

テーマ1「放射線関連施設における活動の現状と将来展望」

①

QST 関西光量子科学研究所における 高強度レーザー科学研究

量子科学技術研究開発機構

関西光量子科学研究所 光量子ビーム科学研究部

部長 羽島 良一

量子科学技術研究開発機構（QST）関西光量子科学研究所では、ペタワット級高強度レーザー（J-KAREN-P）を独自に開発し、これを利用した高強度レーザー科学研究を進めている。レーザー電子加速では、エネルギーの揃った電子を再現性良く得ることに成功し、レーザーイオン加速では、次世代の重粒子線がん治療装置（量子メス）の入射器を開発中である。講演では、これら研究の現状と展望を報告する。

QST 関西光量子科学研究所における高強度レーザー科学研究

量子科学技術研究開発機構 関西光量子科学研究所 光量子ビーム科学研究部

羽島 良一

1. はじめに

量子科学技術研究開発機構（量研/QST）は、平成 28 年 4 月 1 日に発足して以来、量子科学技術分野の研究開発に取り組んでいます。QST は、本部組織に加え、量子技術基盤研究部門、量子生命・医学部門、量子エネルギー部門の 3 つの研究開発部門で構成され、国内に 7 つの研究拠点（六ヶ所、仙台、那珂、高崎、千葉、木津、播磨）を有し、それらに設置された 7 研究所、1 センター、及び 1 病院において様々な研究開発、国際プロジェクト等に取り組んでいます。関西光量子科学研究所は木津地区と播磨地区に活動拠点があり、超高強度超短パルスレーザーや X 線レーザー等を中心とした光量子科学研究、量子科学技術と生命科学の融合を目指す量子生命科学研究および理化学研究所大型放射光施設 SPring-8 に設置した専用ビームラインでの放射光科学研究を推進しています。講演では、私が所属する関西光量子科学研究所（木津地区）における高強度レーザー科学研究について紹介します。

2. J-KAREN-P レーザー

J-KAREN-P は QST 関西研で開発された超高強度短パルスレーザーです[1, 2]。J-KAREN-P は、30 ジュールのレーザーエネルギーを 30 フェムト秒（1 フェムトは 1000 兆分の 1）の時間に閉じ込めることにより 1 ペタワット（1 ペタは 1000 兆）のピーク出力を持つレーザーパルスを生成できます。J-KAREN-P は、他の高強度レーザーと同様に、チャープパルス増幅法の原理を用いています。図 1 にチャープパルス増幅法の原理を示します。発振器で生成したレーザーパルスは、回折格子を用いて時間的に伸長された後、複数のレーザー増幅器で順次増幅されます。J-KAREN-P では、レーザー増幅媒体としてチタンサファイア結晶を用いています。パルスを時間的に引き延ばすことで、ピーク出力がチタンサファイア結晶の破壊閾値を超えないよう増幅を行うことができます。増幅されたレーザーパルスは、回折格子で時間的に圧縮され、高いピーク強度をもったレーザーパルスとなります。

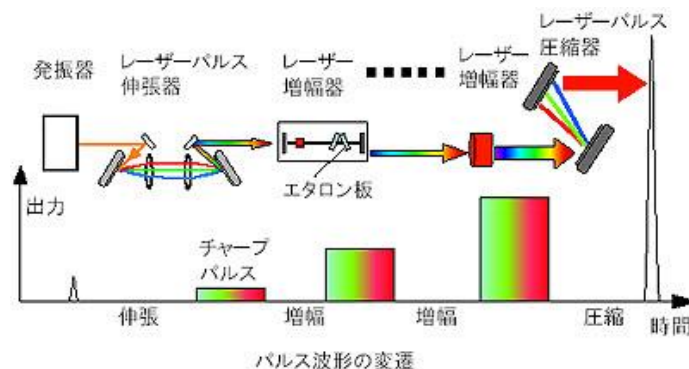


図 1: チャープパルス増幅の原理（日本原子力研究所、たゆまざる探究の軌跡研究活動と成果 2003 より引用）

QST 関西研では、J-KAREN-P レーザー本体をクリーンルームに設置し、発生したレーザーパルスを利用実験室に輸送し、さまざまな実験に供しています。最終段のパルス圧縮装置（回折格子）は利用実験室にあり、圧縮されてピーク強度が増大した後のレーザー光は真空中を輸送され、集光チェンバーにて固体やガスのターゲットに照射されます。利用実験室には、短焦点、長焦点、二つの集光チェンバーが設置されています。図2に、レーザー室、実験室の写真を示します。

