

**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2回シンポジウム**  
**ー 電子加速システムと高強度小型レーザーの開発 ー**  
**予 稿 集**

日 時 : 2025年11月7日(金) 13:15~16:15 (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 会議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/97586654454?pwd=zW57ABQ7w2QnMYOvqBMXhk1skBZ972.1>

ミーティングID: 975 8665 4454

パスコード: 848181

\* \* \* プログラム \* \* \*

司会 プログラムマネージャー補佐 鈴木昌世

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 研究振興局 基礎・基盤研究課 量子研究推進室 室長補佐

山崎貴司

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

司会 プログラムマネージャー 佐野雄二

14:00 レーザー航跡場加速の最適化: 高エネルギー単色電子ビームの安定生成

大阪大学産業科学研究所 金 展

14:25 レーザープラズマ電子加速を用いた小型放射光源

量子科学技術研究開発機構 神門正城

14:50 極短周期・小型アンジュレータの開発と実用加速器における評価試験

高エネルギー加速器研究機構 山本 樹

15:10 小型集積レーザー: 極限への挑戦とスピンアウト

理化学研究所/分子科学研究所 平等拓範

15:35 高エネルギービームを使用した体内創薬への取り組み

ーレーザー航跡場加速電子ビームの社会実装を目指してー

大阪大学産業科学研究所 細貝知直

16:00 全体質疑応答

16:10 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

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実現に広く貢献している。

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。この技術で加速器の小型化が実現できれば、更なる普及・利用はもとより、装置規模から高エネルギー化が限界に近づきつつある加速器とその応用研究に、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、加速器として実用化していく上で不可欠な高出力レーザーの小型・高効率化・高繰返し化にかかわる革新的な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、阪大産研、QST、KEKを中心にレーザーによる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ており(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、レーザー加速電子ビームの創薬医療応用に向けた研究開発も進展している。

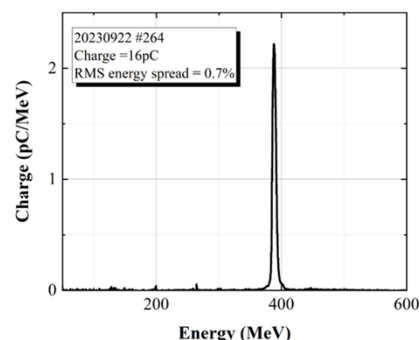


図1 レーザー加速電子のスペクトル

### 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の加速研究を行っている。真空中の薄膜ターゲットにレーザーを照射し、ターゲット裏面に強い電場を形成してイオンを加速する。イオン発生・輸送・計測・診断系にかかわる研究開発および装置化が進展し、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。また、奈良女子大では、レーザー加速イオンビームの応用研究を進めている。

前回のシンポジウムでは、これらの詳細を報告した。

(<https://www.sanken.osaka-u.ac.jp/lpa/sympo2025-2/>)

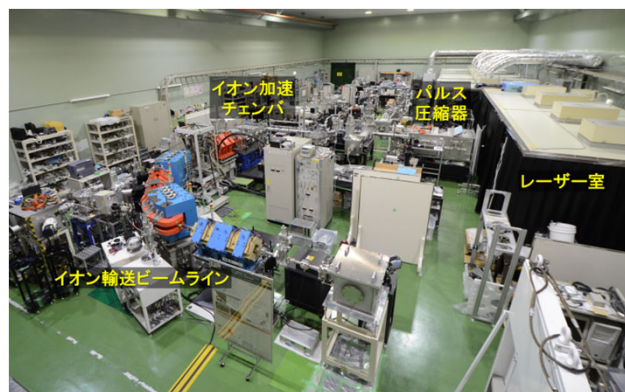


図2 レーザーイオン加速プラットフォーム(QST関西研)

### 高出力レーザーの開発

上述の電子・イオン加速ではTi:sapphireレーザーを使用して実験プラットフォームを構築し、研究開発を推進している。将来のレーザー加速器の普及・利用を考えると、レーザー装置の小型・高効率化と高繰返し化が必須であり、阪大レーザー研、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行っている。

今回のシンポジウムでは分子研、理研の成果を報告する(前回は阪大レーザー研、電通大の成果を報告)。

### 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。ビームの安定性は既存の加速器に未だ及ばないが、改良を進めて電子・イオン入射器としての完成を図る。また、短バンチ・低エミッタンスなどレーザープラズマ加速の特徴を活かした応用研究を推進するとともに、その普及を図っていく。

