

# 「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」 2023年度シンポジウム予稿集

## － プログラム －

司会：電気通信大学 道根百合奈

14:00 開会挨拶

プログラクマネージャー 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

14:15 「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概要

プログラクマネージャー 佐野雄二

14:50 レーザープラズマ電子加速技術の研究開発成果

量子科学技術研究開発機構 神門正城

15:15 レーザー加速電子ビームの創薬・医療への展開

大阪大学 細貝知直

15:30 <<休憩>>

司会：大阪大学 細貝知直

15:40 レーザー駆動イオン加速器の開発成果

量子科学技術研究開発機構 近藤公伯

16:05 レーザー加速の社会実装に向けたレーザーフィージビリティ・スタディ

電気通信大学 米田仁紀

16:20 アクティブミラーレーザーの開発成果

大阪大学 宮永憲明

16:35 室温動作DFCチップレーザーの開発成果

理化学研究所／分子科学研究所 平等拓範

16:50 総合討論

17:05 閉会挨拶

プログラクマネージャー 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概要

自然科学研究機構 分子科学研究所 佐野 雄二

## はじめに

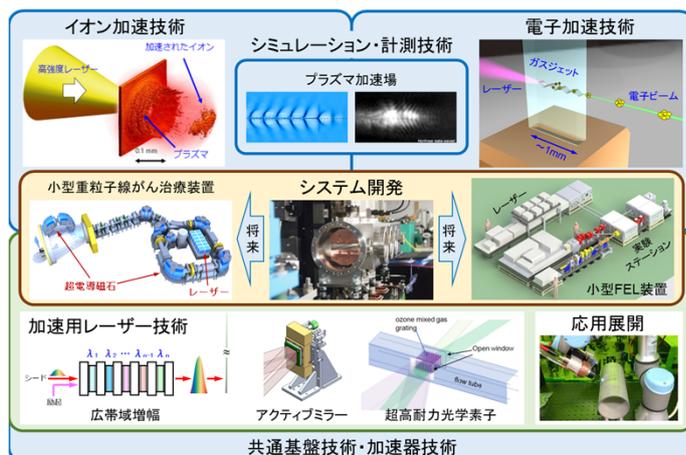
加速器は100年にわたる歴史をもち、宇宙・物質・生命の謎に迫るツールとして最先端の基礎研究に大きく貢献している。また、材料の高機能化や非破壊検査、がん治療や創薬など、幅広い分野で応用されている。

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エネルギーが限界に近づきつつある加速器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、ここではレーザープラズマ加速技術の社会実装を見据えた技術開発を推進している。10年間の開発は3段階のステージで構成され、各ステージ毎にその成果を評価する「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、レーザーおよびレーザー加速に関わる優れた要素技術の開発とその評価を行った。また、ステージ2(2021~23年度)では、ステージ1で開発・選定した技術の高度化を推進し、電子およびイオン加速技術としてのシステム化を進めてきた。



「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」実施内容

## ステージ1~2(2017~2023年度)の開発成果

ステージ1およびステージ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、更にはその応用技術開発を推進した。

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を進めることにより、電子ビームの指向性・制御性が格段に向上した。またコンパクトなアンジュレータを開発・整備し、レーザープラズマによる加速電子の入射による自由電子レーザー(FEL)の増幅実験を開始した。また、高エネルギー電子ビームの応用として、創薬・医療に関わる研究開発などにも着手した。イオン加速では、加速用レーザーの改良・整備、高周波誘導加熱による炭素イオンの高純度化、イオン輸送ビームラインの整備などを行い、炭素イオンの発生・輸送・計測・診断の一連の入射器システム試験を開始した。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・活用により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、新奇セラミックスレーザー媒質、広帯域スペクトル合成技術、高耐力光学素子の開発や損傷評価技術などに大きな進展を得た。更には、高出力パルスレーザー要素技術の応用展開も進展した。

## ステージ3(2024~2026年度)の開発計画

電子加速では、自由電子レーザー(FEL)の高度化開発、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実施する。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(次世代重イオンがん治療装置)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高出力極短パルスレーザーの設計検討を実施する。

## おわりに

本プロジェクトの推進を通して、将来の加速器の大幅な小型化を可能とする技術およびシステム概念を実証し、新材料や新薬の創製、がん治療などへの応用を進めて参ります。また、工学、医学、薬学など幅広い分野の発展に寄与すべく、技術開発を推進して参ります。変わらぬご支援をお願い致します。

