

JST 未来社会創造事業 大規模プロジェクト型
「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」2025年度第1回シンポジウム
ー イオン加速システムとハイパワーレーザーの開発 ー
予 稿 集

日 時 : 2025年9月1日(月) 13:15~16:20 (12:45開場)

主 催 : 「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

開催形態: Zoom によるオンライン開催(定員500名)

参加費: 無料

Zoomミーティング情報:

<https://zoom.us/j/99445287785?pwd=Au5Y3pAZeQGApN1XO2s1KLo8xky2Ch.1>

ミーティングID: 994 4528 7785

パスコード: 616942

* * * プログラム * * *

司会 量子科学技術研究開発機構 近藤公伯

13:15 開会挨拶

プログラムマネージャー

佐野雄二

科学技術振興機構 未来社会創造事業 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 神部匡毅

13:30 プロジェクト成果／レーザーと加速器技術の融合による新しい応用展開

プログラムマネージャー 佐野雄二

14:00 小型量子メスを実現するレーザー駆動イオン加速器の開発

量子科学技術研究開発機構 榊 泰直

14:50 高繰返しパワーレーザーモジュールSENJU -100J/100Hzを目指して-

大阪大学レーザー科学研究所 余語覚文

15:15 長期信頼性光学素子開発と超高耐力オゾンガスオプティックスの開発

電気通信大学レーザー新世代研究センター 米田仁紀

道根百合奈

15:40 レーザー駆動による短パルス・高密度イオンビームの新しい応用

奈良女子大学自然科学系物理学領域 石井邦和

16:05 全体質疑応答

16:15 閉会挨拶

佐野雄二

プロジェクト成果／レーザーと加速器技術の融合による新しい応用展開

大阪大学 産業科学研究所 佐野 雄二

はじめに

粒子加速器は、物質や生命の起源を探る研究など、真理の探求や科学技術の発展に大きく貢献している。また、放射線治療や非破壊検査、分析や材料の高機能化などに活用され、生活の質の向上、安全で安心な社会の構築に貢献している。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、各国で研究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・利用はもとより、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

本プロジェクト「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」は、科学技術振興機構(JST)の未来社会創造事業大規模プロジェクト型として、2026年度までの10年間にわたり研究開発を展開している。そこではレーザーによる電子・イオン加速に関する概念実証(POC)を進めるとともに、加速器としての実用化に欠かせない高出力レーザーの小型・高効率化に関する研究開発を行っている。

レーザーによる電子加速

理研SPRING-8キャンパス内に実験プラットフォームを構築し、大阪大学、QST、KEKを中心に電子加速の概念実証、更にはその応用研究を推進している。真空中に噴射されたガスジェットに高強度のフェムト秒レーザーを照射し、レーザー航跡場を誘起して電子を加速する。ほぼ単色の数百MeVの電子加速が実現され(図1)、全長2mの小型アンジュレータに入射してFEL増幅を達成した。また、創薬医療応用に向けた研究開発なども進展している(詳細は、次回シンポジウムで報告予定)。

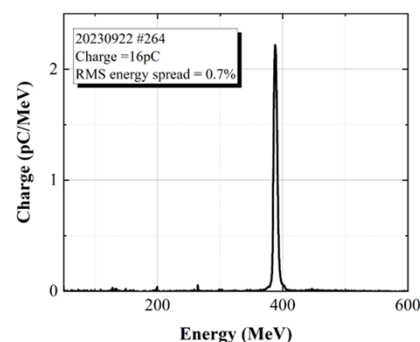


図1 レーザー加速電子のスペクトル

レーザーによるイオン加速

QST関西光量子科学研究所に実験プラットフォームを構築し(図2)、レーザーによる陽子および炭素イオン加速の実証研究を行っている。真空中の薄膜ターゲットに高強度のフェムト秒レーザーを照射し、ターゲット裏面にTV/mにも及ぶ強い電場(シース場)を形成してイオンを加速する。レーザーとターゲットの相互作用研究、連続使用が可能なターゲットの開発、イオン輸送・計測・診断系の構築が進み、量子メス(次世代重粒子線がん治療装置)入射器としての概念実証を進めている。2024年度には奈良女子大が加わり、レーザー加速によるイオンビームの特徴を活かした新しい研究に着手している。

