

研 究 報 告 書

「極相対論的光電磁場における重元素低主量子数電子の電離機構の解明」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 2016 年 10 月～2020 年 3 月

研 究 者: 西内満美子

1. 研究のねらい

超高強度レーザーを薄膜ターゲットに照射すれば、従来型加速器に用いられる加速空洞では発生不可能な究極に高い加速電界が照射時間に同期する時間(フェムト秒)で発生可能であり、この極高強電場はレーザー駆動型のイオンの加速の源として着目を集めている。申請者により、この究極に高い加速電界を使えば、従来型加速器技術では不可能な、重元素の高エネルギー加速と多価電離を、同時に達成できる「極高強度準静的電場」が生じることが明らかにされた。そこで本研究では、重元素の多価電離と高エネルギー加速に寄与する「極高強度準静的電場」と、レーザー光そのものが有する「相対論的極高強度光電磁場」という一見類似しているように見え、実は全く異なる二つの極高強度場に着目し、未だ完全に理解されていない相対論的な超高強度光電磁場による重元素の低主量子数電子の電離過程を実験的に明らかにすることに挑戦する。

超高強度レーザーによる元素の光電離過程においては、「Ammosov-Delone-Krainov (ADK) 理論によるトンネル電離過程でほぼ完全に説明できる」と理解される。しかし実際には、もはや一般的な技術となっている 10^{21} [W/cm²] を超えるようなペタワット(= 10^{15} [W] 以下 PW と記述) 級レベルのレーザーとイオン化ポテンシャルが ~ 100 keV にもなる質量数 200 クラスの重元素の低主量子数電子の電離過程を考えた場合にはこの考えは適用できない。ADK 理論のトンネル電離のモデルの中では、レーザー電場は準静的な電場によって近似でき、その電場によって束縛電子の持つポテンシャル壁が押し下げられて束縛電子が電離するという半古典的な描像に基づくが、これには次の重要な 2 点が欠落する。①相対論的なレーザー強度では、光磁場の効果によって束縛電子がレーザー進行方向に得る速度が増加し、静電場中での電子の動きが双極子近似では扱えないこと。②相対論の効果による電子質量の増加。本研究においては、これらの重要な 2 点が、極相対論的な光電磁場強度において電離過程にいかなる影響を及ぼすのかを実験的に示すことに主眼を置き、「極高強度光電磁場」そのものと、「光電磁場と同等強度を持つ極高強度準静的電場」という比較実験に必要なユニークな二つの系を作り出し、重元素の低主量子数電子の電離過程の両者における違いを明らかにする。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究は「極高強度光電磁場」と「極高強度準静的電場」による重イオンの低主量子数電子の電離過程の違いを実験的に探るものである。

本研究遂行には極強集光可能なレーザーシステムが必須となる。本研究開始時期には、そのようなレーザーは日本においては報告者が所属する QST 関西研の J-KAREN システムがその可能性を持つ唯一のマシンであった。まず①J-KAREN システムの大強度化プロジェ

クトにコアメンバーとして貢献し、J-KAREN システムの強集光を達成した。②強集光したレーザー光とターゲット物質が相互作用するのを妨げるレーザーの背景光の低減を行った。これら二点は、世界初の試みであることを特筆する。

「極高強度準静的電場」は、その強集光した光と最適な材質と厚みでできたターゲットを相互作用させて初めて生成される。大強度レーザー光は、波形整形された後も矩形波とは程遠い波形を示すため、その波形に最適化されたようなターゲット素材を選択する必要がある。また極高強度準静的電場を生成するには nm レベルの厚みの薄膜が必要であるため、残った背景光によって擾乱を受けにくい重元素の銀を選択し、nm レベルの厚みの自立薄膜ターゲットを形成する技術を開発した(③)。

極高強度準静的電場でイオン化された重イオンを計測するのに必要な装置の開発を行った。具体的にはトムソンパラボラスペクトロメータの原理に独自のアイデアを組み合わせ、異なる核子からのイベントを識別可能とした方式である(④)。

