



繰り返し動作キロジュール級パルスレーザーによる 核融合研究への貢献と応用展開への期待

関根 尊史, 加藤 義則, 玉置 善紀, 川嶋 利幸

浜松ホトニクス株式会社 中央研究所 産業開発研究センター (〒 431-1202 静岡県浜松市西区呉松町 1820)

Contribution to Laser Fusion Research by Repetitive kJ-class Pulse Laser and Expectations of Application Development

Takashi SEKINE, Yoshinori KATO, Yoshinori TAMAOKI, and Toshiyuki KAWASHIMA

Industrial Development Center, Central Research Laboratory, Hamamatsu Photonics K.K.,

1820 Kurematsu, Nishi-ku, Hamamatsu, Shizuoka 431-1202

(Received April 19, 2023)

This paper reviews the recent progress in the development of diode-pumped solid-state lasers (DPSSLs) with over 100 J pulse energy at a 10-Hz repetition rate and the feasibility of a 1 kJ-class DPSSL with a scaling concept on a helium gas-cooled multi-disk laser. The potential for contributions to laser fusion research using a 1 kJ-class DPSSL is also discussed. A construction and an operation of an integrated system, which consists of highly stable laser controlling, target production/supplying and plasma measurement/diagnostics, based on a 1 kJ by 10-Hz DPSSL boost-up the level of such core technologies of laser fusion reactors to TRL 7 or more. These technologies will become common for various future applications for high energy and high-repetition rate lasers.

Key Words: Laser, Laser fusion, DPSSL, High energy Laser

1. はじめに

1990年代から研究開発が進められてきた半導体レーザー(LD)を励起源とした固体レーザー(Diode-pumped solid-state laser: DPSSL)は、レーザー加工を中心に応用が進みニーズに応じて高出力化および高性能化が進められてきた。現在は連続波で動作するファイバレーザーの出力は100 kWに達し、パルスレーザーにおいても様々なパルス幅で1 kWを超える平均出力が実現されるに至っている^{1,2}。特に近年は、加工方法に応じてレーザーのパルス幅や波長、繰り返し周波数などのパラメータを最適化することが可能なパルスレーザーの技術開発が活発に進められている。特に平均パワーが1 kWを超え10 J以上のパルスエネルギーを有したパルスレーザーにおいては、レーザー加工に留まらず医療や材料分析へ応用されるレーザー加速、更には未来のエネルギー源として期待されるレーザー核融合など様々な応用展開へ繋がる技術として研究開発が精力的に行われている¹⁻⁷。このような

高エネルギーかつ高繰り返しレーザーは将来の国の産業や科学技術を支える基盤として重要な技術と考えられ、今後も長期的な視点に立った継続的な研究開発の推進が求められる。

レーザー核融合の研究では、2022年12月に米国ローレンス・リバモア国立研究所の国立点火施設(National Ignition facility: NIF)にて、3.15 MJのレーザー核融合出力を達成し利得1.5倍を実証する大きな成果が報告された¹³。今回のレーザー核融合の物理実証を受け、今後は発電炉に向けた研究開発が加速すると考えられる。NIFではフラッシュランプ励起Nd:ガラスレーザーを用いており、繰り返し率が日に2~3発と低く、電気からレーザー光へのエネルギー変換効率も1%以下と低い。レーザー核融合発電の実現には、10 Hz以上の繰り返し率で10%以上の電気-光変換効率で動作が可能なDPSSLなどのレーザーが求められる。Fig. 1にNIFにおけるレーザー核融合出力の推移とDPSSLの出力エネルギーの推移を示す。核融合出力は10年間で1000倍以上に増加し

¹ IPG Photonics: <https://www.ipgphotonics.com/jp/products/lasers/high-power-cw-fiber-lasers>

² TRUMPF: https://www.trumpf.com/ja_JP/products/laser/

¹³ Lawrence Livermore National Laboratory: <https://www.llnl.gov/news/national-ignition-facility-achieves-fusion-ignition>

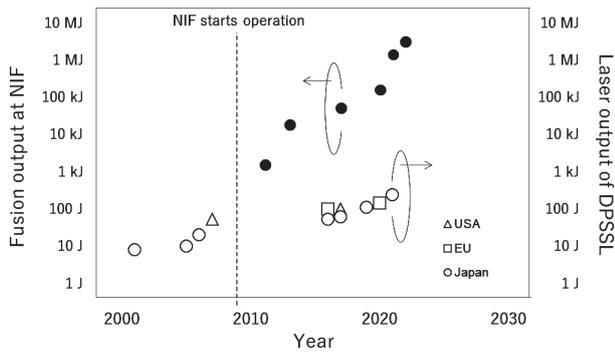


Fig. 1 Progress of laser fusion output on NIF and DPSSL output in the world.

