

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：82502

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26860409

研究課題名(和文)パルス内エネルギー可変型シンクロトロン運転方式実用化に向けた研究

研究課題名(英文)Study for the realization of multiple-energy synchrotron operation

研究代表者

水島 康太 (Mizushima, Kota)

国立研究開発法人放射線医学総合研究所・重粒子医科学センター・研究員

研究者番号：90637092

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：粒子線治療において照射時間を短縮するために、シンクロトロンのパルス内エネルギー可変型運転方式の実用化を目指した研究を行った。シミュレーションと実験から、エネルギー変更に伴って原理的に生じるビーム漏れに対し、横方向高周波電場の周波数成分による低減法の効果を検証した。その方法によってビーム漏れ量は従来の10%以下に抑えることができると確認された。さらに、高速ビーム遮断システムを用いて、より安定で信頼できるビーム漏れを低減するシステムの開発を行い、パルス内エネルギー可変型運転方式が治療照射に対して実用できることを証明した。

研究成果の概要(英文)：We carried out the study for the realization of multiple-energy synchrotron operation in order to save the irradiation time in particle therapy. By the beam simulation and experiment, we verified the effect of the method, which uses the extra frequency component of the transverse RF-field, for the reduction of the uncontrollable spilled beam theoretically induced due to the change of the output beam energy. By this method, the amount of the uncontrollable spilled beam was reduced to below 10% compared to the ordinary method. In addition, we developed the stable and the reliable system for multiple-energy synchrotron operation by using the fast beam damp system and proved that it can be applied to practical use for the treatment.

研究分野：加速器工学

キーワード：粒子線治療 粒子加速器 シンクロトロン

1. 研究開始当初の背景

(1) 加速器によってエネルギーを高められた陽子や重イオンを用いる粒子線治療は、従来のX線による放射線治療に比べて線量集中性が高く、正常組織の損傷を低減できることなどから需要が高まり、治療施設は世界中に増え続けている。粒子線治療で使用される照射法には、主に、拡大ビーム法とスキヤニング法と呼ばれる2種類の方法がある。前者は、電磁石や散乱体で広げた粒子線ビームをコリメータ等により腫瘍形状にあわせて成形するという静的なシステム構成のため、装置制御が比較的容易な反面、腫瘍形状によって正常組織への余分な線量付与が多くなり、治療期間中の腫瘍形状の変化にも対応できないというデメリットから、後者のスキヤニング法が世界的にも主流となりつつある。

スキヤニング法は、細いビームを電磁石によって横方向に走査し、ビームのエネルギー変更により深さ方向の飛程を制御して三次元的に腫瘍を塗りつぶすように照射する方法で[1]、正常組織への線量付与を抑えつつ複雑な腫瘍形状にも適用でき、治療期間中の腫瘍形状の変化にも対応可能である。ビームエネルギーの変更については、板状の材質をデグレーダとして使用する方法もあるが、ビームサイズの増大や二次粒子の増加により正常組織への損傷を増やすことから好ましくなく、加速器で直接的にエネルギーを変えることが望ましい。しかし、照射中に何度もエネルギーを変える必要があるため、エネルギー変更にかかる時間によっては治療照射時間の遅延をまねく。照射時間が長くなると、患者負担が増えるだけでなく照射中に患者が動いて照射位置がずれてしまうリスクが高まるため、避けなければならない。

(2) 従来、シンクロトロンの出射ビームエネルギーを変える方法として使われていたのは、運転周期ごとに電磁石の励磁パターンを切り替えて加速エネルギーを変更する方式であったが、この方式ではエネルギー変更のたびにビームの減速、再入射、加速が行われるため、その都度1~2秒程度の時間がかかってしまう。スキヤニング照射の場合、1回の照射あたりに数十回から百回程度のエネルギー変更が必要なため、それに費やされる合計時間は無視できないものとなる。