次に「極高強度準静的電場」生成のために、最適化されたレーザー波形と生成した銀の 500 nm の薄膜ターゲットを相互作用させることで、42 TV/m の極高強度準静的電場の生成に成功し、準静電場によるイオン化過程では Ag+37 価までを確認した(⑤)。その際に得られた重要な知見として、超高強度レーザーと固体薄膜の相互作用にて生成されるプラズマは非常にユニークな高温(10 keV)固体プラズマであること、さらにターゲットの厚みによっては、固体高温プラズマ中での電子衝突イオン化によって+42 価まで電離されたイオンを裏面の電場で引き出すことが可能であることが分かった。レーザーによる重イオン加速のイオン化メカニズムは、世界においても初めての知見である。

また「極高強度電磁場」と重元素のイオン化過程を探るために TOF-MS スペクトロメータを開発し、キャリブレーションまで完了した。今年度後半に予定されている大強度レーザーのマシントイムにて実験を行う条件が整った(⑥)。

(2) 詳細

1) レーザー開発: 超高強度場電磁場を生成するツールの開発

本研究を遂行するにあたり、超高強度電磁場を実験室に実現するための強集光可能なレーザーシステムが必須となる。本研究開始時期には、そのようなレーザーは世界においても立ち上がりつつあるような状況であり、日本においては報告者が所属する QST 関西研の J-KAREN レーザーシステムがその可能性を持つ唯一のマシンであった。そこで、J-KAREN レーザーシステムの大強度化プロジェクトにコアメンバーとして貢献した。その結果を Figure.1(a)(b)に示す。Fig.1(a)は J-KAREN レーザーの集光スポット、Fig.1(b)パルス波形を示す。適切な波面形成を行うことで、集光スポットは回折限界のほぼ2倍である $1.3 \times 1.4 \text{ mm}^2$ まで強く絞り込むことが可能となり、時間波形においては、時間位相を調整することで、ほぼフーリエ限界に近いところまで圧縮が可能となった。この結果集光スポットにおけるレーザーの強度は世界最高レベルである $\sim 10^{22} \text{ Wcm}^{-2}$ が達成された[1]。

2) レーザー開発: コントラスト向上のための試み : SRSI-ETE

また、レーザーにはピークパルスに先立つ背景光が存在することが知られている。この背景光はメインパルスより前にターゲット物質と相互作用するために、メインパルスとターゲット

物質が直接相互作用する前に、ターゲットの状況が変化してしまうという問題が発生する。超高強度レーザーの場合はこの問題がより顕著になる(背景光が物質のイオン化閾値を優位に超える)ために、本研究で計測したいメインパルスピークによる原子のイオン化の信号がバックグラウンドに埋もれて計測できなくなるという問題が発生する。当初 J-KARENレーザーの持つ時間波形においてはこの背景光成分が、メインパルスに先立つ 200 ps 以前より、元素のイオン化レベルをはるかに超える強度($>10^{13} \text{ Wcm}^{-2}$)領域で存在していた。この状況を改善すべく J-KAREN レーザーシステムの背景光を低減する試みを行ない、Fig.1(c)にみられるように大幅な改善に成功した [2,3,4,5]。

