

# 「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」 2024年度シンポジウム予稿集

## － プログラム －

司会：量子科学技術研究開発機構 近藤公伯

13:00 開会挨拶

プログラスマネージャー 佐野雄二

科学技術振興機構 未来社会創造事業 大規模プロジェクト型

運営統括 大石善啓

文部科学省 科学技術・学術政策局 研究開発戦略課 戦略研究推進室

室長 遠藤正紀

13:15 「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」

プロジェクト紹介および成果

プログラスマネージャー 佐野雄二

13:55 高品質レーザー駆動電子ビーム生成とそれを用いた

X線自由電子レーザー開発の現状

量子科学技術研究開発機構 神門正城

14:20 レーザー加速電子ビームの体内創薬への利用の可能性

大阪大学 細貝知直

14:45 量子メス加速器のためのレーザー駆動イオン入射器の開発

量子科学技術研究開発機構 小島完興

15:10 <<休憩>>

司会：量子科学技術研究開発機構 神門正城

15:25 高平均出力パワーレーザーモジュールSENJU

－大口径アクティブミラー増幅システムの開発－

大阪大学 余語覚文

15:50 Tiny Integrated Lasers for Laser Plasma Acceleration and Beyond

理化学研究所 Arvydas Kausas

16:15 レーザー加速のためのオゾンガス光学素子

電気通信大学 道根百合奈

16:40 総合討論

16:55 閉会挨拶

プログラスマネージャー 佐野雄二

# レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証 プロジェクト紹介および成果

自然科学研究機構 分子科学研究所 佐野 雄二

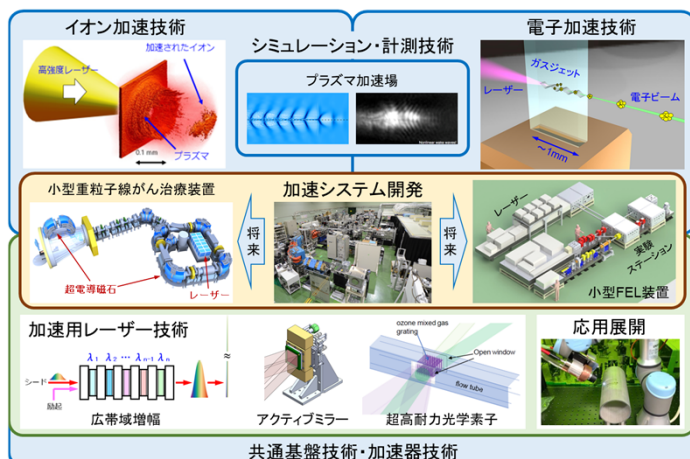
## はじめに

加速器は100年に及ぶ歴史をもち、宇宙・物質・生命の謎に迫るツールとして最先端の基礎研究に大きく貢献している。また、材料の高機能化や非破壊検査、がん治療や創薬など、幅広い分野で活用されている。近年、桁違いに高い加速勾配をもつレーザープラズマ加速が注目され、世界各国で技術開発が進められている。この技術により加速器の小型化が実現できれば、加速器の更なる普及はもとより、装置規模の観点から高エネルギー化が限界に近づきつつある加速器およびその応用研究に、新たなブレークスルーをもたらすことが期待できる。

## プロジェクトの概要

「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」は2017年に始動した10年プロジェクトであり、レーザープラズマ加速に関する基盤技術開発とともに社会実装を見据えた技術開発を推進している。10年の開発は4年／3年／3年の3段階のステージで構成され、「ステージゲート方式」により緊張感ある開発を行っている。

ステージ1（2017～20年度）では、レーザーとレーザー加速に関わる優れた要素技術の発掘・育成・評価を行った。ステージ2（2021～23年度）では、ステージ1で発掘・育成した技術の更なる高度化を推進し、電子およびイオン加速技術としてのシステム化を行った。



「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」開発内容

## これまでの開発成果

ステージ1～2では、レーザープラズマ加速に関わる基盤技術開発を進めるとともに、加速器システムを目指した開発、その応用技術の開発、高出力レーザーに関する要素技術の開発・社会展開を推進した。