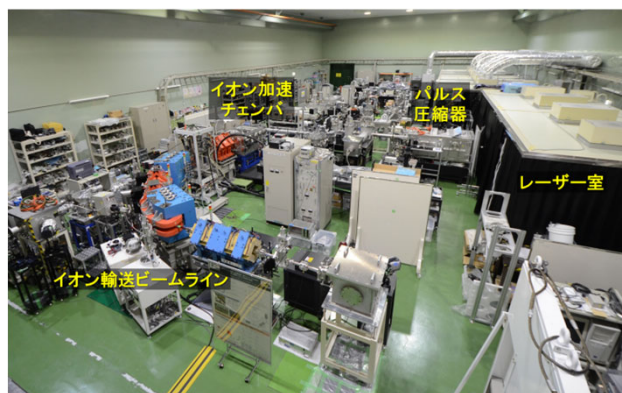


図2 レーザーイオン加速プラットフォーム(QST関西研)

高出力レーザーの開発

上述の概念実証では、現有のTi:sapphireレーザーを使用して電子・イオン加速システムを構築し、研究開発を進めてきた。将来のレーザー加速器の普及・利用においては、レーザー装置の小型・高効率・高繰返し化が必須であり、大阪大学、電通大、分子研、理研においてその実現に向けた研究開発を進めている。今回のシンポジウムでは大阪大学と電通大の成果を報告し、次回は分子研・理研の成果を報告する予定である。

おわりに

これまでの研究開発で、レーザー加速は格段の進歩を遂げた。電子加速では、ほぼ単色のビーム発生とそれによるFEL増幅を確認した。イオン加速では、量子メス入射器に必要なイオンの発生から輸送・診断までの一連の動作を確認した。ビームの安定性は既存の加速器にまだまだ及ばないが、短バンチ(短パルス)性などレーザー粒子加速の特徴を活かした新しい応用研究も進展し、将来の展開が期待されている。

参考資料(本プロジェクトのホームページ)

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

<https://www.sanken.osaka-u.ac.jp/lpa/>

小型量子メスを実現するレーザー駆動イオン加速器の開発

量子科学技術研究開発機構 榊 泰直

プロジェクト内での位置づけ

本研究開発は、この未来社会創造事業のプロジェクトの中でレーザーを利用したイオン加速器の開発をベースにその技術の社会実装を目指し、実際にそれが可能であるということを実証することを目指して進めています。現在の極端パルス高ピーク出力レーザー技術の最先端を駆使してもレーザーで直接原子核を光速近くまで加速することは不可能ですが、電子を瞬時に光速、すなわち相対論的速度まで加速することは容易です。すなわち固体薄膜をターゲットに高密度の相対論的電子を大量に発生させることで、核子あたり MeV 級のイオンを十分な数、発生させることが可能です。このプロジェクトでは、量子科学技術研究開発機構 (QST) が開発する次世代の小型重粒子線がん治療装置 (量子メス) の入射器技術としてレーザープラズマイオン加速技術が利用可能なことを概念実証すべく研究開発を進めています。

技術について(目的、成果、課題等)

量子メスは、炭素イオンを光速の7割程度まで加速するシンクロトロン加速器の部分に超伝導技術を採用することで大幅な小型化(直径8 m)を目標に現在建設が進められていますが、シンクロトロン加速器への入射のための予備加速として光速の1割程度まで加速する入射器の部分については、従来の線形加速技術が利用される予定です。この場合、直線距離で10 m必要となり、小型シンクロトロン内部に設置することはできません。これに対し、本プロジェクトのレーザープラズマイオン加速で十分なエネルギーとイオン数を発生し、シンクロトロン加速器に入射することが可能になることが示されれば、重粒子線がん治療装置の加速器部分は10 m四方の部屋に収まることが可能になり、装置の飛躍的な小型化と低価格化が実現できることとなります。現在までに、炭素イオンを効率よく発生させるのに十分な性能を有するレーザー装置、ターゲット装置を開発し、レーザー加速イオンを高繰り返して発生させ、はじめて開発したレーザー駆動イオンビーム入射器原型機を利用して、発生したイオンビームの速度均一化やバンチ幅の圧縮、イオンビームの特性評価といったイオンビームの伝送実験を精力的に進めています。

一方で、QSTで稼動するレーザー装置は10 Hzの繰り返しで50 TWのピーク出力が可能ですが、3次元のPICシミュレーションや理論計算による評価から、少なくとも6 J/pulseの100 TWを超すレーザー装置が必要であることがわかっており、10 Hzで安定して稼動する極短パルス高出力レーザー装置の開発は依然として課題であります。本課題に関しても未来社会創造事業の中でその要素技術の研究開発が精力的に進められています。

