

DEVELOPMENT OF THE CENTRAL REGION FOR CONTROL OF A BEAM PHASE WIDTH AT THE JAEA AVF CYCLOTRON

Nobumasa Miyawaki^{1,A)}, Susumu Okumura^{A)}, Satoshi Kurashima^{A)}, Hirotsugu Kashiwagi^{A)}, Ken-ichi Yoshida^{A)},
Ikuro Ishibori^{A)}, Yosuke Yuri^{A)}, Takayuki Nara^{A)}, Takashi Agematsu^{A)}, Mitsuhiro Fukuda^{B)}

^{A)} Takasaki Advanced Radiation Research Institute, Japan Atomic Energy Agency

1233 Watanuki-machi, Takasaki, Gunma, 370-1292

^{B)} Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

10-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047

Abstract

The central region of the JAEA AVF cyclotron has been modified to solve the problem of the beam instability caused by the electric discharge between the dee electrode and the RF shielding cover attached to the inflector electrode and to control a beam phase width for microbeam production. The beam stability has been improved by separating the inflector electrode and its RF shielding cover. The beam phase widths, controlled with phase slits, have been 4.5 rf degrees FW for acceleration harmonic mode 1 (H=1) and 3.6 rf degrees FW for H=2 to fulfil the requirement for the microbeam production.

原子力機構AVFサイクロトロンにおけるビーム位相幅制御のための 中心領域の開発

1. はじめに

原子力機構AVFサイクロトロン (K値110) では、微小領域における宇宙用半導体のシングルイベント効果等の材料科学研究や生物細胞への局所照射による生体機能解明研究などのために、4連四重極電磁石を用いたビーム集束方式によって、 $1\mu\text{m}$ 以下のビーム径及び照準位置精度を有する 10MeV/u 以上の重イオンマイクロビーム形成を目指している^[1]。マイクロビーム形成においては、集束電磁石での色収差による影響を抑えるには、ビームエネルギー幅 $|\Delta E/E| \leq 0.02\% \text{FWHM}$ にする必要がある^[2]。

サイクロトロンの加速電圧波形は正弦波であるため、ビームバンチの時間幅が大きなビームであれば、加速ギャップを通過する時の位相によって加速電圧の違いが大きく、エネルギー利得の差も大きくなる。そこで、通常用いられる基本波加速電圧波形に第五高調波を加えることによって、均一なエネルギー利得が得られる時間領域を拡大するフラットトップ加速システムを開発した^[3]。しかしサイクロトロン電磁石磁場が変動すると、ビームの回転周期が変わり、均一なエネルギー利得が得られる時間領域外で加速されて、目標とするエネルギー幅が達成できない。そのため、磁場変動の原因であったサイクロトロン電磁石の鉄心温度変化を 0.1°C 以下に制御し、ビーム位相の高安定化を実現した^[4]。また、ビームバンチの時間幅をこのエネルギー利得が均一な時間領域内に納めるために、ビーム位相をスリットや電極配置などで制限する必要がある。しかし、従来の中心

領域ではビーム位相とビーム軌道の相関関係が明確でないため、位相スリットによるビーム位相幅の制御が不十分であった。そこで全ての加速ハーモニックモード (H=1, 2, 3) のビーム軌道について、ビーム位相と位相スリットを通過する位置の間に強い相関関係を持たせ、高精度のビーム位相幅制御が可能な中心領域の電極の開発を行った^[5]。