電子加速では、ターゲット(ガスジェット)やレーザー波面の改良により加速エネルギー300～400MeV、電荷10～20pCの安定な電子ビームの発生に成功した。また、その電子ビームを磁力反発型小型アンジュレータに導入することで、XUV領域の自由電子レーザー(FEL)の増幅を確認した。また、電子ビームの応用として、創薬・医療に関わる研究開発を医薬工連携で推進し、生体内の局所的な部位で薬剤を活性化させる新しい化学療法の可能性を明らかにした。イオン加速では、加速用レーザーの改良・整備、イオン発生用薄膜ターゲットの開発、イオン輸送ビームラインの整備を行った。また、高周波誘導加熱によるターゲット表面の不純物除去、炭素イオンの高純度化技術の開発等を行い、がん治療装置入射器に必要とされる一連の動作を確認した。レーザー開発では、排熱を促進するアクティブミラーや常温接合技術の開発・活用によるポンプレーザーの大幅な高出力化・小型化に成功した。また、オゾンガスを使用した超高耐力光学素子、新奇セラミックスレーザー媒質、光学素子の損傷評価技術などに大きな進展を得た。更には、民間企業との協力により高出力パルスレーザー要素技術の応用展開を推進した。

## ステージ3(2024～2026年度)の開発計画

電子加速では、電子入射器および自由電子レーザー(FEL)の高度化、シミュレーションを駆使した多段加速による電子の高エネルギー化などを実施する。また、創薬・医療、非破壊検査、材料評価などへの応用検討を行う。イオン加速では、加速用レーザー、炭素イオン発生装置、計測用ビームライン、リアルタイムイオンモニターなどを組合せ、量子メス(次世代重粒子線がん治療装置)のイオン入射器としての実証実験を行う。レーザーについては、優れた新奇要素技術の開発を継続して応用展開を図るとともに、電子およびイオン加速に供するための新しい高出力極短パルスレーザーの検討を行う。

## 参考資料(ホームページ)

<https://www.jst.go.jp/mirai/jp/program/large-scale-type/theme01.html>

<https://lpa.ims.ac.jp/>

# 高品質レーザー駆動電子ビーム生成とそれを用いた X線自由電子レーザー開発の現状

量子科学技術研究開発機構 関西光量子科学研究所 神門正城

## 目指す姿

レーザープラズマ電子加速による電子加速器の小型化、および大型のX線自由電子レーザー(FEL)の小型化を行い、新材料開発などに資することで豊かな未来社会を創出する。

## 開発目標

- レーザープラズマ電子加速ビームによる極端紫外領域(<100 nm)の自由電子レーザー増幅の実証
- 10 keVのX線自由電子レーザーを実現できるレーザープラズマ電子加速ビームを実証

## 方法

レーザープラズマ電子加速法[1]を高度化することにより、既存の加速器を大幅に小型化する。レーザープラズマ加速は、これまでに基礎的な研究から、10 GeVの電子エネルギーや、単色性、短パルス性など好ましい性能が報告されているが、その安定性は高くなく、実用化には至っていない。私たちは、安定化こそ最も重要な開発目標と捉えて、レーザーの波面、プラズマ源となるガスジェットターゲットの開発、安定化を行なっている。これまでに、ガスジェット中にカミソリの刃を導入して作った衝撃波による電子密度の急峻な変化部による電子入射方式を採用し、ガスジェットの安定化開発[2,3]、レーザーへのマスク導入[4]により、単色性がよく、ポインティング性能も高い、安定な電子ビームが出せるようになってきた。昨年度からこの電子ビームが自由電子レーザー発振可能な性能であることを実証するため、アンジュレータに導入し、極端紫外領域の放射光計測を開始した。

## 成果

レーザープラズマ電子ビームを永久磁石四重極とパルス電磁石、ステアリング磁石を用いておよそ6.2 m程度ビームを輸送し、アンジュレータ中に導く。アンジュレータは、真空封止、可変ギャップ長(アンジュレータの偏向定数 $K \leq 1.65$ )で周期長25 mm、磁石長1 mを2台直列

に繋いだものである。また、アンジュレータは強力な磁気吸引力を相殺する磁石を装備しており、従来のアンジュレータよりも軽量化が図られている。電子ビームはおおよそ400 MeV、10 pC程度が発生できており、波長42 nm(光子エネルギー30 eV)が発生する( $K=1.45$ の場合)。この極端紫外領域(Extreme Ultraviolet, XUV)の放射光を楕円体ミラーにより1:1の倍率でアンジュレータから約1 mの像をX線カメラ上に結像させ、プロファイルを計測する。その経路途中に透過型回折格子を挿入することで、XUV光を分光計測する。

