研究成果展開事業

研究成果最適展開支援プログラム（A−STEP）

産業ニーズ対応タイプ

技術テーマ

「コンパクト中性子源とその産業応用に向けた基盤技術の構築」

完了報告書

研究課題名「レーザー駆動指向性中性子の発生・制御

及び検出に関する基盤技術開発」

令和2年5月31日

プロジェクトリーダー
機関名： 光産業創成大学院大学
氏　名： 花 山　 良 平

Ⅰ．研究計画の概要

1.　研究の目標

1－1）開発目的

高い透過性・直進性を有する中性子線はその特徴の反面、屈折や反射によるビームのハンドリングが困難であり、指向性を有する中性子源が開発されれば、中性子の利用効率が高まる。本研究では、高繰り返し高出力超短パルスレーザを用いて、自動車エンジン等の産業機器のイメージングに使用できる指向性を有するパルス高速中性子の発生・制御と計測に関する技術を開発する。さらに、リチウム電池電極内のナノスケール現象のその場計測に使用する熱中性子の生成に関する基盤技術を開発する。

短パルス高出力レーザーによる中性子発生研究では、高出力レーザー技術の進展にともない色々な発生方法が理論、シミュレーション、実験による研究が進んでいる。すなわち、レーザー爆縮核融合中性子、重水素化ナノクラスタや薄膜ターゲットによるイオンビーム核反応中性子及び超高強度レーザー生成高エネルギー電子に伴うガンマ線駆動中性子などの多くの手法が開発されている。現在、比較的小型のレーザーで 10^{11}／パルスを超える中性子の発生にも成功している。しかしながら、レーザー中性子源を利用する研究は限定的であり、具体的な利用事例を念頭に、レーザー中性子源の特長を生かした利用基盤技術開発が課題である。

本研究では、図 1 に示すようなレーザー生成イオンビーム用いた、ビーム核融合（DD 核融合）や核反応（Li-P 核反応）により発生する中性子の利用技術の開拓を行なう。図1では、超高強度短パルス薄膜ターゲット（Pitcher）に照射により裏面に 10^{12} V/m を超えるシース電界を発生し表面数ナノメートルの陽子や重水素を電離加速する方法である。発生したイオンビームを背後に置いたイオンビーム － 中性子コンバータ(Catcher)に入射して中性子を発生する[1]。イオンビームの核種やエネルギーと Catcher の核種により、色々なスペクトルや指向性の有る高速中性子が発生できる。

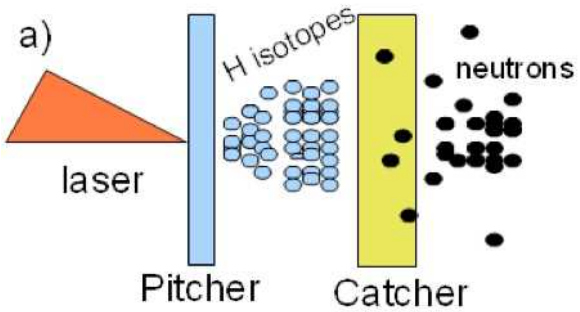


図1　レーザ生成イオンビームによる
中性子発生過程概念図

高い透過性・直進性を有する中性子線はその特徴の反面、屈折や反射によるビームのハンドリングが困難である。一般に中性子は源から立体角の全方位に放射されるが、それらを限られた立体角内に収束させることは困難であり、源で発生する中性子の一部しか利用できない。しかしながら元々指向性を有し、且つサブ MeV の柔らかい中性子源が開発されれば、中性子の利用効率が高まると期待できると共に、中性子発生部や減速部の遮蔽を軽量化できる。この研究では、コンパクトで高繰り返しレーザー駆動中性子源とその利用実現を目指して、イオンビーム生成ターゲット(Pitcher)設計とその供給装置、中性子発生用ターゲット(Catcher)と発生中性子の減速制御装置ならびに中性子検出装置の開発研究を行ない、次のステップで想定されるレーザー中性子イメージング装置開発研究の基盤とする。

１－２）技術テーマ解決と産業協力等への寄与

原子炉に代わるものとして、産業界より小型中性子源に期待が集まっており、より取扱が容易で高輝度の中性子源が待望される。小型加速器による中性子源とともに、この要望に応える可能性を秘めた技術が、超短パルス高出力レーザー中性子源である。

$$^{6}\mathrm{Li} + \mathrm{n} \longrightarrow {}^{4}\mathrm{He}(2055keV) + {}^{3}\mathrm{H}(2727keV)$$

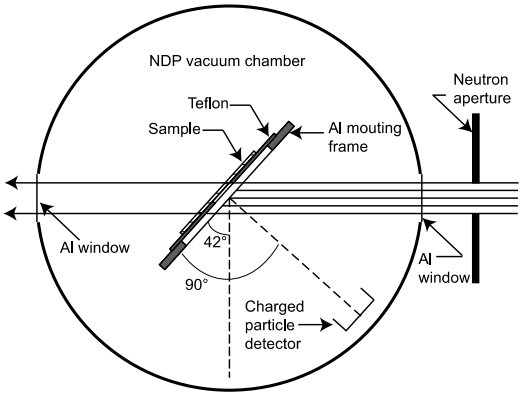


図 2 リチウムイオン電池の
リチウム濃度深さ分布計測

超短パルス高出力レーザーでは、テーブルトップサイズでエネルギーが数 MeV 超、パルス幅がピコ秒で1バンチの電荷がナノクーロン以上のパルスイオンビーム発生が可能である。これは、シングルバンチとしては通常の加速器に比べて格段に高ピーク電流のパルスイオンビームであり、パルス中性子の瞬間強度を格段に高めるものであり、応用研究分野のさらなる拡大を期待できる。すなわち、レーザー中性子技術はまだ未成熟であるが、産業応用に大きいポテンシャルを有する。本提案は、レーザー駆動中性子源の特徴であるパルス性と多様な原子核反応選択性を駆使して、指向性を持つポータブルな中性子源利用への道を開くものである。この結果は、教育現場、生産

現場、医療現場や工事現場で取扱いが容易な中性子発生、減速・輸送、計測・イメージング一体装置の基盤となる小型中性子利用技術開発に貢献する。特に、自動車エンジンのラジオグラフィへの応用を指向した中性子利用開発技術を開拓する。

また、光産業創成大学院大学が長年研究を進めてきた、リチウムイオン電池の計測[2]にも利用することが期待できる。その一例 として、図 2 に示すように、パルス熱外中性子を充放電したリチウム電池電極に照射して、図 3 に示す大きな反応断面積を持つ Neutron−^{6}Li 核反応で発生する MeV トリチウムのエネルギースペクトルを測定することで、充放電に伴う Li の深さ分布を測定できる[3]。また、熱中性子小角散乱を利用した中性子ラジオグラフィにより、電極中の電気の担い手であるリチウムイオンの「動き」に伴う電極材料の構造変化（例えば、負極グラファイトのリチウムインターカレーションによる相変化等）をその場計測することも可能である[4]。このような電池開発現場での“その場観測”が可能となることは、リチウムイオン電池の大容量・高速化、長寿命化などの性能向上に向けた研究開発を加速する。

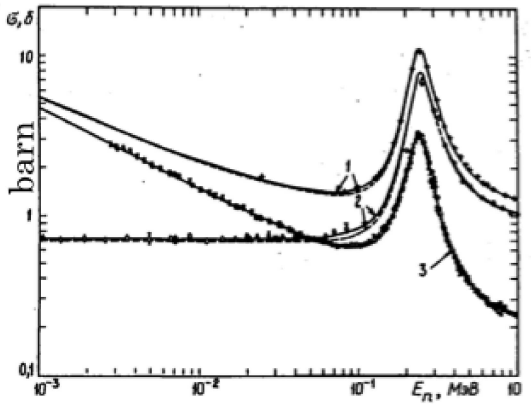


図 3 1keV−1MeV 中性子と ^{6}Li の衝突断面積

1:total,2:elastic,3: ^{6}Li(n,t)^{4}He 核反応断面積

[1] J.Alvarez, J.Fernadez, K.Mima, S.nakai. Y.Kato, et al., “Laser Driven Neutron Sources: Characteristics, Applications and Prospects” Physics procedia, vol.60,29−38(2014)

[2]K.Mima, et al., LANSA2013 proceedings, http://www.ile.osaka-u.ac.jp/lansa/LANSA-13%2520program.pdf

[3] Z.Tun, et al., Can.J.Phys. 88, 751−758 (2010)

[4] 菅野了次、GS YUASA technical Report,2006, 7月第3巻、第1号

2.　研究実施予定表 非公開

3.　研究費 非公開

Ⅱ．研究成果の創出状況

4.　マイルストーンの達成状況

CP1　　重水素発生ターゲット設計

重水素ビーム発生の前半、すなわちプリパルスによるプリプラズマの発生を2次元輻射流体シミュレーションで行い、そこで得られる密度分布を初期値として後半のメインパルスによる重水素イオンビームの発生を1次元、および2次元の PIC (Particle-in-Cell)シミュレーションを行った。それによって発生する重水素イオンビームのエネルギー分布が求まる。この解析手法を用いてプリパルスの強度レベルに対して、プレパルスの照射時間とターゲット厚の関係の最適化を図った。その結果、レーザーエネルギーが 10J のとき、図 4 に示すように 3MeV 以上の重水素イオンが 10^{11}/pulse 以上発生させることが可能であることを明らかにした。(図 4)

実際にプリパルスの状態が既知の実験装置で実験を行い、シミュレーションで得られたプリパルスの有無による重水素イオンビームの違いを再現できることを検証するための実験を、大阪大学レーザー科学研究所の LFEX レーザーを用いて行った。その結果、プリパルスを高め、プリプラズマを多く発生させた場合の方が重水素イオンの発生数が多く、また重水素イオンの最大エネルギーが 8MeV/n 程度の重水素イオンビームの発生が実測できた。すなわち、シミュレーション解析と同じ傾向の結果が得られた。また、コンタミネーションによる水素イオンの加速についてもシミュレーションと同様の結果が得られた。

この LFEX レーザーによる実験結果を受けて、一定のプリパルスに対し、メインパルスを変化させて最適なタイミングをシミュレーションで予測するとともにそれを検証するための実験を京都大学化学研究所の T6 レーザーを用いて行った。その結果、特定のタイミングにメインパルスを照射した場合に水素イオンが顕著に発生したことから、このタイミング依存性があることが明らかになった。

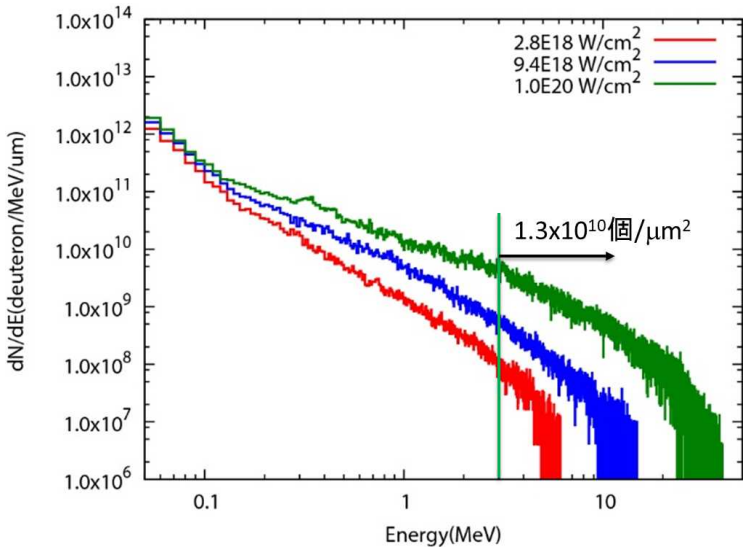


図 4. レーザー照射方向に加速される重水素イオンのエネルギー分布：輻射流体シミュレーションとPICシミュレーションを組み合わせた数値解析によって、10Jレーザーを用いた場合、3MeV 以上の重水素イオンが 10^{11}/pulse 発生する

