

原研超伝導 AVF サイクロトロン建設・整備計画 II

福田光宏^{A)}、奥村 進^{A)}、石井保行^{A)}、斎藤勇一^{A)}、宮脇信正^{A)}、水橋 清^{A)}、上松 敬^{A)}、
倉島 俊^{A)}、千葉敦也^{A)}、酒井卓郎^{A)}、奈良孝幸^{A)}、横田 渉^{A)}、神谷富裕^{A)}、荒川和夫^{A)}、
立川敏樹^{B)}、宮崎洋文^{B)}、松原雄二^{B)}、蜜本俊典^{B)}

^{A)} 日本原子力研究所 高崎研究所 〒370-1292 高崎市綿貫町 1233

^{B)} 住友重機械工業株式会社 〒792-8588 愛媛県新居浜市惣開町 5-2

概要

原研高崎の TIARA におけるバイオ・材料科学分野へのイオンビーム利用研究の新たな展開を図ることを目的に、新加速器施設の建設・整備計画を提案している。これまでの研究から、エネルギー100MeV/n 以上の重イオンを用いることにより、突然変異誘発による植物育種や材料開発等で、非常に大きな成果が期待できることが明らかにされている。このため Bending limit (Kb)=900、Focusing limit (Kf)=300 の超伝導 AVF サイクロトロンの検討を進めており、これまでに重イオン 150MeV/n とプロトン 300MeV の加速が両立可能なサイクロトロン電磁石の解が求められている。本報告では、建設・整備計画の概要と電磁石などの検討状況について報告する。

1 はじめに

原研高崎の TIARA(Takasaki Ion Accelerators for Advanced Radiation Application)[1]は、高速イオンビームの持つ特質をバイオ・材料科学など広い分野に生かすことを目的として建設されたイオン加速器施設であり、4基の加速器(K110AVF サイクロトロン、3MV タンデム加速器、3MV シングルエンド加速器及び400kV イオン注入装置)から構成されている。TIARA で加速可能なエネルギー範囲は重イオンで keV~27.5MeV/n、プロトンで数 keV~90MeV であり、カクテルビーム加速技術、マイクロビーム形成・照射技術、クラスターイオン及びトリプルイオンビーム照射技術、シングルイオンヒット技術など、ユニークな加速器・ビーム技術を開発してきた。

TIARA は産学官に開かれた施設として約 100 件の公募研究課題が毎年実施されており、これらの研究の進展に伴い、GeV 級エネルギー重イオンのニーズが高まってきた。現在の TIARA の K110AVF サイクロトロン[2]では炭素イオンを 27MeV/n までしか加速できないため、ブラックカーブのプラトー領域における LET(Linear Energy Transfer)は P100keV/μm 程度しか得られず、植物の突然変異誘発には不十分であり、かつ水中での飛程も約 2.4mm であるため、研究可能な試料対象も細胞、カルス、培養体、微小サイズの種子などに制限されている。炭素イオンのエネルギーを 100MeV/n まで上げると、植物の突然変異誘発に最適な LET 200~300keV/μm が得られ、かつ水中での飛程も約 26mm となり深部照射が可能となる。このため、育種対象試料も大サイズ種子、花卉、幼芽、組織細胞まで飛躍的に拡張でき、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。

100MeV/n オーダーの重イオンを用いてビーム径 1μm のマイクロビーム[3]を形成することにより、生きた細胞の狙った位置を正確に照射することが可能となる。これによりイオンビームを用いた細胞加工が可能となり、生物の発生・分化過程解明や動植物細胞の情報伝達機構の解明などの新たな研究の展開が期待される。

また、材料開発では、高エネルギー重イオンビームにより、光リソグラフィーやレーザー加工などの技術では得られない円筒状の微細孔を有する高アスペクト比のイオン穿孔膜が作製できる。この円筒状の微細孔(直径 0.01~1μm)を利用した生体機能性膜や電子デバイスなどの開発が期待されている。さらに、宇宙用半導体素子等の耐放射線性評価地上試験に有用であると期待されている。

現在、Kb=1200 の超伝導 AVF サイクロトロンや Kf=250 程度の(超伝導)AVF サイクロトロンは既に存在しているが、両者の limit を両立させた、あるいは両立させようとしているマシンは存在しない。わずかに KVI の K600 が Kb=600、Kf=200 の仕様となっている。その理由は、エネルギーが高くなるにつれて AVF サイクロトロンでは軽イオン、特にプロトンの加速と引き出しが困難となるからである。原研高崎の新加速器施設では、プロトンと重イオン加速の両立を目指した Kb=900、Kf=300 の超伝導 AVF サイクロトロンの設計を進めている。

