

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2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: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]

[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 2 年 4 月 1 日～令和 3 年 3 月 31 日

§ 1. 研究実施体制

[A] 「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

[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] 「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: 白井 敏之 (量子科学技術研究開発機構 量子医学・医療部門放射線医学研究所、部長)
- 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

[D] 「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
 - ・ ラムダキューブ型電子入射器の開発
 - ・ 入射器の高度化
 - ・ 安定ブースターの開発

[E] 「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開発(直径数 cm 相当の DFC 構造製作用)
 - ・ TILA モジュールの産業展開の準備

[F] 「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

- ・ 基本波出力 2J 級 DFC モジュールの開発
- ・ 第二高調波出力 1J 級波長変換素子の開発
- ・ TILA モジュールによる Ti:サファイアレーザー励起準備
- ・ スペクトル合成レーザーの基礎研究

[G] 「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

- ・ 大口径制御素子
- ・ 高強度・高繰り返しアクティブミラー型増幅器の開発
- ・ ジュール級二倍高調波 (SHG) 発生装置の開発
- ・ パラメトリック増幅試験
- ・ セラミックス母材新レーザー材料の開発
- ・ レーザーシステムの共用利用の促進
- ・ パワーレーザー用国内産業技術の結集と普及・産業展開

[H] 「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

- ・ マルチコアファイバーを用いたコヒーレント加算
- ・ 超低損失高強度対応オゾン回折素子の開発とその応用
- ・ 低損失ミラーの損傷機構の解明と損傷データベース化

[I] 「KEK アンジュレータ」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：足立 伸一（高エネルギー加速器研究機構、物質構造研究所、教授）

② 研究項目

- ・ 磁場増強マイクロアンジュレータ磁石の開発
- ・ マイクロアンジュレータ筐体の小型精密化
- ・ マイクロアンジュレータの開発

§ 2. 研究実施の概要

● 「小型 XFEL」研究開発

今年度の電子加速プラットホームでは、入射器の開発に注力した。レーザーパルスの空間チャープと電子ビーム発生軸の相関を明らかにし、この調整方法を確立した。これにより利用できるビーム電荷量が増え、電子ビームの計測、制御性、が大きく向上した。PIC シミュレーションで高い単色性のビーム発生が示唆された双こぶ型の密度分布を持つ超音速ガスジェット標的を開発し、この密度分布を精密に制御する事で単色性の高い($\Delta E/E \sim$ 数%(FWHM)以下)電子ビームを再現よく発生できる事を確認した。更にパルス四重極電磁石とスリットによるエネルギースライス制御を追加することで、再現性を維持したまま、更に単色性の高い電子($\Delta E/E \sim 1\%$ (FWHM)以下)の生成を確認した。入射器の電子ビームを用いて、電子ビームとレーザー光のタイミング計測とバンチ長計測を行い、10 fs (rms)以下の電子ビームとプローブレーザーのタイミングジッターと、30fs (rms)以下の電子ビームバンチ長を確認した。さらに、入射器からの200 MeV の電子ビームと極短周期アンジュレータ($\lambda u=10\text{mm}$, $L=500\text{mm}$)を用いて放射光を確認し、イメージ計測と分光計測を効率よく行えるシステムを設計・製作する指針を得た。上記のレーザー駆動加速部の研究開発に加え、プラズマ中の航跡場を評価のために RF 小型電子加速器のコンポーネント開発・準備を並行して実施した。

● 「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レーザーシステムでのイオン加速実験を開始し、連続標的供給装置によるイオン発生安定性を評価した。レーザーシステムについては、昨年度開発した 100Hz の1段目 CPA を2段目以降へと繋げ、40mJ のレーザー出力を100Hz で達成し、この状態でパルス圧縮することで、スペクトル幅 60nm 程度、圧縮パルス幅 30fs 程度、パルスコントラスト 10^{-10} 程度であることを確認した。ターゲットの炭素高純度化では、真空下での CW レーザー加熱の有効性をポリイミド炭化薄膜、およびグラファイト薄膜、ニッケル基板+グラファイト蒸着薄膜、それぞれに対して確認し、レーザー加熱しながら汚染物を除去して炭素の加速効率を上げる手法が基盤技術として使えることが明らかになった。さらにイオンビームの診断系の開発では、低エネルギー($\sim 10\text{keV/u}$)の炭素イオンを用いて、荷電粒子ビーム光学技術を用いたビーム計測技術の開発、ならびにペッパーポッドシステムによるエミッタンス評価をおこなった。イオン加速スキームの最適化では、励起レーザーの分散制御により発生イオンの最大エネルギーと発生量が制御できることを実験的に明らかにした。また、2D、3D PIC シミュレーションにより各種パラメータ依存性を評価した。

● 「高強度小型レーザーシステム」研究開発

Ti サファイア励起レーザーシステムとして、常温使用の DFC 構造の Nd:YAG と低温使用のアクティブミラー構造の Yr:YAG の励起レーザー先行器の開発を進め、実機に向けた技術開発に目処が着きつつある。また波長変換素子等についても開発を実施した。また、高強度短パルス Ti サファイアシステムの技術的検討を開始した。レーザー関連の要素技術開発として、機械学習を用いたレーザーの安定化、高耐力光学素子の開発および光学素子等の高信頼化評価用加速試験装置の開発を実施した。

● 主要な成果

- [1] “Dynamics of laser-driven heavy-ion acceleration clarified by ion charge states”, M. Nishiuchi et al., Phys. Rev. Research 2, 033081 - Published 15 July 2020.