

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年5月9日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17542

研究課題名（和文）高出力レーザー蓄積リングの開発

研究課題名（英文）Development of High Power Laser Storage Ring

研究代表者

原田 寛之（Harada, Hiroyuki）

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 J-PARCセンター・副主任研究員

研究者番号：30601174

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：大強度の陽子ビームを標的に照射し生成される中性子、ミュオン、ニュートリノビームなどを用いた最先端の実験研究が世界中で行われている。実験の精度や信頼度は統計量に大きく依存するため、21世紀に入り陽子加速器のさらなる大強度化が要求されている。陽子ビームは炭素膜を用いた荷電変換入射と呼ばれる手法で大強度ビームとして蓄積されるが、膜の損傷や放射化がさらなる大強度化を制限してきた。そのため、膜に代わるレーザーを用いた荷電変換手法を考案し、その基盤となるレーザー蓄積リングの開発が本研究の目的である。一度照射したレーザーを再利用するリングを開発し実証した。今後、実用化に向け、さらなる高出力化を目指す。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、レーザー蓄積リングの開発を目指した。この成果は世界初となるレーザー荷電変換入射技術の開発基盤となるものである。まだ開発段階ではあるが、開発後は陽子加速器のさらなる大強度化への制限を取り除くことができる。大強度陽子ビームは、新たな燃料電池開発や新薬開発などの応用研究、さらに宇宙や物質・質量の起源を探る学術研究のさらなる発展へと繋がり、わが国が誇る科学技術の一つとなり得る。

研究成果の概要（英文）：Neutron, muon and neutrino beams produced by high-intensity proton beam are used to experimental research of front line in the world. The resolution and confidence degree are depend on the statics of the experimental data, the proton accelerator is required for more high intensity in 21st century. The proton beam is accumulated by using carbon foil charge exchange injection. However, the damage and residual dose of the foil are limited to more high intensity. So, a new charge exchange injection by using laser only is invented and our goal is to develop a laser storage ring, which becomes an underlying technics for the injection scheme. We demonstrated the ring. As the next step, we make it a goal for a high power of the ring.

研究分野：量子ビーム科学

キーワード：大強度陽子加速器 レーザー荷電変換 レーザー蓄積

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) 世界における加速器を用いた科学実験の一つとして、大強度陽子ビームの標的照射後に生成された2次粒子(中性子、ミューオン、ニュートリノなど)を用いた実験があり、MW級の大強度陽子加速器が計画・建設・稼働中である。高精度な最先端実験のために、陽子加速器のさらなる大強度化に向けた国際競争が激化している。

(2) 世界の大強度陽子加速器では、線形加速器で加速された負水素イオンの2つの電子を円形加速器の入射点に設置された“荷電変換用炭素膜”にて剥ぎ取り、陽子へと変換しながら周回する陽子ビームに多周回にわたり重ねて入射することで、大強度陽子ビームを形成している。この入射手法は、大強度の陽子ビームを生成できる反面、周回する陽子ビームが膜への衝突を繰り返すことで、大角度に散乱された粒子による制御不能なビーム損失が原理的に発生する。加えて、ビームの衝突による膜へのエネルギー付加のため、大強度ビーム出力時には熱や衝撃による膜の破壊が生じる。そのため、大強度陽子ビームの出力や運転効率は、ビーム損失による残留線量や膜の寿命によって厳しく制限される。さらなる大強度出力には炭素膜を用いた荷電変換入射に代わる新たな入射手法が必須となる。

(3) 1990年代に“レーザーによる電子励起”と“強磁場による電子剥離”を組み合わせた“レーザー補助荷電変換入射”が考案され、実証実験が米国ブルックヘブン国立研究所などで行われてきた。現在、米国オークリッジ国立研究所の核破砕中性子源施設(SNS)の線形加速器のビームラインにおいて、実証実験が行われている。現在までに90%以上の荷電変換効率に成功している。しかしながら、入射システムとして実現するには、“大口径磁石による強磁場 1.2T”、“強磁場 1.2T”を用いたビーム入射システムのビーム力学的課題”、そして“高繰り返しと長パルス化による数百倍以上のレーザー出力”が大きな課題となる。特に2桁以上高いレーザーの平均出力の増強は困難を極める。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、強磁場による電子剥離に替わり、高出力レーザーによる電子剥離を行う“レーザー荷電変換入射”を新たに考案し研究開発を進めており、このレーザー荷電変換入射に必須となるレーザーの高繰り返し化に向けた、“高出力レーザー蓄積リングの開発”を目指す。

