



Title	Mega-Watt Class Compact Proton Accelerator Utilizing a Rotating RF Field
Author(s)	原, 隆文
Citation	大阪大学, 2024, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/98635
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 （ 原 隆 文 ）	
論文題名	Mega-Watt Class Compact Proton Accelerator Utilizing a Rotating RF Field (回転高周波電場を用いたメガワット級小型陽子加速器)
論文内容の要旨	
<p>現在、ホウ素中性子捕捉療法（BNCT）、半導体デバイスのソフトエラー試験、中性子イメージングなど中性子の医療・産業応用による、中性子利用の需要が拡大してきている。現在、主に中性子源として使われている原子炉の多くは、老朽化が進んでおり、また大規模な施設が必要なこと、原子炉に対する厳しい規制などによって、新設することや管理、維持のコストがかかる。このことから、原子炉は、中性子の医療、産業利用のための、中性子源として適していない。医療、産業利用のために中性子源として求められる要素は①安全で維持管理が容易なこと②小型で普及しやすいこと③安定した運転が可能である④原子炉中性子源と同等の中性子を発生させること、である。これらの要件を満たすため、新たな中性子源として加速器中性子源が注目されている。加速器中性子源は、核破砕反応を利用した核破砕中性子源と、$p-n$ 反応や、$d-n$ 反応を利用した、小型加速器中性子源の2種類に分類できる。核破砕中性子源は100 MeV 以上の陽子を、炭素、鉛、ウランなどの標的に照射したときに起こる、各破砕反応を使用している。核破砕中性子源は、大強度の中性子を発生させることができるが、高エネルギーのビームを必要とするため大型の施設が必要となり、世界に11施設しか存在しておらず、医療、産業のための普及に適していない。小型加速器中性子源は、数 MeV から 数十 MeVのビームエネルギーを使うため小型で普及のしやすい中性子源として、医療、産業分野の利用に適している。しかし、現在小型加速器中性子源で、原子炉や核破砕中性子源に匹敵する10^{17} n/s以上の中性子を発生させる小型加速器中性子源は存在しない。小型加速器中性子源で10^{17} n/s以上の中性子を発生させるためには、$p-Be$ 反応を利用したとき、例えば1 A、30 MeVの陽子ビームが必要になる。</p> <p>大電流の陽子加速開発に向けて、従来の加速器とは異なる加速法である、自動サイクロトロン共鳴加速法(CARA)に注目した。通常、サイクロトロンや線形加速器のような高周波(RF)電場を用いて荷電粒子を加速するRF加速器では、静電場を用いて加速を行う静電加速器に比べて、高エネルギーまで粒子を加速することができるが、RFの位相に合わせて加速を行う必要があるため、ビームはバンチ構造を必要とする。そのため、ビームの電化密度が高くなり大電流ビームを加速する際には、ビームの自己場の影響(空間電化効果)を無視することができないため、従来のRF加速器では、大電流化が困難である。しかし、CARAは、RF加速器であるがRFの位相によらず連続したDCビームの加速が可能である。そのため、空間電化効果の影響を小さくすることができ、大電流のビームを数十MeVまで加速することができると考えられる。CARAはソレノイド磁場B(以後ガイド磁場と呼ぶ)と、そのガイド磁場に対して垂直で、磁場と平行な軸を中心に角速度ωで回転する電場を使用して、荷電粒子の加速を行う。電荷q、静止質量m_0の荷電粒子を、ガイド磁場に対して平行に入射すると、電場によりガイド磁場に対して垂直な速度成分を持ち、角速度$\Omega = \frac{qB}{m_0\gamma}$で回転を始める。$\gamma$はローレンツ因子である。この時、$\Omega = \omega$ の条件を満たしていれば荷電粒子の回転方向の速度と電場の向きは常に一致し、荷電粒子は加速され続ける。これをサイクロトロン共鳴という。このことから、CARAは高周波の位相に関係なく加速が可能である。しかし、荷電粒子が加速されていくと、γが大きくなりサイクロトロン共鳴の条件を満たさなくなり、高周波と荷電粒子の間の位相差が大きくなっていき、やがて減速するようになる。Yale大学で行われた、CARAの実証試験では、0.08 Tのガイド磁場と進行方向に垂直電場持つ円偏波したTE11モードのRFを用い、20 Aの電子を1 MeV (20 MW)まで加速することに成功している。現在、CARAによる電子以外の荷電粒子を実際に加速した例はない。そこで、本論文では、1 A、30 MeVの陽子加速器開発に向けて、CARAによる陽子加速の概念設計を行い、世界で最も大強度である100 mAのビームの取り出しに成功したSaclayの大強度イオン源をもとに、1 Aビームの加速の前段階として、CARAによる100 mA、30 MeVの陽子ビームの加速の可能性をシミュレーションを用いて検証した。</p>	