CP2　　中性子発生ターゲット設計

図 4 に示した pitcher における重水素(D)イオンの発生のスペクトルデータをもとに、PHITS コードを用いた中性子発生のシミュレーションを行った。中性子発生ターゲットとなる catcher の材質は重水素(D)化ポリエチレン及びベリリウム(Be)を想定した。

PHITS コードには D-D 核融合反応による中性子生成の計算は組み込まれていないため、本研究において入射する重水素の重水素化ポリエチレン内でのエネルギー損失と、評価済み核データ ENDF/B VII.1 の中性子生成断面積と角度分布から、放出される中性子エネルギー及び、中性子生成率を導出した。重水素化ポリエチレンにおける中性子生成量と入射する重水素エネルギーの関係を図 5 に示す。図 4 で得られた重水素エネルギースペクトルから入射するレーザーの出力(W/cm^2)と生成される1パルスあたりの中性子生成量(n/pulse)を導出した。結果を表1に示す。

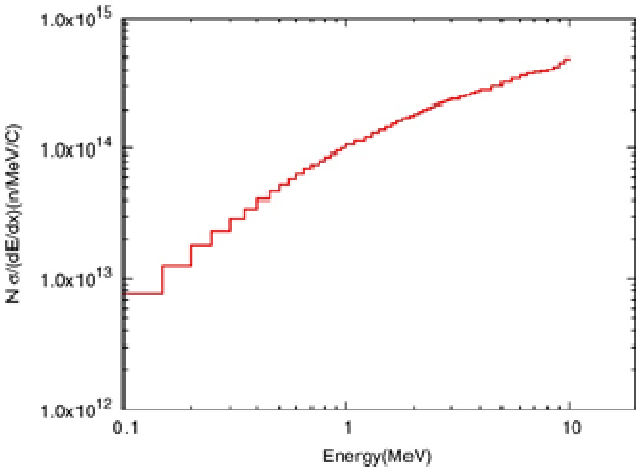


図 5 D-D 反応における重水素化ポリエチレンの中性子生成率

表1. D-D 反応における入射レーザーエネルギーと中性子生成量の関係

入射レーザーエネルギー [W/cm^2]	中性子生成量 [n/pulse]
2.8×10^{18}	4.1×10^{5}
9.4×10^{18}	2.7×10^{6}
1.0×10^{20}	3.8×10^{7}

次に、PHITS コードを用いて D-Be 反応における中性子生成量及び角度分布を導出した。表 2 に D-Be 反応における入射レーザーエネルギーと中性子生成量の関係を示す。重水素エネルギーが増加するとともに、中性子生成量が増加することを確認した。この結果からレーザーエネルギーを 10J と想定すると、D-Be 反応を用いることで中性子生成量が 10^9(n/pulse)に到達することを確認することができた。

表 2. D-Be 反応における入射レーザーエネルギーと中性子生成量の関係

入射レーザーエネルギー [W/cm^2]	中性子生成量 [n/pulse]
2.8×10^{18}	9.2×10^{5}
9.4×10^{18}	5.2×10^{6}
1.0×10^{20}	3.3×10^{8}

図 6 に D-Be 反応における各角度の中性子強度の総中性子強度の割合を示す。いずれの入射レーザーエネルギーにおいても前方立体角 $\pi/2$ 以内に 50%以上の高い指向性を持つ中性子発生を確認することができた。

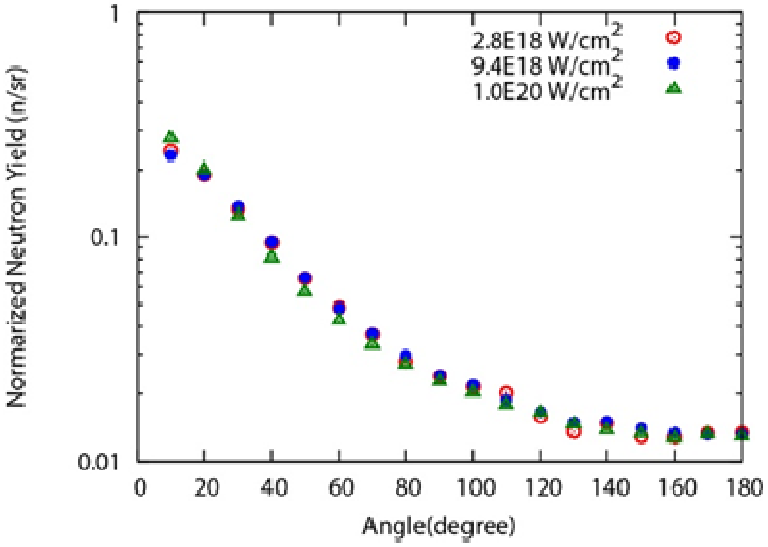


図 6. D−Be 反応における各角度の中性子強度の総中性子強度の割合

CP3　　高速重水素イオンビーム連続発生

テープ・ターゲットの構築方法について、重水素化ポリスチレンを溶媒に溶かした溶液をベースのテープに滴下塗布する方法を考案した。この手法によると実際のターゲット物質である重水素化ポリスチレンを照射位置近傍にのみ塗布すれば良い。加えて、主要なイオン加速機構である TNSA 機構ではターゲットの裏面(レーザ光が照射される面の反対側)近傍の原子が加速されイオンビームとなるので、実際のターゲット物質はターゲット裏面に薄く(約 1μm 以下)塗布すれば良い。これらにより、実際のターゲット物質である重水素化ポリスチレンの使用量はごく少量に抑えることが可能である。また、この手法は量産への応用が容易であると考えられ、非常に実用性の高い手法であると考えている。

ターゲットテープの模式図を図 7 に示す。薄い青色の部分はポリエチレン、PET 等の通常のプラスチック素材であり、搬送やレーザー照射に対する強度担保する。このテープにくぼみを形成する。このくぼみに溶媒に溶かした重水素化ポリスチレン溶液を滴下塗布する。

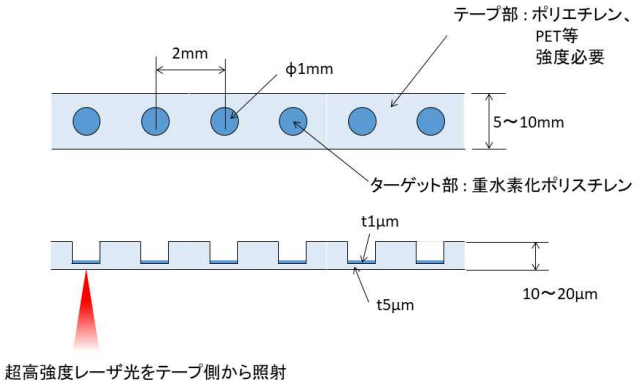


図 7, ターゲットテープ構造の模式図

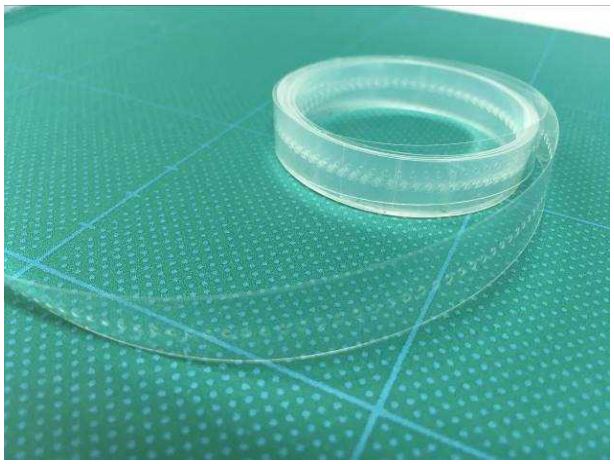


図 8, くぼみ付きテープ(ϕ1mm)、CD 溶液未塗布の状態、

テープ製造業者に委託し製作したくぼみ付きテープの外観を図 8 に示す。この例では PET 素材で厚さ 50μm のテープに対し、ϕ1mm のくぼみを 2mm 間隔で形成した。くぼみの底部の厚さは 4.5μm であった。このテープに対し、溶媒に溶かした重水素化ポリスチレン溶液を滴下塗布(図 9)する。

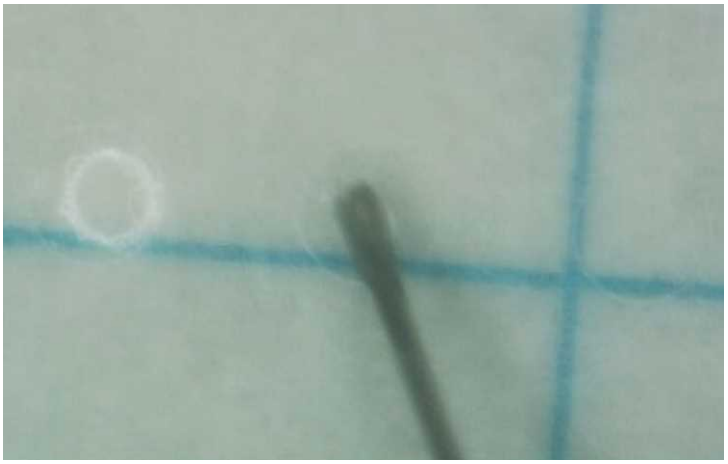


図 9, 溶液を滴下する様子

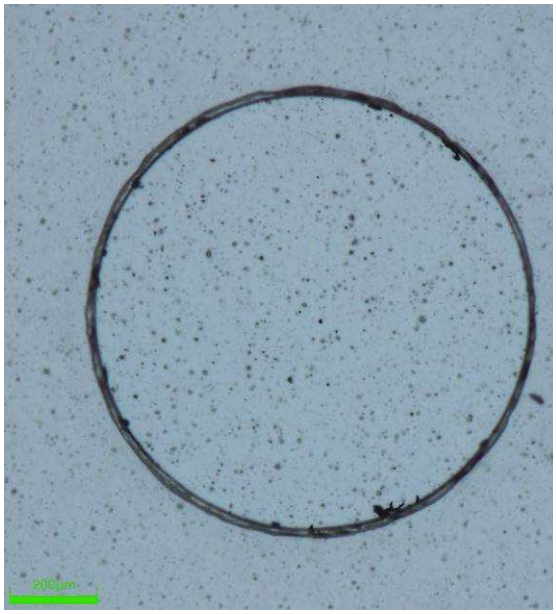


図 10, 滴下前のくぼみ(φ1mm)

