

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 1 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K11928

研究課題名(和文) 極短パルス核破砕中性子源を目指したレーザー荷電変換による陽子ビーム制御の開発

研究課題名(英文) Development of the proton beam control technology by the laser charge exchange for the ultrashort pulse spallation neutron source

研究代表者

武井 早憲 (Takei, Hayanori)

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・研究主幹

研究者番号：20414609

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：周回している高出力レーザー光を負水素イオンビームに照射し、周回数に応じた時間構造を持つ陽子ビームを取り出すことを目指し、その第一段階として、高出力レーザー光源と光周回リングを組み合わせたレーザー光学系を開発する。今回、空気中を周回するレーザー光路中にビューポート付真空容器及び集束用凸レンズを置き、レーザー光の位置を精度良く制御しながら、レーザー光の位置などのデータを取得するとともに、ビューポートが高出力レーザー光によって長時間損傷しないことを確認した。この結果、所定の性能を有するレーザー光学系を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高出力レーザー光源と光周回リングを組み合わせたレーザー光学系を開発することにより、中性子を利用するユーザーのニーズに応じて、パルス核破砕中性子源から発生するパルス中性子の条件を変更することが可能となる。これは、ビーム診断に用いられたレーザー荷電変換技術を応用したもので、新たな陽子ビーム制御技術の開発に繋がる。さらに、大強度陽子ビームから様々な陽子ビームを取り出すことも可能となり、陽子ビームの利用を広めるものである。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to collide the circulating high-power laser light with the negative hydrogen ion beam and extract the proton beam with the time structure according to the circulating number. For the first step, we develop the laser optical system that combines the high-power laser source and the optical orbiting ring. The vacuum vessel with viewports and convex lens for focusing were installed in the circulating laser optical path through the air at this time. Then, we obtained the data such as positions of the laser light under controlling its position with the high accuracy, and confirmed that the no damage was found with the high-power laser light for a long time. As a result, we have developed the laser optical system with a predetermined performance.

研究分野：量子ビーム科学

キーワード：パルス核破砕中性子源 高出力レーザー 光周回リング レーザー荷電変換

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

パルス核破碎中性子源から発生するパルス中性子の仕様は、核破碎ターゲットに入射する陽子ビームの条件によってほぼ決まってしまうため、陽子ビームを加速するビームラインを設置した後から利用者のニーズに応じて陽子ビームの条件を変更することは困難である。

ところで、レーザー荷電変換技術を利用して負水素イオンビームのプロファイルを測定するビーム診断が行われているが、このレーザー荷電変換技術を応用して大強度負水素イオンビームから微小出力陽子ビームを切り出すことも可能である。特に、レーザー荷電変換で切り出された陽子ビームの条件は、レーザー光の条件に応じて変えられるため、利用者のニーズに応じて陽子ビームの条件を変更できる。例えば、極短パルス核破碎中性子源用の陽子ビームの条件として、パルス時間幅が短く(1 ns 以下)、高繰り返し数(1 MHz 程度 ~ 100 MHz 程度)で、可変なことが考えられる。

また、レーザー光を周回させ、ビーム診断やレーザー荷電変換を行うことは、日本や米国などでいくつか提案されているが、使用するレーザーの出力は高々1 W 程度であり、レーザー光を光ファイバーで伝播させている。しかし、大強度負水素イオンビームから微小出力陽子ビームを切り出すには、高出力のレーザー光(基本波長 1064 nm、出力 20 ~ 40 W)を用いるため、光ファイバーを用いることができず、空気中、真空中及び真空を隔てるビューポートを伝播させる必要がある。このため、伝播する媒質が異なる光周回リングを構築し、レーザー光の位置を精度良く制御した前例はほとんど無かった。

