

## AVFサイクロトロンの入射系の更新

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

中尾政夫<sup>#, A)</sup>, 福田光宏<sup>B)</sup>, 依田哲彦<sup>B)</sup>, 神田浩樹<sup>B)</sup>, 安田裕介<sup>B)</sup>, 友野大<sup>B)</sup>, 鎌倉恵太<sup>B)</sup>, 森信俊平<sup>B)</sup>, 齋藤高嶺<sup>B)</sup>, 畑中吉治<sup>B)</sup>, 田村仁志<sup>B)</sup>, 永山啓一<sup>B)</sup>, Koay Hui Wen<sup>B)</sup>, 森田泰之<sup>B)</sup>, 武田佳次朗<sup>B)</sup>, 大本恭平<sup>B)</sup>, Masao Nakao<sup>#, A)</sup>, Mitsuhiro Fukuda<sup>B)</sup>, Tetsuhiko Yorita<sup>B)</sup>, Hiroki Kanda<sup>B)</sup>, Yuusuke Yasuda<sup>B)</sup>, Dai Tomono<sup>B)</sup>, Keita Kamakura<sup>B)</sup>, Shunpei Morinobu<sup>B)</sup>, Takane Saito<sup>B)</sup>, Kichiji Hatanaka<sup>B)</sup>, Hitoshi Tamura<sup>B)</sup>, Keiichi Nagayama<sup>B)</sup>, Hui Wen Koay<sup>B)</sup>, Yasuyuki Morita<sup>B)</sup>, Keijiro Takeda<sup>B)</sup>, Kyohei Omoto<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Gunma University Heavy Ion Medical Center

<sup>B)</sup> Research Center of Nuclear Physics, Osaka University

#### Abstract

The AVF cyclotron at the Research Center for Nuclear Physics (RCNP), Osaka University is being upgraded in order to provide high quality and high intensity beams. One of the improvements is to increase the acceleration voltage of the injected ions from 15 kV to 50 kV at maximum to enable low emittance and high intensity beam injection. In this paper, we report on the injection system consisting of a baffle slit, inflector electrodes, Dee electrode tips and a phase slit, which are necessary for high quality beam injection of ions from the perpendicular injection line to the cyclotron. The injection system has been studied to minimize the eccentricity of the beam orbit, even when the injection voltage is high and the inflector is large, and to accelerate the beam with a small phase width using the phase slit and phase bunching technique. In addition, the design of the inflector was carried out to change the harmonics of the RCNP from 1, 2 and 3 to accelerate multiple beams, for which a common inflector is available. For the design, the electric and magnetic fields calculated by OPERA-3d TOSCA were used, and SNOP developed by Smirnov et al. in JINR, Russia, and OPAL developed in PSI, Switzerland, were used to calculate the beam trajectories to account for the space charge effects.

#### 1. はじめに

大阪大学核物理研究センター(RCNP)では、原子核物理の実験、ミューオン生成、医療用RI製造( $\alpha$ 線核医学治療)、ソフトウェア評価用中性子生成など多用途のビーム需要を満たすために、AVFサイクロトロン改良工事を行っている[1-5]。本発表では、改良のうちAVFサイクロトロン入射系について述べる。

イオン源の取り出し電圧を向上[4,5]させることで、電流を増加した場合でも空間電荷効果によるビーム広がりを減少させ高効率でビーム入射することができる。また、加速効率向上のためDee電極を180°の1台から90°の2台に変更するのでFig. 1のように機器配置が変更になる。それに対応するための入射系として、バフスリット、インフレクター、Dee電極先端部、位相スリット等の設計を行った。サイクロトロンから取り出されるビームのエネルギー広がりを低減するため、入射直後にビームを半径方向にカットすることで位相の制限を行う位相プローブの配置も重要になる。RCNP AVFは様々なイオン種・エネルギーに対応するため、ハーモニック1,2,3,6で加速する必要があるが、インフレクターの交換によりいずれの条件でも加速できるようにし、さらに交換の手間を省くためにハーモニック1,2,3の場合には共通インフレクターで入射できるようにした。大電流ビームの検討には空間電荷効果を考慮に入れる必要があるため、OPERA-3d [6]によって計算された電場と磁場を用いて、ロシアJINRのSmirnov氏らが開発したSNOP [7,8]と、スイスPSIで開発されたOPAL [9]を併用して入射するビーム軌道の計