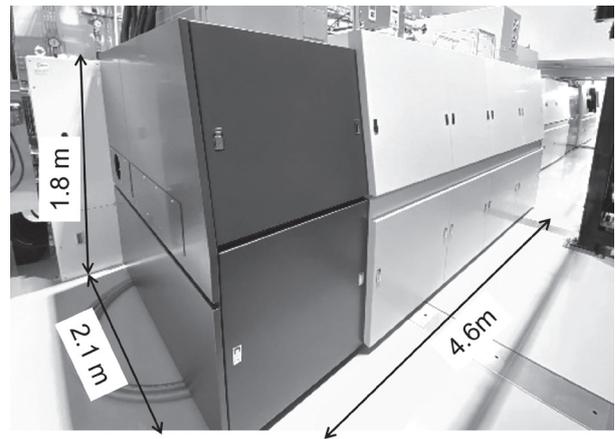


Fig. 2 250-J laser system.^{†4,5}

ているのに対し、DPSSLの出力は20年で10倍程度に留まっている。

本稿では、世界の高繰り返しかつ高エネルギーレーザーの開発動向について我々が行っている1kJ級レーザーの要素技術開発を含め紹介し、それらのレーザー技術が担うレーザー核融合研究への貢献とレーザー核融合以外の応用展開への期待について概説する。

2. キロジュール級LD励起固体レーザー

2.1 世界の100J級LD励起固体レーザー

Table 1に近年日米欧で進められているナノ秒のパルス幅でレーザーエネルギーが100Jを超えるDPSSL開発の状況を示す。世界をリードするのはラザフォード・アップルトン研究所(英国)とHiLASEが共同で進めているDPSSLであり、2021年に146J×10Hzのレーザー出力を達成した⁵⁾。浜松ホトニクスでは、これまでに253J×0.2Hzおよび106J×10Hz出力を達成し、現在250J×10Hz動作を目指して開発を行っている(Fig. 2)^{6)†4,5)}。この2機関では、LD励起低温冷却Yb:YAGセラミクスレーザーの開発を行っている。一方、ローレンス・リバモア国立研究所では、102J×3.3Hzの出力をLD励起

Table 1 100 J class DPSSL development in the world.

	Lawrence Livermore Nat. Lab.	HiLASE & Rutherford Appleton Lab.	Hamamatsu Photonics K.K.	
Output energy	102 J	146 J	253 J	106 J
Repetition rate	3.3 Hz	10 Hz	0.2 Hz	10 Hz
Average power	330 W	1.46 kW	50.6 W	1.06 kW
Laser medium	Nd:glass	Yb:YAG ceramics	Yb:YAG ceramics	Yb:YAG ceramics
Amplifier concept	Multi disk	Multi disk	Multi disk	Multi disk
Coolant medium	RT helium	CT helium	CT helium	CT helium

Nd: ガラスレーザーで得ている²⁾。同研究所では、2025年までに同レーザーを当初の設計の200J×10Hzへ増強する計画を示している。

これらのレーザーは、レーザー媒質は異なるがヘリウムガス冷却マルチディスクレーザーという共通する方式を採用している。この方式の最大の特徴は、繰り返し率を維持したままエネルギーのスケールアップが可能なことである。概要をFig. 3に示す。ヘリウムガス冷却マルチディスクレーザーでは、板状のレーザー媒質を整流させて、広い面(端面)からレーザー光を入射すると共に同じ面にヘリウムガスを流しレーザー媒質を冷却する。この方式では、板状のレーザー媒質の厚さは同じままサイズを大きくすることで、光学薄膜の損傷を抑制できるレーザー光のフルエンス(単位面積当たりのレーザーエネルギー)を維持したままレーザーエネルギーを増加することができる。この時、レーザー媒質の厚さが同じまま2つの端面から冷却することでレーザーエネルギーを増加させてもレーザー媒質内の温度分布が大きく変わらない構成であるということが、スケールアップを成り立たせる上で重要な要件となる。レーザー媒質を冷却する冷媒には、レーザー光に吸収が無く透過波面に影響を及ぼし難い気体が適していることから、比熱が高く熱伝導率も高いヘリウムガスが用いられている。