さらに、ミラー、ビューポートなどの光学部品が高出力レーザー光によって長時間損傷しないことが重要であるが、そのデータは不十分であった。

### 2. 研究の目的

周回している高出力レーザー光を負水素イオンビームに照射し、周回数等に応じた時間構造を持つ陽子ビームを切り出すことを目指し、その第一段階として、高出力レーザー光源と光周回リングを組み合わせたレーザー光学系を開発する。すなわち、周回したレーザー光によるレーザー荷電変換を模擬するため、空気中を周回するレーザー光路中にビューポート付真空容器及び集束用凸レンズを置き、レーザー光の位置を精度良く制御しながら、レーザー光の位置精度などの基礎データを取得する。そして、ミラー、ビューポートなどの光学部品が高出力レーザー光によって長時間損傷しないことを確認する。さらに、長時間のレーザー照射試験から、高出力レーザー光源と光周回リングを組み合わせたレーザー光学系を開発するための知見等をまとめる。

### 3. 研究の方法

(1) 既設の高出力レーザー光源(基本波長 1064 nm、パルス繰り返し数 25 Hz、1 パルス当たりのエネルギー 1.6 J、パルス時間幅 4.8 ns)及び光周回リング(光路長 1.2 m、周回時間 4 ns 即ち 0.25 GHz)が設置された除振台付き遮光ボックス内に、新たに集束用凸レンズ(2 個)を置き、レーザー光を集束・発散を繰り返しながら周回できるように、レーザー光路を設計する(図 1 参照)。このとき、集束したレーザー光の直径を 2.5 mm (FWHM)とする。この直径は(標準偏差)が 1.1 mm の正規分布に相当する。この直径のレーザー光を用いて、出力 250 kW の負水素イオンビーム(ビームエネルギー 400 MeV)から出力 3 W の陽子ビームを切り出すことができる。

(2) 図 1 は、ポラライザ、 $\lambda/2$  波長板、ミラーを組み合わせた光周回リングの模式図である。この光周回リングでは、 $\lambda/2$  波長板を用いてレーザー光の振動面を回転させ、4 回周回させている。特に、4 回周回した後のレーザー光がレーザー光源へ戻り、機器を損傷させることを防ぐため、戻り光がポラライザを避けるように光路を設定する。

(3) 低出力レーザー光を光周回リング内に周回させ、レーザー光の位置、エネルギーを測定しながら、

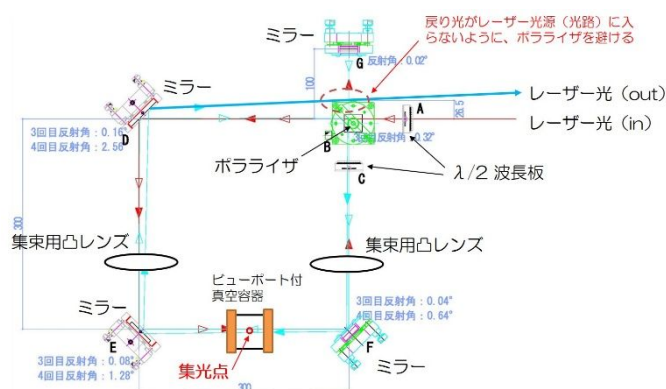


図 1 光周回リングの模式図

レーザー光の位置精度が既に達成した位置精度 ( $\pm 50 \mu\text{m}$  程度)と同程度となるように光学部品を調整する。この調整において、レーザー光の状態を測定する計測器及びレーザー光の位置を自動制御する自動光路調整ユニットは、既設を利用する。

(4) 波長 1064 nm のレーザー光に対する耐力 (レーザー耐力) が  $10 \text{ J/cm}^2$  及び  $140 \text{ J/cm}^2$  のビューポートを光周回リングに設置し、前者のビューポートに対して出力 2 W (1 パルス当たりのエネルギー 80 mJ)、後者に対して出力 20 W (1 パルス当たりのエネルギー 0.8 J) のレーザー光を入射させる照射試験を実施し、レーザー光の位置精度、ビューポート損傷の有無を確認する。照射試験の試験時間として、高出力レーザー光源のフラッシュランプの寿命 (連続発振で 333 時間) と J-PARC リニアックの運転サイクルを考え、通算 7 日間 (168 時間) とする。