算を行った。

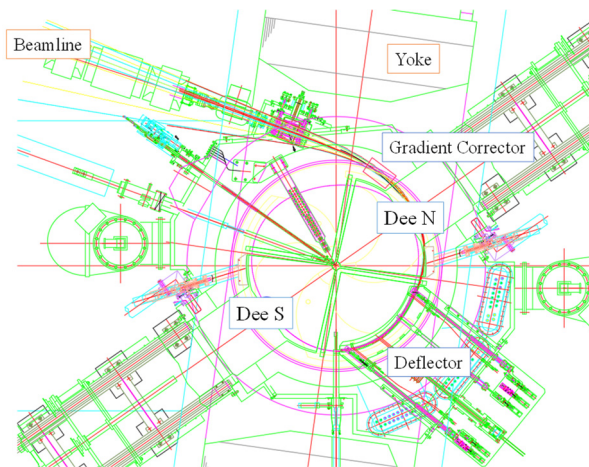


Figure 1: Schematic figure of the RCNP AVF cyclotron. Beamline and Yoke are now existing. Injection system, acceleration system (including Dees and cavity) and extraction system (including Deflector and Gradient Correctors) will be newly made.

#### 2. 中心プラグの更新

同じ粒子を同じエネルギーまで加速する場合入射エネルギーを上げればスパイラルインフレクターを大型化する必要があるが、このインフレクターを軸方向、下側から挿入するためにはFig. 2のようにサイクロトロンヨークからポールの中央部にある中心プラグに空けられた穴を

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

通過する必要があるが、穴は少なくとも直径 64 mm の大きさが必要である。現状では中心プラグのインフレクター下の隙間に電磁軟鉄を配置して磁場の低下を抑えているが、現在の駆動機構を使用し続けるため、駆動負荷は増やせないで電磁軟鉄を増加することはできない。ま

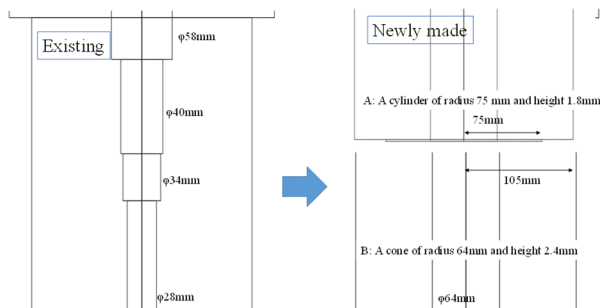


Figure 2: Existing center plug and proposed new center plug.

た、対称性を保つために上下両方の中心プラグを対称にする必要があり、これだけでは磁場の低下は避けられない。

単に中心プラグの穴の直径を拡大するだけでは、Fig. 3 のように TOSCA で計算した中心付近の磁場は 85 ガウス減少した。最も内側にあるトリムコイルは半径 161 mm

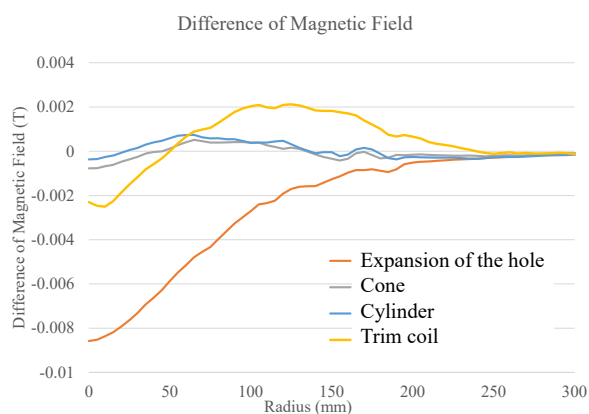


Figure 3: Difference of the magnetic field when the central plug hole is enlarged and their correction.

に存在するのでこの電流の増加で磁場を補正しようとすると、磁場が減少した範囲より外の半径 100 ~ 200 mm 付近の磁場が寧ろ増加してしまう。そこでトリムコイルを使用しなくても元の磁場を再現できるように中心プラグ中央部に突起をもうけることにした。突起の形状は円柱 (cylinder) と円錐 (cone) の 2 タイプとし (Fig. 2)、これらを含めて TOSCA で磁場計算を行うことで最適値を計算した。その結果、平均磁場は円柱の出っ張りで現在との差を 10 ガウス以下に補正可能であることが示された (Fig. 3)。このうち加工精度の高い円柱の出っ張りを採用した。

### 3. 中心領域の軌道とインフレクター電極

RCNP では多種のイオンを幅広いエネルギーで加速する必要がある。ここで以下のようなことを考慮する必要がある。

- 価数はイオン源で制限されるため重イオンでは質量電荷比が高くなってしまふ。
- RF 周波数の調節可能領域は共振器の駆動範囲によるため、16.5 ~ 37 MHz となる。
- また、ハーモニック 2 または 6 であればトップ加速が可能で加速効率が高いため、できれば 2 または 6 で加速したい。
- インフレクターの交換は可能にするが、交換は最低限にしたい。
- ハーモニック 2 加速の Proton 65 MeV 条件が最も多く使用し、大電流が求められる条件であるから、この場合にイオン源の最大電圧である 50 kV で入射する。

最後の条件を満たすためには、Proton 65 MeV 条件よりも中心磁場が高いものはより磁場半径の小さいインフレクターが必要になる。このようなイオンは周回周波数が大きいので主にハーモニック 1 で加速することになる。そこで、ハーモニック 1, 2, 3, 6 のために各々最適なインフレクター製作して (ただし 2 と 6 の場合は同形状となった)、インフレクター 1, 2, 3 の場合は 2 の場合に最適化された

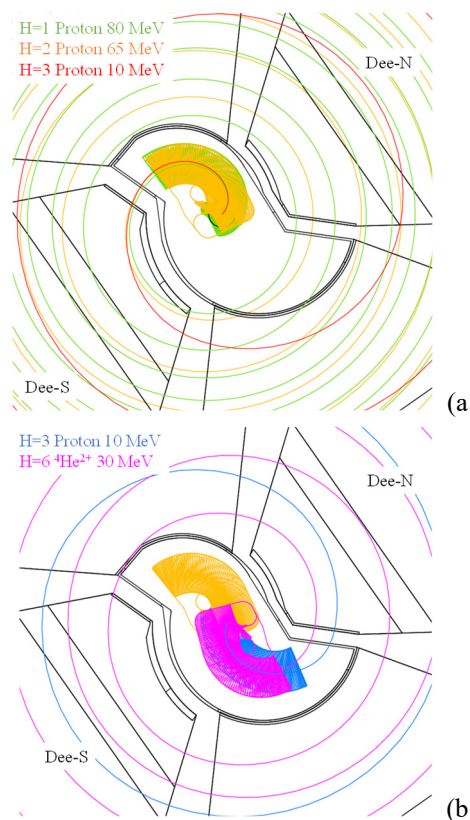


Figure 4: Structure of central region and trajectories of accelerated ions in several different harmonics. Orbits of protons of 10, 65 and 80 MeV injected from Dee-S are shown in (a). Orbits of proton of 10 MeV and  $^4\text{He}^{2+}$  30 MeV injected from Dee-N are shown in (b).

インフレクターを共用で使用できるものとした。また、インフレクターを抜けて Dee に入射する部分は、ハーモニック 2 で位相バンチング [10] を行うために Dee を  $20^\circ$  幅広くしているが、これはハーモニック 3 では  $60^\circ$  で効率の大幅な低下、ハーモニック 6 では  $120^\circ$  となり加速不可能にな