2.2 キロジュール級レーザーの実現可能性

我々は、Table 1にある250J×0.2Hzの実験結果と前

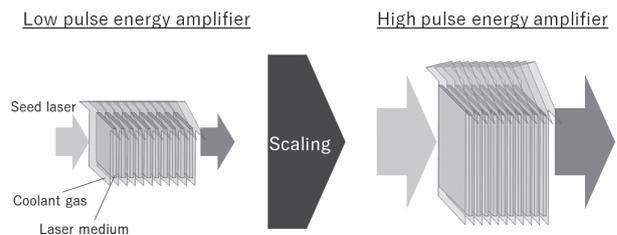


Fig. 3 Scaling concept of multi disk laser.

^{†4} Hamamatsu Photonics K.K.: <https://www.hamamatsu.com/jp/ja/news/products-and-technologies/2021/20210628000000.html>

^{†5} Hamamatsu Photonics K.K.: <https://www.hamamatsu.com/jp/ja/news/products-and-technologies/2023/20230112000000.html>

節のエネルギースケーリング則に基づき、1 kJ 級レーザーの基本設計を行った⁶⁾。参考文献 6) では、20 cm × 20 cm 程の Yb:YAG セラミクス 24 枚を LD により約 3.5 kJ で励起し 175 K の低温ヘリウムガスで冷却するマルチディスクレーザー増幅器を構成し、300 J のレーザーエネルギーを入力することで出力エネルギー 1 kJ を得る設計が示されている。この基本設計は実験結果に基づいているため 1 kJ レーザー実現の一つの指標となる。しかしながら、実現するためにはレーザー媒質である Yb:YAG セラミクスの大型化や励起用 LD の高出力化、更には戻り光防止技術などいくつかのコンポーネントにおいて大きな課題がある。これらの技術的ハードルを低減する方法として、現在の 1 kJ 級 DPSSL の基本設計のレーザー効率を向上することが挙げられる。レーザーの効率は、レーザーパターンの強度分布の均一性を高めることで向上させることができる。強度分布を均一化することで光学薄膜の損傷を抑制したまま平均フルエンスを上げることができ、それによりレーザー媒質に蓄積されたエネルギーを取り出す効率を上げられるためである。その結果として現在の設計よりも小さなレーザーパターンで 1 kJ を出力することが可能になり、Yb:YAG セラミクスのサイズを小さくすることができる。また必要な励起用 LD のエネルギーも低減することができる。その他にもレーザーの波面分布を均一化することで、光学薄膜のダメージリスクを軽減することもできる。このように 1 kJ 級 DPSSL の基本設計をより実現し易い設計へアップデートすることが、既存の 250 J レーザーの特性改善により可能である。更に、セラミクスの大型化など周辺技術の開発が進むことで、近い将来に 1 kJ 級 DPSSL の実現は可能であると考えられる。

3. レーザー核融合研究への貢献

前節で示したレーザー技術の進展により 1 kJ 級 DPSSL が実現されることは、将来のレーザー核融合炉を具体的な規模感で議論できるようになるという意味で、核融合用ドライバーの建設に向けた大きなマイルストーンとなる。NIF と同等とのレーザー核融合の研究を行うには、10 kJ 級のレーザーを数百本備えた数メガジュールのレーザーが必要になる。NIF は間接照射方式であることから、レーザー光を X 線に変換する効率が掛かるため、大きなレーザーエネルギーが必要となる⁸⁾。一方、X 線に変換せずにレーザー光のエネルギーを直接爆縮に用いる直接照射方式も研究が進められており、その中でも爆縮と点火を別々のレーザー光で行う高速点火方式では数百 kJ のレーザーエネルギーで核融合点火を実現できるとされている⁹⁾。つまり 1 kJ 級レーザーであれば数百本、10 kJ 級レーザーであれば数十本で実現することができる。既に NIF において 192 本のレーザーを制御する技術が運用されていることから、数百本の 1 kJ 級 DPSSL のレーザー制御は現実的に検討できる規模と言える。

