

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 14 日現在

機関番号：82118

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656064

研究課題名（和文） 新型入射方式による小型電子蓄積リングの設計研究

研究課題名（英文） Development of a new beam injection scheme for a small electron storage ring

研究代表者

本田 洋介 (HONDA YOSUKE)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・助教

研究者番号：40509783

研究成果の概要（和文）：小型化した電子蓄積リング型加速器は、様々な応用が考えられる。小型であるが故に、リング軌道へのビームの入射方式が困難であるが、非相対論的な低エネルギーで生じる加速空洞における位相のシフトを利用して入射を行う方式を提案した。位相空間の保存則より、エネルギーと加速位相の位相空間において、リングの安定軌道と入射軌道が完全に重なり合うことは無い。このことを解決するには、何らかの減衰効果を積極的に利用する必要があることが分かった。

研究成果の概要（英文）：A small electron storage ring should be useful for many applications. One of the difficulty in designing such a small ring accelerator is the injection scheme. We have proposed a new scheme which utilizes the phase shift while propagating the accelerator cavity at a non-relativistic energy. To realize infinite turns of circulation of the newly injected beam, coincidence on the energy-timing phase space is necessary. We have realized that it never happens due to the conservation rule. A damping mechanism is needed for such a scheme.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	1,100,000	330,000	1,430,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用物理学一般

キーワード：加速器

## 1. 研究開始当初の背景

非常に小型の電子蓄積リングが出来ると、特徴的な応用が考えられる。数 MeV 程度のエネルギーが得られれば、例えばレーザーコンプトン散乱を利用することで、紫外～軟 X 線を発生させることができ、応用の範囲も大きいと考えられる。

このような小型リングの設計で困難な点は、その入射方式である。通常のリリング型加速器ではパルスキッカーによる入射がなされるが、周長が短い故にパルス幅の非常に短いキ

ッカーが必要になり、これが技術的な制限になっている。また、シングルターン入射の場合は、蓄積されるビーム電流は、電子源の出力で決まる事になり、高電荷を出力できる電子銃が必要になる。また、十分な入射効率が実現できなければ、十分な周回電流が得られない。本研究では、これらの問題を解決する新しい入射方式について検討する。

## 2. 研究の目的

システムの全体像は図 1 のようなものである。

電子源と加速空洞、蓄積リング、から構成される。電子源からは、低エネルギーのビームが供給され、静磁場によりリング軌道に合流する。周回ビームと入射ビームはエネルギーが異なるために、静磁場によって完全に同じ軌道に合流できる。リング内に低加速勾配の加速空洞を配置し、入射ビームはこれによって加速され、空洞の出口においてリングの周回エネルギーに達する。ここで、入射ビームは低エネルギーの非相対論的領域であるとし、空洞での加速時には位相のずれが生じるとする。空洞の入り口においては加速位相であったものが出口においては加減速の無い位相になるような状況が実現できると考える。周回ビームが再び加速空洞の入り口に到達した時には加減速の無い位相となるように、リングの周長をうまく調整しておく、一度入射したビームはリング軌道を周回しつづけると考えられる。

このようなことが可能であれば、既に周回中のビームを乱す事無く、次から次にビームを積み上げて入射することが出来、低出力の電子源から高電流で多バンチのビーム蓄積が可能になる。

