

博士論文公聴会の公示(物理学専攻)

学位申請者： 原 隆文

論文題目： 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

日時： 2024年4月24日(水) 16:50~18:20(5限目)

場所： 理学研究科 H棟7階セミナー室(H701号室)

主査： 福田光宏

副査： 川畑貴裕、青井考、石川貴嗣、神田浩樹

論文要旨：

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は大規模な施設である上にその多くは老朽化が進んでおり、原子炉に対する厳しい規制などあって新設するにも維持管理するにも相当なコストがかかっている。このことから、原子炉は、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・産業利用を目的とした中性子源に求められる要素は、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こと、④原子炉中性子源と同等の中性子束を発生できることである。これらの要件を満たす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、高エネルギー陽子ビームなどを用いた核破砕反応による核破砕中性子源と、(p, n) 反応や、(d, n) 反応など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生じる核破砕反応を利用している。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・産業利用のための普及には適していない。小型加速器中性子源は、数 MeV から数十 MeV の陽子・重陽子ビームを利用するため、小型で普及しやすく、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 反応を利用する場合で、例えば1A、30 MeV の陽子ビームが必要になる。

そこで、大電流の陽子加速器開発に向けて、従来の加速器とは異なる加速法である、自動サイクロトン共鳴加速法(CARA)に注目した。通常、サイクロト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、ビームバンチ内の電荷密度が高くなり、大電流ビームを加速する際にはビームバンチ内の荷電粒子間のクーロン力の影響(空間電荷効果)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容易ではなかった。しかしCARAは、RF加速器であるものの、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、空間電荷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 $\Omega = qB/(m_0 \gamma)$ で回転を始める。 γ 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、やがて減速されるようになる。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、進行方向に垂直な電場を持つ円偏波した 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 と同じ方式で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 の陽子加速器開発を最終目標として CARA による陽子加速の概念設計に取り組み、世界で最も大強度である 100 mA の陽子ビームの取り出しに成功した CEA/Saclay の大強度陽子源の利用を仮定した、CARA による 100 mA、30 MeV の陽子ビーム加速の可能性をシミュレーション解析により検証した。

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 以上の磁場を発生させ、RF 電場形成においては進行波ではなく、共振空洞を使用した定在波の TE11 モードの RF を利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。

各種パラメーターを決定するために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は 1.04 m、ピーク電場の大きさは 5.3 MV/m、ガイド磁場の大きさは 15 T に決定した。この時の RF 周波数は 230 MHz で、共振空洞の直径は 1m 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、加速粒子と RF の位相差を 0 としてエネルギーを求めたが、実際には位相差が生じることで電場強度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て電場強度の実効値を明らかにし、それに補正を施して電場を大きくして電場の実効値の平均が 5.3 MV/m となるようにした。シミュレーション計算により、100mA の 30 MeV まで加速することを確かめた。最終的な電場の大きさは 6.13 MV/m である。陽子の到達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 T から 15.24 T の範囲において 25MeV から 33 MeV の加速エネルギーの差があることを明らかにした。