

J-KAREN-P ペタワットレーザーシステムとその利用研究の リモート化と自動化への取り組み

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

(国研)量子科学技術研究開発機構 関西光科学研究所(〒 619-0215 京都府木津川市梅美台 8-1-7)

Remote and Automation Initiative of the J-KAREN-P Petawatt Laser System and Its Research Applications

Hiromitsu KIRIYAMA, Yuji MASHIBA, Yasuhiro MIYASAKA, Nobuhiko NAKANII, Kotaro KONDO,
Akira KON, Yuji FUKUDA, and Mamiko NISHIUCHI

*Kansai Photon Science Institute, National Institutes for Quantum Science and Technology (QST),
8-1-7 Umemidai, Kizugawa, Kyoto 619-0215*

(Received August 5, 2022)

The Kansai Photon Science Institute of the National Institutes for Quantum Science and Technology (KPSI, QST) has been developing an ultrahigh-intensity Ti:sapphire chirped-pulse amplification laser system (named J-KAREN-P laser system) with petawatt ($PW = 10^{15}$ W) peak power and laser-driven quantum beam sources with J-KAREN-P. Here, we describe the configuration and output characteristics of the J-KAREN-P laser system and briefly discuss its application aimed at opening up a new research area of laser-driven quantum beam science and introduce the remote and automated operation of the J-KAREN-P laser system that started since in the last fiscal year.

Key Words: Ultrahigh-intensity laser, Ti:sapphire laser, Chirped-pulse amplification, Quantum beam science, Remote and automated operation

1. はじめに

1985年にチャープパルス増幅(Chirped-Pulse Amplification: CPA)法¹⁾が発明され、フェムト秒レーザーパルスを高エネルギーにまで増幅することが可能となりレーザーピークパワーは劇的に増大した。特に近年の大口径・高品質チタンサファイア結晶育成技術の進展に伴い、CPAを適用したチタンサファイアレーザーにより1~10ペタワット(= $PW = 10^{15}$ W)の超高ピークパワーを有するフェムト秒レーザー²⁾が世界各国で開発され、これらのレーザーを集光することで $10^{22} \sim 10^{23}$ W/cm²の超高集光強度³⁻⁵⁾が達成されている。最近では、ルーマニアのELI核物理施設において、10PWのピークパワーを1分間に1ショットの繰り返しで発生できるレーザーシステム⁶⁾が完成し、極限的な未踏の超高強度場での電子加速、イオン加速、X- γ 線発生や宇宙物理などの研究が行われようとしている。レーザー駆動量子ビームは、他の生成方法と比べてコンパクトで、時間的・空間的制御性に優れており、様々な産業・医療技術への応用が期待されている。

2. J-KAREN-P レーザー

2.1 システム構成

当機構で開発した0.1 Hzで動作するPWレーザー(J-KAREN-P レーザー)システム^{7,8)}及び照射室⁹⁾の構成と外観をそれぞれFig. 1とFig. 2に示す。レーザーシステムは2つのCPAステージで構成されている。1つ目のCPAステージから出力されるコントラスト(メインパルスと背景光の強度比)の高い高品質レーザー光は、2つ目のCPAステージにおいて、ナノ秒にパルス伸長され、OPCPA(Optical Parametric Chirped-Pulse amplification)前置増幅器と4つのチタンサファイア増幅器により段階的に増幅され、真空中に配置されたパルス圧縮器により高エネルギー増幅パルスがフェムト秒に圧縮される。レーザー照射室には2つの照射チャンバーが備えられており、圧縮後のレーザーは真空ビームラインにより、短焦点の集光光学系、あるいは長焦点の集光光学系が配置された照射チャンバーに導かれる。短焦点チャンバーでは 10^{22} W/cm²と高い集光強度での実験が可能であるため、より高いコントラスト動作を可能にするためプラ

