

未来社会創造事業 大規模プロジェクト型
年次報告書

令和3年度
研究開発年次報告書

平成29年度採択研究開発代表者

[研究開発代表者名：佐野 雄二]

[大学共同利用機関法人 自然科学研究機構 分子科学研究所 社会連携研究部門・特命専門員]

[研究開発課題名：レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証]

実施期間：令和3年4月1日～令和4年3月31日

§1. 研究開発実施体制

[A] 「阪大電子加速」グループ(大阪大学 産業科学研究所)

- ① 主たる共同研究者: 細貝 知直 (大阪大学 産業科学研究所
量子ビーム物理研究分野 教授)
- ② 研究項目
 - ・ ガスジェットノズルのチューニングによるエネルギー制御加速電子の電荷増大・単色性向上
 - ・ キャピラリー放電チャンネル標的を使用した電子加速実験
 - ・ プラットフォームレーザー BL-3(10 Jライン)の整備
 - ・ レーザー航跡場加速最適化のための数値計算

[B] 「QST レーザー診断」グループ(国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 関西光科学研究所)

- ① 主たる共同研究者: 神門 正城 (量子科学技術研究開発機構 量子ビーム科学部門 関西光科学研究所、グループリーダー)
- ② 研究項目
 - ・ 各種高精度高速ビーム診断技術の開発(パルス長・タイミング計測器の開発)
 - ・ ビーム制御技術の開発(イオン化入射法、衝撃波入射法、衝突入射法)

[C] 「JASRI 電子加速器等共通技術開発」グループ(公益財団法人高輝度光科学研究センター)

- ① 研究開発代表者: 熊谷 教孝 (公益財団法人高輝度光科学研究センター、名誉フェロー)
- ② 研究項目
 - ・ レーザープラズマ航跡場への同期入射用 $\sim 10\text{fs}$ 極超短パルス電子線型加速器の開発
 - ・ $\sim 10\text{fs}$ 極超短パルス電子幅の測定手法の開発
 - ・ フェムト秒領域のレーザー同期法の開発

[D] 「KEK 小型システム」グループ(大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構)

- ① 主たる共同研究者: 吉田 光宏 (高エネルギー加速器研究機構、加速器研究施設、準教授)
- ② 研究項目
 - ・ EUV-FEL 実証用マイクロアンジュレータの開発
 - ・ X-FEL 実証用マイクロアンジュレータの開発
 - ・ 磁場増強マイクロアンジュレータ磁石の開発
 - ・ 新奇原理に基づくマイクロアンジュレータの開発
 - ・ レーザーシステムの小型化
 - ・ 尖頭電流向上とバンチ内密度変調の研究
 - ・ レーザープラズマ追加速

[E] 「QST イオン加速」グループ(国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構)

- ① 主たる共同研究者: 近藤 公伯 (量子科学技術研究開発機構 量子ビーム科学部門・

② 研究項目

- ・ 10 Hz 以上の高繰り返しレーザー駆動加速技術の開発
- ・ 被加速粒子高純度化のための技術の開発
- ・ レーザー、プラズマ、イオンに関するリアルタイム計測診断系の開発
- ・ 4 MeV/u 重イオン加速スキームの最適化

[F] 「分子研レーザー」グループ(大学共同利用機関法人 自然科学研究機構)

- ① 主たる共同研究者: 平等 拓範 (大学共同利用機関法人 自然科学研究機構 分子科学研究所、特任教授)

② 研究項目

大口径連続接合装置の研究開発、及び TILA モジュールの産業展開

- ・ 直径 10cm 相当大口径連続接合装置の実用化
- ・ TILA モジュールの産業展開

[G] 「理研レーザー」グループ(国立研究開発法人 理化学研究所)

- ① 主たる共同研究者: 平等 拓範 (理化学研究所 放射光科学総合研究センター、グループディレクター)

② 研究項目

電子加速のためのパワーレーザーの研究開発

- ・ 基本波出力 5J 級 DFC モジュールの開発
- ・ TILA モジュールによる Ti:サファイアレーザー励起実験
- ・ スペクトル合成レーザーの検証研究