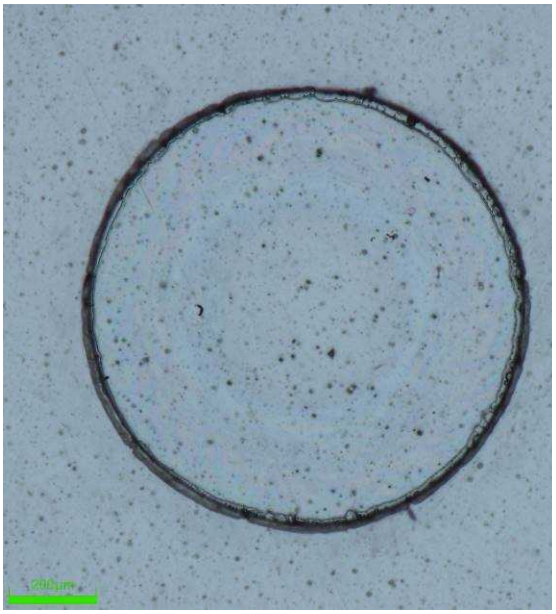
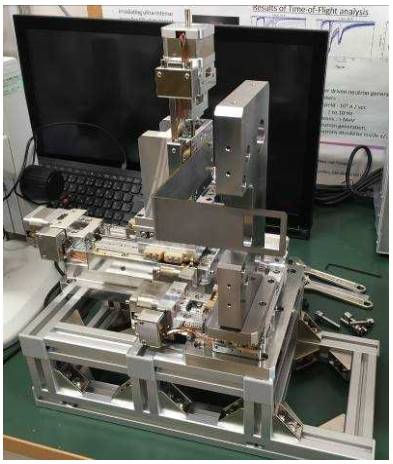


図 11, 薄膜形成後

滴下した溶液は即座に溶媒が揮発し、重水素化ポリスチレン薄膜となる。図 10,11 に滴下前後のくぼみの顕微鏡画像を示す。実際には表面張力の作用により均一な膜とはならないが、溶液の濃度を制御することによりくぼみ中心部の膜厚を制御可能である見通しを得た。図 11 ではくぼみ周辺部で光干渉によるとみられる虹色の模様が観察できる。一方、中心部の虹色は見えない。これにより、干渉色の見える周辺部の厚さは数百 nm 程度、中心部は 100nm 程度と推測している。膜厚を分光干渉技術を用いた膜厚測定手法で測定したところ、滴下する溶液の濃度により膜厚を制御可能であることが確認された。

このテープ・ターゲットはキャッチャーターゲットとして用いられる。これを駆動する装置を構築した。外観を図12に示す。このターゲット駆動装置はテープ・ターゲットを駆動するピッチャー駆動部とキャッチャー駆動部からなる。キャッチャーターゲットは板状であるが、後述の減速体系一体構造とすることも可能

である。ピッチャーターゲットは 2 つの回転ホイールをモーターで回転させることにより、テープを搬送する。キャッチャー駆動部全体は XY 二軸並進駆動機構に搭載され、光軸方向と横方向のターゲット位置を調整可能である。キャッチャー駆動部は XYZ 三軸並進駆動機構を装備してあり、光軸に垂直な面内でキャッチャーターゲットを二次元走査可能である。また光軸方向の位置も調整可能である。キャッチャー駆動部全体は光軸から大きく退避させることが可能であり、キャッチャーターゲットのみのイオン発生試験を行うことも可能である。これらの機構はいずれも真空環境下で動作可能であるように構築されてある。また、レーザー照射試験を行う真空チャンバ内の構成の都合上、レーザーの進行方向に対し、右側の空間は利用不可能であるため、機構は全てレーザー進行方向の左側に構築した。



(a) 外観

(b) レーザー照射部拡大

図12、ターゲット駆動装置

このターゲット駆動装置で、前述のテープ・ターゲットを駆動する時、テープ上に直径 1mm の重水素化ポリスチレン薄膜が 2mm 間隔で配置されてあるため、これらがレーザー照射の間隔内に正確に次の薄膜がレーザー照射位置に運ばれることが肝要である。これを実現するために、ターゲットくぼみの位置を検知する画像検査装置を導入した。この画像検査装置は記憶させた形状パターンをカメラ画像の中から探索し、その位置を出力する。計測に要する時間は約 12msec であり、10Hz 運転に対応可能である。繰り返し 10Hz で運転されているレーザーと正確に同期して作動するためには与えられた時間猶予内に指令を実行可能であることを保証する実時間制御装置を使用する(図 13)。現在、この装置の動作試験を進めているが、レーザー中性子発生試験を実施するには至らなかった。この速やかな実施を目指し、調整を行っている。

図 13, ターゲット駆動装置用実時間制御装置

CP4　　連続中性子発生

レーザーを用いた中性子発生は重水素を含む材料による二重薄膜ターゲットを用いた方法を用いる。すなわち、第 1 ターゲットに超高強度レーザーを集光照射することで、重水素ビームを発生させ、それが第 2 ターゲットに当たることにより、重水素同士の核反応を生じさせ、中性子を発生させる。この手法において、まず、第 1 ターゲットでの重水素発生の検討を進めた。重水素を含むターゲット材料として重水素化ポリスチレン薄膜を用い、これの厚さを変化させ、最適な厚さの探索を行った。その結果、厚さ 5μm の時、最大の重水素ビーム発生を観測した。超高強度レーザーを照射し、重水素ビームを発生させる機構としては、TNSA(Target Normal sheath acceleration)モデルが知られているが、TNSA モデルではターゲット厚さをより薄く、1μm 以下とすることが良いとされている。これに対し、厚さ 5μm で最大の重水素ビーム発生を観測したことは、レーザ・パルス波形の影響が考えられる。すなわち、10^{18}W/cm^2 程度の超高強度レーザ・パルスの立ち上がりの傾斜が十分に急峻でないことや、レーザー光学系内に存在する意図しない反射光等に起因してメインの超高強度パルスの直前に生じるパルス光等により、メインパルス到達時にはターゲットが変形したり、プラズマ化したりしている可能性が考えられ、これにより必要なターゲット厚さの下限値が存在することが考えられる。このことについては、理論予測計算を組み合わせて、さらに検討を進める。

実際に、重水素化ポリスチレンの二重薄膜ターゲットを用いて、レーザーによる中性子発生の実証を行った。実験では連続して 25 ショット可能なターゲットを用い、そのうちの 13 箇所に対し超高強度レーザーを照射したところ、そのうち約半数のショットで中性子発生を観測した。その際の中性子検出信号の例を図 14 に示す。この信号はプラスチックシンチレータと光電子増倍管からなる中性子シンチレーション検出器を用いて取得した。中性子シンチレーション検出器では中性子信号とともに X 線も検出されるが、到達時間の差により両者を分離可能である。図 14 中、左側の信号は X 線を表し、右側の信号が中性子を表す。この中性子信号の大きさから中性子発生量を

推定すると、この中性子検出器で観測された中性子がターゲットから等方的に全立体角方向に放出されたと仮定し、1.4×10^4 個の中性子発生に相当することがわかった。

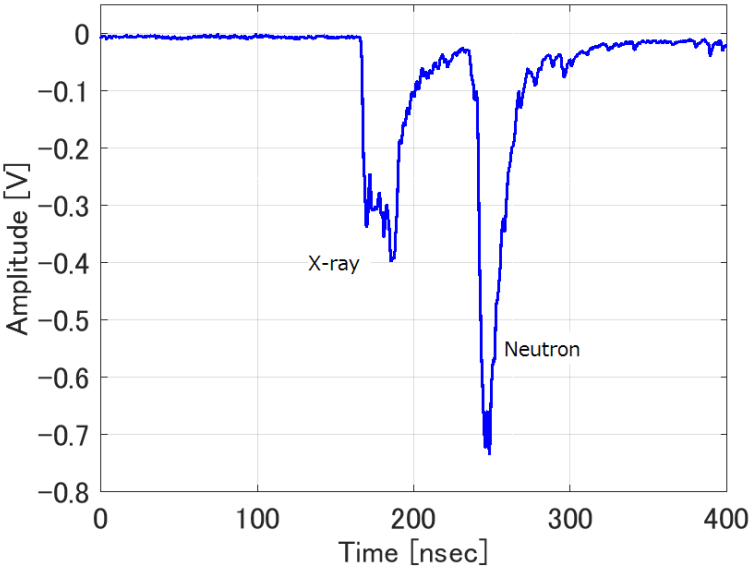


図 14 発生した中性子信号

用いた連続 25 ショットを実現する重水素化ポリスチレン二重薄膜ターゲットを図 15 に示す。このターゲットは第 1 ターゲットを保持するホルダ、第 2 ターゲットを保持するホルダ、および、間隔を調整するスペーサからなる。第 1 ターゲットには 25 個の穴があけられており、1 つの穴が 1 ショット分に相当する。金属製ホルダに重水素化ポリスチレン薄膜を貼り付けてあり、ホルダの穴を通してレーザ照射を行うことにより、穴で制限された領域が照射される。第 2 ターゲットは大きな開口を持つホルダ前面に薄膜を貼り付けてある。両者はスペーサで管理された間隔で貼り合わされている。これを直交 3 軸方向に移動可能な電動ステージ上に設置し、駆動する。25 個存在する穴の一つにレーザ光が入射するように調整しながらレーザ・パルスを照射し、その後、次の穴に移動する。このようにして、連続 25 ショット可能なターゲットを構築した。現在は、ショット間隔は 1 分程度である。ターゲット駆動装置の能力としては 1Hz 程度まで高速化することが可能である。

図 15 連続 25 ショットを実現する重水素化ポリスチレン二重薄膜ターゲット

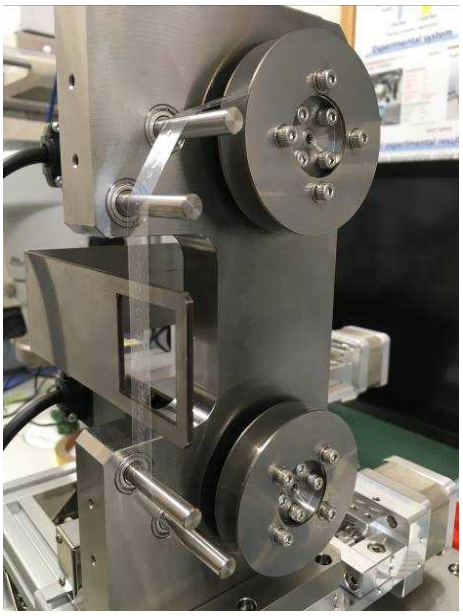


図 16, レーザー照射部の拡大図。
テープ背後の金属製枠に減速体系と一体となった
キャッチャーターゲットを設置する。

さらなる連続照射に向けた機構の構築を進めており、第 1 ターゲット駆動装置とともに完成を目指している。第 1 ターゲットはレーザーの照射毎にターゲットは破壊されるため、都度更新できるようテープ構造のターゲットを用いるが、第 2 ターゲットは都度破壊されることはない。したがって、相対的にゆっくり更新を行うよう、開発したターゲット駆動装置ではテープ状のピッチャーターゲットと板状のキャッチャーターゲットを別々に駆動することが可能な構造としてある。ピッチャーターゲットの背後にキャッチャーターゲットが動作可能な領域として光軸方向に 30mm の空間を確保してある。この空間を利用し、減速体系を含めたキャッチャーターゲットを設置したり、ピッチャーターゲットとキャッチャーターゲットの間隔を制御したりすることを可能としてある。図 16 にターゲットのレー

