

自動サイクロトロン共鳴加速法を用いた陽子加速器のテストベンチ開発状況 STATUS OF THE DEVELOPMENT OF A TESTBENCH FOR THE CYCLOTRON AUTORESONANT ACCELERATOR

原隆文^{*,A)}, 福田光宏^{A)}, 神田浩樹^{A)}, 依田哲彦^{A)}, 武田佳次朗^{A)}, 荘俊謙^{A)}, 篠塚勉^{B)}, 伊藤正俊^{B)},
倉島俊^{C)}, 宮脇信正^{C)}, 涌井崇^{D)}, 中尾政夫^{E)}, 松田洋平^{F)}

Takafumi Hara^{*,A)}, Mitsuhiro Fukuda^{A)}, Hiroki Kanda^{A)}, Tetsuhiko Yorita^{A)}, Keijiro Takeda^{A)},
Tsun Him Chong^{A)}, Tsutomu Shinozuka^{B)}, Masatoshi Ito^{B)}, Satoshi Kurashima^{C)},
Nobumasa Miyawakki^{C)}, Takahi Wakui^{D)}, Masao Nakao^{E)}, Yohei Matsuda^{F)}

^{A)} Research center for Nuclear Physics, Osaka University

^{B)} Cyclotron and Radioisotope Center, Tohoku University

^{C)} Takasaki Advanced Radiation Research Institute, National Institutes for Quantum Science and Technology

^{D)} Institute for Quantum Life Science, National Institutes for Quantum Science and Technology

^{E)} Gunma University Heavy Ion Medical Center

^{F)} Konan University

Abstract

We have been developing the proton Cyclotron AutoResonance Accelerator (CARA). A test bench is developed to demonstrate the acceleration of electron beams with a single RF cavity and a solenoid magnetic field, which is similar to the proton CARA. The test bench consists of a permanent magnet used 2.45 GHz ECR ion source of RCNP and cavity and electron gun. We simulated electric field of permanent magnet and electric field in RF cavity by Finite Element Method (FEM) simulation codes. Then we simulated electron orbit in the electric field and magnetic field by simulated FEM code by OPAL. The simulation showed electron accelerate from 3 keV to 18 keV by the test bench.

1. はじめに

自動サイクロトロン共鳴加速法は、ソレノイド磁場と回転型高周波電場を用いた加速器である。自動サイクロトロン共鳴加速法は粒子を回転型電場に対して垂直に入射することで、荷電粒子は高周波電場の位相に関係なく、ヘリカル状の軌道を描きながら、高周波電場と共鳴状態を維持したまま常に加速され続ける。そのため、時間的に連続したビームを、高周波電場の入力パワーに対して高い効率で加速することができる[1,2]。自動サイクロトロン共鳴加速法を陽子に応用することで、よりコンパクトで高いエネルギー効率の陽子加速器を実現することができると考えられる。大阪大学核物理研究センターでは、自動サイクロトロン共鳴加速法を用いた陽子加速器の実現を目標に、陽子加速のためのパラメーターの設定やシミュレーションソフトを用いた電磁場計算、軌道計算等を行い陽子加速の可能性を模索してきた。荷電粒子がサイクロトロン共鳴する条件は、磁場の強さを b 、粒子の質量を m 、電荷を q 、電場の周波数を f とすると

$$f = \frac{qB}{m} \quad (1)$$

で表すことができる。

粒子を加速する導波管及び共振空洞の大きさは、高周波電場の波長に依存しており、周波数が大きくなれば導波管（共振空洞）は小さくなる。式1より、磁場を大きくすれば高周波電場の周波数を大きくす

