

## NIRS-930 における加速位相の調整について

### ADJUSTMENT OF BEAM PHASE USING PHASE PROBE AT THE NIRS-930 CYCLOTRON

北條 悟, 片桐 健, 中尾 政夫, 杉浦 彰則, 野田 章  
Satoru Hojo, Ken Katagiri, Masao Nakao, Akinori Sugiura, Akira Noda  
National Institute of Radiological Sciences

#### Abstract

The NIRS-930 cyclotron of the National Institute of Radiological Sciences (NIRS) has been used for production of short-lived radio-pharmaceuticals for PET, research of physics, developments of particle detectors in space, and so on[1]. The NIRS-930 has twelve trim coils for generation of the isochronous fields. Until recently, currents of the twelve trim coils had been adjusted only by monitoring the output beam intensity. In order to exactly produce the isochronous fields, a phase probe has been installed in the NIRS-930. The trim coil current was optimized to exactly produce the isochronous fields for 34 MeV helium beams by the phase probe. And the beam phase excursion could be reduced within 10 degrees from ideal phase. The beam intensity at 34 MeV helium beam was increased to 20  $\mu$ A.

#### 1. はじめに

放射線医学総合研究所のサイクロトロン NIRS-930 は、RI 生産を主目的として様々な目的で利用されている。主目的である RI 生産においては、高強度のビームが要求されており、サイクロトロンに関しても、高強度化のための改良開発を行っている。そのひとつとして、等時性磁場の形成と、ビームの効率的な加速のために、位相プローブを導入した。位相プローブは、上下 10 対の電極があり、最も内側の位相プローブを No.1 としている。No.1 電極の設置されている半径位置は、234-292 mm で、これより内側の位相を測ることはできない。最も外側の No.10 電極は、891-949 mm である。NIRS-930 は 12 対のトリムコイルがあり、位相プローブが導入される以前は、ビーム強度が増えるように調整し、最外周まで調整を行っていたため、等時性磁場を作成することができていなかった。位相プローブを導入してからは、半径方向の相対的なビームの位相を比較し、トリムコイルの電流を調整し、等時性磁場の形成を行ってきた。

ビームの高強度化として、具体的な 1 例として、34 MeV Helium がある。ターゲットへのビーム強度要求として、20  $\mu$ A の要求があり、ターゲットまでの輸送効率は他のビームにおける低い例である 90% として、これを実現するためにも NIRS-930 からの取り出し後の強度では、少なくとも 22  $\mu$ A が必要となる。この値を目標としてビーム位相および入射の調整を行った。ビーム強度の上限の目安としては、セプタムに当たる電流値がある。NIRS-930 の取出し高圧デフレクタのセプタムは、入口側 200 mm 程度で損失したビーム電流をモニターできるようになっており、ここでの損失が大きくなるようにビームを調整し、取出し強度を増強する必要がある。

#### 2. 絶対位相の測定と調整

等時性磁場の形成のみであれば、位相プローブによる半径方向の相対的な位相の測定のみで充分である。しかしながら、より効率良く理想的な位相で加速をするためには、Dee 電圧に対する絶対的な位相を測定する必要がある。そのため、各周波数においての信号ライン時間長を測定し、設置位置による角度差を考慮し、Dee 電圧ピックアップ信号に対する、絶対的なビーム位相の測定を行った。RI 生産用のビームで要求強度 20  $\mu$ A の 34 MeV ヘリウムについて、強度増強を目指し、理想的な加速位相への調整を行った[1]。このときの位相調整の結果を Figure 1 に、等時性磁場の調整前を青三角、調整後を赤丸に示す。ここで、理想的な加速位相を縦軸の 0 度としている。等時性磁場を最適化する前は、40 度の位相の幅があったのに対して、トリムコイル電流の調整を行い、等時性磁場を最適化した後では、10 度の位相幅にすることができている。このときのビーム強度、効率をそれぞれ Table 1, 2 に示す。等時性磁場を最適化した後に取り出し機構の調整や、ハーモニックコイル、入射ラインのエレメントなどの調

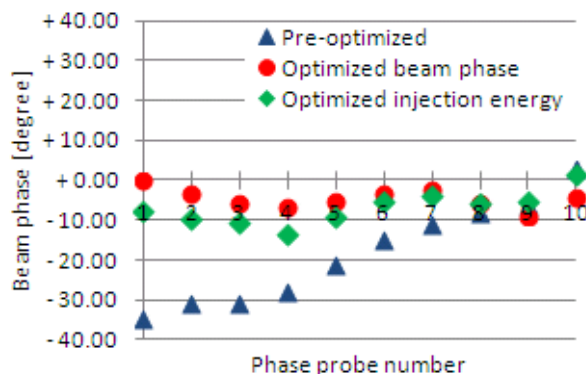


Figure 1: The beam phase of 34 MeV helium.

#s\_hojo@nirs.go.jp

整を行っている。その結果、取り出しの効率が上がり、セプタムでのビームロスが減らすことができ、取り出される強度を上げることができた。しかしながら、インフレクターの入射効率や加速効率が下がってしまっている。その原因として考えられるのが、位相プローブ No.1 で理想的な位相へと調整するため、サイクロトロンの内側のトリムコイルである C1、C2 により、中心領域の磁場の調整をおこなっており、これによりインフレクターの入射効率や、加速効率が下がった為、再調整が必要となった。

Table 1: The Beam Intensity of 34 MeV Helium

Beam monitor	Pre-optimized [μA]	Optimized beam phase [μA]
Inflector	31.0	39.0
Main probe	(13.4)	15.7
Extraction probe	15.0	17.0
Extracted beam	12.4	14.9
Beam loss at Septum electrode	2.2	2.15

Main Probe: A Main radial probe set at the radial position of 100 mm. The detected current at the main radial probe decreases in pre-optimized data, where the main radial probe was affected by insulation failure in this probe head.

Extraction probe: The beam probe at deflector entrance.

Table 2: The Transmission Efficiency of Each Beam Monitor at Alpha 34 MeV

Efficiency	Pre-optimized	Optimized beam phase
Main probe (R=100) /Inflector	43.2%	40.3%
Extraction probe /Inflector	48.4%	43.6%
Extracted beam / Extraction probe	82.7%	87.8%
Beam loss at septum electrode /Extracted beam	17.7%	14.4%

### 3.入射電圧の調整

中心領域の位相調整の結果、入射の効率が下がってしまい、そのために入射電圧を変更し、再調整を行った。

これまでの、入射の電圧の設定は、インフレクター電極の構造寸法である磁場偏向軌道半径と、サイクロトロンの中心磁場から求められるが、この中心磁場の値は、概略計算値から設定されたものであった。この設定値から大きく調整を行い、理想的な加速位相へ近づけるように調整し、目標とする

ビーム強度を実現することができた。結果的に入射エネルギーは、5.0 keV から 5.4 keV へと上った。これにより、中心領域の磁場が C1、C2 トリムコイル電流の変更により 50 [Gauss]程度上昇する結果となった。このときの、ビーム位相分布を Figure 1 の緑菱形に示す。30 度以上の理想的な位相からの差があり、等時性磁場からのズレ幅も 40 度と大きかった Pre-optimized と比較し、加速位相の調整を行い、理想的な位相からの差と等時性磁場からのズレ幅をあわせても ±10 度と、大きく改善されている。

また、各ビームモニターにおけるビーム電流値を Table 3 に示す。入射の強度を 50 μA まで上げることができ、これにより、取出し後の強度を目標とする 22 μA を確認することができた。各調整条件にて各ビームモニターにおけるビーム強度を併せて Figure 2 に示す。等時性磁場の調整と加速位相の最適化を行っただけでは、インフレクターから半径 100 [mm]までの傾きが大きく、入射の効率が低下しているのが明確に見える。また、下流の各モニターでの強度も微増した程度であった。これに対し、位相を最適化して更にこの位相に合わせた入射電圧へと調整し、大幅に強度が増強できている。

Table 3: The Beam Intensity of 34 MeV Helium at Optimized Injection Energy

Beam monitor	Optimized injection energy [μA]
Inflector	51.3
Main probe	24.6
Extraction probe	25.0
Extracted beam	22.3
Beam loss at septum electrode	2.5

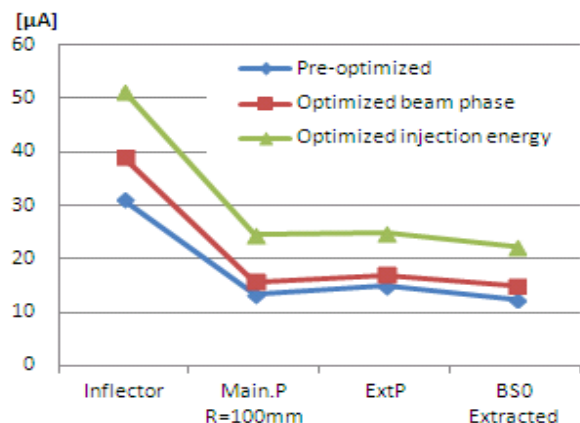


Figure 2: The beam intensity of 34 MeV helium.