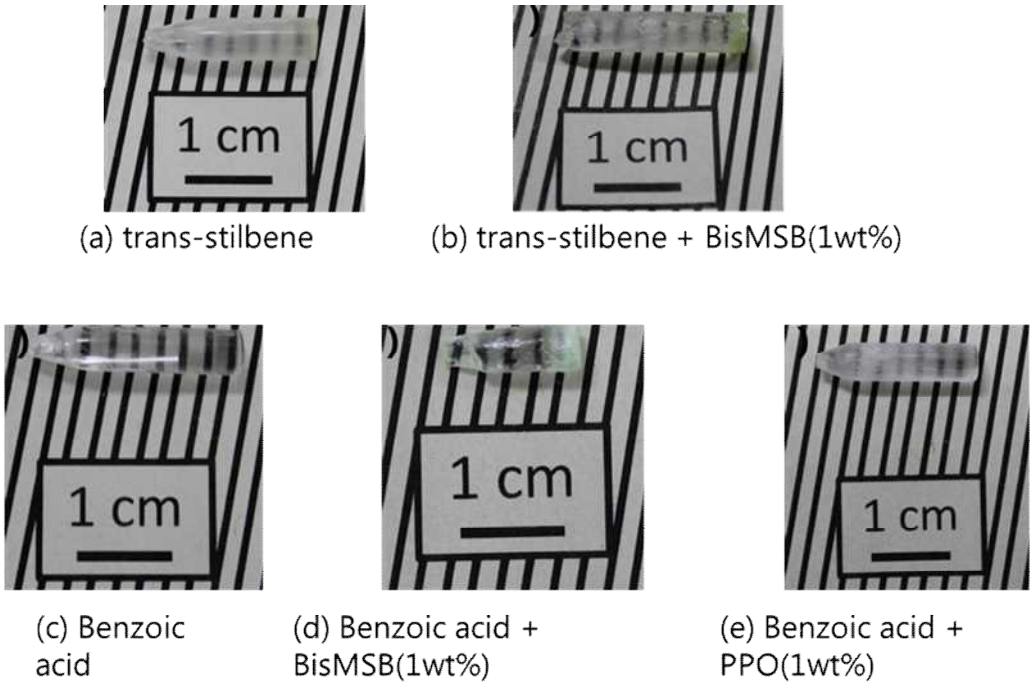
ザー照射部近傍の拡大図を示す。板状の第2ターゲットをテープ状の第1ターゲットテープの背後に設置し、二重ターゲットとする。第 1 ターゲットと第 2 ターゲットを分離することにより、D-D 反応のみならず、D-Be, D-Li 等の核反応を用いることが可能となる。制御は第 1 ターゲットと同じ実時間制御器にて行い、2 つのターゲット駆動機構が同期して動作できるようにする。

CP5　　新規有機シンチレーターの開発

中性子検出をめざしたシンチレーター材料の探索・開発をすすめるにあたって、まずは育成のための炉の開発に取り組んだ。その結果、図 17 のように、マイクロ引き下げ・ブリッジマン法法のハイブリッドタイプ育成炉を組み立てることに成功し、期間後半では材料探索のための炉、および、実用化を目指した結晶の大型化をおこなうための炉の 2 台体制で運用を進めた。また、最適なルツボ材の選択、結晶育成方法の最適化も取り組み、前者は石英が、後者は単純なブリッジマン法やマイクロ引き下げ法に加えて二重るつぼ法（Self-seeding vertical Bridgeman 法）が適切であると判断し、実験を進めた。

図 17　立ち上げたハイブリッド結晶育成炉のセットアップ

図 18 のように、上記の設備・方法を用いて、融点が 150℃以上の結晶を育成し、それらの特性について評価を加えた。



(a) trans-stilbene　(b) trans-stilbene + BisMSB(1wt%)

(c) Benzoic acid　(d) Benzoic acid + BisMSB(1wt%)　(e) Benzoic acid + PPO(1wt%)

図 18 育成した結晶の例

これらの中から、p-ターフェニルがトランス-スチルベン結晶の 2 倍程度の発光量（目標:トランス-スチルベン以上の発光量）、蛍光寿命が 5.8 ns（目標 6 ns 程度以下）、融点 212℃程度（目標 200℃以上）と目標数値を超えて、かつ、大型化も容易であることが実証でき、目標の直径 1 インチサイズを超えて、直径 2 インチの結晶の育成にも成功した（図 19）。

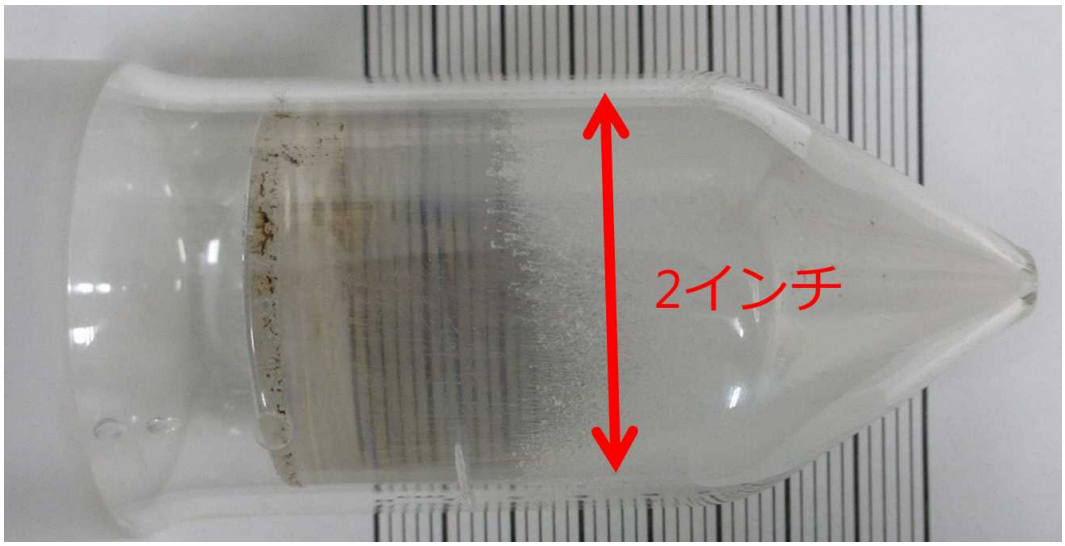


図 19 直径 2 インチの p-ターフェニルの写真

以上のように当初のクリアポイントは達成できたが、中性子撮像のために、p-ターフェニルのバルク結晶の量産を続け、その後図 20 のようにピクセルアレイを 4 個製作した。ピクセルアレイを製作するのは、中性子のフラックスが多い場合に、偶発イベントを切り分けしやすくするためである。そのため、64ch のマルチアノード光電子増倍管でこれらのアレイを読み出し、そして、それぞれの ch で信号処理する回路（図 21(a)）でデータを取集するようにした。

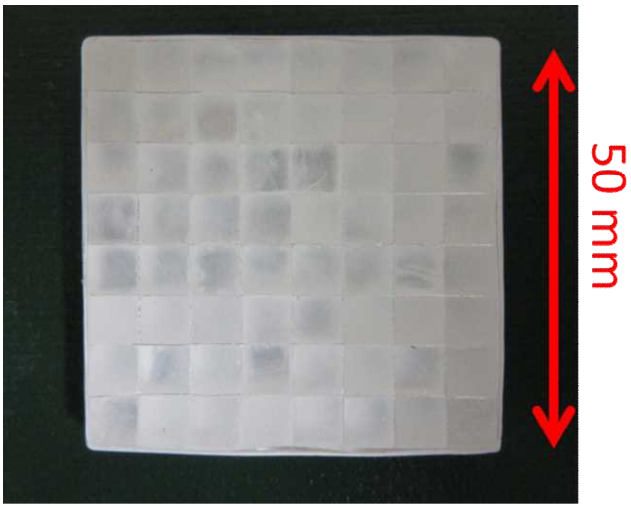


図 20 ピクセルアレイカメラ

実証試験は、京都大学複合原子力科学研究所の原子炉からの中性子を用いて行った（図 21(b)）。その結果トリガーレート 2kHz 程度でも、個別の中性子イベントを図 21(c)のように撮像することができた。

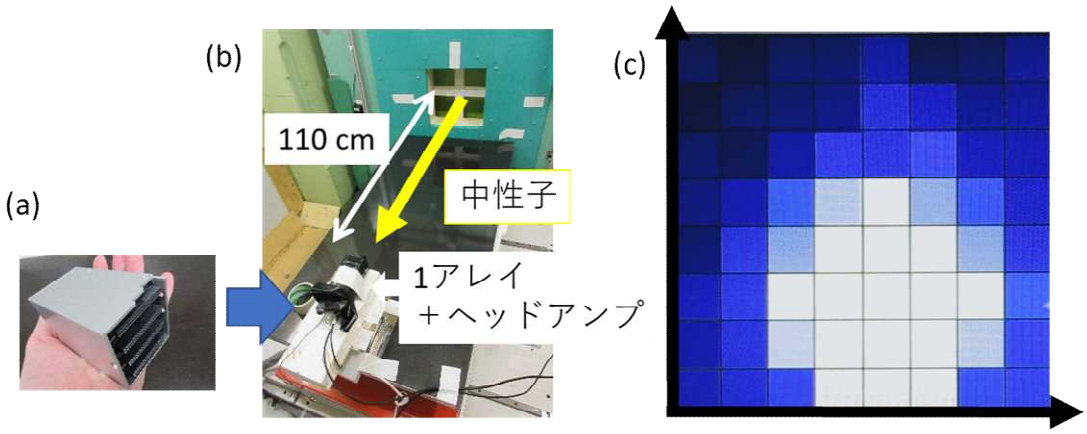


図 21 読み出し回路の写真(a), 京都大学での実験の様子(b)、撮像の一例(c)

CP6　　中性子減速・輸送装置設計

レーザー中性子源の特性である指向性・短パルス性・点光源性を活かした減速・輸送体系を設計するために、大阪大学 LEFX レーザーを用いた実験で得られた陽子及び重陽子のエネルギースペクトルを pitcher における線源とし、中性子生成量が多く、前方方向の生成量が多い D-Be 反応を用いたシミュレーションを実施した。ソースの中性子数を評価するために、低、高コントラストの条件で得られた陽子及び重陽子を同時にベリリウムターゲットに入射したときの中性子スペクトルを導出した。結果を図 22 に示す。低、高コントラストそれぞれの中性子生成率は 1.9×10^{11}、9.9×10^{10} (n/pulse)であり、低コントラストの方が二倍ほど中性子生成率が高いことを確認した。

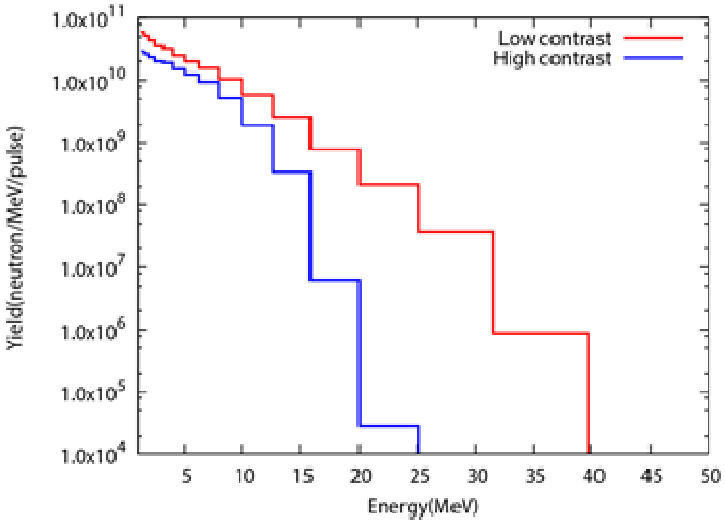


図 22. LEFX の実験で得られた陽子及び重陽子のエネルギースペクトルをベリリウムターゲットに入射した場合における中性子エネルギースペクトル

次に熱中性子を生成するために、catcher の背後に厚さ 20mm の軽水減速材を設置した場合における中性子エネルギースペクトルの評価を実施した。図 23 に軽水減速体の有無の状態における中性子スペクトルを示す。meV 領域の中性子を生成し、keV 領域の中性子を増強するためには、減速体系が必要であることが分かる。減速材を設置した場合における 0.5eV 以下の熱中性子数は 2.6×10^{9}(n/pulse)であるため、ソースの中性子数で除した値は 10^{-4} を上回る値であることを確認できた。

