レーザー駆動中性子源の特徴

森 芳孝¹, 安部 勇輝², 田中 浩基³, 花山 良平¹, 鬼柳 善明⁴, 長友 英夫², 砂原 淳⁵

¹光産業創成大学院大学(〒431-1202 静岡県浜松市西区呉松町1955-1)

²大阪大学 レーザー科学研究所(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-6)

³京都大学 複合原子力科学研究所(〒590-0494 大阪府泉南郡熊取町朝代西2)

⁴名古屋大学 工学研究科(〒464-8602 愛知県名古屋市千種区不老町)

⁵パデュー大学 極限環境物質センター(500 Centra Dr. West Lafayette, Indiana, 47907)

Characteristics of Laser-Driven Neutron Sources

Yoshitaka MORI,¹ Yuki ABE,² Hiroki TANAKA,³ Ryohei HANAYAMA,¹

Yoshiaki KIYANAGI,⁴ Hideo NAGATOMO,² and Atsushi SUNAHARA⁵

¹The Graduate School for the Creation of New Photonics Industries, 1955-1 Kurematsu-cho, Nishi-ku, Hamamatsu, Shizuoka 431-1202

²Institute of Laser Engineering, Osaka University, 2-6 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871

³Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto University, 2 Asashiro-Nishi, Kumatori-cho, Sennan-gun, Osaka 590-0494

⁴Graduate School of Engineering, Nagoya University, Furocho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8602

⁵Center for Materials Under Extreme Environment (CMUXE), Purdue University, 500 Central Dr. West Lafayette, Indiana, 47907

(Received June 18, 2018)

Laser-driven neutron sources offer a unique characteristic as a brightness neutron source because they provide a short pulse duration (less than ns) in time and a small spot size (a few mm²) in space at the source point. The peak flux per driver energy reaches 10¹⁷ n/cm²/s/J, which is 1,000 times higher than that achieved by an accelerator-driven source. We compared the characteristics of a laser-driven neutron source with those achieved by an accelerator-driven source by focusing on the amount of neutron production numbers on the source as a function of driver energy. We also present the technological status or perspective of laser-driven neutron sources in order to achieve an average production rate 10¹¹ n/sr/sec that obtained by a compact accelerator-driven neutron source.

Key Words: Laser driven neutron sources, Accelerator driven neutron source, High-power laser, Ultra-intense laser

1. はじめに

超高強度レーザーによるレーザー駆動量子ビーム発生は、電子加速¹⁾、イオン加速²⁾、及び中性子発生^{3,4)}等に展開されてきた。レーザー駆動量子ビームの研究は、2000年代初頭の「原理実証」を経て、最近は、「応用展開」を意識している。レーザー駆動量子ビームを、学術あるいは産業分野へ展開していくためには、既存ないし既設量子ビーム源との共創が望ましい。

量子ビームの一種である中性子線は、高い透過力や軽元素の識別能力などの特徴を有するため、産業利用の分野等における分析・解析ツールとしての検討がなされている。レーザー駆動中性子源は、既存の加速器駆動と比べ、短パルス(1 ns以下)、点光源(10 mm以下)の特徴を有する。その結果、中性子発生点におけるピークフラックスで比較すると、レーザー中性子源の特性が際立つ。一方、平均中性子発生率は、加速器駆動と比べ3桁以上

低い。その克服には、高平均パルスレーザードライバ開発が必要である。

本解説では、コンパクト中性子源として期待される2つの方式：加速器駆動型、及びレーザー駆動型を比較し、レーザー駆動型の特徴を明らかにする。また、レーザー駆動型中性子源を構成する要素技術の現状について紹介する。

2. 加速器駆動型とレーザー駆動型の中性子源比較

レーザー駆動中性子源は、加速器駆動と比べ、短パルス(1 ns以下)、点光源(10 mm以下)の特徴を有する。Fig. 1 にレーザー駆動及び加速器駆動中性子源の比較を示す。レーザー駆動型では、まず、レーザー光を照射ターゲットへ集光し、ターゲットをプラズマ化する。その結果、レーザー照射領域に、局所瞬間的に高エネルギー密度状態が形成され、電子、ガンマ線、イオン、中

	Laser-driven	Accelerator-driven
Pulse duration	< ns	~ μ s
Source size	0.1~10 mm	~10 cm
Generation efficiency	~ 10^{4-8} n/sr/J	~ 10^8 n/sr/J
Peak flux	> 10^{17} n/cm ² /sec/J	~ 10^{14} n/cm ² /sec/J
Repetition	Single shot, < 1 Hz	Single Shot, 20-200 Hz
Configuration at the source

Fig. 1 Specifications of pulse neutron source for laser driven and accelerator driven.

