

OPTIMIZATION OF THE FLATTOP ACCELERATION VOLTAGE FOR THE JAERI AVF CYCLOTRON

N. Miyawaki, M. Fukuda, S. Kurashima, S. Okumura, T. Nara, T. Agematsu, I. Ishibori, K. Yoshida, K. Kashiwagi,
W. Yokota, K. Arakawa and Y. Nakamura

Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment, Japan Atomic Energy Research Institute
1233 Watanuki-machi, Takasaki, Gunma, 370-1292

Abstract

The flat-top acceleration system with the fifth-harmonic of the fundamental frequency has been designed to minimize energy spread for the microbeam production in the JAERI AVF cyclotron. In principle, the amplitude of the fifth-harmonic voltage is 1/25 of fundamental one to obtain a uniform energy gain distribution, but in reality the voltage ratio for the optimum flat-top acceleration doesn't correspond to 1/25, because an accelerating voltage distribution depends on a radial position and the dee angle. The optimum voltage ratio has been investigated for every accelerating condition by shifting a magnet field from isochronism. The energy spread of 2×10^{-4} can be achieved even in non-isochronous condition by changing an initial beam phase and an outermost trim coil field.

原研AVFサイクロトロンにおけるフラットトップ加速電圧の最適化

1. はじめに

原研AVFサイクロトロン^[1]は、材料科学やバイオ技術の研究開発に多くのイオンビームを幅広いエネルギー範囲にわたって提供している。また長時間にわたって安定なビームの提供を実現した電磁石鉄心の温度制御による磁場の高安定化技術^[2]及びイオン種やエネルギーを短時間で切り替えるカクテルビーム加速技術などの高度な加速器技術を開発し、イオンビーム利用研究を先導している。

特にバイオ技術分野においては、マイクロアパーチャーを用いたコリメート方式によるビームスポット径5~10 μ mの数百MeV級重イオンマイクロビーム形成技術と自動高速シングルイオンヒット技術^[3]を開発し、生物細胞への局所照射などを用いた生体機能解明研究を可能にした。さらなるバイオ、材料研究への応用に向けて、ビームスポット径の高分解能化と照準位置の高精度化、スキャナー電磁石によるシングルイオンヒットの高速化を図るため、四連四重極レンズを用いたビーム集束方式によるビーム径1 μ m以下の数百MeV級重イオンマイクロビーム形成を目指して開発を進めている。この方式では、集束レンズで生じる色収差の影響を考慮すると、ビームのエネルギー幅を $\Delta E/E \leq 0.02\%$ にする必要がある。そこで、エネルギー幅を最小化する加速器技術の一つとして、フラットトップ加速システムを開発した^[4]。

フラットトップ加速システムは、正弦波の加速電圧波形に整数倍の周波数を持つ高調波を重ね合わせるにより加速電圧波形の平坦化を行い、電圧波形に起因するエネルギー幅を最小化する方法である。原研AVFサイクロトロンでは、省電力、省スペースの観点から、高調波の振幅が小さく、共振空洞の定在波波長も短い第5高調波を選択した。基本波に重

置する第5高調波電圧の半径方向の電圧分布が一樣であると仮定すると、等時性磁場の理想的な場合においては第5高調波と基本波の加速電圧の比は25となる。しかしながら実際は電圧分布が一樣でないため、電圧値は半径方向の位置に依存して変化する。従ってエネルギー利得の総和が揃うように高調波電圧の最適化を行った。また磁場が等時性になっていない場合は、初期加速位相をシフトさせることによりエネルギー利得を平坦化する手法を検討した。

2. フラットトップ加速電圧の周波数依存

2.1 加速ギャップに沿った電圧分布

バイオ、材料研究に必要とされる多くのイオン種及び幅広いエネルギー範囲に対応する必要性から、周波数可変型のフラットトップ加速用共振空洞の設計を行った。電磁場解析計算コード"MAFIA"^[5]を用いて得られた加速ギャップに沿った電圧分布を図1

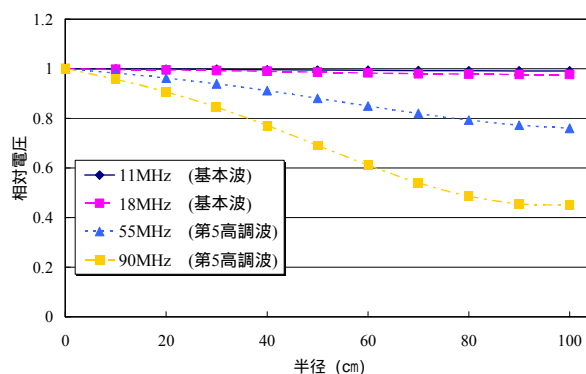


図1 MAFIAによる計算で得られた半径方向の加速電圧分布

に示す。

基本波の場合には $\lambda/4$ の定在波が共振空洞に励振されるため、引き出し半径の923mm付近までの電圧はディー電極先端部に比べて数%しか下がらない。それに対して第5高調波の場合には $3\lambda/4$ の定在波が励振されて周波数に応じてショート板の位置が異なるため、電圧分布の周波数依存性が大きい。従って、周波数が高くなるにつれて電圧の落ち込みは大きくなり、引き出し付近では中心部の半分以下まで電圧が低下する場合もあることがわかった。