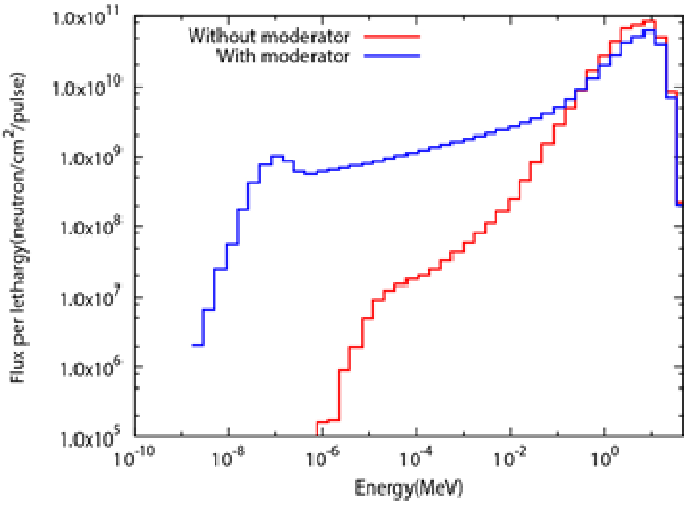


図 23. 軽水減速体の有無の状態における中性子エネルギースペクトル

次にレーザー中性子源の短パルス性を確認するために、LEFX の低コントラストの荷電粒子エネルギースペクトルをベリリウムターゲットに入射させた場合におけるエネルギー分解能の評価を実施した。中性子強度は大きく異なるが、J-PARC の ANNRI 施設のエネルギー分解能と比較するため、減速体から 21.5m の位置におけるエネルギー分解能を評価した。エネルギー分解能は PHITS コードで得られる中性子パルス幅 Δt をもちいて、次式で表される。ΔE/E=2Δt/t

図 24 に中性子エネルギーとエネルギー分解能の関係を示す。減速体を設置した場合においても、レーザー中性子源のエネルギー分解能が良い結果が得られた。J-PARC の陽子ビームのパルス幅が 60ns であることから中性子の keV 領域よりも上のエネルギーにおいてエネルギー分解能が悪くなる傾向があるが、レーザー中性子源の場合は陽子ビームのパルス幅が ps オーダーと非常に短いことから高エネルギーの領域においてもエネルギー分解能が良いことが示された。

さらに詳細に中性子パルス幅を評価するために、単色の重陽子入射をベリリウムに入射した場合におけるシミュレーションを実施した。図 25 に 40MeV の重陽子を様々な厚みのベリリウムキャッチャー内に入射した際の時間分布を示す。40MeV の重陽子のベリリウム中の飛程は 5.6mm である。飛程よりも薄いもしくは厚いターゲットについてシミュレーションを実施した。 飛程よりも薄い条件においては 40nsの位置にピークを形成し、パルス幅は狭いことが分かる。一方飛程よりも厚くなると、ベリリウム中で中性子が散乱され、減速される成分が増加する。20mm 厚の場合、60ns の位置にピークを形成し、26.5mm 厚の場合は、70ns の位置にピークを形成しパルス幅も変化することが分かった。このように、飛程よりも厚いターゲットを用いると、ターゲット内での減速が劣化することを確認した。レーザー中性子源の短パルス性を活かすためにはターゲット厚の選定の重要性が示された。

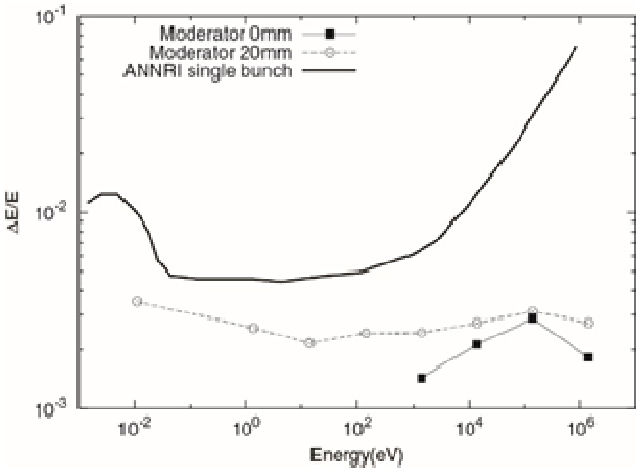


図 24 中性子エネルギーとエネルギー分解能の関係

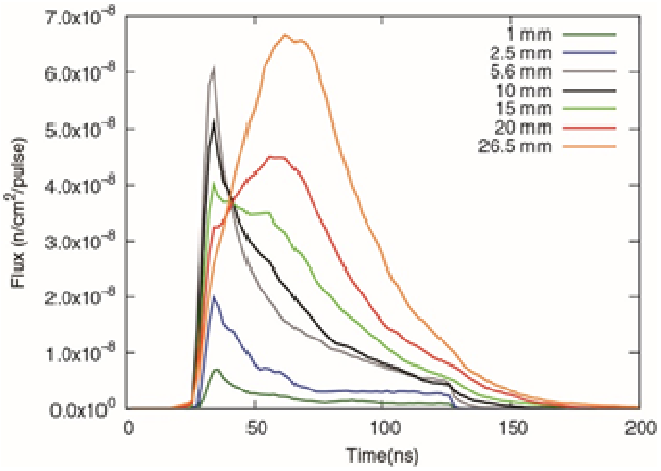


図 25. ベリリウムターゲット厚の違いによる時間分布の変化

5.　研究計画全体の進捗状況

レーザー中性子源は二重のターゲットを用意し、その 1 枚目に超高強度レーザーを集光照射することで重陽子イオンビームを生じさせ、それが 2 枚目のターゲットに当たり、そこで核反応が生じることで中性子線を発生させる。これは第 1 ターゲットを加速器と考えれば、加速器中性子源と同じ構成と考えることが可能である。実際に、第 1 ターゲット部には超高強度レーザーの照射により数 μm 程度の微小空間内に TV/m 程度の強力な加速電場が形成され、加速器として作用している。核反応としては D-D 反応の他、D-Be, D-Li などを用いることが想定され、MeV 級の高速中性子線が得られる。レーザー中性子源の最大の特徴は駆動源のレーザーが数十 fsec 程度の超短パルスであることに起因し、中性子線も数十 nsec 程度の短パルスが得られることにある。これと同時に、高速中性子用で高い時間分解能が実現可能な高速中性子二次元検出器が必要となる。また、短パルス性を活かしたまま減速を行うことで、さらに利用可能範囲を拡大することが可能である。これらを活用し中性子パルスの共鳴散乱イメージングなどを利用した新産業創成が期待できる。

このような目的に対し、本プロジェクトでは a) 第 1 ターゲット近傍の最適化、b)第 2 ターゲットと減速体系の最適化、c)連続中性子発生の実証、d)高速中性子用 2 次元検出器の構築、の課題を設定し、6 つのチェックポイント(CP)を設置した。

CP1 では主に理論計算に基づき第 1 ターゲット近傍の最適化を行った。実際的な超高強度レーザー発生装置を想定し、数十 fsec 程度の幅を有する主の超短パルスに先立ってターゲットに到着する比較的パワーの小さなレーザーパルス成分(プレパルス)の存在を仮定した計算機シミュレーションにより、プレパルスにより生じるターゲット変形とその中で生じる衝撃波の作用により、イオン加速に適した場となる瞬間が存在することを見出した。この効果の検証実験も行い、プレパルスにより発生するイオンビームの量と最高エネルギーが増大する効果を実証した。また、メインパルスとプレパルスのタイミングを変化させることで、イオンビームのスペクトルが変化することを実証した。従来の超高強度レーザーを用いた粒子加速や慣性核融合の研究ではプレパルスを少なくし、メインパルスの急峻な立ち上がりを追求することに注力されて来たが、プレパルスを減少させるためのプラズマミラーと呼ばれる機構などの付加装置を用いない、プレパルスが存在するままのレーザーの方がレーザー中性子源には適していることを見出した。

CP2,6 では理論計算により第 2 ターゲット近傍の最適化を行った。第 1 ターゲットの計算機シミュレーションや実験により得られるイオンビームのスペクトルに基づき、中性子線発生の理論予測を行う体系を構築した。これらの検討により、レーザーのパルス当たりエネルギーが 10J の時、パルス当たり 10^9 個の中性子パルスが得られる可能性を示した。一方、中性子のパルス幅について、減速しても従来の加速器中性子源を上回る中性子短パルスが得られることを見出した。これを用いると、ToF 方式による中性子エネルギースペクトル計測でのエネルギー分解能において、J-PARC 等で得られる分解能を上回る分解能が得られることを見出した。これにより中性子パルスの共鳴散乱イメージング等への応用が期待できることを見出した。一方、中性子短パルスを生

成する時、重陽子線の第2ターゲット内での散乱が大きく影響することが分かった。したがって、第2 ターゲットはターゲット内での重陽子の飛程程度の厚さに抑えることが重要であることを見出した。これと同時に、中性子を減速させて用いようとすると場合は、第2ターゲットと減速体系を一体でコンパクトに構成することが肝要であることを見出した。

CP3,4 は連続レーザー中性子発生の実験実証に対して設定した。まず二重薄膜ターゲットによるレーザー中性子発生の実証を行い、0.6J/pulse のレーザーを用いて 1×10^{4}n/pulse 程度の中性子発生を実証した。ただし、これは CP1,2 の理論計算で予測した数値に対しては 2 桁程度少ない量である。これにはプレパルスによるターゲット変形により、イオンビームが偏向や発散し、期待したイオンビーム量が得られていないことが要因として考えられており、この対策は今後の課題である。連続中性子発生を行うためには特に第 1 ターゲットはレーザー照射のたびに破壊されるためターゲットを連続で供給する必要がある。これを行うためのターゲット供給装置は 2017 年度には構築する予定であったがターゲット構造の検討などに想定以上の時間を要し、大幅な遅延を生じさせてしまった。プロジェクト終結時点では機構の構築が完了しており、動作試験を進めている。今後、極力早期に実証試験を行う予定である。このターゲット供給装置が完成することにより、今後はレーザー中性子発生試験、並びにレーザーイオン加速試験を高い繰り返し率で実施することが可能になる。これらのレーザーとプラズマの相互作用からなるいわゆるレーザープラズマの実験は、確率的な現象が支配的であり、実用に供するに十分な安定性を有しているとは言い難い。しかしながら、連続供給装置と高繰返しレーザーを用いた高密度試験により、実験データを確率として取り扱うことが可能となり、これらの現象への理解が飛躍的に進むことが期待できる。そして、実用的な安定性を獲得するための開発を進められることが期待できる。

