

理研 AVF サイクロトロン の ビーム エネルギー 増加 の ための 改造 と それ が もたらす ビーム 入射 ・ 取り出し 効率 への 影響 について

MODIFICATION OF RIKEN AVF CYCLOTRON FOR ENERGY INCREASE AND ITS EFFECT ON BEAM INJECTION AND EXTRACTION

大西 純一^{#, A)}, 後藤 彰^{A)}, 小高 康照^{B)}

Jun-ichi Ohnishi^{#, A)}, Akira Goto^{A)}, Yasuteru Kotaka^{B)}

^{A)} RIKEN Nishina Center

^{B)} Center of Nuclear Study, the University of Tokyo

Abstract

At the RIKEN AVF Cyclotron, in order to increase beam energies for the purpose of diversifying RI production, the electrode structure of the central region was changed to new one in September 2017. As a result, the beam energies for ions with $M/Q=2$ such as deuteron and helium were successfully increased from 12.5 MeV/nucleon to 14 MeV/nucleon and protons were increased from 14 MeV to 30 MeV. Although the injection efficiencies were improved for high energy beams such as 12 MeV/nucleon, there was a tendency that extraction efficiencies deteriorated. Therefore, we performed a tracking simulation for 12 MeV/nucleon deuterons. As a result, we found that the angular spread of the beams in the radial direction at the entrance to the deflector is large in the new central region, which is one of the reasons for poor extraction efficiency.

1. はじめに

理研 AVF サイクロトロンは 1989 年にコミッショニングされてから単独運転および理研リングサイクロトロン の 入射器として使用されている。K 値は 70MeV でこれまでの最大取り出しエネルギーは加速ハーモックス $H=2$ において陽子で 14 MeV、 $M/Q=2$ のイオンについては核子あたり 12.5 MeV (以下 MeV/u と記す) である。AVF 単独運転では陽子から $^{86}\text{Kr}^{20+}$ まで多様なイオンを加速して物理、生物、工学の実験にビームが供給されている[1]。2009 年に、RI 製造を目的としたユーザーによるエネルギー増加の要求を満たすため、中心領域の改造が行われたが、さらに S. Vorozhtsov らによって加速ハーモックス $H=1$ モードを使用して陽子を 30 MeV まで加速するための中心領域の設計が行われた[2]。この中心領域はしばらく眠っていたが、2016 年 8 月に加速テストを実施した[3]。

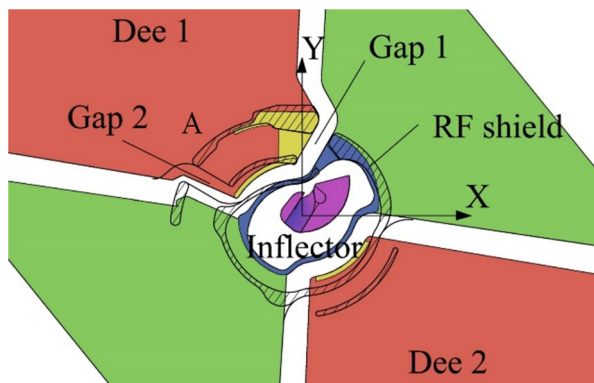


Figure 1: New and original central region. The hatched area indicates the original one.

[#] ohnishi@riken.jp

その後いったん従来のものに戻したが、2017 年 9 月に再度、新中心領域に交換して、これまで約 10 か月間の運転を行っている。

2. 新中心領域

Figure 1 に新旧中心領域の平面図(黒斜線部が旧中心領域)を示す。新中心領域はビームエネルギーを上げるため、RF シールドを小さくするとともに図中 A 部分の隔壁を除去することにより、第1、第2ターンをより小さい半径で通過できるようにし、さらに $H=1$ 加速を行うため、2番目の加速ギャップの位置を下流にずらしている。この中心領域の改造により、

- 加速ハーモックス $H=2$ 運転において、重陽子のエネルギーを従来の 12.5 MeV/u から 14 MeV/u に増加することができ、10 μA 以上のビーム電流値が得られた。
- 加速ハーモックス $H=1$ 運転において、陽子を 30 MeV まで加速することができた。
- d-12 MeV/u などエネルギーの高いビームについて取り出し電流値を増やすことができた。