## レーザー航跡場加速の最適化: 高エネルギー単色電子ビームの安定生成

金 展<sup>1,3</sup>、神門 正城<sup>2,3</sup>、Yan-jun GU<sup>1,3</sup>、黄 開<sup>2,3</sup>、中新 信彦<sup>2,3</sup>、大東 出<sup>2,3</sup>、武藤 俊哉<sup>1,3</sup>、山本 樹<sup>4,3</sup>、細貝 知直<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> 大阪大学 産業科学研究所

<sup>2</sup> 量子科学技術研究開発機構 関西光量子科学研究所

<sup>3</sup> 理化学研究所 放射光科学研究センター

<sup>4</sup> 高エネルギー加速器研究機構

### [研究背景]

レーザー航跡場加速 (Laser Wakefield Acceleration: LWFA) は、プラズマ中に励起される波 (航跡場) を利用して電子を加速する革新的な手法であり、従来の加速器と比べて1000倍以上の加速勾配を持つことから、次世代のコンパクトな粒子加速器として大きな注目を集めています[1]。

近年では、LWFAによって生成された高エネルギー電子ビームをX線自由電子レーザー (XFEL) の電子源として利用する試みが活発に行われています[2]。

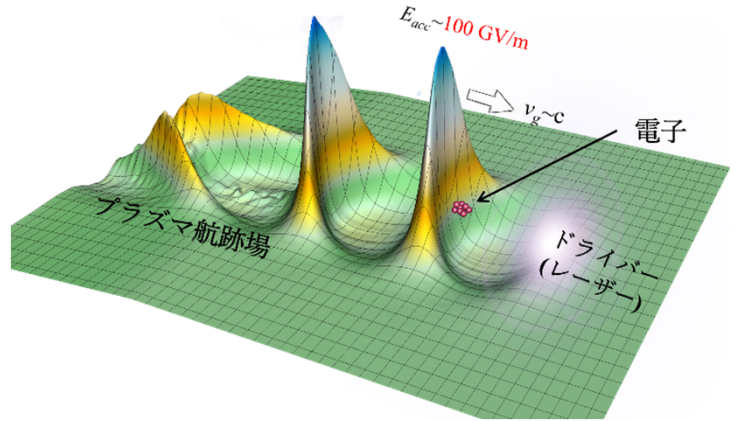


図1. レーザー航跡場加速の概念図

XFELは、ナノメートル・フェムト秒スケールの構造やダイナミクス観測を可能にする強力なツールですが、現在主流の大型加速器によるシステムは施設規模・コスト面での制約が大きく、利用できる拠点が世界的にも限られています。こうした背景の中で、数十メートルスケールの小型FEL実現に向けたLWFA技術の進展が期待されています。

### [研究結果]

私たちは、RIKEN SPring-8センターにおいてLWFA実験プラットフォームを構築し、FEL駆動に必要な高品質電子ビームの安定生成に向けた研究開発を進めています。特に、以下の点に重点的に取り組んでいます：

- ・ **プラズマ密度の最適化と安定化**: 衝撃波入射法などを用い、電子の入射タイミングと位置を精密に制御。
- ・ **レーザー波面の安定化**: 超短パルスレーザーの空間・時間特性のゆらぎを抑制。
- ・ **ビームの位相回転と空間電荷効果の最適化**: エネルギー広がりと指向性を同時に改善。

その結果、エネルギー広がり1%未満、エネルギー400 MeV級、指向安定性0.5 mrad以下という、FEL応用に十分対応可能なビーム品質の実現に成功しています[3-5]。また、小型アンジュレータと組み合わせたFEL増幅実験では、XUV領域における放射の明確な増幅効果も観測されており、小型FELの実現可能性を実証しつつあります。

本講演では、これらの開発成果を中心に、今後の展望や技術的課題についてもご紹介いたします。異分野との連携による応用展開の可能性についても議論させていただければ幸いです。