他分野への適用、今後の計画

現状、発生してビーム伝送した上でイオン照射できるイオンバンチはエネルギー1.5 MeV/uの水素イオンが 10^8 個、 1σ でパルス幅140 psec以下で直径10 mm程度に集光して照射することが可能になっています。このような高密度の高エネルギーイオン照射は通常の静電型加速器を使って作り出すことは困難で、この特徴を活かした応用が広く期待できると考えています。今後は量子メスの入射器開発は言うまでもなく、他の魅力的な利用研究を開拓していきたいと考えています。

参考文献

- H. Sakaki, et al., to be published in Rev. Sci. Instrum.
- S. Kojima, et al., Matter Radiat. Extremes 8, 054002 (2023).
- S. Kojima, et al., Rev. Sci. Instrum. 96, 083001 (2025).
- M. Hata, et al., to be submitted to J. Appl. Phys.

高繰返しパワーレーザーモジュールSENJU -100J/100Hzを目指して-

大阪大学レーザー科学研究所 余語 寛文

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。

技術について(目的、成果、課題等)

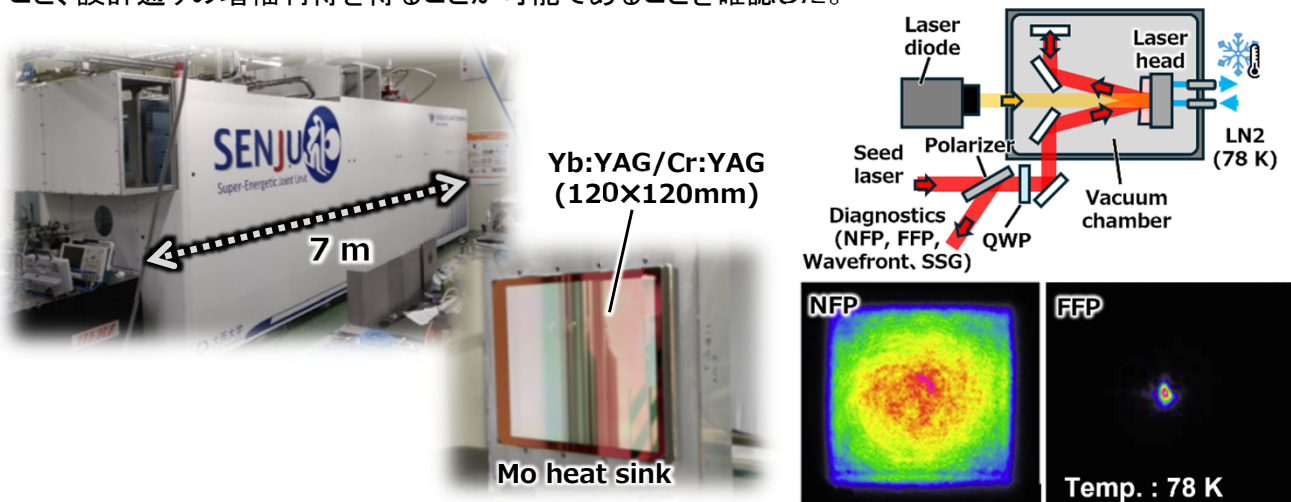
高繰返し発振で課題となる除熱性能の飛躍的向上を可能とする固体間熱伝導レーザー増幅システム「低温冷却Yb:YAGアクティブミラー方式」を独自技術として開発している。特に、以下の技術確立を目標設定した。

- 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

これまでに、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、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%を達成している。

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8台を用いた100J, 100Hz増幅器モジュールSENJU: Super Energetic Join Unit を構築中である。

今年度では、口径10cm級アクティブミラーの単体増幅試験を実施し、冷却による波面ひずみが極めて小さいこと、設計通りの増幅利得を得ることが可能であることを確認した。



(左)SENJUシステム外観 (中)口径10cm級アクティブミラー増幅器 (右)アクティブミラー単体試験の配置図および増幅ビームの近視野像(NFP)、遠視野像(FFP)

他分野への適用、今後の計画

今後は、SENJUの100J, 100Hz出力の実証試験を実施する計画である。他分野への波及として、SENJUの大出力エネルギーの特徴を生かした地上レーザーからの宇宙デブリ検出技術への適応に向けて、民間スタートアップ企業(株式会社パワーレーザー)と検討を開始している。

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.

