

サイクロトロン共鳴加速法を用いた陽子加速器の概念設計

CONCEPTUAL DESIGN FOR PROTON ACCELERATOR WITH CYCLOTRON AUTO-RESONANCE

原隆文^{#, A)}, 福田光宏^{A)}, 依田哲彦^{A)}, 神田浩樹^{A)}, 安田裕介^{A)}, 篠塚勉^{B)},
伊藤正俊^{B)}, 松田洋平^{B)}, 倉島俊^{C)}, 宮脇正信^{C)}, 涌井崇志^{C)}, 中尾正夫^{D)}
Takafumi Hara^{#, A)}, Mitsuhiro Fukuda^{A)}, Tetsuhiko Yorita^{A)}, Hiroki Kanda^{A)},
Yusuke Yasuda^{A)}, Tsutomu Shinozuka^{B)}, Masatoshi Ito^{B)}, Yohei Matsuda^{B)}, Shun Kurashima^{C)},
Nobumasa Miyawaki^{C)}, Takashi Wakui^{C)}, Masao Nakao^{D)}

^{A)} RCNP, Osaka, univ

^{B)} CYRIC, Tohoku, univ

^{C)} QST

^{D)} Gunma, univ

Abstract

In recent years, an accelerator-based neutron source that replaces a nuclear reactor is being developed, and it is required to further increase the intensity of the accelerator. The automatic cyclotron resonance acceleration method is one of the acceleration methods that has succeeded in accelerating high-intensity electrons of 20 A with low energy up to about 2 MeV. The automatic cyclotron resonance acceleration method is a method in which an electric field rotating at the same angular velocity as a charged particle rotating in a magnetic field is generated and the charged particle is always accelerated in the same direction as the rotating direction. We apply the cyclotron auto-resonance acceleration to protons and aim to develop a proton accelerator that accelerates high-current protons to several tens MeV. Since the cyclotron resonance frequency is proportional to the magnetic flux density and inversely proportional to the mass of the particle, generation of a strong magnetic field is the key to realizing a cyclotron resonance accelerator for a proton with a mass of 2000 times that of an electron. A coil system using a high temperature superconducting wire and a resonant cavity for high frequency TE111 mode were designed by finite element electromagnetic field analysis using OPERA-3D to design an electromagnetic field with a static magnetic field of 8 T and circularly polarized light of 121 MHz. Furthermore, the behavior of the proton beam in this static magnetic field and electromagnetic field was calculated by OPAL, and the proton acceleration up to 30 MeV was confirmed. It was also shown that the charge contained in the proton bunch can be increased and the beam can be accelerated with a sufficiently small lateral spread even for a beam equivalent to 100 mA. In this presentation, we will present the calculation of magnetic field and resonant cavity, and the calculation result of proton orbit in the electromagnetic field.

1. はじめに

近年、ホウ素中性子捕捉療法(BNCT)、中性子イメージング、RI 製造など中性子のニーズが高まってきている。主な中性子源として原子炉が使われているが、原子炉は老朽化や社会情勢の変化により、その維持が困難になってきている。そこで、原子炉に代わる中性子源として、加速器ベースの中性子源の開発が進められている。現状の加速技術では数 mA 級の陽子の加速器が実用になっているものの、中性子源としての普及と実用性・効率性等を考えるとより小さなサイズで高強度の加速器を作る必要がある。そこで、Yale 大学で 20 A の電子を加速することに成功した自動サイクロトロン共鳴加速法[1,2]に注目し、これを陽子に応用し、100 mA 級 20 MeV 以上の陽子加速器の開発を目指している。本研究では、自動サイクロトロン共鳴加速法を陽子の加速に適用するための原理検証を行い、陽子の加速に必要な磁場と共振

空洞を設計し、スイスのポールシェラー研究所が開発した軌道計算コードの OPAL[3]を用いて、軌道解析を行い、自動サイクロトロン共鳴加速法での陽子ビームの加速の可能性を示すことに成功した。本論文では、陽子加速に必要な磁場と共振空洞の設計と OPAL による軌道計算について報告する。

2. サイクロトロン共鳴加速法

自動サイクロトロン共鳴加速法の特色として、磁場中を回転する荷電粒子と同じ角速度で回転する電場を発生させ、荷電粒子の回転方向と同じ向きに常に加速することができる(Fig. 1)。従来の加速技術としてはサイクロトロンに近いが、回転する電場を用いることで連続的にビームを加速することができる。

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

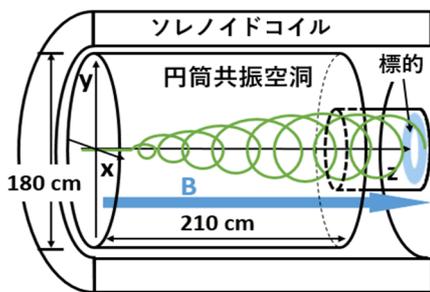


Figure 1: Schematic of proton accelerator with cyclotron auto-resonance.