CP5 では高速中性子用有機結晶シンチレーターの開発を行った。多くの候補材料を結晶成長させて試験を行い、高い発光量と高融点を有し、減衰時間が十分に早い高速中性子用シンチレーターの開発に成功した。また、これを直径 2 インチまで大径化することに成功した。ここまで大きな結晶が得られると、適当な厚さで切り出して光電子増倍管と組み合わせて中性子検出器を構成するほか、ダイス状に切り出し、それを組み合わせて、ピクセル構造を有する二次元検出器用シンチレーターを構成することも可能となる。実際に開口が□100mm であり、16x16 ピクセルの高速中性子二次元検出器を構築し、10^{3}n/sec の高カウントレートでも位置分解能を有する計測が可能であることを実証した。

これらの開発により、実用化に向けた技術開発とともに実用化に向けた課題を明確化することに成功したと考える。賛同する企業参加者を獲得して実用化研究を今後も継続する予定である。

6.　研究実施状況

当研究課題は図 26,27 に示すように、光産業創成大、京都大学、東北大学、レーザー技術総合研究所(平成 29 年 3 月まで)、大阪大学(平成 29 年 4 月から)の 5 機関からなる組織にて研究を実施している。光産業創成大は全体統括の他、目標②に関わる実証実験やシステムの工学的実証を主に担当している。レーザー技術総合研究所、並びに、大阪大学は目標①に関わる中性子発生用ターゲット設計における理論計算のうち、前半の第 1 ターゲット(Pitcher)の計算機シミュレーションを主に担当している。この他、浜松ホトニクス中央研究所の超高強度レーザー設備を実験委託の形態で使用させて頂いた。一部の実験では京都大学化学研究所の超高強度レーザー設備を使用した。なお、レーザー技術総合研究所の研究開発担当者の国外の研究機関への異動に伴い、レーザー技術総合研究所は研究組織から外れ、平成 29 年 4 月から大阪大学が新たに加入した。いずれの研究者も機関の研究組織からの脱退・加入に関わらず、研究協力者として当研究課題に参加しており、この交代に伴う研究計画の変更はなかった。京都大学は目標①に関わる中性子発生用ターゲット設計における理論計算のうち、後半の第 2 ターゲット(Catcher)の計算機シミュレーションを主に担当している。同時に目標③に関わる中性子減速・輸送設計も担当している。東北大学は目標④に関わる高速中性子用の検出器開発を担当している。これらはいずれも当研究課題に必要不可欠な研究開発項目であり、また、それぞれ、当該分野で実績豊富な研究者を組織することができている。研究費は各機関の担当部分に必要十分な配分を行っている。特に、実験やシステムの工学的実証を行う光産業創成大と、高速中性子検出用シンチレーターの結晶育成炉の構築と結晶育成を行う東北大学の 2 機関は装置の導入や材料費等物品購入が多く発生するため重点的に配分を行っている。

これらの 5 機関の担当者や研究協力者は定期的に会合を持ち、進捗の確認と意見交換を行っている。遠隔地に存在する各機関間の会合のために光産業創成大が所有する遠隔会議システムを活用し、旅費の過度な発生を抑制している。プロジェクトリーダーはこの定例会合を通じてプロジェクトの管理を行っている。

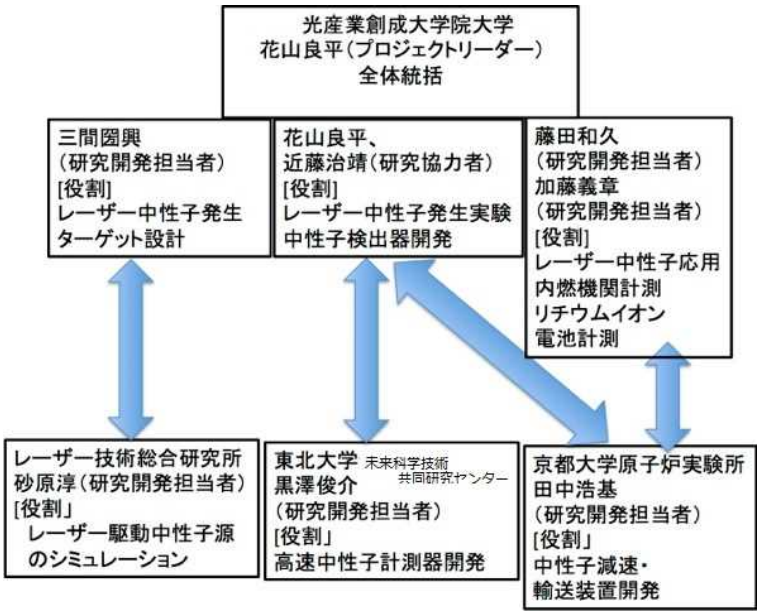


図 26 研究組織図(平成 29 年 3 月まで)

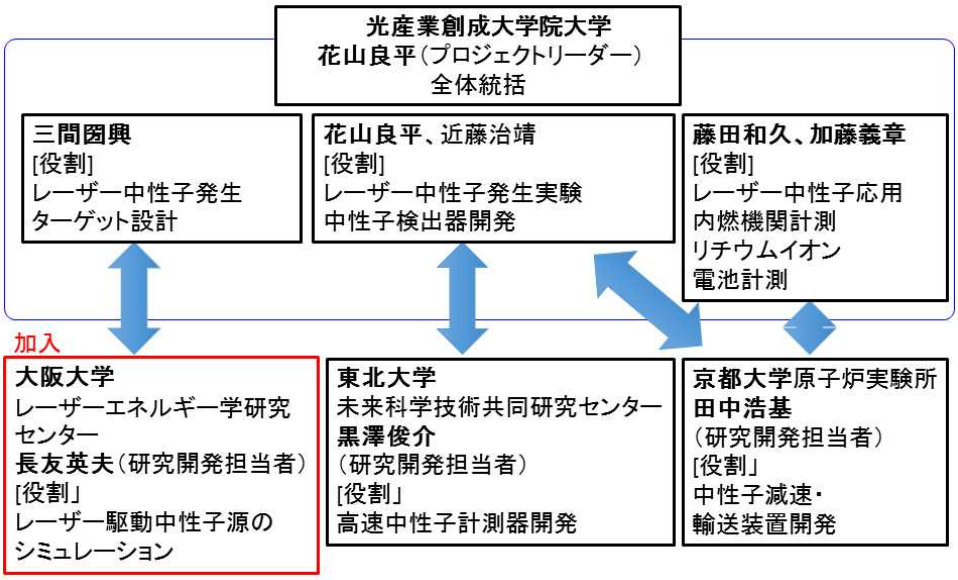


図 27 研究組織図(平成 29 年 4 月から)

7.　産学の対話の活用状況

H28 年度産学共創の場にて「p-c 方式による中性子発生と、その長時間運転試験に挑戦していただきたい。また、点光源の特徴を生かせる p-c 方式と相性の良い超小型モデレーターの検討、および点光源を生かした応用例の検討も行っていただきたい。検出器に関しては、RANS との共同研究によりシンチレーターの特性試験を開始していただきたい。必要であれば、理研との共同研究の仲立ちを PO の立場で行います。」との PO コメントを頂いた。これに基づきシンチレーター特性試験をチーム内で前倒して行った。

引き続き、H29 年度産学共創の場では「p-c 方式による中性子発生では、ターゲット周りの機械的構造の最適化を完成して、安定して中性子を発生できることを実証することが急務と思われる。また、中性子発生以降の光学系に関して、点光源の特徴を生かせる p-c 方式と相性の良い超小型モデレーターの検討、および点光源を生かした応用例の検討も行っていただきたい。検出器に関しては、RANS との共同研究によりシンチレーターの特性試験を試みていただきたい。」との PO コメントを頂いた。これに基づいて RANS 等での試験の検討を行っている。

シンチレーターについては開発したシンチレーターで 2 次元検出器を作成してはどうかとの意見を頂き、計画を調整し開口が□100mm で 16x16 のピクセル構造を有する高速中性子 2 次元検出器を作成し、初期の性能試験を行った。この検出器については試験利用いただける企業や研究所等を探索し、共同研究を目指したい。

今後について、レーザー中性子源は超短パルス高速中性子の発生を特徴とする。高速中性子の産業利用は未開の領域であり、産学の対話により用途や利用方法を開拓していくことが必要不可欠である。そのためにはレーザーにより中性子を連続かつ安定的に発生する技術を確立することに注力する。それにより、レーザー駆動中性子源の特性を明らかにした上で、その利用方法について産業界に意見を伺い、フィードバックをかけていくことを構想している。

8.　創出された研究成果（企業との共同研究、特許、論文など）のリスト

①－1企業との共同研究等（共同研究、サンプル・ノウハウの提供など）　非公開

①－2企業との共同研究によって得られた研究開発成果　非公開

②－1論文・著書（査読付き）

（国内）

1. 三間圀興, 中井貞雄, 加藤義章, 鬼柳善明, “レーザー駆動中性子源の研究開発動向,” レーザー研究, **46**, 10, 558 (2018).
2. 余語覚文, 花山良平, 安部勇輝, 西村博明, “レーザー加速イオンビーム中性子源の15年　－ピッチャー・キャッチャー法を中心として－,” レーザー研究, **46**, 10, 582-588 (2018).
3. 三間 圀興, 福嶋 喜, レーザー研究「レーザー駆動中性子源の学術・産業応用に向けた展望」特集号 Rev. Laser engineering.46, 632, (2018)
4. 有川安信, 池田裕二郎, 清水裕彦, 花山良平, 近藤治靖, 黒澤俊介,“小型パルス中性子源のための中性子計測法の最近の進展”レーザー研究「レーザー駆動中性子源の学術・産業応用に向けた展望」特集号　第 46 巻第 11 号 pp. 634 - 640 (2018)
5. 花山良平, “レーザによる中性子発生,” 波紋, **29**, 1, 33 (2019).
6. 森芳孝, 安部勇輝, 田中浩基, 花山良平, 鬼柳善明, 長友英夫, 砂原淳, “レーザー駆動中性子源の特徴,” レーザー研究, **46**, 10, 564-569 (2018).
7. 福嶋喜章、熊田博明、佐藤馨、田中浩基、清水裕彦、加速器駆動コンパクト中性子源の産業・医療への利用、レーザー研究、46(11)、564-570
8. 朝比奈隆志、田中浩基、安部勇輝、森芳孝、余語覚文、長友英夫、花山良平、早川岳人、レーザー駆動中性子源のパルス幅評価、レーザー研究、46(10)、594-598

（海外）

1. Y.Yogo, K,Mima, et al, Sci.Report 7, 4245 (2017)
2. N.Iwata, K.Mima, et al, Phys. Plasmas 24, 73111 (2017)
3. K. Mima, Taguchi, T., Fuchs, J., et al., “Theory and Experiments on Collective Scattering of Laser Produced Intense Proton Beam in Plasmas,” MRE_36_R1 (2018).
4. Hiroki Tanaka, Takushi Takata, Yoshinori Sakurai, Shinji Kawabata, Minoru Suzuki, Shin-ichiro Masunaga, Koji Ono,Development of real-time thermal neutron monitor array for boron neutron capture therapy,Therapeutic radiology and oncology, 2018;2:51
5. **Akihiro Yamaji, Shunsuke Kurosawa,** Yuji Ohashi, Yuui Yokota, Kei Kamada, Akira Yoshikawa“Crystal Growth and Optical Properties of Organic Crystals for Neutron Scintillators” Plasma and Fusion Research 13, p. 2405011 (2018)
6. **Shinnosuke Yamato**, **Akihiro Yamaji**, **Shunsuke Kurosawa**, Masao Yoshinoa, Yuji Ohashi, Kei Kamada, Yuui Yokota, Akira Yoshikawa“Crystal growth and luminescence properties of organic crystal scintillators for α-rays detection, Optical Materials 94 pp. 58-63 (2019)