(2) 本研究開発で得た知見や技術を活用し、“レーザー荷電変換入射”の実証ならびに実用化に繋げ、大強度陽子加速器における世界基準としての基盤技術を我が国からの発信へと繋げる。

3. 研究の方法

(1) 本研究で開発を目指す“高出力レーザー蓄積リング”の概要を図1に示す。

(2) 対角線上に収束レンズと反射を兼ね備えたトロイダルミラー2枚と、反対の対角線上にレーザー入射用のビームスプリッターミラー(透過率~1%)と全反射平面ミラーを配置する。これを“レーザー蓄積リング”と呼ぶ。リングの光路長で繰り返しを可変にできる(例、300 mmで約1 GHz)。このリングでは、焦点で一度利用したレーザーを周回させ、再利用することが可能となる。この蓄積リングを開発し、実証する。

(3) 開発・実証したこのレーザー蓄積リング内で周回するレーザーは、ミラーの反射率や透過率などにより周回毎に出力が減少していく。そこで、リング内にレーザー増幅器を挿入し出力を増幅し補うことにより、高繰り返しで高出力の“高出力レーザー蓄積リング”を実証する。

4. 研究成果

(1) レーザー入射用のビームスプリッターミラー1枚、周回用の全反射平面ミラー1枚、収束レンズと反射を兼ね備えたトロイダルミラー2枚を製作し、光学定盤上に光路長 2400 mm(周回時間: 8 ns)となるように4枚のミラーを設置し、Nd:YAGレーザー用(波長: 1064 nm)のレーザー蓄積リングの開発を行った。レーザー光源からの入射光軸調整、リング内の周回の光軸調整を行い、レーザーが多周回蓄積するレーザー蓄積リングの実証実験を行った。リング内のレーザーの一部が、ミラー毎で透過することに着目し、リング内の1か所のミラー背面に光検出

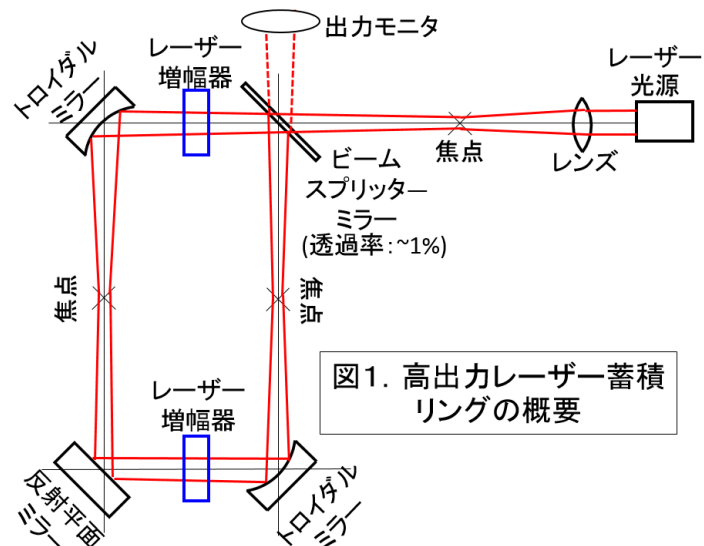


図1. 高出力レーザー蓄積リングの概要

器を設置し、リング内のレーザーの状態を計測した。その結果を図2に示す。図2の左図は、1周回のみさせた時の実測結果であり、右図は多周回させた時の実測結果である。その結果、多周回させることでレーザーが時間的に重なり、強度が約120倍、時間が約2倍、増加した。周回するレーザー強度が徐々に減少しており、これはミラーの反射率の合算である96%を考慮した計算結果と解析結果が一致している。これにより、レーザー蓄積リングを実証した。