図にXUV光を分光した像の例を示す。この図のように、アンジュレータからのXUV領域の放射光を観測することに成功した。アンジュレータの長さを変えた場合に、XUV光の強度が非線形に増大することなどから、XUV領域のFEL増幅を示唆する結果を得た。講演では、このXUV増幅の最新の結果を紹介するとともに、将来の応用の展望も述べる。

## 参考文献

- [1] T. Tajima and J. M. Dawson, Phys. Rev. Lett. 43, 263 (1979).
- [2] Z. Lei et al., High Power Laser Sci. Eng. 11, e91 (2023).
- [3] Z. Lei et al., Rev. Sci. Instrum. 95, 015111 (2024).
- [4] N. Nakanii et al., Appl. Phys. Express 16, 026001 (2023).

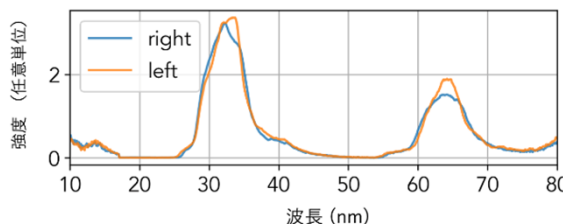


図 アンジュレータからのXUV光

## レーザー加速電子ビームの体内創薬への利用の可能性

大阪大学 産業科学研究所 細貝知直

### 背景

抗がん剤によってがん細胞の増殖を抑える化学療法と、粒子線やX線を利用した放射線療法は、非侵襲的で治療効果が高いことから、外科手術と並ぶがん治療の柱である。化学療法では、抗がん剤を用いてがん細胞の増殖を効果的に抑制しがんの進行を遅らせるが、その効果はがん細胞だけでなく正常細胞にも作用し全身に副作用を引き起こす場合がある。そのため、抗がん剤の効果を患部局所に限定する戦略の一つにプロドラッグの使用がある。プロドラッグは薬理的に不活性な化合物であり、内因性(例えば、酸性または酸化環境など)または外因性(例えば、超音波や可視～近赤外光など)の刺激により標的部位において活性な薬物に変化する。外因性の局所物理刺激として紫外線や可視～近赤外光を用いた例が報告されているが、その組織深達性の低さから体の深部病変を標的とするのは難しい。一方、放射線治療は、粒子加速器の高エネルギー粒子線やX線を体内のがん組織に照射し、がん細胞のDNAを直接または間接的に損傷して破壊する。陽子線や重粒子線は高い組織深達性を持ち体の深部病変を直接標的にすることが可能で、さらに、高エネルギーの放射線や粒子線は、細胞内の水の電離によって水和電子やOHラジカルなどの活性酸素種を生成し、間接的な影響として二本鎖切断などのDNA損傷を引き起しがん細胞を破壊することも知られている。しかしながら、高線量の放射線は病変周囲の正常組織を損傷し副作用を引き起こす可能性もある。

我々は、組織深達性の高い高エネルギーの放射線や粒子線の照射で誘導される水和電子やOHラジカルなどの活性物質が不活性な薬物を高効率で活性化させる化学反応を誘発する可能性に注目し、低被曝線量のこれらを体の深部病変に投与したプロドラッグの外因性の局所物理刺激として利用することを検討している。

### レーザー加速電子ビームを用いた化学治療

我々は、組織深達性の高い相対論的電子ビームの低線量照射をトリガーとしてプロドラッグを活性化させる「相対論的電子ビーム化学療法(U-REBIT: Ultra-Relativistic Electron Beam Induced chemoTherapy)」を提案し[1,2]、レーザー航跡場加速器(LWFA: Laser Wakefield Acceleration)の開発とともに実施している。図1にU-REBITの概念図を示す。LWFAで生成する、~300MeV(メガ電子ボルト)のエネルギーの相対論的電子ビームは、高い指向性を維持したまま、大きく減衰することなく体内深部まで到達・通過する。この電子ビームを用いることで体幹深部局所に限定してプロドラッグを活性化することが可能となり、従来は非侵襲での対処が困難であった体幹深部の疾患にも局所の化学治療で対応可能となることが期待される。

