

令和 6 年 9 月 25 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K12537

研究課題名（和文）サイクロトロン共鳴を利用した高効率大強度加速技術の開発

研究課題名（英文）Development of a high-efficiency and high-intensity accelerator with the cyclotron resonance

研究代表者

神田 浩樹（Kanda, Hiroki）

大阪大学・核物理研究センター・講師

研究者番号：40321971

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：Yale大学における先行研究により大強度・高効率の電子加速が示されていたサイクロトロン共鳴加速法を陽子に適用するための検討を行い、1台の共振器と高温超電導線材による加速器の概念設計を実施した。高温超電導線材を用いることで、MRI等の強磁場のアプリケーションにすでに実用化されている磁場を超える15 Tの静磁場中を発生できること、その中に配置する円筒形の共振空洞内部にTE111モードの回転する高周波電磁場の励振をコンピューターシミュレーションで確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

この研究における大強度陽子加速器は、将来的には中性子などの二次粒子発生用加速器、あるいは大量のRI製造や長寿命核廃棄物の消滅処理などに必要な大強度・高効率加速器の候補となり得る。今回の研究をさらに進めることにより、小型化や高エネルギー化の目途が立てばさらに多くの用途に利用可能な加速器となり得る。

研究成果の概要（英文）：We have carried out a conceptual design of a proton accelerator with the cyclotron resonant acceleration technology which was proved to be an efficient high-current electron accelerator in the previous works in Yale University. Using high-temperature superconducting wires, we confirmed by computer simulation that it is possible to generate a static magnetic field of 15 T, which exceeds the field already in practical use for high magnetic field applications such as MRI, and to excite a rotating high-frequency electromagnetic field of TE111 mode inside a cylindrical resonance cavity to be placed inside it.

研究分野：量子ビーム科学

キーワード：サイクロトロン共鳴 陽子加速器 TE111共振器

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

高エネルギーでかつ大電流の加速器の要望は、RI 製造や大強度の二次粒子ビームの生成など加速器の社会実装が進むとともに日々高まっている。大電流の陽子もしくは重陽子の加速はビーム利用の幅を大きく広げることからきわめて重要である。高エネルギーで大電流のビームの加速のためにはそのパワーに見合った電力を投入する必要がある。スイス・PSI(Paul Scherrer Institut)のHIPA(High Intensity Proton Accelerator)は世界で最高の電力効率を誇る陽子加速器であるが、このサイクロトロンシステムでは 2.4 MW の電力を加速用の高周波共振空洞に投入して、得られるビームの出力は 1.3 MW と約 56%の効率である。そこで、Yale 大学における先行研究により電力効率 90%強で電子 20 A を 1 MeV まで加速することが示されている自動サイクロトロン共鳴加速法(Cyclotron Auto-Resonant Acceleration: CARA)に着目した。この方式では、回転する TE11 モードの電磁波によって、外部磁場として用意した静磁場の軸を中心に周回する電子粒子を周方向に加速する。高周波用の導波管を通過する間に切れ目なく電子が加速されることが、電力効率を高くできる理由と考えられている。継続した加速のためには電磁波の周波数と荷電粒子の周回運動の周波数を同一にするサイクロトロン共鳴条件を満たす必要があるが、陽子の場合には低い周波数による導波管の巨大化とその導波管の領域に発生せねばならない強力な磁場により実現は困難であると考えられていた。

### 2. 研究の目的

この研究では、高効率で大電流の加速の可能性が先行研究によって示された自動サイクロトロン共鳴加速法を陽子に適用し、中性子の発生や多種の RI の製造に利用可能な 30 MeV までの陽子の加速を原理的に実証することを目指した。陽子の周回運動のための静磁場の設計、回転する電磁場の発生方法と高周波電磁場用の導波管もしくは共振空洞の概念設計、電磁場中の荷電粒子の運動シミュレーションによる加速の実証を第一の目的とし、電子による共振空洞における加速の実証を第二の目的、さらに加速器として安定な運転を行うための共振空洞の最適化と共振周波数の調整機構の導入を将来のための発展的な目的としている。