繰り返し動作が可能な 1 kJ 級 DPSSL を用いることで大量の実験データを取得できるようになり、更に AI を

活用したデータ駆動型研究により直接照射方式のレーザー核融合のプラズマ研究を飛躍的に加速することができる。このような高繰り返しレーザーを用いたレーザー核融合研究では、質の高いデータを取得するために再現性の高いプラズマ実験を高頻度に行うことを可能とする高精度で高安定なレーザー照射技術を確立することが重要となる。この技術の確立向け、まずは 1~10 本程度の 1 kJ 級 DPSSL で構成されるレーザー制御やターゲット製造・供給、高繰り返しプラズマ計測・診断など工学的な実現可能性を検証することができる統合システムを構築することが有効と考えられる。

そこで本章では、この統合システムの構築により期待できるレーザー制御技術、ターゲット製造・供給技術およびプラズマ計測技術の発展について示す。

3.1 レーザー制御技術

統合システムが構築されることで発展が期待できる技術として、まず一つにレーザー制御技術が挙げられる。ターゲットの爆縮では、レーザーの特性を安定に保つための制御技術は極めて重要となる。統合システムによりターゲット照射とプラズマ計測を同時に行うことで、レーザーの集光スポットの強度分布を高精度かつ安定に制御する技術開発を行うのと同時に、その集光スポットが与える爆縮への影響を評価することができる。集光スポットの強度分布の他にも、集光位置(ポインティング)やレーザーエネルギーやパルス波形の制御技術の発展も期待できる。

統合システムを用いることで、上述の様なレーザー制御技術が向上できるだけでなく、良好な爆縮を得るために必要なレーザー特性のふらつきの許容範囲も明らかにすることができる。また統合システムを長期間運用することで、1 kJ 級 DPSSL を構成する光学素子や LD、LD を駆動する電源などの経年的な特性の劣化や寿命を評価でき、将来のレーザー核融合実験施設の建設に有用な知見を得ることができる。

3.2 ターゲット製造および供給技術

統合システムの構築によりターゲットに関する技術も大きな進展が見込まれる。統合システムでは大量にターゲットを消費するため、ターゲットの量産化技術と低コスト化技術の開発が必要になる。また、ターゲットの品質は爆縮の特性に大きく影響するため、レーザー特性と同様にターゲットのサイズや真球性、表面粗さ、球殻(シェル)状のターゲットであれば膜厚などの品質を評価する技術も必要になる。

ターゲット製造・評価に加え、ターゲットを連続で供給する技術開発も極めて重要であり、統合システムの構築で進展が期待できる技術となる。国内ではこれまで光産業創成大学院大学を中心とした研究グループで連続してターゲット供給する技術開発が進められ、これまでに 1 mm の中実球および 0.5 mm のシェルターゲットを 1~10 Hz で射出する実証試験が行われてきた¹⁵⁻¹⁷⁾。統合システムの構築により、これまでの技術を実用化レベルに

引き上げる開発の加速が期待できる。

3.3 プラズマの計測・診断技術

前節までに示したレーザー制御およびターゲット技術を統合したレーザー照射の技術開発を行うには、形成された爆縮プラズマを10 Hzの繰り返し率で評価する計測・診断技術が必要になる。ここでは、単に爆縮プラズマを計測するだけではなく、データを解析し爆縮の質を10 Hzの繰り返し速度で評価することが重要となり、統合システムが構築されることでこの高速診断技術を確立することができる。具体的には、X線CCDカメラによる爆縮プラズマの形状や温度、X線ストリークカメラにより爆縮速度などを10 Hzで取得し評価する技術の確立が期待できる。統合システムにプラズマ計測技術が備わることで、各レーザー特性、ターゲット品質、爆縮プラズマ状態が紐づけられたデータセットを大量に収集することができる。これがAIを活用したデータ駆動型研究の基盤となり、レーザー核融合研究の進展を支える重要な技術となる。

