

サイクロトロン NIRS-930 におけるビームのシミュレーション

BEAM SIMULATION FOR CYCLOTRON NIRS-930

中尾 政夫^{#,A)}, 北條 悟^{A)}, 片桐 健^{A)}, 杉浦 彰則^{A)}, 涌井 崇志^{A)}, 野田 章^{A)}, 後藤 彰^{B)},
Smirnov Victor^{C)}, Vorozhtsov Sergey^{C)}

Masao Nakao^{#,A)}, Satoru Hojo^{A)}, Ken Katagiri^{A)}, Akinori Sugiura^{A)}, Takashi Wakui^{A)}, Akira Noda^{A)}, Akira Goto^{B)},
Victor Smirnov^{C)}, Sergey Vorozhtsov^{C)}

^{A)} National Institute of Radiological Sciences

^{B)} Yamagata University

^{C)} Joint Institute for Nuclear Research, Russia

Abstract

Beam simulation for cyclotron NIRS-930 is performed for the purpose of understanding the beam behavior in the cyclotron and searching the best operational parameters by the use of SNOP code, which uses 3D electric and magnetic fields, and which can calculate the space charge effect with PIC method. Initial bunch condition was supposed by comparison of simulation and experimental results changing buncher phase and the apparent phase acceptance are the same value. Regions of phase space where particles extract or lost by collide with deflector or magnetic channel was determined. Using the information, the initial condition which has better extraction rate was supposed.

1. はじめに

放医研にある K=110 のサイクロトロン、NIRS-930 の大強度化を目指し、ビームの挙動を理解するためにシミュレーションを行っている。ターゲットや遮蔽の強化のような大規模な改造の必要がない 2~3 倍程度を当面の目標として、入射、出射効率を向上させることを考えている。シミュレーションプログラム SNOP[1,2]はサイクロトロンの入射から出射までの一粒子、または複数の粒子の空間電荷効果を考慮に入れた 3 次元のシミュレーションを行う。電場(Dee 電極、インフレクター)と磁場(メインコイル、トリムコイル、ハーモニックコイル、マグネティックチャンネル)は、Opera-3d [3]によって 3 次的に計算された値を用いる。18 MeV の陽子をハーモニック 2 で、インフレクターによる入射から取り出しまでのシミュレーション結果について報告する。

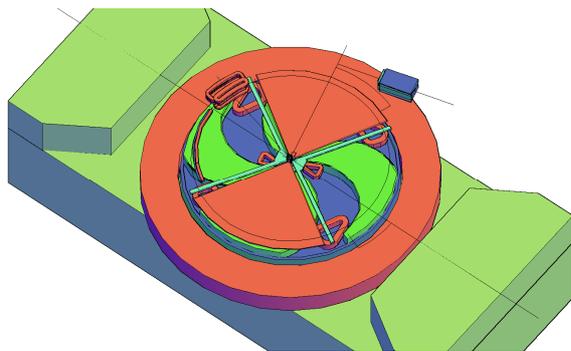


Figure 1: Half cut model of the cyclotron NIRS-930.

2. SNOP によるビームシミュレーションの手法

Figure 1 に NIRS-930 の 3D モデルを示す。イオン源を出たビームはインフレクターの直上にある偏向電磁石によって曲げられ、(バンチャーを使用した場合はバンチされ)、インフレクターの静電場によって入射される。NIRS-930 には 4 つのスパイラルセクターがあり、トリムコイルは 12 対、ハーモニックコイルは入射側と出射側に各 4 対ある。また、dee 電極の角度は 86° 、取り出し半径は 920 mm である。

SNOP は、入射から出射までのビームの軌道を入射、加速、出射の領域に分けながら一連の流れでシミュレーションできる。軌道の計算には 4 次のルンゲッタ法を用いている。多数の粒子のシミュレーションでは、PIC(Particle in cell)法を用いて空間電化効果の影響を計算した。ここで周期的境界条件を仮定して FFT 法を用いている。この結果を Particle to Particle 法の結果と比較して問題ないことを確認した。

3. バンチャー位相を変化させて入射・出射量の変化を測定

RF 位相を変化させてビームの入射、出射効率を測定することで、サイクロトロンの位相アクセプタンスを測定することができる。シミュレーションでは計算開始時刻の RF 位相を変化させて夫々の場合の入射効率と出射効率を計算した。一方で実験では、入射位相を変化させるために、バンチャーの位相をずらしながら入射して測定した。入射時のビームのバンチの幅を位相にして 30 度または 60 度の幅にして、夫々の条件でシミュレーションを行い、入射効率と出射効率をグラフにした結果が Figure 2 と 3 である。また、実験結果は Figure 4 である。ここで、