### 参考文献

- [1] T. Tajima and J. M. Dawson, Phys. Rev. Lett. 43, 267 (1979).
- [2] W. Wang, et. al. Nature 595, 516 (2021).
- [3] Z-Z. Lei, Y-J. Gu, Z. Jin, M. Kando, T. Hosokai et. al. High Power Laser Sci. Eng., 11, e91 (2023)
- [4] Y. Gu, Z. Jin, Z. Lei, M. Kando, T. Hosokai et. al. Sci. Rep. 14, 31162 (2024)
- [5] Z-Z. Lei, Z. Jin, M. Kando, T. Hosokai et. al. Rev. Sci. Instrum. 95, 015111 (2024)



## レーザープラズマ電子加速を用いた小型放射光源

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

### はじめに

放射光やX線自由電子レーザーは、物質の中を透過できるX線を高輝度に出すことができ、物質科学、生物学、創薬などになくてはならない科学分析装置となっていますが、大型の装置であることから、企業・大学の工場や研究所に設置するのは難しくなっています。特に、X線自由電子レーザーは、フェムト秒程度の短パルスのX線を用いて、高速の現象を解明できますが、ビームラインの数が少ないことなどが利用の機会を制限してきました。

私たちは、レーザーとプラズマを用いた新しい加速方法(レーザープラズマ加速, LPA)により、小型化を図り、工場などに設置可能な小型X線自由電子レーザー装置を目指した研究をしてきました。また、このレーザー加速技術で、小型の放射光リングも実現できると考えています。さらに、短パルス性を生かした研究も展開を考えています。

### 開発の現状

私たちは、極端紫外光(XUV)領域の自由電子レーザーを実証するために、図1に示すレーザー電子加速プラットフォームを構築し、試験を実施してきました。

FEL発振可能な高性能の電子ビームの生成に注力し、LPAでは世界最高級の性能を達成し、小型アンジュレータにビームを導入しました(表1)。その結果、33~44 eVの増幅されたFEL光を観測しました。

表1 XUV-FEL実験のパラメータ

| 電子ビーム    | 実測値                 |
|----------|---------------------|
| エネルギー    | 400 MeV             |
| エネルギー拡がり | <0.7%, rms          |
| 電荷量      | 20 pC               |
| ポインティング  | <0.5 mrad rms       |
| アンジュレータ  | パラメータ               |
| 周期長      | 25 mm               |
| 周期数      | 40 × 2              |
| K値       | 0~1.45 (gap 6.4 mm) |

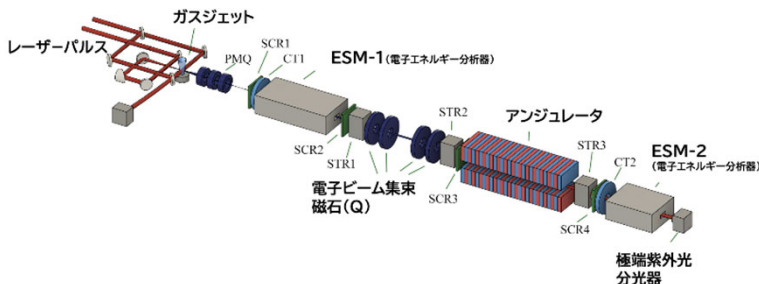


図1 レーザープラズマ電子加速によるXUV-FEL試験装置

### 今後の展望

電子ビームの安定性、とくにピークエネルギーの再現度を向上させるためにレーザーの安定化に取り組んでいます。また、発生させたFEL光は、数値計算では電子バンチのパルス幅と同等の数fsのパルス長を持つ、短パルスと期待され、応用上も期待できるもので、電子ビームの性能を上げていくことでより高輝度化、高安定化に取り組めます。

また、私たちの高エネルギー電子ビーム源は繰り返しが低いのですが、電子蓄積リングと組み合わせることで高エネルギーのX線を高繰り返しで発生させることができます(図2)。このようなレーザー技術と加速器技術を組み合わせた新しい放射光源についての可能性についても検討しています。

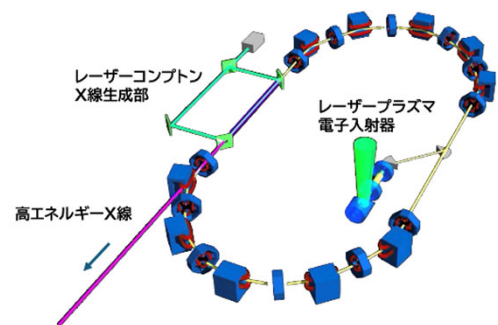


図2 LPAと電子蓄積リングによる高エネルギー放射光源案

## 極短周期・小型アンジュレータの開発と実用加速器に於ける評価試験

高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所 山本 樹

### 極短周期アンジュレータの開発

未来社会創造事業「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証:レーザープラズマ電子加速の開発とXUV-FELシステムの小型化(JST-Mirai-XUV-FEL)」では、レーザー加速された電子を用いる放射光源のコンパクト化に関する研究開発を行っている。この目的で用いるアンジュレータは、光速で進む電子を周期的に蛇行させることによって単色度が強く指向性の高い放射光を発生させる光源装置である。放射光のエネルギーはアンジュレータ周期長に逆比例して高くなるので、アンジュレータ周期長の極短周期化は、従来よりも低エネルギーの電子ビームから高エネルギー放射光発生を可能にする。アンジュレータ本体を含めた放射光源のコンパクト化と低コスト化の点で重要である。

極短周期アンジュレータ磁場生成のために、新たな着磁方式を開発した。この方式では、板状の磁石素材を図1(a)の方式によって着磁し、板状磁石PMM(Plate Monolithic Magnet)を製作する。従来の1/10程度の周期長(10-4mm)を実現できるようになった[1, 2]。図1(b)には、この方式で作成した周期長4 mm(長さ100 mm、幅20 mm、厚さ2 mm)のPMMを示している。1対のPMMをアンジュレータ主列磁石として対向させると、その隙間にアンジュレータ磁場を生成することができる。アンジュレータ磁石の長さを100 mm以上にするためには、複数のPMMを長手に連結する必要があるが、この方法の確立にも成功した[3]。

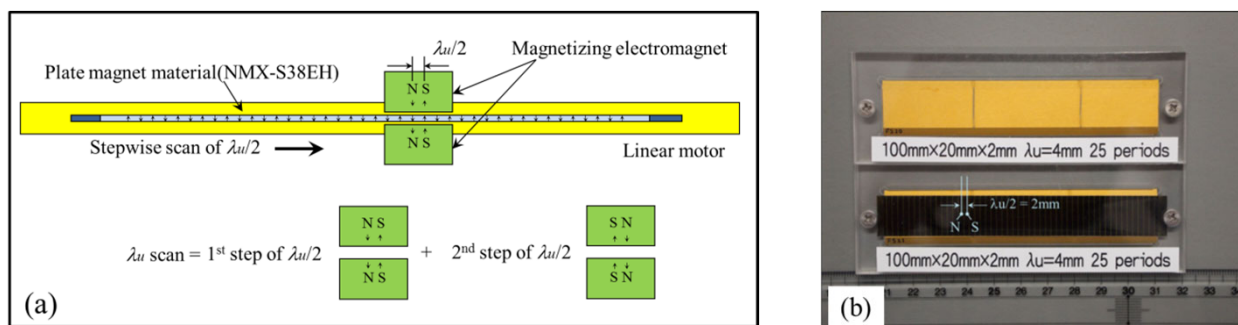


図1:(a) 極短周期アンジュレータ用板状磁石の着磁法、および(b) この方法で作成した磁石

PMMをアンジュレータの主列磁石だけでなく、主列磁石の両側に反発磁石として配置することで、主列磁石間の吸引力を効率的に相殺しアンジュレータ駆動軸に生じる機械的負荷荷重を実質的にゼロにすることができる。この技術は当初極短周期アンジュレータの機械装置の小型軽量化のために開発したが[1-4]、通常周期アンジュレータの主列および反発磁石にも適用可能であることを確認した[5]。高精度装置としてのアンジュレータの小型軽量化に大いに貢献することを証明した。実際、JST-Mirai-XUV-FELプロジェクトでは、SPRING-8レーザー加速プラットフォームにXUV-FELの光源として開発・設置した、2m長・小型・軽量アンジュレータ(周期長25 mm)にこの方式を採用した(図2(a))。磁石列は1m長の2つのセクションに分割され、独立したギャップ駆動が可能である。また、上記の磁力相殺の結果、各セクション当り重量が500kgw.と言う小型軽量化が実現されている(図2(b)) [5]。

