

令和 4 年 5 月 20 日現在

機関番号：82118

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K18769

研究課題名（和文）極低エミッタンス電子蓄積リングにむけたレーザー冷却機構の開発

研究課題名（英文）Development of a laser-cooling system for a low emittance 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・准教授

研究者番号：40509783

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：蓄積リング型の放射光施設は、回折限界性能を目指して性能競争になっている。リングの低エミッタンス設計が重要であるが、従来の原理に基づく限り、簡単なスケールリング則から改善する余地は少ない。本研究では、レーザー冷却と呼ぶ新しいビーム冷却機構により、これを超越する性能の実現を目指す。そのためには、大強度レーザーが必要になるが、従来の外部光共振器のレーザー技術では、精密な共振器制御技術が必要で、不向きである。ここでは、制御なしに光共振器にレーザー光を蓄積できる、新しい自発共鳴型光共振器の技術を、とくに大強度で確立するために、真空試験環境と大強度レーザー用のファイバ増幅器を組み合わせたシステムで試験した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した技術をベースにして、大強度レーザー光を蓄積した光共振器システムを蓄積リングの直線部の複数箇所に設置する。電子ビームと大強度レーザー光を衝突させてコンプトン散乱の過程によるビームエネルギーの損失を導入することで、従来よりも強くビームに減衰を与えることができる。従来のスケールリング則では、回折限界性能を得るには周長500mの大きな蓄積リングが必要であったが、新たなビーム冷却原理を導入することで、より小型で低エネルギーでも同等の性能が得られる可能性がある。近年の科学基盤技術になっている放射光施設がより汎用化されると期待できる。

研究成果の概要（英文）：Storage ring synchrotron radiation facilities are competing for diffraction-limited performance. The low emittance design of the ring is important, but as far as the conventional principle is concerned, there is little room for improvement from the simple scaling law. In this research, we aim to achieve performance that exceeds this by using a new beam cooling mechanism called laser cooling. For that purpose, a high-intensity laser is required, but the conventional laser technology of an external optical cavity requires precise resonator control technology and is not suitable. Here, in order to establish a new self-resonant optical cavity scheme that can store laser light in an optical resonator without control, especially at high intensity, a vacuum test environment and a fiber amplifier for high intensity laser were assembled and the performance were tested.

研究分野：加速器科学

キーワード：レーザー 光共振器 電子ビーム

1. 研究開始当初の背景

蓄積リング型の放射光施設は、世界の各国で建設され、科学技術の基盤技術として利用されている。特に近年新たに建設する施設では、性能競争が激しくなっている。X線の波長領域において回折限界性能が得られるようになると、X線のコヒーレンスを応用した構造解析ができるようになり、物質科学の研究手法を革新すると期待されている。

光源の性能は、蓄積リングの平衡状態における電子ビームのエミッタンスで決まる。つまり、リングを如何に低エミッタンスに設計できるか、の競争になっている。しかし、自然エミッタンス(ビーム電流ゼロにおける平衡状態のエミッタンス)は、放射減衰および放射励起と呼ばれる、放射光の発生に伴う冷却と励起のバランスで決まるため、ビームエネルギーと周長だけで決まる簡単なスケーリング則に乗る(図1)。従って、従来の原理に基づく限り、設計を工夫してエミッタンスを改善する余地は少ない。結局、周長が大きく(>500 m)、エネルギーの高い(3~6 GeV)、大型で高価な加速器施設になってしまう。

本研究では、新たな原理として、レーザー冷却と呼ぶ電子ビーム冷却機構の開発を行う。これにより、スケーリング則を超えた低エミッタンスリングの可能性が生まれる。レーザー冷却の原理自体は20年以上前に提案されているが、必要とされるレーザーの強度が非現実的であった。しかし、近年のレーザー技術の飛躍的發展により、現在では実現可能性がある。

