

# 自動サイクロトロン共鳴加速法を用いた 陽子加速器実現に向けてのテストベンチ開発

## DEVELOPMENT OF AN ELECTRON TESTBENCH FOR PROTON CARA

原隆文<sup>#,A)</sup>, 福田光宏<sup>A)</sup>, 神田浩樹<sup>A)</sup>, 依田哲彦<sup>A)</sup>, 安田祐介<sup>A)</sup>, 武田佳次朗<sup>A)</sup>, 篠塚勉<sup>B)</sup>, 伊藤正俊<sup>B)</sup>,  
倉島俊<sup>C)</sup>, 宮脇信正<sup>C)</sup>, 涌井崇<sup>D)</sup>, 中尾政夫<sup>E)</sup>, 松田洋平<sup>F)</sup>  
Takafumi Hara<sup>#,A)</sup>, Mitsuhiro Fukuda<sup>A)</sup>, Hiroki Kanda<sup>A)</sup>, Tetsuhiko Yorita<sup>A)</sup>, Yusuke Yasuda<sup>A)</sup>, Keijiro Takeda<sup>A)</sup>,  
Tsutomu Shinozuka<sup>B)</sup>, Masatoshi Ito<sup>B)</sup>, Satoshi Kurashima<sup>C)</sup>, Nobumasa Miyawaki<sup>C)</sup>, Takashi Wakui<sup>D)</sup>,  
Masao Nakao<sup>E)</sup>, Yohei Matsuda<sup>F)</sup>

<sup>A)</sup> Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

<sup>B)</sup> Cyclotron and Radioisotope Center, Tohoku University

<sup>C)</sup> Takasaki Advanced Radiation Research Institute, National Institute for Quantum and Radiological Science and Technology

<sup>D)</sup> Institute for Quantum Medical Science, National Institute for Quantum and Radiological Science and Technology

<sup>E)</sup> Gunma University Heavy Ion medical Center

<sup>F)</sup> Konan University

### Abstract

Create an electron test bench for the proton CARA. An accelerating electron test will be conducted on the testbench using a mirror coil and plasma chamber for the RCNP ECR ion source and a 2.45 GHz power supply. Simulating the electron testbench by Opal, it was found that 2 keV electrons could be accelerated to 25 keV.

### 1. はじめに

自動サイクロトロン共鳴加速法(CARA)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。粒子を回転型電場に対して垂直で入射することで、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。Yale 大学で行われた電子の加速実験では、20 A の電子を高周波電場の入力パワーの 96 %をビームに伝達することに成功している[1, 2]。過去の実験で、大電流の電子を高い効率で加速することに成功している

サイクロトロン加速法であるが、電子以外の荷電粒子の加速に成功した例はなく、RCNP 加速器研究部門ではサイクロトロン共鳴加速法を陽子に適用した大強度、高効率の陽子加速器の開発を目指し、陽子加速のためのパラメータの設定や、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。これまでの計算結果をもとに、自動サイクロトロン共鳴加速法による、2.5 MeV、100 mA 以上の陽子加速器の開発を計画している(Fig. 1)。開発の初期段階として、スケールダウンしたテストベンチの作成と、テストベンチによる電子加速試験を計画している。本稿では、テストベンチ作成と電子の加速計画について紹介する。

### 2. 陽子加速器の開発計画

サイクロトロン共鳴加速法の陽子への応用については今まで検討してきた。自動サイクロトロン共鳴加速法は、磁場中を回転する荷電粒子の角速度  $\omega = qB/m$  ( $q$  は荷電粒子の電荷、 $m$  は荷電粒子の質量、 $B$  は磁束密度とする)と、高周波電場の周波数  $f$  が

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{qB}{2\pi m} \quad (1)$$

の関係にある必要がある。Equation (1)より、磁束密度が大きくなれば、加速に使う高周波電場の周波数は大きくなる。そのため、磁束密度が大きいくほど、高周波電場の波長が短くなり、より小さな導波管及び共振空洞を用いることができる。しかし、陽子は電子の 2000 倍の静止質量をもって、メートル級の導波管及び共振空洞が必要となる。そのため、陽子を加速する際にできるだけ小さ