## レーザープラズマ電子加速技術の研究開発成果

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)の小型化を行ない、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

- レーザープラズマ加速電子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を実証する。
- 10 keVのX線自由電子レーザーが実現できるレーザープラズマ電子加速ビームを実証する。

### 方法

レーザープラズマ電子加速[1, 2]は、高出力(50 TW)、極短パルス( $\sim 30$  fs)レーザーをガス中に集光することによりプラズマを生成し、励起されるプラズマ波を用いて電子を加速させるものである。従来の加速器が高周波( $\sim$  GHz,  $\sim$  MW)をドライバー源とし、その高周波を金属の構造体(加速空洞)に入力させて加速場を作るのに対して、レーザープラズマ加速はプラズマ中に発生するTHzのプラズマ波をドライバー源とするものである。金属の代わりにプラズマを用いる結果、加速周波数が格段に高くなり、1000倍以上高い加速勾配が実現され、従来の高エネルギー加速器の長さを大幅に短縮できる点を大きな特長とする。

レーザー加速では、その高い加速勾配により10 GeVの電子生成が既に報告されているが、「使える」加速器としては、第一に「安定な」ビームを出せるかが実用化への大きな課題となっている[3]。私たちはこの安定化こそが最も重要なパラメータであると認識し、これまでにさまざまな要素技術開発を行なっている。

電子を加速するためには、ほぼ光速で進むレーザー航跡波に電子を捕捉させる必要があるが、その手法として、(1)高強度レーザー電場によってガスをプラズマ化し、電離した原子のK殻電子を入射するイオン化入射法と、(2)ガス中に障害物(ブレード)を置き衝撃波を駆動することで急峻な密度差を作り、そこで電子を入射する衝撃波入射法の2つの方法を精密に比較した。また、併せてレーザーのプロファイルの安定化手法[4]、衝撃波の位置を安定化させるためのガスノズル、ブレード開発を進めている。

### 成果

X線自由電子レーザーに必要な、単色ビームの生成には、衝撃波入射法が適していることが分かった。現在では、電子入射器として、370 MeVで相対エネルギー拡がり1% (s.d., 標準偏差)以下の単色電子ビームをパルス当たり電荷量 17 pC(電子数  $1.3 \times 10^8$ 個)、ビーム拡がり 0.5 mradで生成することに成功している。このようなビームがビーム方向安定性  $< 1$  mrad、ピークエネルギー再現度 13% (s.d.)の再現性を持って生成できるようになっており、レーザープラズマ電子加速器としての完成度は大きく進展している。このビーム性能は、極端紫外領域のFEL増幅が見込める性能を達成できている。

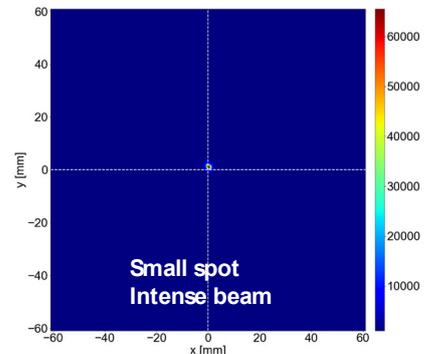


図. 電子ビームの空間分布

### 今後の計画

現在、極端紫外光のFEL増幅を目指し、アンジュレータの磁場調整、インストール、電子ビームラインの整備を進めており、8月後半から実験開始予定である。

### 参考文献

- [1] T. Tajima and J. M. Dawson, Phys. Rev. Lett. 43, 263 (1979).
- [2] E. Esarey, C. Schroeder, and W. Leemans, Rev Mod Phys 81, 1229 (2009).
- [3] Z. Jin et al., Sci. Reports 9, 20045 (2019).
- [4] N. Nakanii et al., Appl. Phys. Express 16, 026001 (2023).

## レーザー加速電子ビームの創薬・医療への展開

大阪大学 産業科学研究所 細貝知直

### 背景

化学物質によってがん細胞の増殖を抑える化学療法と、X線や粒子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、抗がん剤の効果を腫瘍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、酸性または酸化的环境など)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[1]。これまでに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、体の深部病変を標的とする場合、その組織深達性の低さが課題である。一方、放射線治療は、粒子加速器を用いて高エネルギーの粒子線や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。陽子線や重粒子線のように高い組織深達性を持ち体の深部病変を直接標的にできるものもあるが、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。さらに、高エネルギーの放射線や粒子線の照射は、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損傷を引き起こすことも知られている。しかし、誘導されるOHラジカルなどの活性物質は不活性な薬剤を活性化するための化学反応を誘発することも期待されることから、もし、組織深達性の高い低被曝線量の高エネルギー放射線や粒子線が化学反応を高効率に誘発することができれば、これらを体の深部病変の化学治療におけるプロドラッグの外因性トリガーとして利用できる可能性がある。