一方、運転パラメーターが実績値と変わったため、加速実績のあるビームについても調整に時間を要するようになった。また、全般に入射効率は良くなったが、取り出し効率が悪くなる傾向が見られるようになった。

3. トラッキングシミュレーション

中心領域を新しくしたことによるビームへの影響を調べるため、トラッキングシミュレーションを行った。軌道計算は、Opera-3d[4]で計算した磁場分布と電場分布を使用してランゲクッタ法で行った。RF 電場は Opera-3d で静的に計算した後、軌道計算時に時間依存性を導入した。Figure 2 に Opera-3d による電場の計算モデルと軌道の一例を示す。この図はインフレクター以外はメディア

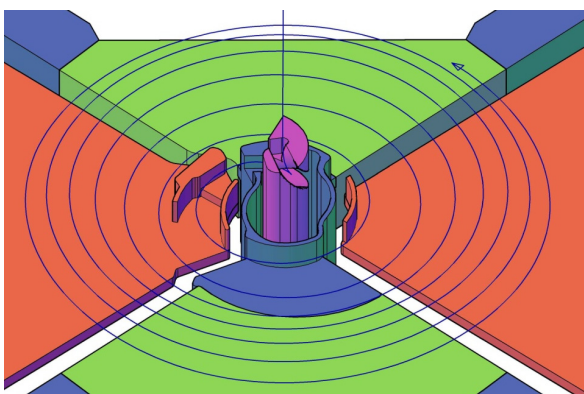


Figure 2: Opera-3d model for electric field calculation.

プレーンより下部分を示している。以下に示す軌道計算結果ではすべて、ビームの出発点を AVF 上部 $Z = 2.1$ m とし、加速粒子を 12 MeV/u 重陽子として等時性磁場を設定した。また、この計算では空間電荷効果は考慮されていない。

4 入射と加速

4.1 アクセプタンス

Figures 3, 4 に、12 MeV/u の重陽子について入射ビーム (6.2 keV/u) の加速と取り出しアクセプタンスを計算した結果を示す。横軸は出発点のビームの位相で加速位相とは異なる(次節 4.2 を参照のこと)。縦軸のアクセプタンスの大きさは、最外周まで加速された粒子とデフレクターを通過して取り出された粒子の、x、y 方向 (エミッタンスモニターの方向) それぞれの位相空間に占める面積を π で割った値である。ディー電圧は 40 kV とした。新中心

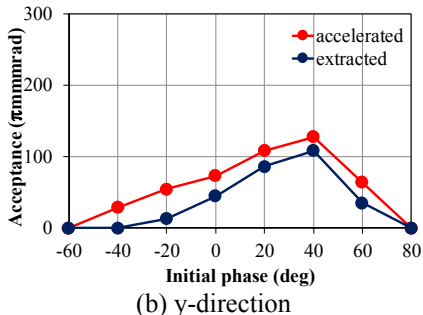
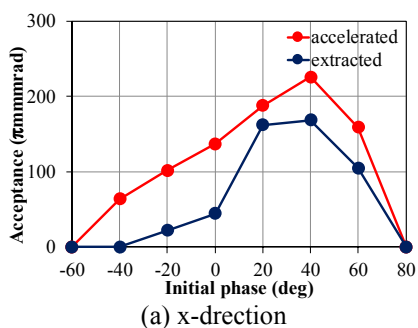


Figure 3: Acceptances for injection beam for the new central region.

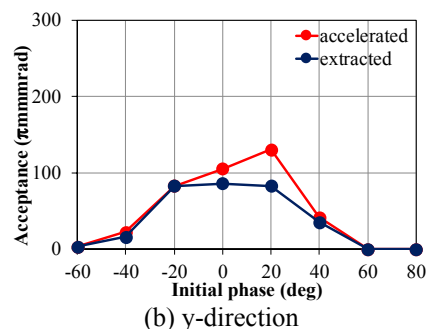
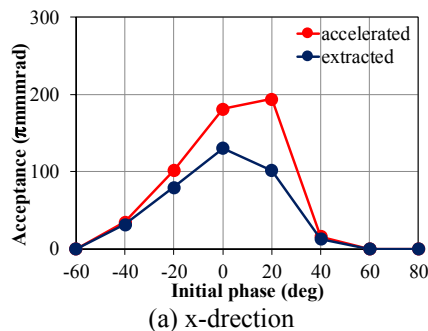


Figure 4: Acceptances for injection beam for the original central region.