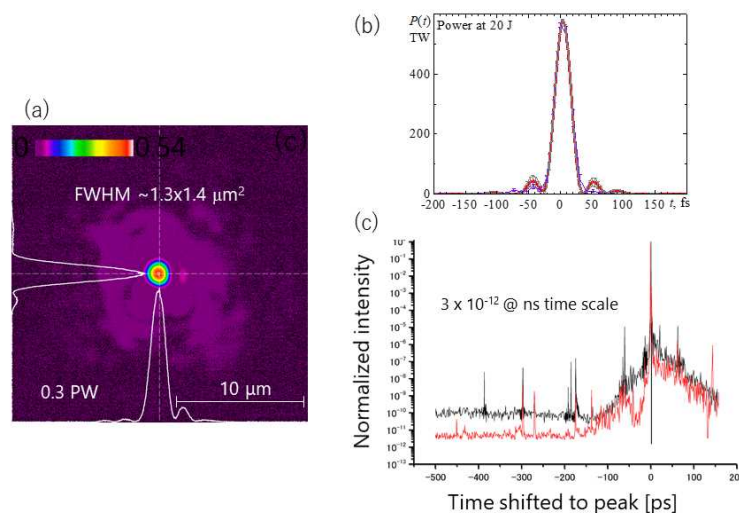


Figure.1 J-KAREN レーザーの持つ(a)集光スポット、(b)パルス波形、(c)コントラスト。

3) 超高強度電場生成のためのターゲット作成

本研究テーマの一つである、極高強度準静的電場生成の手法としては、超高強度レーザーと薄膜を相互作用させ、レーザー照射側から見て裏面に生成されるシース電場(電荷分離電場)を用いる。このシース電場の強度は、薄膜に照射するレーザーのピーク強度の約 7 割程度までたかめることが可能である(詳細は現在執筆中の論文に記述)。このシース強度はターゲットの裏面における電子の密度および電子温度に依存する。しかしながら、上記のレーザーのコントラスト状況が悪いと、ターゲットの裏面にメインパルス照射前にプリプラズマが形成され、プラズマ密度が固体密度よりも減少する。レーザーと薄膜との相互作用によって照射面から発生する高エネルギー電子が発散角を持つため、ターゲットが厚い場合、裏面における電子の密度が減少する。すなわち、できるだけ背景光が低いレーザーを用いて、できるだけ薄い薄膜を使うことで、ターゲット裏面に極高強度準静的電場が生成できる。しかしながら、超高強度レーザーの背景光は全くゼロにすることは原理的に不可能であり、かつ矩形波のようなパルスを生じできないため、ある程度有限の背景光を持つパルスに耐えるターゲットの素材を選ぶ必要がある。このような状況を加味し、背景光に抵抗力がある重元素の銀をターゲット素材として選択し、最薄で 5 nm までの自立ターゲット生成手法を開発した。

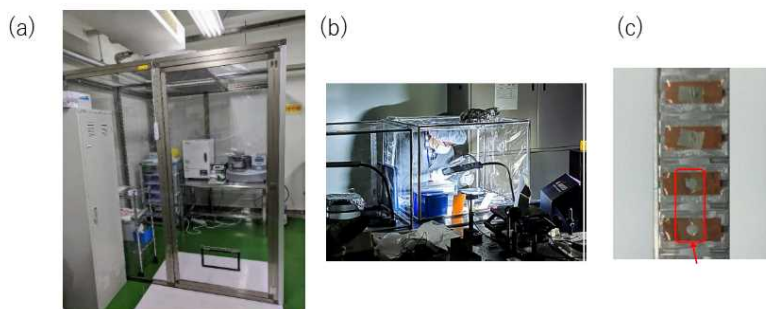


Figure.2 (a) 自立薄膜生成のために開発したクリーンブース、
(b)自立薄膜ターゲットを生成する様子、(c)5 nm の銀の自立薄膜ターゲット。

4) レーザー駆動カクテルビームより重イオンを識別する手法の開発

レーザー駆動イオン加速ビームの持つ特徴であるカクテルビーム性から、様々な核種のイオンが様々な電荷分布をもってターゲットから発生する。通常レーザー駆動イオンビームの識別には、トムソンパラボラスペクトロメータが用いられる。トムソンパラボラスペクトロメータとは、ターゲットより飛行して飛び出すイオンの軌道に対して垂直に電場と磁場を同方向に印加することで、イオンはターゲットから離れた位置に設置した検出器上で、イオンが持つエネルギーおよび価数によってパラボラ曲線を描くことでイオンを分別する原理を持つ。ただし、この際に、同じ価数と質量比(以下 Q/M と記述)を持つイオンに関しては、同じ軌道上に分布することになり、異なる核子であったとしても同じ Q/M を持つイオンは識別することが不可能である。本研究においては、重元素の価数を計測することが目的であり、同じパラボラ曲線上を描く軽元素のイベントと重元素のイベントとを区別することが必須となる。そこで、トムソンパラボラ検出器の検出面にイメージングプレート(以下 IP と記述)を選択した。異なる Z を持つイオンはイメージングプレート上に落とすエネルギー(dE/dx)が異なること着目し、あらかじめイオン種、エネルギー、価数が明らかな加速器からのイオンビームを用いてイメージングプレートを精度よくキャリブレーションした。その結果レーザー駆動のカクテルビームより、精度よく銀のイベントを識別することが可能となり、重元素の銀の価数を正確に計測することが世界で初めて可能となった。

