

## AVF サイクロトロンの入射系の改良

### IMPROVEMENT OF INJECTION SYSTEM OF THE AVF CYCLOTRON AT RCNP

中尾政夫<sup>#, A)</sup>, 福田光宏<sup>A)</sup>, 依田哲彦<sup>A)</sup>, 神田浩樹<sup>A)</sup>, 安田裕介<sup>A)</sup>, 友野大<sup>A)</sup>, 鎌倉恵太<sup>A)</sup>, 森信俊平<sup>A)</sup>,  
齋藤高嶺<sup>A)</sup>, 畑中吉治<sup>A)</sup>, 田村仁志<sup>A)</sup>, 永山啓一<sup>A)</sup>, 原周平<sup>A)</sup>, Koay Hui Wen<sup>A)</sup>, 森田泰之<sup>A)</sup>, 原隆文<sup>A)</sup>,  
武田佳次朗<sup>A)</sup>, 大本恭平<sup>A)</sup>

Masao Nakao<sup>#, A)</sup>, Mitsuhiro Fukuda<sup>A)</sup>, Tetsuhiko Yorita<sup>A)</sup>, Hiroki Kanda<sup>A)</sup>, Yuusuke Yasuda<sup>A)</sup>, Dai Tomono<sup>A)</sup>, Keita  
Kamakura<sup>A)</sup>, Shunpei Morinobu<sup>A)</sup>, Takane Saito<sup>A)</sup>, Kichiji Hatanaka<sup>A)</sup>, Hitoshi Tamura<sup>A)</sup>, Keiichi Nagayama<sup>A)</sup>, Shuhei  
Hara<sup>A)</sup>, Koay Hui Wen<sup>A)</sup>, Yasuyuki Morita<sup>A)</sup>, Takafumi Hara<sup>A)</sup>, Keijiro Takeda<sup>A)</sup>, Kyohei Omotonako<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

#### Abstract

At the Research Center for Nuclear Physics (RCNP) at Osaka University, the AVF cyclotron is being improved to meet the demand for high-intensity and high-quality beams. One of the improvements is to increase the acceleration voltage of incident ions from 15 kV to a maximum of 50 kV to enable low emittance and high intensity beams. In this presentation, we will report on an injection system consisting of an inflector, central region of Dee electrode, phase slit, etc., which are important for increasing the intensity and quality of a beam. In addition, in order to accelerate the various beams required by RCNP, it is necessary to change accelerating harmonics to 1, 2, 3, and 6 easily. Space charge effects need to be taken into account when considering the incidence of high intensity beams. Therefore, we calculated the beam trajectory using SNOP developed at JINR and OPAL developed at PSI.

#### 1. はじめに

大阪大学核物理研究センター(RCNP)では、高強度かつ高品質のビームの要求に応えるために AVF サイクロトロン改良工事が行われている[1,2]。改良点の一つとして、入射イオンの加速電圧を 15 kV から最大 50 kV に向上させ低エミッタンスかつ大強度の入射を可能にすることが挙げられる。本発表では、ビームの高強度化・高品質化に重要な、垂直入射ラインからサイクロトロンに入射するためのインフレクター、Dee の電極先端部、位相スリット等からなる入射系について報告する。入射電圧が高くなりインフレクターが大型化した場合でも、ビームをサイクロトロンの中心を回るように入射し、位相スリットや位相バンチング技術を用いて位相幅の小さい状態で加速するための検討を行った。また、RCNP で要求される多種のビームを加速するためには、加速ハーモニクスを 1,2,3,6 と変更する必要があるが、その際にもインフレクターのみの交換だけで済むような設計を行った。高強度のビームの入射の検討には空間電荷効果を考慮に入れる必要がある。そこで、OPERA-3d [3]によって計算された電場と磁場を用い、ロシア JINR の Smirnov 氏らが開発した SNOP [4,5]と、スイス PSI で開発された OPAL [6]を併用して入射するビーム軌道の計算を行った。

#### 2. インフレクターと中心領域

今回のアップグレードでは、1 周当たりのエネルギー利得を増加させるため、RF 加速部は現状の 180 度 Dee 電極 1 台から 87 度 Dee2 台に変更する(Fig. 1)。また、入射エミッタンス低減のために入射電圧を最大 16kV から 50kV に上昇させる。そこで、インフレクターと中心領

域を更新する必要がある。インフレクターは現在と同様にスパイラル型インフレクター[7-9]を使用する。ここで、インフレクターと中心領域に必要な主な条件として、

- 入射粒子は中心平面に水平に入射すること。鉛直方向のサイズが広がらないこと。
- できるだけ多くの粒子を加速位相に乗せ、その広がりは最小化すること。前項の目的のために弱収束するよう中心の磁場はおよそ 100 ガウス程度等時性磁場から強くなっているため、それを考慮に入れ、かつ時間的に電圧勾配のあるタイミングでギャップを通過させ位相バンチング[10]を起こす。
- 周回軌道はできるだけサイクロトロンの中心を周ること。つまり偏心を少なくすること。返信がおよそ 1cm を超えるとバレーコイルで補正が不可能になり取り出し効率が悪化する。
- これらの条件は、ハーモニク 1,2,3,6 の各加速条件で実現でき、可能ならばインフレクターの交換だ