領域のアクセプタンスは旧中心領域に比べて初期位相の分布がプラス側にシフトしてアクセプタンスが大きくなっている。これは 2 番目の加速ギャップが下流側に移動したこと、旧中心領域では RF シールドに当たって加速できなかった位相空間上の領域が加速できるようになったためであると考えられる。

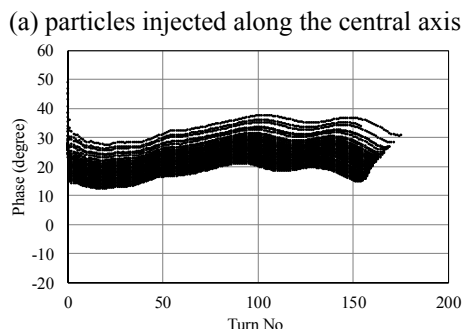
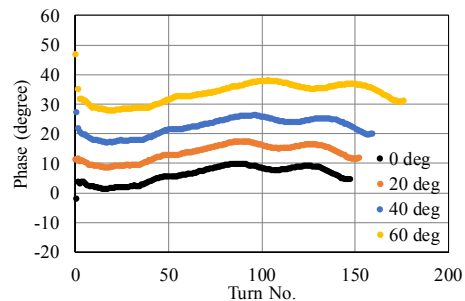


Figure 5: RF phases averaged in each turn when accelerated with the new central region.

4.2 加速位相

Figure 5(a) に、新中心領域においてサイクロトロンを中心軸に沿って入射した粒子の加速位相を示す。加速位相は各ターンにおける 4 つの加速ギャップのギャップ中心での RF 位相の平均値である。初期位相は 0° 、 20° 、 40° 、 60° の場合を示しているが、加速位相は第 2 ターン以降 30° 程度の幅に圧縮されていることが分かる。Figure 5(b) に初期位相が 40° で x 方向に広がりを持った粒子の加速位相の分布を示す。加速位相の広がりインフレクターから最初のターンにおける軌道長の差によって生じている。

5 取り出し

RI 製造に用いられる 12 MeV/u の重陽子は通常 100 μA から 200 μA 入射して、最大 25 μA が取り出される。この場合、入射ビームのエミッタンスは 200π mmmrad より大きく、入射バンチャーによるバンチングも空間電荷による反発によって十分ではないため、横方向、縦方向とも AVF サイクロトロンのアクセプタンスより大きいビームが入射されていると考えられる。AVF サイクロトロンのビームは Fig. 6 に示すように静電デフレクター、磁気チャンネルおよびグラディエントコレクターによって取り出される。10 μA 以上の 12 MeV/u 重陽子の取り出し効率は、そのほとんどがデフレクターにおける損失によって決まるが、現在良く調整された場合でも 60% 程度である。12 MeV/u 重陽子の場合、中心領域の改造によって入射効率が改善された一方、今年 3 月にはデフレクターセプタムの溶融が起きているため、ビーム量を増加させるためには取

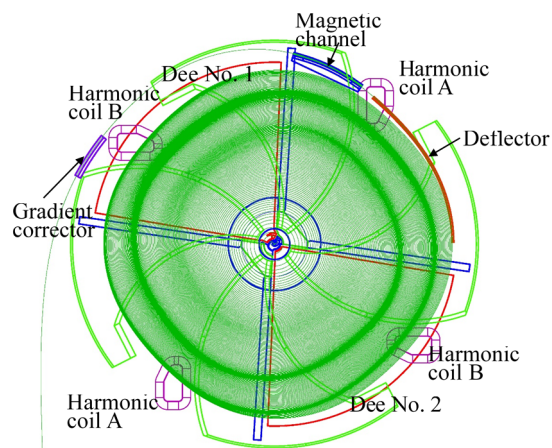


Figure 6: Arrangement of beam extraction devices.