7. N. Iwata, S. Kojima, Y. Sentoku, M. Hata, and K. Mima, "Plasma density limits for hole boring by intense laser pulses," Nature Communications 9:623 doi: 10.1038/s41467-018-02829-5 (2018).
8. H.Nagatomo, K.Mima, et al., "Target Design Study of Fast Ignition for Ignition and Burning Experiments" Nuclear Fusion **59** (2019).
9. Atsushi Sunahara, Takashi Asahina, Hideo Nagatomo, Ryohei Hanayama, Kunioki Mima, Hiroki Tanaka, Yoshiaki Kato Sadao Nakai, Efficient laser acceleration of deuteron ions through optimization of preplasma formation for neutron source development, Plasma Phys. Control. Fusion 61 (2019) 025002 (10pp)
10. T.Asahina, H,Nagatomo, K.Mima, et al., "Enhanced heat transport in ablation plasma under transverse magnetic field by upper hybrid resonance heating" High Energy Density Physics **30**, 8-12 (2019)

②－2論文・著書（査読無し）

（国内）

1. 加藤義章, 三間圀興, 中井貞雄, "レーザー核融合実用化のための基礎的な調査研究," 光科学技術振興財団報告書 (2018).
2. **S. Yamato**, **S. Kurosawa, A. Yamaji, T. Horiai, S. Kodama**, M. Abe, M. Yoshino, Y. Ohashi, K. Kamada, Y. Yokota and A. Yoshikawa, " Temperature Dependence of PL Spectra of p-terphenyl and 1,4-bis(2-methylstyryl)benzene (bis-MSB) at 6-300, " UVSOR activity report 2018 p61 (2018)

（海外）

1. H. Tanaka, **S. Kurosawa**, **A. Yamaji, S. Yamato**, R. Hanayama, A. Sunahara, T. Asahina, H. Nagatomo, K. Mima, Y. Kato, "Evaluation of neutron pulse width in laser-driven neutron source using organic scintillator", 2019 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record (NSS/MIC)

③学会発表（招待講演含む）

（国内）

1. K.Mima, "Efficient ion acceleration in magnetized laser plasmas," JIFT ワークショップ (2018.3.27-28) 広島.
2. K.Mima, "Laser driven ion beam plasma interactions," 双方向核融合理論シミュレーション研究 (2018.1.9-10) 大阪.
3. K.Fujita, K.Mima, et al, "重水素とリチウムの相互作用," レーザー学会 (2018.1.23-26) 京都.
4. 花山良平, 長友英夫, 畠中健, 砂原淳, 田中浩基, 黒澤俊介, 三間圀興, 加藤義章, "超高強度レーザの連続照射を特徴とするレーザ中性子源の開発," 2019 年度精密工学会秋季大会, 浜松, 口頭発表
5. **山路晃広**、**大和慎之介**、**黒澤俊介**、吉野将生、豊田智史、佐藤浩樹、大橋雄二、横田有為、鎌田圭、 吉川彰「中性子検出用途の有機結晶育成とシンチレーション特性評価」第 80 回応用物理学会 秋季学術講演会, 北海道大学（札幌キャンパス）、2019 年 09 月 18 日 口頭発表
6. **山路 晃広**、**大和 慎之介**、**黒澤 俊介**、吉野 将生、大橋 雄二、横田 有為、鎌田 圭、吉川 彰, 「p-terphenyl 結晶の大口径化と評価 」, 第 79 回応用物理学会 秋季学術講演会, 名古屋国際会議場（名古屋、日本）、2018 年 09 月 21 日 口頭発表
7. **大和慎之介**、**山路晃広**、**黒澤俊介**、吉野将生、 大橋雄二、横田有為、鎌田圭、吉川彰,「高計数率 α 線

検出を可能にする高融点有機結晶シンチレータの開発」, セラミックス協会　第 31 回秋季シンポジウム、名古屋工業大学, 2018 年 9 月 5 日、ポスター発表

8. **山路 晃広、大和 慎之介、黒澤 俊介**、吉野 将生、 大橋 雄二、横田 有為、鎌田 圭、吉川 彰, 「p-terphenyl 結晶の作製とシンチレーション特性評価」, 第 66 回応用物理学会春季学術講演会、東京工業大（大岡山キャンパス）, 2019 年 03 月 11 日、ポスター発表
9. **大和 慎之介, 山路 晃広, 黒澤 俊介**, 大橋雄二, 横田 有為, 鎌田 圭, 吉川 彰, 中性子シンチレータ用トランススチルベン結晶の育成と光学特性, 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 福岡国際会議場・国際センター・福岡サンパレス　　2017 年 09 月 08 日　口頭発表
10. **山路 晃広, 黒澤 俊介, 大和 慎之介**, 横田 有為, 鎌田 圭, 吉川 彰,「中性子シンチレータとしての p-terphenyl 結晶の育成とその発光特性」, 公益社団法人日本セラミックス協会　第 30 回秋季シンポジウム 神戸大学（六甲台地区）　　2017 年 09 月 19 日　口頭発表
11. **山路 晃広, 黒澤 俊介**, 大橋 雄二, 鎌田 圭, 横田 有為, 吉川 彰,「中性子シンチレータ開発のための有機結晶育成の立ち上げ」, 第 11 回日本フラックス成長研究発表会, 東北大学（金属材料研究所）2016 年 12 月 09 日　口頭発表
12. 長友英夫, 畠中健, 朝比奈隆志, レーザープラズマ流体解析における非局所電子熱伝導モデルの高精度化, 第 32 回　数値流体力学シンポジウム, 東京都, 2018 年 12 月 11 日, 口頭発表
13. 長友英夫、朝比奈隆志, 畠中健, 畑昌育, 千徳靖彦, 城﨑知至, 運動論効果を考慮した高強度レーザーアブレーションの流体シミュレーション, 日本物理学会　第74回年次大会　福岡市, 2019 年 3 月 15 日, 口頭発表(15aK310-7)
14. 長友英夫, 畠中健, 三間圀興, ,レーザープラズマシミュレーションにおける高速電子熱流束の高精度化, 第 33 回　数値流体力学シンポジウム, 札幌市, 2019 年 11 月 27 日, 口頭発表(E01-3),
15. 畠中健, 三間圀興, 畑昌育, 長友英夫, 高強度レーザープラズマ相互作用の流体シミュレーションに対する影響, プラズマ核融合学会 第 36 回年会, 春日井市, 2019 年 11 月 29 日, ポスター発表（29P14）

（海外）

1. Ryohei Hanayama, Haruyasu Kondo, Atsushi Sunahara, Hiroki Tanaka, Shunsuke Kurosawa,Kunioki Mima, Yoshiaki Kato, “The Introduction of Development Project for Laser Driven Compact Neutron Source in Hamamatsu,” Nuclear Photonics 2016, Monterey, (ポスター発表)
2. Ryohei HANAYAMA, “Development Project for Repetitive Laser Driven Neutron Source using Diode Pumped Solid State Laser,” Conference on Laser Energy Science – Laser and Accelerator Neutron Source and Applications 2017 (2017.4.18-21) Yokohama.
3. R. Hanayama, “Development of Repetitive Laser Driven Neutron Source using Diode Pumped Solid State Laser,” Joint meeting of 26th international Toki Conference and 11th Asia Plasma and Fusion Association Conference (2017.12.5-8) Toki.
4. R. Hanayama, K. Mima, A. Sunahara, T. Asahina, H. Nagatomo, H. Tanaka, S. Kurosawa, K. Fujita, S. Nakai and Y. Kato, “Development of Compact Laser-Driven Neutron Source,” The 10th Asian Symposium on Intense Laser Science (2018.3.10-13) Dubai, UAE.
5. K.Mima, T.Asahina, T.Taguchi, T. Johzaki, H.Nagatomo, Y.Sentoku, A.Yogo, and A.Moracce, “Efficient Ion

Acceleration by Colliding Collision-less Shock in NRCD Plasmas," IFSA2017 (2017.9.10-14) San Malo, France.

6. K.Mima, "Laser ion acceleration for neutron source," Hirscheg Workshop (2018.1.29-2.2) Hirscheg, Switzerland.
7. K.Mima, "Anomalous stopping of intense ion beam in fast ignition," DDFI workshop (2018.3.19-23) York University, UK.
8. K.Mima(光産業創成大), "日独リチウムイオン電池プロジェクト:InDiCate の成果報告," ドイツー日本先進2次電池技術に関するワークシップ 2018.9.19-21 Karlsruhe, Germany
9. Y. Kato (光産業創成大), "High Intensity Lasers: Activities in Asia and R&D Programs in Japan (invited)", ICUIL 2018, 9/10-14, 2018, Lindau, Germany
10. K.Mima(光産業創成大), "Laser Ion Acceleration toward High Neutron Yield (Invited)," ELI-BL, Prague, Symposium 2018
11. K.Mima(光産業創成大), Laser Driven Ion Acceleration and Neutron Source (Invited),"ICMRE 2018.5.6-11, Qingdao, China
12. K.Mima(光産業創成大), "R&D of Laser Driven Neutron Sources and Applications in Japan," ICUIL 2018.9.10-14, Lindau, Germany
13. K. Mima(光産業創成大), "Efficient ps. Laser Ion Acceleration toward High Neutron Yield," EPS 2018.7.1-6, Prague, Czech ポスター発表
14. R. Hanayama(光産業創成大), "Repetitive Laser-Driven Neutron Source Using Diode Pumped Solid State Laser," Nuclear Photonics (2018) Brasov. ポスター発表
15. Ryohei Hanayama, Shunsuke Kurosawa, Hiroki Tanaka, Takashi Asahina, Takeru Hatanaka, Hideo Nagatomo, Atsushi Sunahara, Kunioki Mima, Yoshiaki Kato, "Repetitive laser driven neutron source and organic scintillation crystal for fast neutron detection," t the 1st Experts Meeting on Fast Neutron Imaging, 2019 年 10 月 22 日, Garching, 口頭発表
16. Hiroki TANAKA, Ryohei HANAYAMA, Atsushi SUNAHARA, Takashi ASAHINA, Hideo NAGATOMO, **Shunsuke KUROSAWA**, Kunioki MIMA, Yoshiaki KATO, 「Evaluation of neutron pulse width in laser-driven neutron source」, 11th International Conference on Inertial Fusion Science and Applications、2019 年 9 月 24 日ポスター発表
17. H. Tanaka, **S. Kurosawa**, **A. Yamaji, S. Yamato**, R. Hanayama, A. Sunahara, T. Asahina, H. Nagatomo, K. Mima, Y. Kato, 「Evaluation of neutron pulse width in laser-driven neutron source using organic scintillator」 the 2019 IEEE Nuclear Science Symposium (NSS) and Medical Imaging Conference (MIC) 、2019 年 10 月 28 日ポスター発表
18. Hiroki Tanaka, Yoshinori Sakurai, Minoru Suzuki, Shin-ichiro Masunaga, Toshinori Mitsumoto, Akira Maruhashi, Koji Ono, Current status of cyclotron-based epithermal neutron source for boron neutron capture therapy, Conference on Laser and Accelerator Neutron Source and Applications 2017, 横浜, 平成 29 年 4 月 18 日～4 月 21 日(招待)
19. **Shunsuke KUROSAWA**, Akihiro Yamaji, Shinnosuke Yamato, Hiroki Tanaka, Ryohei Hanayama 「Development of novel Scintillation materials for fast neutron detection」, 1st Experts Meeting on Fast Neutron Imaging