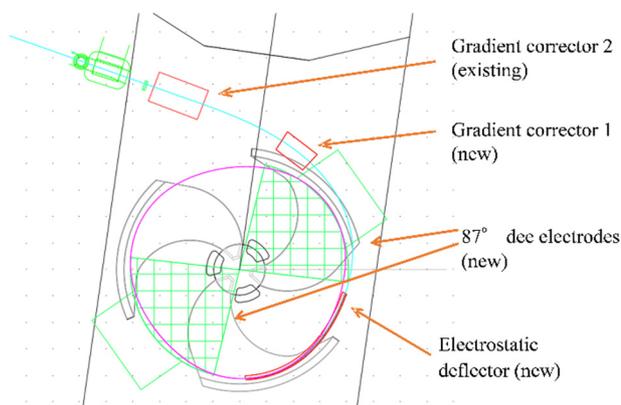


Figure 1: Schematic picture of AVF cyclotron of RCNP after intended upgrade.

<sup>#</sup> nakaom@rcnp.osaka-u.ac.jp

けで対応可能にすること。

が挙げられる。これに対応するための新たな中心領域を Fig. 2(b) に示した。Figure 2(a) は現況の中心領域である。緑で示された軌道が Proton 80 MeV(ハーモニクス 1)、橙色で示された軌道が Proton 65 MeV(ハーモニクス 2)、紅紫色で示された軌道が  ${}^4\text{He}^{2+}$  30 MeV(ハーモニクス 6) である。インфлекターはハーモニクス 1, 2 と 3, 6 で逆方向に取り付ける。また、ハーモニクス 1 の場合のみ異なるインфлекターを取り付けることで Proton 65 MeV と Proton 80 MeV の二つの重要なビームの条件で 50keV の最大エネルギーで入射が可能になった。ここで図のすべての条件で加速可能であることは示されたが、軌道の中心がサイクロトロンを中心から 10mm~15mm ずれている。これを改善するためにさらなる検討が必要である。

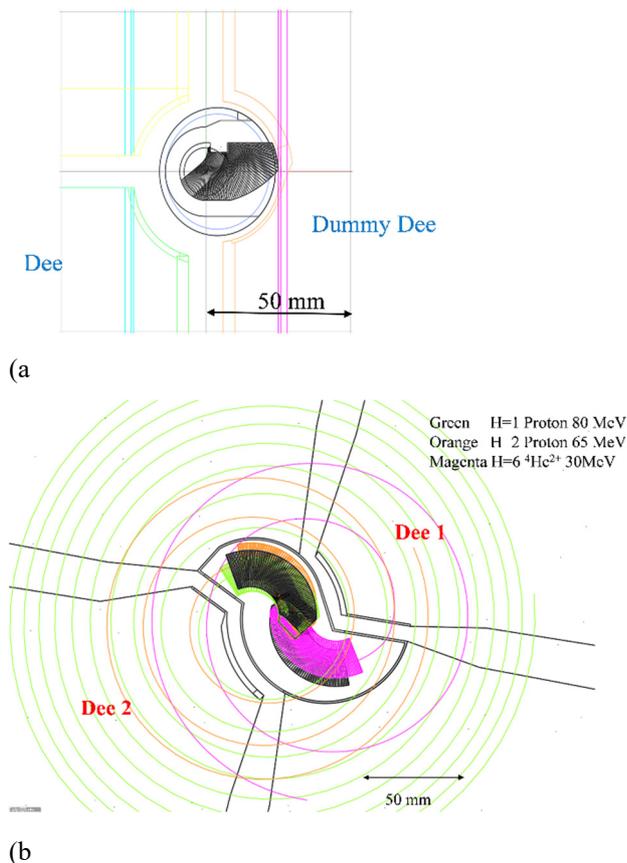


Figure 2: (a) Existing and (b) new inflector electrodes and central part of dee and dummy-dee electrodes.