陽子の質量は、電子の約1860倍のため、粒子の回転運動の角速度 Ω を大きくするためには、電子加速よりも大きな磁場が必要になる。CARAに使用するRFの周波数は、サイクロトロン共鳴の条件 $\Omega = \omega$ を満たす必要がある。加速空洞のサイズは、RFの周波数に依存している。加速器を小型化させるためには、大きなガイド磁場が必要となる。そこで、高温超伝導コイルを用いて10T以上の磁場を使用し、RFには進行波ではなく、共振空洞を使用した定在波のTE11モードのRFを使用することで、ピークの電場を大きくし、加速に必要な距離を短くした。

各種パラメーターの決定は運動方程式から、モデル計算を行い100 keVの陽子を30 MeVまで加速するのに必要な、加速空洞の長さが1.04 m、ピーク電場の大きさ 5.3 MV/m、ガイド磁場の大きさを 15 T と決定した。この時のRF周波数は230 MHzで、共振空洞の直径は1 mである。さらに、ガイド磁場の大きさをサイクロトロン共鳴の共鳴点よりもわずかに大きくすることで、RFの電場成分が、陽子とRFの間の位相差が大きくなることを抑える効果があることを発見した。モデル計算では、粒子とRFの位相差を0としてエネルギーも求めたが、実際には位相差が生じることで、電場の実効値は小さくなる。そこでモデル計算をもとに得られた、エネルギーから位相の変化を求め電場の実効値を調べて、それに補正をかけて電場を大きくし、電場の実効値の平均が5.3 MV/mとなるようにした。シミュレーションにより、100mA の30 MeVまで加速することを確認した。最終的な電場の大きさは 6.13 MV/mである。本研究の陽子加速器の加速エネルギーは磁場依存性を持っており、ガイド磁場の大きさが15.09 から15.24 T の範囲で25 から33 MeV の間で加速エネルギーに差があることが分かった。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 （ 原 隆 文 ）		
	(職)	氏 名
論文審査担当者	主 査	教授 福田 光宏
	副 査	教授 川畑 貴裕
	副 査	教授 青井 考
	副 査	教授 石川 貴嗣
	副 査	講師 神田 浩樹

論文審査の結果の要旨

近年、医療や産業における中性子利用のニーズが高まっており、原子炉に比べて汎用性・安全性が高く、安定性・保守性などにも優れた加速器ベースの大強度小型中性子源が求められている。本研究は、自動サイクロトロン共鳴加速法(CARA : Cyclotron Auto Resonance Acceleration)を用いた全く新しい概念の大電流陽子加速器の開発を目指したものである。本論文にはソレノイド磁場（ガイド磁場）中で回転運動する陽子の回転周期とほぼ同じ周期で回転する TE111 モードの高周波回転電場を用いて連続的且つ安定に加速する制御手法を理論的に明らかにし、ビーム軌道シミュレーション計算によってその加速法の実現性を初めて示した成果がまとめられており、加速器技術の発展に大きく寄与するものとして高く評価される。本研究の最大の課題は、10 テスラ以上の高いガイド磁場と数 100MHz 級の高周波電場を組み合わせる電磁石と共振空洞のコンパクト化を両立させ、目標のエネルギーまで如何に安定に加速するか、という点にある。回転する電磁場中で運動する荷電粒子の運動方程式を近似的に簡略化して共振空洞のサイズと共振周波数、サイクロトロン共鳴のガイド磁場、回転電場の振幅などの基本パラメータを導き出し、安定な加速を成立させるための高周波回転電場と加速粒子の回転運動の位相差を抑制する磁場条件を理論的に解き明かしたことは特筆すべきことである。また、100mA 級の大電流陽子ビームを仮定したビーム軌道シミュレーション計算により陽子ビームの挙動を詳細に解析し、ガイド磁場の精密な制御により最終到達エネルギーを調整しうることを明らかにした意義は極めて大きい。論文審査では、研究の意義と位置付け、研究目的を達成するための課題の設定と解決策、研究目標へアプローチするための手順と工夫、得られた結果に対する考察の妥当性と価値などに重点をおいて評価を行った。

本論文は、小型中性子源の要求仕様、自動サイクロトロン共鳴法を陽子加速に応用する際の技術的な課題と解決策、ガイド磁場と高周波回転電場に関わる基本パラメータの決定、加速エネルギーが目標値まで安定に到達するための位相差のガイド磁場依存性の解明、空間電荷効果を考慮したビーム軌道シミュレーション計算による 100mA 級大強度ビーム加速の実証などから構成されており、論文の流れや論理展開は妥当であると判断される。初期エネルギー100keV の陽子ビームを 30 MeV まで加速するのに必要な基本パラメータは、共振空洞の長さが 1.04m、内径が 1 m、ガイド磁場が 15T、RF 周波数が 230MHz、ピーク電場が 5.3MV/m であり、中性子源のコンパクト性の点でも十分に目標を達成していて得られた成果は申し分ないと言える。さらに、ガイド磁場の大きさを 0.1%のオーダーでサイクロトロン共鳴の共鳴点よりもわずかに大きくすることで半径方向の高周波電場成分が、陽子の回転運動と高周波回転電場の間の位相差を自動的に抑制する効果があることを初めて見出したことは極めて大きな進展である。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として十分に価値あるものと認める。