### 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する「相対論的電子ビーム化学療法 (REBIT: Relativistic Electron Beam Induced chemoTherapy)」を提案し[2]、レーザー航跡場加速器 (LWFA: Laser Wakefield Acceleration) の開発とともに、ビーム創薬研究を実施している。図1にREBITの概念図を示す。LWFAで生成する、～100MeV(メガ電子ボルト)のエネルギーを超える相対論的電子ビームは、放射線荷重係数の小さな(生物学的影響が相対的に小さな)線種であることに加え、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局所の疾患にも化学治療で対応可能となることが期待される。

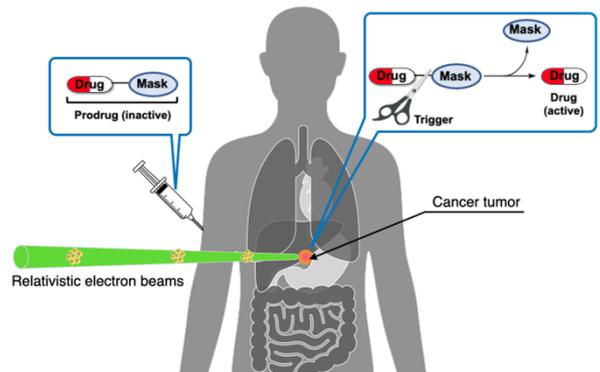


図1 相対論的電子ビーム化学療法 (REBIT) の概念図

### 開発状況

これまでに、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。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

- Peterson, L. W. & McKenna, C. E. Prodrug approaches to improving the oral absorption of antiviral nucleotide analogues, *Expert Opin. Drug Deliv.* **6**, 405-420 (2009).
- 特許出願済み

## レーザー駆動イオン加速器の開発成果

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 近藤 公伯

### はじめに

レーザープラズマを利用すれば極端な強さの加速電界が発生できるので加速長が装置の全体の大きさにくらべて十分に無視することができ、従来方式のイオン加速器に比べ、装置規模やそれに伴う価格面で、高いポテンシャルが期待できる。一方で、レーザーを利用したイオン加速の基礎研究は20年以上に及ぶが、本格的な実用化に至っていない。当該プロジェクトでは、本格的なレーザー駆動イオン加速装置開発を、明確な目標設定の下に実行し、最終的に本格的な実用化が可能であることを実証することを目指す。具体的な目標は、現在、QST（量子科学技術研究開発機構）が独自に実現を目指す次世代の重イオンがん治療装置（「量子メス」と呼んでいる）に設置可能な炭素イオン入射器をレーザー加速により実現できることを原理実証することである。量子メスは超伝導加速技術により小型化したシンクロトロン加速器を設置するが、それに見合う規模の入射器としてレーザー駆動イオン加速ベースの小型炭素イオン入射器の実現が期待されている。

### 開発目標

既存の重イオンがん治療装置における入射器の性能に匹敵する性能が必要であり、すなわち以下の性能がレーザー加速で実現できることを示す。

- (1) 炭素イオンのエネルギー：核子あたり4 MeV
- (2) 入射炭素イオンの個数：2秒間に $10^9$ 個、後段に設置予定のシンクロトロン加速器に入射できる
- (3) 繰り返し10 Hz以上で1ショットあたり $10^8$ 個/1%.b.w.の炭素線をシンクロトロンへ伝送できる
- (4) 炭素イオンの純度は99%以上

ただし、後段のシンクロトロン加速器入射については目標達成に必要な技術の実現性を示した上でシミュレーションを進める。

### 方法

QST関西研のイオン加速プラットフォームにて、原理実証に必要なレーザー装置、ターゲット装置、ビーム診断装置を開発して上記目標達成を目指す。現在、レーザーは繰り返し10 Hz、パルスエネルギー1 J、パルス幅40 fsのチタンサファイアレーザーをイオン加速に必要な性能まで引き上げ、 $10^{20}$  W/cm<sup>2</sup>の照射強度で核子あたりMeV級の炭素イオンを発生し、四重極磁石や偏向磁石、ピンホールアパーチャーを利用した単色化、高純度化を、さらにデバンチャーによる圧縮により、レーザーとターゲットの相互作用で発生したイオンから、目標に必要な炭素線を選び出し、シンクロトロン入射の可能性を示す。また、3D PICによる実際のターゲット薄膜での炭素イオン生成の条件を検討する。