Table 1: Parameters of Deflector

Maximum voltage (present)	50(40) kV
Length	680 mm
Gap(entrance)	6 mm
Gap(exit)	8 mm
Septum thickness(entrance)	0.3 mm
Septum thickness(exit)	2.8 mm

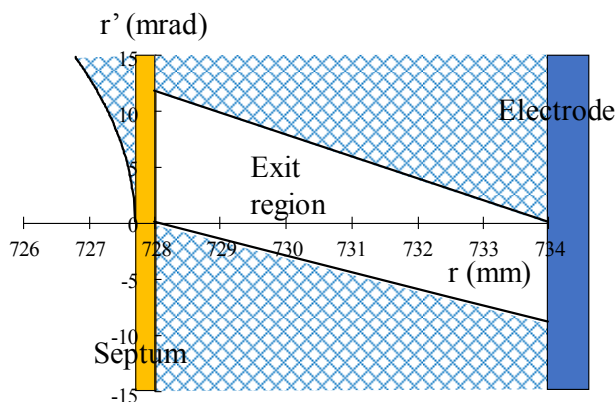


Figure 7: Exit region in r-directional phase space at the deflector entrance.

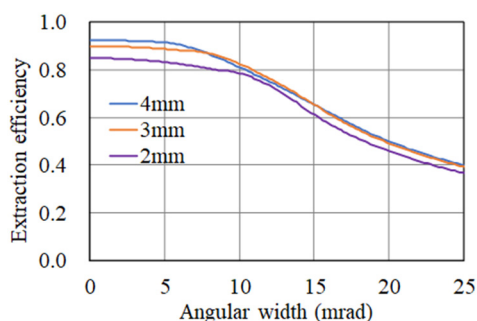
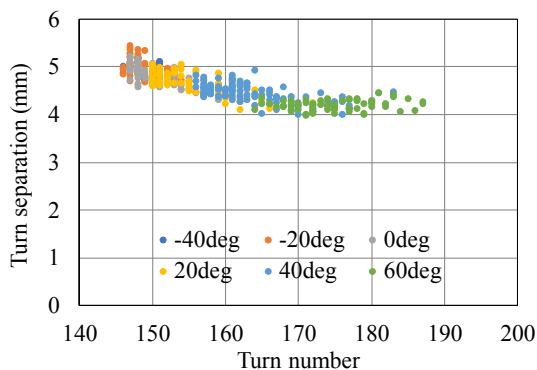


Figure 8: Geometrical extraction efficiencies as a function of angular widths of beams at the deflector entrance. Three curves indicate cases where turn separations are 2 mm, 3 mm and 4 mm.

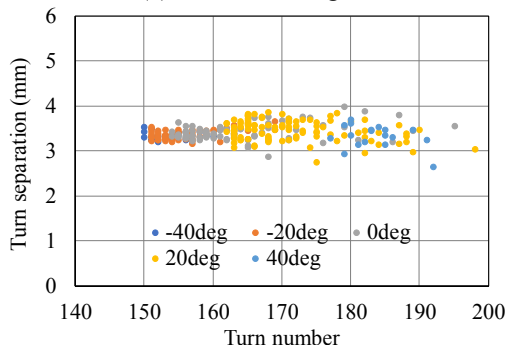
り出し効率を改善することが必要である。

静電デフレクターのパラメーターを Table 1 に示す。Figure 7 にデフレクター入口における r 方向の位相空間上の取り出し可能領域 (Exit region) を示す。1 周の加速電圧を 160 kV (ディー電圧 40 kV) とするとデフレクター入口における加速によるターンセパレーションは 2.6 mm であるが、ベータトロン振動があるためその位相角により変動する。Figure 8 にビームの角度広がり関数として、Fig. 7 から幾何学的に計算した取り出し効率をターンセパレーションが 2 mm, 3 mm, 4 mm の場合について示す。この計算ではビームはマルチターンで取り出され半径方向に一様であると仮定し、横幅をターンセパレーション、縦幅をビームの角度広がりとする長方形領域を考えて、Exit region の占める面積の割合を取り出し効率とした。

Figure 9 にデフレクター入口に達するまでのターン数とデフレクター入口でのターンセパレーションを新旧中心領域について示す。各点は初期位相 -60° 、 -40° 、 -20° 、 0° 、 20° 、 40° 、 60° で x 方向と y 方向の位相空間上に一様に広がっている粒子のうち加速されたものである。出発点の位相空間のメッシュ間隔は位置、角度それぞれ 2 mm と 5 mrad としている。ディー電圧は 40kV とした。この計算モデルではターンセパレーションはベータトロン振動のために軌道半径によって概ね 0-5 mm の範囲で



(a) new central region.