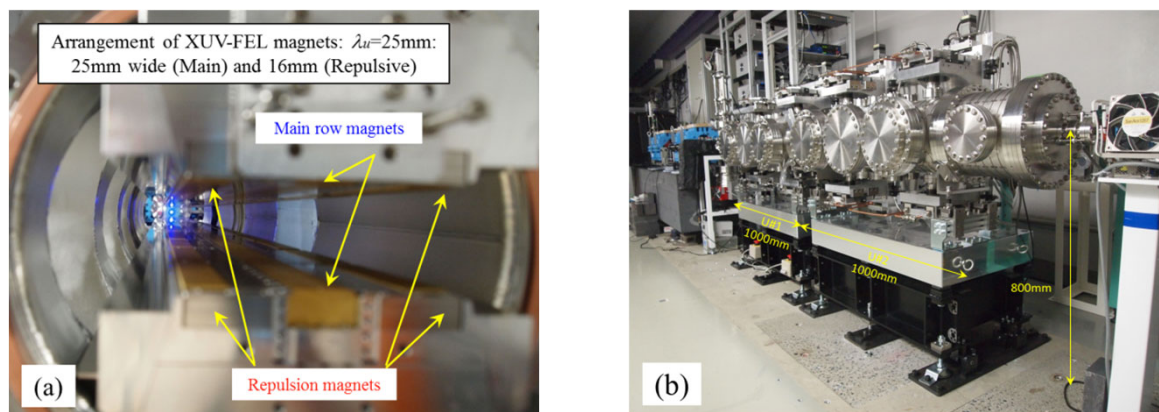


図2:(a) 磁力相殺のための反発磁石の配置、および(b) 反発磁石を用いた小型軽量XUV-FELアンジュレータ



## 極短周期アンジュレータの実用光源加速器に於ける評価試験

上記で開発した極短周期アンジュレータを実用光源加速器に設置し、生成される放射光の性能評価を行うことは、このアンジュレータの光源装置としての有用性を示すために極めて重要である。これまでに、東北大学先端量子ビーム科学研究センターRARIS(旧、電子光物理学研究センターELPH)線形加速器施設 t-ACTS (50MeV) に於ける評価試験(周期長 $\lambda_u=4\text{mm}$ 、磁石長 $L=100\text{mm}$ によるアンジュレータ放射(波長468nm)の生成)を行い極短周期アンジュレータによる放射光の高エネルギー化に成功した他、同じ極短周期アンジュレータをAichi-SR光源リング(1.2GeV)に導入設置するための検討を行い、評価試験が実施可能であることを確認し、評価試験の準備を進めている。

上記に加えて、3GeVの高エネルギー・低エミッタンスビームを利用できる、高輝度放射光施設NanoTerasuに於ける評価試験の実施準備が進行中である。ここでは、この試験について準備状況を紹介する。NanoTerasuは、国内では初めてのMBA(Multi-Bend Achromat)ラティスを採用した低エミッタンス3GeV蓄積リングと入射器である線型加速器から構成される、軟X線領域に強みを持つ世界最高レベルの放射光を供給する高輝度放射光施設であり、東北大学青葉山キャンパスに設置されている。本研究では、NanoTerasuにおける小型・高輝度挿入光源の新展開を目指し、3GeV線型加速器の最下流部において極短周期アンジュレータの導入と実証試験を行うことを目的とする。本研究は、GeV級エネルギーの蓄積リングに於ける電子ビームと同程度のエミッタンスのビームを極短周期アンジュレータに適用する初めての試みであり、当面の線型加速器に於ける実証試験を通して、低エミッタンス蓄積リング(NanoTerasu メインリング)に於ける小型・高輝度光源の実現に対する足掛かりとなることを目指している。

本研究では当面、既にJST-Miraiプロジェクトに於いて開発した、周期長 $\lambda_u=10\text{mm}$ 、および磁石長 $L=500\text{mm}$ の極短周期アンジュレータ(図3(a))を使用して評価試験を行う。研究の進展に応じて $\lambda_u=8\text{mm}$ 程度のより短周期の磁石列の使用も検討する。この極短周期アンジュレータをNanoTerasu 3GeV加速器に設置すると、 $\lambda_u=10\text{mm}$ の場合には8keVの放射光を生成することができる。NanoTerasu メインリングで想定される放射光スペクトルを図3(b)に示した。NanoTerasu加速器グループでは、極短周期アンジュレータを設置する3GeV線型加速器の最下流部の改造を含めた評価試験の準備に取掛っている。