#### 4. 研究成果

(1) 光周回リングにおいて、直径 9 mm (FWHM) のレーザー光を 1 枚目の集束用凸レンズで直径 2.5 mm に集束させ、2 枚目の集束用凸レンズで元の直径に戻すため、凸レンズの焦点距離 (集光長) 及びレーザービーム品質  $M^2$  を変化させながら、スポット径を計算した。その結果、表 1 に示すように、集光長が 300 mm ~ 1000 mm の範囲でスポット径が 2.5 mm となることが分かった。光周回リングの一边が 30 cm であることを考慮し、焦点距離 500 mm の凸レンズを選定した。

表 1 集光長とスポット径の関係

波長 $\lambda$ [ $\mu\text{m}$ ]	入射径 D [mm]	集光長 f [mm]	$M^2$	スポット径 (理論限界) d [mm]	スポット径 w [mm]	拡がり角 (全角) $\theta$ [mrad]	$\sqrt{2} \times S$ 焦点深度 b [mm]
1.064	9	1000	16.61	0.1505	2.5000	2.50	555.56
1.064	9	700	23.73	0.1054	2.5000	3.57	388.88
1.064	9	500	33.22	0.0753	2.5000	5.00	277.78
1.064	9	300	55.36	0.0452	2.5000	8.33	166.66

(2) 波長 1064 nm のレーザー光に、レーザー位置制御用の波長 632 nm のレーザー光を一致させ、そのレーザー光を用いてレーザー光の位置精度が  $\pm 50 \mu\text{m}$  程度となるように光学部品を調整した。当初、光周回リング内に置いたミラー (サンプラー) からの反射光により、レーザー光の位置や形状を測定する予定であった。しかし、サンプラーによりレーザー光路が乱されるため、光周回リングから出射した後のレーザー光で測定した。図 2 は低出力の波長 1064 nm のレーザー光と波長 632 nm のレーザー光の断面を表している。両者が良く一致していることが分かる。ところで、通算 7 日間の調整期間中、外気温などの変化でレーザー光の位置が多少変動することがあった。この位置変動でもレーザー光の周回に支障が生じないように直径 2 インチの凸レンズに変更するなどの工夫を施した。