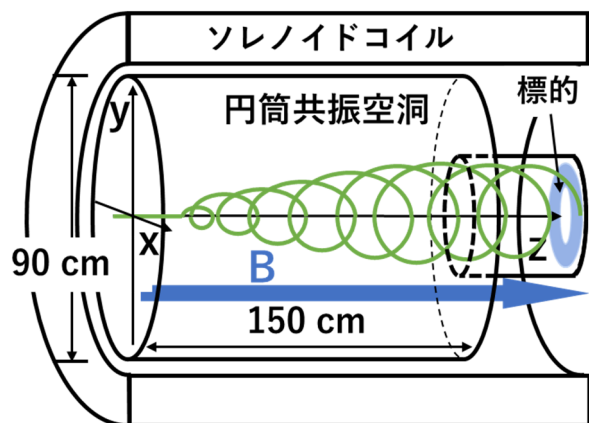


Figure 1: Schematic diagram of proton CARA.

<sup>#</sup> takafumi@rcnp.osaka-u.ac.jp

くする(できる限り磁束密度を大きくする)と、現実可能な範囲の磁束密度を考慮して陽子加速器のパラメータの設定を行った。

### 2.1 陽子加速器のパラメータ

陽子加速のパラメータとして、高周波電場は電子で用いられた進行波の TE11 モードではなく、定在波の TE111 モードを用いることで、単位長さあたりの、加速効率を向上させ、よりコンパクトにすることができる。磁束密度の大きさは 15 T とした、この時の高周波電場の周波数は約 230 MHz となる。この時の共振空洞の直径 90 cm、長さ 150 cm としている。電場の最大値を 0.84 MV/m としてこの時、50 keV 陽子を入射することで、2.5 MeV まで加速することができる (Fig. 2)。電場をもっと大きくすれば数十 MeV まで加速することも可能である。

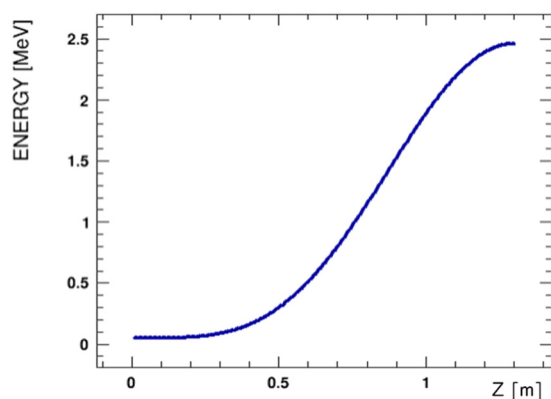


Figure 2: Simulation of proton CARA we plan to develop.

## 3. テストベンチの整備計画

### 3.1 陽子加速の課題

自動サイクロトロン共鳴加速法を陽子に適用する際のパラメータについて決定したが、陽子を加速する際の課題を以下に挙げる。

- ・ 回転する特殊な高周波電場の高周波パワーの入力システムの開発。
- ・ 先行研究では CARA により加速したビームエネルギーの実測を行っておらず**実用に向けたデータが足りない**。
- ・ 先行研究では進行波の TE11 モードを用いており、陽子の加速には定在波の TE111 モードを使う。この時、**進行波の時と同じように、高強度、高効率の加速が可能かわからない**。

これらの課題を明らかにするために、スケールダウンした定在波型のテストベンチを作成し、電子の加速試験を行う。

### 3.2 加速試験の計画

電子の加速試験の概要を Fig. 3 に示す。電子の加速試験には、RCNP の ECR イオン源用のミラーコイルを磁場形成して磁束密度を調整して使用する。ミラーコイルの設計上、電場を回転させる機構を組み込むことは困難であるため、電場にはイオン源用に作成したプラズマ

チェンバー (Fig. 4) を利用して加速を行い、電源には 2.45 GHz のマイクロ波電源を使用する。また回転する共振空洞の作成及び試験は加速試験と並行して行う。加速する電子は取り出しを行わず下流までビームを輸送して、蛍光するガラス窓に照射し、その蛍光の半径と磁場からエネルギーを測定する。

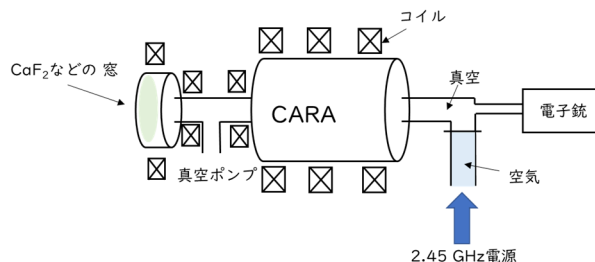


Figure 3: Schematic diagram of test bench CARA.