2 超伝導 AVF サイクロトロンの性能

2.1 ビーム性能

バイオ・材料科学分野で必要とされているビーム性能を表 1 に示す。イオンビーム育種の研究では、炭素からクリプトンまでのイオンでエネルギーが 50~100MeV/n、水中における飛程が 2~3 mm から数 cm、LET が 100~400keV/μm の範囲が要求されている。宇宙用半導体素子の評価試験では、大気中において半導体素子のモールド部分を透過させて照射が可能である 120MeV/n 以上のクリプトンと、二次粒子によるシングルイベント効果を研究するためのプロトン 300MeV が必要とされている。材料開発分野では 100MeV/n 以上の重イオンが、また放射線化学分野では 100MeV/n 以上の重イオンで数十 nA 以上のビームが必要とされている。

一方、低エネルギー側は、既設 K110AVF サイクロトロンを用いた現在の研究の継続性の点から、可能な限り低いエネルギーまでの加速が要請されているが、ポジトロン放出核種を用いたイメージング技術の開発では、プロトン

18MeV で大電流 (数十 μ A) が必要であることから、小型加速器で別途対応する計画である。

表 1: バイオ・材料科学に必要なビーム性能

	バイオ分野	宇宙・材料分野
イオン種	C~Ar	H~Bi
エネルギー	50~100MeV/n	H:300MeV, HI:120MeV/n
ビーム電流	数 nA	~数十 nA
ビームサイズ	0.5~20mm ϕ	10mm ϕ
照射面積	10cm \times 10cm	10cm \times 10cm
均一度	\pm 5%以内	\pm 5%以内
照射方向	垂直照射	水平照射
特殊照射	シングルイオンヒット	パルスビーム シングルイオンヒット
試料及び照射方法	細胞、カルス、種子、大気中	デバイス、高分子、大気中

2.2 基本仕様

表 1 に示したようなビーム性能の要求に応えるイオン加速器として、 $K_b=900$ 、 $K_f=300$ の超伝導 AVF サイクロトロン の設計を開始した。表 2 にサイクロトロン の主な諸元を示す。RF 周波数範囲は 24~64MHz、加速ハーモニック数 2、3、4 により、図 1 に示したような広いエネルギー範囲でのイオン加速が実現できる。

表 2: サイクロトロン の主な諸元

偏向リミット K_b	900
集束リミット K_f	300
磁極直径	2300mm
セクター数	4
最小ヒルギャップ	70mm
最大平均磁場	4.5T
引き出し半径	1050mm
ディー電極数	4 (バレーに設置)
RF 周波数範囲	24~64MHz
加速ハーモニクス	2,3,4
ディー電圧 (ピーク)	100kV

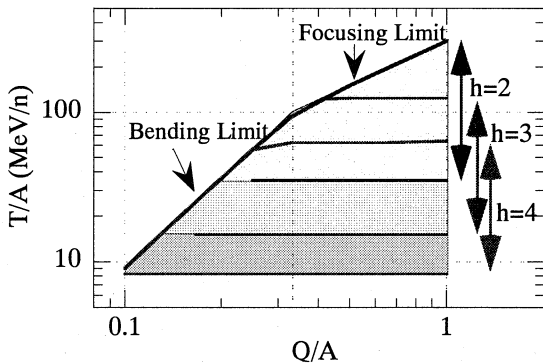


図 1: 加速可能なイオンの電荷/質量数 (Q/A) とエネルギーの範囲

3 電磁石の設計

3.1 電磁石の構造

4セクターサイクロトロンは、 $\nu_r=N/2$ (N :セクター数) の π モードストップバンド共鳴条件を避けることができ、プロトンを 300MeV まで加速することが可能であるが、3セクターサイクロトロン [4] では、プロトン 300MeV で $\nu_r=1.5$ に近づくため加速が困難となる。このため、サイクロトロン電磁石は、重イオンと軽イオンの加速を両立させるため、4セクター型を採用した。