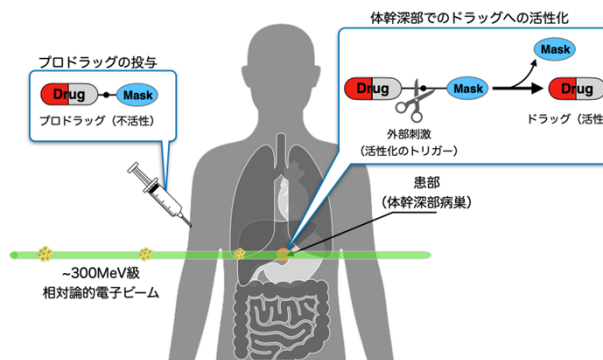


図1 相対論的電子ビーム化学療法(U-REBIT)の概念図

### 開発状況

これまでに、数種類のヒトがん細胞を用いたin vitro実験とがんモデルマウスを用いたin vivo治療実験において、プロドラッグ化した数種類の抗がん剤を線形加速器もしくはLWFAからの相対論的電子ビームの照射によって活性化し、その抗がん剤の生理活性や薬理効果が照射された局所部位で特異的に発現することを確認している[1]。さらに、複数の新たなプロドラッグの開発も同時に進めている[3]。講演では、相対論的電子ビームをトリガーとして利用するプロドラッグ活性化技術の可能性について報告する。

### 参考文献

1. T.Hosokai, Y. Yamashita, et.al, *Nature Physics*, Under review (2024).
2. 特許出願済み
3. 山下泰信、細貝知直、他 第49回反応と合成の進歩シンポジウム; 抄録集P.44

## 量子メス加速器のためのレーザー駆動イオン入射器の開発

量子科学技術研究開発機構(QST) 関西光量子科学研究所  
レーザー駆動イオン加速器開発プロジェクト 主任研究員

小島 完興

### 【 開発目標 】

我々、イオン加速ユニットではレーザープラズマ加速技術を応用した重イオン入射器の開発に取り組んでいる。開発するイオン入射器は次世代の小型重イオン線がん治療装置へ搭載することを予定しており、医療分野での社会実装を目指している。重イオン線がん治療では、身体深部にあるがん細胞に炭素イオン（陽子に比べて重いイオン種）を照射して死滅させる。この際、炭素イオンを光速の約73パーセントにまで加速する必要があるため、現状では大規模な加速装置や専用の建屋が必要となる。今後の重イオン線がん治療の展開に向けて、QSTでは既存する装置（重イオン線がん治療装置 HIMAC）を約1/40（面積比）に小型化する“量子メス”と呼ばれる次世代重イオン線がん治療装置の開発を産官学連携で進め、2030年の実用化を目指している。治療装置の大幅な小型化は、革新的な2つの新規技術（超伝導シンクロトロンとレーザー駆動イオン入射器）の導入で達成される計画である。2大技術の1つである超伝導シンクロトロンは、すでに実証機の製作段階にある。もう一つの技術であるレーザー・プラズマ加速を用いた新型イオン入射器が我々のユニットの開発目標である。

### 【 研究進捗 】

未来社会創造事業(JPMJMI17A1)の支援を受けて行われた2つのステージに及ぶこれまでの研究では、重イオン加速のドライバーとなる高強度レーザー装置、レーザー照射し重イオンを加速する標的技術、加速された重イオンを輸送するイオン輸送系とそれぞれ必要な要素技術が開発されてきた。

標的技術に関連して、レーザー駆動イオン加速では標的薄膜を覆う炭化水素や水がプロトンの供給源となるため、どのような元素が標的の場合であっても加速されるイオン種がプロトンとなる根本的な問題があった。我々のチームでは誘導加熱を利用して炭化水素や水を100ミリ秒以下の短時間に除去する装置をこれまでに開発し、レーザー駆動で重イオンを高繰り返しに加速することに世界で初めて成功した<sup>[1,2]</sup>。

ステージ2の後半からはそれまでに開発された要素技術を繋ぎ合わせることでレーザー駆動重イオン入射器の原型機として稼働させることに成功した。原型機が稼働したことで、レーザー駆動で加速したイオンバンチをイオン用レンズで収束させながら4m以上下流へと制御して輸送できるようになった。またイオンバンチのビームパラメータの計測には、非破壊型の壁電流モニターやファラデーカップなど既存の加速器の研究分野で使用されてきた信頼度の高い計測器が使用された。通常、レーザー駆動イオン加速の研究では、高強度レーザーが生み出す過酷なノイズのため、イオンバンチの電荷量を読みとるような直接的で信頼性の高い計測はこれまで行えていなかった。