このような事は一見不思議であるが、どのような条件において実現可能になるかを検討する。

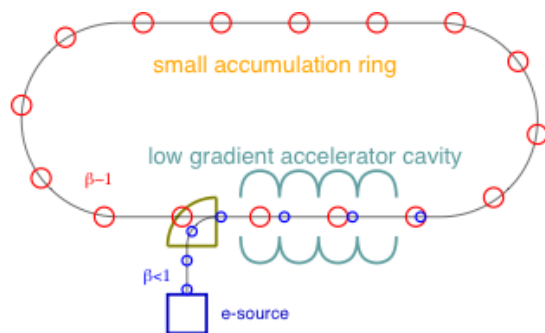


図 1

### 3. 研究の方法

加速空洞を通過する際のエネルギー-タイミングに関するビームダイナミクスの詳細な検討が必要である。図2に入射ビームと周回ビームについてのエネルギーの変化の様子を模式的に説明する。周回ビームは、光速度に近い状態でかつ加減速無しの位相で空洞を通過するため、エネルギーの変化を受けない。一方、入射ビームは加速位相で入射するが、低速度であるため位相がシフトし、空洞の出口で周回ビームに追いつかれる状態にならなければならない。また、空洞の出口において、丁度周回のエネルギーまで加速される必要がある。

まず、簡単なモデル化を行い、計算機シミュ

レーションによって、この条件が実現するパラメータにあたりをつける。そのうえで、空洞の加速勾配、長さ、エネルギーについて最適化し、どのような場合がこの条件に適しているか検討する。

非相対論的領域から加速される様子をトラッキングする計算コードをまず製作する。空洞を、周波数、セル数、加速電場、だけで記述するような簡単なモデルとし、単粒子のエネルギーとタイミングを計算する。

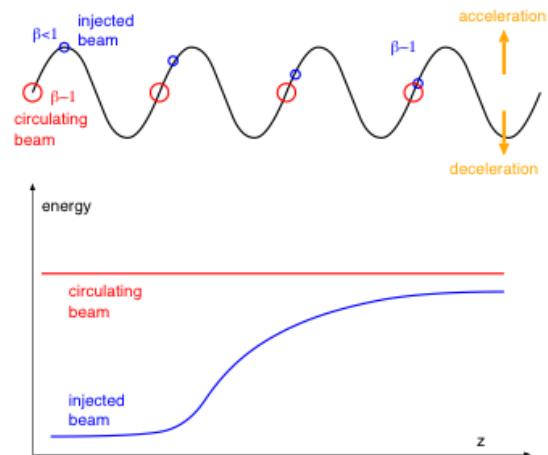


図 2

### 4. 研究成果

入射ビームが、周回軌道に乗る条件を検討する為に、上記パラメータを変えて実現条件を探したところ、うまいパラメータを見つけることが出来なかった。

実はこれは、エネルギー-位相平面における、周回ビームおよび入射ビームのダイナミクスを考えると良く理解できる。図3に示すように、ビームバンチは、エネルギーとタイミングの位相平面上の点として表現することが出来る。ビームがリングを周回する毎にこの平面上を移動することになるが、周回しつづけることができる安定領域では、その移動範囲が閉じており、原点周辺を回転する。一方で、その条件に合わないものは有限回の周回の後に遠くの領域へ移動してしまう。

入射ビームがこの位相平面上のどの位置からスタートするかによってその後の経過は一意的に決まるが、静磁場で入射することを仮定する以上、必ず不安定領域から始まる。これは、時間の経過を逆回しにした場合を考えると理解できる。ここで考える運動力学は時間反転にたいして対称である。仮に入射ビームが周回の安定領域に入るといことがあったとすると、これを時間反転すると、安定領域にあったビームがそこから外れてエ

エネルギーを失って電子源に戻るということが起こる事になる。これは最初の仮定と矛盾するため、このようなことはあり得ないという結論になる。別の言い方をすると、位相空間の保存則である。