サイクロトロン磁石の現在設計中の構造を図 2 に示す。主コイルは、二対の超伝導コイルを分離して設置する構造とし、等時性を確保できる磁場勾配を、広いエネルギー領域で達成できるように位置とコイルの形状を最適化した。バレーの形状は、等時性磁場を発生させるための最適な鉄磁場分布を生成するために、ステップ状とした。

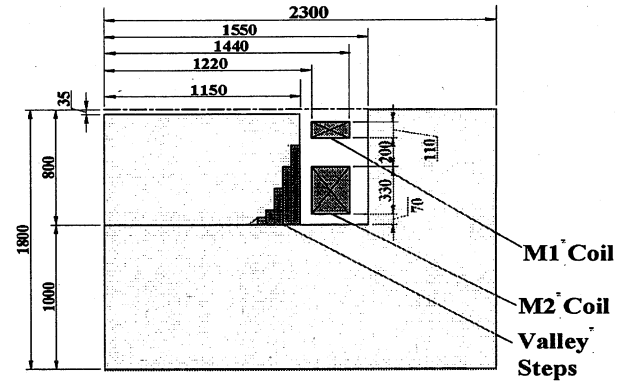


図 2: 超伝導 AVF サイクロトロン電磁石の 1/4 断面図

3.2 磁場

磁場分布は、OPERA-3D/TOSCA コードを用いて計算した。これまでに求めたプロトン 290MeV まで加速するための磁場の最適形状による平均磁場と鉄磁場の寄与について図 3 に示した。図から明らかなように、鉄により発生する平均磁場は、ほとんどフラットな分布である。このため、等時性磁場を形成するためには、トリムコイルによる磁場補正が必要であるが、この補正磁場は数百ガウス程度である。トリムコイルによる補正磁場の発生では、コイル発熱にともなう熱伝導による磁場の変動を避けるために、コイ

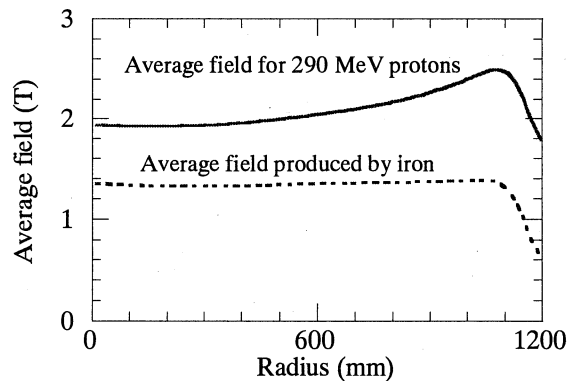


図 3: 290MeV プロトンの加速に必要な等時性磁場と鉄磁場成分

ルによる消費電力を可能な限り小さくすることが必要である。この目的のために、バレーにステップを設けることが有効であるが、バレーにステップを設けることはフラッターに大きな影響を及ぼす。本設計では、プロトン 290MeV 加速に必要な等時性と収束力が両立するようにステップの高さ・形状を最適化した。

3.3 エネルギー加速の制限

加速エネルギーの上限は、基本的に K_b と K_f により制限されるが、各加速ハーモニクスにおける上限にはさらにスパイラルインフレクターの構造及び電場による制限条件が加わる。本設計では、インフレクターの最小磁場半径 R_m 13mm、最大電場半径 R_e 30mm、最大電場 25kV/cm を想定している。一方、重イオンの高エネルギー側の加速限界については、 K_f を超えて加速が可能であるかどうかは興味深い課題である。そこで Q/A (電荷/質量) = 1/2 のイオンを代表例として $^{12}C^{6+}$ を用いた閉軌道計算から検討した結果、162.5MeV/n (1950 GeV) 辺りまで加速でき、 K_f (150MV/n) を若干超えられることがわかった。

一方、低エネルギー側を制限する主たる要因は鉛直方向のベータトロン振動の共鳴条件 $\nu_z=1$ である[5]。スパイラルセクター型 AVF サイクロトロンでの ν_z とフラッター F^2 及びスパイラル角 ϵ の関係は、

$$\begin{aligned} \nu_z^2 &= -\beta^2\gamma^2 + F^2(1 + 2 \tan^2 \epsilon) \\ &= -\beta^2\gamma^2 + \frac{(B_{hill} - \bar{B})(\bar{B} - B_{valley})}{\bar{B}^2} (1 + 2 \tan^2 \epsilon) \end{aligned}$$