性子などの量子ビームが発生する。特に、パルス幅が数ピコ秒以下の超高強度レーザーを用いる場合は、照射ターゲットからエネルギーMeV級の荷電粒子ビームが発生する⁵⁾。これら荷電粒子ビームを、レーザー伝搬軸後方に設置した中性子発生ターゲットへ当てることで中性子が発生する。この方式を、照射ターゲットをピッチャー、中性子発生ターゲットをキャッチャーになぞらえ、ピッチャーキャッチャー方式と呼ぶ。荷電粒子発生において、レーザー照射強度を極限まで引き上げ、レーザー光と物質との非線形な相対論効果を励起することで、荷電粒子の高エネルギー化及び発生量の向上が試みられている⁶⁾。ピッチャーキャッチャー方式によるレーザー駆動中性子発生は、余語らにより解説される⁷⁾。

一方、加速器駆動型では、線形加速器などで加速された荷電粒子を、中性子発生ターゲットへ入射し、核反応により中性子が発生させる。荷電粒子のエネルギーは加速器の性能で決定され、中性子発生に対して、核反応断面積を考慮した中性子発生ターゲット厚み等の最適化が行われる。中性子発生量は、荷電粒子の電荷数に線形的に比例する。荷電粒子のビーム径は、加速ビームの空間電荷効果による制限を受ける。

加速器駆動型およびレーザー駆動型において、荷電粒

子エネルギー及びレーザーパルスエネルギーをドライバーエネルギーと定め、性能比較をおこなった。加速器駆動中性子源は、大型陽子加速器J-PARC核破砕中性子源⁸⁻¹³⁾、理研の小型陽子加速器中性子源RANS¹⁵⁾、及び北大の電子加速器中性子源HUNS¹⁶⁻¹⁸⁾を取り上げた。

Table 1に、各々の加速器駆動中性子源の荷電粒子ドライバ及び発生中性子性能をまとめた。尚、HUNSについては、現在ハイパワー化のためのリプレースを行っており、2018年中には新加速器の運転が行われる予定である。レーザー駆動型においては、フェムト秒チタンサファイアレーザー¹⁹⁻²³⁾、サブピコ及びピコ秒ガラスレーザー²⁴⁻³⁰⁾を用いたビーム核融合反応等による中性子発生、及び、ナノ秒ガラスレーザー³¹⁻³³⁾を用いた熱核融合による中性子発生を取り上げた。Table 2に、代表的なレーザー駆動中性子源のレーザードライバ及び発生中性子性能をまとめた。尚、米国国立点火施設(National Ignition Facility: NIF)について、最近、世界最高値の核融合発生中性子数 1.9×10^{16} n/pulseが報告され、研究開発が進展している³⁴⁾。Fig. 2に、ドライバーエネルギーに対する(a)パルスあたりの中性子発生量、及び(b)時間平均した際の中性子発生量を示す。中性子発生量は単位立体角当たりとした。加速器駆動については、発生点からの等方散乱を仮定した。中性子を駆動するドライバーエネルギーを統一単位とすることで、両者の特性比較が可能となる。

現状のレーザー駆動中性子源は、加速器駆動型と比較した際、パルス当たりの発生中性子量は同等量が達成されているが、時間平均すると差が顕著となる。例えば、Fig. 2(a)に示す様に、米国国立点火施設(NIF)で得られた中性子発生数は、パルス当たりJ-PARC相当(1×10^{15} n/sr/pulse)が達成されている。このことは、1パルスでのデータ取得が可能な応用であれば、すでにレーザー駆動中性子源は応用可能な中性子量が達成されていることを意味している。一方、Fig. 2(b)より、時間平均で比較すると5桁以上発生量が低下する。

Fig. 2 Neutron yields (a) per pulse and (b) per sec in relation to driver energy.

Table 1 Specification of accelerator-driven-neutron sources.

Facility	J-PARC ⁸⁻¹⁴⁾	RANS ¹⁵⁾	HUNS ¹⁶⁻¹⁸⁾
Accelerated beam parameters			
Charged particle	Proton	Proton	Electron
Average beam power	1 MW	0.7 kW	1.2 kW
Peak beam power	40 GW	54 kW	7.1 MW @3.4 μ s
Particle energy	3 GeV	7 MeV	35 MeV (max. 45 MeV)
Repetition	25 Hz	14–200 Hz	Single–200 Hz
Beam energy per pulse	40 kJ	9.7 J @72.2 Hz 3.5 J @200 Hz	0.25 J @50 Hz, 10 ns 24 J @50 Hz, 3.4 μ s
Average current	333 μ A	100 μ A (max.)	36 μ A @50 Hz, 3.4 μ s
Charge per pulse	13.3 μ C	1.39 μ C @72.2 Hz	0.72 μ C @50 Hz, 3.4 μ s
Pulse duration	1 μ s 0.1 μ s (s-bunch)	8–180 μ s	0.01–3.4 μ s
Duty ratio	0.0025%	< 1.3%	< 0.017%
Beam current per pulse	13.3 A 67 A (s-bunch)	7.7 mA @180 μ s	0.212 A @3.4 μ s 0.75 A @10 ns
Projected area of beam	150 $\times$ 70 mm ²	ϕ 20 mm	ϕ 12 mm
Neutron generation			
Target material	Mercury	Beryllium	Tungsten+Lead+Lead
Size (width $\times$ height, thickness)	500 $\times$ 130 mm ² , 900 mm	ϕ 50 mm, 0.3 mm	W: ϕ 60 mm, 1.5 mm Pb: 67 $\times$ 67 mm ² , 19 + 24 mm
Neutron generation scheme	Spallation	Be(p, n)	Photonuclear reaction: (γ , n)
Neutron parameters at source			
Produced numbers per pulse	5 $\times$ 10 ¹⁵ n/pulse 2.5 $\times$ 10 ¹⁵ n/pulse (s-bunch)	1.4 $\times$ 10 ¹⁰ n/pulse @72 Hz 0.5 $\times$ 10 ¹⁰ n/pulse @200 Hz	3.2 $\times$ 10 ¹⁰ n/pulse @50 Hz
Average production rate	1.3 $\times$ 10 ¹⁷ n/sec	1 $\times$ 10 ¹² n/sec	1.6 $\times$ 10 ¹² n/sec @1 kW
Peak production rate	5 $\times$ 10 ²¹ n/sec 2.5 $\times$ 10 ²² n/sec (s-bunch)	7.8 $\times$ 10 ¹³ n/sec	9.4 $\times$ 10 ¹⁵ n/sec @3.4 μ s 3.3 $\times$ 10 ¹⁶ n/sec @10 ns
Peak flux (estimated)	1.2 $\times$ 10 ¹⁸ n/cm ² /s 6 $\times$ 10 ¹⁸ n/cm ² /s (s-bunch)	1.2 $\times$ 10 ¹³ n/cm ² /s	8.3 $\times$ 10 ¹⁴ n/cm ² /s @3.4 μ s 2.9 $\times$ 10 ¹⁵ n/cm ² /s @10 ns
Accelerator type	Linac + High-rep. synchrotron	Linac	Linac
Facility size	Large-scale user facility	Academic laboratory size	Academic laboratory size

