

未来社会創造事業 大規模プロジェクト型
年次報告書

H30 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]

[所属: 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 : 平成 30 年 4 月 1 日～平成 31 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~10fs 極超短パルス電子線型加速器の開発
 - ・ ~10fs 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
 - ・ ビーム制御技術の開発

[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] 「理研電子加速」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: 細貝 知直 (理化学研究所 放射光科学総合研究センター、チームリーダー)
- ② 研究項目
 - ・ 数サイクルレーザーのアップグレード
 - ・ 電子ビームビ入射器の高度化

[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、准教授)
- 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)
 - ・ 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
- ・ TILA モジュールの産業展開の準備

[F] 「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

[G] 「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

§ 2. 研究実施の概要

[A] 「JASRI 電子加速器等共通技術開発」グループ

JASRI 電子加速器等共通技術開発グループでは、レーザー航跡場へ入射する電子線型加速器を研究開発している。それは、縦方向の時間幅が 10fs 以下で横方向の幅が全幅で数百 μm の電子バンチを生成するものである。本年度は、この短バンチ電子の生成方法として幾つかの方法を検討した。その中には、数 ps 幅の 2MeV 程度の電子ビームを C バンド (5712MHz) のレーザー高周波電子銃より生成して、その後と同じく C バンドの進行波型バンチ圧縮空洞を採用することで電子の速度変調により 10fs 以下の短バンチを生成する線型加速器がある。我々は、この加速器の予備的な電子ビームの軌道シミュレーションを実施し、ほぼ目標に近い電子ビームの縦方向 Z が時間にして 12 fs で、横方向 X,Y が 200 μm に絞れることを見いだした。このことから今後の開発方向としては、この線型加速器の開発をすることを決めた。

以上に加えて我々は、線型加速器の大電力高周波源であるクライストロン用の出力 350kV のパルス高電圧電源を製作した。その性能は、予備的な試験の範囲であるが、クライストロンを駆動出来る 30pps で 350kV、4 μs の高電圧パルスを出力できるものである。またその電圧安定度は、そのスイッチング周波数を現行の 20kHz から 40kHz に上げることで世界最高レベルの約 10ppm (全幅) のパルス毎の電圧ジッタに達した。またフェムト秒領域の レーザー同期方法の開発として我々は、レーザー光源である発振器で必要な、モードロック用の時間基準となる超低ノイズ電氣的発振器 (80MHz ほか) を開発した。モードロック

がレーザーの出力時間ジッタを決め、その性能を決定づける大きな要素はモードロックの時間基準となる電気発振器のノイズレベルである。開発した信号源のノイズレベルは、X線自由電子レーザーに於いて電子ビームと加速高周波の13fs (rms)の同期性能を実現した信号源より、予備的な評価であるが5712MHzの側波帯の10Hzに於いて-10dB以上低い-80dBであった。このレベルは既に世界最高レベルである。

[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)

パルス長・タイミング計測に関しては、播磨拠点でのレーザー加速電子ビーム(30-80 MeV, ~1 pC)に対し、QSTにて実績のある電気光学効果空間デコード法(GaP結晶)によるシングルショット計測を実施したが、信号計測に至らなかった。感度不足が原因と考えられることから、より高感度(~75倍)のZnTeに変えて計測を行う予定である。短いパルス長を計測可能なコヒーレント遷移放射光計測のための分光器を設計し、2~18 μ mの波長範囲をシングルショットで計測できる分光器を設計した。ビーム制御技術に関しては、イオン化入射法の試験をQSTのJ-KAREN-Pレーザーを用いて行った。レーザーパワーは300 TW, 40 fs, 集光強度 10^{20} W/cm²で直径10 mmのコニカルガスジェットノズルを用いた。Neガスをを用いることで、発散角が<1 mradのビームが発生することがわかり、これはイオン化ボリュームとタイミングが影響していることを示唆している。このように、イオン化入射法を用いることで加速電荷量、ビーム品質がある程度制御できることがわかった。

[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)