長期信頼性光学素子開発と超高耐力オゾンガスオプティックスの開発

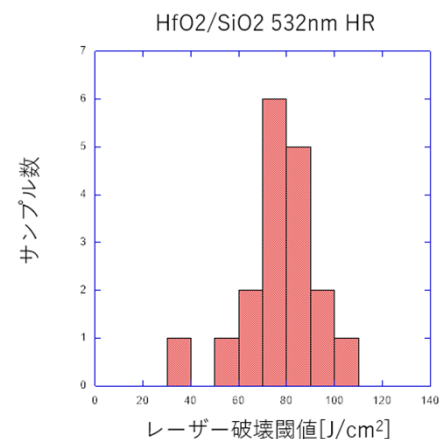
電気通信大学レーザー新世代研究センター 米田仁紀、道根百合奈

プロジェクト内での位置づけ

1. 国内成膜メーカーと協力し、長期信頼性が高く耐力が高い光学薄膜光学素子の開発を推進することで、レーザー加速システムのコンパクト化を行う。
2. 破壊強度が従来の固体光学素子より桁違いに高く、デブリフリーや究極のダイクロイック性を高耐力光学素子で実現させることで、レーザー加速におけるデブリ問題の解決、価電子透過光回折などの追加速時に鍵となる光学素子を実現させ、加速システムの高効率化、高寿命化を実現させる。

技術について(目的、成果、課題等)

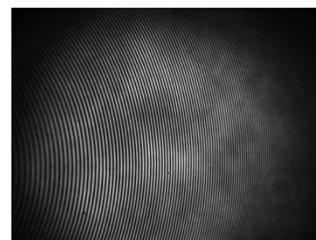
1. 光学薄膜では、薄膜材料、母材料、研磨工程、コーティング手法、アニーリング、コンディショニングなどの要因に加え、長期間の使用では膜材料などの変化・照射効果などが影響し使用条件を制限してしまう。また、光学破壊現象は確率現象であるために、1つの膜やコンディショニング条件などの評価にも多大な試験サンプル数を必要とする。これらはデータを蓄積するために、24時間試験可能で、膜質の変化を光学定数だけでなく散乱要素も併せて計測しながら破壊データが得られる自動評価装置を開発・稼働させることで、データの拡充、膜の設計指針へのフィードバックを行っている。例えば、照射履歴を考えると、 10^7 ショットレベルの試験が必要になるが、100Hzの試験用レーザーを用いても1日以上かかり、これを確率現象によるポアソン分布が得られる程度計測を行うためには1条件で優に1週間を必要になる。現在常時稼働を行いながら国内成膜メーカーの3社と協力しながら高信頼膜の条件探索を続けている。



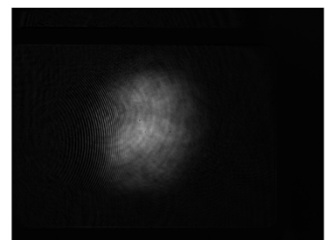
2. オゾン分子を混入させ、紫外レーザーにより大振幅の粗密波を生成させ、回折光学素子を作る手法は、ナノ秒程度のレーザーで平面波を対象にした場合は、容易に実現できる。すでに米国でも我々の知識提供により回折光学素子の生成に成功している。しかし、この気体光学素子をレーザー加速システムへ応用しようとした場合、広帯域性や高NAでの光学素子の実現が必要になる。特に、この素子での鍵となる大振幅粗密波は作動気体内での固有モードになる必要があり、気体内に精密に制御された3次元の粗密波を形成させる必要がある。これを実現するためには、気体層の密度、厚みと言ったパラメータに加え、2つの書き込みレーザーの波面条件、被回折波の波面条件など多くのパラメータの中での最適解探索が必要になってくる。これを解決させるために、理論モデルに加え機械学習を利用した最適解探索実験プラットフォームの開発を行い、短期での気体光学素子の最適化を行っている。

他分野への適用、今後の計画

1. JST未来で開発された長期評価システムは、すべての波長の光学素子に対して有効であり、特に経年劣化が大きい紫外域の多層膜ミラーでは、強い要望がある。そのため、同様なシステムで深紫外領域に拡張したものを別途開発中である。また、高反射ミラーだけではなく、減反射コーティングに関しては、その超低反射特性を求められるようになってきている。ここでの光学薄膜試験も加速器施設と協力してシステムを立ち上げ中である。



大振幅波生成のための紫外レーザーパターン



左図で気体光学素子として回折できる範囲の例

2. 気体光学素子は全く新しい概念に基づいた光学素子で、性能の高さから、レーザー加工、新型高出力レーザーシステム開発、レーザー核融合用最終光学系などへの期待が多く、本JST未来で開発された技術・知見・物理詳細モデルなどを利用して各応用分野の研究として展開中となっている。

