

# NIRS-930 におけるビームのシミュレーション

## BEAM SIMULATION FOR NIRS-930

中尾 政夫<sup>#, A)</sup>, 北條 悟<sup>A)</sup>, 片桐 健<sup>A)</sup>, 杉浦 彰則<sup>A)</sup>, 野田 章<sup>A)</sup>, 後藤 彰<sup>B)</sup>,  
Smirnov Victor<sup>C)</sup>, Vorozhtsov Sergey<sup>C)</sup>  
Masao Nakao<sup>#, A)</sup>, Satoru Hojo<sup>A)</sup>, Ken Katagiri<sup>A)</sup>, Akinori Sugiura<sup>A)</sup>, Akira Noda<sup>A)</sup>, Akira Goto<sup>B)</sup>,  
Victor Smirnov<sup>C)</sup>, Sergey Vorozhtsov<sup>C)</sup>  
<sup>A)</sup> National Institute of Radiological Sciences  
<sup>B)</sup> Yamagata University  
<sup>C)</sup> Joint Institute for Nuclear Research, Russia

### Abstract

Beam simulation of the AVF cyclotron NIRS-930 is in progress for the purpose of understanding the behavior of the beam and searching the best beam parameters for the improved operation. The simulation is performed with code SNOP, which uses 3D electric and magnetic field calculated by OPERA-3d, and which can calculate the space charge effect by the use of PIC method. The results are as follows. The phase variation of 18MeV proton beam of the simulation was compared to that of the experiment. Both results show similar tendency. The beam loss point of each injection phase agreed between simulation and observation. It was found that the beam particle injected in fast phase passes inflector though they are lost at extraction. It means that the best phase of the injection and the extraction are different. Considering the results of the simulation, actual operation of the NIRS-930 cyclotron can be improved.

## 1. はじめに

放射線医学総合研究所の AVF サイクロトロン、NIRS-930 (K=110) [1]において、ビームの挙動を理解し、最適なパラメータを調査してビームの強度や品質を向上するためにビームのシミュレーションを行っている。シミュレーションにはサイクロトロン内の 3次元電場・磁場分布を利用し、多数の粒子の空間電荷効果を PIC 法によって計算できるコード SNOP[2,3]を用いた。SNOP は、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ネル)の値として Opera-3d[4]を用いて 3次元的に計算された値を用いる。SNOP はインフレクターによる入射から、加速、取り出しまでのシミュレーションを行う。18MeV の陽子をハーモニック 2 で加速したシミュレーションについて報告する。

## 2. SNOP によるビームシミュレーションの手法

### 2.1 NIRS-930 のモデル化

Figure 1 に NIRS-930 の 3D モデルを示す。イオン源を出たビームはサイクロトロンの真上にある偏向電磁石によって曲げられ、サイクロトロンの中心に向かい(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  $86^\circ$ 、取り出し半径は 920 mm である。

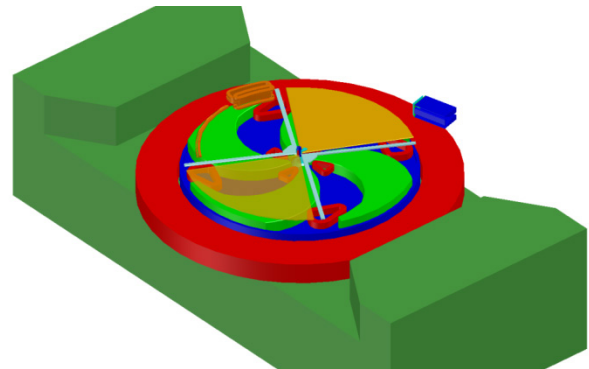


Figure 1: Half cut model of the cyclotron NIRS-930.

