

氏 名 Taufik

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2108 号

学位授与の日付 2019 年 9 月 27 日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 加速器科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Beam Dynamics for a Racetrack-Shape Fixed Field Induction
Accelerator for Giant Cluster Ions and Its Key Devices

論文審査委員 主 査 教授 白形 政司
教授 外山 毅
准教授 宮島 司
准教授 吉田 光宏
シニアフェロー 岡村 勝也
高エネルギー加速器研究機構加速器科学支援
センター

(Form 3)

Summary of Doctoral Thesis

Name in full Taufik

Title Beam Dynamics for a Racetrack-Shape Fixed Field Induction Accelerator for Giant Cluster Ions and Its Key Devices

A well-known energetic giant cluster ions interaction with a target material called cluster effects have attracted attention for high energy application such as mutation or material science. So far, giant cluster ion acceleration is performed by electrostatic accelerator which has a limitation in maximum energy. Meanwhile RF acceleration has a bandwidth limitation due to a large mass number to charge state ratio (A/Q). A racetrack-shape fixed field induction accelerator (RAFFIA) is a unique solution for high energy giant cluster ions acceleration. The RAFFIA employs the induction acceleration system to accelerate C-60 ($A=720$, $Z=10$) from 10 MeV to 144 MeV.

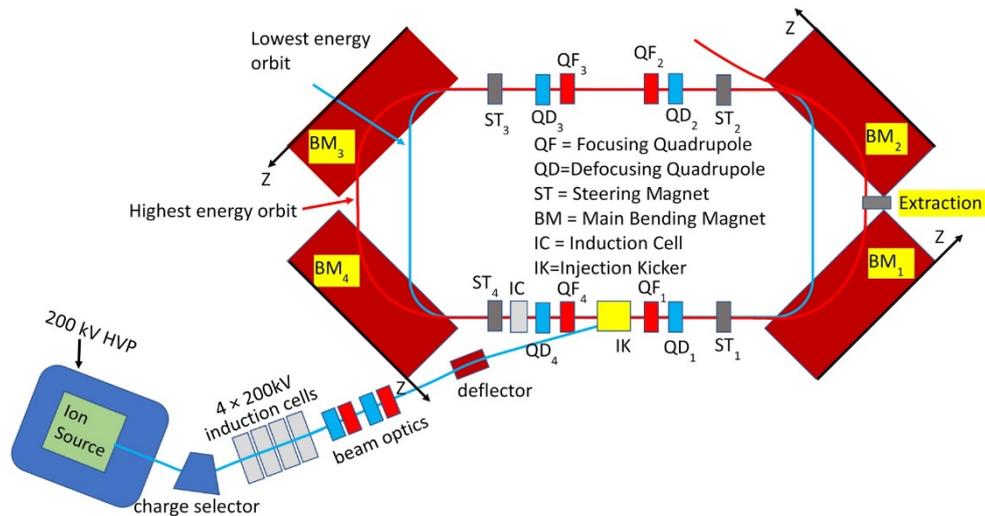


Figure 1: Layout of the RAFFIA

As shown in Fig. 1, the RAFFIA ring with two straight sections consists of four bending magnets, ramping quadrupole doublets, steering magnets, electrostatic injection kicker, and induction cells. Racetrack orbits are set up by four bending magnets. Slant angle between the orbit and front surface of the bending magnet induce extremely large edge defocusing in the vertical direction. Thus, the gradient field in the main pole region and the reverse field in the front of the bending magnet is applied to give a net focusing in the both vertical and horizontal directions.

In order to investigate the orbit stability, a particle tracking code based on the Runge-Kutta method has been developed to simulate particle orbits through the acceleration cycle. A linear orbit theory has been established to figure out the essential features of the RAFFIA such as the lattice function, momentum dispersion function, closed orbit distortion (COD), and compaction factor. In some sense, they are similar

to that in a synchrotron. However, they vary with acceleration, because the orbit gradually changes like that in a cyclotron. Non-uniformity of the magnetic field along the longitudinal direction of the bending magnet generates the intrinsic COD. Ramped steering magnets are required for orbit stability as well as ramped quadrupole doublets. The beam stability is confirmed through an entire acceleration cycle by macroparticle tracking simulations. Longitudinal motion with a time varying transition energy, which is one of characteristic features in the RAFFIA, has been studied with a help of computer simulations.

