

FEASIBILITY STUDY OF THE K900 SUPERCONDUCTING AVF CYCLOTRON FOR MATERIALS SCIENCE AND BIOTECHNOLOGY

M.Fukuda^{1,A)}, S.Okumura^{A)}, S. Kurashima^{A)}, N. Miyawaki^{A)}, Y. Ishii^{A)}, Y. Saitoh^{A)}, K. Mizuhashi^{A)}, T.Agematsu^{A)},
A.Chiba^{A)}, T.Sakai^{A)}, T.Nara^{A)}, W.Yokota^{A)}, T.Kamiya^{A)}, K.Arakawa^{A)}, T.Tachikawa^{B)}, T.Mitsumoto^{B)}

^{A)} Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment, Japan Atomic Energy Research Institute
1233 Watanuki, Takasaki, Gunma, 370-1292

^{B)} Sumitomo Heavy Industries, Ltd.

5-2 Soubiraki, Niihama, Ehime, 792-8588

Abstract

A superconducting AVF cyclotron with a bending limit of 900 MeV and a focusing limit of 300 MeV is being designed to meet the requirements for the research in materials science and biotechnology at TIARA facility of JAERI. The spiral-sector shape of the cyclotron magnet has been optimized for acceleration of a 300 MeV proton to produce sufficient focusing forces in an extraction region. An energy range of the superconducting AVF cyclotron overlaps with that of the present K110 JAERI AVF cyclotron. Characteristics of a resonator for the superconducting AVF cyclotron have been investigated using the MAFIA code. An acceleration voltage in a frequency range of 24 to 64 MHz can be produced by the resonator with a $\sqrt{2}$ excitation mode.

材料・バイオ研究のためのK900超伝導AVFサイクロトロン設計研究

1. はじめに

原研高崎研のTIARA(Takasaki Ion accelerators for Advanced Radiation Application)^[1]のK110 AVFサイクロトロン^[2]は、幅広い加速イオン種とエネルギー範囲(陽子で5~90 MeV、重イオンで2.5~27.5 MeV/n)をカバーする材料・バイオ研究専用の加速器である。TIARAが稼働を始めて10年以上が経過し、様々な分野でのイオンビーム利用研究が進展するに従い、既設AVFサイクロトロン^[2]の加速性能を超えたGeV級エネルギー領域へのニーズも高まってきた。

植物育種研究では、水中での飛程を20mm以上に伸ばして育種の対象となる試料の範囲を大サイズ種子、花卉、幼芽、組織細胞まで大幅に拡張し、しかも突然変異誘発に最適なLET(Linear Energy Transfer)値 200~300 keV/ μ mを得るために100 MeV/n以上の炭素イオンビームなどが求められている。これにより、紫外線耐性作物、耐病虫性作物や環境耐性・環境修復樹木の作出、及び新品種の花弁・高品質果樹の作出等が期待されている。また、生きた細胞内の特定の部位を1 μ m以下の照準精度で正確に狙い撃ちし、生物の発生・分化過程や動植物細胞の情報伝達機構の解明など新たなバイオ技術・生命科学の研究領域の開拓を可能にする100 MeV/n以上の重イオンマイクロビーム^[3]が必要とされている。

また、材料開発では、GeV級重イオンビームによ

る高密度電子励起現象の基礎研究や高アスペクト比のイオン穿孔膜の開発などへのニーズが高い。また、宇宙用半導体素子の耐放射線性評価試験では、半導体素子を実装した状態で系統的な評価試験を実施するため、最大300 MeVの陽子と100 MeV/n以上の重イオンが求められている。

そこで、300MeV陽子と150MeV/n重イオンの加速を両立させるとともに、幅広いエネルギー領域をカバーする偏向リミット $K_0=900$ MeV、集束リミット $K_f=300$ MeVの超伝導AVFサイクロトロン^[4]の設計研究を行い、材料科学・バイオ技術分野のイオンビーム利用研究に最適な高性能のGeV級イオン加速器の開発を目指している。今回は、加速エネルギー範囲及び共振器の検討結果について報告する。

2. 加速エネルギー範囲

2.1 陽子の最大加速エネルギー

従来の超伝導AVFサイクロトロンは、3セクター型の磁極を用いているため、モード・ストップバンド共鳴($\nu_r = N/2$, Nはセクター数)の存在により、陽子の最大加速エネルギーは200 MeVが限界であった。この問題を解決するために、4セクター型磁極を採用し、300 MeV陽子の加速に必要な磁極形状等の最適化を図った。