参考文献

[1]Y. Michine et. al., Communications, Physics 3, (2020) 24, [2]米田仁紀、他、新しいガスオプティックスの開発とその応用、レーザ協会誌 vol. 47, No.1, p.1 (2022) [3]Y. Michine, et. al., Phys. Fluids 36, 041703 (2024)

レーザー駆動による短パルス・高密度イオンビームの新しい応用

奈良女子大学自然科学系物理学領域 石井邦和

緒言

我々は本プロジェクトにおいてレーザー駆動イオンビームの高純度化とその応用展開を担当している。現状ではMeV領域まで加速されたレーザー駆動イオンビームが実用可能なレベルとなっており、量子メスの入射器としてだけでなくMeVイオン加速器としても実用可能となっている。本講演では従来の加速器から得られるイオンビームとレーザー駆動イオンビームの比較を行い、レーザー駆動により得られるイオンビームの特性をまとめ、応用展開について考える。

技術について(目的、成果、課題等)

レーザー駆動イオンビームは薄膜に強烈なレーザーを打ち込み、薄膜裏面に生成されるシース電場により薄膜構成原子が加速されるものである。レーザーが時空間的に収束されているため、得られるレーザー駆動イオンビームも時空間的に収束可能となる。3連四重極電磁石と位相回転空洞をビームラインに導入することで、短パルス高密度イオンビームの引き出しが可能となった。レーザー駆動イオンビームの問題点としては、薄膜裏面に付着している不純物も加速されてしまうこと、および得られるイオンビームの運動エネルギー分布が幅広いことの二点が挙げられる。我々は電磁石による磁場剛性選別とイオン種によって飛行時間が異なることを利用したパルスチョッパの併用によりイオンビームの高純度化を達成した。このビームは1ナノ秒以下の時間幅に 10^8 個もの粒子がおよそ1平方ミリメートルに含まれるという時空間的に収束された短パルスかつ高密度なパルスイオンビームである。

他分野への適用

そもそもMeV領域のイオンは物質中の高速イオンのLET(線エネルギー付与:放射線が物質中を透過する際に単位長さあたりに失うエネルギー)が最大となるエネルギー領域のイオンであるため、医療、産業、分析等の様々な分野で利用されている。例を挙げると、重粒子線がん治療においては細胞に直接相互作用する際の粒子のエネルギー領域であると言え、また産業分野においては半導体業界の主要技術であるイオン注入の入射イオンとして使われており、物質中の深さ分析において主要となるラザフォード後方散乱分光法においてもMeV領域のイオンが用いられている。本プロジェクトによって達成された短パルスかつ高密度なMeVイオンビームは、これまでの従来加速器で得られていたMeVイオンビームと比べて粒子フルエンス率(単位時間、単位面積あたりの粒子数)が格段に優れているため、様々な応用が考えられる。

今後の計画

現在、我々は本プロジェクトにより得られたビームの応用を考えており、そのいくつかを紹介する。まず、このビームの短パルス性に着目し、MeVイオンパルスラジオリシス法(MeVイオンによる放射線分解現象の時間発展を解明する手法)の開発を行っている。具体的には、短パルスMeVイオンビームをポンプとして物質に入射し、白色レーザーをプローブとする。ポンプとプローブの時間差を変えていくことで、物質中にイオンが形成するイオントラックの生成過程、すなわちイオンの通過と共にそのLETによりイオン軌跡の周囲が溶融し、周りの物質が熱浴となり急冷されるという時間的发展を明らかにしようと考えている。これは、標的物質を半導体とすれば、半導体業界におけるイオン注入技術の更なる発展に繋がるブレークスルーとなりうる可能性を持ち、また、核融合炉材や原子炉材料を標的とすれば高密度な放射線照射下における炉材のダメージのシミュレーションに役立つことが予想される。

医療分野、特に重粒子線がん治療においてはFLASH効果が注目されている。これは極端に高い放射線量でイオンを照射すると、従来よりも副作用が抑制され、より安全な放射線治療につながると期待されているものである。フルエンス率が格段に高いという特長を持つ本プロジェクトで開発されたビームは、このFLASH効果をその作用機序から明らかにできる可能性を持つ。我々も乾燥DNAを用いた予備実験を始めているところであり、また真空中に液体の水を導入する技術も確立しているところである。

現状では、開発されたビームの応用研究はまだ開発段階にあるため、まとまりのある話にはなっていないが、新奇な短パルスかつ高密度なMeVイオンビームの応用可能性について議論したい。