# 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

宮脇信正、福田光宏、倉島 俊、奥村 進、中村義輝、奈良孝幸、
上松 敬、石堀郁夫、吉田健一、荒川和夫
日本原子力研究所 高崎研究所 〒370-1292 群馬県高崎市綿貫町 1233

#### 概要

原研 AVF サイクロトロンでは、集束レンズ方式により ビーム径 1µmのマイクロビームを形成するため、フラッ トトップ加速によるビームエネルギー幅|∠E/E|≦2×10<sup>4</sup> の達成に必要なビーム位相幅±8°以下に制御するための 中心領域の設計を行った。TOSCA コードによる 3 次元電 場解析を基に加速ハーモニックモード H=1、2、3 のそれ ぞれについて軌道解析を行い、電極形状及び配置の最適化 を行った。その結果、各加速ハーモニックモードに対して |∠| φ|≦8° RF のビーム位相幅を達成する目途を得た。

#### 1 序論

原研 AVF サイクロトロン(K値 110)[1]は、3種類の 加速ハーモニックモード H=1、2、3での運転により材料 科学・バイオ研究専用のサイクロトロンとして多くのイオ ン種を幅広いエネルギー範囲にわたって提供している。現 在、バイオ研究に必要なビーム径 1 µmのマイクロビーム を形成するため、フラットトップ加速によるエネルギー利 得の均一化[2]、サイクロトロン磁場の高安定制御による ビーム位相の高安定化[3]、ビーム位相幅制御の高精度化 などの技術開発を進めている。

マイクロビーム形成には、4連四重極電磁石を用いたビ ーム集束法を採用しているが、集束レンズでの色収差の影 響を抑えてビームを1μmに集束させるためにはビームエ ネルギー幅を|∠E/E|≤2×10<sup>4</sup>にする必要がある[4]。そこ でエネルギー利得の均一化によってエネルギー幅の縮小 化を図るフラットトップ加速システムの開発を行ってい る。

原研 AVF サイクロトロンのフラットトップ加速システ ムは、省電力、省スペースの観点から高調波電圧の振幅が 小さく、波長も短い第5高調波を基本波電圧に重畳する方 式を用いている。図1に基本波加速と第5高調波の重畳に よるフラットトップ加速のエネルギー利得分布を示す。 エネルギー利得の幅を|△E/E|≦2×10<sup>4</sup>にするビーム位相 幅は16°であるため、この範囲を越える位相の粒子は、 位相スリットにより排除する必要がある[5]。しかし、従 来の中心領域ではビーム位相をビーム軌道の相関関係が 明確でないため、ビーム位相幅の制御が不十分であった。 そこで H=1、2、3のそれぞれの粒子の軌道について、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 域の電極設計を行った。



図1:基本波加速と基本波に第5高調波を重畳した フラットトップ加速のエネルギー利得分布

## 2 設計の基本的考え方

#### 2.1 従来の中心領域の問題点

従来の中心領域では、位相スリットのピラーギャップ を3mm程度に設定することにより|△φ|≦8°RFに制御可 能であるが、ビーム電流は大幅に減少し、実用的ではなか った。また、RFシールドカバーと一体になったインフレ クター電極を用いているため、インフレクター電極の位置 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は放電が起こることがあっ た。シールド部分のRF加熱によりスパイラル電極に熱が 伝わり、高圧電極間の絶縁碍子の絶縁性が劣化して電圧が 降下し、ビーム電流が不安定になることもあった。さらに 加速ハーモニックモードを変更するためには、インフレク ターとプラーの二つの電極を交換する必要があり、作業時 間として2時間を要することから、サイクロトロンの稼働 率が上がらない原因となっていた。

#### 2.2 新しい中心領域の設計方針

新しい中心領域の設計においては、ビーム位相幅を|⊿ ¢|≦8°RFに制御できること、軌道中心のずれを最小化 すること、加速電場による鉛直方向の集束力を確保するこ となどを目標に電極形状及び配置の最適化を行った。イン フレクター電極については、スパイラル型電極の電場半径、 磁場半径の妥当性と空間的制約を検討した結果、従来と同 様のものを採用することにし、ビーム位相制御のための電 極配置の最適化を行うこととした。インフレクターの RF シールドの分離、アース板への固定化にあたっては、ディ ー電極及びダミーディー先端電極との幾何学的整合を取 りながら、ビーム位相とビーム軌道位置の間に強い相関を 生じるように、プラー電極との間に形成される初期加速電 場を最適化することにした。位相スリットのピラー形状に ついては、ビーム位相幅制御に最適な形状をビーム軌道か ら求めることとした。

## 3 新しい中心領域の設計

インフレクターの RF シールド固定化に伴い、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、プラー電極との 間の初期加速位置を共通化する必要がある。ところが、 H=3 の場合、H=1 及び2 のビーム位相幅制御に最適なプラ 一電極位置ではビーム位相とビーム軌道位置の相関関係 が十分でなく、ビーム位相幅制御の精度が悪くなることが 分かった。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 した。