5) 超高強度短パルスレーザーと固体薄膜相互作用による極高強度場生成

大強度レーザー J-KAREN システムからのレーザーパルスを銀のターゲットに照射することで、マクロな準静的電場としては、地球上の他のいかなる手法によっても生成できない極高強度電場 50 TV/m を達成した。この電場強度は、例えば宇宙における中性子星の表面付近に存在する電場強度に匹敵するほど高強度な電場である。

実験では J-KAREN レーザーシステムを 300 TW モードで用い、10 J、40 fs のレーザー光を 500 nm の銀の薄膜に F/1.4 の軸外し放物面鏡で 45 度の角度から $5 \times 10^{21} \text{ Wcm}^{-2}$ の集光強度で照射した。達成した電場の強度をターゲット素材の銀のイオン価数によって計測するという手法をとることを考え、上記 4) のトムソンパラボラスペクトロメータを用いた。

ターゲットの裏面に強力な電場を立てたい場合にターゲット上に邪魔ものが存在する。それは、ターゲット表面に存在する、数十 nm の厚みの水や油などの不純物層である。レーザーが

ターゲットに照射されることで、この不純物層由来の軽元素がターゲット裏面にプラズマを形成し、そのプラズマ中に電場が形成されることで、まずは不純物層由来の軽元素が電場のポテンシャルによって加速される。すなわちこれらの不純物層の加速に電場のポテンシャルが無駄に使われるために、標的である銀を電離及び加速するための強い電場の形成には至らない。すなわちこの表面不純物層を取り除く必要がある。そこで、J-KAREN レーザーのパルスをやうまく整形してやることで、プリパルスを形成し、このプリパルスによってあらかじめプリシース電場を作り、ターゲット表面の不純物層を電離・加速することを考えた。すなわちメインパルスが銀ターゲットに照射される時間には、不純物層は十分ターゲットより離れている状況を実現するというものである。ただしここで気を付けるべきは、プリパルスの強度とメインパルスとの時間である。あまりにも強度が高いプリパルスを早期に照射すると、不純物ばかりではなくターゲット自体もプラズマ化して膨張してしまうために、高強度場形成に必要な電子密度が下がってしまうからである。

このようにあらかじめ時間波形を調整した J-KAREN レーザーを用いることでターゲット裏面に強電場を形成し、銀を電離・加速し取り出した。結果としてトムソンパラボラスペクトロメータには最高+42 まで多価電離された銀イオンが 15 MeV/u まで加速されたことが計測された。また同時に計測された表面不純物層由来の陽子線は 40 MeV まで加速されていたことを確認した。

この実験状況を詳細に理解するために、解析的手法、および流体シミュレーション及び PIC シミュレーションを行った。用いた PIC シミュレーションには詳細なイオン化プロセスが組み込まれている。

まず、メインパルス照射時にはターゲットの表面の不純物層は十分にターゲット表面から離れた位置まで吹き飛んでいることが確認され、かつその時点において銀のターゲットは固体密度を保っていたことも確認された。次に、照射したレーザーの電場に相当する 200 TV/m に対し、その約 1/5 である 43 TV/m の電場がターゲットの裏面に形成されていることが確認された。この加速電場でイオン化できる銀の価数は 37 価どまりであり、実験で計測された 42 価の銀イオンのイオン化メカニズムは説明できないことが分かった。