s-bunch: single-bunch, High-rep.: High-repetition

時間平均の発生量が低いのは、レーザードライバーの平均出力が低いためである。加速器駆動と比較すると、パルス当たりのドライバーエネルギーは加速器と同等以上を達成しているが、繰り返し及び平均出力に隔りがある。Fig. 3 に、加速器駆動とレーザー駆動におけるドライバーエネルギーに対するドライバーの繰り返しの関係を示す。RANSを例にあげると、繰り返し72 Hz、陽子エネルギー10 Jで運用されており、平均出力は1 kW程度である。一方、TRIDENTレーザーでは、パルスエネルギー80 J、ショット間隔は1時間で、平均出力は1 W以下である。レーザー駆動中性子発生に用いられたレーザーシステムの大半は、平均出力1 W以下である。

RANS相当の平均中性子発生率(10^{11} n/sr/s)を、レーザー駆動で定常的に実現するためには、レーザースペッ

ク(100 J/100 Hz)を視野にいたれた高平均出力高強度レーザー開発が求められる。Fig. 2(b)より、レーザー駆動で、平均中性子発生率： 10^{11} n/sr/sを定常的に発生させるためには、以下3つの方法が考えられる。第1は、ジュール級フェムト秒レーザー(HERUCULES: 1 J/40 fs/0.1 Hz, 1×10^6 n/sr/sの10 kHz運用である。第2は、100 ジュール級サブピコ秒レーザー(TRIDENT: 80 J/0.6 ps/0.00037 Hz, 1.9×10^6 n/sr/sの20 Hz運用である。第3は、10 キロジュール級ナノ秒レーザー(GXII: 8 kJ/0.75 ns/0.00014 Hz, 1.4×10^7 n/sr/sの1 Hz運用である。それぞれの中性子発生機構は、第1及び第2は、ピッチャーキャッチャー方式によるビーム核融合、第3は、爆縮方式による熱核融合である。ここで、Fig. 2(a)をみると、現時点において、ピッチャーキャッチャー方式に

Table 2 Specification of laser-driven-neutron sources.