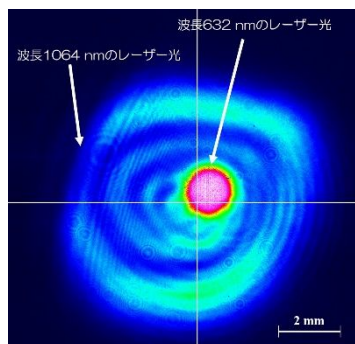


図 2 レーザー光の断面

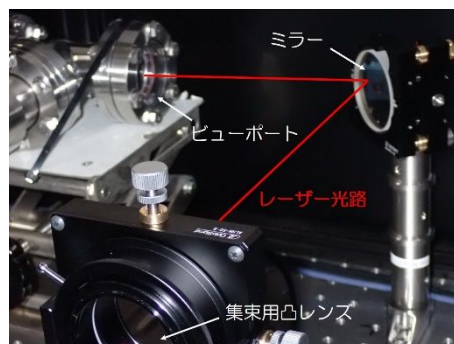


図 3 光周回リング中のビューポート

(3) まず初めに、レーザー耐力が  $10 \text{ J/cm}^2$  のビューポートを設置した光周回リングに 1 パルス当たりのエネルギー 80 mJ のレーザー光を入射させ、次に、レーザー耐力が  $140 \text{ J/cm}^2$  のビューポートを設置した光周回リングに 1 パルス当たりのエネルギー 0.8 J のレーザー光を入射させる長時間の照射試験を実施した。図 3 は光周回リングにビューポートを設置した状況を表している。図 4 は光周回リングから出射した後のレーザー光の断面を表しており、青色から赤色になるほど、レーザー光の出力密度が高くなる。図よりレーザー光の直径は 7 ~ 8 mm であり、集束した後のスポット径は 1.9 ~ 2.2 mm になると推測される。従って、集束した時のレーザー光の断面積は 80 mJ の場合  $0.0296 \text{ cm}^2$ 、0.8 J の場合  $0.0359 \text{ cm}^2$  である。また、周回数が 4 回の光周回リングを用いているため、レーザー光源からの 1 パルスのレーザー光は 12 ns の時間内に 4 回ビューポートを通過する。このため、単位面積当たりの出力は、80 mJ の場合  $10.9 \text{ J/cm}^2$ 、0.8 J の場合  $89.6 \text{ J/cm}^2$  となる。図 5 及び図 6 は、照射試験中のレーザー光の重心位置及びエネルギーの変動を表している。図より、レーザー光の位置精度が  $\pm 50 \mu\text{m}$ 、エネルギーの変化が 4% 以下となっていることが分かる。



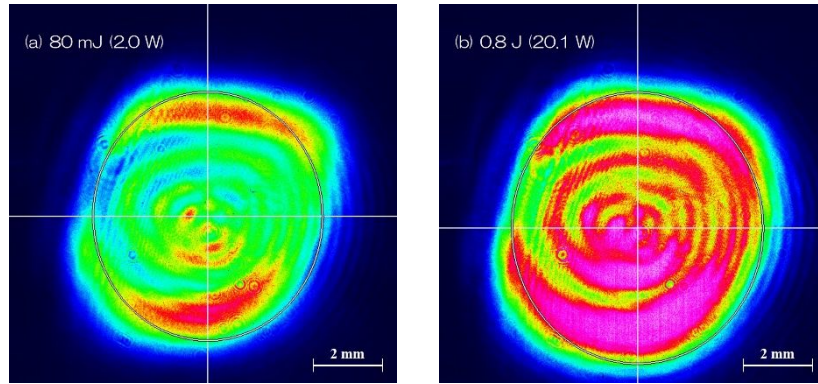


図 4 光周回リングから出射した後のレーザー光の断面

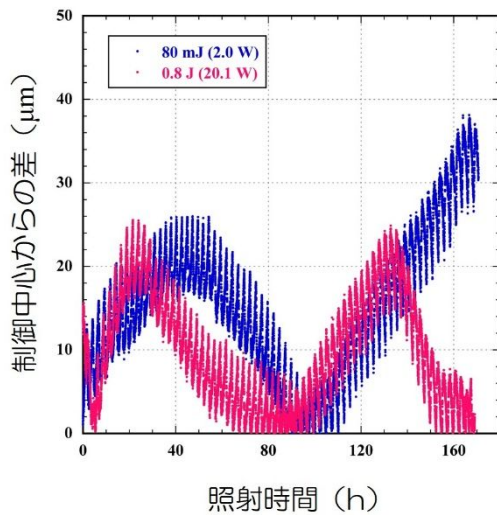


図 5 重心位置の変化

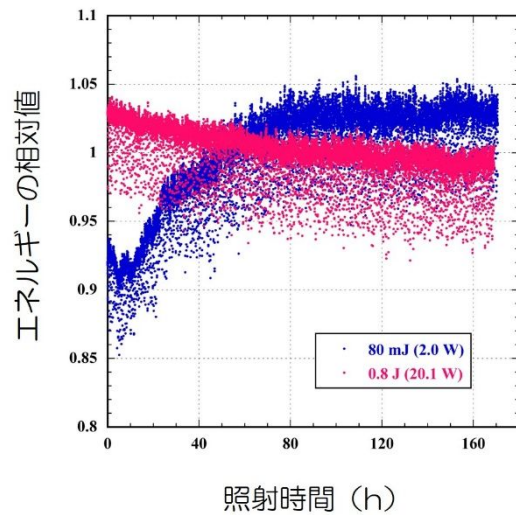


図 6 エネルギーの変化

(4) レーザー耐力は、決められた時間幅の 1 パルス (ショット) のレーザー光に対しての損傷閾値を表している。今回使用したビューポートの場合、時間幅は 10 ns である。この時間を超えたレーザーパルスに対して、レーザー耐力の変化を示すデータは無かったが、レーザー光で発生した熱の蓄積によりレーザー耐力が低下する恐れがあった。また、照射時間が数百時間になった場合のレーザー耐力の変化についてもデータが無かった。今回、通算 7 日間 (168 時間) 以上の照射試験を行った結果、ビューポートに損傷は認められなかった (図 7)。従って、繰り返し数が 0.25 GHz、単位面積当たり 89.6 J/cm<sup>2</sup> のレーザー光の周回に対して、ビューポートは問題が無いことが分かり、所定の性能を有するレーザー光学系を開発できた。

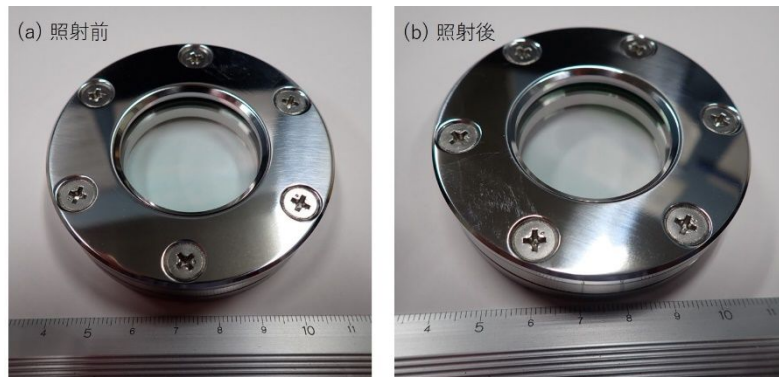


図 7 照射試験前後のビューポート (レーザー耐力 140 J/cm<sup>2</sup>)

(5) 今回の研究において得られた知見などを以下にまとめる。  
 レーザー耐力は光学部品が損傷を起こす閾値を表しているが、光学部品が置かれた状況 (例えば、放射線環境下) に対してレーザー耐力の低下を示すデータは無かった。今回使用したピュ

ーポートでは、基板上に誘電体多層膜を成膜し、高いレーザー耐力を得ている。この誘電体多層膜が放射線によってどのような損傷を受け、レーザー耐力が低下することについては未だ不明である。今後、この研究を進めるためにも、放射線環境下でのレーザー耐力の変化に関するデータを取得する必要がある。

周回しているレーザー光の状態を測定する方法について検討する必要がある。通常、サンブラーによる反射光やミラーからの透過光を用いて測定を行っている。しかし、この方法では集束点での状態を測定することは困難である。今回、集束点でスパーク（光絶縁破壊プラズマ）が生じることがあった。このスパークはレーザー光が集束していることを示しているが、測定器が無いためどのような状態になっているのか不明であった。今後、レーザー荷電変換効率を検討するためにも、非接触で周回中のレーザー光の状態を測定する必要がある。

万一ビューポートが損傷した場合、レーザー光が入射光と同じ方向に戻り、レーザー光源へ入射し、機器を損傷させる恐れがある。今回、ビューポートは損傷しなかったため、戻り光の影響を考慮する必要が無かった。今後、この研究を安全に進めるためには、光周回リングの上流側に戻り光を遮るファラデーアイソレーターを設置する必要がある。

多くの光学部品を用いた光周回リングでは、多くの透過光、散乱光、反射光が生じる。特に今回の場合、レーザー光が不可視であるため、レーザー光路を調整中に予期しないレーザー光が生じていないか、レーザー光を可視化する赤外線 IR ビューアで確認を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔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
---------	---------