原型機の持つ収束機能と輸送機能によって大電流のイオンバンチの輸送が可能となり、イオンバンチの電荷量、空間分布、エミッタンス、ビーム時間幅などが高精度で計測可能となった。

講演では、レーザー駆動重イオン入射器の最新の開発進捗を報告する。

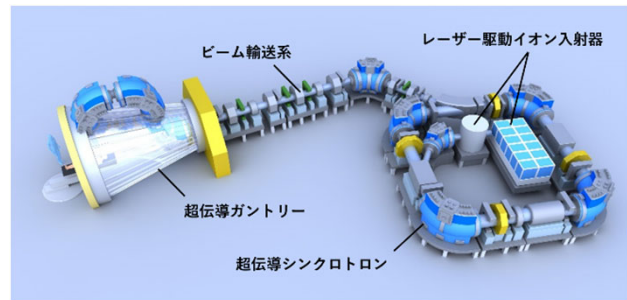


図1 次世代重イオンがん治療装置  
(量子メス)

[1] Sadaoki Kojima et al., Matter and Radiation at Extremes 8, 054002 (2023).

[2] 特願: 2022-190747, 国際出願: PCT/JP2023/ 41213

QST(関西地区): 榎 泰直, デン タンフン, 畑 昌育, 森 道昭, 長谷川 登, 石野 雅彦,  
青山 誠, 伊東 富由美, 山本 洋一, 錦野 将元, 神門 正城, 近藤 公伯  
日立造船株式会社: 黒木 宏芳, 清水 祐輔, 原田 寿典, 井上 典洋  
住友重機械工業株式会社: 大友 清隆, 戸内 豊, 筒井 裕士, 松原 雄二  
九州大学: 松本 悠椰, 村川 真宙  
奈良女子大学: 大石 沙也加, 岡野 朱莉, 熊谷 嘉晃, 石井 邦和  
QST(千葉地区): 宮武 立彦, 白井 敏之

Hitz  
Hitachi Zosen

QST

住友重機械

九州大学  
KYUSHU UNIVERSITY

国立学法人  
奈良女子大学  
Nara Women's University

# 高平均出力パワーレーザーモジュール SENJU —大口径アクティブミラー増幅システムの開発—

大阪大学レーザー科学研究所 余語 覚文

## プロジェクト内での位置づけ

レーザー駆動量子ビーム加速器(レーザー加速器)の社会実装には、高繰り返し・高パルスエネルギー・超短パルスレーザーが必要不可欠である。そのために、超広帯域増幅が可能なチタンサファイア結晶や光パラメトリック非線形光学結晶を励起するための必要性能を有するとともに、多様なレーザー応用分野におけるイノベーションに資する機能・性能を兼ね備えた“革新的パワーレーザー”の技術確立を目指す。

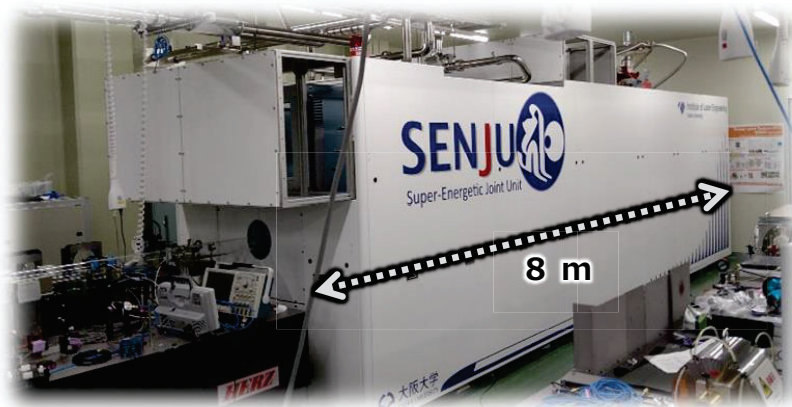
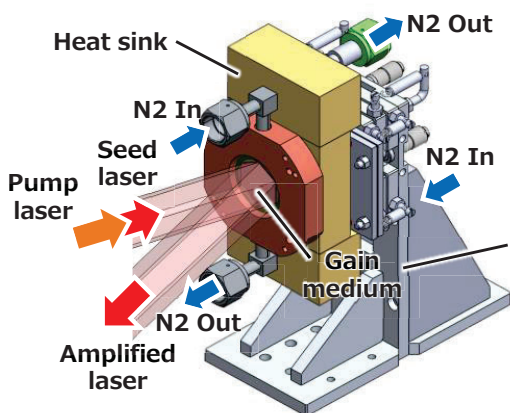
## 他分野への適用、今後の計画