るため、Dee-Sからの入射はハーモニック1, 2, 3用、Dee-Nからの入射はハーモニック3, 6用として使い分けることとした。

Figure 4に、Dee-N, Dee-Sの夫々の方向から入射したいくつかの粒子の場合の軌道を書き入れた。北の方角にあるDeeがDee-N, 南の方角にあるDeeがDee-Sと名付けられた。Dee-Sから、ハーモニック1~3の夫々の場合に共通インフレクターで入射が可能であることが明らかになった。図には書き入れていないが、Dee-Nからハーモニック6で入射される ${}^4\text{He}^{2+}$  30 MeV条件は、Dee-Sからの共通インフレクターによる入射によりハーモニック3で加速することも可能であり、実験スケジュールにより選択可能である。

#### 4. 重イオンの加速

質量電荷比が大きく、到達エネルギーも高い重イオンでは1ターン当たりの軌道半径の増加が小さい。同じハーモニック3での加速であっても、Proton 10 MeV条件のように軽く磁場が低い粒子よりも ${}^{40}\text{Ar}^{12+}$  486 MeV条件のような重イオンの軌道の方が、入射位置が同じであっても相対的な偏心が大きいまま数ターン周回することになる。この原因により、 ${}^{40}\text{Ar}^{12+}$ はシミュレーション上でハーモニック3ではうまく位相に乗った加速が困難であった。そこでハーモニック2で加速することにしたが、周回周波数が7.632 MHzなのでRF周波数が22.896 MHzから15.264 MHzとなり、共振器の最低周波数より低くなってしまった。そこで取り出しエネルギーを570 MeVまで上げると16.503 MHzとなり加速できるが、今度は中心付近の磁場が1.791 Tとなり磁場の最大値~1.65 Tを超えてしまう。そこでイオン源で生成する ${}^{40}\text{Ar}$ イオンの価数を12から13に上げ、取り出しエネルギーを570 MeVのままとすることで、磁場は1.653 Tとなり、これは可能な磁場の値である。この条件で外周まで安定して加速できることをSNOPで確認した。

#### 5. 位相スリット位置でのビーム分布

Figure 5に中心領域の概略図と位相スリットの挿入方向(赤線)を示した。Proton 65 MeV条件の場合にはDee-S方向から入射するので、まず加速されるギャップを1<sup>st</sup>ギャップ、ビームが回転する方向に順に、2<sup>nd</sup>, 3<sup>rd</sup>, 4<sup>th</sup>ギャップと呼ぶ。1周して再び1<sup>st</sup>ギャップと同じギャップを通るときを便宜上5<sup>th</sup>ギャップと呼ぶ。粒子のギャップでのRF位相とは、ある1個の粒子がそのギャップを通過するときのDee電極のRF位相を表すものとする。

Figure 6 (a)に、1<sup>st</sup>ギャップでの位相と位相スリットでの半径の関係を示した。ここで濃い線はエミッタンスを0としてサイクロトロン軸上から入射した粒子の取る値を、薄い\*印はインフレクター上、Z=70 mmの位置で位相空間内で正立する3 mm × 10 mradのビームの値を示す。エミッタンスが0の場合は位相と半径の関係がある曲線上に乗っているため位相スリットでビーム半径を制限すれば位相が制限することが出来る。一方でビームが有限のエミッタンスを持っている場合には位相スリットで半径を制限しても、ある範囲以下に位相幅を制限すること

