

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 $1\mu\text{m}$ 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 $|\Delta E/E| \leq 2 \times 10^{-4}$ の達成に必要なビーム位相幅 $\pm 8^\circ$ 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 $|\Delta \phi| \leq 8^\circ$ RF のビーム位相幅を達成する目的を得た。

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 $1\mu\text{m}$ 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 $1\mu\text{m}$ に集束させるためにはビームエネルギー幅を $|\Delta E/E| \leq 2 \times 10^{-4}$ 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 $|\Delta E/E| \leq 2 \times 10^{-4}$ 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と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。

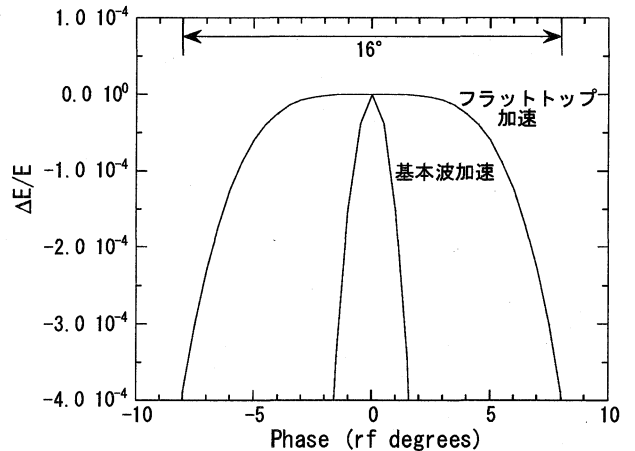


図 1: 基本波加速と基本波に第 5 高調波を重畳したフラットトップ加速のエネルギー利得分布

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 $|\Delta \phi| \leq 8^\circ$ 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、高圧電極間の絶縁障子の絶縁性が劣化して電圧が低下し、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 $|\Delta \phi| \leq 8^\circ$ 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

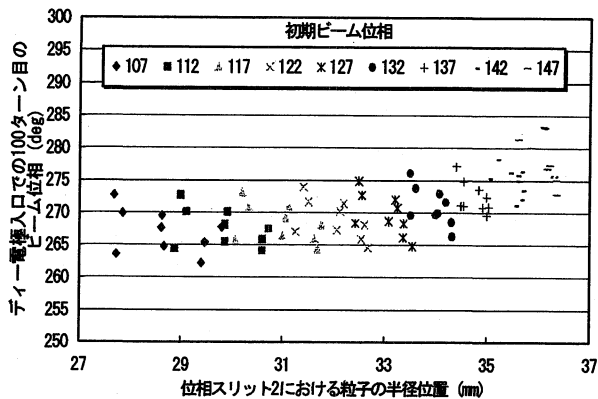


図 5 : 加速ハーモニック H=2 の RF 位相とスリット位置の関係

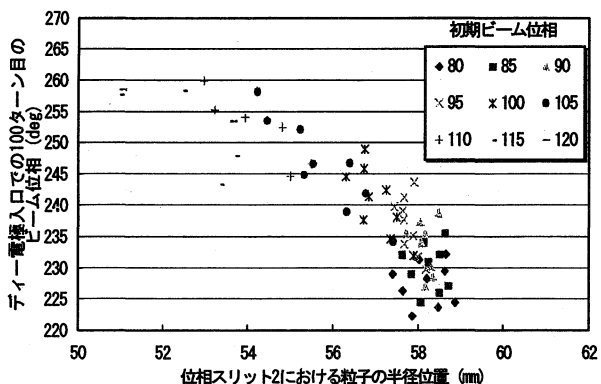


図 6 : 加速ハーモニック H=3 の RF 位相とスリット位置の関係

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。

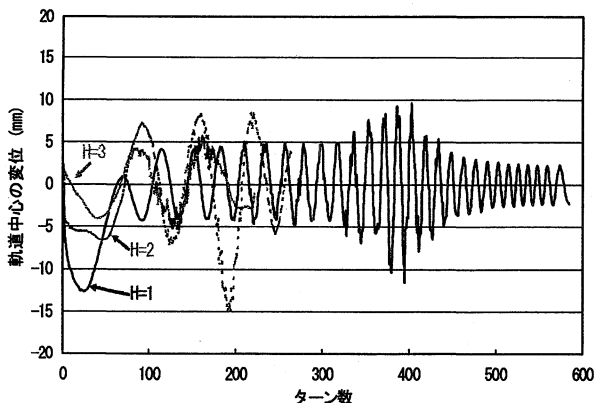


図 7 : 軌道中心の変位

4.3 鉛直方向の集束

プレー電極の鉛直方向のアーチャーは 20mm、ディー電極のアーチャーは 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 $\epsilon_z=2\text{mm}\times 80\text{mrad}=160\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 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

- [1] 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)