2. 研究の目的

本研究で目的とするレーザー冷却は、蓄積リングの直線部において、レーザー光を電子ビームに衝突させ、コンプトン散乱によって電子ビームにエネルギー損失を与える手法である。エネルギーは高周波加速空洞による加速で補われ、平衡状態になることで、運動量が揃っていく(図2)。従来の放射減衰も似た原理であるが、エネルギーの損失を起こす過程が偏向部の放射光の発生である点が異なる。偏向部にはエネルギー分散があるため、同時に軌道振動を励起する放射励起の過程が伴い、これがスケーリング則の限界を決めていた。エネルギー分散の無い直線部でのエネルギー損失過程を利用するレーザー冷却はこの点で異なり、原理的には不確定性の限界まで冷却することができる。

レーザー冷却に必要なレーザーパワーは、リング全体で200 MWクラスと見積もられる。複数の衝突点に複数の光パスを組み合わせた衝突システムを置く想定で、1システムあたり5 MWのレーザー光が実現できれば、な

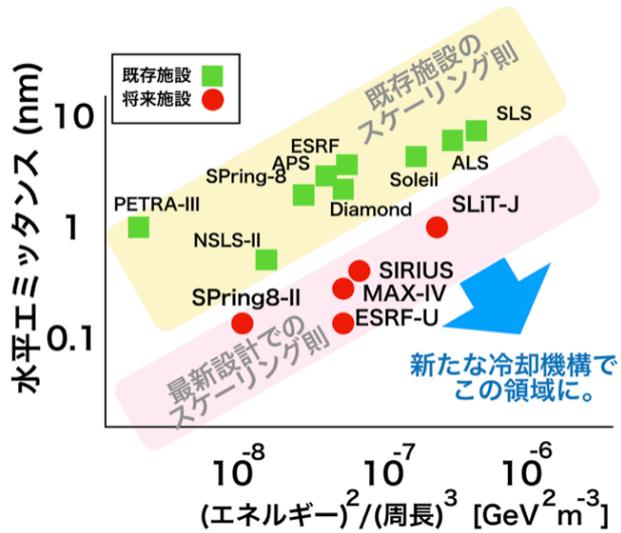


図1: 放射光施設の性能の分布

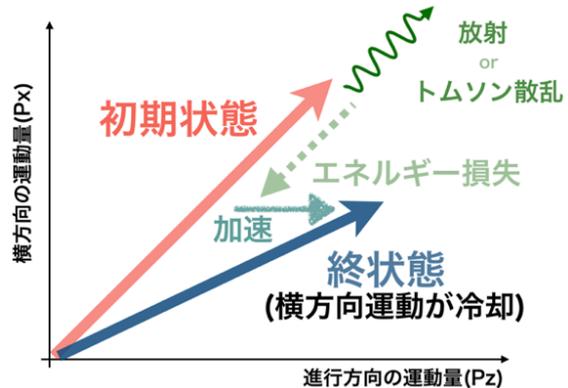


図2: ビーム冷却の原理

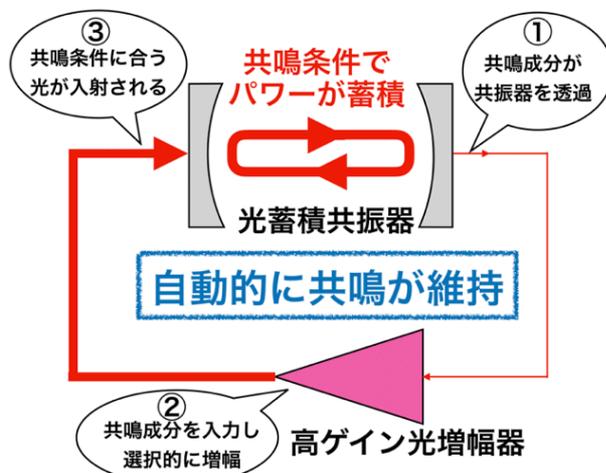


図3: 自発共鳴型光共振器の動作原理

んとか実現可能である。ここで、5 MW のレーザーシステムは、単純なシングルパスのシステムでは不可能であるが、光共振器の技術を用いれば可能である。

光共振器は、レーザー光源からの光を高反射率ミラーで構成した外部共振器に閉じ込めることで、実効パワーを何桁も増大することができる。しかし、従来の光共振器では、共振器の共鳴状態を保つ精密制御技術が必須で、多数の共振器を同時に運用する用途には不向きである。本研究では、自発共鳴型光蓄積共振器という新スキームを用いて、精密制御なしに光共振器の共鳴維持を行う開発を行った。これは、図3のようにレーザー光源を高ゲイン光増幅器に置き換え、共振器と一体化したシステムとしたものである。