本稿では、中心領域の改良後のビーム加速の現状やビーム位相幅の実測結果について報告する。

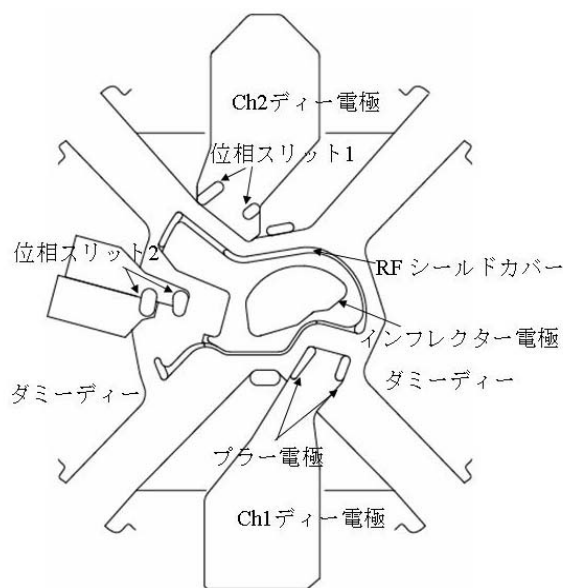


図1：改良後の中心領域の概念図

¹ E-mail: miyawaki.nobumasa@jaea.go.jp

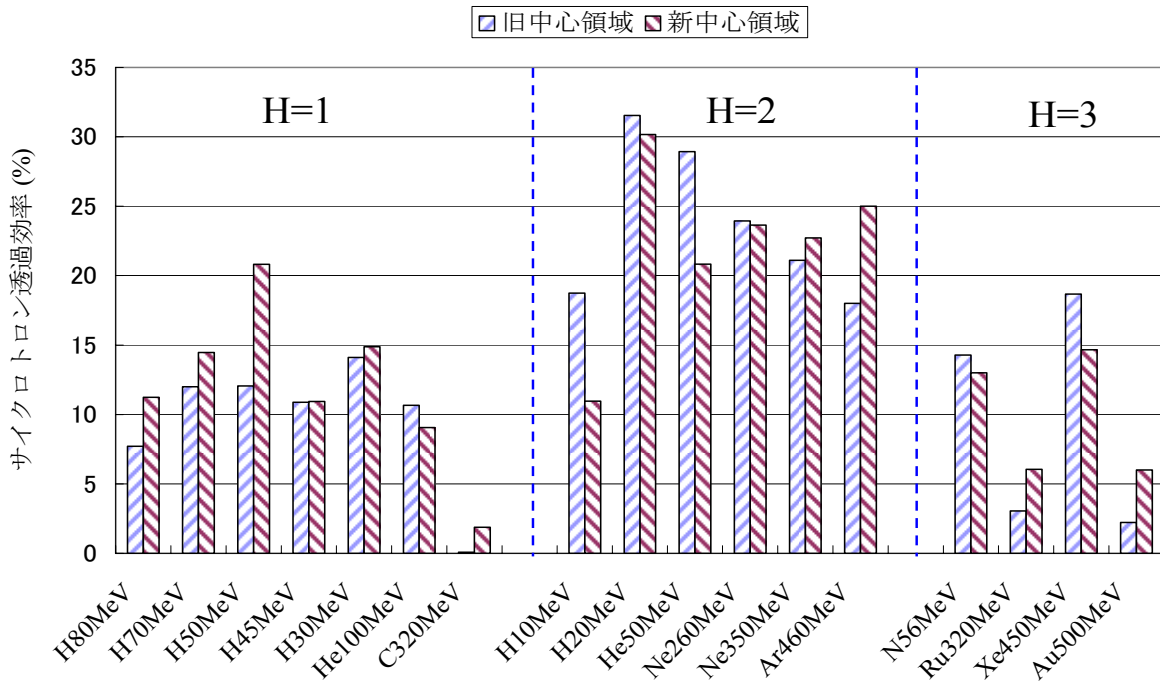


図2：新旧中心領域のビーム透過効率

2. 新中心領域でのビーム加速の現状

2.1 RFシールドの固定化

中心領域の改良においては、従来の中心領域において問題になっていたインフレクター電極での放電等のビームが不安定になる現象についての解決も図った。従来の中心領域ではインフレクター電極とRFシールドカバーが一体となって移動し、電極の位置によってはディー電極先端とのギャップが狭く、加速電圧が50kV以上になる運転条件で放電が起きていた。またビームが不安定になる現象については、シールド部分がRF加熱されることにより、スパイラル電極の温度が上昇し、高圧電極間の絶縁碍子の絶縁性が劣化して電圧が低下することにより生じていたと考えられた。これらの問題を解決するために、RFシールドをインフレクター電極から分離してアース板に固定する構造へ改造した(図1)。その結果、放電やビームが不安定になる現象は収まり、現在安定したビーム加速が行われている。