ることができる。つまり、磁場が大きくなれば、導波管（共振空洞）を小さくすることができ、加速器自体の小型化につながる。そのため、磁束密度を(できる限り)大きくし、かつ実現可能な範囲に設定すると10 T級の磁束密度が必要になる。また、[1,2]では電子の加速に進行波の TE_{11} モードを使って加速をしているが、陽子の加速では、定在波の TE_{111} モードを用いて加速することで共振空洞内の電場を大きくし加速効率を上げることで、短い距離でより加速することができるようになる。この時、陽子の加速に必要な高周波電場の周波数は数百 MHz オーダーとなり、共振空洞の大きさも1~2 mの範囲に抑えることができる。しかし、自動サイクロトロン共鳴加速法の加速器の実例が少なく、特殊な回転する電場が必要であることと、10 T級の強い磁場が必要となることから、スケールダウンした電子のテストベンチの作成を行い、回転する高周波電場を発生させる機構の開発や、ビームの引き出し、高周波パワーのエネルギー伝達効率などのデータの収集を行い、開発予定の陽子加速の性能の評価を行う。本稿では、テストベンチの全体像について説明したのち、磁場の形成、加速電場の形成、軌道計算についての報告を行う。

2. テストベンチの概要

テストベンチによる電子の加速試験で明らかにすることは次の二つである。

- 進行波の TE_{11} モードではなく定在波の TE_{111} モードで加速したときのエネルギー効率はどのようであるのか

* takafumi@rcnp.osaka-u.ac.jp

- 加速された電子のエネルギーを実測する

テストベンチは、電子を発生させるための電子銃と、RCNPの2.45 GHz ECR イオン源用永久磁石と TE_{111} モードを励振させるための共振空洞から構成されている (Fig. 1)。電子銃は、最大 5 kV まで印加することができ、ビーム径 1 mm のビームを入射することができる。入射された電子は、導波管を通過したあと共振空洞で加速される。加速された電子のエネルギーは、①下流にある蛍光窓に照射し、蛍光部分の半径と磁束密度から測定する方法と、②蛍光窓を金属窓に取り換えて、電子を照射させることで発生する X 線のエネルギーを測定することで調べる方法の 2 種類の方法を検討している。

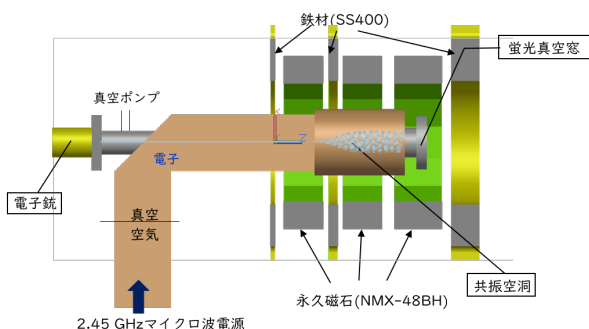


Figure 1: The schematic of CARA testbench.

3. 磁場の形成

磁場の形成は、核物理研究センターで ECR イオン源用に使用している永久磁石を使用する。永久磁石は高さ 34 mm、軸方向の長さ 50 mm の磁石を同一円周上にならべたものを 2 つと、高さ 34 mm、軸方向の長さ 60 mm の磁石を同一円周上にならべたものを 1 つ使用する (Fig. 2)。磁場の設計には OPERA3D-TOSCA を使用した [3]。形成する磁場は、共振空洞を全体を覆うよう軸方向に 100 mm 以上の範囲で、電子が 2.45 GHz での共鳴点を持つ 875 G の平坦な磁場を設計する。永久磁石だけでは目的とする磁場を形成できなかったため鉄材を使って調整することで目的とする磁場を形成することができた。その時の永久磁石と鉄材の配置と磁場分布を Fig. 3 に示す。