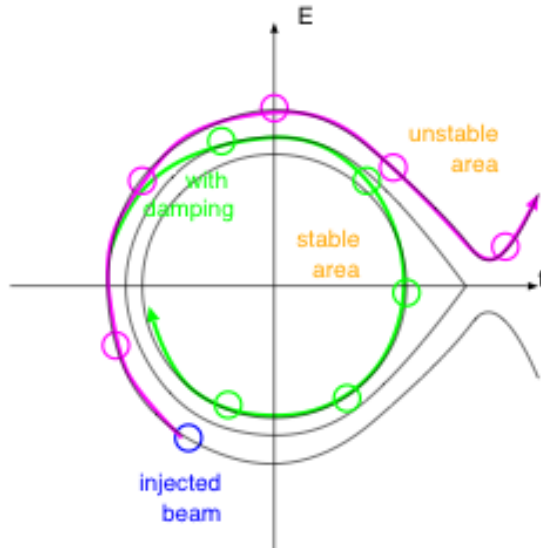


図 3

位相空間の保存則から、通常ではこのようなことは起こりえないので、ここで提案する入射方式を実現するには、なんらかの減衰効果がなければならない。減衰効果があれば、図 3 において原点方向に落ち込むことになる。入射ビームが不安定領域に居ながらも暫くは周回を続けている間に、一度安定領域の内側に入ってしまうと、その後安定領域に居続けることが出来る。

通常の電子蓄積リングでは、放射減衰の効果が働き、これによって安定領域に捕獲されるが、ここで検討している低エネルギービームでは、放射減衰の効果は無視できる程である。代わりにたとえば、確率冷却等の方法を導入する必要があると検討された。これは、周回部にキッカーを導入して、人工的に補正を加えることで減衰させる手法である。

キッカーの方式としては、縦方向キック、つまりエネルギーの補正を行うものを用いる場合(図 4a)と、縦方向と横方向のビーム運動を混合したうえで横方向キックを行う場合(図 4b)の 2 種類について検討した。

縦方向キッカーの場合、周回軌道中にエネルギー分散のある領域を設け、そこでのビーム位置を測定することでバンチの平均的なビームエネルギーを検出することができる。これを即座にキッカーに入力し、加速あるいは減速力を与えることで、安定領域に向かわせる減衰力を実現する。

横方向キッカーの場合、エネルギー分散部に

ビーム位置依存性のある加速装置、具体的にはダイポールモードで動作する加速空洞を設置する。横方向キッカーと組み合わせる事で、やはり、加速あるいは減速力を制御することが出来、同様の効果を与える事ができる。

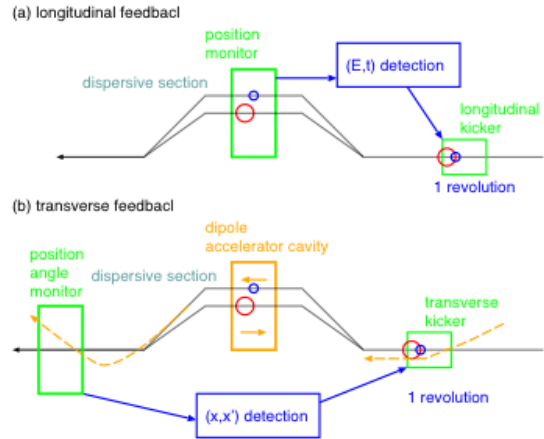


図 4

この場合、現実的に困難と思われるのは、ビーム位置の検出である。もともと低電流の電子源からビームを生成し、リングで多数回の入射が積み上がることで有意なバンチ電荷に達すると想定していたのであるが、上記のように高速のフィードバックシステムが必要となると、過渡期にあるバンチのビーム位置を検出できなければならない、大きなバンチ電荷がなければ成り立たない。

また、システムが複雑になってきてしまい、当初の目的であった、小型化単純化から外れてきてしまう結果になっている。

検討の結果をまとめると、本計画で考案した入射方式は、位相空間の保存則のため、そのままでは成立しないことが理解された。また、この原理的境界を回避するための対策を検討したが、現実的な方法は見つかっていない。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 1 件)

(1) Yosuke Honda, A New Beam Injection Scheme for a Compact Low-energy Storage Ring, International Particle Accelerator Conference, 2012 年 5 月 20 日~5 月 25 日, NewOrleans Louisiana, USA

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

本田 洋介 (HONDA YOSUKE)  
大学共同利用機関法人高エネルギー加速  
器研究機構・加速器研究施設・助教  
研究者番号：40509783

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし