

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 9 月 7 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03589

研究課題名(和文) 高速・巨大クラスターイオン用誘導加速マイクロトロンの開発

研究課題名(英文) Study on the Induction Microtron for Giant Cluster Ions

研究代表者

高山 健 (Takayama, Ken)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・研究員

研究者番号：20163321

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

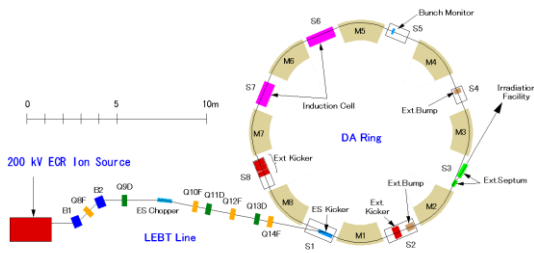
研究成果の概要(和文)：多粒子シミュレーションコードを確立。参照粒子集団軌道からlattice関数を見出す一般的手法を確立した。線形理論との一致を確認。偏向磁石が持つ物理的有限性に起因する磁場の非一様性が生むIntrinsic CODが見出され、対称steering補正系の必要性を見出す。プロトタイプ偏向磁石を製作した。磁石本体部の飽和特性を利用した磁石開口部の逆磁場簾の生成のアイデアが実証された。磁極間に働く磁力による磁極間ギャップの変形を見出す。予め計算で把握しておくことの重要性が明らかになった。線形化された空間電荷効果で摂動を受けるBeam Core発展方程式を導入し、クラスターイオンビーム電流閾値を見出す。

研究成果の概要(英文)：Macroparticle simulation code for the induction microtron has been established, from which the lattice functions such as beatron function or omentum dispersion function can be evaluated. The results have been confirmed with the newly developed linear theory. A prototype bending magnet with the ininverse field strip in the front and field gradient has been manufactured. Field measueremnets such as exciation curve and field mapping have been carried out. The original idea, where the reversed field strip is generated associated with saturation in the main core, has been confirmed.

研究分野：ビーム力学

キーワード：誘導加速 マイクロトロン 軌道理論 90度偏向磁石 逆磁場簾 半導体スイッチ Closed Orbit Distortion

1. 研究開始当初の背景



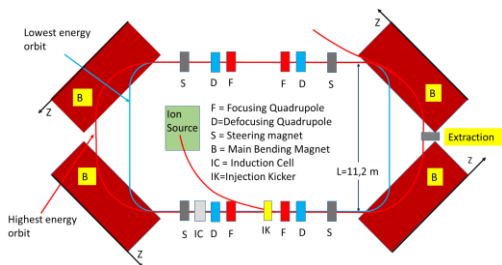
KEK デジタル加速器

(速い繰り返し誘導加速シンクロトロン)

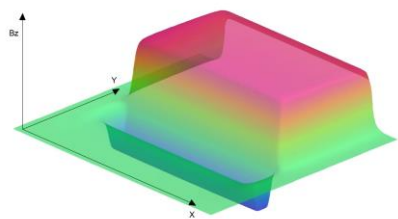
巨大クラスターイオンを高いエネルギーに加速し得る加速器は存在していなかった中、本研究の研究代表者を中心として誘導加速をマイクロトロンに導入した誘導加速マイクロトロンのアイデアが論文として発表されたばかりであった[1]。高周波加速器に代わる誘導加速の円形加速器への導入は 2006 年と 2013 年に遅い繰り返し、速い繰り返し誘導加速シンクロトロンとして既に研究代表者等の手で実証されていた。

2. 研究の目的

原著論文[1]では磁石開口部の逆磁場簾と主磁極部に磁場勾配を持った 90 度偏向磁石 4 台とダブレット 4 極磁石 4 セットの構成が提示されていたが、加速時間全域にわたる粒子軌道の安定性は未知のままであったので、軌道理論の体系化が大きな目的であった (目的 1)。一方、逆磁場簾付き偏向磁石を実現する方法を見出す作業が課題であった (目的 2)。誘導加速マイクロトロンで加速可能なクラスターイオンビーム電流の評価が様々な応用を考える場合重要になる。(目的 3)



