

RCNP AVF サイクロトロンの高強度化を目指した 中心領域及び出射系の改良の検討

STUDY OF IMPROVEMENT OF A CENTRAL REGION AND AN EXTRACTION SYSTEM OF THE RCNP AVF CYCLOTRON

中尾政夫[#], 福田光宏, 依田哲彦, 神田浩樹, 安田裕介, 友野大, 森信俊平, 斎藤高嶺, 畑中吉治, 永山啓一,
田村仁志, 鎌倉恵太, 原周平, Koay Hui Wen, 森田泰之, 原隆文, 武田佳次朗

Masao Nakao[#], Mitsuhiro Fukuda, Tetsuhiko Yorita, Hiroki Kanda, Yuusuke Yasuda, Dai Tomono,
Shunpei Morinobu, Takane Saito, Kichiji Hatanaka, Keiichi Nagayama, Hitoshi Tamura, Keita Kamakura, Shuhei Hara,
Hui Wen Koay, Yasuyuki Morita, Takafumi Hara, Keijiro Takeda
Research Center for Nuclear Physics, Osaka University,

Abstract

High quality and high intensity beam of AVF cyclotron at RCNP is used for both nuclear physics and various applied research. It is needed to increase beam intensity for the needs of nuclear medicine. An improvement of injection line, inflector, and central region of cyclotron is needed to increase the intensity of accelerated beam of cyclotron, while extraction system, which limits extraction beam current and causes radio-activation must be improved. Simulation study utilizing SNOP code is performed for high efficiency beam in the cyclotron with space charge effect. The structure of extraction system was determined to increase the efficiency of extraction.

1. はじめに

RCNP の AVF サイクロトロンは、原子核などの物理の基礎研究はもとより、半導体のソフトウェア対策の研究、放射性薬剤(アルファ線核医学治療法)の製造などのために利用されてきているが、大強度化するためにアップグレードが計画されている[1, 2]。そのために、入射電圧を 15 kV から 50 kV に向上させて低エミッタンスで大強度のビームを入射し、Dee 電極を現在の 180°のものから 90°を 2 台にすることによって加速効率を向上させ、加速中のエミッタンス増大を防ぐとともに、ターンセパレーションを拡大してデフレクターでの出射効率を向上させることを予定している。また、サイクロトロン上部ヨークリフターを設置し、イオン源を設置しているサイクロトロン上部のコンクリート遮蔽ブロックをかさ上げすることでサイクロトロン内部のメンテナンス性を向上させる工事ならびに、ビーム強度の増大に伴う放射線遮蔽の強化などの工事も同時に行う予定である。

空間電荷効果を考慮しつつ、OPERA-3d[3]などによって計算された電場、磁場からビームの軌道を計算するためにロシア JINR の Smirnov 氏らが開発した SNOP[4-6]プログラムと、スイス PSI で開発された OPAL[7]プログラムを使用してシミュレーションを行っている。

今回は主に、効率よく取り出すための出射系の検討について報告する。

2. 出射系の変更

現在の AVF の出射系は、ディー電極の反対側に 60°のデフレクター 2 台を設置してビームを偏向し、パッシブのマグネティックチャネル(磁気シールド)、グラディエント

コレクターを経てビームラインに接続している。今回の改修で加速効率を上げるために RF 系が 87°のディー電極 2 台になるため、現在の出射系はほとんど新規に設計製作する必要がある。Fig. 1 のように、取り出すビームは Dee 電極から出た後にプローブを経て 72°のデフレクターに入り、再び Dee 電極に入り、その後 2 台のグラディエントコレクターで収束されて取り出しビームラインに乗ることになる。