イオン加速については、パルスコントラスト性能が改良されたJ-KARENを利用し、加速スキームの最適化実験をリアルタイム診断装置開発と合わせて実施した。炭素線については、銀薄膜照射において1ショットあたり4 MeV/uの炭素線を1msrあたり10%帯域内にH29年度に得られたものより多く発生できることがわかった。また、イオン加速のためのプラットホームレーザーの整備を加速し、ダブルCPAシステムの1段目の開発を終え、R1の夏にイオン加速のための照射実験を開始できるように開発を進めた。

[D] 「理研電子加速」グループ(国立研究開発法人 理化学研究所)

数サイクルレーザーのアップグレードに関しては、ラムダキュー法のドライバーとして開発されている数サイクルレーザーはこれまでにエネルギー1mJ,パルス幅5.5fsのパルスが得られている。平成30年度は、10mJに出力を増強するために、高出力のピコ秒励起レーザーを追加した。grismおよびdazzlerを透過することで分散補償およびパルス幅伸張された光をこの励起レーザーを用いたNOPAで増幅することにより10mJまで増幅した。入射器の高度化に関しては、ステージング加速において追加速航跡場へ入射する単色電子ビームの電荷量を増やすため、入射器の電子輸送系を検討し予備実験を実施した。入射器の電子ビームの単色化と収束に用いているパルス駆動ソレノイドに加え、強収束用のパルス駆動ソレノイドを導入し、電子発生点をイメージリレーすることによりブースターへの電子入射効率を向上させた。また、二次元PIC(粒子法)シミュレーションにてステージング加速のブースターレーザー航跡場における加速可能な電子ビームの最大電荷量を見積もった。この手法を用いてレーザー航跡場でのチャージローディングの効果を考慮したステージング加速の検討が可能となった。

[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)

連続接合装置の開発(直径数 cm の DFC 構造)につき継続検討を行った。特に H30 年度は、中間層を介した接合に関し良好な結果を得て、40mm 角のサファイア/Nd:YAG の4層連続接合を検証した。今後、その評価を進める。基本波出力 2J 級 DFC モジュールの開発に関しては、DFC モジュールのレーザー性能評価系開発、励起レーザーの DFC モジュール開発(2J, 120Hz の設計)につき発熱特性を計算し、H30 年度は出力 2J, 120Hz のモジュール設計を行った。評価に関して、その発熱をサーマルカメラにより評価する事を行い、DFC 構造のありなしで劇的な発熱の違いがある事を検証した。第二高調波出力 1J 級波長変換素子の開発に関しては、SHG デバイスの開発(100mJ 級 SHG の設計)として、H30 年度は水晶 QPM 素子の可能性を評価し、従来手法では、LBO, YCOB, QPM-水晶 と順次特性が劣化すると考えられてきたが、強励起状態では、状況が逆転する。このような観点から、100mJ 級 SHG デバイスの設計に必要な QPM-水晶、YCOB の基本特性を取得する事にした。TILA モジュールによる Ti:サファイアレーザー励起準備に関しては、10TW 出力 Ti:サファイアレーザーの準備はほぼ終了。スペクトル合成レーザーの基礎研究に関しては、スペクトル合成レーザーの検討(Nd を発光中心とした広帯域固体レーザー及び広帯域 OPCPA のための非線形波長変換素子の探索)として、H30 年度はスペクトル合成レーザーに不可欠な分光計測システムの開発などを行った。TILA モジュールの産業展開の準備に関しては、理研では、H30 年 10 月 1 日付けで「レーザー駆動電子加速技術開発グループ」を発足。分子研において社会連携研究部門を H31 年 4 月 1 日より発足させることになり、また TILA コンソシアムが立ち上がる予定である。

[F] 「阪大レーザー」グループ(国立大学法人大阪大学)