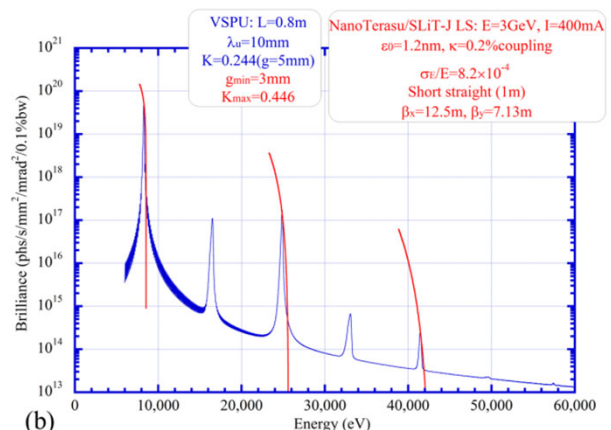
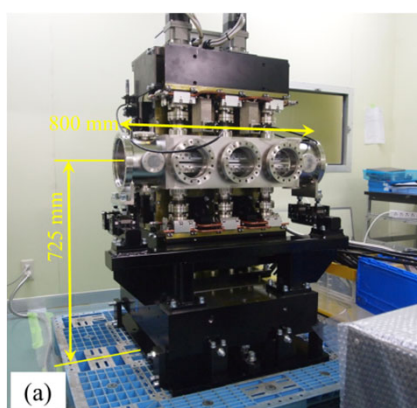


図3:(a) NanoTerasuに於ける光源評価に用いる極短周期アンジュレータ( $\lambda_u=10\text{mm}$ 、 $L=500\text{mm}$ )、および  
(b) NanoTerasu で想定される放射光スペクトル

## 参考文献

- [1] S. Yamamoto, Journal of Phys.: Conf. Ser. 425 032014, 2013, doi:10.1088/1742-6596/425/3/032014.
- [2] S. Yamamoto, WEOAA02, Proc. IPAC2014, pp.1845-1857, Dresden, Germany, 2014, doi:10.18429/JACoW-IPAC2014-WEOAA02.
- [3] S. Yamamoto, WEXGBD1, Proc. IPAC2018, pp.1735-1739, Vancouver, BC, Canada, 2018, doi:10.18429/JACoW-IPAC2018-WEXGBD1.
- [4] S. Yamamoto, et al., J. Synchrotron Rad. 26, pp.1902-1910, 2019, doi.org/10.1107/S1600577519013031
- [5] S. Yamamoto, Journal of Phys.: Conf. Ser. 3010 012028, 2025, doi:10.1088/1742-6596/3010/1/012028.

