

自動サイクロトロン共鳴加速のための RF 共振空洞の開発

DESIGN OF THE RF CAVITY FOR THE CYCLOTRON AUTO-RESONANT ACCELERATION

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

Hiroki Kanda^{#, A)}, Mitsuhiro Fukuda^{A)}, Tetsuhiko Yorita^{A)}, Yuusuke Yasuda^{A)}, Takafumi Hara^{A)},
Keijiro Takeda^{A)}, Tsutomu Shinozuka^{B)}, Masatoshi Ito^{B)}, Nobumasa Miyawaki^{C)}, Satoshi Kurashima^{C)},
Masao Nakao^{D)}, Yohei Matsuda^{E)}, Takashi Wakui^{F)}

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

^{B)} Cyclotron Radioisotope Center, Tohoku University

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

^{D)} Gunma University Heavy Ion Medical Center

^{E)} Department of Physics, Konan University

^{F)} Institute for Quantum Medical Science, National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

Abstract

An accelerator based on the Cyclotron Auto-Resonance Acceleration is expected to be implemented in the application which need high-current beams, such as a radioisotope production and a neutron source. The electron accelerator with this kind of acceleration technique using a wave guide for a TE11 traveling wave located in a solenoid was proposed and developed in the previous study by Prof. J. L. Hirshfield at Yale University. For application of this kind of acceleration to the acceleration of proton, we have demonstrated the acceleration of protons with computer simulations of a TE111 standing wave cavity, a superconducting coil system and the beam dynamics. For demonstration of the Cyclotron Auto-Resonance Acceleration with a TE111 mode standing wave, we have been designing a model cavity for rotating TE111 mode standing wave. It is a key technology for the realization of the cyclotron auto-resonance accelerator for the protons. The cavity is designed for the cyclotron resonance of muons in the field of 3.5 T with the RF frequency of 500 MHz which significantly reduces the size of the cavity from the one for the proton cyclotron resonance. We have tested couplings for input and probing the RF and tuning method. We report the current status of the design of the RF cavity.

1. はじめに

高周波電場と磁場中の粒子の回転運動によるサイクロトロン共鳴を粒子加速に用いる試みは古くから行われてきた。サイクロトロン共鳴は、高周波電場の角周波数 ω と磁場中の粒子の回転運動の角速度 Ω が一致する場合に発生し、粒子のエネルギー吸収が効率よく行われることが知られている。粒子の回転運動の角速度は粒子の静止質量 m_0 、電荷 q 、粒子の運動によるローレンツ因子 γ 、磁束密度 B を用いると

$$\Omega = \frac{qB}{\gamma m_0}$$

と表すことができるが、式に現れているように加速にともなって γ が増大することによって Ω が減少し、共鳴からのずれ、つまり位相偏差が発生する。これは普通型サイクロトロンと同様の問題であり、加速に限界が生じることに

なる。角周波数と角速度のずれを補償するために粒子の移動による位置の変化を利用して、位置によって高周波電場の波長を変化させるか、あるいは、磁場を変化させることで共鳴を維持する加速方式を自動サイクロトロン共鳴加速 (CARA: Cyclotron Auto-Resonance Acceleration) [1]と呼んでいる。この方式の加速器は Yale 大学の J. L. Hirshfield が中心となって開発を行っており、M. A. LaPointe らが、複数の円環状のコイルによって位置による磁場を調整できるように設計された磁石の中に配置した円筒形の導波管を配置し、導波管内に回転する TE11 モードの進行波を通すことで電子の加速を行う装置を製作した[2]。彼らはこの装置で 20 A 以上という極めて大電流の電子の加速を行い、CARA による加速可能性、および加速用高周波の電力が電子の加速に使用される割合として定義される RF 電力効率が 90%を超えるという、極めて高い効率を実証した[2]。

近年では加速器の応用範囲が広がるとともに大電流化と高効率化への要望が高まっている。私たちは自動サイクロトロン共鳴加速法を応用し、さらに発展させることに

[#] kanda@rcnp.osaka-u.ac.jp

よってこれらの要望を満たす加速器を開発することが可能であると考えた。私たちの研究グループでは、これまでに自動サイクロトロン共鳴加速法を陽子に適用するために、8 T の磁場を発生するコイルシステムと 120 MHz の高周波電場用の直径 180 cm、長さ 210 cm の共振空洞をそれぞれモデル化して有限要素解析を行い、得られた磁場と高周波電場を用いた荷電粒子軌道解析によって陽子を 30 MeV まで加速できることを示してきた[3]。

