19
- [2] Andrew Maier, CERN/PS 89-061