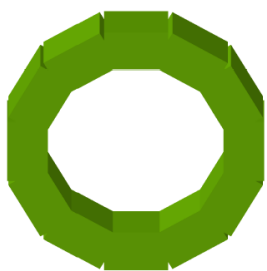


Figure 2: The schematic of permanent magnet

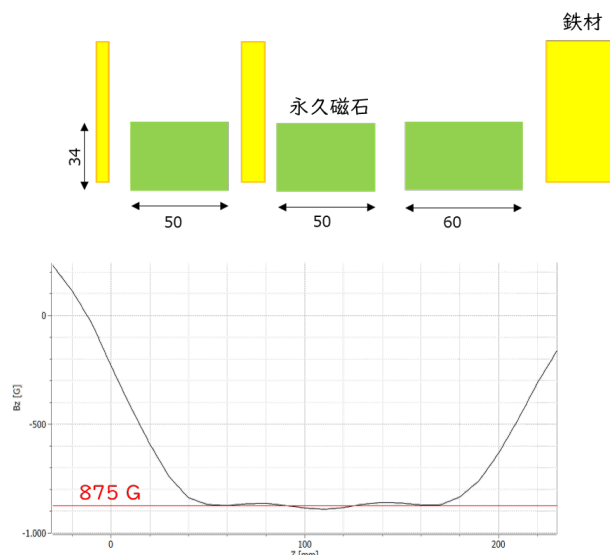


Figure 3: The alignment of permanent magnets and steel disks and magnet field.

4. 加速電場の形成

電場を励振させるために使用する、マイクロ波増幅器は varian 社の VZS-693G1 を使用する。VZS-693G1 は周波数を 2~ 4 GHz の範囲で変化させることができ、最大で 200 W のパワーを入力することができる。共振空洞の上流部は導波管と共振空洞をインピーダンス整合させるために ridged transformer の構造をとっている。共振空洞の設計は ANSYS HFSS [4] を使用した。空洞の内径が 85 mm、長さが 117.1 mm のとき、2.447 GHz の周波数のときインピーダンスマッチングする (Fig. 4)。2.447 GHz で 200 W のパワーを入力したときに励振する電場の様子を Fig. 5 に示す。

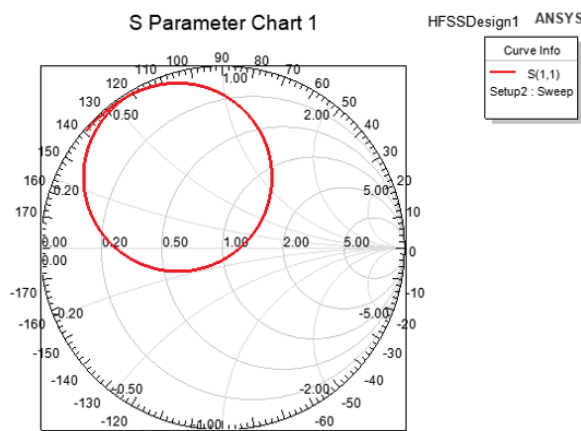


Figure 4: smithchart of RF cavity

5. 軌道計算

この章では、テストベンチの軌道系算を行った。軌道計算はシミュレーションコードの OPAL [5] を用い

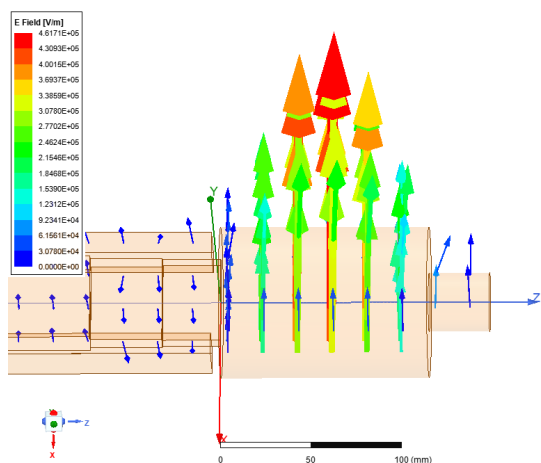


Figure 5: Electric field of 2.447 GHz, 200 W input power.

