

プログラム名：ユビキタス・パワーレーザーによる安全・安心・長寿社会の実現

PM名：佐野 雄二

プロジェクト名：レーザー加速・XFEL実証

委 託 研 究 開 発

実 施 状 況 報 告 書 (成 果)

平 成 29 年 度

研究開発課題名：

ビーム計測・制御技術の開発

研究開発機関名：

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構

研究開発責任者

神門 正城

## I 当該年度における計画と成果

### 1. 当該年度の担当研究開発課題の目標と計画

レーザー駆動のコンパクト XFEL 実現のため、レーザー航跡場の分布計測及びレーザー・プラズマ制御技術を開発する。開発項目は、5 項目あり、そのうち 3 項目は 1D グループが開発する要素技術であり、残り 2 つは他のグループと共同で行う開発項目である。5 つの項目は、①航跡波計測装置の開発、②高出力レーザーによる電子加速試験、③レーザー安定化試験、④ビームモニタの開発、⑤プラットホーム統合実験である。各項目の目標は以下の通りである。

#### ①航跡波計測装置の開発

前年度までに開発に成功した、周波数領域ホログラフィー法と極短パルスプローブ光を用いた航跡波分布の計測器をプラットホーム拠点にて整備する。

#### ②高出力レーザーによる電子加速試験

量研機構で開発された高出力レーザーを用いて、100fs 程度のパルス幅にて電子加速試験を行ない、レーザーの伝播の様子や GeV 級の加速電子エネルギーを計測する。実験結果は PIC シミュレーションと比較する。

電子加速時にベータトロン計測器を用いて、X 線の角度分布、エネルギー分布の計測を実施する。

#### ③レーザー安定化試験

レーザードリフトを補償するためのレーザー位置モニターとミラーの制御を行う装置をプラットホーム用に整備する。

#### ④ビームモニタの開発

電子ビームのパルス幅・タイミング計測装置として電気光学素子を用いた手法を高度化させる。また、電子ビーム位置、エネルギーの計測に関して拡張できないか可能性を探る。

#### ⑤ プラットホーム統合実験

理研播磨地区に設定されたプラットホームの電子加速実験装置の準備を大阪大学等と協力して行ない、実験開始する。これまでに開発してきた計測器や装置の設置を行う。

### 2. 当該年度の担当研究開発課題の進捗状況と成果

#### 2-1 進捗状況

#### ①航跡波計測装置の開発

極短パルスプローブは、拠点のパルス圧縮部と加速チェンバーの間に光学定盤を設置し、メイン光の 0 次回折光をビーム縮小系により 1/10 程度にした後、30fs に再圧縮し、ガスフィル型細管中に集光し自己位相変調による広帯域化、チャープミラーによるパルス圧縮装置を整備した。後述するように、パルス帯域の問題が発生したことや、実験スケジュールで電子発生を優先させるため、今年度はパルス圧縮まで完了させ、広帯域化させずにプラズマ観測に用いた。本装置により、電子発生条件の最適化（レーザーのプリパルス除去）役立つことができた。

電子周波数領域ホログラフィー法については部品の整備と配置案の設計を行った。

## ②高出力レーザーによる電子加速試験

量研機構で開発された高出力レーザーを用いて、10 mm 長のガスジェットを用いてブースター部の模擬試験を行った。レーザー光に正チャープを与えておよそ 80 fs 程度にしたところ、ポインティング不安定性が改善し、エネルギー600 MeV の準単色電子を得ることができた。本実験では、偏向磁石の前後に電子位置検出用スクリーンを設置し、ポインティングがふらついた状態でも電子のエネルギーを正確に計測できるマルチスクリーン方式を新たに導入し、エネルギー計測の正確性を向上させた。また、実験結果はPICシミュレーションとの比較や詳細解析を実施している。

アライメント装置としてのベータトロン X 線計測器を原子力機構の高エネルギー X 線照射装置（放射線標準施設）で湾曲結晶 X 線分光器の特性評価試験を実施した。高エネルギー X 線照射装置から L=3m の位置に同分光器を設置し、X 線照射装置の印加電圧をそれぞれ 70, 120, 200 kV の条件で分光器に入射し、分光データを取得した。

## ③レーザー安定化試験

拠点に 2 色のレーザーダイオードビームを整備し、Ti:Sapphire レーザーと同軸にアライメントを行い、光学系のドリフトや、モニターの原点出しを行えるようにした。