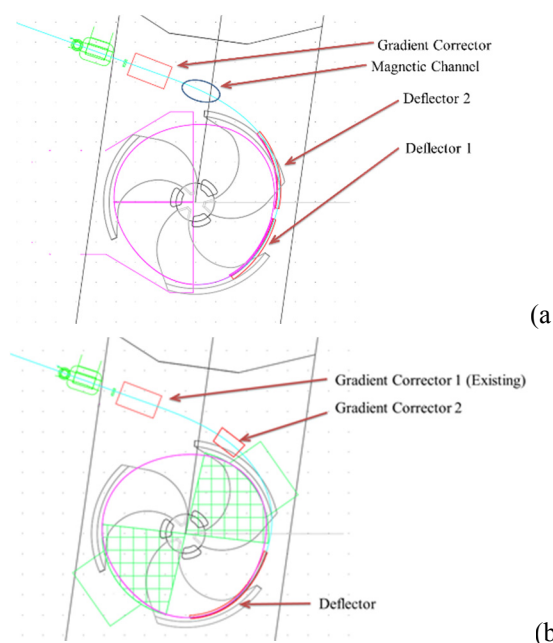


Figure 1: a) Existing and b) New extraction system of AVF cyclotron at RCNP.

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

この配置では、デフレクターの後方にマグネティックチャンネルを配置してビームを大きく曲げる必要がない。また、現在のデフレクター2の電極後半部には電場勾配を発生させるために丸み(高圧電極は凹面、セプタム電極には凸面)が付けられているが、新デフレクター位置に収束要素を設けても効果が低いため採用していない。収束要素はグラディエントコレクターをディー電極の外側に設置する。グラディエントコレクターはサイクロトロンメイン磁場が半径方向に向かって減少していき、weak focusが半径方向に強い発散力を持っている区間で効果的である。また、この位置にグラディエントコレクターをディー電極とともに引き抜いてメンテナンスを行うこともできる。

3. グラディエントコレクターによる収束

サイクロロンから出射されるビームが磁場勾配を通過する際の水平方向の発散を抑えるために、グラディエントコレクターを追加する。グラディエントコレクターのない場合には、Fig. 2に示したように水平方向のビームサイズは現在のグラディエントコレクター位置で100 mm程度になり、さらに出射後最初の偏向電磁石位置で200 mmとなり、ビームダクトの直径を上回ってしまう。そこでグラディエントコレクターで収束することにより、ビームサイズがサイクロロン出射後最初の偏向電磁石の位置において水平方向100 mm鉛直方向50 mm以下になることを目標とした。

グラディエントコレクターはデフレクターによって取り出されたビーム軌道が、サイクロロン磁場の減少率が最大になる半径の部分に設置することが望ましいが、設計時の検討で、設置できる場所の条件は、ディー電極に固定すること、ディー電極とともに引き抜く場合にヨーク等と干渉しないことといった制約のもとで位置を決定した。

Fig. 2に示すように、グラディエントコレクターの効果により水平方向ビームサイズは偏向電磁石位置で80 mmになった。一方で、Fig. 3に示すようにグラディエントコレクターは鉛直方向には発散の効果があるので鉛直方向のビームサイズは45 mmに拡大している。

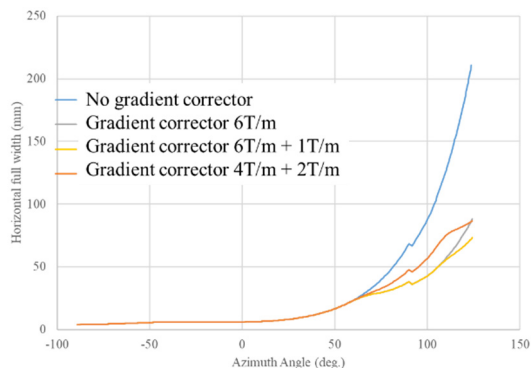


Figure 2: Horizontal beam size variation at each azimuth angle.

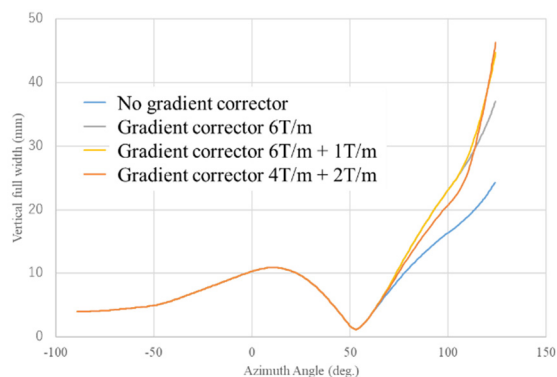


Figure 3: Vertical beam size variation at each azimuth angle.