### 3. 研究の方法

陽子は電子の 1840 倍の質量をもつことから、Yale 大学における電子加速器の設計をそのまま踏襲することはできず、磁場の強さと周期の積が電子加速器の 1840 となるように設計の変更が必要になる。そこで、REBCO 等の高温超伝導線材を使用したコイルによる静磁場の発生、導波管もしくは共振空洞の構造と高周波電力の投入方法の工夫による回転する高周波電磁場の設計を、有限要素法電磁場シミュレーション法の OPERA 3D および ANSYS HFSS を用いて実施した。さらに、これらから得られた静電場、高周波電磁場を、荷電粒子の運動計算コード OPAL に入力して荷電粒子の運動シミュレーションを実施した。また OPAL が提供する大強度ビームにおける空間電荷効果を加味した粒子軌道計算によって大強度のビーム加速までの検証を行った。

### 4. 研究成果

大阪大学核物理研究センターにて研究を行ってきた高温超伝導技術を用いたソレノイドによって、10 T もしくはそれを超える静磁場の発生は可能であるという見込みから、陽子の周回運動用の静磁場を磁束密度を 15 T に設定した。この磁場中での陽子のサイクロトロン周波数は 230 MHz、この周波数のための TE11 モードの導波管の直径は約 1 m となることから、ソレノイドの長さは大きくできず、ソレノイドの軸長を 1 m 程度に限ることとした。この寸法で高周波共振空洞を設計すると、TE111 モードの円筒形共振空洞は直径 1.0 m、軸方向の長さが 1.04 m で、OPERA 3D、ANSYS HFSS のどちらの有限要素法計算によっても十分な Q 値( $\sim 10^4$ )で回転する電磁場を励振することが可能であることが示された。

図1に ANSYS HFSS を用いたシミュレーションによって得られた電磁場の励振の様子を示す。この図は円筒形の共振空洞の中央を軸に垂直な面で切って表示したもので、矢印の向きは各格子点における電場の向きを、長さは電場の強さを表している。円筒形共振器の上側と左側にあるアルファベットの J 型に屈曲した金属棒は、ループ型結合器であり高周波電力を電流によるインダクタンスによって空洞内に導入する機構を表している。空間的に 90 度の位置にあるこれらの結合器によって図中の左右方向と上下方向に高周波電磁場を励振する。このとき、時間的位相を 90 度ずらした高周波電流を流すことによって重畳した電場の方向が回転する。この図における位相は 0 度であるが、位相を変化させることによって電場の方向が回転することが確認された。教科書的には用意に想像できる電磁場のふるまいであるが、実際の電磁場シミュレーションによって示すことができ、CARA による陽子加速のためにほぼ理想的な電磁場の形成が可能であることが分かった。

実際にこの共振器を用いて一定の周波数で安定的に励振させるためには、チューニング機構が不可欠である。特に左右方向と上下方向の周波数が一致していないと電場は回転している状態

から徐々に振動方向が変化してゆき、うなりのような現象を起こしてしまう。そのためにチューニング用の金属棒を挿入する仕組みを考案した。ANSYS HFSS によるシミュレーションの結果、この金属棒の挿入長を変化させることによる S パラメータの変化と、共振周波数の変化を得ることができた (図 2)。さらに、2 本の金属棒を利用して左右方向、上下方向の共振周波数が独立に変化することを確認した (図 3)。

これらの機構により、円筒形共振器による回転電場の実現と実際の加速としての応用の可能性を示すことに成功した。これらの結果は日本加速器学会の年会においてポスターによる報告をおこなった。