3.4 現在の技術成熟度レベル

これまでに述べてきた統合システムと共通する技術は、現在文部科学省の先端研究設備プラットフォーム事業における「パワーレーザー-DXプラットフォーム(2020年~2025年)」において、国内の主要なレーザー施設で開発が進められている¹⁰⁻¹⁴⁾。同事業では、遠隔地からリモートで実験を行うことができるレーザー制御や計測結果のデータベース化などのプラットフォームの開発が進められており、事業終了時には技術成熟度レベル(Technology Readiness Level: TRL)で“実験室レベルでの実証レベル”となる4以上に到達することが期待される。レーザー核融合炉の実現に貢献するには、1 kJ × 10 Hz レーザーのターゲット照射およびプラズマ計測・診断をTRLで“実環境下での技術成立レベル”となる7以上へ高める統合システムの構築が重要と考えられる。

浜松ホトニクスが開発した250 J レーザー(Fig. 2)においても、レーザーのパラメータとレーザー照射の結果をデータベース化できるシステム構成となっている。また、厚さ1.2 mのコンクリートを遮蔽壁としたレーザー核融合研究用の施設内に直径1.4 mの真空チャンバーを設置し、そこへレーザー光を対向して照射できる実験系の構築を行っている(Fig. 4)¹⁸⁾。同社では、この施設にて250 J レーザーシステムを軸に本章で示した統合システムに繋がる個別技術をTRL4以上で確立する開発を行う計画である。

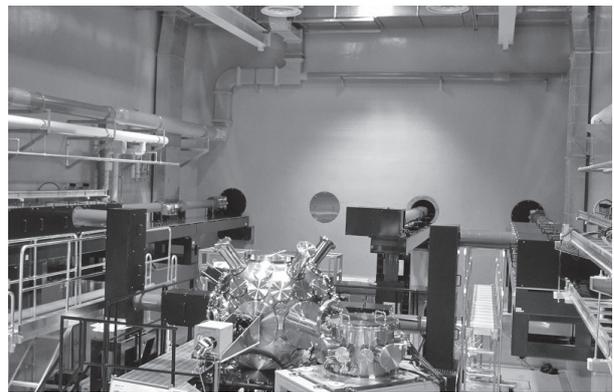


Fig. 4 Experiment area at Hamamatsu Photonics K.K.¹⁸⁾

4. 応用展開への期待

3章では、レーザー核融合発電に向けた国家もしくは国際プロジェクトの早期の立上げに繋げる方策の一案として、1 kJ級DPSSL技術を活用したレーザー核融合研究への貢献について示した。一方で世界では、レーザー核融合発電に先立つ高エネルギーかつ高繰り返し率のDPSSLによる応用研究の国家プロジェクトが多く進められている。そこで本章では、レーザーエネルギーが10 J以上で1 kW以上の平均出力が求められる応用分野について、国内および世界の研究動向を概説する。

Table 1に示された250 J レーザーは、NEDO「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」プロジェクト¹⁶⁾を通してTACMIコンソーシアム¹⁷⁾のレーザー加工プラットフォームの一部として開発された。金属材料の表面に圧縮残留応力を付与し疲労寿命を向上することができるレーザーピーニング加工への応用が期待されている。レーザーピーニングは、従来のショットピーニングに比べ材料の深くまで圧縮残留応力層を形成できる特徴があり、疲労耐力を大幅に向上することができるため、高い信頼性が求められる航空機部品などへの適用が進められている。HiLASE(チェコ)においても、低温ヘリウムガス冷却Yb:YAGセラミクスによる100 J × 10 Hz出力が可能なDPSSLを用いた産業応用の研究が行われている¹⁸⁾。彼らは、SUS 316Lの3次元金属造形物に対しレーザーピーニング処理を施し、残留応力層を付与することで疲労耐性の向上を確認する報告などを行うなど、精力的に産業開発を進めている¹⁹⁾。米国では、既にLSP technologies社やCurtiss-Wright Surface Technologies社がレーザーピーニング事業を展開しており、今後益々高エネルギーかつ高繰り返し率DPSSLの産業展開が進むと考えられる^{9,10)}。