そのため、我々は過去の研究で、シンクロトロンの「パルス内エネルギー可変型運転方式」を開発した[2]。この方式は、図1に示したような細かい階段状の励磁波形の運転パターンを用いることで、ビームの再入射を行うことなく、連続的に、非常に短時間でエネルギーの変更を行うことができ、時間効率を最大限に高めることが可能となる。しかし、このパルス内エネルギー可変型運転方式の実用化に際しては、エネルギー変更後に生じるスパイク状の「ビーム漏れ」が大きな課題であった。これは、ビーム減速によるエミッ

タンスの増加が原因で、エネルギー変更に伴って不安定領域に出た大量の粒子が、短時間にシンクロトロンからこぼれ出ること生じていた。

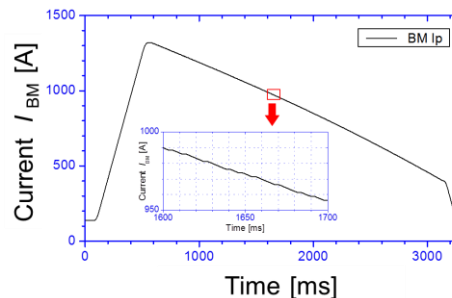


図1 パルス内エネルギー可変型運転方式を使用したシンクロトロン偏向電磁石 (BM) の励磁電流パターン。

2. 研究の目的

パルス内エネルギー可変型運転方式を用いて出射ビームエネルギーを変更したとき、原理的に生じてしまうビーム漏れに対して、図2に示したような原因となるベータトロン振幅の大きな粒子に強く共鳴する周波数の横方向高周波電場をビーム出射時に印加することで周回ビームの横方向分布を制御する方法[3]を応用し、ビーム漏れ量を低減することを目指す。そのために、粒子トラッキングシミュレーションを用いて提案方法の効果を見積もり、周波数最適化方法について検討を行う。また、ビーム実験にてビーム漏れ量を低減できることを確認し、パルス内エネルギー可変型運転方式実用化のためのシステム開発を行う。

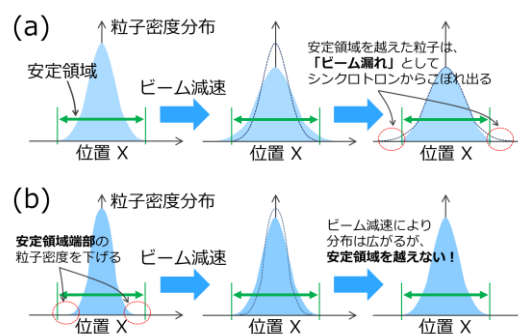


図2 パルス内エネルギー可変型運転方式を用いてビームエネルギーを変更した場合に生じるビーム漏れ(a)とその低減法による効果(b)を表した概念図。

3. 研究の方法

(1) ビームエネルギー変更に伴ってビーム漏れが生じる状況を粒子トラッキングシミュレーションで検証するために、図3に示したタイミングチャートを用いた。シミュレーションプログラムは、過去の研究[3, 4]で開発、検証したものを応用した。シミュレーションでは、エネルギー変更後に「ビーム漏れ」となって観測された粒子が、エネルギー変更前

に位相空間上でどのように分布していたかを調べるとともに、原因粒子群の時間的位置情報をフーリエ変換して得られるベータatron振動スペクトルから、ビーム漏れ量低減に効く横方向高周波電場の周波数を推定し、実際にビーム漏れ量が低減されることを確認した。

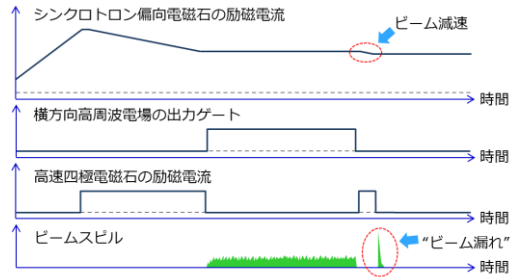


図3 ビーム漏れを検証するためにトラッキングシミュレーションで用いたタイミングチャート。

(2) 放射線医学総合研究所の重粒子線治療用加速器 HIMAC を利用したビーム実験において、シンクロトロンでのエネルギー変更後の「ビーム漏れ」低減法の有効性を検証した。HIMAC シンクロトロンのパルス内エネルギー可変型運転については、これまでの研究開発[2, 5]で調整済みである。現実には電磁石電源のリプルやトラッキングエラーによってビーム減速区間で計算以上に粒子分布が広がり、シミュレーションとの誤差を生じる可能性があるため、最適な横方向電場の周波数はビーム漏れ量の低減率を測定することで探した。さらに、提案方法によって低減されたビーム漏れ量とスキニング照射に求められる条件との比較評価を行った。