陽子用の自動サイクロトロン共鳴加速器の実用化に向けた次のステップとして、私たちは (1) 回転する TE111 モードの高周波電場を励振して試験を行うための小型の共振空洞の設計・製作、(2) 電子サイクロトロン共鳴型イオン源 (ECRIS: Electron Cyclotron Resonance Ion Source) 用の電磁石、高周波システムをベースにした電子加速器の設計・製作、の 2 つの方法をとることとし平行して研究を進めることとしている。この発表では(1) のモデル共振器の設計について報告を行い、(2)の電子用の加速器については原による報告[4]を参照されたい。

2. 回転 TE111 モード共振空洞

J. L. Hirshfield が提案した CARA の特徴は回転する電磁場を用いることである。この電磁場を用いることで、サイクロトロン共鳴状態にある荷電粒子は周方向に常に力を受けることになり効率よく加速される。一般的に ECRIS では回転する電磁場を用いないが、回転しない磁場であっても一方向に偏波した電磁場であれば、CARA と同様に荷電粒子の加速は可能である。ここで、CARA と ECRIS のそれぞれの電場で、粒子が 1 周あたり得られるエネルギーを近似的に求めてみる。ある時刻において粒子が共振器の中心軸を軸とした半径 R の円軌道を描いているとし、その速度ベクトルを $\vec{v} = (R\Omega \cos(\Omega t + \phi), R\Omega \sin(\Omega t + \phi), v_z)$ とする。ここで ϕ は回転する電場との位相差とする。TE111 モードの定在波の、その半径の位置における電場の強さを $E(R, z)$ とし、電場を表すベクトルを $\vec{E}_{CARA} = (E(R, z) \cos(\omega t), E(R, z) \sin(\omega t), 0)$ とする。この後の計算では粒子がエネルギーを得ることによる回転角速度の変化を無視する。また、粒子の回転運動の一周の間に得られるエネルギーは小さいと仮定して、粒子の回転半径の変化を無視し、一周に要する時間が小さいと仮定して粒子の z 方向の位置の変化を無視することで電場の強さも一定であると仮定すると、CARA に使用される回転する電場によって粒子が一周あたりに電場から得られるエネルギー ΔE_{CARA} は近似的に以下のようにあらわすことができる：

$$\Delta E_{CARA} = \int_0^{2\pi/\omega} q \vec{E}_{CARA} \cdot \vec{v} dt$$

ここで、簡単のために $\phi = 0$ で、かつサイクロトロン共鳴状態にある $\Omega = \omega$ の場合を考える。この条件は明らかに 1 周あたりに得られるエネルギーが最大となる場合である。一方、ECRIS における電場が CARA と同じ強さで、 x 方向に偏波しているとする、電場を表すベクトル

は $\vec{E}_{ECR} = (E(R, z) \cos(\omega t), 0, 0)$ で表される。この電場によって粒子が一周あたりに電場から得られるエネルギー ΔE_{ECR} も同様に計算でき、これらの比を求めると

$$\begin{aligned} \frac{\Delta E_{CARA}}{\Delta E_{ECR}} &= \int_0^{2\pi/\omega} q \vec{E}_{CARA} \cdot \vec{v} dt \bigg/ \int_0^{2\pi/\omega} q \vec{E}_{ECR} \cdot \vec{v} dt \\ &= \int_0^{2\pi} d\theta \bigg/ \int_0^{2\pi} \sin^2 \theta d\theta = 2 \end{aligned}$$

となることから、CARA は ECR に比べて 1 周あたり 2 倍のエネルギーが得られることが分かる。これは、回転する電磁場が独立した x 方向の偏波と y 方向の偏波から構成されていることによるものであり、また共振器内部に回転する電磁場を励振するには、 x 方向に偏波した高周波と y 方向に偏波した高周波を位相差 $\pi/2$ で入力すれば良いということも理解される。

さて、この回転電場を発生する共振空洞として、ここでは 500 MHz の TE111 定在波を選ぶことにした。これは、ミューオンを 3.5 T の磁場中に置いた場合のサイクロトロン周波数で、このとき空洞の大きさは直径が 38 cm で、長さが 79 cm となることから、テーブルトップで扱うのにちょうど良い大きさである。さらにこのサイズであるとプローブの位置決める精度による位相の精度、また、オシロスコープで検出される波形の時間差の精度による位相の精度がほどよくなる。この共振空洞を設計し、製作することで、