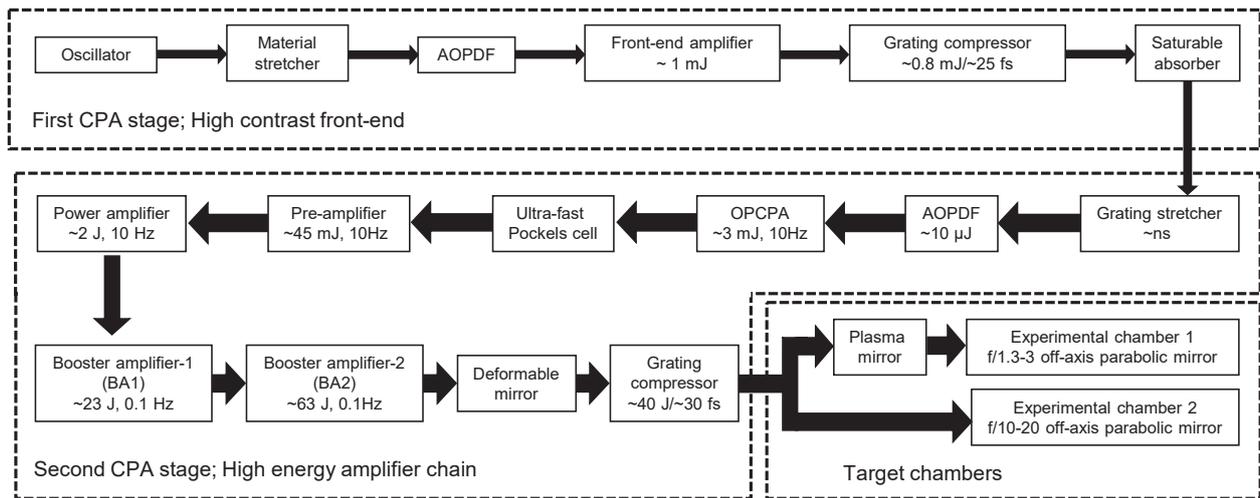


Fig. 1 Schematic diagram of the J-KAREN-P laser system.



Fig. 2 View of the J-KAREN-P laser system. (left) Laser room, (right) target chamber room.

ズミラー⁹⁾が導入されている。

2.2 レーザー時間特性

J-KAREN-P レーザーを集光することで 10^{22} W/cm² の高い強度が実現できる。このような超高強度光と固体密度、特にナノメートル厚薄膜やマイクロメートルスケールクラスター粒子との相互作用実験において、レーザーのコントラストは極めて重要となる。例えば、コントラストが10桁あったとしても、メインパルスより時間的に先行する背景光の強度は 10^{12} W/cm² となり、レーザーアブレーション閾値 (10^{10} W/cm²) を超えてしまう。このため、固体ターゲットはプラズマ化して膨張し、メインパルスはターゲット表面のプリプラズマと主として相互作用し、固体密度物質と直接相互作用できなくなる。従って、集光強度の向上に伴って多くの実験において、背景光によりプリプラズマが形成されないような高いコントラストが必要である。

先行する背景光、すなわち、コントラストを劣化させる原因として、1) 自然放出光の増幅(Amplified Spontaneous Emission: ASE)¹⁰⁾ やパラメトリック蛍光(Parametric Fluorescence: PF)によるナノ秒プリパルス¹¹⁾、2) 非線形結合によるフェムト秒プリパルス¹²⁾、3) ランダム位相ノイズ(Random Spectral Phase Noise: RSPN)によるピコ秒ベダスタル¹³⁾、がある。

J-KAREN-P レーザーでは、高コントラスト化のために以下の工夫をしている。ASEの抑制については、2つのCPAステージの間に可飽和吸収体(強度が低いノイズに対しては吸収体として働き強度が高いメインパルスに

対しては飽和して透明体として働く非線形フィルター)を配置し、1つ目のステージからの高エネルギーレーザー光のASE成分を除去し、高コントラスト化したシードレーザー光を2つ目のステージに導入している。2つ目のステージでは、背景光の発生が少ないOPCPAを用いるとともにシード光が高エネルギーであるためにOPCPAを低利得で動作させることでPFを抑制している¹⁴⁾。