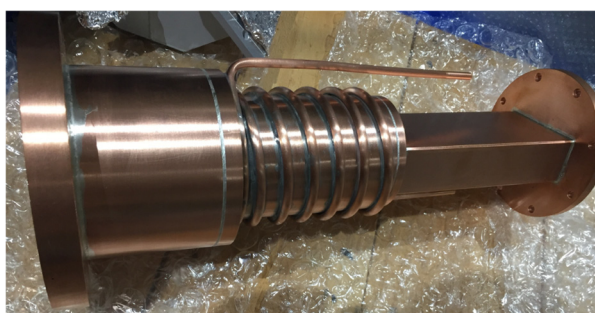


Figure 4: Plasma chamber used for test bench.

## 4. シミュレーション

### 4.1 電場の計算

2.45 GHz 周波数の時プラズマチェンバー内に励振する電場を HFSS で計算を行った結果を Fig. 5 に示す。Figure 6 は 1 W のパワーを周波数を変化させて入力したときの電場の強度(縦軸)とチェンバーの z 軸上の位置(横軸)の関係である。シミュレーション結果から、プラズマに定格の 2 kW のパワーを印加したときに、0.38 MV/m の電場の最大値が得られることが分かった。

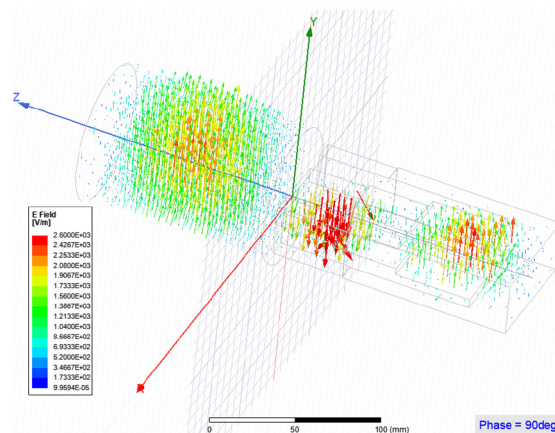


Figure 5: Electric field input 2.45 GHz power simulated by HFSS.

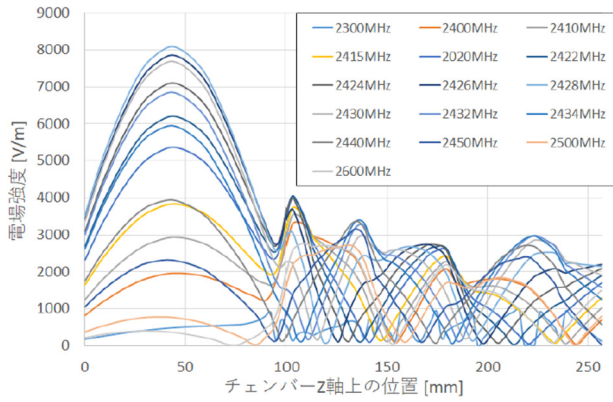


Figure 6: Electric field each frequency (2300~2600 MHz) simulated by HFSS.