4. エネルギー・イオン種によるビーム軌道の変化

ここまでは高頻度利用される、Proton 65 MeVの条件でのビーム軌道を計算してきたが、ビームのエネルギーやイオン種によって軌道は変化する。取り出す軌道がデフレクター電極の駆動範囲より外にいたり、デフレクターの曲率とビーム軌道の曲率がずれていたりする場合にはすべてのビームを取り出すことができないので、そのようになっていないかをチェックする必要がある。

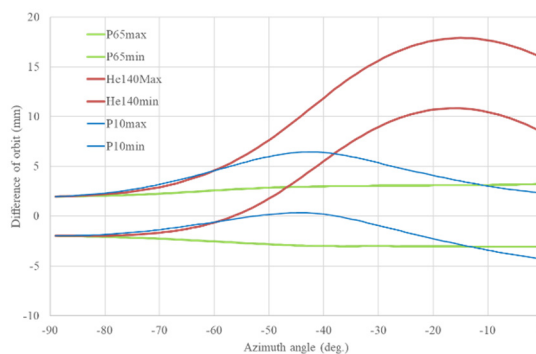


Figure 4: Difference of maximum and minimum orbit of 65 MeV Proton and 10 MeV proton and 140 MeV $^4\text{He}^{2+}$ from central orbit of 65 MeV Proton orbit.

Fig. 4に、Proton 65 MeVの中心軌道を0として、Protonの10 MeV, 65 MeV, $^4\text{He}^{2+}$ の140 MeVの2 mm × 3 mradの初期条件からスタートしたビームの全幅に対応する位置をプロットした。デフレクターの入口ではProton 65 MeVと $^4\text{He}^{2+}$ 140 MeVの各条件で同じ位置にビームがあったにもかかわらずデフレクター出口付近では14 mmほどずれる。さらに、このずれは一定割合で増加していないため、このままではデフレクターを傾けただけではずれを解消できない。高圧電極とセプタム電極の間隔を調整して、デフレクターの入口と出口で電場を変化させる必要がある。このような軌道の差が生じる理由は、励磁レベルの高い条件においてはヒルの磁場が飽和し始めているために、ヒルとバレーの磁場の比が下がり、軌道が

円に近くなっているためである。

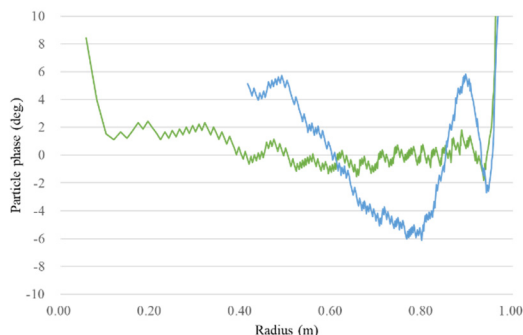
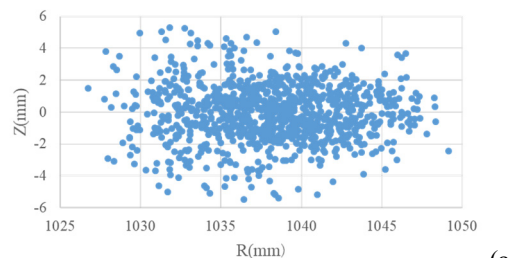


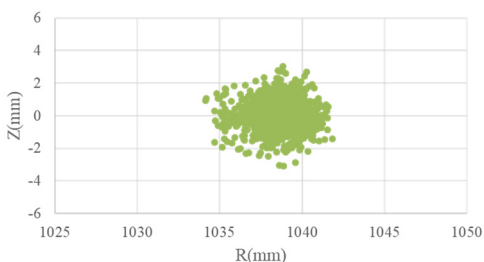
Figure 5: Difference of particle phase from RF Phase when the reference particle comes to the center of Dee electrode. (a blue line is $\pm 6^\circ$ in phase and (b green line is in $\pm 2^\circ$ in phase.