(3) 治療照射時に「ビーム漏れ」が発生する状況としては、ビームエネルギーやシンクロトロン内のビーム蓄積量など様々な条件がある。そのため、どのような条件でもビーム漏れ量を抑えられるシステムを開発し、ビーム実験にてその安定性、信頼性を確認する。

4. 研究成果

(1) シミュレーションによりパルス内エネルギー可変型運転方式によるエネルギー変更を行った際に生じるビーム漏れを再現することができた。シミュレーションで使用したパラメータを表1に示す。ビーム漏れとなって観測される粒子は、予想通り、エネルギー変更直前にベータatron振動と六極磁場による三次共鳴で生成される不安定領域近傍に滞在していることが確認できた。それらの粒子群が持つベータatron振動数を解析して求めた周波数を、ビームを拡散して出射するために帯域をもたせて印加していた従来の高周波電場の周波数成分と合成し、ビーム漏れ量を低減した結果を従来法と比較して図4に示す。ビーム漏れの原因粒子に強く

共鳴する単一周波数成分を加えることで、エネルギー変更前に不安定領域近傍の粒子密度が下げられ、ビーム漏れ量は従来方法の10%以下まで抑えられていることがわかる。さらに、元の周波数成分に対する新たに加えた単一周波数成分の振幅比を大きくすることでビーム漏れ量の低減率も単調増加することも確認できた。

表1 トラッキングシミュレーションで使用したパラメータ

Ion	$^{12}\text{C}^{6+}$
Beam energy	200 → 197 MeV/u
Particle number	5×10^5
Betatron tune (Q_x, Q_y)	(3.682, 3.130)
Revolution frequency	1.313 MHz
Frequency band of transverse RF-field	887-897 kHz
Additional freq. of transverse RF-field	885 kHz

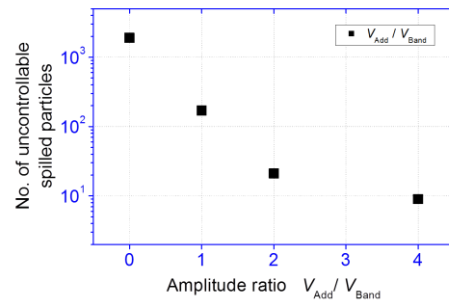


図4 高周波電場周波数成分の振幅比と漏れビーム量の関係を調べたシミュレーション結果。

(2) シミュレーションと同様に、ビーム実験にてパルス内エネルギー可変型運転方式によるエネルギー変更後のビーム漏れ低減法の効果を検証した。低減されたビーム漏れの典型的な結果を図5(a)に示す。ビーム実験においても、提案法によってビーム漏れ量を従来の1/10程度まで減らすことができた。しかし、電磁石電源のリプルやトラッキングエラーによる影響、ないしは不正磁場との高次共鳴によるエミッタンス増加なのか、ビーム漏れ量はシミュレーションで想定したよりも多く、図5(b)に示したように測定ごとの再現性も悪かった。また、根本的な問題として、周回ビームの蓄積量が多く、且つ、高いビーム強度で出射した後のエネルギー変更時のビーム漏れは多くなりやすく、さらに、出射時間が非常に短い場合には高周波電場を印加する時間も短くなってしまいうため、ビーム漏れ低減法の効果自体が弱まるということが判明した。結果として、様々な条件、状況が想定される治療照射においては、提案した方法だけでは求められている 1×10^8 particles/s (pps) 以下のビーム漏れという目標を達成することは難しいということがわかった。そのため、次で説明する高速ビーム遮断制御を応用した新しいシステムを検討した。