144 MeV 誘導加速マイクロトロン



開口部に逆磁場簾付き磁場分布

3. 研究の方法

目的 1 : 偏向磁石の 3D 磁場計算結果を取り入れた運動方程式を Runge-Kutta 法によって解く多粒子シミュレーションにより粒子集団の加速全域にわたる安定化を見出すダブレット 4 極磁石の励磁パラメーター (k-value) を得るべく trial & error を繰り返す手法が取られた。一方、これとは独立に加速全域に渡る理想粒子の軌道を先ず見出し、基準座標 (軌道座標) を得た上で、その軌道座標上で磁場計算結果を線形展開し、誘導加速マイクロトロンの完全な線形理論の構築を計り、線形安定性の観点から見出す、ダブレット 4 極磁石の k-value を見出し、前者と対比させた。

目的 2 : リアルサイズの 10 分の 1 モデル磁石の設計・製作・磁場測定を試みた。磁石主要部の磁気飽和特性を利用して開口部の逆磁場簾を産み出すアイデアの確認であった。

目的 3 : 目的 1 ではほぼ到達した標準的誘導加速マイクロトロンの Lattice を仮定し、10 MeV/ion の入射エネルギーの条件で加速し得るクラスターイオンビーム電流の評価のため、線形の空間電荷効果によって摂動を受ける Beam Core 発展方程式をこのケースに導入し、評価した。

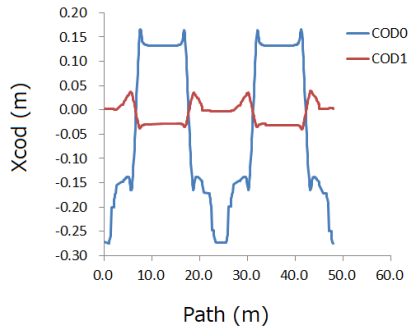
4. 研究成果

目的 1 : 多粒子シミュレーションコードを確立。参照粒子集団軌道から lattice 関数 (ベータートロン関数、運動量分散関数、ベータートロン振動数) を見出す一般的手法を確立した。一方線形理論も同時に確立した。誘導加速マイクロトロン設計道具立てとして機能することが示された。この研究の中で、現実の偏向磁石が持つ長手方向の物理的な有限性に起因する磁場の非一様性に伴って発生する Intrinsic Closed Orbit Distortion が見出され、これを補正する対称 steering 補正系の必要性を明らかにした。

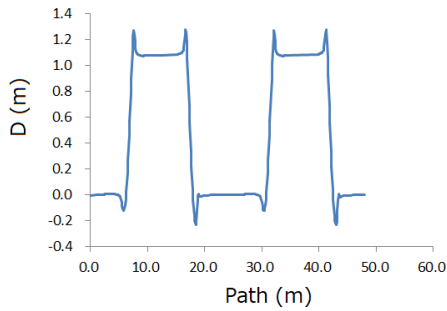
目的 2 : 1/10 プロトタイプ偏向磁石を部品ごとに製作し、研究グループメンバーで組み立てた。一对の励磁コイルで、磁石本体部の飽和特性を利用した磁石開口部の逆磁場簾の生成はほぼ計算通りのものが実現できた。アイデアは実証されたと言える。しかしマイクロトロン偏向電磁石の特徴である広い磁極面の影響で、磁極間に働く磁力による磁極間ギャップの変形が無視できない程大きい事が分かった。使用磁束密度と想定磁極間ギャップを予め計算で把握しておくことの重要性が明らかになった。

目的 3 : 直線加速器、シンクロトロンの軌道理論では比較的一般的な Beam Core 発展方程式の導入と、位相空間 (σ, σ') での不安定解析から空間電荷効果の閾値を見出した。その結果、標準的誘導加速マイクロトロンの加速可能なクラスターイオンビーム電流は 200 μ A である事がわかった。

[1] Ken Takayama, Toshikazu Adachi, Masayoshi Wake, and Katsuya Okamura, Racetrack-shape fixed field induction accelerator for giant cluster ions, Phys. Rev. Accel. & Beams, 18, 2015, 050101-12



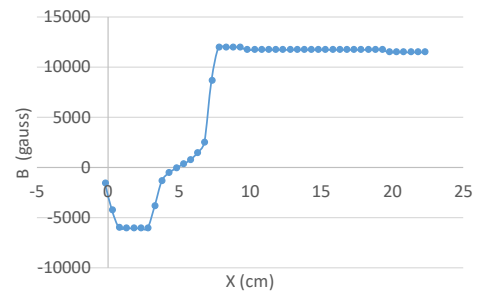
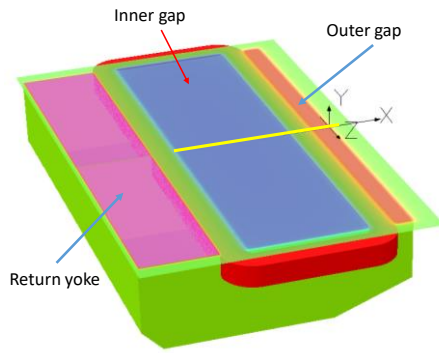
COD とその補正