レーザープラズマ加速に必要な高繰り返し動作と高パルスエネルギー動作が可能な超高強度レーザーとして数十 J、>100Hz を現状の目標として設定した。これを実現する現実的な超高強度レーザーとしてチタンサファイアレーザーや光パラメトリック増幅を想定した場合に、最大の課題である励起レーザー光源として 100J, 100Hz, 1kW を開発目標とした。この励起光源を実現するための第一段階として、大口径の偏光制御素子およびレーザー増幅器を開発し 10J, 100Hz, 1kW のパワーレーザーシステムを世界で初めて構築する。具体的には、レーザーシステムに不可欠な偏光制御素子として TGG セラミックを用いた口径 50mm 級ファラデー偏光回転装置を新規に開発した。また、パルスエネルギーのスケールに優れ、かつ高い除熱機能を持つ口径 50mm 級アクティブミラー型増幅器を新規に開発しファラデー偏光回転装置と組み合わせ主増幅器として構築し 10J, 100Hz, 1kW のパワーレーザーシステムの試験を開始した。現在、10J, 10Hz, 100W を得ることに成功するとともに、熱、波面、偏光、自然放出増幅光、寄生発振に関する知見が得られパルスエネルギー100J 増力の設計が可能となった。本レーザーを超高強度レーザーの励起光源としての利用するためには二倍高調波への変換が必要であり、1kW の平均出力に常時耐えうる二倍高調波発生を阪大独自の軸方向冷却された非線形結晶を用いることで実現する。このための装置設計を終了した。

さらに、超短パルス高強度パワーレーザーの基盤技術として、超高強度を維持しつつパルスエネルギーを抑えることでレーザー装置全体を小型化する試みとして 10fs 以下の超短パルス化を検討した。小出力ながら 300nm 以上の超広帯域光パラメトリック増幅に成功した。これを高パ

ルス化する際に問題化するビーム口径内の局所的な増幅スペクトルの違いを補正する手法を独自に考案、特許申請した[1]。

また、複数のエネルギー変換を必要とする現在の超高強度レーザーからの脱却として将来のさらなる小型化・高効率化を目指した新レーザーセラミック材料開発を進めており、液相から開始するセラミック製造技術の初期段階として素となる粉体の粒径制御を行い、最適条件を見出した。

レーザーの産業展開として H30 年 11 月に大阪大学レーザー科学研究所内に企業 30 社による「パワーレーザーフォーラム」を立ち上げ、産学連携ネットワークの枠組みづくりを開始した。

[1] Li Zhaoyang, 河仲準二、「レーザー増幅方法」特願 2019- 3879.

[G] 「電通大レーザー」グループ(国立大学法人電気通信大学)

本グループでは、将来の高繰り返し、高平均出力レーザーを実現するために、ファイバーレーザーでのコヒーレント加算技術の開発、超高耐力超低損失光学素子の開発とそれを利用した新しい概念のレーザーシステムの原理実証実験、超高品質光学素子の高耐力化とその試験および製造方法の確立を行っている。まず、マルチコアファイバーのコヒーレント加算の研究では、将来の数十～数百本にもなると予想される加算本数に適応可能なコヒーレントビーム結合技術として、異なるファイバーレーザー間の位相を深層強化学習の手法で合わせていくシステム開発を行った。30年度では、まず、二つのファイバー増幅器のコヒーレントビーム結合の位相雑音を評価関数とし、機械学習をさせた後で加算時の変動を抑えるプロセスを行うソフトウェアの開発を行った。その結果、従来のPID制御と有意な差がないレベルまで加算可能なことを確認した。超低損失オゾン回折素子の開発では、スイッチ後の回折波の波面計測を行い、波面精度が $\lambda/10$ 以下になるような動作領域を決定し、10Hz程度まで安定に高品質な波面が得られることを確認した。これまですでに回折効率で96%を達成しているので、この結果と合わせ、実際のレーザーシステム応用への最低条件をクリアすることができた。超低損失高反射率光学素子は、使用するレーザーの高平均出力化が進むにつれ重要となってくる。しかし、この高反射率低損失化とパルスレーザーに対する高耐力化は現在までのところ同時には達成されていない。特に、精密に制御された光学薄膜が高平均強度のレーザーにさらされた時に、どのような変化をするかは不明である。この評価のためには、他の要因を排除できる試験環境整備が必要で、そのための新たなクリーンルーム環境を設置(クラス10程度)し、膜のin-situ計測モニターとしてエリプソメトリを照射面で測定できるシステムを構築した。