で表され、加速粒子のエネルギーが下がると第2項のフラッターが増加するとともに、相対的に第1項が小さくなるため、 $\nu_z=1$ に近づきやすくなる。そこで、加速エネルギーの下限値を明らかにするため、モデル磁場を用いた閉軌道計算による評価を行った。その結果、エネルギーを下げてもトリムコイルの性能には十分余裕があるのに対し、 $\nu_z=1$ 共鳴によってプロトンは 185MeV、 $^{20}Ne^{10+}$ は 1520MeV (76MeV/n)、 $Q/A=1/3$ のイオンは 27MeV/n、 $^{40}Ar^{10+}$ は 720MeV (18MeV/n) が低エネルギー側の加速限界となることがわかった。取り出し近傍の Z 方向のベータトロン振動数が加速限界を決める場合、実際に ν_z の値がどこまで許容されるかはかなり微妙な問題で、今後、さらに詳細な検討を行う予定である。

図4に低エネルギー側の例としてプロトン 185MeV、 $^{20}Ne^{10+}$ 76MeV/n、 $A/q=3$ 27MeV/n、 $^{40}Ar^{10+}$ 18MeV/n についての軌跡を示す。

4 二段加速 (連結運転)

K110AVF サイクロトロンを入射器として使用し、引き出された低荷電状態のイオンを K900 超伝導 AVF サイクロトロンに入射し、中心領域に設置された荷電変換フォイルで高荷電状態に変換して加速した場合の重イオンエネルギーの向上の可能性について検討した。荷電変換比 Q_{K900}/Q_{K110} は、K900 超伝導 AVF サイクロトロンの中心付近に設置された荷電変換フォイルに到達する入射イオンの状態に依存するため、入射速度と荷電変換効率との関係を考慮するとともに、K110 と K900 の周波数帯域が大幅

に違うことから周波数比の検討が必要とされる。さらに、磁

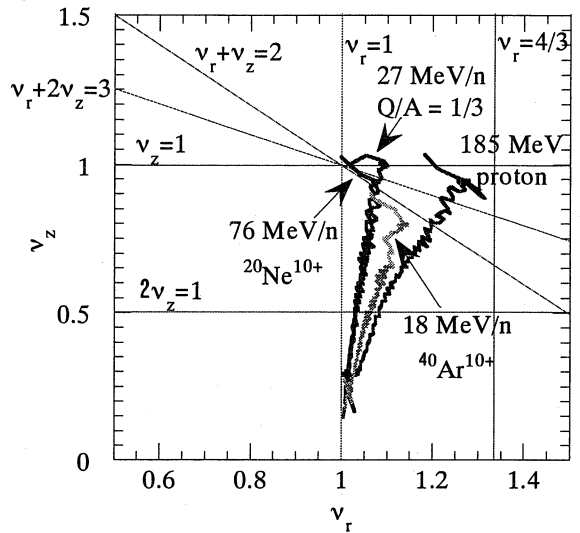


図4：プロトン 185MeV、 $^{20}Ne^{10+}$ 76MeV/n、 $Q/A=1/3$ 27MeV/n、 $^{40}Ar^{10+}$ 18MeV/n のチューンダイアグラム

磁気剛性の観点から K900 に入射できる条件を考慮することも必要である。これらの条件を踏まえて検討した結果、K110AVF サイクロトロンのビームエネルギーは、K900 超伝導 AVF サイクロトロンによる加速で 2 ~ 3 倍高くすることができることが分かった。しかし、この程度のエネルギーの向上は、高性能 ECR イオン源の開発により、K900 超伝導 AVF サイクロトロンの単独運転で実現可能である。従って、エネルギーを飛躍的に高めるという意味では、K110AVF サイクロトロンを入射器とした二段加速は得策でないことが明らかとなった。

5 プロジェクトの現状

加速器、建家、実験利用系を含む加速器施設全体の概念設計と同時にバイオ・材料科学分野の研究計画の検討が並列して進められている。また、平成15年度は、バイオ・材料科学分野を中心として、高エネルギー重イオンビーム利用により期待される研究成果についての経済への波及効果と経済規模、学術的な貢献度、及び社会的な貢献度についての調査が進められている。

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] G. Gale et al., Proc. 11th Intern. Conf. On Cyclotrons and Their Applications, Tokyo, Japan, 184 (1986).
- [5] H.G. Blosser Proc. 9th Intern. Conf. On Cyclotrons and Their Applications, Caen, France, 147 (1981)