共振器に共鳴した光が共振器を通過して増幅器に入力され、そして増幅されて共振器に入力される。つまり、自動的に共鳴条件を満たす光成分だけが選別されて成長するため、制御なしに自動的に共振器に光が蓄積された状態が実現するというものである。このスキームは、既に低パワーでの原理試験は行なっていたが、大強度化を目指すには、大出力化に対応できる増幅器と、大強度レーザーを蓄積できる真空環境下の光共振器で試験する必要がある。

### 3. 研究の方法

光共振器は、高強度のレーザーを実現できるように、真空環境で試験する環境を整備した。ここで必要とする真空環境は、加速器で要請されるような超高真空ではなく、レーザーによって大気放電が起きない程度で簡便に試験できる環境である。装置を簡単に入れ替えできるように、上蓋が簡単に大きく開けられるアルミ削り出し真空チェンバを製作した。ここに試験用の光共振器、すなわち通常の市販の光学部品を組み合わせた光回路を設置する。ミラーを駆動するピエゾアクチュエータと温度計を設置し、これらはフィードスルーを介して真空外から扱えるようにしている。

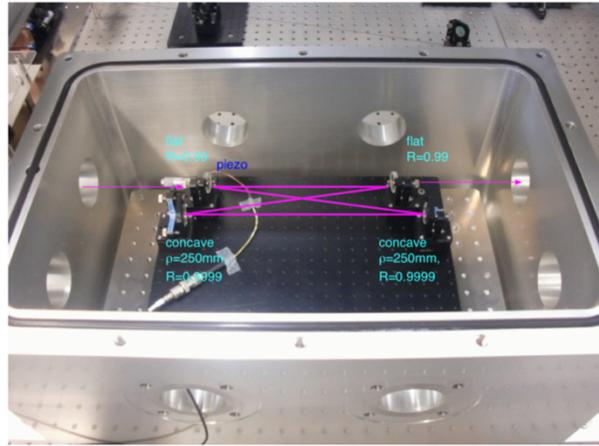


図4: 共振器と真空チェンバのセットアップ

ミラーを駆動するピエゾアクチュエータと温度計を設置し、これらはフィードスルーを介して真空外から扱えるようにしている。

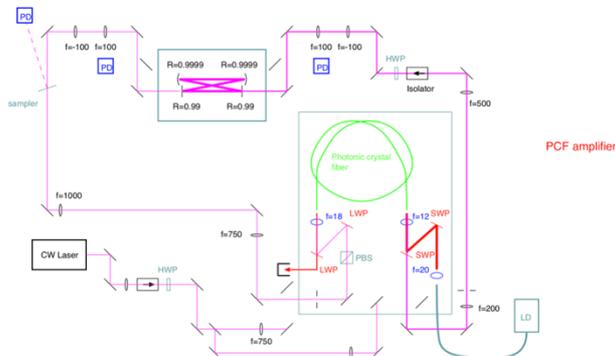


図5: システム全体のセットアップ

光学システム全体のセットアップのスキームと写真を図5に示す。高ゲインで大強度まで増幅できる特徴をもつ、Yb 添加フォトニック結晶ファイバを光増幅器として使用した。励起光は 50 W のレーザーダイオードを用い、フォトニック結晶ファイバの出力端から導入した。励起光と信号光はダイクロイックミラーで分離するものとなっている。

以前に低出力で原理試験をした際には、共振器を含めてレーザー系は全て大気中での試験であり、増幅器はシングルモードファイバで、全てコネクタ接続のファイバ部品で構成していた(図6)。本研究では、これらの両方を更新したものになっている。