また、各ビームモニターにおける効率を Table 4 に示す。インフレクターからの入射効率は 48%となっている。また、取出しの効率も高く、89.2%で、これに伴い、取り出されたビームに対するセプタムでのビーム損失の割合も、11.2%と下げることができ

た。  
これまでの各調整条件における効率をまとめて Figure 3 に示す。先にも述べた通り、等時性磁場と加速位相の最適化を行った際には、取出し効率のみが高くなる結果となっており、インフレクターでのビーム強度に対する入射の効率は低下している。入射エネルギーを最適化後の調整においては、入射効率、取出し効率ともに高上させることができています。

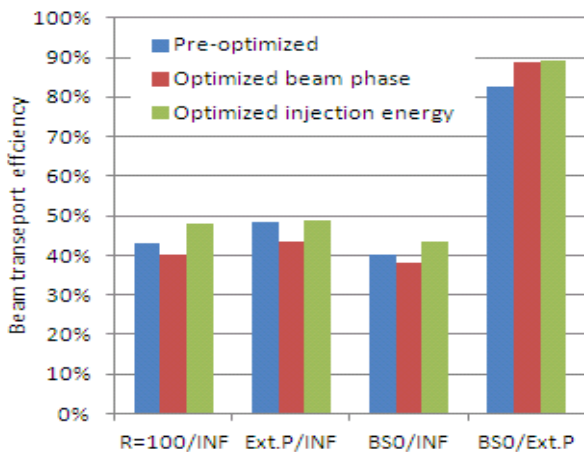


Figure 3: The beam efficiency of 34 MeV helium.

Table 4: The Beam Intensity of 34 MeV Helium at Optimized Injection Energy

Beam monitor	Optimized injection energy
Main probe (R=100) /Infllector	48.0%
Extraction probe /Infllector	48.7%
Extracted beam / Extraction probe	89.2%
Beam loss at septum electrode /Extracted beam	11.2%

#### 4.調整後のターンパターン

入射電圧を変更することによる、加速位相の調整結果において、ディファレンシャル(0.5 mm)プローブにて、ターンパターンの違いを比較した。中心から 150 mm からのモニターとなっている。

まず、Pre-optimized パラメータでのターンパターンを Figure 4 に示す。このときの位相幅は、39.4 度で、No.1 プローブの位相は、-19.7 度となっていた。これに対し、入射電圧と加速位相の調整後のターンパターンを Figure 5 に示す。このときのビーム位相幅は±10 度以内に納まっており、No.1 電極は、-7.8 度となっている。中心に近い、150 mm 付近では、ターンセパレーションがはっきりとしており、ターン毎の加速度が大きいことが確認できる。

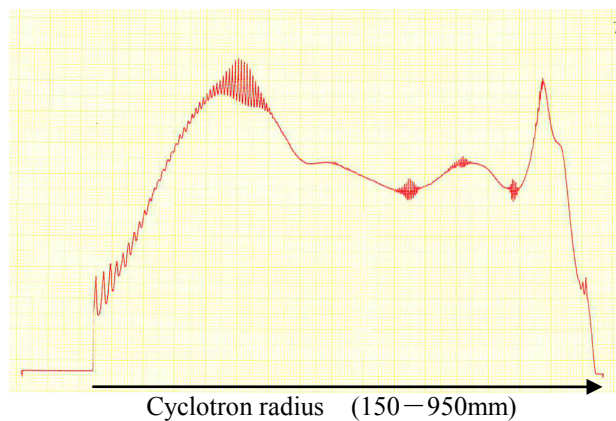


Figure 4: The turn pattern of 34 MeV helium beam when the pre optimized.

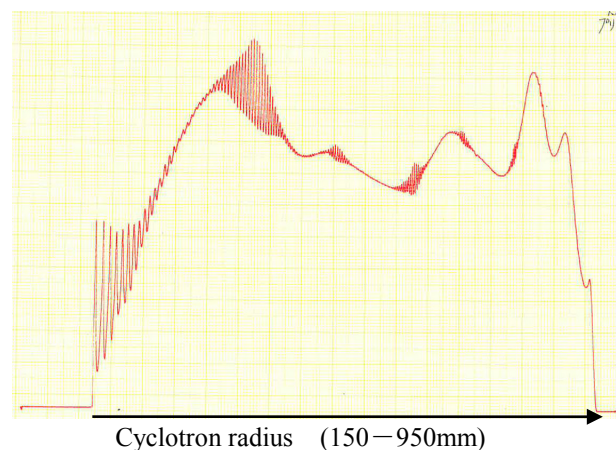


Figure 5: The turn pattern of 34 MeV helium beam when the optimized beam phase and injection energy.

#### 5.まとめと今後

入射電圧を含めて中心領域の磁場を調整することにより、理想的な加速位相へと調整を行うことができた。その結果、目標とした取出し強度を実現することができた。今後、入射電圧の初期設定について中心領域のシミュレーションを応用することを含めて検討や、ターンパターンと加速位相との比較を行い、さらに、Garren and Smith method[2]や、加速周波数スキャンによる方法[3]など、他の手法との比較による確認を行う予定である。

#### 参考文献

- [1] S. Hojo, Proceedings of IPAC2014, Dresden, Germany MOPRI080 pp794-796 (2014).
- [2] A. A. Garren and L. Smith, International Conference on Sector-focused Cyclotrons and on Cyclotrons and their Applications, Geneva, Switzerland, 1963, CERN Yellow Report No. 63-19.
- [3] S. Kurashima, Review of scientific instruments. 81, 033306 (2010)