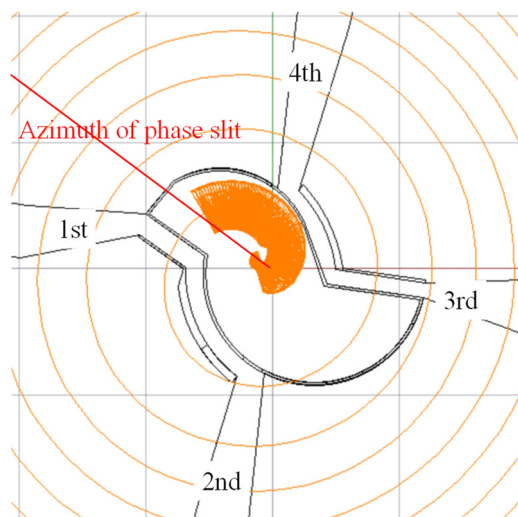
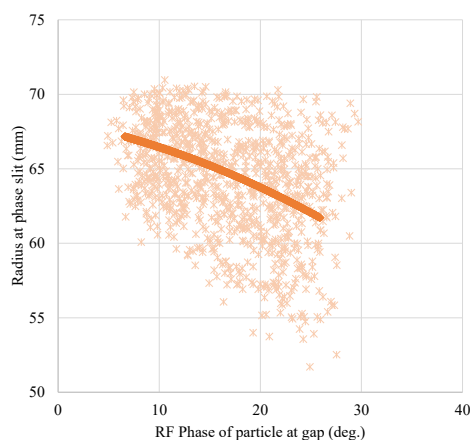
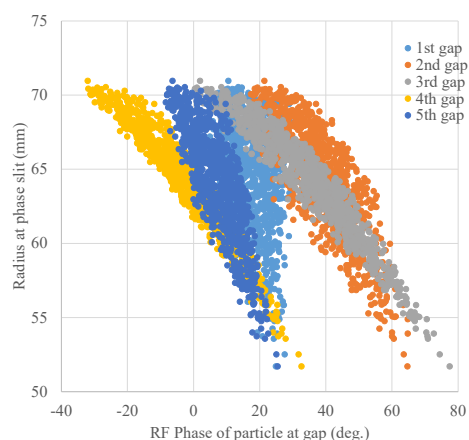


Figure 5: Definition of the gaps and the azimuth of the phase slit (red line). 5<sup>th</sup> gap means 1<sup>st</sup> gap of second turn.



(a)



(b)

Figure 6: PF phase of the Dee electrodes and radius at the phase slit. (a) Relation at RF phase at the 1<sup>st</sup> gap. Orange line is central orbit. (b) Relation at RF phase at the 1<sup>st</sup> to 5<sup>th</sup> gaps. These results are calculated for 65 MeV Proton. The injected beam is 3 mm × 10 mrad above inlet of the inflector electrode (70 mm from the median plane).

が困難である。

一方で、ビームの RF 位相は通過するギャップによって異なり(Fig. 6(b)、これは加速ギャップが4つある一方で磁場の三回対称性により軌道が膨らんだ三角形を取ることに由来する)。従って、一カ所の位相と半径の関係のみでは、取り出し時の粒子のエネルギーは決定せず、複数ターンの複数のギャップにおける位相を比較して判断する必要がある。

## 6. 結論

サイクロロンへの入射エネルギーの向上、Dee 電極の更新に伴い、サイクロロンの入射部の軌道計算を行った。軌道計算に基づき、入射系として、バップルスリット、インフレクター、Dee 電極先端部、位相スリット等の設計を行っている。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP20H04454 および国立研究開発法人科学技術振興機構 産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム(JST、OPERA、JPMJOP1721)の支援を受けて実施しました。また、ビーム計算コードを使用させていただいた SNOP および OPAL の開発者に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] H. Kanda *et al.*, PASJ2020, In these Proceedings, THSP09.
- [2] M. Fukuda *et al.*, PASJ2020, In these proceedings, WE0006.
- [3] T. H. Chong *et al.*, PASJ2020, In these proceedings, THPP06.
- [4] T. Yorita *et al.*, PASJ2020, In these proceedings, FRPP23.
- [5] K. Omoto *et al.*, PASJ2020, In these proceedings, FRPP50.
- [6] OPERA-3D, Cobham plc; <http://www.cobham.com/>
- [7] V. L. Smirnov and S. B. Vorozhtsov, SNOP - Beam Dynamics Analysis Code for Compact Cyclotrons Proc. RuPAC 2012 (St. Petersburg, Russia, 2012).
- [8] V. L. Smirnov, Computer Modeling of a Compact Isochronous Cyclotron Physics of Particles and Nuclei 46 pp. 940-955 (2015).
- [9] A. Adelmann *et al.*, “The OPAL (Object Oriented Parallel Accelerator Library) Framework”, Paul Scherrer Institut, PSI-PR-08-02, (2008 - 2018).
- [10] N. Miyawaki *et al.*, “Geometric analysis of phase bunching in the central region of cyclotron” Nucl. Instr. and Meth. A715 (2013) 126.