

サイクロトロン NIRS-930 における共鳴によるビームロスを防ぐための シミュレーション研究

SIMULATION STUDY TO AVOID THE BEAM LOSS CAUSED BY RESONANCE AT CYCLOTRON NIRS-930

中尾 政夫^{#,A)}, 北條 悟^{A)}, 片桐 健^{A)}, 杉浦 彰則^{A)}, 野田 章^{A)},
宮原 信幸^{A)}, 涌井 崇志^{A)}, 野田 耕司^{A)}, 後藤 彰^{B)}
Masao Nakao^{#,A)}, Satoru Hojo^{A)}, Ken Katagiri^{A)}, Akinori Sugiura^{A)}, Akira Noda^{A)},
Nobuyuki Miyahara^{A)}, Takashi Wakui^{A)}, Koji Noda^{A)}, Akira Goto^{B)}
^{A)} QST, National Institute of Radiological Sciences
^{B)} RIKEN

Abstract

It is necessary to increase beam intensity of the NIRS-930 cyclotron for meeting the demand of medical RI. Increasing beam intensity with low deflector efficiency may lead melting or activation of deflector septum electrode. The simulation study using SNOP code was carried out with 18 MeV proton condition which is one of the most commonly used. The result show increasing extraction efficiency, the particle direction spread in front of deflector must be reduced. The condition of injection phase is found to important to realize that condition. If we realize high extraction current and low heat exposure of deflector septum magnet, it is necessary to decrease phase width of injection bunch. New buncher may realize such a situation.

1. はじめに

医療用の RI の需要を満たすために、サイクロトロンの大強度化が求められている。放医研には、サイクロトロンとして大型サイクロトロン NIRS-930 (Thomson-CSF, bending limit $K_b=110$ MeV, focusing limit $K_f=90$ MeV) [1] (Fig.1)と、PET 用核種製造専用の 2 台の小型サイクロトロンがある。NIRS-930 の大強度化を目指し、サイクロトロン内におけるビームの挙動を知るため、シミュレーションによる研究がなされてきた。サイクロトロン内では、プローブの位置でのみビームの量を測定できるが、シミュレーションでは失われた位置やその場所に至るまでの軌道を計算することが可能である。本研究で用いた SNOP コード[2,3]は、サイクロトロンの入射から出射までを連続的に、space charge を考慮に入れた計算が可能である。ハーモニックが 1 の場合については、既に NIRS-930 における位相やビーム効率等の再現性が確認されている [4]が、現在最も頻繁に使用されている、18MeV の陽子のハーモニックが 2 の加速の場合について、シミュレーションを行った。

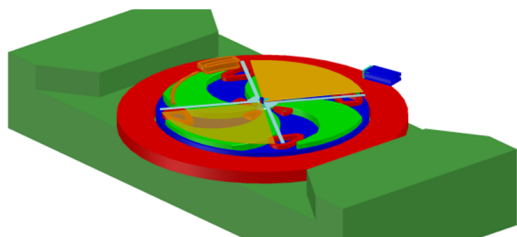


Figure 1: Calculation model of NIRS-930.

NIRS-930 において、18MeV の陽子の強度を RI 製造の需要を満たすために現在の 20 μ A から 30 μ A に増強しようとするならば、どのような変更が必要かを検討している。ここで、現在の取り出し効率は 57%であるが、イオン源の増強などでビームの強度を上げた場合に、取り出し効率が上がらなければ、デフレクターの熱負荷、放射化の問題が発生する。特に、デフレクターのプリセプタム電極 (Fig.2)が最もビームが衝突する部分である。一方で、phase slit 等を用いてビームを切る方法では、効率は向上しうるが取り出し強度は増加しない。デフレクターの効率を高くして取り出し強度を上げる方法が必要である。

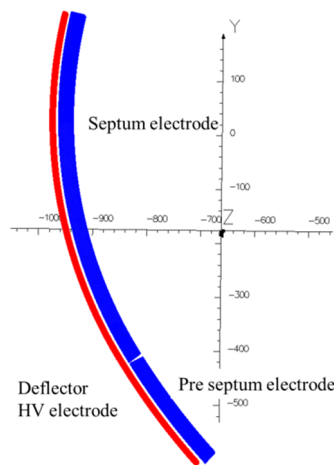


Figure 2: Each parts of deflector electrodes.