レーザー加工の他には、各国で国家プロジェクトを中心とした学術・医療などの研究開発に高エネルギーかつ

¹⁶⁾ NEDO「高輝度・高効率次世代レーザー技術の開発」プロジェクト：https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100124.html

¹⁷⁾ TACMI コンソーシアム：<http://www.utripl.u-tokyo.ac.jp/tacmi/>

¹⁸⁾ HiLASE：<https://www.hilase.cz/>

¹⁹⁾ LSP technologies：<https://lsptech.tlipng.com/>

¹⁰⁾ Curtiss-Wright Surface Technologies：<https://cwst.com/>

高繰り返し動作 DPSSL の適用および検討が進められている。日本では JST 未来社会創造事業の中の「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」プロジェクトにおいて、レーザー電子加速の研究開発が行われている¹¹。レーザー電子加速を用いた X 線自由電子レーザーの実現に向け 1 GeV 以上の電子ビームの安定生成を目指している²⁰。このレーザー電子加速にはフェムト秒レーザーが用いられており、フェムト秒レーザーの励起用光源として繰り返し周波数が 100 Hz 以上でレーザーエネルギーが数 10 J 級となる DPSSL の実用化が求められている^{21,22}。また同事業では、レーザーイオン加速によるがん治療用の量子メスの研究開発も行われており、フェムト秒レーザーの励起用としてレーザー電子加速よりも高いエネルギーの DPSSL が必要とされている²³。

英国ラザフォード・アップルトン研究所では、Table 1 に示した 100 J × 10 Hz 出力 DPSSL 技術をベースとした励起用 DPSSL を新規に開発し、フェムト秒レーザーによるレーザー電子加速器施設 (Extreme photonics applications center: EPAC) が 2024 年から稼働する計画である。主な応用先は医療分野における高速イメージングなどの先端研究である¹²。

また、独国ハンブルグにある欧州 X 線自由電子レーザー施設 (European XFEL) でも、英国製 100 J × 10 Hz 出力 DPSSL を設置し、高エネルギーレーザーをターゲット材料に照射した際に発生する衝撃波を活用した研究が行われる計画である¹³。日本国内においても、理化学研究所播磨事業所の X 線自由電子レーザー (SACLA) の実験エリアに波長 532 nm、パルス幅 10 ns、60 J × 0.1 Hz で動作するフラッシュランプ励起レーザーが設置され、大阪大学を中心に高エネルギー密度科学の研究が行われている²⁴。

その他にもレーザー駆動中性子源やレーザー核融合で発生する熱を利用した水素製造プラント構想 (Hydrogen-production Plant with Energy Reactor of Inertial fusion: HYPERION) など、産業、医療、学術、材料、宇宙、エネルギーなど多岐に渡る分野において社会的なインフラに繋がる可能性のある重要な応用が期待されている^{25,26}。このような多岐に渡る高出力レーザーの応用研究を行う拠点として、大阪大学から多用途施設 J-EPoCH (Japan Establishment for a Power-laser Community Harvest) の建設が提案されている²⁷。

5. まとめ

本稿では、日米欧で進められている 100 J 超級かつ 10 Hz 動作が可能な DPSSL の開発状況と、ヘリウムガス冷却マルチディスクレーザーによる 1 kJ 級レーザーの実現可能性について概説した。また 1 kJ 級 DPSSL によるレーザー核融合研究への貢献として、1 kJ × 10 Hz で稼

働するレーザー制御、ターゲット製造・供給、プラズマ計測・診断を備えた統合システムを構築し、質の良い爆縮プラズマを安定的に発生する技術開発を行うことで、レーザー核融合のコア技術を TRL7 以上に高める構想を示した。ここで確立された技術は、4 章で紹介した様々な応用においても共通技術となる。

高出力レーザーには国の基幹技術に繋がる様々な応用展開が期待される。その一方で、レーザー技術は日進月歩で進歩しており、国際競争力を持った高出力レーザー技術を維持するためには、継続的な研究開発の支援が求められる。浜松ホトニクスにおいても、自社設備と施設を活用して関係機関と連携し高出力レーザーの技術開発に取り組む計画である。