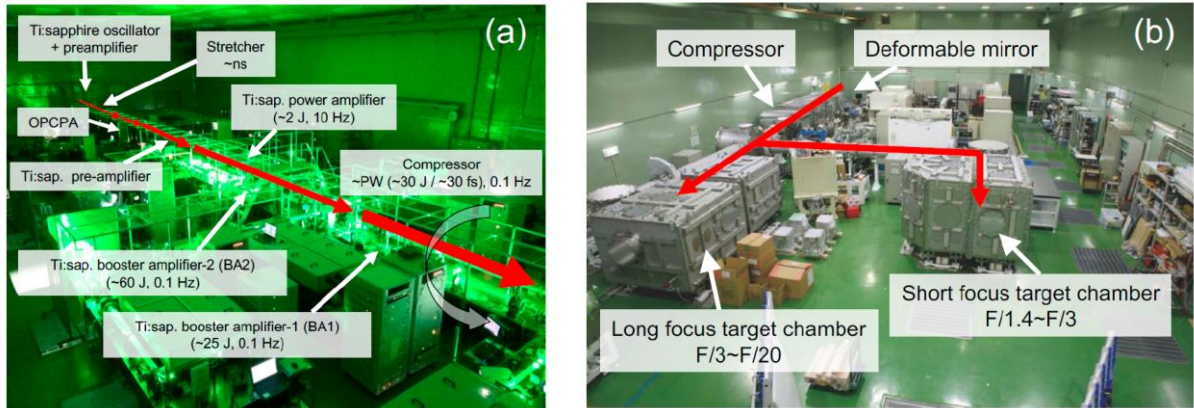


図2：(a) J-KAREN-P レーザー本体室、(b) J-KAREN-P レーザー利用実験室[2]

3. プラズマ電子加速

高強度レーザーをガス中に集光すると、レーザーパルスはガスをプラズマ化しながら進み、航跡場としてプラズマ化した電子の疎密状態を生じます。この航跡場は非常に高い電場を持って前方に進行するので、“波乗り”をするように電子を加速することができます（図3）。従来の加速器は、金属製の共振空洞に閉じ込めたマイクロ波（高周波）を使って電子を加速するため、加速電場は空洞内面の真空絶縁破壊で制限され、実用加速器では100 MV/m程度が加速電場の上限です。これに対して、プラズマ電子加速では、絶縁破壊の制限がなく、非常に高い加速電場（100 GV/m以上）を実現できる利点があります。

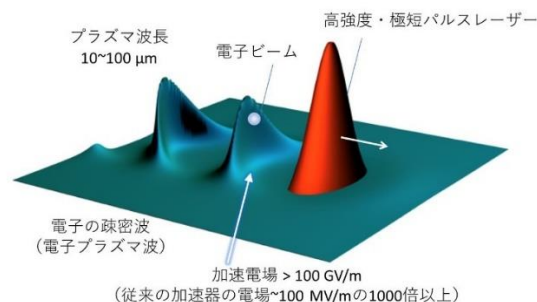


図3：プラズマ電子加速の原理。レーザー後方に生じる航跡場で電子が加速される。

このように、従来加速器に比べて3桁高い加速電場が得られるプラズマ電子加速ですが、加速電場を支える媒体がガスを電離したプラズマであるため、安定性、再現性の実現が大きな課題でした。QST 関西研では、ガスタargetに入射する直前に円形の穴を持ったアパーチャを挿入し、レーザーの空間プロファイルを整えることで、加速電子の出射方向を揃えることに成功しました[3]（図4）。この技術を使って、プラズマ加速電子による自由電子レーザー発振実験が進んでいます[4]。

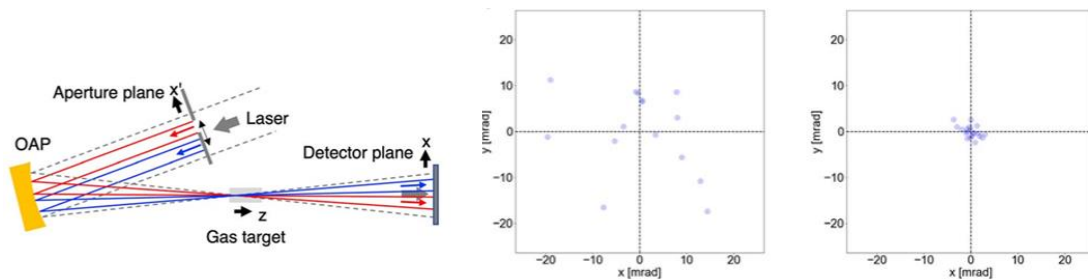


図 4: (左)アパーチャによるレーザー空間分布の整形、(中)アパーチャがない場合の電子の出射方向、(右)アパーチャを入れた時の電子の出射方向。

4. レーザー駆動イオン加速

超高強度レーザーを用いることで、高エネルギーのイオンを発生することもでき、これをレーザー駆動イオン加速と呼んでいます。レーザー駆動イオン加速は、超高強度レーザーを膜状の物質に照射することで生成された物質表面にできるプラズマの高強度電場によって、イオンを加速するというものです (図 5)。