[#] nakao_m@nirs.go.jp

Figure 4 の結果における位相の幅を Figure 3 の結果と比較することで実際のバンチの長さを推定することができる。

Figure3 に示すように、60度のバンチは実験を再現しているが、Figure4 に示す 30 度のバンチの方が入射効率の高いことが見て取れる。これは、現在は sin 波であるバンチャーの RF 波形に高調波を加えて最適化し、入射する粒子の初期条件を変えることによって入射効率が上昇していることを示している。

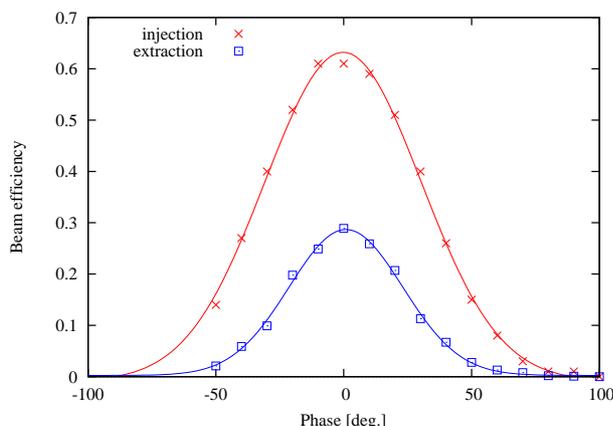


Figure 2: Simulation results of injection and extraction efficiency with a short (30°) bunch. Each one sigma width of the peak is $1\sigma=43.2\pm0.8^\circ$ at injection and $1\sigma=31.4\pm0.7^\circ$ at extraction.

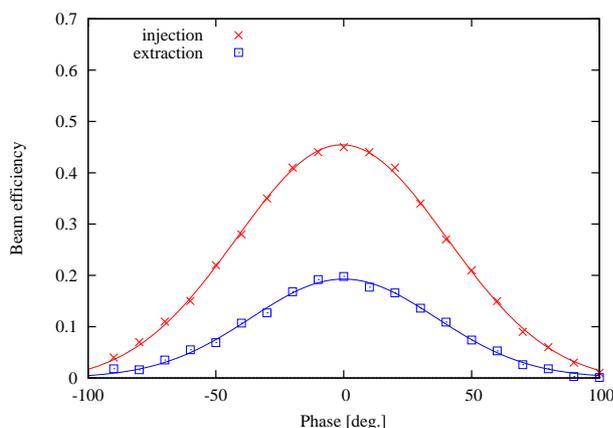


Figure 3: Simulation results of injection and extraction efficiency with a short (60°) bunch. Each one sigma width of the peak is $1\sigma=56.5\pm2.2^\circ$ at injection and $1\sigma=57.0\pm4.7^\circ$ at extraction.

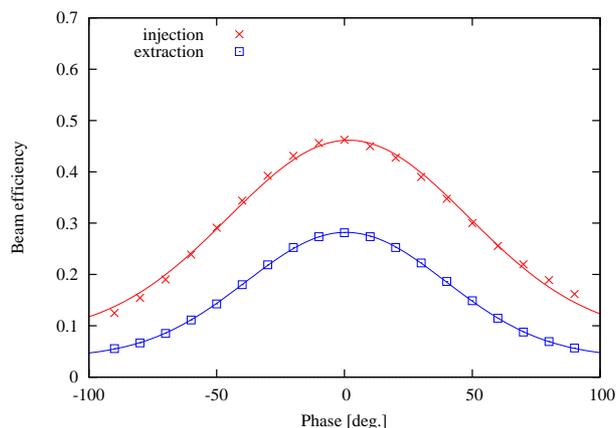


Figure 4: Experimental results of injection and extraction efficiency. Each one sigma width of the peak is $1\sigma=66.3\pm3.0^\circ$ at injection and $1\sigma=55.2\pm0.3^\circ$ at extraction.