### 2.2 1 粒子のシミュレーション

18MeV の陽子 1 粒子の入射から取り出しまでの軌跡をシミュレーションした。この目的は加速位相の測定値とシミュレーションの値を比較することである。実際の運転では、各トリムコイルの値は位相プローブで測定した位相が理想的な値になるようにトリムコイルを調整している[5,6]。さらに取り出されるビーム強度が最大になるように他のパラメータを決定している。一方、シミュレーションで使用する磁場の値としては、実際に使用しているメインコイル、トリムコイルの値を参考にしながら理想的な等時性磁場[7]の値を使用した。Figure 2 に結果の比較を示す。シミュレーションと同じパラメータ(微調整

<sup>#</sup> nakao\_m@nirs.go.jp

のための最外周のトリムコイルを除く)を使用した” Revised parameter” の位相の値の変化はシミュレーションと同じ傾向を示している[8]。

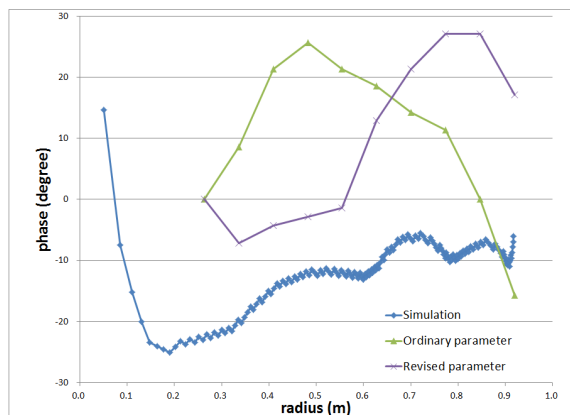


Figure 2: Comparison of the phase between the simulation and actual measurements. The phase of the innermost probe is defined as zero.

### 2.3 多数の粒子のシミュレーション

SNOP の複数の粒子のシミュレーションでは、空間電荷効果を PIC (Particle In Cell)法によって計算する。取り出したビームの各粒子の位相空間内での様子を Fig. 3 に示した。このビームのエミッタンスは動径方向が  $24.9 \pi \text{ mm mrad}$ 、軸方向は  $11.2 \pi \text{ mm mrad}$  であった。

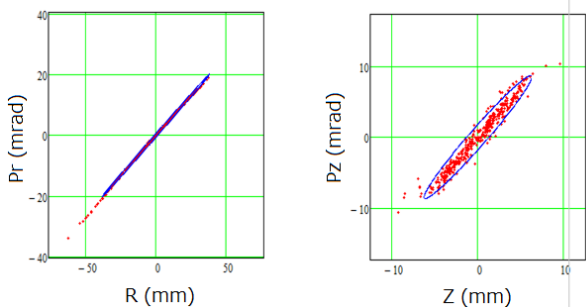


Figure 3: The phase space plot of the extracted beam in simulation.

### 3. ビーム取り出し効率

18MeV 入射するビームは各方向にガウス分布になるようにした。進行方向はバンチャーの効果を考慮している。入射ビームのエミッタンスは横方向がそれぞれ  $100 \pi \text{ mm mrad}$ 、バンチの長さは  $280 \text{ mm}$  であり、これは PF 位相の  $60^\circ$  に対応する。ビーム強度は、普段の使用時にインフレクターで測定される  $130 \mu \text{ A}$  に決定した。シミュレーションの粒子数は  $10000$  個である。

Table 1 に実験とシミュレーションにおけるビームの透過効率をビームの各部での残存率として表した (R=10cm は半径 10cm よりも外側で失われたものを

意味する)。取り出し効率はシミュレーションが実際の値より悪くなっているが、効率はデフレクターの位置や電圧により鋭敏に変化するので取り出し系の最適化により今後改善する可能性がある。

Table 1: Comparison of Beam Transmission Efficiency (survival ratio) (%)

Position	Experiment	Simulation
Entrance of the inflector	100	100
R=10cm	39	82
Before deflector	36	74
Extracted	23	24

### 4. ビームの失われる位置と位相

ビーム透過効率の向上のために、ビームの粒子の失われる位置と入射時の RF 位相の関係をシミュレーションと実際の測定で調べた。それにより、入射時にどの位相にいた粒子がどこで失われるかを調査することができる。入射時の位相とは、RF の原点と入射時刻の相対的な時間差を表す。入射の位相を変えるために、実験ではバンチャーの位相をずらしながら使い、シミュレーションではバンチの入射タイミングを変更した。

