

RCNP AVF サイクロトロンにおける入射領域の最適化

OPTIMIZATION OF THE INJECTION SYSTEM FOR THE RCNP AVF CYCLOTRON

板倉 菜美^{#A)}, 松田 洋平^{A)}, 福田 光宏^{A)}, 依田 哲彦^{A)}, 神田 浩樹^{A)}, 友野 大^{A)},
安田 裕介^{A)}, 斎藤 高嶺^{A)}, 田村 仁志^{A)}, 荘 俊謙^{A)}, 趙 航^{A)}, Shali Ahsani Hafizhu^{A)},
松井 昇大朗^{A)}, 井村 友紀^{A)}, 石畑 翔^{A)}, 辻阪 匡^{A)}

Nami Itakura^{#A)}, Yohei Matsuda^{A)}, Mitsuhiro Fukuda^{A)}, Tetsuhiko Yorita^{A)}, Hiroki Kanda^{A)}, Dai Tomono^{A)},
Yusuke Yasuda^{A)}, Takane Saito^{A)}, Hitoshi Tamura^{A)}, Tsun Him Chong^{A)}, Hang Zhao^{A)}, Ahsani Hafizhu Shali^{A)},
Shotaro Matsui^{A)}, Tomoki Imura^{A)}, Sho Ishihata^{A)}, Tasuku Tsujisaka^{A)}

^{A)} RCNP, Osaka University

Abstract

An upgrade of the AVF cyclotron at RCNP is currently underway to achieve higher beam intensity and improved beam quality. As part of this ongoing effort, optimization of the injection system is being conducted to improve both the injection efficiency and the energy resolution of the accelerated beam. This involves investigating optimal conditions for parameters such as the injection angle, injection phase, and central bump magnetic field from the vertical injection line. In parallel, hardware components including the Dee-tip electrodes and the inflector are being redesigned. For this purpose, magnetic field calculations are performed using OPERA-3d, and beam dynamics simulations are carried out using OPAL. In this presentation, we report on the current status and results of these optimization studies.

1. はじめに

大阪大学核物理研究センター(RCNP)では、AVF サイクロトロンのビームの大強度化・高品質化を目指した改造が継続的に行われている。サイクロトロンで加速された粒子ビームは物理実験などの基礎科学分野や、医療・産業利用などの応用分野まで幅広く利用されている。医療利用のための RI 製造ではビームを大強度化することが重要になってくる。そのためには、イオン源からのビームの増量、サイクロトロンへの入射効率の向上、加速軌道の最適化、出射効率の向上などを複合的に実現する必要がある。イオン源からのビームを増量する場合、空間電荷効果によりビームが広がりエミッタンスが増加し、入射効率が下がる。そのため、AVF サイクロトロンのアップグレードではイオン源からの入射電圧を上げることで、入射エミッタンスを小さくする工夫を施した。この入射電圧の上昇に対応するように、インフレクターや中心領域もアップグレードにより変更されている。本研究では、この

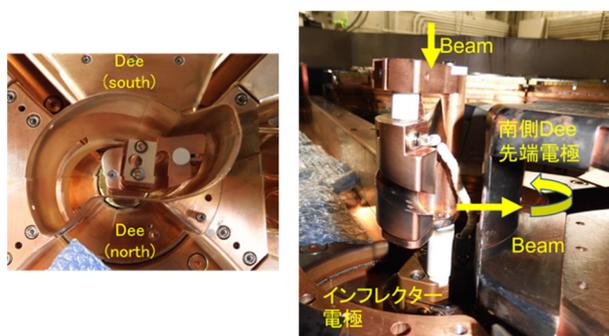
インフレクターや Dee 電極先端のさらなる改良に向けて、入射・取り出しのための磁場生成、入射の際の位相、プレー電極に関して検討した。Figure 1 は中心領域の写真である。

2. OPAL によるサイクロトロンの軌道解析

AVF サイクロトロンの中心部を最適化するため、シミュレーションコード OPAL[1]によって、サイクロトロン入射部から出射部までの軌道解析を実施した。AVF サイクロトロンのモデルに合わせて Dee 電極位置(加速位置)を設定し、現在のインフレクターの出口を軌道の出発点とした。初期エネルギー0.5 keV の陽子を加速電圧 50 kV、引き出し半径 1 m で 65 MeV まで加速させる。RF 周波数は 33.69 MHz、ハーモニックは 2 である。

2.1 OPERA-3d を用いた磁場の生成

AVF サイクロトロンの磁場はメインコイル、トリムコイル 16 個、バレーコイルによって生成される。トリムコイルは内側から 1~16 番と呼ぶ。磁場は Fig. 2 に示す OPERA-3d[2]モデルで計算する。サイクロトロン内の粒子軌道の最適化の過程では、これらの電流設定値を細かく微調整をするが、その度に OPERA-3d で計算すると、非常に時間がかかるという問題がある。そのため、本研究では、以下の方法により、磁場計算の時間短縮を図った。



a) Dee-tip electrodes

b) inflector

Figure 1: Current central region.