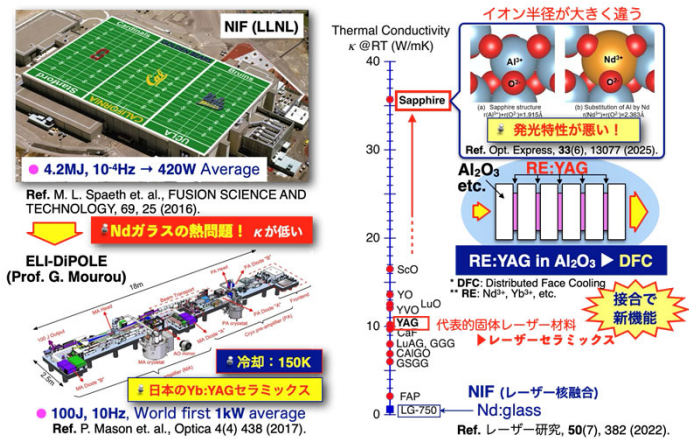
## 小型集積レーザー: 極限への挑戦とスピンアウト

理化学研究所/分子科学研究所 平等拓範

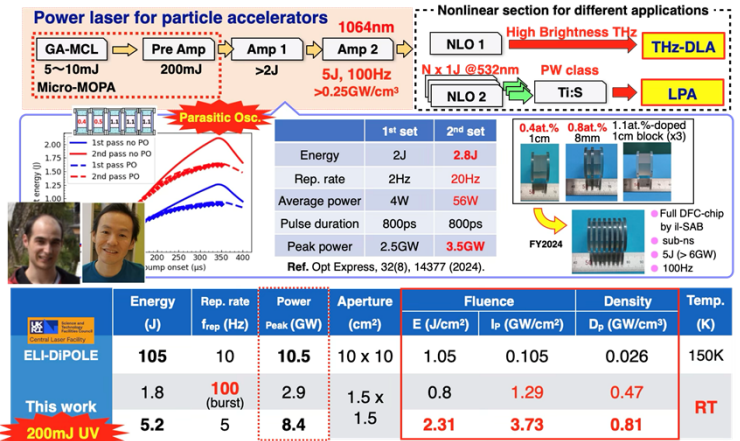
レーザー駆動電子加速に資する小型高強度レーザーの研究開発

分子・原子レベルの物質操作によるレーザー素子の新機能発現

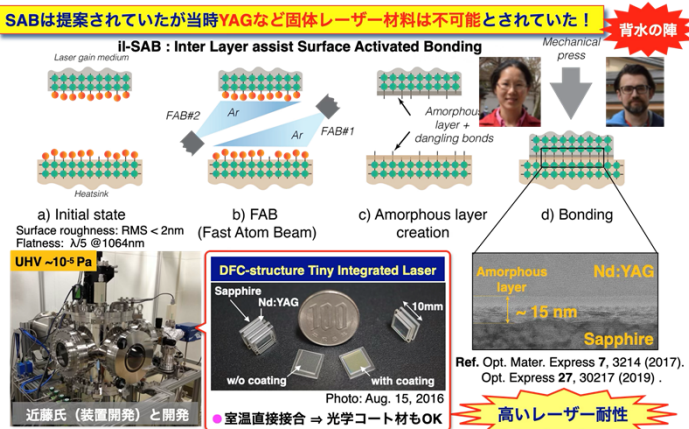
### 小型高強度レーザーに向けた提案



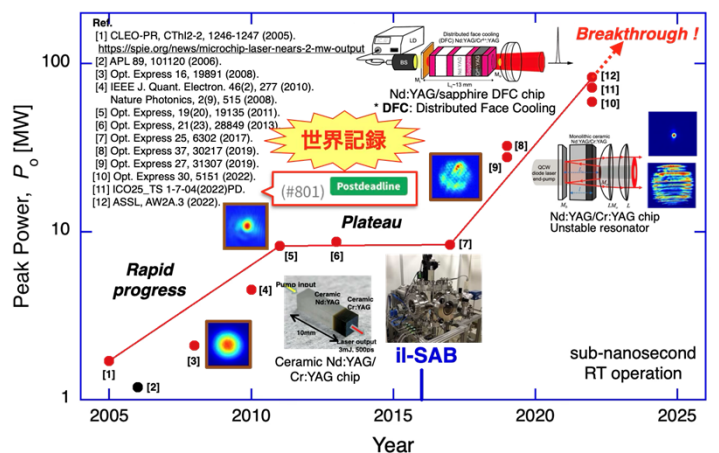
### 小型集積 DFC レーザー増幅器



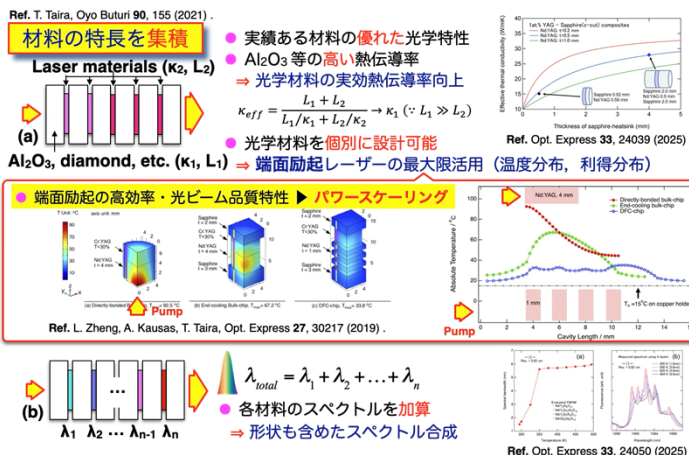
### 表面活性常温接合 il-SAB



### 小型集積 DFC チップレーザー



### DFC 小型集積レーザー



### 社会実装に向けた取り組み



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2回シンポジウム

— 電子加速システムと高強度小型レーザーの開発 — 2025/11/07開催



## 高エネルギービームを使用した体内創薬への取り組み ーレーザー航跡場加速電子ビームの社会実装を目指してー

大阪大学 産業科学研究所 細貝知直

### 研究の背景

がん治療には、外科手術に加え、化学療法と放射線療法が主要な手段として用いられている。抗がん剤を用いる化学療法は有効である一方、正常細胞にも作用し全身的な副作用が問題となる。この課題に対し、体内では不活性で特定の刺激により活性化するプロドラッグ (prodrug) の利用が注目されている。プロドラッグは、酸化還元環境などによる内因性刺激や、光・超音波などの外因性刺激によって活性化される。紫外線や近赤外光を用いた例も報告されているが、光は組織深達性が低く、深部腫瘍の標的化には限界がある。