磁場の大きさを B 、荷電粒子の電荷と質量をそれぞれ q 、 m とすると、荷電粒子のサイクロトロン運動の角速度は $\Omega = \frac{qB}{m}$ と表せる。この時電場の角速度を ω とすると荷電粒子を加速するための条件は

$$\begin{aligned} \omega &= \Omega \\ &= \frac{qB}{m} \end{aligned} \quad (1)$$

となる。

3. 電場と磁場の条件

3.1 加速電場

陽子の加速には、 TE_{111} の RF を用いる。 TE_{111} モードは、進行方向に対して垂直な電場を持ったモードである。

この TE_{111} を共振空洞内に 90° の角度をつけて、位相を $\pi/2$ ずらして入力することで回転する電場を発生させることができる(Fig. 2)。

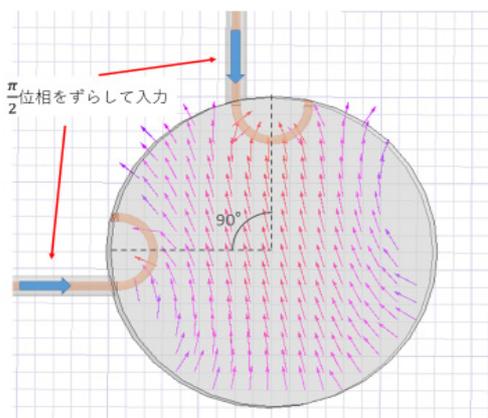


Figure 2: Electric field distribution of rotating TE_{111} .

3.2 陽子加速のためパラメータの設定

陽子を加速するためには、式(1)の条件を満たす必要がある。磁場の大きさを 6 T から 9 T まで 1 T ずつ変えていった時の共振空洞の半径と長さの関係を Fig. 3 に示す。

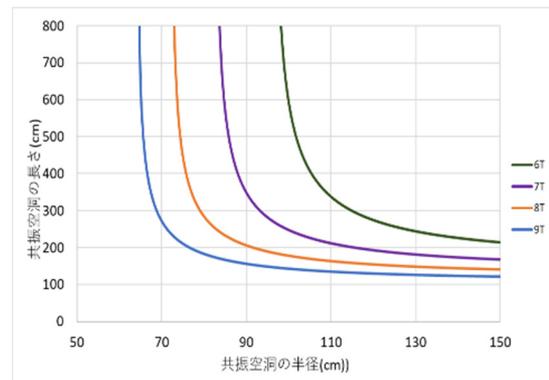


Figure 3: Relationship between guide magnetic field and cavity size.

さらに、以下のようなことを踏まえてパラメータの検討を行った。

- 共振空洞の大きさをコンパクトにする
- 磁場の大きさを MRI 用として実現している 9 T よりも小さくする

上記 2 つを考慮して、Fig. 3 から磁場の大きさを 8 T、共振空洞の半径 90 cm、長さ 210 cm とした。また、その時の、RF の周波数は 121 MHz である。

3.3 ソレノイド磁場の設計

ガイド磁場には、半径 90 cm の円筒共振空洞を外から覆い、その中心で 8 T の磁場を発生させる必要がある。そのため常伝導コイルでは、コイルが巨大になってしまい、消費電力も大きくなる。そこでコイルの線材には高温超電導線材を用いる。z 方向に磁場を徐々に大きくしていくことでサイクロトロン共鳴を維持することもできるが、磁場を大きくすることで発生するミラー効果により陽子が進行方向と逆向きに力を受けてしまい z 方向の速度が 0 になってしまい、共振空洞を通り抜けることができなくなる。磁場を大きくしていった場合、共振空洞を陽子が通り抜けることができるようにするには、入射する陽子のエネルギーを大きくする必要があり、数十 MeV まで加速するのに数 100 keV 以上の陽子を入射しなければならない。

イオン源で数 100 keV の陽子を入射するのは困難であるため、数 100 keV の陽子を入射するためには静電加速器等で加速をする必要となってしまふ。そのため、ガイド磁場には、一様な磁場を用い、入射する陽子のエネルギーは 50 keV 以下に設定した。高温超電導線材は RCNP 加速器グループで実際に使用し、データを持っている DI-BSCCOType HT-CA (住友電工製) [4] を仮定している。DI-BSCCOType HT-CA は厚さ 0.34 mm、幅 4.5 mm の線材である。線材の外部温度を RCNP 加速器グループで実際に実現した 20 K で 8 T 以上の外部磁場の臨界電流から線材一巻き当たりに 100 A の電流が流れる計算で OPERA-3D/TOSCA でシミュレーションを行った。この時の電流密度は 7000 A/cm^2 である。このシミュレーションにより共振空洞の中心から、数十 MeV の陽子の回転半径 10 cm の間で一様な磁場を発生させることができていることを確認した(Fig. 4)。