超伝導AVFサイクロトロン^[4]の2組のメインコイルの内、中央平面に近い側に設置されたメインコイル

¹ E-mail: fukuda@taka.jaeri.go.jp

の電流密度を30 A/mm²(起磁力726 kA/coil)に上げて引出半径105cm付近の平均磁場と磁場勾配を高めるとともに、300 MeVにおいても鉛直方向のベータトロン振動数 ν_z が0.2以上の値を確保できるようにセクター磁極形状を最適化し、引出半径付近のビーム集束力を強める条件を見出した。300MeV陽子加速におけるエネルギーとベータトロン振動数の相関を図1に示す。これにより、陽子のエネルギーを300MeVまで上げる目処を得た。

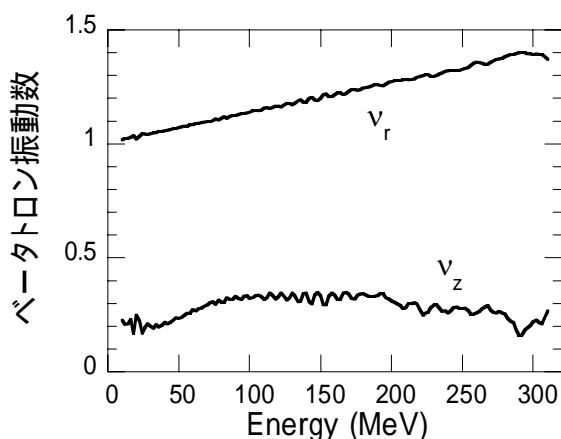


図1：300MeV陽子加速のエネルギーとベータトロン振動数の相関

2.2 加速エネルギー範囲の下限

既設AVFサイクロトロン(約3,200時間)に対して利用者のビームタイム申請時間は1.5倍を超えており、特にここ数年はバイオ技術分野の利用が著しい伸びを見せているため、重イオンビームの利用頻度が年々増加している。従って、超伝導AVFサイクロトロンがカバーする重イオンのエネルギー範囲を既設AVFサイクロトロンにオーバーラップさせることは施設利用効率を高める意味でも極めて有益である。そこで、超伝導AVFサイクロトロン(約3,200時間)の加速エネルギー下限値の検討を行った。

加速エネルギーが下がると、フラッターが増加するとともに、 $(\nu_z - 1)^2$ が相対的に小さくなるため、 ν_z は1に近づきやすくなる。従って、加速エネルギーの下限値を左右する主たる要因は、 $\nu_z = 1$ の共鳴現象とメインコイル及びトリムコイルの等時性磁場生成能力である。

そこで、前節の300 MeV 陽子加速用に最適化した磁極の磁場分布を用いてM/Q=1~6のイオンの閉軌道計算を行い、加速エネルギー下限値の評価を行った。その結果、等時性磁場を形成するメインコイル及びトリムコイルの性能には十分余裕があることから、低エネルギー側の加速限界は主に $\nu_z = 1$ 共鳴に依存していることがわかった。 $\nu_z = 1$ を横切ったときのエネルギーを下限値として、加速粒子のM/Q値毎にまとめたものを表1に示す。

実際に ν_z の値がどこまで許容されるかを明らかにするためには、軌道シミュレーション計算による詳細な解析が必要とされるが、ここでは単純に $\nu_z = 1$ を横切ったエネルギー値と既設AVFサイクロトロンの加速エネルギー範囲を比較してみる。陽子加速の場合には185 MeVが下限値であるが、水素分子イオンとしてH₂⁺を加速すれば76 MeV/nまでエネルギーを下げるのができ、既設AVFサイクロトロンの陽子の最大加速エネルギー90 MeVとオーバーラップさせることが可能である。重イオンの場合には、大きなM/Q値のイオンを加速することによってエネルギーを8 MeV/nまで下げることが可能であり、十分にオーバーラップが達成されている。

エネルギー下限値をさらに下げのために低エネルギー側でフラッターが大きくなるように磁極形状等を最適化することは可能であるが、フラッターが下がることによって逆に最大エネルギーも減少するため、実用上のニーズを考慮した上で加速エネルギー範囲を設定する必要がある。

表1：加速エネルギーの下限値

M/Q	イオン種	エネルギー下限値 (MeV/n)
1	Proton	185
2	20Ne10+	76
3	-	27
4	40Ar10+	18
5	40Ar8+	11
6	84Kr14+	8