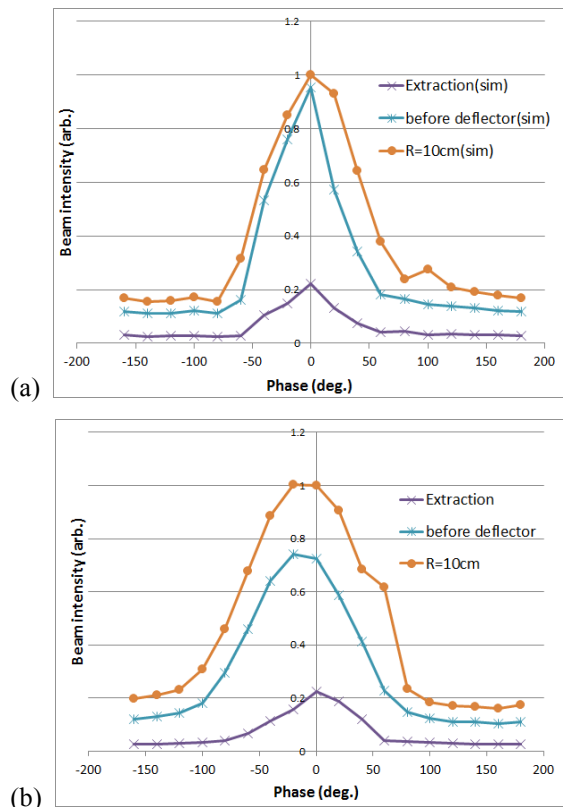


Figure 4: Beam intensity of each part of the cyclotron as functions of RF phase in the case of (a) simulation and (b) experiment. Ordinate is beam intensity of arbitrary unit where the intensity at R=10cm.

R=10cmの領域、デフレクター前、出射の各々の、R=10cmの領域を1とした相対的なビーム強度を、位相を変えながらシミュレーションによって求められたものを Fig. 4 (a) に、実際の測定値を Fig. 4 (b) に示す。ここで、位相の0点は入射から出射までの透過効率が最大になる点として定義した。

Figure 4 (a)のグラフの詳細についてみると、位相の進んだもの(横軸が負の部分)は位相の遅れたもの(横軸が正の部分)よりデフレクター前では多い。しかしこれらの粒子は大部分が出射していない。つまり、進んだ位相で入射した粒子はインフレクターや中心領域は通過するものの大部分がデフレクター以降で失われている。実際のサイクロトロンにおいても、Fig. 4(b) が示すように、位相が進んでいるものは中心領域では多く残っているがデフレクター以降で失われるという似た傾向を示している。ピーク付近のより詳細なビームの失われる位置と位相の関係を Fig. 5 に示した。出射効率が最大になっているのは315°の条件だが、入射効率が最大になるのは295°であり、20°の差がある。

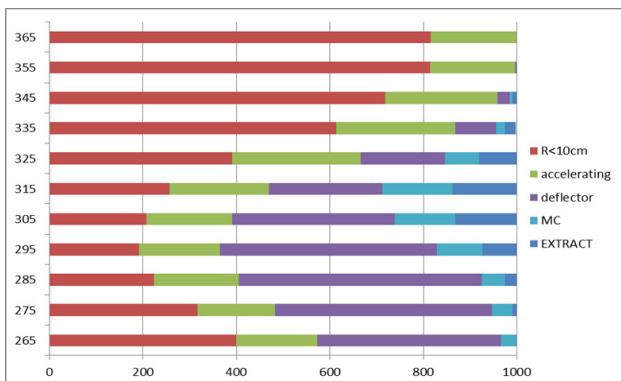


Figure 5: Particle numbers lost in each point or extracted, changing buncher phase in simulation.