4. デフレクター位置、電圧、マグネティックチャンネル位置の最適化

Figure 5 に、ビームがデフレクターに入る直前の位置における位相空間上で、各点上にある粒子がデフレクター(高圧電極あるいはセプタム)またはマグネティックチャンネル(MC)で失われるか、あるいは通過して出射するののかの結果別に表示し、また ± 10 度の狭いバンチのビームを、入射したときにその位相空間上のどこに来るかの分布を、位相を変えて2つシミュレーションしたものを示した。

例えば Figure 5 の右上の位置には、外側を外向きに通る粒子があるのでデフレクターの高圧電極で失われていることや、中央の縦に細長い領域にデフレクターのセプタムに衝突して失われる粒子がある事などが見て取れる。セプタムで失われるものより左側(実空間で内側)にある粒子は何にも衝突せず、取り出されることもないが、再びサイクロトロン内を周回し、Dee 電極で加速されることで半径が大きくなり、次以降の周回で取り出されるか、何かに衝突すると考えられる(図に示されたのは入射してから一定周回数のもので次の周回での位置は示されていない)。

ここで入射する粒子バンチのパラメータを変化させてシミュレーションし、同じ位相空間上にプロットする。出射した領域に入っている粒子数を数えることでそのバンチの出射効率が見て取れる。ここで衝突して失われる粒子についても、例えば位相空間内で右下にあれば半径が小さく傾きも小さかったのでデフレクターのセプタムに衝突したというように、衝突した場所とその原因を理解できるので出射効率を上げるために必要な条件を知ることができる。

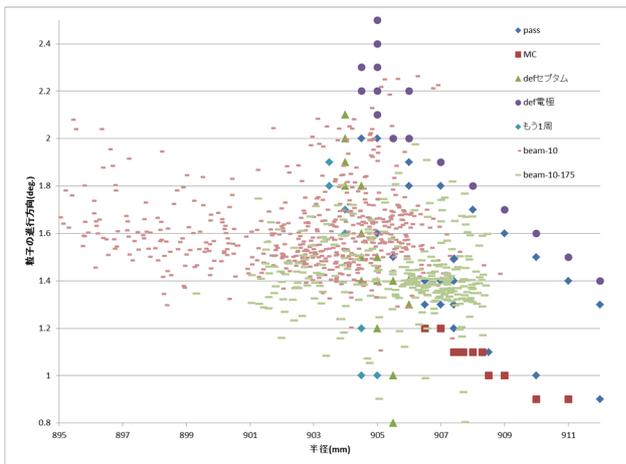


Figure 5: Extraction simulation results of some points in the phase space before deflector and the bunch injected in certain RF phase.

ここで、Figure 5 においてマグネティックチャンネルで失われている粒子をシミュレーション上で追跡すると、マグネティックチャンネルの入り口の内側に衝突していた。その粒子が通過するように、マグネティックチャンネルを半径方向で 5 mm 内側に移動させて Figure 5 と同様の単粒子シミュレーションを行ったものを Figure 6 に示す。元の条件ではマグネティックチャンネルで失われていたものが出射するようになっていることが見て取れる。

このような改善をデフレクターの位置(傾き、ギャップ幅)、デフレクターにかける電圧を変えて行うことで、同様に射出ビーム量を増やすことが可能である。

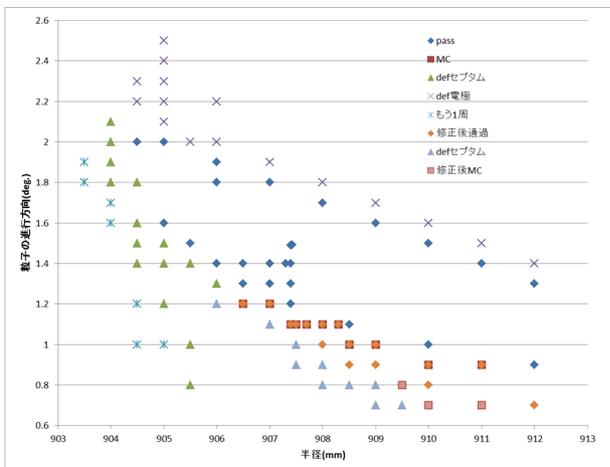


Figure 6: Extraction simulation results of some points in the phase space before deflector changing current of magnetic channel.

5. まとめ

入射ビームの条件を変えてシミュレーションを行うことで、現状の入射ビームの幅を推定することができた。またその条件を変えることができればビームの入射量を増加できることが予想される。

粒子の位相空間上における位置によってどの粒子が通過あるいは何に衝突しているのかを把握することができた。それによってバンチの透過効率を上げるための条件を知ることができた。

参考文献

- [1] V.L. Smirnov, S.B. Vorozhtsov, Proc. of RUPAC2012 TUPPB008 325 (2012).
- [2] V.L. Smirnov et al., Proc. of IPAC2012 292 (2012).
- [3] <http://www.cobham.com/about-cobham/communications-and-connectivity/about-us/antenna-systems/specialist-technical-services-and-software/products-and-services/design-simulation-software/opera/opera-3d.aspx>