軌道の中心がサイクロトロンを中心からずれている場合、各ヒルを通過する道のりが各々異なるため歳差運動が発生する。中心が移動する方向のターンセパレーションは縮まり、逆方向のターンセパレーションは広がる。軌道中心のずれが大きい場合には方向によってはターンセパレーションが負になる場合もある。デフレクターの方角で負になっていると、想定したエネルギーより低いエネルギーでビームが取り出されてしまう。一方でターンセパレーションが大きい位置にデフレクターがあれば取り出し効率を上げることができる。しかしながら、偏心が大きいほど各加速ギャップ間の粒子の道のりの差が大き

なるので、各加速ギャップでの RF 位相が理想的な位置からずれ、エネルギー広がりもエミッタンスも増大させてしまう。

### 3. アクセプタンス

ここまで記述された中心領域を使用したときのアクセプタンスを、SNOP による計算で見積もった結果を Fig. 3 に示す。インфлекター直前のメディアンプレーンから 70mm 上から、サイクロトロンに入射してから 3 ターンを通過した粒子を橙色、通過しなかった粒子を青色でプロットしている。ただしこの計算では空間電荷効果を考慮に入れていない。また、角度方向に 50mrad 以上の広がりがある粒子を想定していない。

Figure 3 は、6 次元エミッタンスのうちの 2 次元への射影であるため、青と橙が混合している。

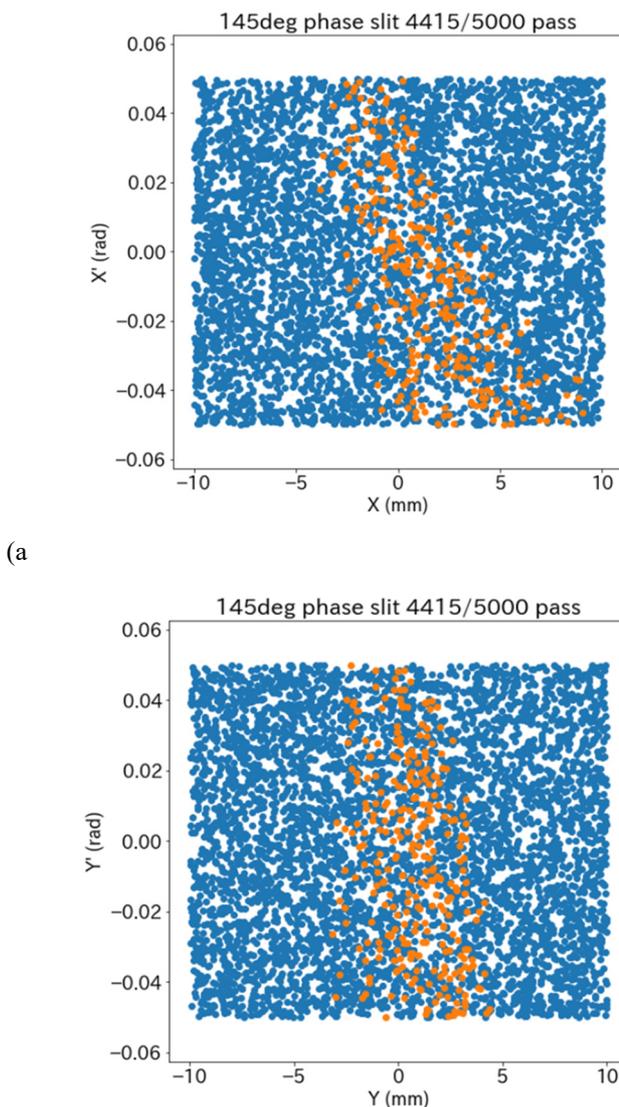


Figure 3: Acceptance of (a) x-direction and (b) y-direction from inflector to 3 turns.

#### 4. 結論

サイクロトロンへの入射エネルギーの向上、Dee 電極の更新に伴い、サイクロトロンの入射部の設計が進んでいる。偏心をさらに小さくしてビームの品質を向上させるために、さらに検討を続ける必要がある。

#### 謝辞

SNOPとOPALの開発者に対し、ソフトウェアの使用を許可して下さったことを感謝いたします。

#### 参考文献

- [1] Kanda *et al.*, In these proceedings, FSPI018.
- [2] Fukuda *et al.*, In these proceedings, FROH02.
- [3] OPERA-3D, Cobham plc; <http://www.cobham.com/>
- [4] V. L. Smirnov and S. B. Vorozhtsov, SNOP - Beam Dynamics Analysis Code for Compact Cyclotrons Proc. RuPAC 2012 (St. Petersburg, Russia, 2012).
- [5] V. L. Smirnov, Computer Modeling of a Compact Isochronous Cyclotron Physics of Particles and Nuclei 46 pp. 940-955 (2015).
- [6] A. Adelman *et al.*, "The OPAL (Object Oriented Parallel Accelerator Library) Framework}", Paul Scherrer Institut, PSI-PR-08-02, (2008-2018).
- [7] J.L. Belmont and J.L. Pabot, "Study of axial injection for the Grenoble cyclotron", IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-13 No. 4,191-193(1966).
- [8] P. Heikkinen, "Injection and extraction for cyclotrons", CAS, CERN 94-01, Vol. II, (1994).
- [9] N. Miyawaki *et al.*, "Geometric analysis of phase bunching in the central region of cyclotron" Nucl. Instr. and Meth. A715 (2013) 126.
- [10] M. Nakao *et al.*, TUP022 日本加速器学会プロシーディングス (2017).