メインパルスとポストパルスが互いに干渉し、メインパルスのスペクトル強度や位相が変調を受けることで、パルス圧縮後にフェムト秒プリパルスが発生する非線形結合過程が存在する。レーザーが透明媒質を透過するとき、媒質の表面と裏面の反射に起因するメインパルスより時間的に後から追従するポストパルスが発生する。レーザーシステムにおいて、プリパルスの発生原因であるほとんどの透過媒質の特定を行い、これらの媒質に微小な角度(ウエッジ)をつけることで、ポストパルスを除去し、プリパルスの発生を抑制している¹⁵⁾。

以上のASEとPF、及び非線形結合を抑制する高コントラスト化技術を導入する前後でのJ-KAREN-Pレーザーのコントラスト特性をFig. 3(a), Fig. 3(b)にそれぞれ示す。コントラストはレーザー室にある小型のパルス圧縮器を用いて全ビームを用いて計測した。ASEとPF

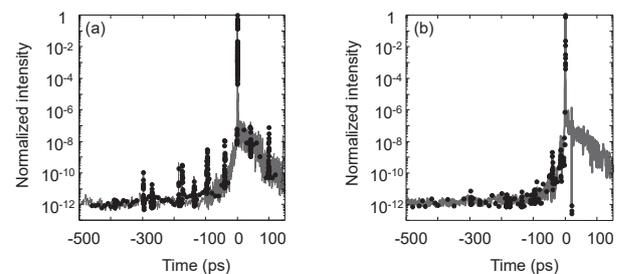


Fig. 3 Typical contrast of the J-KAREN-P laser system with ~1 J (solid line) and ~10 J (black filled circle) output energies (a) before and (b) after employing optical components with a small wedge angle.

は計測器の検知限界である 12 桁が実現され、ほとんどのフェムト秒プリパルスを取り除くことに成功している。

次に、RSPN の抑制について述べる。パルス拡張器において、レーザーは空間的に波長ごとに違った方向へ分散される。この時、光学素子の表面精度が悪い(表面に凸凹がある)と波長ごとに本来想定される光路長に対して誤差(RSPN)が生じる。オフナー型のパルス拡張器において、凸面鏡の表面精度が悪いとメインパルス周辺 ~ 100 ps のペDESTAL 発生原因となる。このため、表面精度が 1 ~ 2 nm(rms) であった凸面鏡を 0.2 ~ 0.3 nm(rms) と凸凹の小さい凸面鏡に替えることで、RSPN を抑制している¹⁶⁾。

以上のように RSPN を抑制する高コントラスト化技術を導入する前後での J-KAREN-P レーザーのコントラスト特性を Fig. 4(a), Fig. 4(b) にそれぞれ示す。メインパルスの ~ 25 ps 前まで 12 桁の高いコントラストを達成することに成功した。

プラズマミラー(シングルプラズマミラー構成)を用いることで、更に 2 桁のコントラストが改善できることを確認している⁹⁾。現在、プラズマミラーのアップグレード中で、コーティングの最適化やダブルプラズマミラー構成とすることで現状のシングルプラズマミラー構成時よりも更に 2 ~ 3 桁のコントラスト改善を実現する予定である。

2.3 レーザー空間特性

レーザー集光強度の劣化、すなわちレーザーの波面を悪化させる原因として、1)色収差、2)球面収差や非点収差、3)角度分散、がある。

色収差については、レーザーシステム内のビーム拡大光学系を透過型タイプではなく、全て反射型タイプにすることで取り除いた。球面収差や非点収差については、Fig. 1 に示すようにレーザーシステム内に形状可変鏡を導入し、大口径ビームの波面を高精度に計測し、その情報を形状可変鏡にフィードバックすることにより、取り除いた。角度分散については、精密な回折格子の調整により取り除いた。

これらにより、波面がほぼ完全に揃ったレーザー光が実現でき、最終的に理論限界まで集光することに成功した。

形状可変鏡による球面収差や非点収差の補正前後での

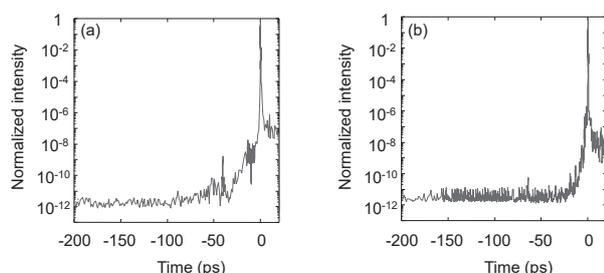


Fig. 4 Typical contrast of the J-KAREN-P laser system with the Öffner stretcher's convex mirror roughness of (a) 1 ~ 2 nm RMS and (b) 0.2 ~ 0.3 nm RMS.