[#] 現在の所属は大阪大学 核物理研究センター nakaom@rcnp.osaka-u.ac.jp

2. SNOP を用いたシミュレーションスキーム

SNOP は 3 次元磁場・電場データを用いて、空間電荷力を考慮に入れて、サイクロトロン多数の粒子の軌道を計算できるプログラムである。OPERA-3D [5]を用いて鉄心やコイルの形状から磁場を、電極の形状から電場を 3 次元的に計算して使用した。

磁場データは、メインコイルとトリムコイルによって生成する磁場に、ハーモニックコイルとマグネティックチャンネルの各コイルの磁場を加えている。また、電場はインフレクターとデフレクターの静電場に Dee 電極の RF 電場(静電場に三角関数をかけたもの)を加えている。この近似は実際の状況を再現しつつ計算時間を減らすことに貢献している。また、各電極やチェンバー、スリットの物理的な位置情報を入力し、その各面に衝突した粒子が失われることをシミュレーションする。

粒子の軌道は入射から出射まで連続的に、4 次のリングクッタ法を用いて計算される。空間電荷効果は、PP 法(各マクロパーティクルの間のクーロン力を直接計算する)と、FFT と Poisson 境界条件を用いた PIC(Particle-in-cell)法の両方で計算され、両者がコンシステントになるように時間刻みとセル刻みを決定した。10³ 粒子以上では、PIC 法が PP 法よりも早いいため、PIC 法を標準的に用いた。

3. シミュレーションの結果

3.1 ビームロスが起こっている箇所の特定制と出射効率の向上

多くの粒子が出射の課程で失われるが、その原因をデフレクター前における粒子の位相空間内の座標で分類した図を Fig. 3 に示す[6]。Figure 3 の左の Another round の領域は、デフレクターのセプタム電極の内側を通ることを示していて、その領域の粒子はもう 1 周して R が増加して再びデフレクター前にやってくる。Extracted の領域は出射する領域であり、その周囲はそれぞれ図に示された要素に衝突してビームが失われる領域である。図で示されている各要素のうち、デフレクターの電極名は Fig. 2 に示した通りである。

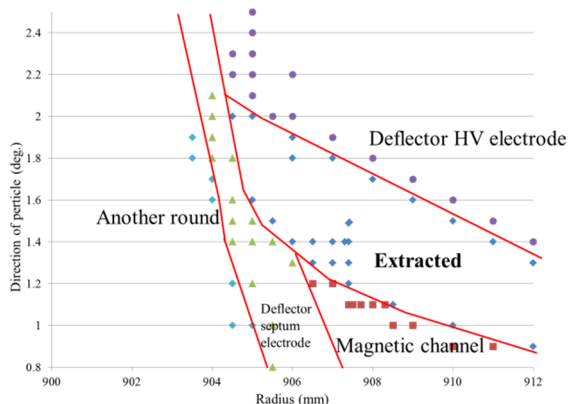


Figure 3: Phase space plot in front of deflector and simulated destination of the particle. Particle comes to inside the deflector septum turns another round and dees accelerate the particle again.

3.2 ビームロスが起こっている箇所の特定制と出射効率の向上

Figure 3 に、入射からデフレクター前までシミュレーションしたバンチの結果を重ねた結果が Figure 4 である[6]。それぞれ初期位相幅が 10°で、入射タイミングを 20°ずらしたものを図に書き入れた。入射タイミングのずれがデフレクター前に置ける進行方向の違いとなって現れるので、入射位相幅の大きいビームはデフレクター前における進行方向広がり大きく、Figure 3 に Extracted と示された出射アパチャーよりも縦長のビームになれば出射効率は低下する。ここでデフレクターの角度を変化させても出射アパチャーは位相空間の縦方向には動くが出射アパチャー自体の幅はほとんど変化しない。

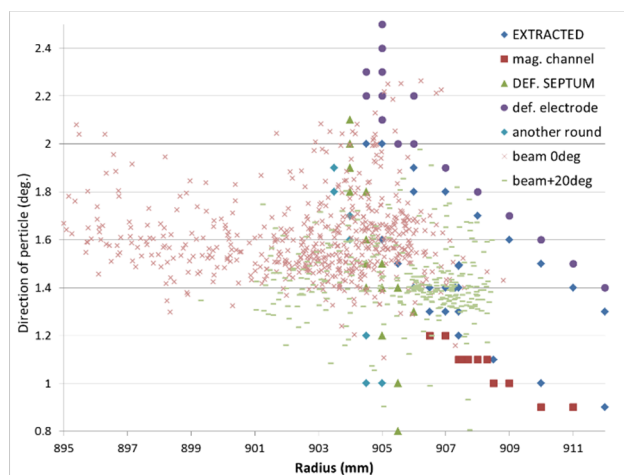


Figure 4: Extraction simulation results of some points in the phase space before deflector and the bunch injected in certain RF phase.

10⁴ 個の粒子を、入射エネルギー 5.9keV、ビーム電流 105μA、横方向には $\epsilon_x = \epsilon_y = 16\pi$ mm mrad のガウス分布、進行方向には空間的には一様分布で速度広がり 0.5% の分布で入射したときのシミュレーションを、バンチの位相広がりを変化させていくつかの条件で行った。Figure 5 に示された結果から、出射効率は位相幅が 30°を超えると急速に減少することが分かる。入射効率も位相幅に対して単調減少であることから、セプタム電極に負担を与えずに出射ビーム強度を上げるためには入射位相幅を 30°程度以下に抑える必要がある。