チタンサファイアレーザー用の励起レーザー開発に主眼を置き、以下の技術確立を目標設定した。

- ① 高安定・高効率・高ビーム品質の10J, 100Hzレーザー技術
  - ② レーザー加速器の社会実装に必要な100J級, 100Hz励起レーザーに繋がるパワースケーラブル技術
- 成果として下記の技術を確立した。

- ① 低温冷却Yb:YAGアクティブミラー方式の有効性と先進性を口径5cm級で実証した。10.2J, 100Hz (1.02kW)動作を達成。出力変動を0.7% rmsにまで抑制すると共に、光・光変換効率31.3%を達成した。
- ② 上記の成果に拡大スケーリング則を適用して、口径10cm級アクティブミラーを用いた100J, 100Hz増幅器モジュールSENJU: Super Energetic Join Unit を構築した(別予算)。

今年度は、システム再設計によってコンパクト化した口径5cm級アクティブミラー増幅モジュール:SENJU-lite(別予算含む)において10J, 100Hzの定常動作を実証すると共に、口径10cm級アクティブミラー増幅器SENJUの100J, 100Hz実証試験(別予算)を実施する計画である。



(左)口径5cm級アクティブミラーの概要図 (右)口径10cm級アクティブミラー増幅器モジュールSENJU

今後は次期パワーレーザー施設構想「多様な知が活躍できるパワーレーザー国際共創プラットフォーム: J-EPoCH計画」(文部科学省「学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想:ロードマップ2023)の実現に向けて、ユーザー利用システムの整備を含めた開発を実施する。

## 参考文献

1. J. Ogino, et al., “10 J operation of a conductive-cooled Yb:YAG active-mirror amplifier and prospects for 100 Hz operation,” *Optics Letters*, 46 (3), 621–624 (2021).
2. J. Ogino, et al., “10-J, 100-Hz conduction-cooled active-mirror laser,” *Optics Continuum*, 1 (5), 1270–1277 (2022). (15 Popular Papers on Lasers and Lasers Optics, 11th May, 2023)
3. 荻野純平, 他, 第47回レーザー学会業績賞進歩賞「革新的パワーレーザーの開発- 伝導冷却アクティブミラーレーザー」, 2023年5月31日.

## Tiny Integrated Lasers for Laser Plasma Acceleration and Beyond

Arvydas Kausas<sup>1,2</sup>, Vincent Yahia<sup>2,1</sup>, Hideho Odaka<sup>1,2</sup>, Mitsuhiro Yoshida<sup>3,2</sup> and Takunori Taira<sup>1,2</sup>

1. Laser-Driven Electron-Acceleration Technology Group, RIKEN SPring-8 Center, Japan
2. Institute for Molecular Science, Okazaki, Japan
3. Accelerator Division V, KEK, Tsukuba, Japan

### The need for technology within the project

Constructing a tool for comprehending the laws of the Universe poses a challenging task, demanding national funding and establishment of connections between diverse research groups and engineering teams. One such tool is particle accelerator, involving acceleration of light and heavy particles to near-light speeds, followed by collisions or the generation of secondary source radiation, opening new opportunities for exploring the Laws of Nature. Conventional facilities like SPring-8 in Japan or the Large Hadron Collider necessitate accelerators ranging from several hundred meters to nearly 30 kilometers in length, consuming extensive space and resources. Alternatively, high-intensity light is utilized to accelerate particles, exemplified by laser plasma electron acceleration (LPA) [1].