しかし、ターゲットの温度はメインパルス照射によって、10 keV 近くまで上昇していたことが確認され、42 価まで多価電離されたイオンはターゲット中の電子の衝突電離過程によって生成され、裏面の加速電場で取り出されたイベントであることが理解された。

また、このような高い温度を持つ固体の銀プラズマを生成できるのは、背景光をできるだけ落とした超高強度短パルスレーザーのみであり、生成されたプラズマは非常にユニークなプラズマであることも確認された。

6) 超高強度電磁場と希ガスの相互作用で形成される多価イオン識別のための MS-TOF システムの開発

ここでは、「超高強度電磁場」によるイオン化過程を調査するために、 10^{21} Wcm^{-2} を超える超高強度レーザーと希ガスの相互作用によるイオン化閾値を実験的に取得し、古典モデルとの比較を行うことを目的とする。そのために必要な飛行時間計測法による質量分析装置 (MS-TOF) を開発した。集光強度の低いレーザー ($< 10^{18} \text{ Wcm}^{-2}$) による原子のイオン化過程を調べるための分析装置と超高強度レーザーを照射してイオン化過程を調査するための分析

装置は、設計思想が全く異なる。低強度のレーザー照射においては、レーザー照射によってイオン自体が速度をもらい受けることはない。しかしながら、レーザー強度が 10^{21} Wcm^{-2} レベルになると、レーザーの持つ電磁場によって、イオン自体も加速されてしまい速度を持つことになる(例えば 10^{22} Wcm^{-2} の直線偏光レーザーを、Kr に照射すると、レーザー偏光方向に最高で 5 KeV ものエネルギーを得る)。このような「初速を持った」イオンをいかに効率よく収集し、エネルギー分解能よく検出器に運ぶかを粒子シミュレーションを用いて設計し MS-TOF システムを制作した。

今年度後半(2019/12~2020/1)に大強度レーザーJ-KAREN を用いて Ar および Xe のデータのレーザー電磁場によるイオン化メカニズムの実験を行う予定である。

3. 今後の展開

「超高強度電磁場によるイオン化(テーマ A)」と「超高強度準静電場によるイオン化(テーマ B)」のそれぞれについて記述する。

両テーマ共通してさきがけ期間内において調査できたレーザーの強度範囲は、 $<5 \times 10^{21} \text{ Wcm}^{-2}$ にとどまっている。しかしながら、もっとレーザー強度が上がっていくことで、レーザー電磁場と静電場との違いが顕著に表れてくるのは明らかであり、引き続きさらなる高強度領域にてこれらのテーマを続けていくことが必要である。これらは、既存のイオン加速手法にない卓越した特徴を持つレーザー駆動重イオン加速手法を制御するためには必要不可欠な情報である。レーザー駆動重イオン加速手法が超高強度レーザー領域で制御可能になれば、現在最先端の素粒子・原子核実験に用いられている重イオン加速器の飛躍的な小型化が期待でき、エネルギーフロンティアにさらなる切込みを入れることが可能になると考えられる。

テーマ(B)において、研究開始当初には考えていなかった新しい展開(4 章に詳細を後述)につながったため、超高強度レーザーと薄膜との相互作用にて生成できるユニークなプラズマにおけるエネルギー輸送の問題に引き続き取り組みたいと考えている。これも、レーザー駆動重イオン加速器制御のために必要不可欠なテーマであるとともに、プラズマ物理としても未踏の領域における研究である。

また、さらに高強度のレーザーを用いることで、プラズマ中に radiation friction の効果が卓越してくる領域に入ると考えられ、イオン化のプロセスとしては、今の強度領域($<10^{22} \text{ Wcm}^{-2}$)では無視できる X 線の光子衝突イオン化の効果がどのように成長してくるのかを計測するというのが大きなテーマとなると考えられ、現在高エネルギーX線及びガンマ線の計測手法の開発を開始している。