1. TE111 モード定在波を効率よく励振するための結合方法
2. 定在波に対する影響の小さいピックアップ方法
3. 共振周波数の変動に対する x 偏波、 y 偏波独立した補償方法

を調査し、実際の共振器の設計に反映させることを目的とする。以下では、上記の項目のうちの 1. と 3. の項目について現在の検討状況を説明する。

3. 電磁場解析

共振器の電磁場解析には有限要素法電磁場解析ソフト Ansys® HFSS™ [5] を使用し、電磁波に対する周波数ドメインソルバーを用いたモーダル解析を行った。

Figure 1 に、有限要素解析に用いたモデルを示す。図の上下に向いている Z 軸を軸とした直径 38 cm、高さ 79 cm の銅の円筒は内部が真空となっており、 X 軸に沿って RG5U 同軸ケーブルを模した 50 Ω の同軸ケーブルが円筒内部に 5 mm 挿入され、 XY 平面上に芯線が半径 10 mm の円を描いてループを構成し円筒の銅に接触している。これが、 y 偏波用の結合器である。 XY 平面上の X 軸から 45 度の角度の位置に同様の同軸ケーブルとループ結合器が取り付けられており、これがピックアップを模している。 Y 軸上には直径 19.5 mm の銅の円柱が挿入されており、これの出し入れによって Y 軸方向の円筒の有効な径を変化させて、 y 偏波方向の入力に強く相関するようにインピーダンスを変化させてチューニングを行うことを画した。この銅の円柱の出し入れは油圧

もしくは水圧で行うこととするが、この機構は RCNP の AVF サイクロトロン RF 共振器に用いられているコンペンセーターの仕組みにヒントを得ている。

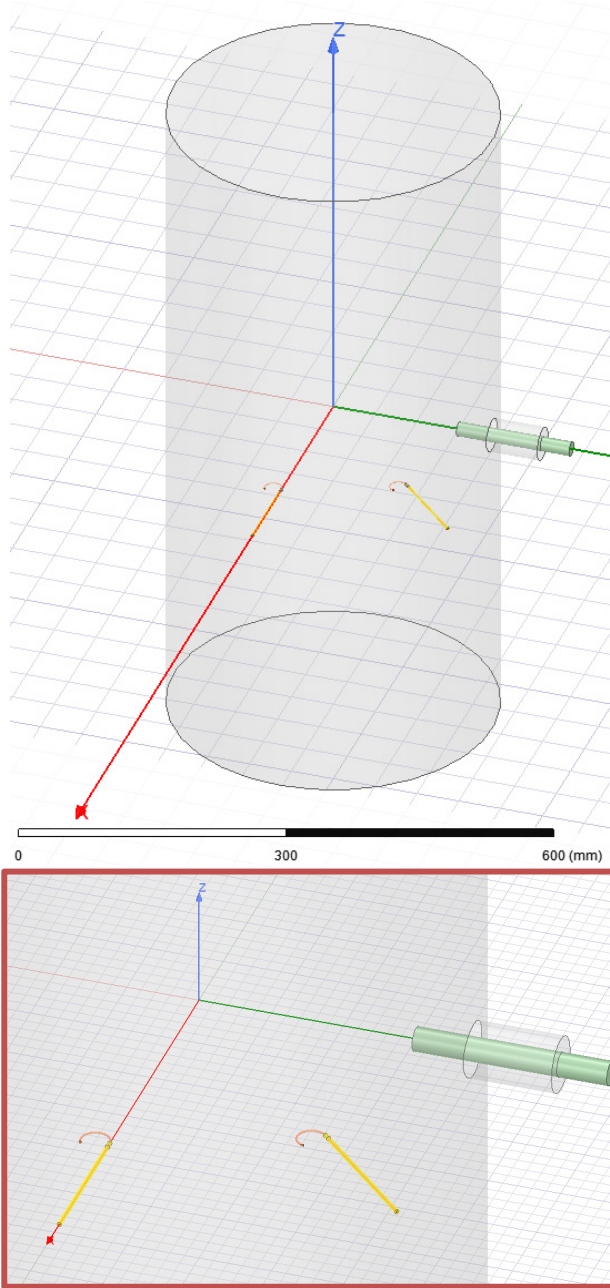


Figure 1: A finite element analysis model of the RF cavity with 2 loop couplers and one tuning rod. The lower inset shows the magnified view of the XY plane.

Figure 2 に Ansys® HFSS™ によって求めた S パラメーターの周波数による変化を示す。これによって、周波数が 504.7 MHz で共振を起こし入力ポートの反射が最低となり、プローブからの出力が最大となることがわかった。この時の XY 平面上の電場のベクトル図を Fig. 3 に示す。XY 平面上の Z 方向を法線としたループ結合器によって Y 軸方向の電場が発生していることが分かる。

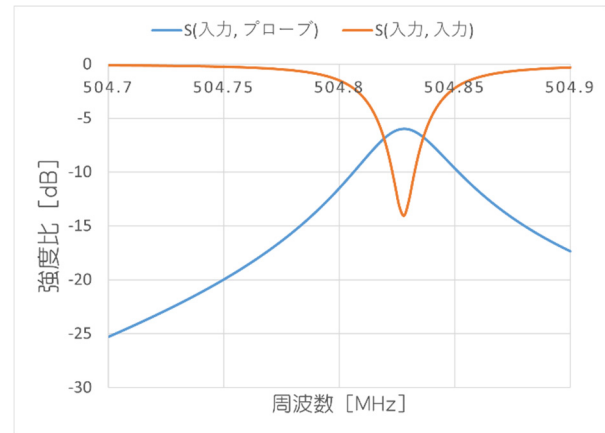


Figure 2: Result of the modal analysis. S parameters are plotted with respect to the frequency.