2.2 初期加速位置の変更

RFシールドのアース板への固定に伴い、全ての加速ハーモニックモードに対して、インフレクター電極をRFシールドの内部に配置するとともに、プラー電極とRFシールドの間の初期加速位置を共通化する必要があった。しかし、TOSCAコードによる電場解析や軌道計算による設計の結果、H=3のビーム位相とビーム軌道位置の相関関係が認められず、ビーム位相幅制御の精度が良くないことがわかった。そこで、H=3のインフレクター電極を180°回転し、ビームをもう一方のディー電極に入射させることとし、

既存の二つのピラーが独立駆動である位相スリット1をプラー電極とすることで、初期加速電場生成の自由度を保たせた。一方、従来と同じディー電極に入射するH=1、2のビームは軌道半径が異なるため、プラー電極の二つのピラーをそれぞれ独立で駆動可能な機構にし、初期加速電場生成の自由度を向上させた。図2に新旧中心領域におけるビーム透過効率の一例を示す。ビームの透過効率は、サイクロトロンの入射と取り出しビーム電流の比である。RFシールドの固定によりビームへの追従性が損なわれたが、一方でプラー電極ピラーの独立駆動化で補うことにより、ビーム透過効率は改良前後もほとんど変わらず、条件によっては増加しているものもあり、順調にビームを提供することができている。

3. ビーム位相幅制御

3.1 ビーム位相幅制御

AVFサイクロトロンでは、イオン源から引き出されたビームのエネルギー幅がディー電極での加速によるエネルギー利得に対して無視できるほど小さいので、主に入射時の加速電圧の時間(位相)差によるエネルギーの違いが中心領域での半径方向のビームの広がりになって現れる。エネルギー利得が増加するにつれてその寄与は相対的に小さくなるため、位相制御の上では最初のターンにおいてスリットで制限することが最も効果的である。またスリット位置でビームが発散していれば、スリットで空間的に制限を加えることによりビーム強度が大きく減少し、一方でスリットギャップを広げる必要がない位相の粒子がスリットを通過することで位相制御が難