4. 自己評価

本研究内容として、「超高強度電磁場(テーマ A)」と「超高強度準静電場(テーマ B)」におけるイオン化過程の違いを調査するというものであった。両テーマに共通して、必要なレーザーの環境を整えるのにかなりの時間を要したことは否めない。しかしながら、それを通じて、同じ問題を抱え、同じ目的を持つ海外の研究者との交流が深まり、深い共同研究に発展したことは非常に大きな収益だった。

テーマ B を遂行するにあたって、実験計画当初には考えていなかった、High Energy

Density(HED)物質の研究への新しい展開が生まれた。具体的には、超高強度レーザーと薄膜との相互作用によって、生成できるプラズマがユニークなものであり、他のいかなる手法をもってしても生成できないものであることが判明したこと。すなわち、超高強度レーザー、それも短パルス(数十フェムト)レーザーの照射によって始めて、プラズマが高温度に加熱されることが分かった。いくら多くのエネルギーを投入しても長時間(ピコ秒以上)かけてエネルギーをインプットするのでは、プラズマが輻射によって冷却する過程のほうが勝るために、プラズマの温度が上がらない。短パルスのレーザーであったとしても、背景光の量が多いと、長いパルスでゆっくりプラズマを加熱しているのと同じ効果になってしまう。これらが原因で今まで短パルス(数十フェムト)超高強度($>10^{21}$ Wcm⁻²)かつ、低い背景光のレーザーが強集光できるまでは、このようなプラズマが生成できなかった。このようなユニークなプラズマ中にエネルギー輸送過程を研究することは、プラズマ物理としても未踏の領域における研究である。

また、このような高温度固体プラズマ中では、電子衝突イオン化の効果によって、数多くの高イオンが生成され、ターゲットの厚みを最適化することでそれらを加速して取り出すことが可能となることも明らかになった。レーザー駆動イオン加速手法を制御して応用につなげるという観点から考え、このユニークなプラズマ中のイオン化過程を調査し、レーザー駆動イオン加速の最適化手法へつなげられる知見を得たことは、非常に重要である。これらの結果により、現在最先端の素粒子・原子核実験に用いられている重イオン加速器の飛躍的な小型化が期待でき、エネルギーフロンティアにさらなる切込みを入れることが可能になることにとどまらず、小型の医療レーザー駆動イオン加速器(all optical)の確立も期待できる(科学技術及び社会への波及効果)。

テーマ A に関しては、研究に必要な環境を整え最終年度の後半にマシンタイムが取得できたため、実験をそこで行う予定であるが、さきがけ研究期間内においてはまだまだ途中であるため、今後引き続き研究を行っていきたいと考える。

研究費の執行状況としては、後述するように当初の予定どおり執行され、必要な実験環境を整えることができている。

5. 主な研究成果リスト

(1)論文(原著論文)発表

1.
A. S. Pirozhkov, Y. Fukuda, M. Nishiuchi, H. Kiriyaama, A. Sagisaka, K. Ogura, M. Mori, M. Kishimoto, H. Sakaki, N. P. Dover, et.al., “Approaching the diffraction-limited, bandwidth-limited Petawatt”, Optics Express, 17, (2017).
2.
H. Kiriyaama, A. S. Pirozhkov, M. Nishiuchi, Y. Fukuda, K. Ogura, A. Sagisaka, Y. Miyasaka, M. Mori, H. Sakaki, N. P. Dover, et.al., “High-contrast high-intensity repetitive petawatt laser,” Opt. Lett. **43**, 2595–2598 (2018).

3.

M.Nishiuchi, H. Kiriya, H. Sakaki, N. P. Dover, K. Kondo, T. Miyahara, J. Koga, A. S. Pirozhkov, A. Sagisaka, Y. Fukuda, K. Ogura, Y. Watanabe, M. Kando, K. Kondo, “Ion acceleration experiment with the high intensity, high contrast J-KAREN-P laser system”, The review of Laser Engineering, 46, 145–147, (2018).

4.