一方、放射線療法は粒子加速器で生成した高エネルギー粒子線やX線を照射し、DNAを直接または間接的に損傷してがん細胞を破壊する。陽子線や重粒子線は深部到達性と高精度照射が可能で、さらに照射により生じる水和電子 ( $e_{aq}^-$ ) やOHラジカルなどの活性種 (reactive species) が間接的にDNA損傷を誘発することも知られている。ただし、高線量照射では正常組織への損傷が避けられず、低線量・高選択性治療が求められている。

我々は、化学療法と放射線療法を相補的に活用する新しいアプローチとして、放射線照射で誘起される放射線化学反応に着目している。照射により生成される水和電子やラジカル種がプロドラッグの化学構造を変換し、局所的に薬効を発現させる可能性を検討している。現在、低線量の高エネルギー電子線を外因性トリガーとして用いるプロドラッグ活性化戦略の開発を進めており、深部病変でも選択的に薬剤を活性化できる新たな非侵襲的治療法として期待される。

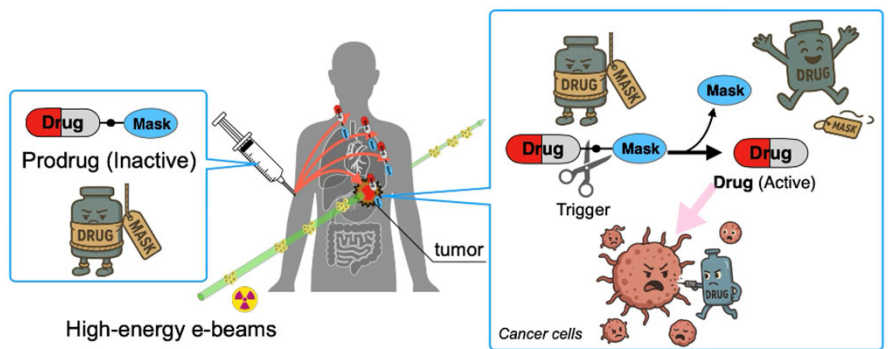


図1 超相対論的電子ビーム化学療法 (U-REBIT) の概念図

### 高エネルギー電子ビームを用いた化学治療

我々は、高い組織深達性を有する高エネルギー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し、新しい治療概念「超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) の開発と並行して実証研究を進めている。

図1にU-REBITの概念図を示す。LWFAによって生成される約300 MeV (メガ電子ボルト) 級の相対論的電子ビームは、高い指向性とエネルギー保持性を維持したまま、体内を大きな減衰なしに深部まで透過する。この電子ビームを外因性刺激として用いることで、体幹深部の限局領域におけるプロドラッグ活性化が可能となり、従来の非侵襲的手法では対応が困難であった深部病変への局所化学療法を実現できる可能性がある。

### 開発状況

これまでに、複数のヒトがん細胞を用いた in vitro 実験およびがんモデルマウスを用いた in vivo 治療実験により、プロドラッグ化した抗がん剤を線形加速器 (linac) およびレーザー航跡場加速器 (LWFA) から的高エネルギー電子ビーム照射によって活性化できることを確認した[1]。照射により誘起されたプロドラッグの活性化は、照射領域に限定して抗がん剤の生理活性および薬理効果を発現することを実証している。

さらに現在、電子線照射下で高い選択的活性化を示す新規プロドラッグ分子群の設計・合成を並行して進めている[3]。講演では、これらの成果を基に、相対論的電子ビームを外因性トリガーとして利用するプロドラッグ活性化技術の有効性と将来展開について報告する。

### 参考文献

1. T. Hosokai, Y. Yamashita et al., *Nature Physics*, under review (2024).
2. 特許出願済み。
3. 細貝知直、山下泰信、他：一般社団法人レーザー学会学術講演会第45回年次大会，予稿集 I07-22p-III-04.