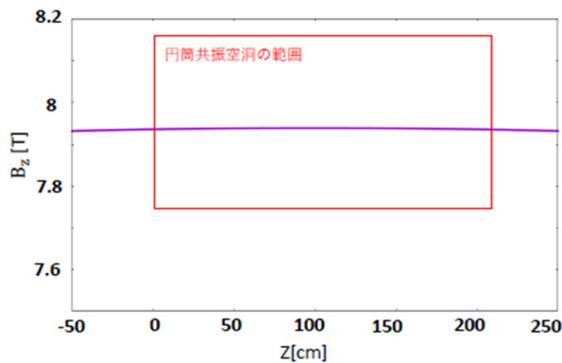


Figure 4: Guide magnetic field at center of cavity.

4. OPAL による陽子の軌道計算.

OPERA3D/TOSCA で計算した磁場と、OPERA3D/SOPANO で計算した TE_{111} モードの RF 電場を OPAL に入力し陽子の軌道計算を行った。スイスのポールシェラー研究所で開発された軌道計算コードで、ビームをマクロパーティクルに分割し、Particle-In-Cell 法を用いて空間格子点上の電流と電荷から、格子点上の電磁場を計算する。Particle-In-Cell 法により計算した電磁場中の運動方程式を Runge-Kutta 法により解いていくことで空間電荷効果を考慮した軌道計算ができる。OPAL による計算の条件 (Table 1) で計算することでサイクロtron 共鳴加速法での陽子加速のシミュレーションを行った。この時の、進行方向 z に対する陽子のエネルギーの変化を Fig. 5、共振空洞の出口でのエネルギーの広がりを見 Fig. 6 に示す。Figure 5 から Table 1 の条件で陽子を 22 MeV まで加速することができることが分かった。

Table 1: Parameter of Simulation by OPAL

粒子	陽子
入射エネルギー	50 keV
RF 周波数	121 MHz
マクロパーティクル	1×10^4 個
ビームの直径	2 cm
ビームの長さ	2.5 cm
ガイド磁場	8.04 T
ビーム電流	$1 \mu\text{A}$

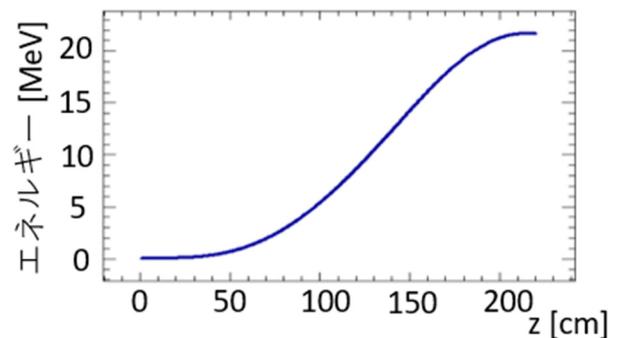


Figure 5: Dependence of energy and axial distance z .

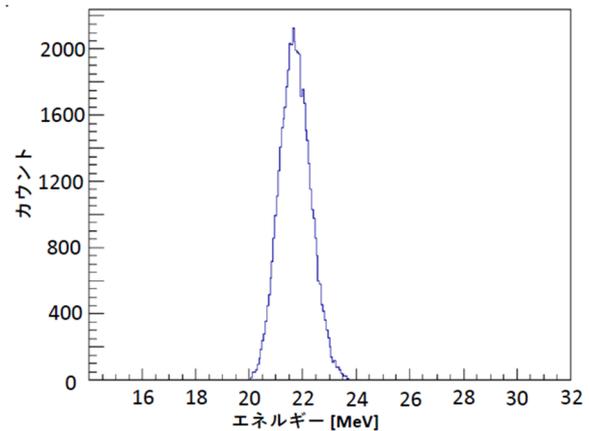


Figure 6: Distribution of energy at $z = 210$ cm.

5. まとめ

小型中性子源として、サイクロtron 共鳴加速法を用いた陽子加速器の概念設計を行った。有限要素法を用いた電磁場解析により求めたガイド磁場と RF の電磁場の値を、OPAL に入力することで現実的な電磁場での空間電荷効果を考慮した軌道計算を行い、サイクロtron 共鳴加速法による陽子加速の可能性を示すことに成功した。

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] OPAL: A. Adelman *et al.*, "The OPAL (Object Oriented Parallel Accelerator Library) Framework", Paul Scherrer Institute PSI-PR-08-02 (2008-2018).
- [4] 住友電気工業株式会社, "住友電気工業株式会社 | 超電導 web サイト type ht", 2020 年 8 月 31 日; https://sei.co.jp/super/hts/type_ht.html