Laser system	λ -cube	MAT-SU-1	HERCULES	HAMA	TRI-DENT	TexasPW	GXII	GXII	NIF
Laser spec.									
On-target energy	20 mJ	1.2 J	1.1 J	1.2 J	80 J	90 J	2.4 kJ	8 kJ	1.9 MJ
Pulse duration	35 fs	60 fs	40 fs	104 fs	0.6 ps	0.15 ps	0.1 ns	0.75 ns	20 ns
Peak power	0.6 TW	20 TW	28 TW	12 TW	133 TW	0.6 PW	24 TW	11 TW	425 TW
Focal spot size	1.3 μm	8 μm	1.3 μm	13 μm	4 μm^*	10 μm	200 μm	790 μm	
Intensity (W/cm^2)	3×10^{19}	3×10^{18}	2×10^{21}	4.7×10^{18}	$1 \times 10^{21*}$	$8 \times 10^{20*}$	7.6×10^{16}	1.8×10^{14}	
Repetition	500 Hz	1 Hz	0.1 Hz	1 Hz	1 shot/h	1 shot/h	1 shot/2 h	1 shot/2 h	1 shot/8 h
Neutron gen.									
Target	D ₂ O water	CD nano-ptcl. + CD sheet	CH ₂ foil + LiF blk.	CD beads	CD ₂ foil + Be blk.	CH foil + Cu stack	cone-in CD shell	SiO ₂ caps. w/ DT gas	Hohlraum w/ DT ice
Reaction	D (d, n)	D (d, n)	Li (p, n)	D (d, n)	Be (d, n)	Cu (γ , n)	DD (th.)	DT (th.)	DT (th.)
Neutron spec.									
Prod. numbers (n/sr)	2×10^1	3.6×10^3	1.0×10^7	7.6×10^3	5×10^9	9.5×10^6	1.2×10^6	1.0×10^{11}	7.2×10^{14}
Duration	3 ps*	10 ps*	50 ps*	> 0.1 ns*	0.3 ns*	50 ps	50 ps	< 100 ps	152 ps
Source size	$\phi 10 \mu\text{m}$	$\phi 40 \text{ mm}$ L40 mm*	$\phi 10 \text{ mm}^*$	$\phi 1 \text{ mm}$	$\phi 6 \text{ mm}$ L12 mm	$\phi 26 \text{ mm}$ L18 mm	$\phi 100 \mu\text{m}$	$\phi 200 \mu\text{m}$	$\phi 73 \mu\text{m}$
Ave. prod. ratio (n/s)	1.3×10^5	4.5×10^4	1.3×10^7	9.6×10^4	1.7×10^7	3.3×10^5	2.1×10^3	1.7×10^8	2.1×10^{11}
Peak prod. ratio (n/s)	8×10^{13}	5×10^{15}	1×10^{18}	9×10^{14}	2×10^{20}	2×10^{19}	3×10^{17}	1×10^{22}	4×10^{25}
Peak flux ($\text{n}/\text{cm}^2/\text{s}$)	3×10^{19}	9×10^{13}	4×10^{17}	3×10^{16}	7×10^{19}	1×10^{18}	1×10^{21}	1×10^{25}	2×10^{29}
Laser type	Ti:sapphire	Ti:sapphire	Ti:sapphire	Ti:sapphire	Nd:glass	Nd:glass	Nd:glass	Nd:glass	Nd:glass
Reference	Hah 2016 ¹⁹⁾	Kawashima 2015 ²²⁾	Zuliek 2013 ²¹⁾	Komeda 2013 ²³⁾	Roth 2013 ²⁹⁾	Pomerantz 2014 ³⁰⁾	Abe 2017 ³¹⁾	Yamanaka 1986 ³²⁾	Hurricane 2014 ³³⁾

spec.: specification, gen.: generation, ptcl.: particle, blk.: bulk, caps.: capsule, th.: thermal, prod.: produced, ave.: average

*Estimated value.

Fig. 3 Repetition rate of neutron source driver in relation to the driving energy.

よるパルス幅がサブピコ秒のTRIDENTレーザーで得られた値が、パルスエネルギー当たりの瞬間中性子発生効率が最も高く、加速器駆動と同等、 10^8 n/sr/Jを達成している。そこで、レーザーパルス幅をサブピコ秒に焦点を当て、フェムト秒への展開も視野に置いて、

100 J/100 fs/100 Hzを検討スペックの中心に据えた。ピーク出力1 PW、平均出力10 kWとなる。中性子源駆動用高平均出力レーザー装置の実現性検討は、時田等によって報告される³⁵⁾。レーザー駆動中性子源の研究開発は発展途上である。したがって、レーザープラズマ専門家の奮起により、将来、ジュール当たりの瞬間発生効率が向上されると、レーザーに対する仕様は大幅に緩和される。

中性子発生点におけるパルス当たりの中性子ピークフラックスと比較すると、レーザー中性子源の特性が際立つ。Fig. 4に、パルス当たりの中性子ピークフラックスを示す。加速器駆動型のピークフラックスは、Table 1に示すように加速ビームサイズ(文献値)から算出した断面積と中性子発生ターゲット厚み(文献値)で囲まれる空間を中性子発生領域、加速器ビームパルス幅を中性子パルス幅として概算した。J-PARCについては、通常のダブルバンチ運転(平均出力1 MW、パルスエネルギー40 kJ、パルス幅1 μs)に加えて、中性子発生点における高ピークフラックスが期待できるシングルバンチ運転(平均出力0.5 MW、パルスエネルギー20 kJ、パルス幅0.1 μs)¹⁴⁾の値も示した。レーザー駆動型の中性子パルス幅は、文献に表記されていないものは、レーザー駆動加速イオンがターゲット中を伝搬する時間とした。レー

Fig. 4 Neutron luminosity at source in relation to the driver energy.