### Technology

The LPA relies on a Petawatt laser source creating plasma in a guided channel for accelerating electrons through plasma wakefields. Recent advancements include demonstrating petawatt (PW) laser-guided electron beam acceleration to 8 GeV in a laser-heated capillary discharge waveguide as part of LPA. However, the current size of PW-class lasers negates their compact acceleration advantages. Addressing this, there is a critical need to reduce the size of petawatt (PW) lasers. Overcoming challenges related to achieving pulse energies greater than 2 Joules and a compact, room-temperature-operating laser source with a repetition rate of 100 Hz remains a significant focus in laser-driven electron acceleration.

A novel approach introduces an artificially-bonded composite structure using Distributed Face Cooling (DFC). This structure employs intermediate-layer assisted surface activated bonding (il-SAB), relying on surface activation and mechanical press at room temperature, eliminating internal stresses. Combining il-SAB bonding with DFC enhances thermo-mechanical properties, including effective thermal conductivity and thermal shock parameter.

We have successfully developed an amplifier system designed to operate at a repetition rate of up to 25 Hz, delivering over 2 J of energy with a sub-nanosecond pulse duration. The system comprises a front-end system providing over 100 mJ of energy to the main amplifier, which includes two main amplifier stages. The primary amplifier utilizes the DFC-PowerChip architecture and incorporates multiple bonded sapphire/Nd<sup>3+</sup>:YAG chips [2]. This amplifier system has been specifically designed to pump the Ti:sapphire laser used as an amplifier source in PW systems used for laser-driven particle acceleration.

### Application to other fields, future plans

In the realm of LPA, the downsizing of large lasers for electronic drive signifies a pivotal shift, mitigating the limitations imposed by conventional RF cavity-based accelerators. The potential to accelerate electrons to higher energies with a TILA-driven system not only streamlines LPA applications but also extends the reach of laser-driven electron acceleration to diverse fields such as engineering, chemistry, and medicine. Furthermore, the innovative bonding techniques introduced in this research lay the groundwork for the development of compact, high-power lasers that transcend current size constraints. This breakthrough paves the way for transformative applications, including advanced materials synthesis, drug development, and precise particle beam cancer therapy. The fusion of compact laser systems, TILA modules, and cutting-edge bonding methodologies promises a future where powerful lasers are not only more accessible but also more versatile, fueling progress and breakthroughs across a spectrum of scientific and technological endeavors.

### Reference

A. J. Gonsalves et al., "Petawatt Laser Guiding and Electron Beam Acceleration to 8 GeV in a Laser-Heated Capillary Discharge Waveguide," Phys. Rev. Lett. 122(8), 84801 (2019).

V. Yahia et al., "Joule-class sub-nanosecond pulses produced by end-pumped direct bonded YAG/sapphire modular amplifier," Opt. Express 32, 14377-14393 (2024).

## レーザー加速のためのオゾンガス光学素子

電気通信大学レーザー新世代研究センター 道根百合奈

### プロジェクト内での位置づけ

電通大で開発したオゾンガス光学素子を、①励起用レーザーの小型化、②イオンビーム発生でのデブリフリー集光光学系 ③レーザーによる電子追加加速で用いる電子ビーム透過・レーザー反射光学系 ④高耐力・長寿命なパルス圧縮用回折光学系 など既存のパラメータから桁違いに耐力等が高い光学素子の特質を活かし、レーザー加速システムの社会実装を促進する。

### 技術について(目的、成果、課題)

ここで使われるガス光学素子は、オゾンガス領域に紫外レーザーで縞構造を書き込み、過渡的な回折光学素子を生成させる方法である。これまでに $1.6\text{kJ}/\text{cm}^2$ の超高耐力(既存の光学素子の100倍)、高平均回折効率(96%以上)、高品質制御波面( $\sim \lambda/20$ )、超低損失(10ppm)性などを実証してきた。これらをレーザー加速における①~④の課題に適用させるための開発を行っている。

①では、レーザーシステムのうちメートル級の伝搬光路を占めている空間的・時間的なフィルターを、オゾン光学素子の波面選択性高速スイッチ性を利用し、小型化を目指している。これまでに、 $10\lambda$ 程度歪んだビームからのシングルモードビームの選択取り出しと、ナノ秒のスイッチング動作を確認しており、数100J級レーザーでの試験を行う準備を進めている。