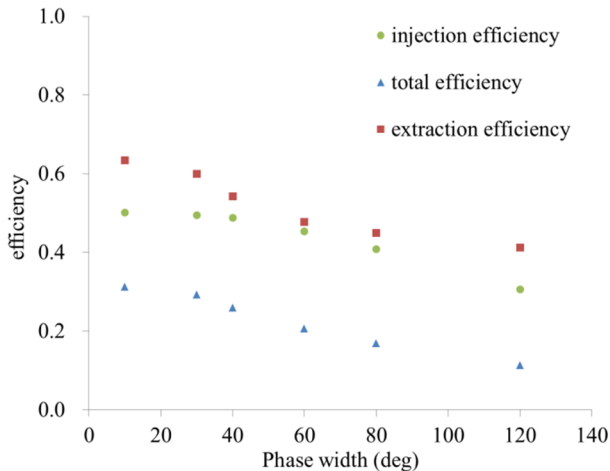


Figure 5: Bunch phase length dependence of injection, extraction and total efficiencies. Generally, longer phase length bunch has less efficiency. Particularly, extraction efficiency decreases drastically between 30° and 60° region.

3.3 共鳴によるデフレクター効率の低下

サイクロトロン内でのビームロス的大部分は入射部でインフレクターに衝突するか、加速位相に乗れずに中心領域で失われるか、出射部で電極等に衝突するものである。ただし、加速過程においても急激にビームロスが増大することがある。これは $\nu_z=0.5$ の共鳴によってZ方向の振動が増大していることが原因と考えられる。共鳴が起こるかどうかは入射粒子の条件によっても変わるため、磁場を変化させた時に出射粒子数は連続的に変化する。ここでチェンバーはZ方向に ± 20 mmのアパチャーがあるが、デフレクターのセプタム電極の断面はコの字型になっており、アパチャーが ± 7 mmしかない。このため、共鳴したときに他の箇所よりビームロスが起こりやすいと考えられる。

Figure 6 に、デフレクターセプタム電極において粒子が失われた位置を、デフレクターに沿って、横軸を中心角、縦軸をZ座標として円筒座標で示した。Figure 6のdefaultの条件では、デフレクターの効率は51%あるが、それより 5×10^{-5} だけメインコイルの磁場を減少した条件ではデフレクター効率が46%に減少する。ここではデフレクターの上下に衝突する粒子が増加している。 5×10^{-5} 程度の磁場の変化によって共鳴するかどうか急速に変化する。実際のサイクロトロンでもこの現象が起こっているのかどうか調査する必要がある。

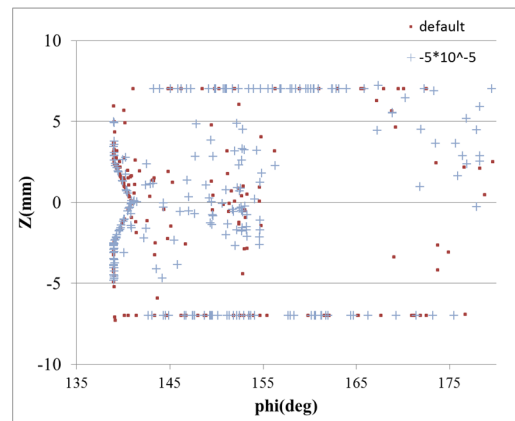


Figure 6: Beam lost point at deflector. Slightly change of 5×10^{-5} make resonance and particles are bombarded to upside and downside of deflector septum.

4. 結論

NIRS-930 サイクロトロンについて、SNOP プログラムを使用したシミュレーション研究が行われてきた。出射においてビーム損失の場所を特定したところ、デフレクター前の粒子の運動方向が重要であることが判明した。運動方向の広がりが入射ビームのバンチ幅を縮小することで減少する。出射ビーム量を高くし、かつデフレクターセプタム電極の熱負荷を押さえるという条件では、入射バンチの位相幅を縮小することが必要である。このような入射バンチを作るために、新たなバンチャーなどが求められている。

謝辞

本研究で使用した SNOP プログラムを開発した、また様々なアドバイスをいただいた、V. Smirnov 氏、S. Vorozhtsov 氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] S. Hojo *et al.* Progress on the upgrade for TRT at NIRS cyclotron facility, Proc. of HIAT2015 MOPA07 (Yokohama, Japan, 2015).
- [2] V. L. Smirnov and S. B. Vorozhtsov, SNOP - Beam Dynamics Analysis Code for Compact Cyclotrons Proc. RuPAC 2012 (St. Petersburg, Russia, 2012).
- [3] V. L. Smirnov, Computer Modeling of a Compact Isochronous Cyclotron Physics of Particles and Nuclei 46 pp. 940-955 (2015).
- [4] V.L. Smirnov *et al.*, Quantitative Simulation of NIRS-930 Cyclotron, Proc. of IPAC2012 292 (New Orleans, USA, 2012).
- [5] OPERA-3D, Cobham plc <http://www.cobham.com/>
- [6] M. Nakao *et al.*, Multi Particle Simulation for the Cyclotron NIRS-930 Proc. of HIAT2015 MOPA08 (Yokohama, Japan, 2015).