2019 年 10 月 22 日、口頭発表

20. **Akihiro Yamaji, Shinnosuke Yamato, Shunsuke Kurosawa,** Masao Yoshino, Kei Kamada, Yuui Yokota, Hiroki Sato, Yuji Ohashi, Akira Yoshikawa Shunsuke KUROSAWA, 「Growth of heterocyclic compounds crystal and its scintillation property for neutron detection」, 15 th International Conference on Scintillating Materials and their Applications 2019 年 10 月 01 日、ポスター発表
21. **Shinnosuke Yamato, Akihiro Yamaji, Shunsuke Kurosawa**, Masao Yoshino,Yuji Ohashi, Kei Kamada, Yuui Yokota[b] and Akira Yoshikawa, 「Scintillation and optical properties of organic crystal scintillators with a high melting point for α-particles detection」, The 5th International Conference on the Physics of Optical Materials and Devices, Igalo, Montenegro、 2018 年 8 月 30 日、口頭発表
22. **Akihiro Yamaji, Shouhei Kodama, Shinnosuke Yamato, Shunsuke Kurosawa**, Yuji Ohashi, Yuui Yokota, Kei Kamada, Akira Yoshikawa, 「Crystal Growth of p-terphenyl and its Luminescence Properties for Neutron Detection」, The 7th Asian Conference On Crystal Growth and Crystal Technology (CGCT-7), Changchun, China 2017 年 10 月 17 日 口頭発表(招待)
23. **Akihiro Yamaji**, **Shunsuke Kurosawa**, Yuji Ohashi, Yuui Yokota, Kei Kamada, Akira Yoshikawa, 「Crystal growth and optical properties of organic crystals for neutron scintillator」、Conference on Laser Energy Science/Laser and Accelerator Neutron Sources and Applications 2017 (CLES/LANSA'17)、横浜・日本、2017 年 04 月 20 日、ポスター発表
24. **Shinnosuke Yamato, Akihiro Yamaji, Shunsuke Kurosawa**, Yuji Ohahshi, Yuui Yokota, Kei Kamada, Akira Yoshikawa, 「Crystal Growth and Optical Properties of Trans-Stilbene-Based Crystals for Neutron Scintillators」 Phosphor Safari and the 6th International Workshop on Advanced Spectroscopy and Optical Materials (PS-IWASOM)、グダニスク・ポーランド、2017 年 07 月 11 日、ポスター発表
25. **Akihiro Yamaji**, **Shunsuke Kurosawa**, Yuji Ohashi, Yuui Yokota, Kei Kamada, Akira Yoshikawa、「Crystal growth and optical properties of benzoic acid crystals for neutron scintillator」14th International conference on Scintillating Materials and their Applications、フランス・シャモニー、2017 年 09 月 20 日、ポスター発表
26. **Shinnosuke Yamato, Akihiro Yamaji, Shunsuke Kurosawa,** Yuji Ohashi, Kei Kamada, Yuui Yokota, Akira Yoshikaw「Crystal Growth and Luminescence of Benzoic acid-based Scintillators for Neutron Detection」, The7th Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology (CGCT-7), Changchun, China 2017 年 10 月 16 日 、ポスター発表
27. **S. Kurosawa, A. Yamaji, S. Yamato, T. Horiai, S. Kodama**, Y. Ohashi, K. Kamada, Y. Yokota, A. Yoshikawa, 「Scintillation Properties of Benzoic-acid-Based Crystals for Neutron Scintillator Grown by the Bridgeman Method」, 2017 the IEEE Nuclear Science Symposium / the IEEE Medical Imaging Conference, Atlanta, Georgia, USA 2017 年 10 月 23 日、ポスター発表
28. **Shinnosuke Yamato, Akihiro Yamaji, Shunsuke Kurosawa**, Yuji Ohahshi, Yuui Yokota, Kei Kamada, Akira Yoshikawa 「Scintillation Properties of Benzoic acid-based Crystal Scintillators for Neutron Detection」 the 13th International Workshop on Ionizing Radiation Monitoring (IWIRM) Oarai, Japan2017 年 12 月 03 日、ポスター発表
29. **Shinnosuke Yamato, Akihiro Yamaji, Shunsuke Kurosawa**, Yuji Ohahshi, Yuui Yokota, Kei Kamada, Akira Yoshikawa, 「Characterization of Benzoic Acid-based Solid Scintillators for a Neutron Detector 」 the 2nd

International Symposium on Radiation Detectors and Their Uses (ISRD2018)　KEK, Tsukuba, Japan　2017 年 01 月 24 日、ポスター発表

30. **Akihiro Yamaji, Shinnosuke Yamato, Shunsuke Kurosawa**, Yuji Ohahshi, Yuui Yokota, Kei Kamada, Akira Yoshikawa Growth of organic crystals for neutron detection and their scintillation properties the 2nd International Symposium on Radiation Detectors and Their Uses (ISRD2018) KEK, Tsukuba, Japan　2017 年 01 月 26 日　口頭発表
31. Hideo NAGATOMO, Takashi ASAHINA, Atsushi SUNAHARA, Kunioki MIMA, Ryohei HANAYAMA, Effect of external and self-generated magnetic field in formation of pre-plasma due to the pre-pulse of ultra-intense laser, OPIC/LANSA'17, 2017 年 4 月 20 日, 横浜市, 招待講演
32. H. NAGATOMO, T. Asahina, T. Hatanaka, Y. Sentoku, T.,Johzaki, Modeling of LPI and non-local electron transport for radiation hydrodynamic simulation, 60th Annual Meeting of the American Physical Society Meeting, Division of Plasma Physics, 2018 年 11 月 8 日, Portland, ポスター発表
33. Atsushi Sunahara, Hideo Nagatomo, Takashi Asahina, Takeru Hatanaka, Ryohei Hanayama, Hiroki Tanaka, Kunioki Mima, Yoshiaki Kato, Shunsuke Kurosawa, Shunsuke Inoue, Shuji Sakabe, Kazuaki Yazawa, Ahmed Hassanein, Effect of Pre-formed Plasmas on Target Normal Sheath Acceleration for Efficient Laser-Driven Neutron Sources, 11th International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications, 2019 年 9 月 26 日, 大阪市, 招待講演 (5C11).
34. Takeru HATANAKA, Kunioki MIMA, Masayasu HATA, Hideo NAGATOMO, Effects of high intensity Laser Plasma Interaction on hydrodynamic simulations, 61st Annual Meeting of the American Physical Society Meeting, Division of Plasma Physics, Fort Lauderdale, 2019 年 10 月 24 日, ポスター発表 (UP10.00055)

④知的財産（特許権、実用新案権など）

（ｉ）特許出願

（国内）

1. 「レーザ照射用ターゲット、該レーザ照射用ターゲットの製造方法及び該レーザ照射用ターゲットを使用するイオンビーム発生方法」, 特願 2020-21231, 出願日:2020 年 2 月 12 日, 発明者:花山　良平, 出願人:学校法人光産業創成大学院大学

（海外）

該当なし

（ⅱ）特許登録

（国内）

該当なし

（海外）

該当なし

⑤他制度への展開 非公開

⑥その他（受賞、新聞報道、招待講演、展示会等の出展など）

9.　その他特記事項

この研究課題を遂行するに当たり、学術界や産業界との連携を促進する以下の 2 つの取り組みを行った。

a) ”Laser and Accelerator Neutron Source and Applications 2017 (レーザーと加速器による中性子源とその応用 2017)” と題した国際シンポジウムを平成 29 年 4 月 18 日～4 月 21 日に横浜において、大阪大学・西村・余語グループと共同で開催した。中性子発生と中性子利用を行っている内外の研究者が多数参加した。産業界からの参加者も多くおり、中性子産業応用に向けた環境の醸成となった。

b) レーザー学会中性子源利用専門委員会、およびシンポジウム
2017 年 4 月より 2019 年 3 月まで 2 年間にわたり、レーザー学会の「レーザー中性子源利用専門委員会」において、繰り返しレーザーによる中性子発生技術とその利用につき現状と課題をまとめた。委員会活動の成果はレーザー学会誌 2018 年 10 月号と 11 月号の特集として公表された。また、2020 年 1 月 20 日のレーザー学会年会のシンポジウムにおいて、光産業創成大学院大学のプロジェクトの成果を含めレーザー中性子源と利用に関する研究開発動向につき報告、検討を行う予定である。本委員会結論として、ドライバーとなるレーザーの仕様として、100J/pulse/psec, 100Hz が提案された。また、重水素ビームによる高効率中性子発生が特筆された。今後、中性子発生に最適化された kW 級ショートパルスレーザーによる中性子源の実証が期待される。

一方、レーザー中性子源の開発は世界各国で行われている。欧州では特に活発に開発研究が進められており、高出力レーザーの開発と利用に関する研究が長年にわたり実施され、層の厚い研究者コミュニティが構築されている。この基盤に立ち、チェコ、ルーマニア、ハンガリーに建設が進められてきた欧州 ELI 研究所 (Extreme Light Infrastructure)が 2018 年に完成し、レーザー駆動量子ビーム研究が本格化しつつある。

この一環となるレーザー駆動中性子源は、非接触検査への利用に関心が持たれている。英国ラザフォード研究所では、全固体レーザー駆動粒子線・X 線源開発に関する大規模プロジェクトが開始されようとしており、独国ダルムシュタット工科大学では、セキュリティ、航空機、化学、レーザー等に関する大手企業と連携した研究所設立が検討されている。

また、IAEA にレーザー駆動中性子源に関する技術員会が設置された。2020 年に Technical Meeting が開催され、その結果が IAEA Technical Digest としてまとめられる予定である。

Ⅲ. 今後の展開

10. 成果の今後の展開

このプロジェクトで得た成果をもとに、本課題での実験でレーザー施設の貸与を受けた浜松ホトニクス、および、大阪大学・余語グループ等と共同で A-STEP 産学共同（本格型）への申請を行った。その中で、連続レーザー駆動中性子発生の結果をシミュレーション等により解析することで、来年度以降にレーザー中性子源利用システム設計を行い、早期に連続レーザー駆動中性子源の利用技術開発の開始を目指す。特に、ナノ秒の中性子パルスの共鳴散乱イメージングなどの利用例を実証する。

レーザー中性子源の短パルス性の特性により、加速器中性子源では取得することができない高エネルギー分解能での測定が可能であることが本研究において明らかとなった。特に keV から MeV 領域の中性子のエネルギー分解能が優れているため、このエネルギー領域における適応が期待できる。

高速中性子用シンチレーターは、これを用いた高速中性子 2 次元検出器の開発を国内の放射線 2 次元検出器メーカーと共同で開発する可能性を模索する。それとともに、この A-STEP 内のより開発の進展した小型中性子源チームと共同で、源と検出器を組み合わせたトータルシステムとしての実用化開発の可能性を模索する。これにより、小型で高速中性子透過画像が撮像可能な計測システムを構築することが可能となる。広く一般への展開を考えた時、源単体や検出器単体では潜在ユーザの興味を引くことは難しいが、フルシステムとして提示することにより、潜在ユーザへの訴求力は大きく高まり、ユーザ層の拡大が期待できる。