運動量分散関数



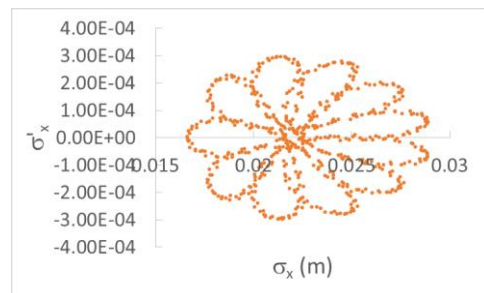
プロトタイプ偏向磁石と測定ベンチ



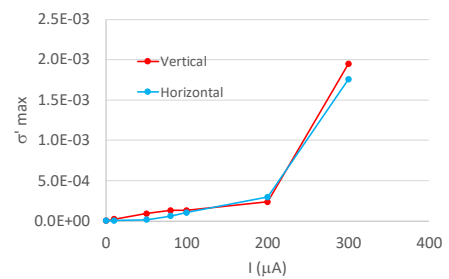
磁場分布

$$\sigma''_x + K_x(s)\sigma_x - \frac{k_1}{\sigma_x(s) + \sigma_y(s)} = \frac{\epsilon_x^2}{\sigma_x^3}$$

ビームコア発展方程式



位相空間での軌道



不安定性のビーム電流依存性

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① 高山 健、高エネルギークラスター加速を実現する誘導加速技術の進歩、放射線と産業、(招待論文)、144 号、2018、16-23

[学会発表] (計 10 件)

- ① 岡村勝也、隈元大輝、高山 健、大パワー SiC-MOSFET 駆動の加速器パルス電源、NIFS Symposium, Toki, 2017 December
- ② 隈元大輝、岡村勝也、高山 健、13 kV 級高耐圧 SiC-MOSFET を使用したパルス電圧発生方法の研究、NIFS Symposium, Toki, 2017 December
- ③ Taufik, Microtron for Gainat Cluster Ions, 4th South Asian Accelerator School, Tsukuba (invitation), 2017 october
- ④ Taufik, T.Adachi, M. Wake, and K.Takayama, Lattice Design of The 144 MeV Induction Microtron for C-60, 14 回加速器学会年会、札幌、2017
- ⑤ K.Takayama, A Possible Accelerator Complex for Giant Cluster Ion Inertial Fusion, US-Japan meeting on Inertial Fusion and War Dense Matter, (invitation), Berkely, 2017 Feb. 21
- ⑥ 高山 健、How are quasi-relativistic cluster ions obtained?, 量研機構高崎量子応用研究所連携研究、(招待講演)、2016 12 月 5 日
- ⑦ K. Takayama, How are quasi-relativistic cluster ions obtained?, 9th Int. Meeting on Recent Development in the Study of Radiation Effects in Matter, (invitation), Kyoto, 2016 October 26-28
- ⑧ 高山 健、安達利一、和気正芳、岡村勝也、百合庸介、岩田康嗣、準相対論的巨大大クラスターイオン用誘導加速マイクロトロン、29 回タンデム加速器及び周辺技術の研究会、(招待講演)、2016 June 30 - July 1
- ⑨ K.Takayama, W.Wake, Y.Iwata, Y.Yuri, T.Adachi, and K.Okamura, A RACETRACK-SHAPE FIXED FILED INDUCTION ACCELERATOR FOR GIANT CLUSTER IONS, 7th International Particle Accelerator Conference (IPAC' 16), Busan, Korea, 2016 May 6 - 13

[図書] (計 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

出願年月日 :

国内外の別 :

○取得状況 (計 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

取得年月日 :

国内外の別 :

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高山 健 (TAKAYAMA, Ken)

高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・研究員

研究者番号 : 20163321

(2) 研究分担者

安達利一 (ADACHI, Toshikazu)

高エネルギー加速器研究機構・シニアフェロー

研究者番号 : 80141977

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :

(4) 研究協力者

Taufik (タウフィック)