### 成果

レーザーについては10 Hzの繰り返しで $10^{20}$ W/cm<sup>2</sup>で薄膜照射できるように性能向上を進め、最終段増幅器直後でパルスエネルギー3.2 Jの取り出しが可能であることが示された。ターゲット装置では炭素線発生の高純度化のために薄膜ターゲット裏面のIHコイルによる加熱機構を試験し、その有効性が示され、特許申請を行った。現在、核子あたりMeV級のイオンの診断のため、四重極磁石や偏向磁石、ピンホールアパーチャーをイオン加速プラットフォームに設置し、実験を進めようとしている。

### 結論

量子メスの入射器としてレーザー駆動炭素線加速装置の原理実証へ向け、研究開発がさらに進んだ。

### 今後の計画

核子あたりMeV級のイオン診断に必要なレーザーやターゲット装置、ビーム伝送器や検出器を準備し、実験を開始した。第3ステージではここで得られた知見に基づき原理実証を行う。

### 参考文献

Y. Iwata, et al., “Design of a compact superconducting accelerator for advanced heavy-ion therapy”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1053 168312 (2023).

# レーザー加速の社会実装に向けたレーザーフィジビリティ・スタディ

電気通信大学レーザー新世代研究センター 米田仁紀

## 目指す姿

レーザー加速が原理実証され、社会実装が行われる段階になって、レーザー装置内の光学素子、機能素子を現在の技術より十分上げ、世界で社会実装技術としてイニシアティブをとれるものを、企業とともに作り上げていく。

## 開発目標

ここでは、2つの開発目標を上げている。

(1) 高信頼性光学薄膜の開発: 超低損失性(10ppmレベル)でありながら、ナノ秒のレーザーで $200\text{J}/\text{cm}^2(1\mu\text{m})$ 、 $50\text{J}/\text{cm}^2(0.5\mu\text{m})$ の耐力を持ち、長期安定性も保証できる光学薄膜技術を開拓する。

(2) 新しい気体回折光学素子の開発: 気体媒質を使用するこれまでとは全く異なる光学素子をレーザーシステムに実装させ、その高耐力性(ナノ秒レーザーで $1.5\text{kJ}/\text{cm}^2$ )、超低損失性(挿入損失10ppm)、高速制御性(スイッチングとして使用した場合に10ns以下)、ダメージフリー(ガスによる過渡的光学素子のためにダメージが次男ショットに影響しない)、高波面選択性( $\lambda/10$ の波面を選択的に取り出し)などの特筆すべき特性を活かした光学制御素子を開発する。

## 方法

(1) 高信頼性光学薄膜の開発: 国内光学薄膜成膜メーカーと共に、主に高密度の薄膜が形成でき低損失な光学薄膜が製作可能なイオンビームスパッタリング膜を中心に光学薄膜の高性能化を行う。電気通信大学レーザー新世代研究センター内に、クラス10のクリーンルーム内で高出力レーザーの長時間試験が行える施設を作り、 $10^8$ ショットまでの照射による光学薄膜のin-situ光学定数変化、ダメージ強度試験だけでなく、ダメージの予測信号の検出、新しいアニーリング手法の開発、膜中に含まれる分子の同定などを行っている。(右図は、その測定中の様子)

(2) 新しい気体回折光学素子の開発: 気体中に大振幅密度を生成させ、それによる光学定数の空間変調を利用して回折光学素子を生成させている。すでに96%の回折効率や $f=200\text{mm}$ 程度の集光光学素子の開発に成功しているが、時間応答の高速化、長パルス化、より大振幅な波による数mm厚の光学素子の実現、広帯域化、真空内気体光学素子開発、などの要素技術を開発しており、それを実レーザー装置に実装して行っている。(右図は、真空内で生成されたガスによる回折格子)