レーザー駆動中性子源のパルス幅については、朝比奈等による数値解析がある³⁶⁾。レーザー駆動型は、加速器駆動型と比較して、短パルス及び光源サイズが小さい。したがって、単位時間単位面積あたりの中性子輝度で評価すると、同じドライバーエネルギーにおいて、3桁以上の輝度を得ることができる。ここで列挙した中性子発生方式は、フェムト秒及びサブピコ秒レーザーを用いたものはビッチャーキャッチャー方式によるビーム核融合、ナノ秒レーザーを用いたものは爆縮あるいはそれに類似した方式による熱核融合である。特に、爆縮方式を用いると、ピークフラックス 10^{29} n/cm²/secを超える性能が期待できる。

レーザー駆動中性子源の有する高輝度性は、レーザー駆動特有の性能である。従来の中性子源では、発生後に減速材を設け、中性子エネルギーを熱領域まで下げてイメージングなどに活用されてきた。高輝度中性子源の適用可能性は検討段階にあるが、時間分解能ナノ秒以下的高速現象中性子イメージング或いは中性子回折解析などが原理的に可能であろう。さらに、レーザー光で実現された光と物質の相対論効果のような、照射強度を向上することで出現した非線形物理機構が、中性子においても存在するのであれば、新たな展開が見いだせるかもしれない。レーザー駆動中性子源及びガンマ線源による宇宙核物理・原子力基礎研究への応用が検討されている^{37,38)}。

3. レーザー駆動型中性子源開発に求められる要素技術

レーザー駆動型中性子源をシステム開発するためには、中性子発生までのプロセスにおいて、以下3つの要素技術：(1)レーザードライバ、(2)レーザー伝送/集光、(3)ターゲット供給のシステム統合が求められる。本章では、レーザー駆動型中性子源のシステム化に求められる要素技術の現状について紹介する。

3.1 レーザードライバ

レーザードライバ開発に求められることは、高ピーク出力パルスレーザーの高平均出力化である。Fig. 5に、パルスレーザーの平均出力に対するピーク出力を示した。次世代産業用パルスレーザーの市販仕様は、平均出力10-100 W、ピークパワー1 kW-0.1 TWである。また、同等の平均出力において、ピークパワーがPWに達するフェムト秒レーザーも理化学用途向けに市販されている(Fig. 5：三角)。一方、平均出力100 W以上のパルスレーザーは、開発途上にある。

高ピーク出力レーザーの平均出力向上のためには、半導体励起レーザーの技術開発が求められる。半導体レーザーをレーザー励起光源として用いることで、従来のフラッシュランプ励起方式と比べ熱負荷が低減され、パルスレーザーの高平均出力が可能となった。Fig. 5中の四角に示すのが、これまで開発された半導体励起レーザーである。現在、欧州連合によるELIプロジェクトにおいて、100 ジュール級半導体励起レーザー開発が進展した。英国ラザフォードアップルトン研が開発したレーザーDiPOLEは、平均出力1 kW(100 J/10 Hz)の1時間運転を達成している³⁹⁾。また、米国リバモア研では、平均出力2 kW(200 J/10 Hz)を目指した開発がすすめられており、現在80 J/3.3 Hzを達成している。国内においては、2008年に、平均出力213 W、ピーク出力2.4 GWのHALNAレーザーが開発され、現在、レーザー加工を目指した500 J超級レーザー開発プロジェクトが進行中である⁴¹⁾。国内外において、高平均出力化を目指したレーザー開発が勢力的に展開されている。大阪大学における10 kW級繰り返し超高強度レーザー開発動向について、河仲等により報告される⁴²⁾。

半導体励起レーザーをポンプ光源としたチタンサファイアレーザーにより、高ピーク、高平均出力化が達成可能である。国内では、ジュール級半導体励起レーザーKURE-1⁴³⁾をポンプ光源としたピーク出力10 TW超級チタンサファイアレーザーHAMA^{44,45)}とMATSU-1²²⁾が開発され、応用に供されている。例えば、Fig. 5丸で示すHAMAレーザーは、繰り返しレーザー核融合研究開発を目的として開発され、連続中性子発生及び核融合研究

Fig. 5 Pulse laser specification: average power versus pulse peak power.

に供されている^{23,46-48)}。さらに出力20 TWの全固体半導体レーザーMATSU-1は、重水素化ナノ粒子を用いた2.45 MeV核融合中性子の繰り返し発生(繰り返し1 Hz, 発生率98%以上)を達成している。欧州のELIプロジェクトでは、HAPLSレーザーが完成し、現在、ピーク出力0.5 PW, 平均出力50 W(16 J/30 fs/3.3 Hz)を達成している⁴⁹⁾。本方式は、ピーク出力1 PW(100 J/100 fs), 平均出力10 kWを達成するための検討候補の一つである。

3.2 レーザー伝送/集光

パルス圧縮回折格子のダメージしきい値、及び繰り返し数により、伝送ビームフルエンスが制限される。超高強度レーザーでは、チャープ増幅パルスを圧縮するため、回折格子を用いる。回折格子の表面は、金コート或いは誘電体多層膜コートされる。誘電体多層膜コートは、金コートよりもレーザーフルエンスに対する耐力が5倍以上高い。中心波長1 μm 帯のピコ秒レーザーにおいては、回折格子への誘電体多層膜コート技術が完成している。一方、中心波長0.8 μm 帯のフェムト秒レーザーでは、開発段階にあり、金コート回折格子が用いられている。金コートのダメージしきい値は、パルス幅30 fsにおいて、0.1 J/cm²とされる。ダメージしきい値の1/2で運用すると、100 Jフェムト秒レーザーのビーム直径は、約60 cmとなる。レーザー繰り返しが数Hz以上となると、平均熱負荷などを考慮する必要がある。フェムト秒レーザーパルスのための高耐力回折格子の研究開発が続けられている。

繰り返し運用の際は、集光光学系をターゲットデブリから保護する必要がある。集光強度 10^{22} W/cm²以上で中性子発生を目指す際は、F値が1程度の短焦点集光光学系を用いる。この際、集光光学系は、照射ターゲットとの距離が短くなるため、ターゲットデブリに晒される。ターゲットデブリの影響は、レーザー繰り返し数が高くなるにつれ、積算される。ターゲットデブリを防ぐ方法として、ターゲットデブリの生じないターゲットを用いる方法と、デブリシールド導入する2つの方法が考えられる。ターゲットデブリに対して、金属ターゲットを用いるレーザーEUV光源開発では、その回収対策が試みられている⁵⁰⁾。

3.3 ターゲット供給

レーザー駆動量子ビーム用ターゲット供給の高繰り返し化(数Hz以上)が求められる。ターゲット供給技術は、レーザー駆動中性子源を含めたレーザー加速技術全体の課題として、検討が続けられている。特に、欧州では、「高繰り返しレーザー駆動量子ビーム用ターゲット開発(TRG)」と題した会議が2013年より隔年で開催されている。繰り返し運用が可能なターゲットとして、従来テープターゲットが用いられてきた。しかし、一般的なテープターゲットでは、レーザーエネルギーが上昇すると、レーザー照射後、テープが切断され、供給が停止してしまう。連続供給可能な薄膜ターゲットとして、オハイオ大では、液体結晶フィルムターゲットが開発された⁵¹⁾。

これは、液体結晶の体積と温度を変えることで、フィルム厚みを10 nmから10 μm の間で調整可能である。ショット毎に、液体結晶をワイパーで供給し、0.1 Hzでの運用が可能である。さらに、オハイオ大では、常温液体シートターゲット⁵²⁾が用いられ、500 Hzレーザー実験に供されている。独では、クライオ液柱ターゲットが開発された⁵³⁾。SLACでは、クライオ液中水素ターゲットが開発され⁵⁴⁾、不純物のない高速プロトン発生に成功している⁵⁵⁾。ターゲット投入技術は、投入エネルギー以上の中性子エネルギー発生(粒子エネルギー×発生量)が期待できる将来の核融合炉においても、必須の技術である。繰り返しレーザー技術の進展により、レーザー駆動中性子源を含む将来のレーザープラズマ応用を視野にいったターゲット供給技術開発が求められる時代となった。

4. まとめ

コンパクト中性子源として期待される加速器駆動型、レーザー駆動型を比較し、レーザー駆動型の特徴を明らかにした。更に、レーザー駆動システムの開発で求められる3つの要素技術 1. レーザードライバ、2. レーザー伝送/集光、3. ターゲット供給の開発状況を紹介した。レーザー駆動中性子源は、加速器駆動とくらべ、短パルス性(パルス幅1 ns以下)、点光源(光源サイズ数mm以下)の特徴を有する。結果、他の方式では得られない高輝度中性子源が可能であり、ピークフラックスは、ドライバ入力エネルギーあたり、加速器駆動の3桁以上高い性能(10^{17} n/cm²/s/J)を有する。一方、平均出力発生率を考慮すると、5桁以上低く、 10^6 n/sr/sに留まる。したがって、レーザードライバ開発に対して、高ピーク出力レーザーの高平均出力化が要求される。そのためには、近年、国内外で開発が活性化している高出力パルス半導体励起レーザーの技術開発とその適用が肝心である。

謝 辞

加速器駆動中性子源の情報を提供頂いた池田 裕二郎博士、及び大竹 淑恵博士に謝意を表します。

参考文献

- 1) 北川 米喜, 森 芳孝: レーザー研究 **45** (2017) 58.
- 2) 千徳 靖彦: レーザー研究 **34** (2006) 142.
- 3) 米田 修: 学位論文, 光産業創成大学院大学 (2013) 浜松.
- 4) 西村 博明: レーザー研究 **43** (2015) 70.
- 5) 西内 満美子: プラズマ・核融合学会誌 **88** (2012) 5.
- 6) A. Macchi, M. Borghesi, and M. Passoni: Rev. Mod. Phys. **85** (2013) 751.
- 7) 余語 覚文, 花山 良平, 安部 勇輝, 西村 博明: レーザー研究 **46** (2018) 582.
- 8) J-PARC Center, MLF Division: JAEA-Technology 2011-035 (2012).
- 9) High-Intensity Proton Accelerator Team: JAEA-Tech 2003-044/KEK Report 2002-13 (2003) p. 87.
- 10) 物質・生命科学実験施設建設チーム: JAERI-Tech 2004-001vol. 1 (2004) p. 12.

- 11) H. Kogawa, S. Ishikura, H. Sato, M. Harada, S. Takatama, M. Futakawa, K. Haga, R. Hino, S. Meigo, F. Maekawa, *et al.*: J. Nucl. Mat. **343** (2005) 178.
- 12) H. Takada, K. Haga, M. Teshigawara, T. Aso, S. Meigo, H. Kogawa, T. Naoe, T. Wakui, M. Ooi, M. Harada, and M. Futakawa: Quantum Beam Sci. **1** (2017) 8.
- 13) 神永 雅紀, 寺田 敦彦, 羽賀 勝洋, 木下 秀孝, 石倉 修一, 日野 竜太郎: JAERI-Tech 2000-076 (2001).
- 14) 井頭 政之: 核データニュース (2005) 41.
- 15) Y. Ikeda, A. Taketani, M. Takamura, H. Sunaga, M. Kumagai, Y. Oba, Y. Otake, and H. Suzuki: Nucl. Instrum. Methods A **833** (2016) 61.
- 16) 鬼柳 善明, 木野 幸一: Isotope News **717** (2014) 31.
- 17) M. Furusaka, H. Sato, T. Kamiyama, M. Ohnuma, and Y. Kiyonagi: Physics Procedia **60** (2014) 167.
- 18) 大学加速器連携協議会: 大学加速器施設一覧 (2017).
- 19) J. Hah, G. M. Petrov, J. A. Nees, Z.-H. He, M. D. Hammig, K. Krushelnick, and A. G. R. Thomas: Appl. Phys. Lett. **109** (2016) 144102.
- 20) T. Ditmire, J. Zweiback, V. P. Yanovsky, T. E. Cowan, G. Hays, and K. B. Wharton: Nature **398** (1999) 489.
- 21) C. Zwick, F. Dollar, V. Chvykov, J. Davis, G. Kalinchenko, A. Maksimchuk, G. M. Petrov, A. Raymond, G. R. Thomas, L. Willingale, *et al.*: Appl. Phys. Lett. **102** (2013) 124101.
- 22) 川嶋 利幸, 渡利 威士, 関根 尊史, 松門 宏治, 西原 功修, 高木 勝, 吉村 涼, 幡野 佑真, 竹内 康樹, 佐藤 伸弘: レーザー研究 **43** (2015) 108.
- 23) O. Komeda, Y. Nishimura, Y. Mori, R. Hanayama, K. Ishii, S. Nakayama, Y. Kitagawa, T. Sekine, N. Sato, T. Kurita, *et al.*: Sci. Reports **3** (2013) 2561.
- 24) P. A. Norreys, A. P. Fews, F. N. Beg, A. R. Bell, A. E. Dangor, P. Lee., M. B. Nelson, H. Schmidt, M. Tatarakis, and M. D. Cable: Plasma Phys. Control. Fusion **40** (1998) 175.
- 25) N. Izumi, Y. Sentoku, H. Habara, K. Takahashi, F. Ohtani, T. Sonomoto, R. Kodama, T. Norimatsu, H. Fujita, Y. Kitagawa, *et al.*: Phys. Rev. E **65** (2002) 036413.
- 26) H. Habara, K. L. Lancaster, S. Karsch, C. D. Murphy, P. A. Norreys, R. G. Evans, M. Borghesi, L. Romagnani, M. Zepf, T. Norimatsu, *et al.*: Phys. Rev. E **70** (2004) 046414.
- 27) D. P. Higginson, J. M. McNaney, D. C. Swift, T. Bartal, D. S. Hey, R. Kodama, S. Le Pape, A. Mackinnon, D. Mariscal, H. Nakamura, *et al.*: Phys. Plasmas **17** (2010) 100701.
- 28) L. Willingale, G. M. Petrov, A. Maksimchuk, J. Davis, R. R. Freeman, A. S. Joglekar, T. Matsuoka, C. D. Murphy, V. M. Ovchinnikov, A. G. R. Thomas, *et al.*: Phys. Plasmas **18** (2011) 083106.
- 29) M. Roth, D. Jung, K. Falk, N. Guler, O. Deppert, M. Devlin, A. Favalli, J. Fernandez, D. Gautier, M. Geissel, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **110** (2013) 044802.
- 30) I. Pomerantz, E. McCary, A. R. Meadows, A. Arefiev, A. C. Bernstein, C. Chester, J. Cortez, M. E. Donovan, G. Dyer, E. W. Gaul, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **113** (2014) 184801.
- 31) Y. Abe, A. Sunahara, S. Lee, T. Yanagawa, Z. Zhang, Y. Arikawa, A. Morace, T. Nagai, T. Ikenouchi, S. Tokita, *et al.*: Appl. Phys. Lett. **111** (2017) 233506.
- 32) C. Yamanaka, S. Nakai, T. Yabe, H. Nishimura, S. Uchida, Y. Izawa, T. Norimatsu, N. Miyanaga, H. Azechi, M. Nakai, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **56** (1986) 1575.
- 33) O. A. Hurricane, D. A. Callahan, D. T. Casey, E. L. Dewald, T. R. Dittrich, T. Döppner, M. A. Barrios Garcia, E. E. Hinkel, L. F. Berzak Hopkins, P. Kervin, *et al.*: Phys. Plasmas **21** (2014) 056314.
- 34) S. Le Pape, L. F. Berzak Hopkins, L. Divol, A. Pak, E. L. Dewald, S. Bhandarkar, L. R. Benediti, T. Bunn, J. Biener, J. Crippen, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **120** (2018) 245003.
- 35) 時田 茂樹, 森 芳孝, 森 道昭, 河仲 準二: レーザー研究 **46** (2018) 571.
- 36) 朝比奈 隆志, 田中 浩基, 安部 勇輝, 森 芳孝, 余語 寛文, 長友 英夫, 花山 良平, 早川 岳人: レーザー研究 **46** (2018) 594.
- 37) L. A. Bernstein, D. L. Bleuel, J. A. Caggiano, C. Cerjan, R. J. Fortner, J. Gostic, P. M. Grant, N. Gharibyan, C. Hagmann, R. Hatarik, *et al.*: Plasma Fus. Res. **9** (2014) 4404101.
- 38) T. Hayakawa, T. Nakamura, H. Kotaki, M. Kando, and T. Kajino: Quantum Beam Sci. **1** (2017) 3.
- 39) P. Mason, M. Divoky, K. Ertel, J. Pilař, T. Butcher, M. Hanuš, S. Banerjee, J. Phillips, J. Smith, M. De Vido, *et al.*: Optica **4** (2017) 438.
- 40) R. Yasuhara, T. Kawashima, T. Sekine, T. Kurita, T. Ikegawa, O. Matsumoto, M. Miyanaga, H. Kan, H. Yoshida, J. Kawanaka, *et al.*: Opt. Lett. **33** (2008) 1711.
- 41) 川嶋 利幸, 栗田 隆史, 関根 尊史, 渡利 威士, 竹内 康樹, 水田 好雄, 倉田 将輝, 森田 宇亮, 玉置 善紀, 加藤 義則, 他: レーザー研究 **45** (2017) 560.
- 42) 河仲 準二, 時田 茂樹, 椿本 幸治, 吉田 英次, 郭 晓杨, 李 朝阳, 藤岡 加奈, 森尾 登, 萩野 純平, 本越 伸二他: レーザー研究 **46** (2018) 576.
- 43) T. Sekine, H. Sakai, Y. Takeuchi, Y. Hatano, T. Kawashima, H. Kan, J. Kawanaka, N. Miyanaga, and T. Norimatsu: Opt. Express **21** (2013) 8393.
- 44) Y. Mori, T. Sekine, O. Komeda, S. Nakayama, K. Ishii, R. Hanayama, K. Fujita, S. Okihara, N. Satoh, T. Kurita, *et al.*: Nucl. Fusion **53** (2013) 073011.
- 45) 森 芳孝, 関根 尊史, 米田 修, 西村 靖彦, 三浦 永祐, 中山 師生, 石井 勝弘, 花山 良平, 佐藤 伸弘, 栗田 隆史, 他: レーザー研究 **42** (2014) 154.
- 46) Y. Kitagawa, Y. Mori, R. Hanayama, S. Okihara, K. Fujita, K. Ishii, T. Kawashima, N. Sato, T. Sekine, R. Yasuhara, *et al.*: Plasma Fusion Res. **6** (2011) 1306006.
- 47) Y. Kitagawa, Y. Mori, O. Komeda, K. Ishii, R. Hanayama, K. Fujita, S. Okihara, T. Sekine, N. Satoh, T. Kurita, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **108** (2012) 155001.
- 48) Y. Mori, Y. Nishimura, R. Hanaayma, S. Nakayama, K. Ishii, Y. Kitagawa, T. Sekine, N. Sato, T. Kurita, T. Kawashima, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **117** (2016) 055001.
- 49) E. Sistrunk, T. Spinka, A. Bayramian, S. Betts, R. Bopp, S. Buck, K. Charron, J. Cupal, R. Deri, M. Drouin, *et al.*: Conference on Lasers and Electro-Optics (OSA, 2017) STh1L.2.
- 50) 東口 武史, 藤岡 慎介, 砂原 淳, 柳田 達哉, 溝口 計: レーザー研究 **42** (2014) 14.
- 51) P. L. Poolea, C. D. Andereck, D. W. Schumacher, R. L. Daskalova, S. Feister, K. M. George, C. Willis, K. U. Akli, and E. A. Chowdhury: Phys. Plasmas **22** (2014) 039905.
- 52) J. T. Morrison, E. A. Chowdhury, K. D. Frische, S. Feister, V. M. Ovchinnikov, J. A. Nees, C. Orban, R. R. Freeman, and W. M. Roquemore: Phys. Plasmas **22** (2015) 043101.
- 53) R. A. Costa Fraga, A. Kalinin, M. Kühnell, D. C. Hochhaus, A. Schottelius, J. Polz, M. C. Kaluza, P. Neumayer, and R. E. Grisenti: Rev. Sci. Instrum. **83** (2012) 025102.
- 54) J. B. Kim, S. Göde, and S. H. Glenzer: Rev. Sci. Instrum. **87** (2016) 11E328.
- 55) S. Göde, C. Rödel, K. Zeil, R. Mishra, M. Gauthier, F.-E. Brack, T. Kluge, M. J. MacDonald, J. Metzkes, L. Obst, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **118** (2017) 194801.