3. 共振器

3.1 基本仕様

4セクター型磁極の4カ所のバレー部分に加速電極を配置し、磁極内を鉛直方向に貫通する開口部を設けて共振空洞を加速電極に結合させる。想定した同軸共振空洞モデルの外筒直径は380mm、内筒直径は160mmである。1/2モードの定在波を共振空洞内に励振し、最大100 kVの加速電圧を発生させる。加速ギャップは、中心領域で10mm、引出半径周辺で50mm、加速電極の高さは60mm、ビームが周回するスペースとして40mmを確保している。図2に加速電極及び共振空洞の配置の概念図を示す。

加速に必要なRF周波数帯域は24~64 MHzで、加速ハーモニクス数を2、3、4のいずれかに設定することにより、広範な加速エネルギー領域をカバーすることができる。主な加速粒子のパラメータを表2に示す。

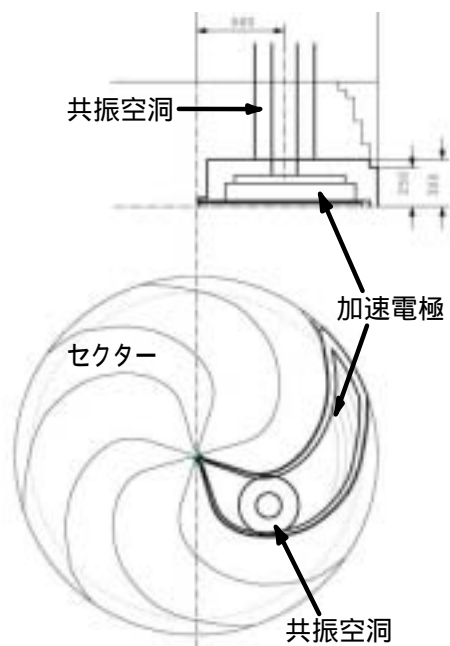


図 2 : 加速電極と共振空洞の配置の概念図

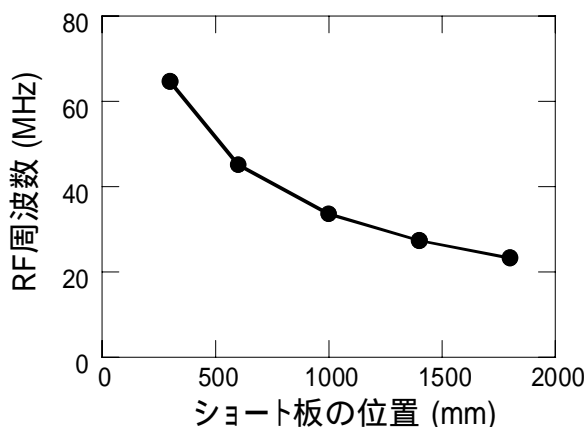


図 3 : 共振周波数とショート板位置の関係

表 2 : 主な加速粒子のパラメータ

パラメータ	陽子	$^{12}\text{C}^{6+}$	$^{40}\text{Ar}^{10+}$	$^{84}\text{Kr}^{14+}$
M/Q	1	2	4	6
エネルギー (MeV/n)	300	150	62	28
加速ハーモニクス	2	2	3	4
RF周波数 (MHz)	59.4	46.2	47.3	43.5

3.2 共振器の特性

電磁場解析コードMAFIAを用いて図 2 の共振空洞モデルの特性を評価した。ショート板の位置と共振周波数の関係を図 3 に示す。24 ~ 64MHz の加速周波数帯域をカバーするためには、1500mmのショート板駆動ストロークが必要とされるが、これは実用の範囲である。

加速ギャップに発生する半径方向の電圧分布は、30MHz以下の低い周波数域ではほぼ一様になるのに対し、周波数が高くなるにつれて一様性は失われて、半径位置への強い依存性がある。例えば、64MHz付近では、引出半径での加速電圧に対して中心領域では約 1 / 3 の電圧になっており、エネルギー利得が小さくなる分、ターン数の増加とターンセパレーションの減少が避けられない。

参考文献

- [1] R. Tanaka et al., Proc. 12th Intern. Conf. On Cyclotrons and Their Applications, Berlin, Germany, 566 (1989).
- [2] K. Arakawa et al., Proc. 13th Intern. Conf. On Cyclotrons and Their Applications, Vancouver, Canada, 119 (1992).
- [3] Y. Kobayashi et al., Nucl. Instr. And Meth., B210C (2003)308.
- [4] M. Fukuda, et al., “原研超伝導AVFサイクロトロン建設・整備計画”, Proc. 14th Symp. on Accelerator Science and Technology, Tsukuba, Japan, 302 (2003).