J-KAREN-P レーザーの波面の計測結果と計測結果より予測される集光特性の計算結果を Fig. 5(a), Fig. 5(b) にそれぞれ示す。また、Fig. 5(c) に収差や角度分散を取り除いた後、f/1.3 の軸外し放物面鏡で集光して実験的に得られた集光スポットを示す。回折限界の ~ 1.35 μm (FWHM) が得られた。J-KAREN-P レーザーパワー 300 TW で 10^{22} W/cm^2 の極限的な強度を 0.1 Hz で達成した³⁾。

3. J-KAREN-P レーザーの利用研究例

当機構では高強度場科学研究を進めている。ここでは、現在進めているレーザー駆動粒子加速研究の一部について簡素に紹介する。

超高強度レーザーと固体薄膜との相互作用では、従来法(高周波加速)では不可能な ~ 100 TV/m もの高勾配電場をわずかマイクロメートル以下の極微小空間に生成できるため、コンパクトな加速器が実現できるものと期待されている。

レーザー駆動イオン加速においては、この高勾配電場により、重イオンであっても多価電離イオンを生成可能である。これまで、鉄イオンを 16 MeV/u まで加速すること¹⁷⁾や、45 価まで電離した銀イオンを 23 MeV/u まで加速すること¹⁸⁾に成功している。

シース電場によって加速されるイオンは特段の工夫をしない限り、主に表面吸着物由来の水素イオンが先立って加速され、重イオンの加速効率が低い課題がある。そこで、我々はチタン薄膜がナノメートル級と非常に薄く安定な酸化被膜を有することに着眼した。小型の加熱用 CW レーザーを用いて、表面吸着物を脱離させながら酸化膜を露出させたチタン薄膜に高強度レーザーを照射することで、高効率に準単色のスペクトルを持つ酸素イオンを加速することに成功している¹⁹⁾。

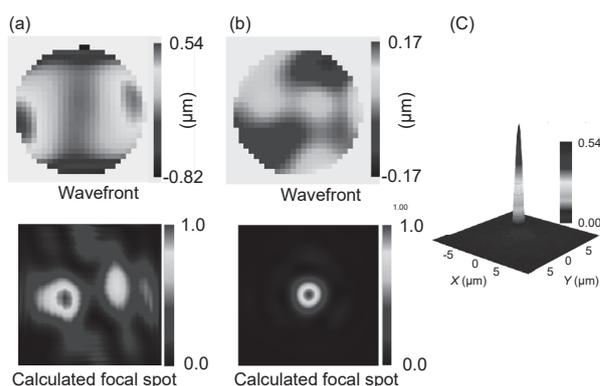


Fig. 5 Typical wavefront and calculated focal spot of the J-KAREN-P laser system and corresponding measured focal spot. (a) Wavefront calculated focal spot before the deformable mirror for 90 mm diameter. (b) Wavefront calculated focal spot before the compressor for 280 mm diameter after aberration correction. (c) Measured at focus spot with f/1.3 OAP (280 mm diameter with 300 TW peak power after compressor), the maxima correspond to the corresponding Strehl ratio (SR).