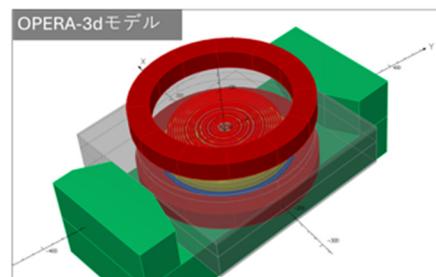


Figure 2: OPERA-3d model of AVF cyclotron.

[#] nami@rcnp.osaka-u.ac.jp

OPERA-3d であらかじめ基準となるデータを計算しておき、そのデータを用いて各コイルが指定した電流値のときの磁場を補間的に計算する。基準となるデータは

- メインコイル 0, 5, 10, 15, ..., 800 A
 - トリムコイル No.1~16 全て 0 A
 - メインコイル 0, 200, 400, 600, 800 A
 - トリムコイル No.i 200 A, No.i 以外 0 A (i=1~16)
- 合計 241 種類の組み合わせのデータである。磁場を計算する際は、メインコイルとトリムコイル計 17 個の電流値を指定し、基準のデータを用いて以下の 2 種類の磁場をモニタリング補間により計算する。

- メインコイル(指定した電流値)のみで発生する磁場
- メインコイル(指定した電流値)とトリムコイル No.i (i=1~16) (200 A) で発生する磁場

後者の磁場を、トリムコイルの指定した電流値で傾斜をかけ、前者と足し合わせることでコイル全体の磁場を計算することができる。

陽子を引き出し半径 1 m、エネルギー 65 MeV まで加速させる磁場を生成するために必要な電流値を定め、その電流値で計算した場合の磁場マップを Fig. 3 に示す。

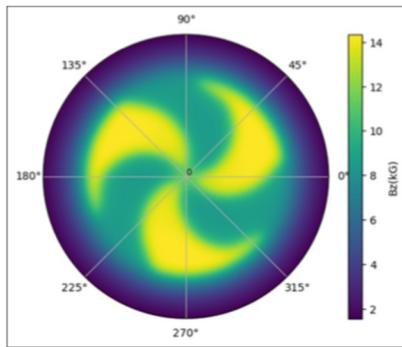


Figure 3: Magnetic field calculated when current values.

2.2 等時性磁場の形成

Figure 4 に、等時性磁場、各半径の平均磁場、平衡軌道での平均磁場とその理論計算値を示した。平衡軌道はのちに記述する OPAL-cycle で tune 計算を行い、エネルギー毎の入射半径と軌道から平均磁場を計算した。

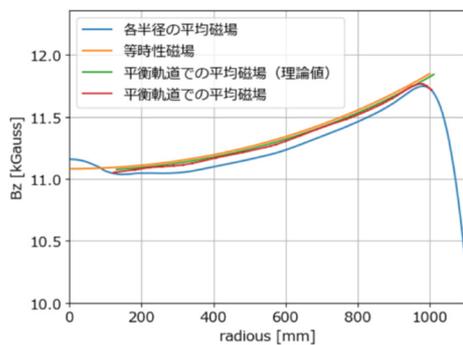


Figure 4: Isochronous magnetic field, average magnetic field by radius, average magnetic field on static equilibrium orbit by tune, and average magnetic field on static equilibrium orbit.

のちに掲示する Fig. 6 は加速粒子の周回毎の位相を示している。その位相は等時性領域において最大 $\pm 5^\circ$ 程度あり、完璧な磁場を生成できたとは言えないが、中心部に対する検討を行うには十分許容範囲であるとした。

3. 中心領域の最適化に向けた取り組み

3.1 プラー位置の最適化

Dee 電極の先端にあるプラーの位置について検討を行うにあたり、OPAL で粒子軌道計算を行った。OPAL 上の Dee 電極、プラー、入射の位置関係を Fig. 6 に示す。Dee 電極は 316.5° の位置にあるものから時計回りに Dee1,2,3,4 と呼ぶ。Dee3 とプラーの角度の絶対値を θ_p と定義する。現在の設計では、Dee3 から負の角度方向にプラーがあり、 $-\theta_p = -5.35^\circ$ に固定されている。軌道の入射位置を現在のインフレクターの出口である半径 34.33mm, x 軸からの角度 113.11° に固定し、可能な範囲で θ_p を調整し、軌道計算を行う。なお、インフレクターから粒子が出る時の位相 ϕ_{inf} は非相対的な計算で求めた。

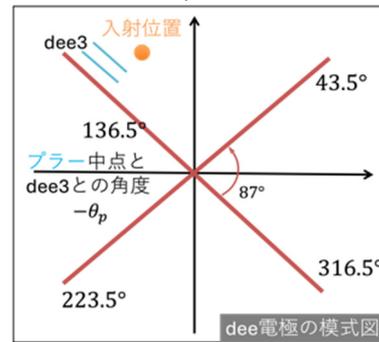


Figure 5: OPAL-cycle model.