図2: TOSCA による電場計算のためのメッシュの一例

CH2 Dee



図3:新しい中心領域とH=2の軌道

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。一方、H=3 のプラー電極は、既存の二つの ピラーが独立駆動である位相スリット 1 と兼用させるこ とにより、H=1、2 と同様に加速電場生成の自由度を保た せた。また H=3 のフラットトップ加速時のみ、H=1、2 のプラー電極を H=3 のビーム位相幅制御に最適化した位 相スリット3 のピラーに取り替えることとし、ビーム位相 幅制御の高精度化を図った。

固定 RF シールドカバー、独立駆動可能なプラー電極、 ディー先端電極等の形状・配置を最適化するため、TOSCA コードによる電場解析を行った。計算に用いたメッシュの 一例を図2に示す。これにより得られた電場分布を用いて 軌道解析を行い、フラットトップ加速において高精度なビ ーム位相幅制御が可能となるように反復して電極形状と 配置を変え、最適な解を求めた。図3に新しい中心領域の 電極配置と H=2 の軌道を示す。

## 4 ビーム軌道解析

#### 4.1 ビーム位相幅

TOSCA コードにより求めた電場分布を用いて、各加速 ハーモニックモードの軌道解析を行った。1 ターン目に設 置された位相スリット 2 における粒子の半径位置と 100 ターン目のディー電極入口加速ギャップ通過時の RF 位相 との関係を図 3~5 に示す。解析を行った加速粒子は 70MeV H<sup>+</sup>(H=1) (図 4)、460MeV<sup>40</sup>Ar<sup>13+</sup>(H=2) (図 5)、 150MeV<sup>40</sup>Ar<sup>8+</sup>(H=3) (図 6) であり、フラットトップ加速 を行っている。初期ビーム位相は40° RF の範囲で 5° RF 毎に設定し、入射ビームの水平方向のエミッタンスを  $\epsilon$  =2mm×80mrad=51  $\pi$  mm・mrad と仮定した。中心磁場 バンプによるビーム位相のドリフトの影響はほとんどな く、等時性が保証される領域として 100 ターン目の半径位 置 40cm(H=1)、55cm(H=2)、61cm(H=3)において、ビーム 位相と位相スリットでの粒子位置の相関を調べた。

各加速ハーモニックとも位相スリット 2 の位置と 100 ターン後の RF 位相に強い相関関係が得られており、特に、 H=2 については r=28~34mm の範囲でビーム位相幅が 16°RF 以内に収まっており、位相スリット 2 による制御 が容易であることがわかった。また、H=1、H=3 について も、位相スリットによる空間的なビーム制限や入射ビーム のエミッタンス制限により、ビーム位相幅の制御が可能で あることを示している。





図 6:加速ハーモニック H-3の RF 位相とスリット位置の関係

4.2 ビームセンタリング

中心領域における初期加速により生じる軌道中心のず れが大きくなった場合、ビーム軌道の安定性に影響を及ぼ すだけでなく、ビーム位相のずれが生じて等時性が保証さ れなくなり、加速ギャップでのエネルギー利得にも影響を 及ぼす可能性がある。軌道中心のずれについて解析を行っ た結果を図7に示す。最もターン数が多く軌道中心のずれ が大きい H=1 でも軌道中心の変位量はほぼ±10mm 以内 に収まっており、既設ハーモニックコイルによる補正が可 能な範囲に収まっている。



図7:軌道中心の変位

#### 4.3 鉛直方向の集束

プラー電極の鉛直方向のアパーチャーは 20mm、ディー 電極のアパーチャーは 24mm であるため、ビームはこれ以 下に集束させる必要がある。インフレクターから出射する ビームの鉛直方向のエミッタンスを  $\epsilon_z$ =2mm×80mrad=51  $\pi$  mm・mrad と仮定して軌道計算を行った。その結果、ス パイラルセクターによる強集束の効果が小さい20cm ぐら いまでの中心領域付近では±0.6mm 程度まで振幅が大き くなったが、その後次第に集束し、ディー電極の開口部を 問題なく通過できることを確認した。

## 5 まとめ

原研 AVF サイクロトロンにおいて TOSCA コードによ る 3 次元電場解析とビーム軌道解析によりビーム位相幅 制御の高精度化を目指した中心領域の設計を行い、フラッ トトップ加速に必要なビーム位相幅の制御が可能である ことを確認した。

新しい中心領域を用いたフラットトップ加速によって エネルギー高分解能化を図ることによりビームの質が向 上し、マイクロビーム形成に大きく貢献できるだけでなく、 ビームハローがない大強度のビームの輸送が可能となり、 ターゲット上のビーム整形も容易になる。また、930型 AVFサイクロトロンでのシングルターン引出しを実現し、 引き出し効率の向上によるデフレクター等の放射化低減 やシングルパルスビームの安定供給などが期待される。

# 参考文献

- K. Arakawa, et al., Proceedings of the 13th International Conference on Cyclotrons and their Applications, Vancouver, Canada, 119(1992).
- [2] S. Kurashima, et al., Proceedings of the 13th Symposium of Accelerator Science and Technology, Suita, Osaka, October 2003, p.232
- [3] S. Okumura, et al., Proceedings of the 13th Symposium of Accelerator Science and Technology, Suita, Osaka, October 2003, p.283
- [4] 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)
- [5] M. Fukuda, et al., "Flat-top acceleration system for the variable-energy multipurpose AVF cyclotron", Rev. Sci. Instrum. 74, 2293 (2003)