5. 等時性磁場を調整して RF 位相とバンチの位相を合わせることの重要性

SNOP のシミュレーション上で、Fig. 5 の(aのように、加速 RF 位相とビームの位相の差が常に 10° 以内に収まっ



(a)



(b)

Figure 6: Horizontal and vertical beam distribution in front of the deflector electrodes. In case of (a and (b in fig. 5 cases.

ていれば、加速効率としては $\sin(80^\circ) = 0.985$ であり、ビームを最外周まで加速すること自体に問題はない。しかしながら、ビームのバンチのサイズは、初期条件では $2 \text{ mm} \times 3 \text{ mrad}$ であったものが fig. 6 に示したように全幅で 20 mm 程度に広がっている。通常デフレクターのギャップ間隔は $5 \sim 8 \text{ mm}$ であるから、このビームをシングルターンで取り出すことは不可能であり、取り出し効率も低くなる。この加速 RF 位相とビームの位相の差はサイクロ

ترون磁場の等時性磁場からのずれから生じている。実際の運転パラメータのメインコイル、トリムコイルの電流値を入力した OPERA 等で計算した磁場から、BH カーブの誤差を補正したものをシミュレーションに使用しているがこの補正は精度が要求され、 200 ターン周回したのちに 2° 以下の誤差に留めるためには磁場に 3×10^{-5} 程度の精度が必要である。

ここで Fig. 5 の(b)のように位相の差を $\pm 2^\circ$ 以内に収めるような磁場を設定すると、実空間におけるビーム分布は Fig. 6 の(b)に示すようになり R 方向ビーム幅は 7 mm に縮小する。この幅であればシングルターン取り出しが可能である。

現在も RCNP では、特に品質の高いビームを要求する物理実験では、AVF サイクロトロン加速位相を位相プローブで見て $\pm 2^\circ$ の範囲に入るようなビーム調整を行っており、その条件で高い出射効率も実現している。

6. まとめと今後の課題

今回の発表では、グラディエントコレクターの必要性、デフレクターの電極位置の可動部など主に射出系の検討について述べたが、5 節で指摘したように、射出系においてシングルターンで高品質のビームが取り出されるためには、デフレクター前に Fig. 6 の(b)のようなビームが存在することが必要であり、それは入射と加速の段階によって決まる。よって入射部と加速部の設計を十分に検討しておかなければ高品質・高効率・高電流のビームを生成できない。

今後、空間電荷効果が重要な役割を占める、ビームが低速で運動している領域についても信頼性の高い計算を行っていくことが必要となる。

謝辞

SNOP の利用に関してロシア JINR の S. B. Vorozhtsov, V.L. Smirnov 両氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] H. Kanda *et al.*, in these proceedings, FROL08.
- [2] T. Yorita *et al.*, in these proceedings, FSP030.
- [3] OPERA-3d Cobham plc; <http://operafea.com/>
- [4] V. L. Smirnov, "Computer Modeling of a Compact Isochronous Cyclotron", *Physics of Particles and Nuclei* **46** pp. 940-955 (2015).
- [5] S. B. Vorozhtsov, V.L. Smirnov and A. Goto, "Modification of the central region in the RIKEN AVF cyclotron for acceleration at the H=1 RF harmonic", *Proc. of CYCLOTRONS 2010* p. 138 (Lanzhou, China, 2010).
- [6] V.L. Smirnov *et al.*, *Quantitative Simulation of NIRS-930 cyclotron*, *Proc. of IPAC2012* p. 292 (New Orleans, USA, 2012).
- [7] The Object Oriented Parallel Accelerator Library (OPAL), Paul Scherrer Institut; <http://amas.web.psi.ch/>