従来の、レーザー駆動イオン加速では、レーザー光は膜状物質の内部に侵入できず大部分は表面で反射されるため、効率の良いイオン加速は実現できていませんでした。QST 関西研、ドイツ HZDR を中心とした研究グループでは、レーザー時間波形を精密に制御することで、固体密度に近い物質中へのレーザーの浸透 (相対論的透過現象) を実現し、ペタワット級レーザーで世界最高の高効率イオン加速を達成しました [5]。本成果は、レーザーイオン加速器のさらなる発展をもたらし、既存加速器では生成不可能なパラメータのイオンビームを加速する新規重イオン加速器の実現や、宇宙における元素合成過程の謎の解明につながるものです。

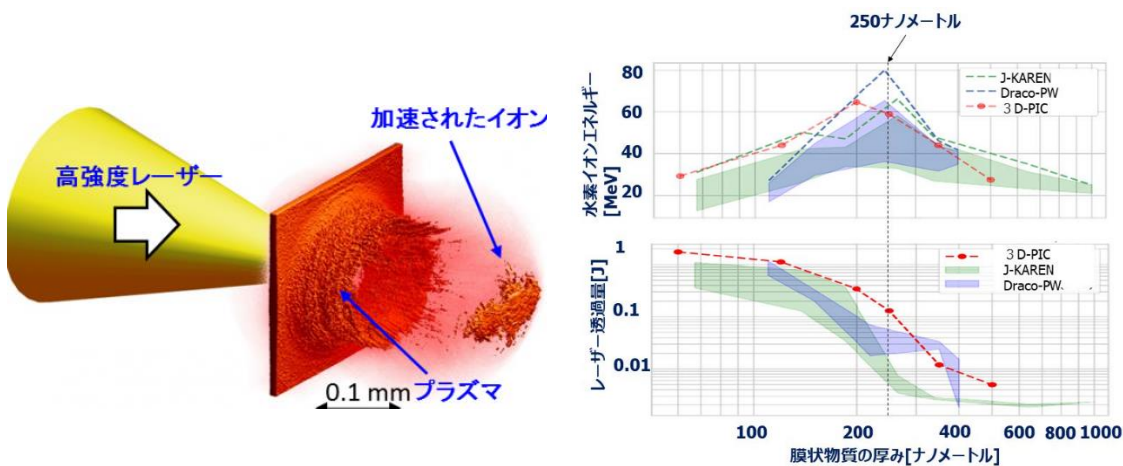


図 5: (左) レーザー駆動イオン加速器の原理、(右) 相対論的透過現象で実現したイオン加速。照射する膜厚状物質の厚みを変えた時のイオンエネルギー、レーザー透過量。 [5]

5. おわりに、

QST 関西研は、日本原子力研究所関西光科学研究所として平成 11 年に木津地区に研究施設を開所し、その後、国立研究開発法人の再編によって、日本原子力研究開発機構、量子科学技術研究開発機構と法人名称を変えつつも、最先端の光科学を追究してまいりました。本稿で紹介した以外にも、レーザーを利用したトンネル打音検査、アト秒超短パルス光源の開発、

超短パルスレーザーを使った物質の高速現象の研究、重粒子線がん治療装置の小型化を目指したレーザー駆動炭素イオン源の開発など、多くの研究が行われています。共同研究や施設利用の制度も用意しておりますので、ご興味をお持ちいただけの方は、お気軽にお問い合わせください[6]。

参考文献・資料

- [1] 桐山 博光, ハイパワーレーザーの基礎, 加速器, 2022, 19 巻, 4 号, p. 177-186, https://doi.org/10.50868/pasj.19.4_177
- [2] H. Kiriya, Y. Miyasaka, A. Kon, M. Nishiuchi, A. Sagisaka, H. Sasao, et al. Photonics 2023, 10, 997. <https://doi.org/10.3390/photonics10090997>
- [3] N. Nakanii, K. Huang, K. Kondo, H. Kiriya, K. Kando, App. Phys. Exp. 16, 026001 (2023). <https://doi.org/10.35848/1882-0786/acb892>
- [4] 神門 正城, 金 展, レーザー航跡場加速の基礎と X 線自由電子レーザーへの応用, 加速器, 2022, 19 巻, 4 号, pp. 187-194. https://doi.org/10.50868/pasj.19.4_187
- [5] N.P. Dover, N.P. et al., Light Sci Appl 12, 71 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41377-023-01083-9>
- [6] QST 各研究拠点の問い合わせ先 <https://www.qst.go.jp/site/policy/39648.html>

講演者略歴



羽島 良一 (はじま りょういち)

所 属 量子科学技術研究開発機構 関西光量子科学研究所 光量子ビーム科学研究部 部長

住 所 〒619-0215 京都府木津川市梅美台 8-1-7

連絡先 TEL/FAX : 0774-80-6014、E-mail:hajima.ryoichi@qst.go.jp

学 職 歴 1989年 東京大学大学院 工学系研究科 修士課程修了

1989年 東京大学 助手、その後、講師、助教授

1999年 日本原子力研究所 入所

～ 現在 国立研究法人改編を経て、現職にいたる

1995年 博士 (工学)、東京大学

研究・活動分野など 電子加速器を用いた先端光源の開発研究として、自由電子レーザー、レーザーコンプトン散乱ガンマ線の開発と利用など。