2.2 初期位相幅とエネルギー幅

半径方向の電圧分布が一様でないため、等時性磁場中でもエネルギー利得は一定ではない。さらに、ビームの平衡軌道半径は加速回転数の平方根に比例して増加し、電圧の効果が大きな半径での加速回転数が増えることや、加速周波数が異なると電圧分布も違うことから、エネルギー幅を最小にする第5高調波電圧の最適値は加速条件に大きく依存する。

そこで、等時性磁場中の理想的な平衡軌道上を運動する単一粒子について、加速毎に得られるエネルギー利得を計算し、引き出し半径までの積算から、ビーム引き出し時のエネルギー幅が最小となる第5高調波電圧を求めた。図2に $^{40}\text{Ar}^{13+}$ 460MeVの加速条件で初期位相幅毎の基本波に対する第5高調波の電圧比とエネルギー幅の関係を示す。初期位相幅を小さくすると、到達可能なエネルギー幅の最小化は小さくなり、その時の電圧比は大きくなる。最適な電圧比は異なるもののすべての加速条件で同様の傾向が得られた。マイクロビーム形成に必要なとされるエネルギー幅 $\Delta E/E \leq 0.02\%$ を達成できる最大の初期位

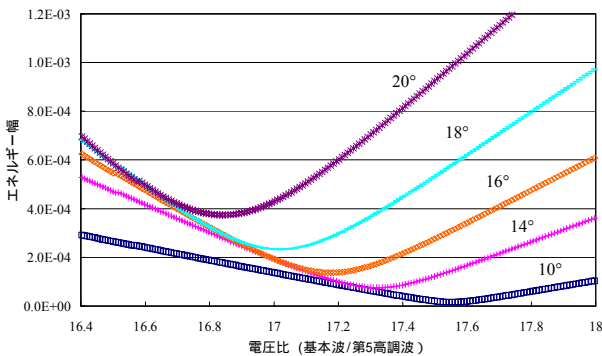


図2 初期位相幅毎の電圧比とエネルギー幅
相幅は、約 16° であることがわかった。

2.3 等時性磁場中の最適な電圧比

原研AVFサイクロトロンにおいて加速可能な粒子について、初期位相幅 16° でエネルギー幅が最小となる電圧比を加速ハーモニック毎に求めた結果を図3に示す。

電圧分布は周波数に依存するため、第5高調波電圧の落ち込みが大きい高い周波数の領域では、電圧比は小さくなる。一方、ディー電極のスパン角が 86° であることから、加速ハーモニック数に応じて

粒子がディー電極を通過する時の第5高調波のエネルギー利得に違いが生じ、加速ハーモニック数の違いによる電圧比の差が大きく表れている。従って、原研AVFサイクロトロンの場合には等時性磁場が成立しても、加速条件や共振器の構造から、エネルギー幅を最小にする第5高調波と基本波の電圧比は