[H] 「阪大レーザー」グループ(国立大学法人大阪大学)

- ① 主たる共同研究者: 河仲 準二 (大阪大学レーザー科学研究所、教授)

② 研究項目

- ・ イオン加速用レーザーの開発
- ・ セラミックス母材新レーザー材料の開発

[I] 「電通大レーザー」グループ(国立大学法人電気通信大学)

- ① 主たる共同研究者: 米田 仁紀 (電気通信大学レーザー新世代研究センター、教授)

② 研究項目

- ・ レーザーのフィージビリティスタディ
- ・ オゾン回折光学素子を用いた新しいレーザーシステムの開発
- ・ 光学素子の長寿命化と高品質化の研究

§ 2. 研究開発成果の概要

- 「小型 XFEL」研究開発

衝撃波入射を用いた電子発生の最適化を進め、EUV FEL 発振に必要な電子ビームパラメータを取得した。レーザー波面の改良により電子ビームの方向制御を可能とし、ポインティング揺らぎを従来の1/3に改善した。また、相対エネルギー拡がり($\Delta E/E$)1%未満の単色性の高い電子ビームを得た。イオン化入射法と衝撃波入射法に於ける電子バンチ構造を計測し、衝撃波入射は単色性に優れ、より短いバンチ長が得られることを確認した。また、ガスジェットの密度分布を制御することにより、ピークエネルギー300MeV、 $\Delta E/E \sim 6\%$ (FWHM)以下で大電荷量(~ 50 pC)の電子ビームを再現よく発生できることを確認し、密度分布と電子ビームのエネルギースペクトルの相関を明らかにした。また、EUV FEL 用アンジュレータとして、周期長 25mm、K 値 1.4 ($B_0 = 6000$ G)、磁石間距離 5mm が可能な磁力相殺方式の小型極短周期アンジュレータ試験機(磁石長 1m)を開発した。

- 「重イオン小型入射器」研究開発

イオン加速プラットホームのレーザーシステムの高度化を進めイオン加速実験を行った。昨年度開発した 100Hz の 2 段のチタンサファイア CPA を 10Hz の最終段増幅器に導入し、パルスあたりの出力エネルギー 0.75 J で、圧縮パルス幅 40 fs 程度、パルスコントラスト 10^{10} 程度が得られることを確認した。観測された炭素イオンスペクトルは、現状では C^{4+} と C^{5+} が支配的であり、 C^{6+} が支配的な状態まで電離が進んでいないことがわかった。この結果は比較的簡単な理論モデルや PIC シミュレーションによる計算結果と矛盾しておらず、イオン入射器の置き換えに必要なイオン価数、イオンエネルギー、イオン数の目標値を満たすためには、レーザー集光強度および標的の最適化によるシース電場の増強が必要であることが分かった。また、炭素イオン発生の高純度化に必要な条件を明らかにするとともに、炭素イオンの連続発生を目指して高繰り返し発生可能なターゲットシステムを試作した。

- 「高強度小型レーザーシステム」研究開発

将来の加速用レーザーシステムに必要な小型高出力レーザーの実現を目指して、DFC 構造の最適化によるレーザーの熱問題解決、100J/100Hz を視野に入れたアクティブミラー型の冷却構造の高度化、超高耐力光学素子としてのオゾンレンズの非点収差解消、高耐力ミラーのコーティング損傷現象の予兆捕捉等において、多くの進捗があった。

【代表的な原著論文】

- [1] Naveen Pathak, Alexei Zhidkov, Tomonao Hosokai, "Effect of pulse group velocity on charge loading in laser wakefield acceleration", *Physics Letters A* 425, 127873 (2022).
- [2] K. Huang *et al.*, "Experimental demonstration of 7-femtosecond electron timing fluctuation in laser wakefield acceleration," *Applied Physics Express* 15, 036001 (2022).
- [3] Yoichi Sato and Takunori Taira, "Study on the specific heat of Y3Al5O12 between 129 K and 573 K", *Opt. Mater. Express* 11, 551 (2021).