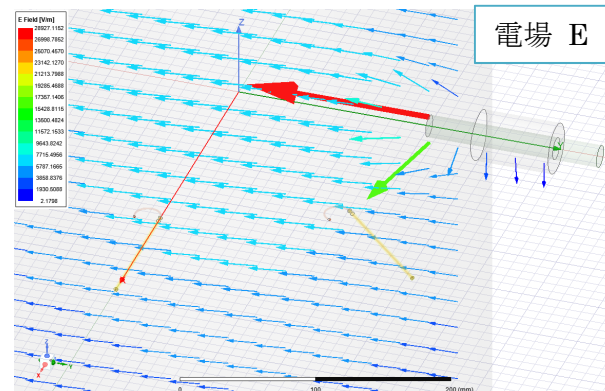


Figure 3: Result of the modal analysis. Arrows show the direction and the strength of electric field on the XY plane.

また、Fig. 4 に銅の円柱の挿入長さ、X 偏波、Y 偏波の高周波の共振周波数を示す。この図からわかるように円柱の挿入距離によって Y 偏波側の共振周波数が大きく変化し、X 偏波側の共振周波数の変化が少ないことから独立したチューニングが可能であることが示された。想定される共振周波数の変化の要因としては共振器を構成する導体の熱膨張が挙げられる。銅の線熱膨張係数は室温付近で 16.5 ppm/K である。共振器の使用によって温度が 30 K 程度上昇する可能性を仮定すると 500 ppm の膨張が発生する。共振器の寸法と共振周波数はほぼニアな関係があるので、共振周波数が 0.05% ほど変化する可能性がある。これを補償するために 0.1% 程度 (500 MHz に対して 0.5 MHz) の周波数可変幅を確保しておきたい。今回の挿入距離を 40 mm とすると 1.4 MHz の変化を得ることができたので 0.3% に近い可変幅を得ることが出来、この点からいえば十分に目標を満足する結果が得られた。ただし、この円柱の挿入距離を大きくすると、X 偏波の電場に Y 成分が大きく含まれてくる様子が見られるなど電場が乱れる様子が見られたため、この方法によるチューニング方法の是非については注意深い解析が必要であることも分かった。

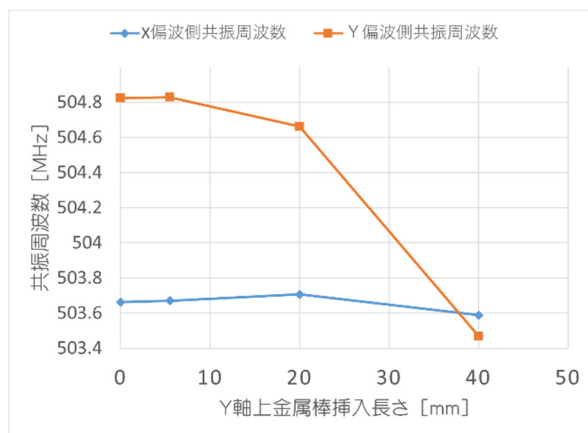


Figure 4: Result of the modal analysis. The resonance frequencies for x- and y- polarization are plotted with respect to the insertion length of the copper rod.

4. まとめ

サイクロトロン自動共鳴加速法による陽子の加速器の開発に向けて、テスト用の小型 RF 共振器の設計を行っている。ミュオン用として 500 MHz の回転する TE111 モードの定在波を励振するための検討をコンピューターによる有限要素法計算によって実施している。今後、さらに電磁気的な設計を進め、機械設計を行う。特に可動部品を持ったチューニング機構については慎重に機械設計を行う必要を認識している。またチューニング機構そのものについては電磁場の方向など可能な範囲で得られる情報を元にした注意深い解析と設計が必要である。今年度中には実機の製作を行い、ネットワークアナライザ一等を用いたローレベルの試験を実施する予定である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP21K12537 の助成を受けたものです。

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. Yorder, Chagbiamno Wang, A. K. Ganguly, and J. L. Hirshfield, “Experimental Demonstration of High Efficiency Electron Cyclotron Autoresonance Acceleration” Phys. Rev. Lett. 76, 2718, (1996).
- [3] T. Hara *et al.*, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Sep. 2-4, 2020, WEOT04.
- [4] T. Hara *et al.*, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Aug. 9-12, 2021, WEP019.
- [5] <https://www.ansys.com/ja-jp/products/electronics/ansys-hfss>