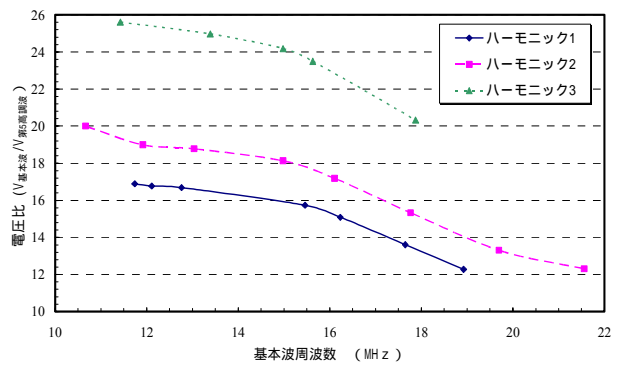


図3 加速条件毎のエネルギー幅が最小となる電圧比と周波数の関係
理論上の25にならない。

3. フラットトップ加速電圧の磁場依存

原研AVFサイクロトロンの加速領域用軌道計算コードを用いて、磁場分布が等時性からずれている場合のフラットトップ加速によるエネルギー幅が最小になる高調波電圧の検討を行った。 $^{40}\text{Ar}^{13+}$ 460MeVの加速条件で高調波電圧がない場合の中心軌道について、等時性からずれた磁場分布(以下'0G')、最外周のトリムコイルを用いて1.6G変化させた場合(以下'1.6G')のそれぞれの加速ギャップを通過する際のRF位相を図4に示す。但し、磁場を1.6G変化させた場合については初期位相を0Gに比べて $+20^\circ$ 遅らせている。また、図4の磁場分布を用い、フラットトップ加速のために重畳する第5高調波電圧を変え、初期位相幅 16° 以内の中心軌道についてエネルギー幅が最小になる値を求めた結果を図5に示す。

1.6Gはこの加速条件でメインコイルが作り出す磁場の 1×10^{-4} に相当する大きな変化量であり、0Gとは全く異なる加速粒子の位相の変化を示している。しかしながら、初期位相を $+20^\circ$ 変えただけで 2×10^{-4} 台のエネルギー幅を得るとともに、0Gの場合とほぼ同じ電圧比を得た。初期位相幅 16° の中心軌道のみ限定した条件ではあるが、等時性からずれた磁場であっても初期位相と高調波電圧を最適化することにより 10^{-4} オーダーのエネルギー幅が得られることを確認しており、現在、より詳細な解析を行っている。またエネルギー幅が最小になる電圧比については、図2の17.2に比べて小さくなっていることから、磁場のずれを高調波電圧で補っていると考えられる。

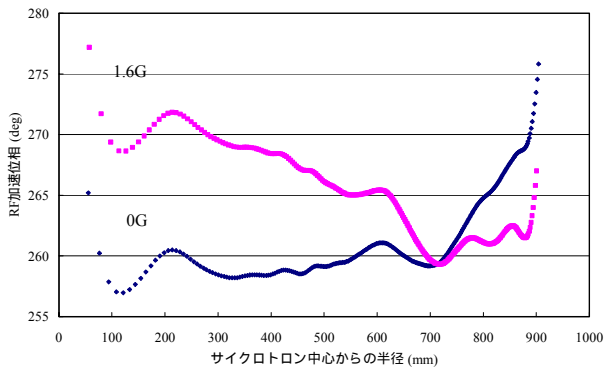


図4 加速粒子の位相の変化

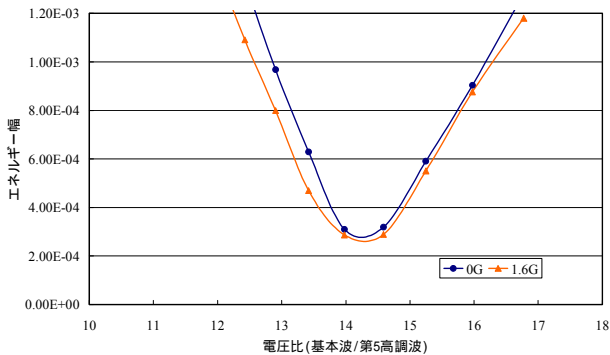


図5 異なる磁場中のエネルギー幅と電圧比の関係

4. まとめ

フラットトップ加速電圧の最適化について検討を行った結果、原研AVFサイクロトロンに起因するディレー電圧分布やディースパン角がビームのエネルギー幅を最小化するための基本波と第5高調波の電圧比に対して、大きく影響することを明らかにし、加速条件毎に等時性磁場中のエネルギー幅を最小にする電圧比を得た。また、等時性からずれた磁場分布の場合でも、初期位相や電圧比の調整によって、初期位相幅 16° について中心軌道の粒子のエネルギー幅を0.02%台まで達成できる見通しを得た。

参考文献

- [1] T. Nara, et al., "Status Report on JAERI-AVF Cyclotron System", 本要旨集.
- [2] S. Okumura, et al., "Temperature control of a cyclotron magnet for stabilization of the JAERI AVF cyclotron beam", Proc. 16th Int. Conf. on Cyclotron and their Applications, East Lansing, USA, p. 330 (2001).
- [3] T. Kamiya, et al., "Development of an automated single cell irradiation system combined with a high-energy heavy ion microbeam system", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 181, 27 (2001)
- [4] S. Kurashima, et al., "原研AVFサイクロトロンにおけるフラットトップ加速システムの開発", Proc. 13th Symp. on Accelerator Science and Technology, KEK, Tsukuba, Japan, p. 359 (2003).
- [5] The MAFIA collaboration, User's Guide MAFIA Version 4, CST GmbH, Luteschlägerstraße 38, D-64289, Darmstadt, Germany.