入射効率が最大になる位相と出射効率が最大になる位相を一致させ、その位相で入射するようにバンチャーを調整すれば、総合的な透過効率が最大になると考えられる。この条件を実現するためには、内側から外側にかけて位相のずれに相当する位相を進ませるように等時性磁場から磁場を調整すればよい。これによって取り出しまでのターン数が増えるものの、透過効率が上昇する可能性がある。

## 5. 大強度のビームを入射した場合の空間電荷効果による透過効率の低下

空間電荷効果によってビームは広がり、透過効率は低下する。シミュレーションによって空間電荷効果で制限され始めるビーム強度を推定した。Figure 6 は入射するビームの強度を変えて、それぞれの位置で残っているビーム量を示したグラフである。入射したビーム量が1300  $\mu\text{A}$  まではビーム透過率は各場所ではほぼ一定である。実際には、デフレクターで失

われるビーム量が100  $\mu\text{A}$  という状況ではデフレクターのセプタム電極が損傷を受けるため、電流値を上げることができないが、加速は可能であることを示している。また、今回のシミュレーションに含まれていない入射ラインでの空間電荷効果を考慮に入れる必要がある。

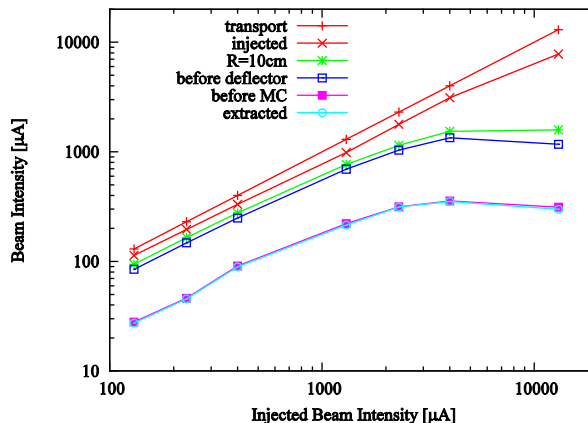


Figure 6: Beam intensity of each part by changing injected beam intensity.

## 6. ビームのエネルギー広がり最小になるRF周波数

シミュレーション上で、ビームのエネルギーをRF周波数を変更してプロットしたものが Fig.7 である。通常の運転時のRF周波数は20 MHzである。エネルギーが最大になるRF周波数(20.002 MHz)よりも高い周波数(20.005 MHz)でエネルギー広がり最小になっている。

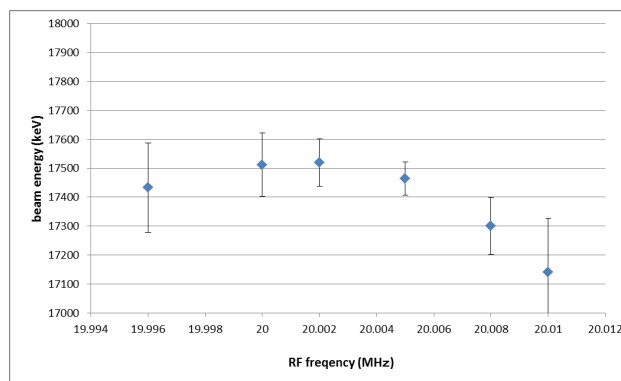


Figure 7: Beam energy and energy spread variation by changing RF frequency.

## 7. まとめ

サイクロトロン内のビームの挙動について、シミュレーションと実際の値を比較し、改善が可能である点を発見した。多数の粒子のシミュレーションを行い、位相を変えながらビームの失われる位置を

特定した。これらのシミュレーションの結果を利用することでサイクロトロンの出射ビーム強度を向上することを目指している。

### 参考文献

- [1] S. Hojo, Proceedings of this conference. FSP005
- [2] V.L. Smirnov, S.B. Vorozhtsov, Proc. of RUPAC2012 TUPPB008 325 (2012)
- [3] V.L. Smirnov et al., Proc. of IPAC2012 292 (2012)
- [4] <https://www.cobham.com/about-cobham/aerospace-and-security/about-us/antenna-systems/specialist-technical-services-and-software/products-and-services/design-simulation-software/opera/opera-3d.aspx>
- [5] S. Hojo, Proceedings of IPAC2014, Dresden, Germany MOPRI080 pp794-796 (2014).
- [6] S. Hojo, Proceedings of this conference. MOOM03
- [7] M. M. Gordon, Particle Accelerators Vol. 13 pp. 67-84 (1983)
- [8] M. Nakao, Proceedings of IPAC2014, Dresden, Germany MOPRI081 pp797-799 (2014).