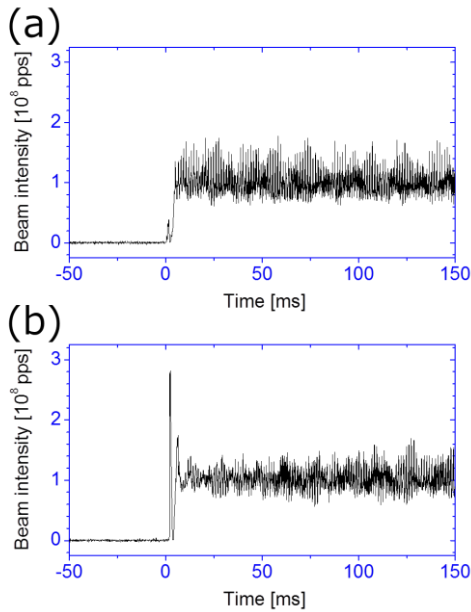


図5 提案法によりビーム漏れが低減された場合(a)と、同様の条件でも効果があまり見られなかった場合(b)の比較。

(3) 出射時に印可する高周波電場を応用したビーム漏れ低減法では、ある一定の効果は得られたものの、スキャンング照射治療に求められる条件をどのような状況でも満たせるものではなかった。そこで、上記方法で防ぎきれない分のビーム漏れを、ビーム輸送ラインにある高速ビーム遮断用電磁石を利用してビームダンプに当てることで、照射開始時のビーム漏れを防ぐシステムを試験した。システムのレイアウトを図6に示す。このシステムを用いて、パルス内エネルギー可変型運転方式によるエネルギー変更照射試験を行った。その結果を図7に示す。照射試験では、水中飛程差で29 cmに相当する430 MeV/uから89 MeV/uまでのエネルギー変更を、145ステップ(水等価厚2mmピッチ)で行い、55秒で完了できることが確認できた。この試験では、ビーム強度を 1×10^8 pps、1エネルギーあたりの照射時間を100 msとしており、1回のエネルギー変更にかかった時間は平均280 msであった。結果として、大きなビーム漏れはなく、様々なビームエネルギーに対して、安定に照射ビーム強度を制御できることが実証された。

最後に、実際の治療照射パターンを用いたビーム試験結果を図8に示している。この試験では、前立腺がんに対する照射を模擬しており、使用エネルギーは349 MeV/uから268 MeV/uまでの40種類で行っており、ビーム強度は $0.3 \sim 2.3 \times 10^8$ ppsの間でそれぞれのエネルギーごとに制御された。図からもわかるように、治療照射パターンにおいてもビームは安定に制御されており、本研究の方法、システムによってシンクロトロンのパルス内エネルギー可変型運転方式を用いた治療照射を実現できることが証明できた。

