

## 空洞共振器型 CARA 加速器のテストベンチ開発 DEVELOP OF TESTBENCH OF RF CAVITY CARA SYSTEM

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>, 荘俊謙 <sup>A)</sup>, 伊藤正俊 <sup>B)</sup>, 篠塚勉 <sup>B)</sup>,  
中尾政夫 <sup>C)</sup>, 松田洋平 <sup>D)</sup>, 倉島俊 <sup>E)</sup>, 宮脇信正 <sup>E)</sup>, 涌井崇 <sup>F)</sup>

Takafumi Hara <sup>\*,A)</sup>, Mitsuhiko Fukuda <sup>A)</sup>, Hiroki Kanda <sup>A)</sup>, Tetsuhiko Yorita <sup>A)</sup>, Chong Tsun Him <sup>A)</sup>, Masatoshi Itoh <sup>B)</sup>,  
Tsutomu Shinozuka <sup>B)</sup>, Masao Nakao <sup>C)</sup>, Yohei Matsuda <sup>D)</sup>, Satoshi Kurashima <sup>E)</sup>, Nobumasa Miyawaki <sup>E)</sup>, Tkashi Wakui <sup>F)</sup>

<sup>A)</sup> RCNP, Osaka University

<sup>B)</sup> CYRIC, Tohoku University

<sup>C)</sup> GHMC, Gunma University

<sup>D)</sup> Konan University

<sup>E)</sup> QST-Takasaki

<sup>F)</sup> QST-NIRS

### Abstract

We have been developing proton CARA. The proton CARA has a huge potential of becoming a high intensity and high efficiency proton accelerator. As an element technology design for proton CARA, we are developing test bench of electron CARA. Using the permanent magnets which is used ECR ion source in RCNP and iron plates, we generated the uniform 875 G magnetic field over a range of 100 mm for the test bench. We developed the RF cavity with TE111 mode excitation at 2.45 GHz and had successfully impedance matched at 50  $\Omega$ .

## 1. 研究背景

RCNP では自動サイクロトロン共鳴加速法 (CARA) [1] を陽子の加速に応用した、大強度高効率の小型陽子加速器の開発を進めている。CARA はソレノイド磁場と、その磁場に対して垂直な成分を持つ回転する電場からなる加速器で、連続なビーム入射し、ヘリカルな軌道を描きながら連続的に加速を行うことができる。そのため、時間的にも空間的にも効率よく加速を行うことができる。Yale による先行研究では、進行波 TE11 モードを使用した電子加速に成功し、20 A の電子ビームを、入力 RF パワーの 90% 以上をビームパワーに伝達することが実証された [2]。CARA を陽子の加速に応用する際、内径がメートル級で 10 T を超える強磁場を生成する電磁石の開発、200 MHz の共振空洞内に回転電場の形成が必要になる。また、先行研究において電子の加速エネルギーは未測定である。さらに、定在波回転電場を用いた電場を利用したときのパワー伝達率は未確認である。そこで、共振器を使用した電子 CARA のテストベンチの開発を行い、定在波回転電場形成の実証、電子の加速エネルギー測定、加速による電子のパワー伝達率の評価を行う。

## 2. テストベンチの計画

テストベンチの概念図を、Fig.1 に示す。次に、テストベンチの構成要素と電子の軌道計算について記す。

### 2.1 電子銃

電子の発生源には、ビーム直径 1 mm, 電流量 1 nA の DC ビームを放射する電子銃を用いることを考えている。

### 2.2 共振空洞

RF パワーの入力には、ループコプラー方式を採用し、周波数は 2.45 GHz、共振モードは TE111 モードの回転電場を励振する。

### 2.3 磁場

磁場の形成には、RCNP の ECR イオン源用の永久磁石を使用する。磁場強度の目標値は、2.45 GHz の RF 周波数と電子の回転周波数が共鳴する 875 G の磁場を、共振空洞の長さと同じ範囲 (>100 mm) で平坦な磁場を形成する必要がある。

### 2.4 ビューポート

ビームのエネルギーは、共振空洞の出口に蛍光物質のビューポートを設置し、蛍光の半径と磁場強度から算出する、さらに金属のターゲットの照射することによる放出される X 線を測定することでも加速エネルギーを測定する予定である。

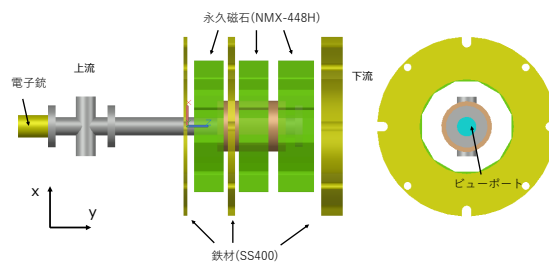


Figure 1: Scheme of testbench of CARA.

