

ANALYSIS OF SPILL STRUCTURE OF SYNCHROTRON FOR PARTICLE THERAPY

Futaro Ebina, Kazuyoshi Saito, Satoshi Totake, Kazuo Hiramoto
Hitachi, Ltd. Energy & Environmental Systems Laboratory
7-2-1 Omika-cho, Hitachi-shi, Ibaraki, 319-1221

Abstract

Stability of spill structure is required for synchrotrons for particle therapy. To evaluate the influence of synchrotron oscillation on spill structure of a synchrotron with RF-driven slow extraction technology, beam extraction from the synchrotron is analysed by 6-dimensional particle tracking simulation. The result of the simulation says that the momentum of the extracted beam becomes higher than that of the remained circulating beam. Turning off the RF-cavity simultaneously with the RF-kicker is effective to reduce the beam-off time, but the momentum of the extracted beam increases by 0.01% from the momentum without RF-cavity turning off.

粒子線治療用シンクロトロンのスピル構造解析

1. 背景

粒子線治療用のシンクロトロンには、出射ビーム強度の安定性が求められる。このことは、ビームの照射位置を走査して患部に線量分布を形成するスキャニング照射法において特に顕著である。

高周波を用いた遅い取り出しは、出射ビームの位置・傾きが安定するため、粒子線治療用のシンクロトロンに適用されている[1]。一方、高周波を用いた遅い取り出しにおいては、ベータトロン振動の安定領域（セパトリクス）の大きさが周回ビームのチューンに依存するため、出射ビームのスピル構造がシンクロトロン振動の影響を受ける。

シンクロトロン振動が出射ビームのスピル構造に与える影響を評価するため、シンクロトロンからのビーム出射を6次元位相空間上でのトラッキングにより解析した。

2. 解析手法

計算高速化のため、シンクロトロンは出射用静電セプタム電極（ESD）、六極電磁石、高周波キッカ、高周波加速空洞の各要素位置で分割する。水平・垂直方向の位相空間分布はTwissパラメータを用いて規格化し、分割した要素間のビーム輸送は、ベータトロン振動の位相進みに応じた規格化位相空間上の回転として取り扱う。周回ビームを構成する個々のビーム粒子のチューンは、リングのクロマティシティと中心運動量からのずれの積に比例した量だけ周回ビームの中心チューンからずれる。そこで、規格化位相空間上での回転量をチューンのずれに相当する量だけ変化させることにより、運動量のずれがビーム粒子の軌道に与える影響を評価した。

ESDはセパトリクスを越えた周回ビーム粒子をリングの外側方向へ偏向し、シンクロトロンからビームを出射する。本解析では、ESDの電極間に入射したビーム粒子についてシンクロトロンから出射

されたものとする。六極電磁石は薄レンズで近似し、ビーム粒子の水平・垂直方向の傾きのみを変化させる。高周波加速空洞は、周回ビームに進行方向の高周波電圧を印加し、ビーム粒子の進行方向位相及び運動量を一周ごとに変化させる。シンクロトロン振動の周期はベータトロン振動の周期に比べて十分遅いため、高周波加速空洞以外の場所では進行方向の位相が変化しないと仮定した。高周波キッカは周回ビームに水平方向の高周波電圧を印加し、周回ビームの水平エミッタンスを増大させる。高周波キッカの蹴り角 $\Delta x'$ は、次式に示すように均等に分布した線スペクトルの合成で与えた。

$$\Delta x' = \frac{A}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} \cos\{(v_{\text{MIN}} + \Delta v k)(2\pi m + \phi) + \theta_k\}$$

$$\text{ただし、} \Delta v = \frac{v_{\text{MAX}} - v_{\text{MIN}}}{N-1}$$

ここで、 A は高周波キッカによる蹴り角、 N は線スペクトルの本数、 v_{MAX} 、 v_{MIN} はそれぞれスペクトル帯域の上限と下限に相当するチューン、 n はビーム粒子の周回数、 ϕ はビーム粒子の進行方向の位相、 θ_k は線スペクトルごとに設定した $0 \sim 2\pi$ の範囲のランダムな値である。

3. 解析結果

3.1 解析条件

小型の陽子線治療用シンクロトロンからのビーム出射を解析した。シンクロトロンの周長はおよそ23mであり、対向する位置に設置された2台の六極電磁石により出射用のセパトリクスを形成する。

出射解析の主要な条件を表1に示す。水平方向のクロマティシティは、シンクロトロンのナチュラルクロマティシティ（-0.66）よりも絶対値が大き

いが、これは偏向電磁石が持つ六極磁場による影響を考慮したためである。高周波キッカのスペクトラム帯域は、3次共鳴線 ($\nu_x = 1.666$) と周回ビームの水平チューンの間に均等に分布した線スペクトルの合成として与えた。

解析は500msの区間に渡って行うが、開始時点で六極電磁石は励磁されておらず、高周波キッカには電圧が印加されていない。開始から100msかけて六極電磁石を所定の励磁量まで励磁し、100ms時点から高周波キッカに電圧を印加するため、実質的な出射期間は400msとなる。解析開始から100ms時点を出射開始時点とし、100~500msの区間を出射期間とする。