参考文献

- 1) P. Mason, M. Divoký, K. Ertel, J. Pilař, T. Butcher, M. Hanuš, S. Banerjee, J. Phillips, J. Smith, M. D. Vido, *et al.*: *Optica* **4** (2017) 438.
- 2) E. Sistrunk, T. Spinka, A. Bayramian, S. Betts, R. Bopp, S. Buck, K. Charron, J. Cupal, R. Deri, M. Drouin, *et al.*: *in Conference on Lasers and Electro-Optics, OSA Technical Digest* (Optica Publishing Group, 2017) Sth1L2.
- 3) D. Albach, M. Loeser, M. Siebold, and U. Schramm: *High Power Laser Sci. Eng.* **7** (2019) e1.
- 4) T. Sekine, T. Kurita, M. Kurata, Y. Hatano, Y. Muramatsu, T. Morita, Y. Kabeya, T. Iguchi, T. Watari, R. Yoshimura, *et al.*: *High Energy Density Phys.* **36** (2020) 100800.
- 5) M. Divoký, J. Pilař, M. Hanuš, P. Navrátil, O. Denk, P. Severová, P. Mason, T. Butcher, S. Banerjee, M. De Vido, *et al.*: *Opt. Lett.* **46** (2021) 5771.
- 6) T. Sekine, T. Kurita, Y. Hatano, Y. Muramatsu, M. Kurata, T. Morita, T. Watari, T. Iguchi, R. Yoshimura, Y. Tamaoki, *et al.*: *Opt. Express* **30** (2022) 44385.
- 7) J. Ogino, S. Tokita, S. Kitajima, H. Yoshida, Z. Li, S. Motokoshi, N. Morio, K. Tsubakimoto, K. Fujioka, R. Kodama, *et al.*: *Opt. Cont.* **1** (2022) 1270.
- 8) S. Fujioka and Y. Sentoku: *Rev. Laser Eng.* **49** (2021) 130 (in Japanese).
藤岡 慎介, 千徳 靖彦: *レーザー研究* **49** (2021) 130.
- 9) T. Johzaki: *Rev. Laser Eng.* **49** (2021) 135 (in Japanese).
城崎 知至: *レーザー研究* **49** (2021) 135.
- 10) H. Oku, K. Takahashi, H. Nagatomo, M. Nagata, Y. Kubota, M. Ishida, K. F. Farley LAW, M. Hashimoto, M. Taniguchi, C. Yamaguchi, *et al.*: *Rev. Laser Eng.* **50** (2022) 661 (in Japanese).
奥 浩行, 高橋 圭介, 長友 英夫, 永田 みず穂, 久保田 良典, 石田 正人, King Fai Farley LAW, 橋本 賢子, 谷口 麻梨香, 山口 智代, 他: *レーザー研究* **50** (2022) 661.
- 11) K. Miyaniishi, K. Sueda, and T. Yabuuchi: *Rev. Laser Eng.* **50** (2022) 668 (in Japanese).
宮西 宏併, 末田 敬一, 藪内 俊毅: *レーザー研究* **50** (2022) 668.
- 12) M. Hashida, S. Inoue, S. Masuno, and S. Tokita: *Rev. Laser Eng.* **50** (2022) 673 (in Japanese).
橋田 昌樹, 井上 峻介, 升野 振一郎, 時田 茂樹: *レーザー研究* **50** (2022) 673.
- 13) H. Kiriya, Y. Mashiba, Y. Miyasaka, N. Nakanii, K. Kondo, A. Kon, Y. Fukuda, and M. Nishiuchi: *Rev. Laser Eng.* **50** (2022) 678 (in Japanese).
桐山 博光, 眞柴 雄司, 宮坂 泰弘, 中新 信彦, 近藤 康太郎, 今 亮, 福田 祐仁, 西内 満美子: *レーザー研究* **50** (2022) 678.
- 14) Y. Kobayashi, K. Bamoto, K. Sshimihara, T. Endo, H. Tamaru, K.