また、同じ固体ターゲットでも、水素クラスターと呼ばれる大きさがマイクロメートル程度の球状の固体水素を繰り返し発生させることの出来る装置を世界に先駆けて開発し²⁰⁾、この水素クラスターにレーザーを照射することでクラスター内に衝撃波を立て、衝撃波加速の原理に基づく新しいイオン加速メカニズムCSBA (Converging Shock-induced Blow-off Acceleration)²¹⁾による高品質な準単色陽子線発生の実験検証を実施している²²⁾。

超高強度レーザーと希薄なガスターゲットと相互作用させることで高エネルギーまで電子を加速する実験においては、これまで1 cmのガスターゲットで1 GeV程度の準単色電子ビームの観測することに成功した。並行して、電子バンチ長の評価技術の開発や、高エネルギー電子を利用した研究を進めている。

4. J-KAREN-P レーザーのリモート化と自動化

令和3年度より5年間、文部科学省が推進する「先端研究基盤共用促進事業(先端研究設備プラットフォームプログラム)」に採択され、J-KAREN-P レーザーのリモート化と自動化を進めている。

各年度における具体的な本プラットフォーム事業に対する取り組みをFig. 6に示す。1年目である昨年度は、フロントエンドの励起レーザー制御、レーザーパラメーター測定、及びレーザー遮光のリモート化を行った。2年目である現在は、前置増幅器用励起レーザーのリモート化を実施するとともに、レーザープロファイル画像な

どのリアルタイム可視化システムを構築中である。3年目は、繰り返し0.1 Hzと10 Hzのレーザーオペレーション変更と、レーザー減光のリモート化を行う。4年目は、照射室のレーザーエネルギー及びレーザースペクトル測定のリモート化と、それらデータのデータベース構築を行う。5年目は、レーザー室におけるレーザーエネルギー及びレーザースペクトル測定のリモート化、AI画像分析による大型ミラーダメージの自動検査とレーザーパラメーターの統合監視のための整備を行う。これらリモート化と可視化システムによって、レーザーオペレーションの多種多様な実験に対する運用効率の最大化を図り、同時に安全なレーザーオペレーションを実現する。

これまでに、Fig. 7に示すWebアプリケーションを開発し、J-KAREN-P レーザーシステム内に設置した遮光板や測定器をリモート操作して各増幅部での遮光やレーザーパラメーターの測定ができるように整備を行った。レーザーの遮光状態や測定状態はリアルタイムで可視化でき、レーザーオペレーション状況の共有がWebを用いた無線LANで可能となっている。非常時にレーザー出射をリモート操作で即時に停止することもできる。また、Fig. 7に示すようにレーザーシステム内の主要箇所にはレーザー光路自動制御システムを導入した。レーザーのポインティングを常時監視し、そのデータを取得し、アクチュエータが付属したミラーを自動で制御することで、レーザー立ち上げ時間を短縮するとともに、長時間の安定供給を可能とした。

5. まとめ

本稿では、J-KAREN-P レーザーのシステムの構成と、レーザーの利用研究で決定的に重要となる時・空間品質向上に関する技術開発と現在得られているレーザー特性を紹介した。ASEやPF、非線形結合によるプリパルス、及びRSPNによるペDESTAL抑制技術を開発することにより、メインパルスの~25 ps前まで12桁と高いコントラストでのレーザーパルスを実現した。現在、シングルプラズマミラー構成で更に2桁のコントラスト改善を実現したが、ダブルプラズマミラー構成とするとともにコーティングの最適化を行うことで、現状のシングルプラズマミラー構成時に比して更に2~3桁のコントラスト向上を目指してプラズマミラーをアップグレード中である。また、集光強度の劣化、すなわち波面を悪化させる原因を特定し、色収差、球面収差、非点収差、角度分