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

## 2.5 軌道計算

軌道計算コードの OPAL-t [3] を用いて、テストベンチによる電子の加速のシミュレーションを行った。電子の初期エネルギーを 2 keV、最大電場勾配を 0.2 MV/m としたとき以下のようになった [Fig.2]。

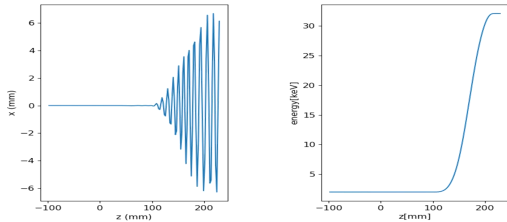


Figure 2: Simulation of testbench by CARA.

## 3. 磁場の形成

磁場の形成には、RCNP の ECR イオン源で使用していた、永久磁石を使用する。OPERA-3D/TOSCA [4] によるシミュレーションの結果、永久磁石の間に鉄材を挟むことで 100 mm 以上の範囲で磁場強度が 875 G の磁場が形成できることが分かった。シミュレーションの結果を Fig.3 に示す。シミュレーションの結果をも

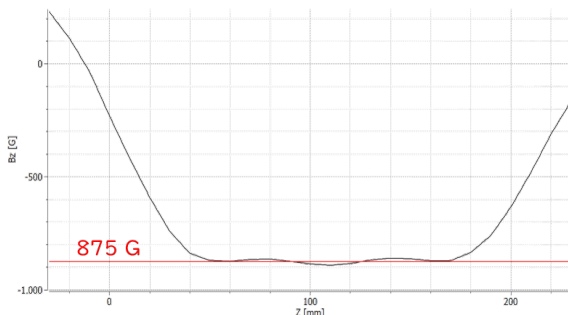


Figure 3: Magnetic field simulated by OPERA3D/TOSCA.

とに、磁石のアライメントを行った。アライメント後に磁場測定を行った。磁場測定は、磁石の中心軸上を 5 mm 感覚で 300 mm の範囲で行った。磁場測定の結果を Fig. 4 に示す。実測した磁場 (青点) と、シミュレーション (橙点) を比較したところ、実測値が 839 G で、シミュレーションとの値とずれていることが分かった。そこで、上流側の、鉄材を数ミリ上流側へ動かすことで 880 G まで上げることができた。磁場調整後の磁場の様子を Fig. 5 に示す。調整後の磁場を、OPAL-t に入力し計算を行った。計算結果を Fig. 6 に示す。計算結果より、形成後の磁場 (青線) は、シミュレーションの磁場によるもの比べてほとんど変わらない結果を示していることがわかる。そのため、調整後の磁場分布で、電子の加速ができると考えられる。

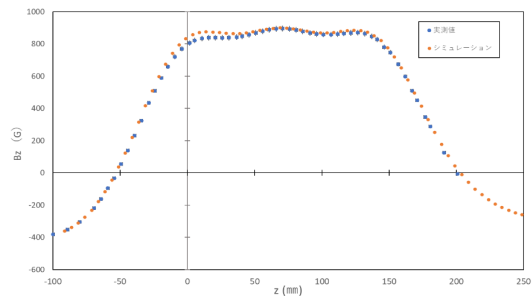


Figure 4: Measured value of magnetic field (blue) and simulated one (orange).

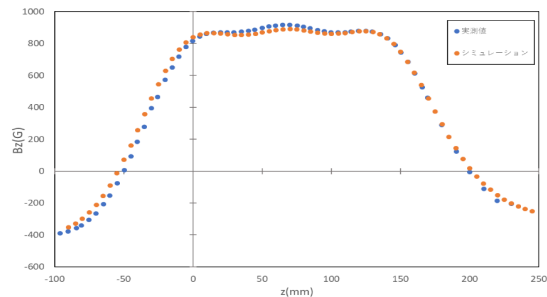


Figure 5: Measured value of magnetic field after iron plate position is adjusted (blue) and simulated one (orange).