The space charge effects on beam-core evolution and the beam current threshold have been discussed. The beam-core evolution equation approach which has a merit of an extremely quick evaluation time, is justified by the macroparticle tracking simulation. The beam-core evolution equation can work as a powerful tool to know what happens in high-intensity beam operation and to estimate the space-charge limited current for any accelerator ring. Poincaré mapping in the beam core phase space $(\sigma, d\sigma/ds)$ can clearly manifest how the beam core evolves, depending on a parameter of beam current. Below the beam current threshold, the Poincaré map is stable around the matched beam-core phase point called an elliptic point in the nonlinear dynamics terminology. Beyond the threshold, the elliptic point disappears and perio-doubling bifurcation takes place; the beam-core size actually achieves a large value. This beam-core instability can be rigorously analysed by using the linearized beam-core evolution equation and matrix theory (tangent map). A scaling law is evaluated to know the stability threshold for a cluster ion with various A/Q or injection energy or emittance. A C_{60}^{10+} beam with 10 MeV injection energy and 1×10^{-5} m-rad beam emittance in the RAFFIA has the beam current threshold around 225 μA .

A unique feature of the RAFFIA bending magnet is an inverse field strip in the front side. It has been justified by using a prototype bending magnet where the main bending field and this reverse field can be excited by a single pair of two coils. Magnetic attraction force gives a significant reduction of the gap size, which is caused by a long nose property in the pole face. The gap reduction must be considered at the stage of designing. Insertion of pole gap supports into the gap may be another countermeasure. Shaping of the pole gap must be carried out carefully by using a high precision machine, because the mechanical profile of the pole gap along the longitudinal direction significantly affects on the magnetic field profile. Comparison between the Tosca calculation based on the actually measured gap profile and the field measurement result is quite important. Some discrepancy may be attributed to unknown properties of the magnet material.

博士論文審査結果

Name in Full
氏名 Taufik

Title
論文題目 Beam Dynamics for a Racetrack-Shape Fixed Field Induction Accelerator for Giant Cluster Ions and Its Key Devices

核子当たりのエネルギーが 1 MeV/u を超えるクラスターイオンは、材料の表面物性の改善、微生物や作物の突然変異の促進といった研究に有用である。C-60 による中間エネルギー領域のクラスターイオンを作り出すための加速器として提案されているのが RAFFIA であり、本論文では RAFFIA 実現に向けた加速器設計と R&D を行っている。加速器設計では三次元ビームトラッキングによるシミュレーションに加え、解析的なビーム光学系の定式化も行ってその検証精度を高めている。

本論文の内容は、大きく三つの主題で成り立っている。ひとつは誘導加速方式を取り入れたイオンマイクロロンである、RAFFIA の軌道および加速設計の確立である。とりわけキーデバイスとなる 90 度偏向電磁石はユニークな磁場構造を持ち、解析的な手法によるビームサイズ予測に加えて数値計算によるビームシミュレーションを行い、安定なビーム光学設計の確立を目指している。RAFFIA は加速に応じて周回軌道がどんどん長くなる設計であるため、momentum compaction factor が加速に伴い変化する。これはトランジションエネルギーが変化することを意味するが、Taufik 氏は基礎方程式から RAFFIA に特化したシミュレーションを行い、ビームの縦方向の振る舞いが誘導加速方式シンクロトンと同様であることを示した。また横方向についても、ビームロスの極めて少ないラテイスの構築に成功している。二つ目は、空間電荷効果を取り入れたビーム不安定性の評価である。基本となる Poisson 方程式から空間電荷ポテンシャル、空間電荷力を導出し、Coupled Nonlinear Beam-Core Evolution Approach (CNBCEA) という手法を考案して、シミュレーションによるビーム電流の上限を提示している。空間電荷からくるビーム電流制限は加速器の理論的性能上限を与えるが、CNBCEA により得られた上限値がトランスフォーマトリクスの固有値式から導かれる解析的なビーム安定性条件と一致することを示すなど、大変興味深い内容となっている。三つ目はこれらの加速器設計に加え、90 度偏向電磁石のプロトタイプを製作し、構造体の製作誤差と機械的強度の測定、磁場分布の測定など、RAFFIA 実機を製作するために必要な基礎データの収集と評価を行っている。実機の 1/8 サイズで現実的な磁極形状のデザインを行い、ギャップサイズと励磁時の磁場による形状変化を精密に測定し、その対策まで行った。RAFFIA の 90 度偏向電磁石は磁場と反転磁場の両方を発生させる極めてユニークな構造であるが、意図した磁場を発生させることが出来ることを実証した。

上記のように、本論文は極めて内容豊富であり、特にマイクロトロン光学設計、空間電荷効果の定式化において、優れたものと認められる。論文審査会の発表では、Taufik 氏により広範囲にわたる研究内容が十分に説明され、質問に対しても適切な返答をいただけ

たものとする。提出された論文のうち、RAFFIAの基本設計をまとめた研究論文は既に学術誌(PhysRevAccelBeams)に掲載され、空間電荷効果によるビームコアのシミュレーション手法と解析的評価方法についても、Physics Letters Aに掲載が決まっている。よって審査会は、本論文が学位を授与するにふさわしいものと判断し、審査員全員一致で合格とした。