

## 電子加速技術の開発成果と展望

大阪大学 産業科学研究所 細貝知直

### はじめに

高強度レーザーパルスとプラズマとの相互作用で励起される電子プラズマ波(レーザー航跡場)を用いて電子を加速するレーザー航跡場電子加速は、その超高電場による加速機構故に、巨大な高エネルギー電子加速器を飛躍的に小型化し、原理的には、GeV級の超高エネルギー加速器でさえも卓上サイズで実現できると期待されています。これまでの世界各国の研究開発競争で当初目標を大きく超えるマルチGeVの加速エネルギーや[1]準単色ビーム発生の実証[2]が既に達成され電子の加速機構としての高いポテンシャルが示されてきました。しかしながら、ビームの安定性/再現性、品質、制御性等の電子加速器としての性能指標の現状は、その加速媒質となるプラズマの制御の難しさから既存の電子加速器に遠く及ばず、これらの確立がレーザー航跡場加速器実現の喫緊の課題となっています。

### レーザー航跡場加速の実用化に向けて

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」では、レーザー航跡場加速のGeV級電子ビームをドライバーとする超小型X線自由電子レーザー(XFEL)の実現を目標に掲げ、レーザー航跡場加速の実用化に向けた研究開発に取り組んでいます。レーザー航跡場加速で高エネルギー電子ビームを従来加速器のように毎ショット再現性良く生成することは大きな挑戦ですが、XFELのドライバー電子ビームには、これに加えて大電荷量、極短パルス性、高い単色性、低エミッタンス性も同時に要求されます。非線形レーザー航跡場ではこのような高品質な電子ビームを再現性良く生成することが難しいため、入射と加速に機能を分離(従来加速器の電子銃と加速管の機能に相当)した制御性の高い線形レーザー航跡場で電子ビームを段階的に加速する多段レーザー航跡場加速を提案し、研究開発を実施しています。

図1に多段レーザー航跡場加速駆動XFELの概念図を示します。レーザー航跡場を励起する三つのレーザーパルスは正確に時間同期し、それぞれの航跡場の機能に最適化されたエネルギー、パルス幅、標的ガス密度に調整されます。レーザー航跡場の初段は電子入射、二段目は位相回転(単色化)と加速、三段目は追加速の機能をそれぞれ担います。さらに、追加速部をモジュール化し段数を重ねていくことでより高い加速エネルギーを得ることも可能です。

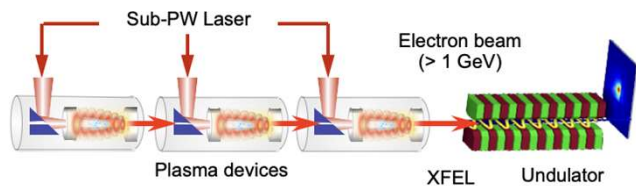


図1 多段レーザー航跡場加速駆動XFELの概念図

### 研究開発現状

近年、高強度レーザーパルスに対してレンズや光ファイバーの機能を持つプラズマ光学素子[3]や電子ビームを標的直前で強集束するプラズマレンズ[4]などが開発され、これらの技術の導入によってGeV級電子ビーム発生のみならず、電子ビームの品質と安定性が飛躍的に向上しました。電子ビームの安定性と再現性の向上に伴い従来加速器のビーム光学の導入も可能になり電子ビームの制御性は更に向上しています。これらの成果を基に、レーザー加速実験プラットフォームが理研SPRING-8キャンパスの旧SCSSトンネル内に構築され、レーザー加速電子ビーム駆動のXFEL実験では可視～EUV領域のアンジュレータ放射が確認され始めています。現在、レーザー航跡場加速研究は原理実証から加速器の実現へと向かう過渡期にあります。レーザー航跡場加速器をXFELのドライバーとして実用化するためには、電子ビームのさらなる高品質化と高い安定性/再現性が不可欠です。そのためには、プラズマダイナミクスやプラズマ中の電子輸送を含めた電子加速機構の詳細にわたる理解とともに、従来加速器のビームの制御技術との融合がより一層重要になります。講演ではこれらの詳細について報告します。

### 参考文献

1. W. P. Leemans et al., Nature Physics 2, 696 (2006); S. Karsch et al., New J. Phys. 9, 415 (2007)
2. S. P. D. Mangles et al., Nature (London) 431, 535 (2004); C. G. R. Geddes et al., Nature 431, 538 (2004); J. Faure et al., Nature 431, 541 (2004); E. Miura et al., Appl. Phys. Lett. 86, 251501 (2005)
3. T. Hosokai et al., Phys. Rev. Lett. 97, 075004 (2006); Y. Mizuta et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams., 15, 121301 (2012); Y. Sakai et al., Phys. Rev. Accel. Beams., 21, 101301 (2018); N. Nakanii et al., EPL(Europhysics Letters), 113, 34002 (2016)
4. Z. Jin et al., Sci. Rep., 9, 20045 (2019)