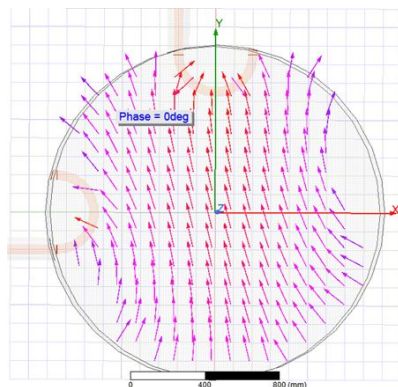


図 1 円筒形共振空洞内に励振した高周波電場

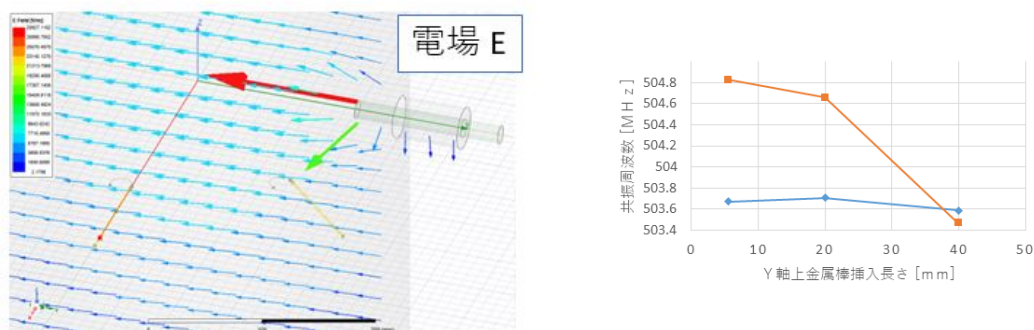


図 2 共振空洞内への金属棒の挿入の様子 (左) と共振周波数の変化 (右)

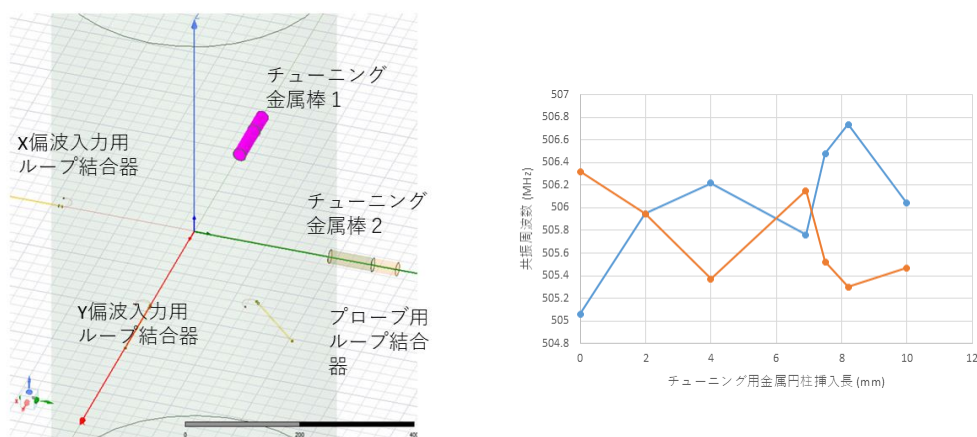


図 3 共振空洞内への 2 本の金属棒の挿入の様子 (左) と共振周波数の変化 (右)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 神田浩樹
2. 発表標題 自動サイクロトロン共鳴加速用回転TE111モードRF共振空洞の設計
3. 学会等名 第19回日本加速器学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 神田浩樹
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本加速器学会第18回年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 原隆文
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本加速器学会第18回年会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 荷電粒子加速装置及び荷電粒子加速方法	発明者 神田浩樹	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2020-150015	出願年 2024年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	福田 光宏  (Fukuda Mitsuhiro)  (60370467)	大阪大学・核物理研究センター・教授    (14401)	
研究分担者	依田 哲彦  (Yorita Tetsuhiko)  (30372147)	大阪大学・核物理研究センター・講師    (14401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関