

京都大学	博士 (工学)	氏名	山川 恵美
論文題目	Study of serpentine acceleration in zero-chromatic FFAG accelerator (零色収差 FFAG 加速器における蛇行加速に関する研究)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、零色収差を特徴とする固定磁場強集束 (FFAG) 加速器において、陽子、ミューオン等の荷電粒子を周波数一定の高周波電場により素早く高エネルギーまで加速する新方式の加速方式 (蛇行加速法: serpentine acceleration) を提案し、その可能性について理論的ならびに実験的に研究したものである。</p> <p>本論文は6つの章からなる。</p> <p>第1章は緒言として、この研究の背景ならびに目的等について述べている。</p> <p>第2章では、円型加速器における一般的な高周波加速法について、その原理・基本的性質・特徴についてまとめている。</p> <p>第3章では、本研究ではじめて提案された零色収差FFAG加速器における蛇行加速 (serpentine acceleration) 法についてその方式の物理的描像・原理を述べ、荷電粒子の縦方向運動二次元位相空間における正準方程式より解析的に系のハミルトニアンをはじめて導出し、粒子運動の運動学的解析を行っている。さらに導出されたハミルトニアンにより、分離された定常高周波バケツの形状とトランジションエネルギーとの関係、粒子エネルギーが非相対論的エネルギーから相対論的エネルギーへ移行する領域での蛇行加速における粒子運動のふるまい、磁気勾配係数 (k-値) と定常エネルギー (高周波バケツ中心エネルギー) との関係を示した。また、蛇行加速が可能となる最小高周波加速電圧、ビーム入射から取り出しに至る加速エネルギーゲイン、ならびに蛇行加速が可能となる加速位相の範囲のそれぞれについて理論的解析を行い、蛇行加速における最適パラメータの決定に際して必要とされる多くの知見を得た。さらに、単一サイン波形状の高周波に代わる矩形高周波による蛇行加速での粒子運動の解析を行い、理想的な矩形高周波電圧では加速に伴うビームエネルギーの広がりを極めて小さくできることを明らかにした。特に、3次高調波のみの重畳においても、単一サイン波形状の場合のビームエネルギー広がりを80%以上減少できることをビームシミュレーションにより示した。</p> <p>第4章では、蛇行加速の実証のために行った実験及びそれにより得られた結果について述べている。実験は電子を約8MeVまで加速する零色収差FFAG加速器で行われ、第3章で明らかにされた蛇行加速に関する理論的評価により得られた結果をもとに最適な加速条件を設定することで、零色収差FFAG加速器において蛇行加速が可能であることを世界ではじめて実証した。また、高周波加速電圧に対する位相アクセプタンス変化の測定において、実験結果は理論的予測が示す位相アクセプタンス変化の傾向とほぼ良い一致を示し、本加速方式の特性と有効性を実験的に明らかにした。</p> <p>第5章では、以上の研究成果で得られた各研究成果を総括している。</p> <p>第6章では結語として、本研究の結果、零色収差FFAG加速器において周波数一定の高周波電圧による蛇行加速法が適用可能であり、これにより将来の加速器駆動未臨界炉のための大強度の陽子ビーム加速、ならびにミューオン等の短寿命粒子のビーム加速が十分実現可能であることを述べている。特に、加速器駆動未臨界炉のための蛇行加速法を用いたFFAG陽子加速器 (最大エネルギー<math>\sim</math>1GeV) の基本設計を行い、リング直径約12mのコンパクトな加速器が可能であることを示し、本研究での蛇行加速法が零色収差FFAG加速器において有効な加速法であることを述べている。</p>			

氏名	山川恵美
----	------

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、荷電粒子を高エネルギーまで加速する零色収差FFAG加速器において、一定周波数の高周波電圧により加速する蛇行加速 (serpentine acceleration) 方式について詳細なビーム運動力学的な解析ならびに評価を行い、それらにより得られた新しい知見と最適化から蛇行加速方式が、ミュオンのような短寿命粒子の加速あるいは大強度の陽子ビーム加速において極めて有効な手法であることを明らかにした。

