

## TE01 モード円筒型空洞共振器を用いた粒子加速器の検討

### STUDY OF PARTICLE ACCELERATION USING A CIRCULAR TE01 MODE CAVITY RESONATOR

石畑 翔#, 福田 光宏, 依田 哲彦, 神田 浩樹, 荘 浚謙, Zhao Hang, Shali Ahsani Hafizhu,

松井 昇大朗, 渡辺 薫, 井村 友紀, 板倉 菜美

#Sho Ishihata, Mitsuhiro Fukuda, Tetsuhiko Yorita, Hiroki Kanda, Tsun Him Chong,

Hang Zhao, Ahsani Hafizhu Shali, Shotaro Matsui, Kaoru Watanabe, Tomoki Imura, Nami Itakura

大阪大学 核物理研究センター(RCNP)

#### Abstract

The Research Center for Nuclear Physics (RCNP) at Osaka University has designed a proton accelerator with high power efficiency by accelerating protons using the system of the automated Cyclotron Auto-Resonance Acceleration (CARA), and evaluated its performance by computer simulations. We have designed an accelerator that uses the circumferential electric field generated by the TE01 mode excited in a cylindrical cavity, without considering the cyclotron resonance condition. The principle is to prepare a static magnetic field by means of a solenoid and excite a standing wave of the TE01 mode in a resonant cavity whose axis is oriented in the direction of the magnetic field. The charged particles with axial velocity are injected in a direction that matches the radius of their rotational motion, resulting in a circular motion in the static magnetic field and a constant-velocity linear motion in the axial direction. We analytically investigated the characteristics of the cylindrical cavity for the TE01 mode and its structure for particle acceleration.

#### 1. 研究背景

近年の中性子利用の社会における普及に伴い、原子炉以外の中性子源の需要が高まっていることから、大電流加速器の必要性を考え、我々は 20 MW の電子の加速に成功した自動サイクロトロン共鳴加速法 (CARA)[1]に注目し、陽子加速器の開発を目指している。

自動サイクロトロン共鳴加速法のシステムを用いて陽子を加速することで、高い電力効率を持つ陽子加速器の設計を行い、コンピューターシミュレーションによる性能評価を実施してきた。CARAの先行研究で得られた技術や知見から応用し、サイクロトロン共鳴条件を考慮せず、円筒型空洞内に励振した TE01 モードの周方向に発生する電場を用いる加速器を考案した。TE01 モード用円筒型共振空洞の特性、粒子加速のための構造について解析的な検討を行った。

#### 2. これまでの CARA の研究

CARA(Cyclotron Auto-Resonance Acceleration) :自動サイクロトロン共鳴加速法とは磁場中を回転する荷電粒子に、荷電粒子と同じ角速度で回転する電場を印加することで、荷電粒子の回転速度と電場が常に同じ方向を向き常に荷電粒子を加速できる加速法である(Fig. 1)。大強度で高い電力効率で電子の加速に成功した加速法として、Yale 大学の Hirshfield によって開発された。Figure 1 のように円筒の導波管の中心 z 軸として、導波管中を Fig. 2 のように進行方向に垂直な電場の成分を持ち、角速度  $\omega$  で回転しながら進む TE11 モードの高周波の電磁波 (RF) と、z 軸に平行な静磁場 B (ガイド磁場) に対して、電子を z 軸に平行に入射する。入射された電

子は RF の電場成分によって力を受けることで、磁場に対し垂直で、電場に対して平行な速度成分を持ちサイクロトロン運動を始める。

サイクロトロン共鳴をして加速された電子は、エネルギーが大きくなるにつれて相対論効果で質量が大きくなるため、RF と電子のサイクロトロン運動の間の位相にずれが生じ、やがて減速されるようになってしまう。このため相対論を考慮したとき、サイクロトロン共鳴を維持しながら加速するためには

$$\frac{\Omega}{\gamma} = \omega - k_g v_z \quad (1)$$

を満たす必要がある。

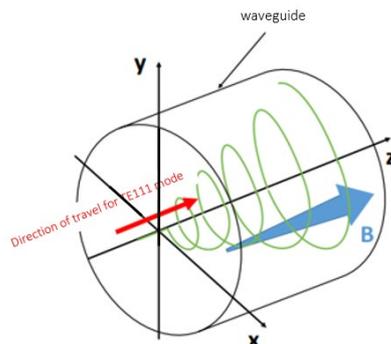


Figure 1: Schematic of automated cyclotron resonance acceleration method.