## 成果

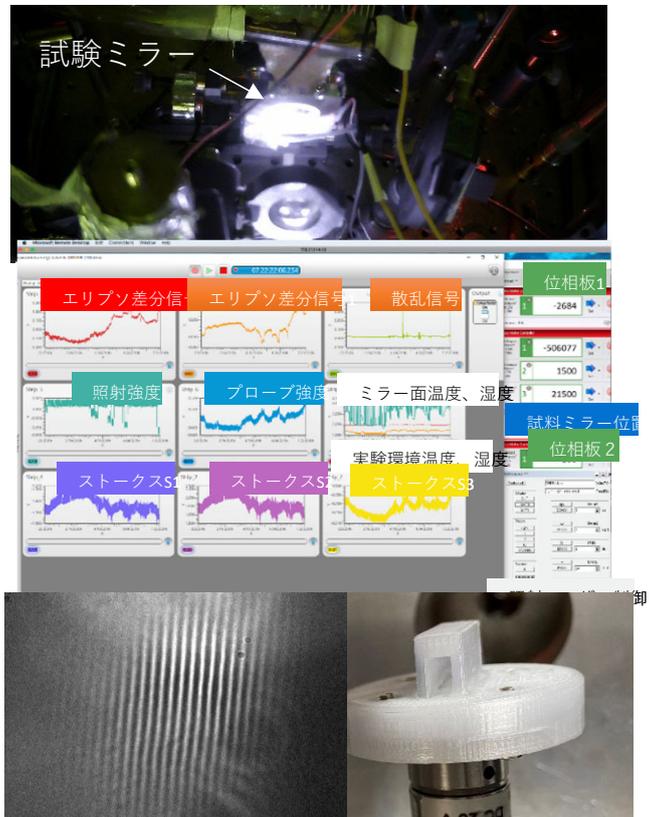
光学薄膜については、すでに従来の電子ビーム成膜方による光学薄膜に匹敵する耐力を持つものが可能になってきており、新しいアニール法によるレーザーコンディショニングの短縮化も可能になってきている。また、一部膜では、損傷前信号を確認することができている。気体回折光学素子では、これまででは分離できなかった大振幅密度波形成を担っている音波と第2音波を区別して制御できるようになりつつあり、ナノ秒の時間分解能とマイクロ秒の長パルス化制御が可能になってきている。

## 結論

光学薄膜、気体光学素子双方で、我が国独自の技術シーズを発展させ、企業とも協力して主に光学素子の面で社会実装に向けた準備が整い始めている。

## 今後の計画

数100Jクラスのレーザーシステム内での試験やkJクラスのレーザーでの試験を国内外の企業、研究機関と行う準備を開始している。



# アクティブミラーレーザーの開発成果

大阪大学 レーザー科学研究所 宮永憲明

## 目指す姿

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。

## 開発目標

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

## 方法

- ① 上記目標を達成するための最適なレーザー方式として、低温冷却Yb:YAGアクティブミラーを採用。
- ② システム全体にわたって半導体レーザー(LD)励起を採用。
- ③ ファイバーCW発振器と任意パルス波形整形器からなる安定なフロントエンドを構築。
- ④ ファイバー増幅器と多重パス低温冷却Yb:YAGロッド増幅器からなる高安定・高利得前置増幅器を構築。
- ⑤ 4段直列の低温冷却Yb:YAGアクティブミラーを用いて主増幅器を構成。Yb:YAGセラミックスをモリブデンヒートシンクに低歪み接合し、ヒートシンクに液体窒素を循環させてYb:YAGを伝導冷却することで、高効率・高出力と高繰り返し動作を両立。

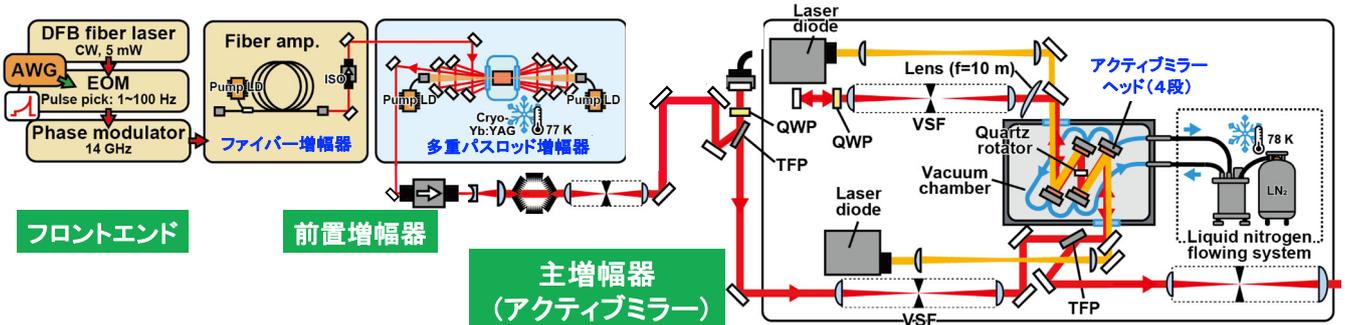


図1. 10J, 100Hzレーザーのシステム構成.