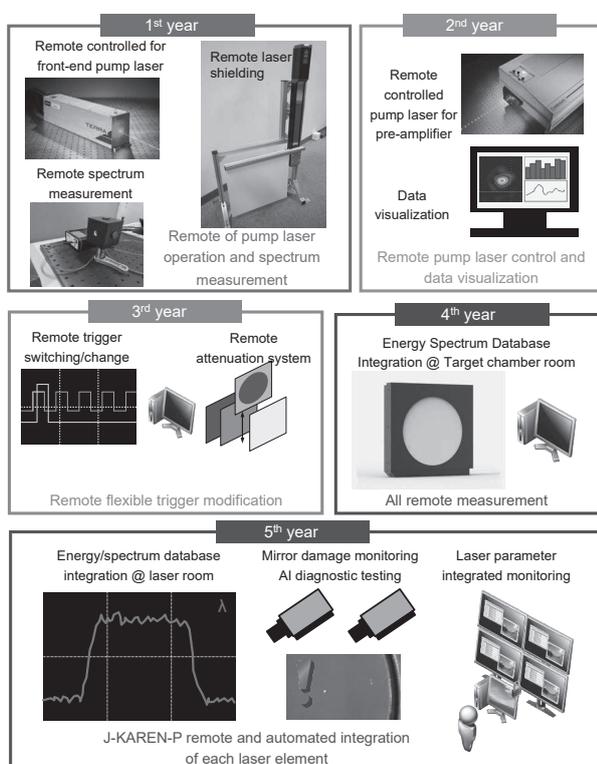


Fig. 6 DX platform initiative for the J-KAREN-P laser system at QST.

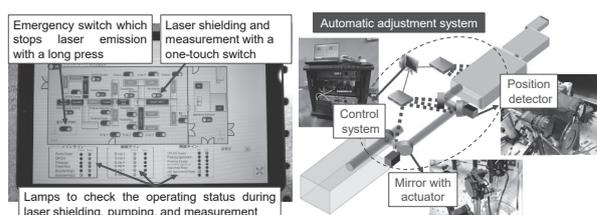


Fig. 7 Example of (left) remote control and (right) automatic adjustment system for the J-KAREN-P laser system.

散を補正及び調整するシステムをレーザーシステムに導入し、 10^{22} W/cm²の極限的な集光強度を0.1 Hzで可能とした。J-KAREN-Pレーザーの利用実験として、ここで紹介したイオン・電子加速実験以外にも高輝度X線発生実験など様々な実験に取り掛かり、優れた成果が創出されている。

文部科学省が推進する先端研究基盤共用促進事業の先端研究設備プラットフォームプログラムに採択され、J-KAREN-Pレーザーのリモート化と自動化を進めている。併せて、国内有数のパワーレーザー研究施設をネットワーク化し、ワンストップサービスと施設のデジタルトランスフォーメーションを進めることで、研究者に高度な利用支援を提供できる研究施設プラットフォームを形成することに貢献する。これらを通して、レーザー制御の新しいコンセプトの発見、医療・産業創成において、多様な新たな展開が生まれることを期待したい。

謝 辞

本研究の一部はJSPS科研費JP20H01882, JP16K17686, JP21H01103, JP22K12665, JP20H00140, JP21KK0049, JP22H00121及びJST未来社会想像事業JPMJMI17A1とさきがけJPMJPR16P9の支援を受けたものです。また、本研究の一部は文部科学省先端研究基盤共用促進事業(先端研究設備プラットフォームプログラム)JPMXS0450300221で共用された機器を利用した成果です。

参考文献

- 1) D. Strickland and G. Mourou: *Opt. Commun.* **56** (1985) 219.
- 2) N. C. Danson, C. Haefner, J. Bromage, T. Butcher, F. C. J. Chanteloup, A. E. Chowdhury, A. Galvanauskas, A. L. Gizzi, J. Hein, I. D. Hillier, *et al.*: *High Power Laser Sci. Eng.* **7** (2019) e54.
- 3) S. A. Pirozhkov, Y. Fukuda, M. Nishiuchi, H. Kiriya, A. Sagisaka, K. Ogura, M. Mori, M. Kishimoto, H. Sakaki, P. N. Dover, *et al.*: *Opt. Express* **25** (2017) 20486.