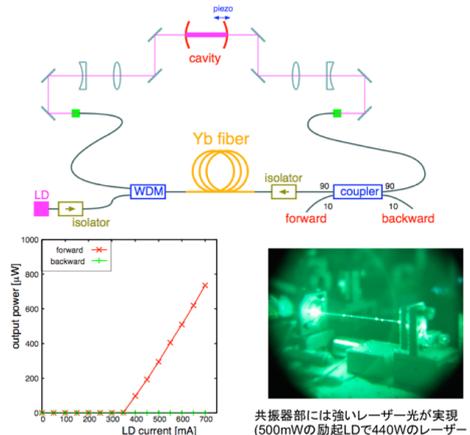
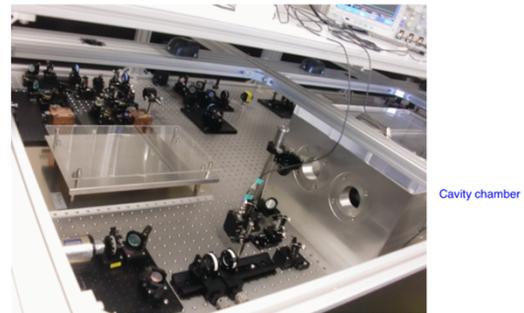


図6: 以前の低出力原理試験のセットアップ

共振器部には強いレーザー光が実現 (500mWの励起LDで440Wのレーザー)

#### 4. 研究成果

自発共鳴を確立するには、周回での損失を増幅が上回らなければならない。光路のアライメントにずれがあると、共振器への入力モード不整合や、ファイバ増幅器への入力モード不整合になり、簡単に大きな損失を生じてしまう。低出力試験で確立していた、調整用のシングルモード外部レーザーを用いた、順方向および逆方向からのマッチング手法の手順により、今回のセットアップでも確実にアライメントを確立できることを実証した。

アライメント調整の後、系の周回を閉じ、フォトニック結晶ファイバ増幅器の励起レーザーダイオードの出力を上げていくと、ある時点から系の周回パワーが導入した励起パワーに線形にตอบสนองして増加する現象が確認された(図7左)。系の周回は、すなわち共振器を通過しているということであるから、共振器の内部に光が蓄積された状態ということである。共振器ミラーの透過率を仮定して換算すると、内部パワーを評価できる。共振器内部パワーが励起パワーを上回っていることから、自発共鳴し、強度増大していることが確認できたことになる。また、制御することなく、一定の周回光強度が安定に実現している(図7右)。これは自発共鳴の特長である。

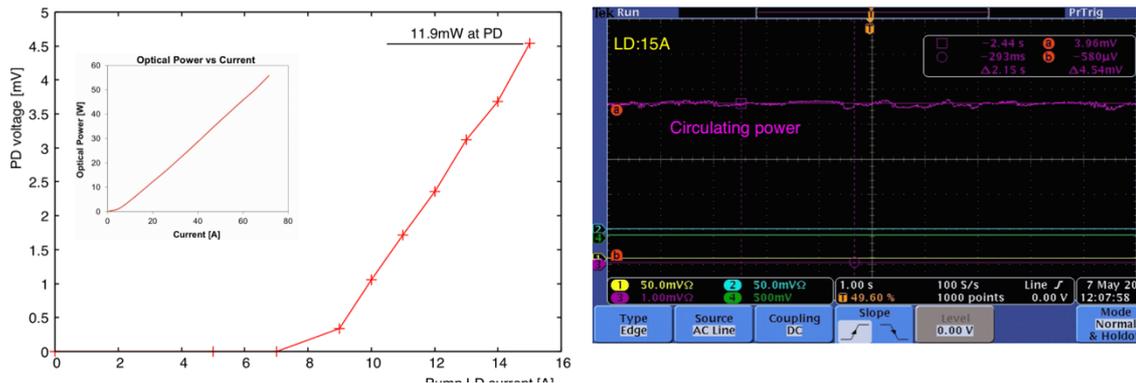


図7: 自発共鳴の実験結果

本研究では、将来の自発共鳴型蓄積共振器の実用に向けて、大強度動作で必須となるステップである、真空チェンバシステムと組み合わせた構成、大強度増幅が可能なフォトニック結晶ファイバ増幅器を採用した構成、での動作が実証された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 本田洋介
2. 発表標題 ビーム冷却用の大強度レーザーにむけた自発共振器の開発
3. 学会等名 日本加速器学会年会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------