¹¹ JST「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」プロジェクト: <https://lpa.ims.ac.jp/>

¹² Extreme Photonics Applications Centre (EPAC): <https://www.clf.stfc.ac.uk/Pages/EPAC.aspx>

¹³ European XFEL: https://www.xfel.eu/facility/instruments/hed/index_eng.html

- Sakaue, H. Sakurai, and S. Tani: *Rev. Laser Eng.* **50** (2022) 683 (in Japanese).
 小林 洋平, 場本 圭一, 島原 光平, 遠藤 翼, 田丸 博晴, 坂上 和之, 櫻井 治之, 谷 峻太郎: *レーザー研究* **50** (2022) 683.
- 15) Y. Mori, A. Iwamoto, K. Ishii, R. Hanayama, S. Okihara, Y. Kitagawa, Y. Nishimura, O. Komeda, T. Hioki, T. Motohiro, *et al.*: *Nucl. Fusion* **59** (2019) 096022.
- 16) O. Komeda, Y. Nishimura, Y. Mori, R. Hanayama, K. Ishii, S. Nakayama, Y. Kitagawa, T. Sekine, N. Sato, T. Kurita, *et al.*: *Sci. Rep.* **3** (2013) 2561.
- 17) Y. Mori, Y. Nishimura, O. Komeda, K. Ishii, R. Hanayama, S. Okihara, Y. Kitagawa, A. Iwamoto, A. Sunahara, Y. Sentoku, *et al.*: *Rev. Laser Eng.* **49** (2021) 167 (in Japanese).
 森 芳孝, 西村 靖彦, 米田 修, 石井 勝弘, 花山 良平, 沖原 伸一朗, 北川 米喜, 岩本 晃史, 砂原 淳, 千徳 靖彦, 他: *レーザー研究* **49** (2021) 167.
- 18) Y. Tamaoki, T. Sekine, T. Kawashima: *J. Inst. Elect. Engnr. Jpn.* **141** (2021) 571 (in Japanese).
 玉置 善紀, 関根 尊史, 川嶋 利幸: *電気学会誌* **141** (2021) 571.
- 19) S. Zulić, D. Rostohar, J. Kaufman, S. Pathak, J. Kopeček, M. Böhm, J. Brajer, and T. Mocek: *Surface Engineering* **38** (2022) 183.
- 20) T. Hosokai, J. Zhan, N. Pathak, A. G. Zhidkov, D. O. Espinos, Z. Lei, Y. Mizuta, T. Muto, K. Huang, N. Nakanii, *et al.*: *Rev. Laser Eng.* **50** (2022) 341 (in Japanese).
- 細貝 知直, 金 展, パサック ナビーン, ジドコフ アレクセイ, ウンバレク エスピノス ドリス, 雷 臻哲, 水田 好雄, 武藤 俊哉, 黄 開, 中新 信彦, 他: *レーザー研究* **50** (2022) 341.
- 21) J. Ogino, S. Tokita, H. Yoshida, K. Matsumoto, K. Tsubakimoto, K. Fujioka, N. Morio, S. Motokoshi, R. Kodama, and J. Kawanaka: *Rev. Laser Eng.* **50** (2022) 377 (in Japanese).
 荻野 純平, 時田 茂樹, 吉田 英次, 松本 景子, 椿本 孝治, 藤岡 加奈, 森尾 登, 本越 伸二, 兒玉 了祐, 河仲 準二: *レーザー研究* **50** (2022) 377.
- 22) T. Taira: *Rev. Laser Eng.* **50** (2022) 382 (in Japanese).
 平等 拓範: *レーザー研究* **50** (2022) 382.
- 23) M. Nishiuchi and K. Kondo: *Rev. Laser Eng.* **50** (2022) 359 (in Japanese).
 西内 満美子, 近藤 公伯: *レーザー研究* **50** (2022) 359.
- 24) Y. Inubushi, T. Yabuuchi, T. Togashi, K. Sueda, K. Miyanishi, Y. Tange, N. Ozaki, T. Matsuoka, R. Kodama, T. Osaka, *et al.*: *Appl. Sci.* **10** (2020) 2224.
- 25) A. Yogo: *Rev. Laser Eng.* **50** (2022) 365 (in Japanese).
 余語 覚文: *レーザー研究* **50** (2022) 365.
- 26) K. Shigemori and A. Iwamoto: *OPTRONICS* **481** (2022) 67 (in Japanese).
 重森 啓介, 岩本 晃史: *OPTRONICS* **481** (2022) 67.
- 27) R. Kodama: *OPTRONICS* **481** (2022) 42 (in Japanese).
 兒玉 了祐: *OPTRONICS* **481** (2022) 42.