水平・垂直方向のビーム分布はガウス分布で与え、進行方向のビーム分布は高周波バケットに収まる一様分布とした。計算粒子数は10000個で、ビーム粒子間の相互作用は考慮していない。

表 1 : 出射解析の条件

シンクロトロン周長	23m
ビームエネルギー	200MeV
チューン	水平 : 1.685 垂直 : 1.450
クロマティシティ	水平 : -2.0 垂直 : -1.0
高周波キッカ帯域	$\nu_{MAX} = 1.685$ $\nu_{MIN} = 1.666$
高周波キッカ線スペクトル本数	10本
高周波キッカ蹴り角	$A = 1.5 \mu\text{rad}$
高周波加速空洞電圧	200V
エミッタンス (1σ)	水平 : $10\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 垂直 : $5\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$
運動量分散 (全幅)	$\pm 0.1\%$
解析区間	500ms
計算粒子数	10000個

3.2 連続出射時の解析結果

ビームを連続的に出射する場合を想定した出射解析の結果を示す。高周波キッカは出射開始時点以降(出射期間中)常時ONであり、高周波加速空洞は解析期間中常時ONであるとした。

解析終了時点(500ms時点)でのESD入り口地点における水平方向位相空間分布を図 1 に示す。周回ビームはセパトリクス内に分布しているが、運動量分散によりビーム粒子の水平チューンが広がりを持つため、安定領域の境界は鮮明な直線とはならない。周回ビーム分布の重心が中心軌道からずれているのは、出射用のバンプ軌道を形成しているためである。ESDの電極間に分布しているビーム粒子が、解析区間中にシンクロトロンから出射されたビーム

粒子である。

出射ビームのスピル形状及び出射ビームの運動量の解析結果を図 2 に示す。スピル形状は1msごとにカウントした計算粒子の数、運動量は1msの間に出射されたビーム粒子の運動量の平均値である。出射期間中は高周波キッカの出力が一定であるため、出射ビームの強度は、周回ビーム電荷量の減少に従い徐々に減衰する。出射開始時点より前に現れるビームは、周回ビームのエミッタンスの上限をセパトリクスよりも大きく設定したために、六極電磁石の励磁中にセパトリクスの外に出て出射されたビーム粒子である。出射ビームの運動量は、周回ビームの中心運動量よりおよそ0.06%高くなっている。シンクロトロンの水平クロマティシティが負であるため、運動量が高いビーム粒子の水平チューンは周回ビームのチューンよりも3次共鳴線に接近し、セパトリクスは小さくなる。従って、シンクロトロン振動しているビーム粒子から見たセパトリクスは、運動量に応じて拡大と縮小(振動)を繰り返す。解析結果は、高周波キッカによる周回ビームの拡散がクロマティシティの振動よりも遅いため、運動量が高くなるタイミングでビーム粒子が出射されやすくなることを示している。

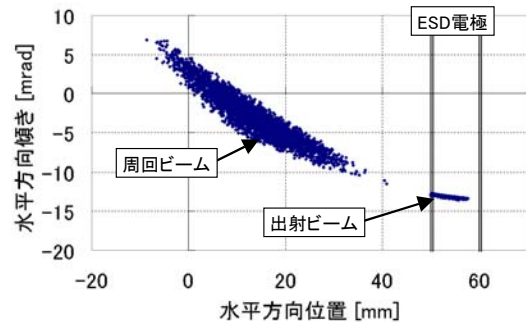


図 1 : 水平方向位相空間分布の解析結果

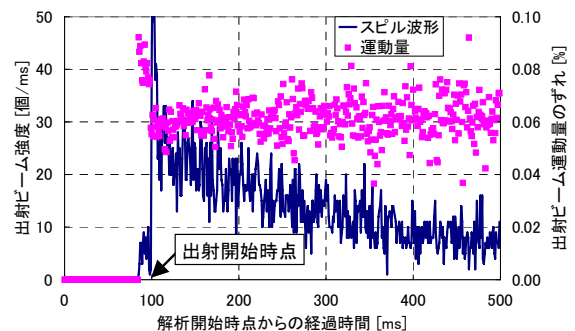


図 2 : スピル構造解析結果 (連続出射)

3.3 スキャンニング照射時の解析結果

ビームの照射位置を離散的に走査するスキャンニング照射法を想定した出射解析の結果を示す。高周波キッカは出射期間中10msごとにONとOFFを切り替え、高周波加速空洞は解析期間中常時ONとした。高周波キッカがOFFの間は周回ビームのエミッタンスが増

大しないため、シンクロトロンは10msごとにビームの出射と停止が切り替わることになる。

出射ビームのスピル形状及び出射ビームの運動量の解析結果を図 3 に示した。ビームの出射と停止がわかり易いよう、解析開始時点から200~240msの区間のみを表示し、出射粒子数及び運動量は0.5msごとに算出した。シンクロトロンからビームが出射される区間は、高周波キッカがONとなる区間に対応し、高周波キッカがOFFの間はほとんどビームが出射されない。また、出射ビームの運動量は、ビームを連続的に出射した場合と同様、周回ビームの中心運動量よりも高くなる。

スピル形状の解析結果から、高周波キッカがOFFとなってもビーム出射がすぐには停止せず、1ms程度はビーム出射が継続することがわかる。これは、周回ビーム粒子がシンクロトロン振動をしているため、高周波キッカがOFFとなった時点で安定限界の近傍にいる粒子が、セパトリクス振動により安定限界を越えて出射されるためであると考えられる。

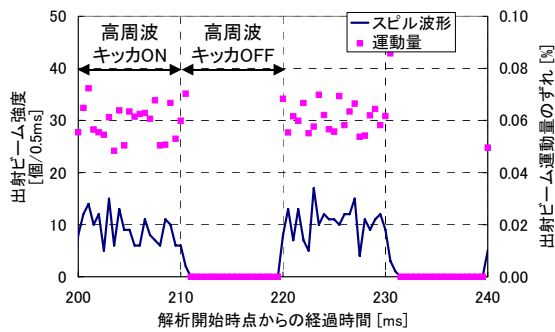


図 3 : スピル構造解析結果 (高周波キッカのみON/OFF)

3.4 高周波加速空洞ON/OFF時の解析結果

シンクロトロン振動の影響により高周波キッカの停止後もビームが出射されることを防ぐには、高周波キッカの停止と同時に高周波加速空洞を停止し、出射停止中のシンクロトロン振動を抑制すればよい。ただし、高周波加速空洞を停止した状態では周回ビームと高周波加速空洞の相互作用により周回ビームのエネルギーが減少する恐れがあるため、ビーム出射の再開と同時に高周波加速空洞をONとし、出射中に再び周回ビームを高周波捕獲する。

出射期間中10msごとに高周波キッカのON/OFFを切り替え、高周波加速空洞のON/OFFを高周波キッカのON/OFFと同期して切り替えた場合の出射スピル形状を解析した。ここで、高周波加速空洞がOFFとなる際には高周波キッカと同様瞬時に印加電圧が0となるが、ONとなる際には周回ビームを断熱的に捕獲するため1msかけて徐々に印加電圧を200Vまで上げていくものとした。高周波キッカと高周波加速空洞の運転パターンの模式図を図 4 に示す。

出射ビームのスピル形状及び出射ビームの運動量の解析結果を図 5 に示す。ビーム出射は高周波キッカ及び高周波加速空洞の停止と同時に中断して

おり、高周波加速空洞の停止がビーム出射停止時間の短縮に有効であることが確認できる。ただし、出射ビームの運動量は、周回ビームの中心運動量よりも0.07%高く、高周波加速空洞をON/OFFしない場合の0.01%増しとなった。このことは、周回ビームの再捕獲の際に高周波バケットからこぼれたビームが出射ビームの運動量を押し上げることを示している。出射ビームを患者まで輸送するビーム輸送系のデイスパージョンは高々数メートルであるから、高周波加速空洞のON/OFFによる出射ビーム運動量の増加は、ビーム輸送系の設計にほとんど影響しない。

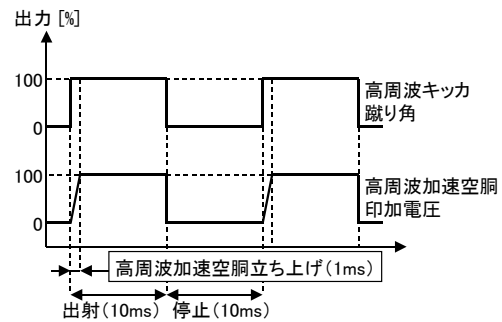


図 4 : 高周波キッカ及び高周波加速空洞の運転パターン模式図

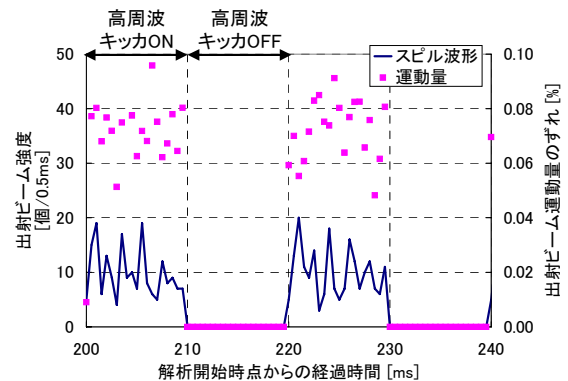


図 5 : スピル構造解析結果 (高周波キッカと高周波加速空洞を同期してON/OFF)

4. 結論

粒子線治療用シンクロトロンからのビーム出射を解析し、ビーム出射の停止がシンクロトロン振動の影響で高周波キッカの停止より遅れることを確認した。また、高周波加速空洞のON/OFFはビーム出射停止時間の短縮に有効であるが、高周波バケットからこぼれたビームにより出射ビームの運動量が増加することが判明した。

参考文献

- [1] K. Saito, et al., "Accelerator Development for Advanced Particle Beam Therapy" Proceedings of the 11th European Particle Accelerator Conference (EPAC2008), Genoa, June 23-27, 2008