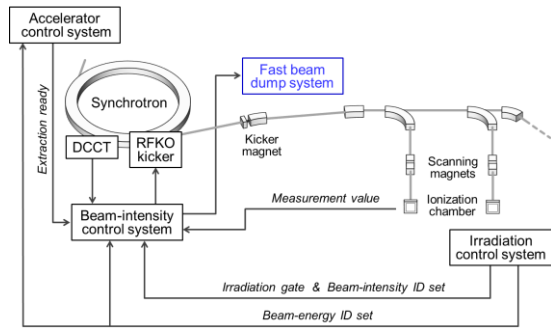


図6 ビーム制御システムレイアウト。

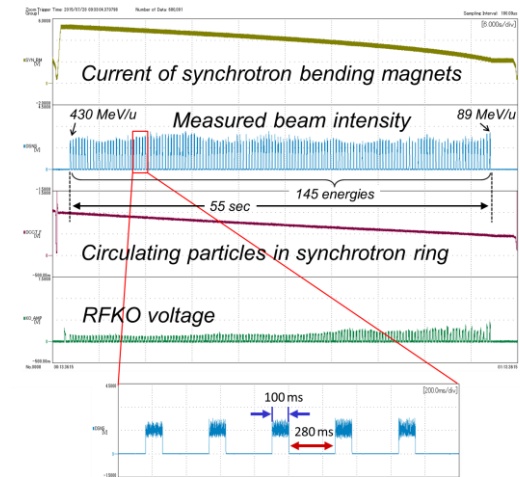


図7 シンクロトロンのパルス内エネルギー可変型運転方式による145段連続エネルギー変更照射試験結果。

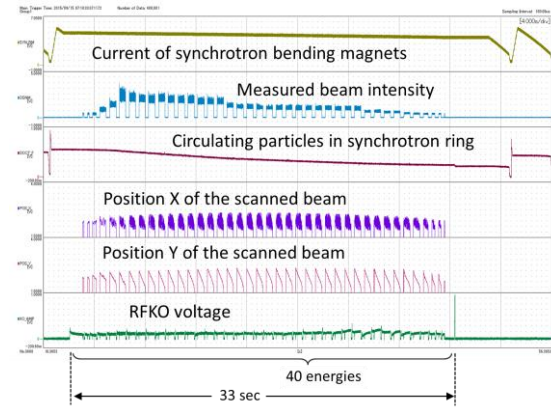


図8 シンクロトロンのパルス内エネルギー可変型運転方式を用いた前立腺がん治療の模擬照射結果。

<引用文献>

[1] Th. Haberer et al., Magnetic scanning system for heavy ion therapy, Nucl. Instrum. Methods Res. Sect. A, 330, 296-305 (1993).
 [2] Y. Iwata et al., Multiple-energy operation with extended flattops at HIMAC, Nucl. Instrum. Methods Res. Sect. A, 624, 33-38 (2010).

- [3] K. Mizushima et al., Reduction of uncontrollable spilled beam in RF-knockout slow extraction, Nucl. Instrum. Methods Res. Sect. A, 606, 325-329 (2009).
- [4] K. Mizushima et al., Making beam spill less sensitive to power supply ripple in resonant slow extraction, Nucl. Instrum. Methods Res. Sect. A, 638, 19-23 (2011).
- [5] K. Mizushima et al., Experimental studies of systematic multiple-energy operation at HIMAC synchrotron, Nucl. Instrum. Methods Res. Sect. B, 331, 243-247 (2014).

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計5件)

- (1) 水島康太、古川卓司、岩田佳之、原洋介、早乙女直也、皿谷有一、丹正亮平、白井敏之、野田耕司、炭素線高速三次元スキャニング照射のための可変エネルギー運転の開発、第13回日本加速器学会年会、2016年8月、千葉。
- (2) K. Mizushima, T. Furukawa, Y. Iwata, Y. Hara, N. Saotome, Y. Saraya, R. Tansho, S. Sato, T. Shirai, K. Noda, Performance of the HIMAC Beam Control System Using Multiple-Energy Synchrotron Operation, 12th European Conference on Accelerators in Applied Research and Technology (ECAART12), July 2016, Finland.
- (3) 水島康太、古川卓司、岩田佳之、原洋介、早乙女直也、皿谷有一、丹正亮平、白井敏之、野田耕司、炭素線高速三次元スキャニング照射システムに求められるビーム技術とその開発、第110回日本医学物理学会学術大会、2015年9月、札幌。
- (4) K. Mizushima, Y. Iwata, T. Furukawa, S. Sato, T. Shirai, K. Noda, Upgrade of synchrotron operation for scanned carbon-ion therapy at NIRS-HIMAC, 7th Korean-Japan Joint Meeting on Medical Physics, September 2014, Korea.
- (5) K. Mizushima, T. Furukawa, Y. Hara, K. Katagiri, Y. Iwata, S. Sato, T. Shirai, K. Noda, Performance of multiple-energy operation for scanned carbon-ion therapy at HIMAC, 53rd Annual Conference of the Particle Therapy Co-Operative Group (PTCOG53), June 2014, China.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

水島 康太 (Kota Mizushima)

国立研究開発法人放射線医学総合研究所・重粒子医科学センター・研究員

研究者番号：90637092

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者
なし