## 成果

- ① 10.2J, 100Hz(1.02kW)動作を達成。出力変動を0.7% rmsにまで抑制。
- ② アクティブミラーの冷却性能を向上させ、光・光変換効率31.3%、高ビーム品質(1.3×回折限界)を達成。
- ③ 前置増幅器を改良し、2J, 100Hz小型レーザーの実用化が視野に(市販品の数分の1の装置コスト)。

## 結論

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。この成果に基づき、口径10cm級アクティブミラーを用いた100J, 100Hz増幅器を構築中である。

## 今後の計画

- ① 冷却器の容量を増大し、10J, 100Hzの定常動作を実証予定。
- ② 2倍高調波変換によって、6J, 100Hzのグリーンレーザーを実証予定。
- ③ レーザー加速器の社会実装に必要な励起レーザーの機能・性能を実現するための方策を検討予定。

## 参考文献等

- 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.

## 室温動作DFCチップレーザーの開発成果

理化学研究所：平等拓範, 辻明宏, 佐藤庸一, 石月秀貴

分子科学研究所：平等拓範, A. Kausas, V. Yahia, H.H. Lim, 竹家啓, 吉田光宏

### 目指す姿

レーザー電子加速の有用性検証において、駆動用のパワーレーザーが大掛かりになることが妨げとなりつつある。そこでマイクロ（固体）フォトニクスによるパワーレーザーを小型集積化する基盤開発を理研レーザー駆動電子加速技術開発グループで進めている。一方、パワーレーザーの小型集積化は、高強度レーザーに直接かかる産業、エネルギー、社会インフラ、美容・医療など広い分野で革新をもたらすと期待される。そのようなことから分子研では、レーザー加速に資する高性能レーザーを社会実装するため小型集積レーザー（Tiny Integrated Lasers, TILA）コンソーシアムと、これを根拠とした社会連携研究部門にて進めている。

### 開発目標

レーザー駆動電子加速との先端科学と、産業、エネルギー、社会インフラ、美容・医療、安全保障、宇宙などへの社会実装の両立のため以下の指針を立てた。

- 1) 連続接合による実用的DFCチップの開発（DFC, distributed face Cooling）。
- 2) 基本波出力5J級DFCチップによるレーザーモジュールの開発。
- 3) TILAモジュールによるTi:サファイアレーザー励起実験。
- 4) スペクトル合成レーザーの検証研究。
- 5) 小型集積レーザー（TILA）モジュールの産業展開にかかる検討

### 方 法

- 1) 室温動作のためにレーザー媒質としてNd:YAGを選定。
- 2) Nd系の量子効率改善のために励起波長を808nmから885の上準位直接励起法を考案。
- 3) DFC構造実現のため、Nd:YAGとサファイアの異種材料常温接合法を開発（il-SAB）。

### 成 果

- 1) DFC実現のために重要な大口径常温接合を可能とするil-SABに関し複数の特許を国内外で成立させた。
- 2) 常温で出力5Jに拡張可能な空間結合端面励起方式の妥当性を検証した。
- 3) TILAモジュールによるTi:サファイアレーザー励起を検証中。
- 4) スペクトル合成レーザーの可能性を検証中。
- 5) 小型集積レーザー（TILA）モジュールの産業展開に関し30社以上からの支援を得ている。

### 結 論



### 今後の計画

- 1) DFCチップによる室温動作 5J拡張性に加え、100Hz 動作の基礎検証を行う。
- 2) SH波出力 >2.5J の拡張性検証と共に、超短パルス Ti:sapphire レーザーの励起源に資する事を検証する。
- 3) レーザー加速に資する高性能小型集積レーザーをTILAコンソーシアムを通じて社会実装する。

### 参考文献

1. A. Kausas and T. Taira, "Laser-induced damage study of bonded material for a high-brightness laser system," Opt. Lett., vol. 47, no. 12, pp.3067-3070 (June 2022).
2. 平等拓範, 「マイクロ固体フォトニクスによるレーザー加速ドライバーの開発」, レーザー研究, vol. 50, no. 7 (「レーザー加速の未来像」特集号), pp. 382-387 (2022).