H. Kiriya, M. Nishiuchi, A. Pirozhkov, Y. Fukuda, H. Sakaki, A. Sagisaka, N.P Dover, Ko. Kotaro, K.Ogura, M. Mori, Y. Miyasaka, N Nakanii, H. Kai, J. Koga, T. Esirkepov, M. Kando, K. Kondo, “The J-KAREN-P facility laser performance status”, The Review of Laser Engineering, 46(3), 134 – 137, (2018).

5.

M. A. Alkhimova, A. Ya. Faenov, I. Yu. Skobelev, T. A. Pikuz, M. Nishiuchi, H. Sakaki, A. S. Pirozhkov, A. Sagisaka, N. P. Dover, Ko. Kondo, K. Ogura, Y. Fukuda, H. Kiriya, K. Nishitani, T. Miyahara, Y. Watanabe, S. A. Pikuz, M. Kando, R. Kodama, and K. Kondo, “High resolution X-ray spectra of stainless steel foils irradiated by femtosecond laser pulses with ultra-relativistic intensities”, Optics Express 25 29501 (2017).

(2)特許出願

研究期間累積件数:0件(公開前の出願件名については件数のみ記載)

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

招待講演

1) Electric fields extracting highly charged heavy ions by the short pulse high intensity laser J-KAREN-P system

西内 満美子, 榊 泰直, 桐山 博光, ドーバー ニコラス ピーター, コーガ ジェームズ, 近藤 康太郎, 渡辺 幸信, 神門 正城, 近藤 公伯, 畑 昌育, 岩田 夏弥, 千徳 靖彦

ICMRE 2019, University of Science and Technology,

2) Extreme electric fields extracting highly charged heavy ions by the short pulse high intensity laser J-KAREN-P system

西内 満美子, 榊 泰直, 桐山 博光, ドーバー ニコラス ピーター, コーガ ジェームズ, 近藤 康太郎, 渡辺 幸信, 神門 正城, 近藤 公伯, 畑 昌育, 岩田 夏弥, 千徳 靖彦

SPIE Optics Optoelectronics , SPIE, 2019-04-03

3) Investigation of ionization processes in the HED plasma, laser-driven ion source

西内 満美子, NicholasPeter Dover, 畑昌育, Hironao Sakaki, Kotaro Kondo, 宮原巧, Hiromitsu Kiriya, James Kevin Koga, 岩田夏弥, MARIYA, Alkhimova, Alexander Pirozhkov, FAENOV, Anatory, PIKUZ, Tatiana, Akito Sagisaka, Yukinobu Watanabe, Masaki Kando, Kiminori Kondo, Sentoku Yasuhiko
HEDS2019, OPIC , 2019-04-22

- 4) Extreme plasma as an ion source produced by high intensity laser pulses interaction with solid density targets

M.Nishiuchi, N.P. Dover, M. Hata, H. Sakaki, Ko. Kondo, T. Miyahara, H. Kiriya, J. K. Koga, N. Iwata, M. A. Alkhimova, A. S. Pirozhkov, A. Ya. Faenov, T.A.Pikuz, A. Sagisaka, Y. Watanabe, M. Kando, K. Kondo, Y. Sentoku

54th ASRC International Workshop Sakura-2019 "Nuclear Fission and Structure of Exotic Nuclei " 2019/03/25-27

- 5) Ion acceleration experiments with high contrast high intensity laser system
"J-KAREN-P" -- Extremely strong quasi-static electric field---

M.Nishiuchi, N.P. Dover, M. Hata, H. Sakaki, Ko. Kondo, T. Miyahara, H. Kiriya, J. K. Koga, N. Iwata, M. A. Alkhimova, A. S. Pirozhkov, A. Ya. Faenov, T.A.Pikuz, A. Sagisaka, Y. Watanabe, M. Kando, K. Kondo, Y. Sentoku

AAPPS-DPP 2018 (Division of Plasma Physics, Association of Asia Pacific Physical Societies)

2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics 2018/11/12-17 "

受賞

第 13 回 日本加速器学会奨励賞