原子力科学の分野では、核廃棄物処理ならびに安全な原子力システムとして期待される加速器駆動未臨界炉(ADS)において、大強度の高エネルギー陽子ビームが求められている。また、将来の高エネルギー物理学の研究分野では、ミュオンのように短寿命粒子を高エネルギーまで素早く加速する加速器が必要とされている。こうした目的のためには、(1)ビーム集束磁場が静磁場である(2)一定周波数による高周波加速法を用いる(3)ビーム集束において強集束原理を満たす高エネルギー粒子加速器が必要である。線形加速器はこれらの条件を満たすが、建設・運転・維持関連コストが高いという難点がある。低コスト化が可能な円型加速器では、サイクロトロン、シンクロトロンは両者ともに原理的にそれぞれ上記三条件すべてを満たすことができない。一方零色収差FFAG加速器では、三つの条件全てを満たすことができ、したがって素早い加速と大強度ビームを高エネルギーまで加速する事が原理的に可能である。零色収差FFAG加速器では、加速粒子のエネルギー増大に応じた粒子速度と軌道長の変位のためにリング周回時間が大きく変化する。したがって、荷電粒子を加速するための高周波電圧はその周波数を周回時間に同期して変調する必要がある。FFAG加速器の大きな特徴は、上に述べたように集束磁場が時間的に変化せず一定であり素早い加速が原理的に可能なことである。しかしながら、高周波加速においては周波数変調に必要とされる時間のために高強度ビーム加速、またミュオンのような超短寿命粒子加速に制限が生じていた。山川氏はビーム加速におけるこうした困難を克服する方法として周波数が一定な高周波電圧による新しい加速方式(蛇行加速法)を提案し、運動学的理論解析さらには実験的に実証することにより、この加速方式が有効な方法であることを本研究においてはじめて示した。

本研究で得られた主な成果は次の通りである。

蛇行加速方式では、ビームの縦方向運動において磁場勾配 (モーメントム・コンパクション) に関係した特定のエネルギー (transition energy) を挟む異なるエネルギーに安定点を有する2つのポテンシャル (定常高周波バケツ) が存在することを利用する。これらは互いに干渉し、特定の条件のもとでは低エネルギーから高エネルギーに至る経路 (potential path) をつくるのが可能となる。これを利用することで、非相対論的領域から相対論的なエネルギー領域にわたって大きく粒子速度が変化した場合においても、一定周波数で効率良く荷電粒子を加速することが可能となる。本研究では、蛇行加速での粒子運動を記述するハミルトニアンが、エネルギーEと位相 $\phi$ を正準変数とする縦方向二次元位相空間において解析的に導出できることをはじめて示し、それに基づいて効率的に加速を行うための諸条件 (磁場勾配係数、高周波電圧、定常周波数) 間の関係を明らかにした。また、通常の単一サイン波形状の高周波では、条件により加速後のビームエネルギー分布に大きな広がりが生じる場合があり、たとえば、ミュオン加速のようにより高エネルギーまでの加速のためにカスケード的に次段の加速器でビーム加速する際には大きな制約となる。本研究では、3次の高調波を重畳させることで加速後のエネルギー分布広がりを80%以上制御することが可能であることを示した。さらに、上記理論的解析にもとづき零色収差電子FFAG加速器装置を用いて蛇行加速方式によるビーム加速実験を行い、本方式の有効性を実験的に世界ではじめて実証した。

以上の成果はFFAG加速器のビーム光学ならびにビーム力学的知見をより深化させるとともに、加速器科学の様々な応用への展開の可能性を飛躍的に広げるものである。また、これらはすでに数編の査読付き論文として学術雑誌に掲載されており、また、いくつかの国際会議においても口頭発表され評価を得ている。

以上の内容により、本論文博士 (工学) の学位審査の請求に値するものと認める。また、平成25年2月24日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し合格と認めた。