# ishihata@rcnp.osaka-u.ac.jp

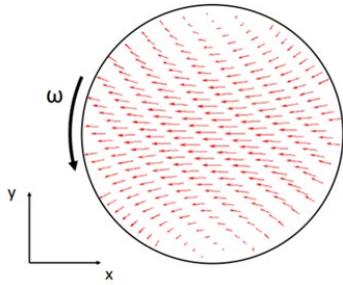


Figure 2: Electric field in TE11 mode.

### 3. TE01 モードの提案

Figure 3 に TE01 モード共振空洞の概略図を示す。

TE01 モードとは電磁場の進行方向を z 軸方向としたとき、z 軸方向の電場  $E_z = 0$  の電磁場モードであり、円筒の半径方向  $E_\rho$ 、周方向  $E_\phi$  に電場が発生している。円形導波管の TE01 モードに関する電場と磁場の成分は TE 波の電磁場成分から式(2)のように表される。 $\omega$  は各周波数、 $k$  は波数(下字の c と g はそれぞれ自由空間内、援用共振器内)を表す。

円筒型空洞内に励振した TE01 の周方向に発生した電場を用いて粒子を加速。荷電粒子は軸方向の速度を持ちつつ、回転運動の半径に合わせた方向に入射することで、静磁場中の円運動と軸方向の等速直線運動を行い、TE01 モードの周方向の電場と静磁場中の円運動の方向が一致することで加速が行われる。

$$\begin{aligned}
 E_\rho &= 0 \\
 E_\phi &= 2A \frac{\omega\mu}{k_c} J'_0(k_c\rho) \sin k_g z \cos \omega t \\
 \frac{\partial E_\phi}{\partial t} &= -2A \frac{\omega^2\mu}{k_c} J'_0(k_c\rho) \sin k_g z \sin \omega t \\
 E_z &= 0 \\
 H_\rho &= 2A \frac{k_g}{k_c} J'_0(k_c\rho) \cos k_g z \sin \omega t \\
 H_\phi &= 0 \\
 H_z &= 2A J_0(k_c\rho) \sin k_g z \sin \omega t
 \end{aligned} \quad (2)$$

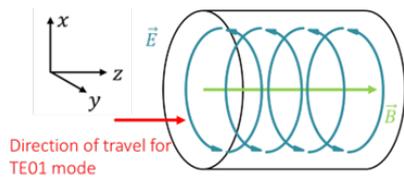


Figure 3: Electromagnetic field in TE011 mode.

### 4. TE01 モード円筒共振器による電子加速の検討

#### 4.1 TE01 モード円筒共振器による電子加速

Figure 4 のように電子を共振器に入射させ加速させることを検討した。TE01 モードの共振器を使って入射する場合、電磁場の半周期で加速させるのが最も効率的である。しかしながら、電子を半周期で共振器を通り抜ける

場合、速度が光速に達する必要がある。そのため、本検討では半周期を超えた時間を設定することで電子を加速させることを考えた。つまり、TE01 モードの電磁場が半周期を超えると電場が周方向の逆向きに発生するため、電子の減速を考慮し共振器の中を通り抜ける電子について解析的に求めた。

TE01 モードは Fig. 4 のように共振器の中心軸と壁付近では電場は発生せず、中心軸から  $R_{Emax}$  だけ離れた半径の位置に電場の最大値が存在する。そのため、電子を入射させる際に斜め入射し、半径  $R_{Emax}$  の位置において、磁場 B で回転半径が  $R_{Emax}$  となる運動量を与える。電子を入射しているため、電場と逆の方向に加速される。

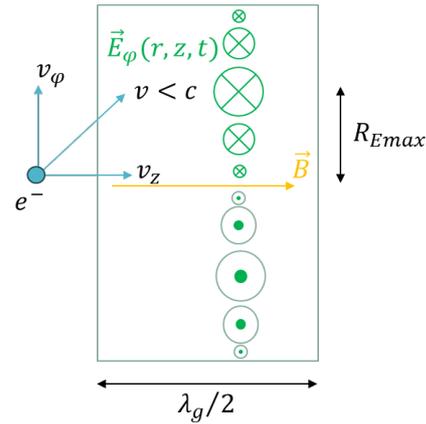


Figure 4: Schematic of cylindrical accelerator in TE01 mode.