②では、ターゲットから飛来するデブリの影響を回避するガスレンズ(図1)の開発を進めており、被制御レーザーの入射角を制御することで3mm直径のレンズ生成に成功した。さらに高NAのガスレンズを生成するため、最近、粗密波の基礎研究を進めている過程で偶然に発見した、気体中で急峻に変化する屈折率変調( $\Delta n$ )を利用しながら、2mmガス厚み以下のガスレンズ生成技術を開発中である。

③では、2段目の電子加速に使用している穴あきミラーを、ガスレンズに置き換え(図2)、完全同軸上のレーザーとビームのオーバーラッピングを実現する。ここでは、広帯域化、真空中対応のガス光学素子の実証も進めている。真空中にオゾンを含むガスを噴出させ、ガス層を高密度化するためのグレーティング構造をもったガス停滞部の製作や、噴出圧力を増加させるため、希ガス混合オゾン生成技術開発を進めている。

④では、現在最も損傷や耐力的に弱く、高価で、一般的な高強度レーザーシステムでのウィークポイントとなっているパルス圧縮用回折格子を、このガス光学素子に置き換える技術開発を行っている。広帯域波長をもつ超短パルスレーザーにこのガス回折格子を適応させるためには、十分な波長分散が得られるガス回折格子設計やガス中の多光子吸収を低下させる薄いガス層での光学素子の実現、5cm以上の幅を持った大型気体回折光学素子の実現などが技術開発となっている。特に、ガス流路の大型化を目指し、オゾン流路の両外側にガイドガスを流す構造を採用し、詳細な形状を流体力学的計算で予測しながら進めている。これまでに図3に示したように $0.5 \times 5\text{cm}$ の長尺ガス流路が完成した。性能面では、広帯域波長を高効率で回折させるため、紫外レーザーでオゾン気体を励起させた際にできる急峻な屈折率変調構造を利用して、位相差+反射系で制御を行う。この特殊な $\Delta n$ 構造に合った計算コード開発が完了し、広帯域レーザーでの試験を進めている。

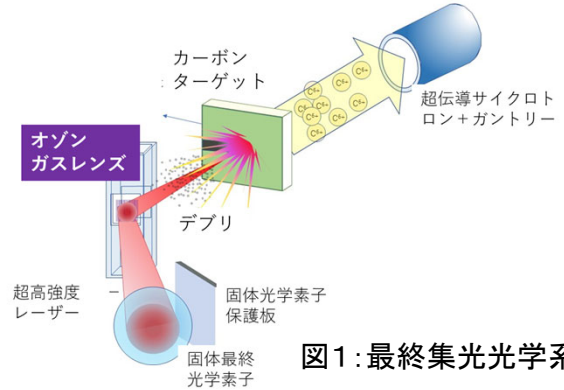


図1: 最終集光光学系

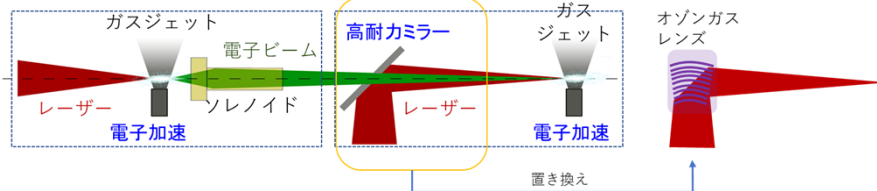


図2: 電子ビーム透過・レーザー集光ガス光学系

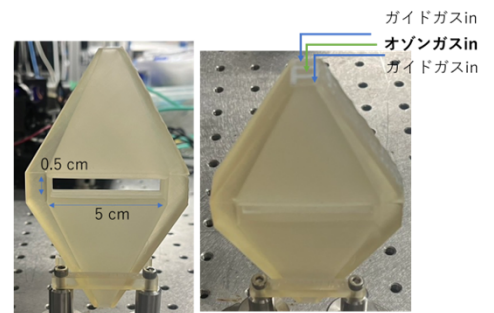


図3:  $0.5 \times 5\text{cm}$ の長尺ガス流路

### 他分野への適用

このユニークな気体光学素子は我々独自の技術であり、デブリが問題となるレーザー加工機での集光光学系、多波長・多焦点の空間変調器等への応用開発を進めている。米国国立点火施設では、オゾン光学素子の核融合ターゲットへの最終集光光学系としての適用計画が進行中で、産業界・最先端のレーザー研究の両面で大きなブレークスルーとなりつつある。