

未来社会創造事業 大規模プロジェクト型
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]

[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6年4月1日～令和7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：レーザー電子加速技術の開発
 1. 電子加速プラットホーム整備／FEL 実験
 2. 入射器の高度化
 3. 数値シミュレーション
 4. 電子ビーム創薬応用技術の開発
 5. 短パルス線型加速器の開発・応用研究

[B] 「QST レーザー診断」グループ（量子科学技術研究開発機構）

- 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 量子技術基盤研究部門、
関西光量子科学研究所、副所長）
- ② 研究項目：高速・高精度診断系の開発
 1. バンチ計測システムの開発
 2. XUV/X 線計測器の開発
 3. ビーム制御技術の開発

[C] 「KEK 小型システム」グループ（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、教授）
- ② 研究項目：システム小型化に向けた研究開発
 1. XUV-FEL 実証用マイクロアンジュレータの高度化
 2. X-FEL 実証用マイクロアンジュレータの開発（優先度見直しにより実施見送り）
 3. 磁場増強マイクロアンジュレータ磁石の開発（優先度見直しにより実施見送り）
 4. 小型光源リングにおけるマイクロアンジュレータ利用の検討
 5. 新奇原理に基づくマイクロアンジュレータの開発（別資金にて実施）
 6. レーザーシステムの小型化（理研・分子研レーザーGと連携）
 7. 尖頭電流向上とバンチ内密度変調の研究（研究完了）
 8. レーザープラズマ追加速（優先度見直しにより実施見送り）

[D] 「QST イオン加速」グループ（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、関西光量子科学研究所、
量子応用光学研究部、部長）
- ② 研究項目：レーザー駆動イオン加速技術の研究開発
 1. 実験とシミュレーションによるイオン加速スキーム並びにターゲット構造の決定
 2. ターゲットシステムの高度化開発
 3. 炭素イオンビームライン開発
 4. プラットホームおよびレーザーの整備

[E] 「奈良女イオン応用」グループ(奈良国立大学機構奈良女子大学)

- ① 主たる共同研究者: 石井 邦和 (奈良女子大学、研究院自然科学系物理学領域、准教授)
- ② 研究項目:イオンビームの高純度化
 1. 高純度化評価実験
 2. 高純度化シミュレーション
 3. 高純度化ユニット開発
 4. 既存ビームとの比較実験

[F] 「分子研レーザー」グループ (自然科学研究機構)

- ① 主たる共同研究者: 平等 拓範 (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
 1. 直径 10cm 相当大口径連続接合装置の実用化
 2. TILA モジュールの産業展開

[G] 「理研レーザー」グループ (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:粒子加速のためのパワーレーザーの研究開発
 1. 大出力 DFC モジュールの応用開発
 2. TILA モジュールによる Ti:サファイアレーザー励起実験
 3. 広帯域レーザー媒質の探索

[H] 「阪大レーザー」グループ (大阪大学 レーザー科学研究所)

- ① 主たる共同研究者: 余語 覚文(大阪大学レーザー科学研究所、教授)
- ② 研究項目:レーザープラズマ加速のためのハイパワーレーザー研究開発
 1. AM 用大口径接合技術の開発
 2. 新レーザー結晶の開発 (優先度見直しにより実施見送り)
 3. 新しい広帯域増幅技術の開発 (優先度見直しにより実施見送り)

[I] 「電通大レーザー」グループ (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:レーザーのフィジビリティスタディ
 1. 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
 2. 深層学習を用いたレーザー制御の研究 (優先度見直しにより実施見送り/期中に実施へ変更)
 3. 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

■ 「電子加速／小型 FEL」研究開発

レーザー加速プラットフォームに於ける光学系、制御系の性能向上を図り、電子ビームの収束性が大幅に改善した結果、EUV 領域に於けるアンジュレータ光の増幅状態が安定的に維持可能となった。並行して実施した PIC 法シミュレーションとの整合性も高い。開発した極短周期アンジュレータを小型光源リングで利用する検討も進んだ。レーザー加速電子ビームを低線量照射トリガーとして用い、体内深部のがん病巣のプロドラッグを局所的に活性化する「相対論的電子ビーム化学療法」に関しては、抗がん剤の生理活性、マウスの局所部位での薬理効果等について試験を行い、有望な結果を得た。播磨から移設を進めている C バンド高周波 (RF) 線型加速器の構築も計画通り進捗した。

■ 「重イオン小型入射器」研究開発

レーザーシステム、ターゲットシステム、ビーム伝送システムから構成される重イオン加速プラットフォームの統合試験を継続し、改良・高度化を進めた。その結果、レーザーシステムの光軸安定化、高コントラスト化が進展し、また、ターゲットシステムの表面汚染除去機能も改善され、世界で初めて 10Hz 動作で安定した炭素イオンの加速を実現するに至った。連続交換型デブリシールドの開発も進捗した。生成される低エネルギー極短パルス重イオンビームを用いた実験的研究の検討も開始した。空間電荷効果を考慮したシミュレーションにより、ビーム伝送システムの設計指針となる定量的な評価も進んだ。また、3次元 PIC シミュレーションからは重イオン加速プラットフォームに必要となるレーザーエネルギーに関する知見が得られた。

■ 「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となる小型高出力レーザーの実現を目指した研究開発を引き続き推進した。常温接合が可能な大口径連続接合装置の実用化、DFC チップを使用した Ti:サファイアレーザー励起・増幅実験、広帯域化のためのスペクトル合成レーザーの実証等に於いて進捗を見るとともに、産業展開を推進した。アクティブミラー (AM) 増幅システムのさらなる大エネルギー化を目的とした試験装置「SENJU」の構築および性能評価を行い、予想を上回る利得を実験的に確認した。オゾン密封型回折光学素子に関しては、外部レーザーに依る密度変調波の制御に成功した。また、深層学習試験用レーザー発振器システムを構築し、レーザー制御に関する評価を進めた。光学素子の長寿命化と高品質化に関する取り組みでは、光学素子損傷の高速検出、位置特定が進捗し、損傷に関して統計的な知見が得られるに至った。

【代表的な原著論文情報】

- [1] Kai Huang, et al., “Electro-optic 3D snapshot of a laser wakefield accelerated kilo-ampere electron bunch”, *Light: Science & Applications* **13**, 84 (2024).
- [2] Yan-Jun Gu, et al., “Generation of highly stable electron beam via the control of hydrodynamic instability”, *Scientific Reports* **14**, 31162 (2024).
- [3] 榊泰直、白井敏之、“医療応用を目指したレーザー駆動型小型イオン加速器開発”、「加速器」Vol. 21、No. 2、2024 (112-118).