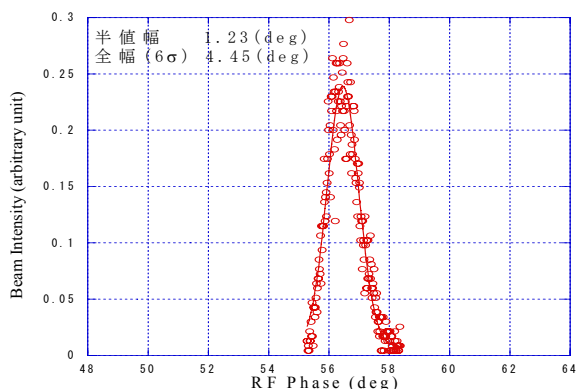


図3 : H70MeVのビーム位相分布

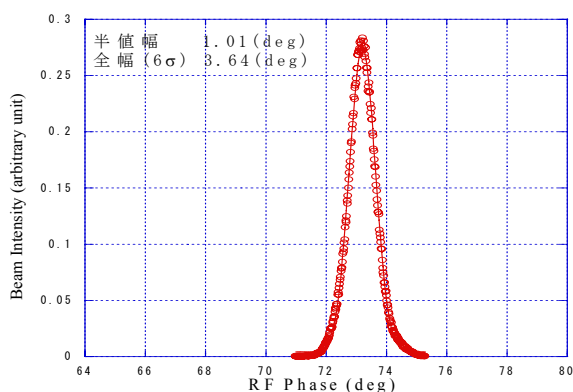


図4 : Ne260MeVのビーム位相分布

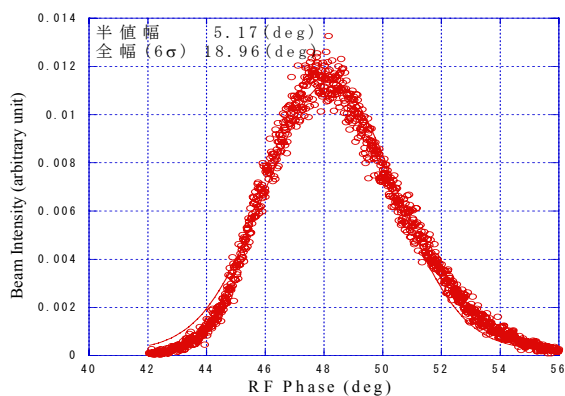


図5 : Ar150MeVのビーム位相分布

しくなるため、スリット位置で水平方向に収束させるとともに、位相に応じてビーム軌道位置が異なっている必要がある。従って、設計においてもスリット位置で位相差によって軌道が広がり、水平方向の位相空間での広がり集束することを軌道計算により確認した。そこで改良後のサイクロトロン中心領域のスリットや電極等の位置とビーム位相幅の関係を明らかにし、ビーム位相幅の実用的な制御法を確立するため、サイクロトロン出口に設置したプラスチックシンチレータを用いて、ビーム位相幅の測定を行った。

3.2 ビーム位相幅測定

ビーム位相幅制限のために用いる機器は、中心領域の位相スリット1、2とプラー電極ピラーである(図1)。H=1,2の場合、プラー電極、Ch1ディー電極で加速された後、位相スリット2で主にビームを制限し、次の位相スリット1は補助的な役割を担っている。一方、H=3は位相スリット1がプラー電極の役割を担い、H=1,2でのプラー電極は位相スリットの代用として、H=1,2の場合と同様に位相スリット2で主にビームを制限し、補助的にこの位相スリットを使う。これらを用いて、マイクロビーム形成に必要とされるエネルギー幅を達成するためのビーム位相幅14rf(deg)以下^[6]を全ての条件で達成するため、位相スリットの位置の最適化を行った。図3にH=1の一例としてH70MeV、同様に図4にH=2としてNe260MeV、図5にH=3としてAr150MeVの測定結果を示す。H70MeVではビーム位相幅4.5rf(deg)FW、Ne260MeVでは3.6rf(deg)FWが得られ、目標とする位相幅内に制御できることが確認できた。またその時の取り出しビーム電流が数十nAとマイクロビーム形成に十分な電流値を得ることができた。一方、H=3のAr150MeVは目標値よりも大きく、ビーム強度が小さいため、現状ではマイクロビーム形成は困難であると考えられる。このため、更なる最適化を行うことや新たな位相スリットを開発して位相幅をより精度良く制限することが、今後の課題である。

4. まとめ

原子力機構AVFサイクロトロンにおいて、ビーム位相幅制御のための中心領域の改良を行った結果、通常の運転においてはビーム透過率がほとんど低下せず、ビーム位相幅をH=1,2で目標値14rf(deg)FW以下を達成し、マイクロビーム形成などの高品位ビーム生成に向けて大きく前進した。

参考文献

- [1] M. Fukuda, et al., "An energy spread minimization system for microbeam generation in the JAERI AVF cyclotron", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B210, 33 (2003)
- [2] M. Oikawa, et al., "Design of a focusing high-energy heavy ion microbeam system at the JAERI AVF cyclotron", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 210, 54 (2003)
- [3] S. Kurashima, et al., "Improvement in beam quality of the JAEA AVF cyclotron for focusing heavy-ion beam with energy of hundreds of MeV", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B, to be published.
- [4] S. Okumura, et al., "Magnetic field stabilization by temperature control of an azimuthally varying field cyclotron magnet" Rev. Sci. Instrum. 76, 033301 (2005).
- [5] 宮脇信正 他, "原研AVFサイクロトロンにおけるフラットトップ加速のための中心領域の設計", Proceedings of the 14th Symposium on Accelerator Science and Technology p.404-p.406(2003).
- [6] M. Fukuda, et al., "Flat-top acceleration system for the variable-energy multiparticle AVF cyclotron" Rev. Sci. Instrum. 74, 2293 (2003).