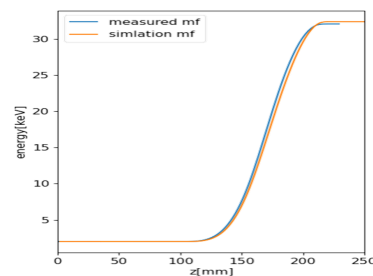


Figure 6: Simulation of testbench by OPAL-t using magnetic field after iron plate position is adjusted (blue) and magnetic field which is simulated by TOSCA (orange).

## 4. 共振空洞の開発

共振空洞の中に納まるように設置する必要がある。そのため、空洞の内径は、ECR イオン源で使用していた、プラズマチェンバーと同じ 85 mm とした。このとき、2.45 GHz の TE111 モードの RF を励振させるのに必要な、共振空洞の長さは 117.1 mm である。空洞の上流側側面にループアンテナの取付穴を二つ開けている。ループアンテナは、アンテナの取付コネクタをに装着し SMA からアンテナにパワーを入力する。また、側面に、ピックアップのための取付機構を設けており、90 度の位置でのピックアップ信号の位相差を調べることで、電場の回転を確かめる。HFSS [5] を用いて、ループアンテナによる入力シミュレーションを行った。シ

シミュレーションは、ループアンテナのループ部の幅を固定し、長さを変化させて行ったところ、同線の直径が1 mm のとき、長さが7 mm でインピーダンス整合が取れることが分かった。シミュレーションの結果を Fig.7 に示す。

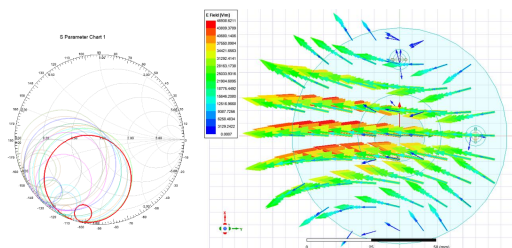


Figure 7: Smith chart (left) and Electric field of TE111 mode (right) simulated by HFSS.

シミュレーションの結果をもとに、共振空洞を試作し、ネットワークアナライザを用いて静特性試験を行ったところ、50 Ω でインピーダンス整合が取れることがわかった。静特性試験による、反射係数と Smith チャートを Fig.8 に示す。

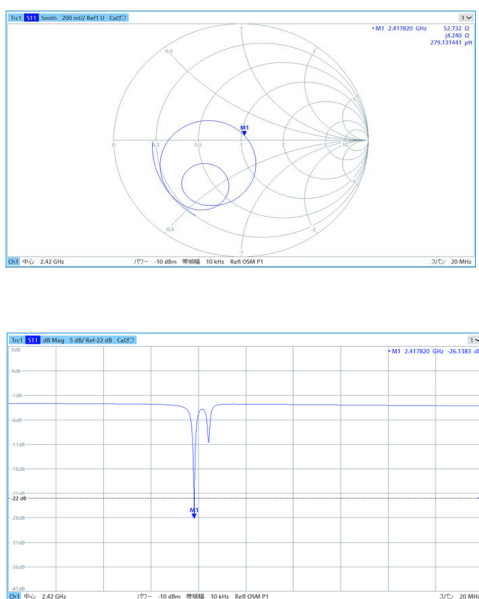


Figure 8: static characteristics test of Smith chart (top) and Electric field of S parameter (bottom) by static characteristics test.

## 5. まとめと今後

RCNP では、陽子 CARA の開発を目指しており、陽子 CARA の要素技術開発として電子 CARA のテストベンチを整備した。テストベンチに必要な磁場は、永久磁石と鉄材を用いて形成し、シミュレーションで電子が加速できることを確認した。RF を励振する共振空洞を設計開発し、パワーを入力するループアンテナを設計し、静特性により試作したループアンテナで、50 Ω でインピーダンス整合することに成功した。今後は RF の試験、電子銃の試験ののち、電子の加速実験を行う予定である。

## 謝辞

本研究は JSPS 特別研究員奨励費 22KJ2168 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 autoresonant 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] Adelman *et al.*, “OPAL a Versatile Tool for Charged particle Accelerator Simulation” (2019).
- [4] L. Koppers *et al.*, “tosca:TOOLS for Statistical Content Analysis” (2021).
- [5] <http://www.ansoft.com/products/hf/hfss/>