- 4) Z. Guo, L. Yu, J. Wang, C. Wang, Y. Liu, Z. Gan, W. Li, Y. Leng, X. Liang, and R. Li: *Opt. Express* **26** (2018) 26776.
- 5) W. J. Yoon, G. Y. Kim, W. Il, J. H. S. Choi, J. H. Sung, W. H. Lee, K. S. Lee, and H. C. Nam: *Optica* **8** (2021) 630.
- 6) F. Lureau, G. Matras, O. Chalus, C. Derycke, T. Morbieu, C. Radier, O. Casagrande, S. Laux, S. Ricaud, G. Rey, *et al.*: *High Power Laser Sci. Eng.* **8** (2020) e43.
- 7) H. Kiriya, S. A. Pirozhkov, M. Nishiuchi, Y. Fukuda, K. Ogura, A. Sagisaka, Y. Miyasaka, M. Mori, H. Sakaki, P. N. Dover, *et al.*: *Opt. Lett.* **43** (2018) 2595.
- 8) H. Kiriya, S. A. Pirozhkov, M. Nishiuchi, Y. Fukuda, A. Sagisaka, A. Kon, Y. Miyasaka, K. Ogura, P. N. Dover, K. Kondo, *et al.*: *Crystals* **10** (2020) 783.
- 9) A. Kon, M. Nishiuchi, Y. Fukuda, K. Kondo, K. Ogura, A. Sagisaka, Y. Miyasaka, N. P. Dover, M. Kando, A. S. Pirozhkov, *et al.*: *High Power Laser Sci. Eng.* **10** (2022) e25.
- 10) Y.-H. Cha, Y.-W. Lee, S. M. Nam, J. M. Han, Y. J. Rhee, B. D. Yoo, B. C. Lee, and Y. U. Jeong: *Appl. Opt.* **46** (2007) 6854.
- 11) F. Tavella, A. Marcinkevičius, and F. Krausz: *New J. Phys.* **8** (2006) 219.
- 12) V. N. Didenko, V. A. Konyashchenko, P. A. Lutsenko, and Y. S. Tenyakov: *Opt. Express* **16** (2008) 3178.
- 13) H. Kiriya, Y. Mashiba, Y. Miyasaka, and R. M. Asakawa: *Rev. Laser Eng.* **46** (2018) 142.
- 14) H. Kiriya, M. Mori, Y. Nakai, T. Shimomura, H. Sasao, M. Tanoue, S. Kanazawa, D. Wakai, F. Sasao, H. Okada, *et al.*: *Opt. Lett.* **35** (2010) 1497.
- 15) H. Kiriya, Y. Miyasaka, A. Sagisaka, K. Ogura, M. Nishiuchi, A. S. Pirozhkov, Y. Fukuda, M. Kando, and K. Kondo: *Opt. Lett.* **45** (2022) 1100.
- 16) H. Kiriya, Y. Miyasaka, A. Kon, M. Nishiuchi, A. Sagisaka, H. Sasao, and A. S. Pirozhkov: *High Power Laser Sci. Eng.* **9** (2022) e62.
- 17) M. Nishiuchi, H. Sakaki, T. Zh. Esirkepov, K. Nishio, T. A. Pikuz, A. Ya. Faenov, I. Yu. Skobelev, R. Orlandi, A. S. Pirozhkov, A. Sagisaka, *et al.*: *Plasma Phys. Rep.* **42** (2016) 327.
- 18) M. Nishiuchi, N. P. Dover, M. Hata, H. Sakaki, K. Kondo, H. F. Lowe, T. Miyahara, H. Kiriya, J. K. Koga, N. Iwata, *et al.*: *Phys. Rev. Research* **2** (2020) 033081.
- 19) K. Kondo, M. Nishiuchi, H. Sakaki, N. P. Dover, H. F. Lowe, T. Miyahara, Y. Watanabe, T. Ziegler, K. Zeil, U. Schramm, *et al.*: *Crystals* **10** (2020) 837.
- 20) S. Jinno, M. Kanasaki, M. Uno, R. Matsui, M. Uesaka, Y. Kishimoto, and Y. Fukuda: *Plasma Phys. Control. Fusion* **60** (2018) 044021.
- 21) R. Matsui, Y. Fukuda, and Y. Kishimoto: *Phys. Rev. Lett.* **122** (2019) 014804.
- 22) Y. Fukuda: *Rev. Laser Eng.* **50** (2022) 371 (in Japanese).
福田 祐仁: *レーザー研究* **50** (2022) 371.