#### 4.2 磁場の形成

OPERA3D-TOSCA を用いてミラーコイル磁場の形成を行った。2.45 GHz の電場を使って加速するため、加速するためには式(1)から、875 G の磁束密度の大きさを加速領域で発生させなければならない。電流値を調整したミラーコイルの磁束密度の様子を Fig. 7 に示す。チェンバーの長さは 11.59 cm であり、それよりも長い範囲で 875 G を発生させていることがわかる。

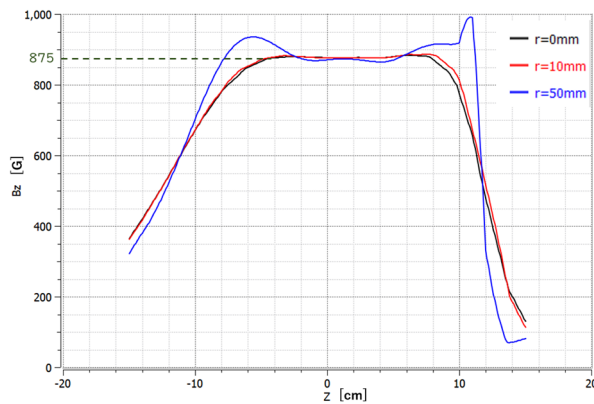


Figure 7: Magnetic field simulated by TOSCA.

#### 4.3 軌道計算

上記の電磁場計算をもとに、軌道計算コードの OPAL で軌道計算を行った。電場は、理想的な TE111 モードの電場を用い電場の最大値は 0.38 MV/m (2 kW 入力時) とし、磁場のデータは TOSCA の計算結果を用いた。電子の初期エネルギーを 2 keV として計算を行ったときの電子の軌道とエネルギーの変化を Fig. 8 に示す。以上のことからテストベンチの設定でシミュレーションをした場合、電子の加速は可能であり、2 keV の電子が 25 keV まで加速されることが分かった。

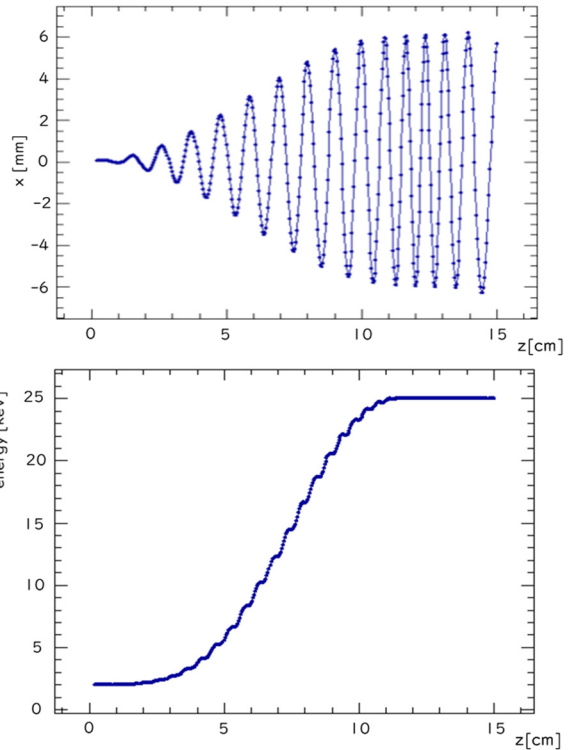


Figure 8: Simulation of test bench by OPAL.

### 5. まとめ

自動サイクロトロン共鳴加速法の陽子への適用のための、電子のテストベンチ作成を行う。テストベンチには RCNP の ECR イオン源用のミラーコイルとプラズマチェンバー、2.45 GHz 電源を用いて、電子の加速試験を行う。テストベンチの条件を軌道計算コードの OPAL を用いて計算したところ、2 keV の電子を 25 keV まで加速できることが分かった。実際に加速試験を実施するにあたってより詳細な計画を立てていき、実際に加速試験を行う。この研究は自動サイクロトロン共鳴加速法の陽子加速実現に向けての大きな一歩であり、大強度加速器の新たな可能性であると考えている。

### 参考文献

- [1] B. Hafizi, P. Sprangle, and J. L. Hirshfield, "Electron beam quality in a cyclotron autoresonance accelerator" Phys. Rev. E 50, 3077, (1994).
- [2] M. A. LaPointe, R. B. Yoder, Changbiao Wang, A. K. Ganguly, and J. L. Hirshfield, "Experimental Demonstration of High Efficiency Electron Cyclotron Autoresonance Acceleration" Phys. Rev. Lett 76, 2718(1996).