## ④ビームモニタの開発

電子ビームのパルス幅・タイミング計測装置として電気光学素子を用いた手法の原理の再検討を行った。シミュレーションや理論計算を行った結果、従来知られている位置と時間の較正式を修正する必要があることを発見した。またプラットホームでの電子入射器セクションでの計測の準備を行った。

## ⑤ プラットホーム統合実験

大阪大学、理研のグループと共同でプラットホーム拠点での電子加速 Phase 1（入射器）の準備を行い、プローブ計測系、トムソン散乱計測系、ステージ駆動ソフトウェアなどを整備し、実験を開始した。

## 2-2 成果

### ①航跡波計測装置の開発

極短パルスプローブシステムの拠点への導入は基本装置の設置は完了し、30 fs 程度まで圧縮した。このパルスをプラズマの観測に用い、電子発生条件の最適化に資することができた。

電子周波数領域ホログラフィー法については部品の整備と配置案の設計を行った。

### ②高出力レーザーによる電子加速試験

量研機構で開発された高出力レーザーを用いて、10 mm 長のガスジェットを用いてブースター部の模擬試験を行った。レーザー光に正チャープを与えておよそ 80 fs 程度にしたところ、ポインティング不安定性が改善し、エネルギー600 MeV の準単色電子を得ることができた。本実験では、偏向磁石の前後に電子位置検出用スクリーンを設置し、ポインティングがふらついた状態でも電子のエネルギーを正確に計測できるマルチスクリーン方式を新たに導入し、エネルギー計測の正確性を向上させた。また、実験結果はPICシミュレーションとの比較や詳細解析を実施している。

アライメント装置としてのベータトロン X 線計測器は、電子加速時には用いることができなかったが、原子力機構の高エネルギー X 線照射装置（放射線標準施設）

を用いて特性 X 線から本分光器のエネルギー分解能を評価した所、60keV の X 線に対し約 1 %である事が明らかになった。

また本実験で取得した分光結果と入射 X 線強度を比較し、本分光器に入射する湾曲結晶の回折効率 R を解析し、目標である 30 - 120 keV の X 線が分光出来る事が確認出来た。

### ③レーザー安定化試験

プラットホーム拠点に 2 色のレーザーダイオードビームを整備し、これを用いて光学系の調整、安定度評価、計測装置の設置に資することができた。

### ④ビームモニタの開発

電子ビームのパルス幅・タイミング計測法において、レーザー電子加速の発生点近くにおいた場合に、従来知られている公式が適用できず、修正した関係式を導出し、論文として発表した。本装置をプラットホームへ組み込みを行った。また、これを電子ビームの位置検出に用いる装置を設計した。

### ⑤ プラットホーム統合実験

理研播磨地区に設定されたプラットホームの電子加速実験装置の準備を大阪大学等と協力して行ない、電子入射部の試験を行った。1 J, 20 fs のレーザーパルスを窒素ガス中に集光し、パルスソレノイドにて電子ビームを集光することができた。エネルギーは 14 MeV、電荷量は数 pC 程度が達成できた。本調整において、①で開発中のプローブ光を 30fs 程度で用いてレーザーのコントラスト調整を行ない、最適な電子発生条件を探ることができた。

## 2-3 新たな課題など

プラットホームへの極短パルスプローブを設置するにあたり、レーザービームライン 1 の 0 次回折光を別途圧縮するラインを構築したが、0 次光のスペクトルが元のレーザーのスペクトルの長波長成分が減少した構造となっていることが判明し、またエネルギー分岐比も 1%程度と効率が見積より低いことが判明した。対策としては、当初の予定通りパルス幅短縮試験を行うこと、問題があれば 0 次光ではなくメインビームからビームを切り出すこととした。

## 3. アウトリーチ活動報告

神門がイタリア カプリ島で開催された **Advanced Summer School on “Laser-Driven Sources of High Energy Particles and Radiation”**にて、**LWFA Electrons: staged acceleration** というタイトルで 2 コマの講義を行った。講義内容は、加速器物理の基礎とレーザー電子加速における多段加速のレビューと理論について解説と考え方、問題点、将来展望についてである。主にヨーロッパの大学院生、アジアからの大学院生が参加者が約 50 名程度参加した。