て行った。加速するビームは直径 1 mm の電子ビームとして、加速電場と磁場はそれぞれ section 3, 4 で扱った計算結果を用いた。Figure 1 の示すように、電子銃から射出された電子は、導波管と ridged transformer の部分を通すなければならない。導波管と ridged transformer 部分には定在波が励振している。また、電子が共振空にし入する際に永久磁石の漏れ磁場の影響を受ける。そのため、共振空洞から 150 mm 離れたところから電子を入射し、導波管と ridged transformer 部分での電場と永久磁石の漏れ磁場の影響を考慮した計算を行った。電子を 3 keV、として共振空洞内の最大電場が 0.2 MV/m としたとき、18 keV まで加速することが分かった。またこの電子の軌道半径は 4 mm である。電子の軌道の様子を Fig. 6, エネルギーの変化を Fig. 7 に示す。

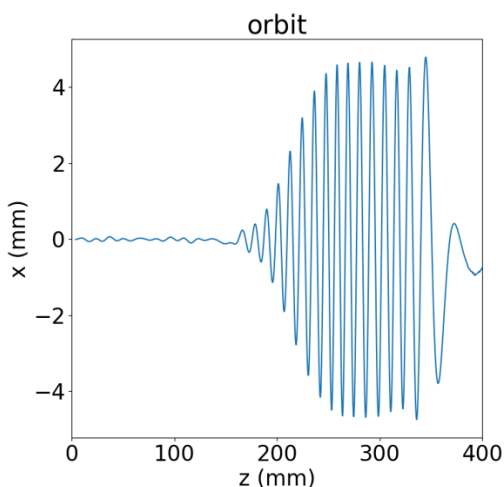


Figure 6: Plot of Electron orbit.

6. まとめ

大阪大学核物理研究センターでは、自動サイクロトロン共鳴加速法を用いた陽子加速器の開発を進めており、その前段階として電子によるテストベンチ

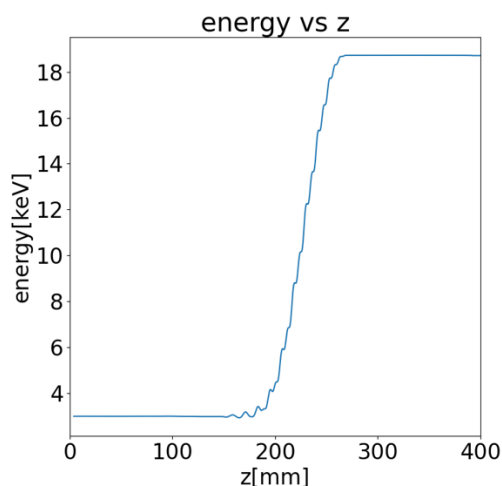


Figure 7: Plot of Electron Energy.

の開発と加速試験を計画している。テストベンチは磁場を発生させる磁石と、加速電場と電子銃からなり磁場は 2.45 GHz ECR イオン源に使われている永久磁石を用いて加速に必要な磁場を形成する。共振空洞を新たに作成し、2.447 GHz のとき 200 W 出力で最大電場 0.4 MV/m の TE₁₁₁ モードの高周波電場が励振することがシミュレーションによりわかった。シミュレーションにより得られた、電場と磁場を使って、より現実に即した軌道計算を行い、3 keV の電子を 18 keV まで加速することが分かった。今後、テストベンチによる電子の加速試験を行い陽子加速実現への足掛かりとする。

謝辞

本研究は JSPS 特別研究員奨励費 22J13951 及び JPS 科研費 21K12537 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] B. Hafizi *et al.*, "Electron beam quality in a cyclotron autoresonance accelerator", Phys. Rev. E 50,3077,(1994).
- [2] M.A. LaPoint *et al.*, "Experimental Demonstration of High Efficiency Electron Cyclotron Autoresonance Acceleration", Phys. Rev. Lett. 76, 2718 (1996).
- [3] L. Koppers *et al.*, "tosca: TOOLS for Statistical Content Analysis" (2021)
- [4] <http://www.ansoft.com/products/hf/hfss/>
- [5] Adelman *et al.*, "OPAL a Versatile Tool for Charged particle Accelerator Simulation" (2019)