#### 4.2 TE01 モード加速器の解析結果

z 軸方向の電子の速度  $v_z$  を  $0.7c$  ( $c = 3 \times 10^8$  m/s)、5 MV/m の電場、50 MHz で発生する周波数、共振器内の電磁場の波長  $\lambda_g = 1.2\lambda$  として仮定した値を用いて電子が得るエネルギーを計算した。電子に影響を与える電場は  $E_\phi$  成分のみなのでこの電場が与えるエネルギーがそのまま電子の運動エネルギーになる。

仮定した条件から、(3)の式を計算することで1つの共振器で 4.797 MeV だけ電子がエネルギーを獲得することが分かった。Figure 5 は電子が獲得するエネルギーを表している。この図から、最初に周方向に発生する電場に向けて入射した電子はある程度加速した後、半周期の間逆向きに発生する電場の影響を受けることで獲得するエネルギーが大きくなることが予想される。

Figure 6 は電子が受ける  $\phi$  方向に発生している共振器内の最大電場 5 MV/m の依存性を表している。 $\rho$  方向に起因するものは(1)のベッセル関数になっている。Figure 7 は電子の受ける  $\rho$  方向に発生する電場の依存性を表している。

$$K = \int_0^{\frac{Tc\lambda_g}{2v_z\lambda}} ev_\phi E_\phi(r, v_z t, t) dt \quad (3)$$

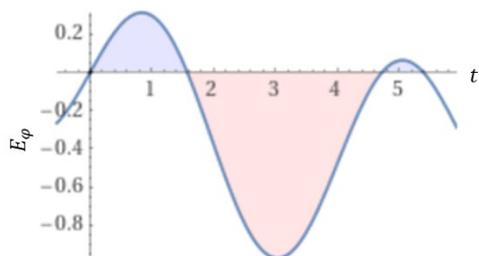


Figure 5: Energy acquired by electrons.

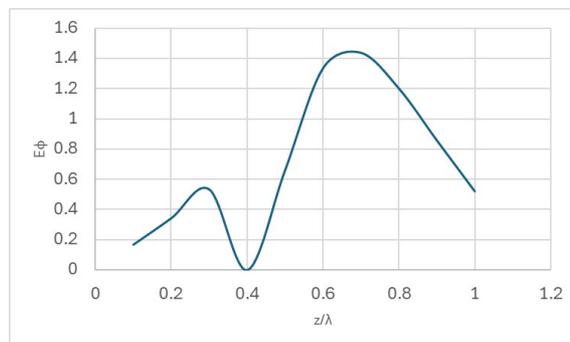


Figure 7: Dependence of  $E_\phi$  in the direction of  $z/\lambda$ .

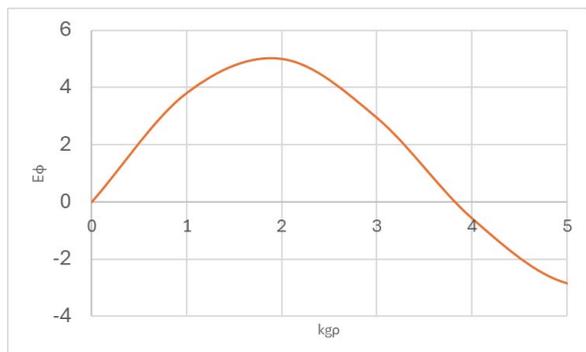


Figure 6: Dependence of  $E_\phi$  in the direction of  $k\rho$ .

## 5. 今後の検討

今後は電子の磁場からの影響や加速による電子の回転半径増大などを考慮した計算を行う必要がある。電場の周期や波長、周波数などを変化させることでより大きなエネルギーを獲得できるかについて検討を行う。

## 参考文献

- [1] B. Hafizi, P. Sprangle, and J. L. Hirshfield. Electron beam quality in a cyclotron autoresonance accelerator. *Phys. Rev. E*, 50:3077-3086, Oct 1994.