$\theta_p = 1^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ の 4 パターンについて、OPAL で計算を行い、Dee3 位置での位相差を確認した。その結果を Fig. 6 に示す。プラーの位置によって入射直後の位相差が正しく変化していることが確認できた。

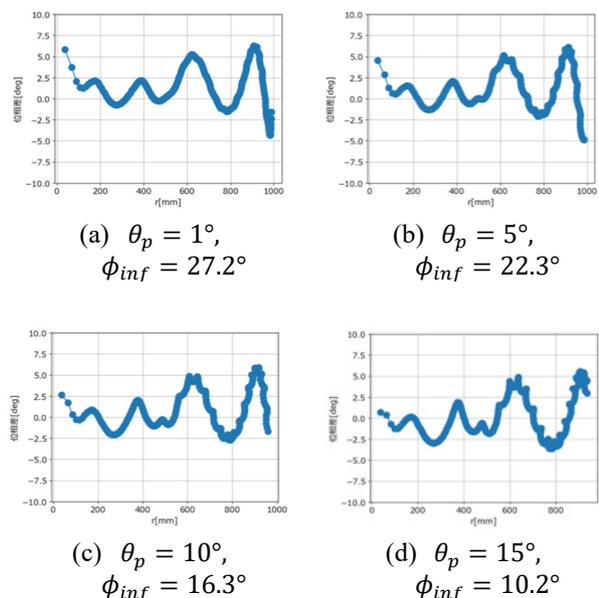


Figure 6: Phase difference for each pattern.

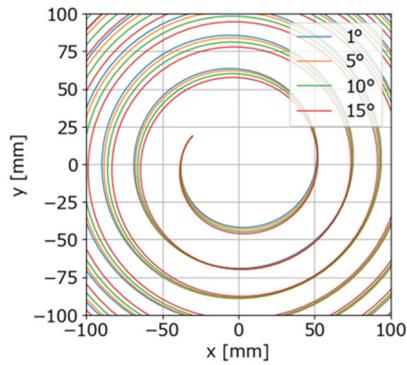


Figure 7: Particle orbit for each pattern.

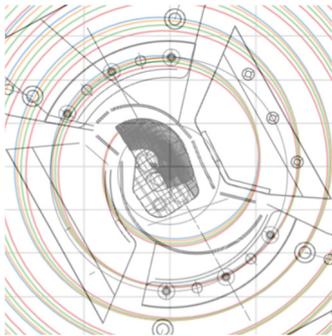


Figure 8: Particle orbit in AVF cyclotron model.

Figure 7, Fig. 8 に各 θ_p の場合の粒子軌道を示した。プラマーの位置における中心領域の軌道の差は最大 5 mm ほど、等時性領域ではより大きく差がある。これを

現在のサイクロロンモデルに合わせて考えると、入射後に壁に衝突してしまっている。この4パターンの中で、より内側の軌道であるのはプラマー角度が $\theta_p = 1^\circ$ の場合なので、現在のプラマー位置よりも Dee 電極側に寄せた方が良く考えられる。プラマーの正確な角度、またプラマー自体の傾きに関しては今後の課題とする。

4. 今後の方針

AVF サイクロロンの大強度化を達成するための要因の一つに、中心領域の改良によるサイクロロン入射効率の向上がある。本研究では、インフレクターや Dee 電極先端のさらなる改良に向けて、入射・取り出しのための磁場生成、入射の際の位相、プラマー電極に関して検討した。OPERA-3d による加速磁場の生成、OPAL-cycle による粒子軌道計算からプラマーの位置の最適化を行った。入射後の軌道がより理想的なものに近づくためには、現在の設計よりも Dee 電極側にプラマーを寄せる必要があると考えられる。

今後の展望として、本研究ではプラマー電極は Dee 電極と平行であると考えているが、実際は傾いているので入射角度についても検討する必要がある。また、インフレクターも含めた中心領域全体のコンポーネントの最適化を進める。それらを満たすことができるインフレクター、Dee 電極先端部の形状を定め、多粒子で計算を行い、現在の入射効率との比較を行いたい。

参考文献

- [1] OPAL, <https://gitlab.psi.ch/OPAL/src/>
- [2] OPERA-3d Cobham plc, <http://operafea.com/>