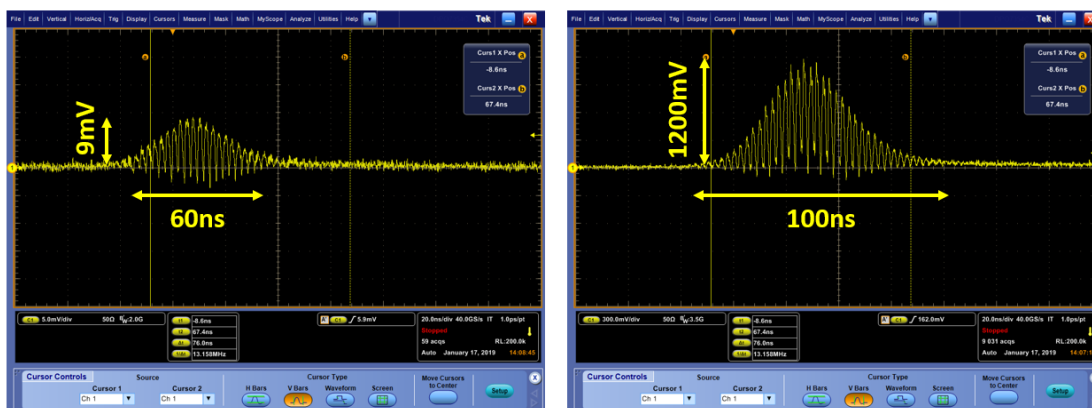


図2. レーザー蓄積リングの実証に向けた光検出器による実測結果
左図：1周回時の実測結果，右図：多周回時の実測結果

(2) レーザー蓄積リング内で周回するレーザーは、ミラーの反射率や透過率などにより周回毎に出力が減少していく。そこで、リング内にレーザー増幅器を挿入し出力を増幅し補うことを目指した。リング内にレーザー増幅器としてNd:YAGのランプを挿入し励起した所、レーザー光源本体が不安定となり、動作不良となった。検証の結果、増幅器から発振される光がリング内を逆方向に周回し、レーザー光源側へ戻ることにより、光源の不安定化が生じることが判明した。偏光子や波長板をレーザー入射光軸上に設置し、レーザー光の逆流を防ぐことが重要だと判明した。

(3) 研究期間内では、当初の目標の一部を達成できなかったが、今後に繋がる成果や検証結果を得ることができた。期間後の開発を継続して行っていく。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計8件)

- ① P.K. Saha, H. Harada, et al., Status of Proof-of-Principle Demonstration of 400 MeV H-Stripping to Proton by Using Only Lasers at J-PARC, Proceedings of the 61st ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High-Intensity and High-Brightness Hadron Beams (HB2018, 国際会議)、査読無、招待講演、2018、422-427
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/hb2018/papers/thp1wc02.pdf>
- ② サハ プラナブ、原田 寛之、他、J-PARC 3GeV シンクロトロンにおけるレーザー荷電変換入射実現に向けた原理検証実験の進捗状況、Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2018)、査読無、2018、806-810
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2018/proceedings/PDF/THP0/THP016.pdf
- ③ 原田 寛之、サハ プラナブ、他、レーザー荷電変換入射の原理実証実験に向けたレーザーシステムの開発、Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2018)、査読無、2018、811-815
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2018/proceedings/PDF/THP0/THP017.pdf
- ④ サハ プラナブ、原田 寛之、他、J-PARC 3GeV シンクロトロンにおけるレーザー荷電変換入射実現に向けた原理検証実験の現状、Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2017)、査読無、2017、866-870
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2017/proceedings/PDF/WEP0/WEP024.pdf
- ⑤ 原田 寛之、サハ プラナブ、他、レーザー荷電変換入射実現に向けた高出力レーザー蓄積リング、Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2017)、査読無、2017、684-688
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2017/proceedings/PDF/TUP1/TUP117.pdf
- ⑥ P.K. Saha, H. Harada, et al., Proceedings of the 60th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High-Intensity and High-Brightness Hadron Beams (HB2016, 国際会議)、査読無、招待講演、2016、310-314
<http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/hb2016/papers/tupm7x01.pdf>
- ⑦ 山根功、原田 寛之、他、J-PARC RCS のレーザー荷電変換入射の可能性、加速器学会誌「加速器」、13巻、2号、2016、80-90
<https://www.pasj.jp/kaishi/cgi-bin/kasokuki.cgi?articles%2F13%2Fp80-90.pdf>

- ⑧ 原田 寛之、サハ プラナブ、他、レーザー荷電変換入射実現に向けた高出力レーザー蓄積リングの開発、Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2016)、査読無、2016、983-986
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2016/proceedings/PDF/TUP0/TUP051.pdf

[学会発表] (計 2 件)

- ① 原田 寛之、他、数 MW 級の大強度陽子加速器に必須なレーザー荷電変換入射に向けた高出力レーザー蓄積リングの開発、日本物理学会第 72 回年次大会、2017
② 原田 寛之、次世代大強度陽子加速器に向けたレーザー荷電変換入射、ビーム物理研究会 2017、2017

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：サハ プラナブ

ローマ字氏名：(SAHA, Pranab Kumar)

研究協力者氏名：米田 仁紀

ローマ字氏名：(YONEDA, Hitoki)

研究協力者氏名：井上 峻介

ローマ字氏名：(INOUE, Shunsuke)

研究協力者氏名：山根 功

ローマ字氏名：(YAMANE, Isao)

研究協力者氏名：道根 百合奈

ローマ字氏名：(MICHINE, Yurina)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。