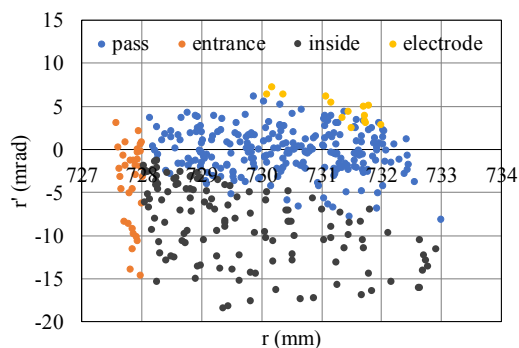


(b) original central region

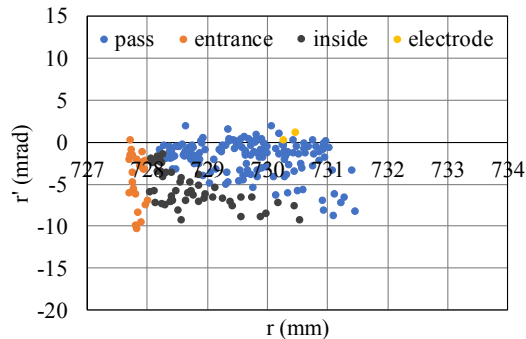
Figure 9: Turn numbers and turn separations at the deflector entrance.

変動している。デフレクター入口でのターンセパレーションは2組のハーモニックコイルによって平衡軌道をシフトさせることにより変わるが、Fig. 9 は取り出し効率がよくなるようにハーモニックコイルの電流値を与えた。

Figure 10 にデフレクター入口における各粒子の位置と傾きの分布をしめす。各点は Fig. 9 と同じである。青色“pass”はデフレクターを通過したもの、橙色“entrance”、灰色“inside”、黄色“electrode”はそれぞれ、デフレクター入口、セプタムの取り出し軌道側、電極に衝突したものを表す。この計算では新中心領域と旧中心領域のデフレクター通過効率それぞれ58%と72%であり、新中心領域の方が悪い結果となった。ディー電圧40kV、デフレクター電圧も40kVとして、新旧中心領域においてメインコイルとトリムコイル磁場は同じであるが、ハーモニックコイル電流値は変えている。取り出し効率そのものはハーモニックコイルによる磁場やデフレクターの位置と角度によって変動するが、新中心領域の角度広がりには旧中心領域より大きい結果となっているため、Fig. 8 に示したように新中心領域の取り出し効率が悪い原因となっている。角度広がりが多い理由はまだ解明できていないが、新中心領域の方が加速アクセプタンスが大きいため、その分角度広がりが多いと思われる。横方向、縦(位相)方向とも加速アクセプタンスに比べて大きいビームを入射した場合、同様の結果になると思われる。従って、取り出し効率を良くするためには横方向、縦方向とも入射ビームのエミッタンスを制限して角度広がりを小さくする必要がありと考えられる。



(a) new central region.



(b) original central region

Figure 10: Positions and angles of all accelerated particles at the deflector entrance.

6 結論

新旧中心領域について12 MeV/u 重陽子のトラッキングシミュレーションを行った結果、新中心領域では入射アクセプタンスが大きくなった一方、取り出しにおいてはデフレクター入口での半径方向の角度広がりが大きくなったため、デフレクターでの損失が増えることが分かった。取り出しのシミュレーションは位相空間内の粒子分布、磁場分布、デフレクターの位置、角度などパラメーターが多いため、現実を十分に反映しているわけではないが、この計算結果は、中心領域変更後の実際の運転において、12MeV/u 重陽子のビーム量は増加したがデフレクターにおける損失も増える傾向となったことを説明するものである。今後さらに分析を進めて、デフレクターでの損失を減らす方策を見つけてビーム量を増加させていきたいと考えている。

参考文献

- [1] K. Kobayashi *et al.*, “理研 AVF サイクロトロン運転の現状報告”, in these proceedings.
- [2] S. B. Vorozhtsov *et al.*, “Modification of the central region in the RIKEN AVF cyclotron for acceleration at the H=1 RF harmonic,” Proceedings of Cyclotrons 2010, pp. 138–140.
- [3] J. Ohnishi *et al.*, “Beam test using new central region for energy upgrade at RIKEN AVF cyclotron,” Proceedings of Cyclotrons 2016, pp. 332–335.
- [4] <https://operafea.com/>