

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
令和元年度事後評価結果

1. 研究課題名：レーザー駆動中性子源の開発と高速ラジオグラフィへの応用

2. プロジェクトリーダー：余語 覚文（大阪大学 レーザー科学研究所 准教授）

3. 研究概要

本研究課題では、レーザー駆動中性子源を開発し、高速中性子ラジオグラフィの原理実証を行う。そのために次の3つの開発テーマを設定する。

①レーザーによる中性子発生手法である (a) 光核反応、(b) イオンビーム核融合反応、(c) 軽元素核反応の3手法につき、それぞれの中性子発生プロセスに係わる物理の解明および中性子発生効率の向上を図るとともに産業利用に適する発生手法の絞り込みを行う。

②レーザー駆動中性子源の特徴である点光源性および短パルス性を活かすことの出来る高速中性子ラジオグラフィに係わる (a) 画像分解能の向上、(b) 拡大撮像、(c) 飛行時間分解による X 線や散乱中性子の除去による画像の S/N 比の向上の、3 点の原理実証を行う。

③産業応用に対応するため熱中性子発生のためのモデレータの開発を行う。

4. 事後評価結果

4-1. 研究の進捗状況及び研究成果の現状

①レーザー駆動中性子源を開発するために、主たる中性子発生法である (a) 光核反応、(b) イオンビーム核融合反応、(c) 軽元素核反応のそれぞれに対して適切な実験を企画し、中性子発生までのプロセスに対して各段階の物理現象の解明を進めるとともに中性子発生効率の向上が図られた。

(a) 光核反応に関しては、プラズマ化レーザーと電子加速レーザーを組み合わせる（ダブルパルス法）ことで高速電子への変換効率の向上に成功した。また、高繰り返しテーブルトップレーザーに回転式連続ターゲット供給装置を組み合わせることで中性子の連続発生に成功した。京都大学化学研究所における実験では発生中性子数 $3 \times 10^4 (4\pi) / \text{shot}$ を確認し 1000shot の連続運転に成功した。スペインの CLPU 研究所における実験では発生中性子数 $6.8 \times 10^6 (4\pi) / \text{shot}$ (200shot の平均値) を確認するとともに、回転ターゲットの 10Hz × 10s の動作実証を行い、中性子発生実験も 0.5Hz で実施している。

なお、加速器 γ 線中性子源における中性子発生試験においては γ 線の偏光方向に指向性を持つ中性子が発生していることを角度依存性の測定により確認している。

(b) イオンビーム核融合反応に関しては、重水素を充填した球殻燃料の内面に高強度レーザーを照射して中性子を発生させる方法（内面照射法）により、Be(d, n) 反応を用いた軽元素核反応の中性子発生量で規格化した値を当初の $1/10^5$ から 2019 年度までに $1/10$ へと

実に 10^4 倍発生効率を向上させることに成功している。

(c) 軽元素核反応中性子発生法（いわゆるピッチャーキャッチャー方式）に関しては、大阪大学レーザー研究所の LFEX レーザーを用いた陽子・重陽子発生実験により変換効率のスケーリング則を決定し、1kJ で約 4%、0.5kJ で約 2% の値を得た。また、従来のレーザー加速実験の結果から 2 桁低いレーザー強度において同程度の加速エネルギーが得られることを発見し、その原因が「時間幅効果」であることを明らかにするとともに、その効果の理論的解明にも成功している。さらにピッチャーキャッチャー方式の最適化を行い中性子発生数 $1 \times 10^{11} \text{n/shot}$ の世界記録を達成するとともに、中性子発生量のスケーリング則として（中性子発生数 n ） \sim （レーザーエネルギー p ） $^{1.5}$ 則を得ている。

②次に 2 番目の設定テーマである高速中性子ラジオグラフィでは、まず理化学研究所の小型中性子源施設 RANS との共同研究において、大阪大学で開発した大口径ハニカム液体シンチレータの撮像試験を行った。その結果、レーザー中性子源が 1shot で発生可能な中性子量では感度が不足し撮像が不可能であることが判明した。そこで、アバランシェフォトダイオードを応用し 10^5 倍の増倍率を誇る「アバランシェ光増幅パネル」を開発して検出感度を大幅に向上させるとともに LFEX で発生させた中性子による 1shot 撮像に挑戦しパラフィンと鉛の識別可能な画像を取得した。さらにイメージャ面までの距離の異なる 2 本の水入り PET ボトルの撮像により、点光源性による拡大効果を示唆する画像の撮像にも成功した。また開発した検出器は時間分解機能を有し、2019 年モデルでは時間分解能 60ns を達成している。これは、今後の撮像実験においては 3m 程度の距離で X 線と中性子の弁別撮像が可能であることを示唆している。

③最後にターゲット、コンバータ、モデレータの開発テーマにおいては、10,000shot の連続照射実験が可能なディスク型回転ターゲット供給装置を使用し京都大学化学研究所およびスペイン CLPU 研究所にて連続試験に成功している。また熱中性子モデレータでは英国に先行されていたため開発目標を冷中性子モデレータに変更し、固体水素冷中性子モデレータを開発した。前述の LFEX を用いたこのモデレータの実証実験において、発生中性子のエネルギースペクトルをヘリウム 3 検出器の飛行時間弁別機能により計測し、10meV 以下の冷中性子の発生を確認することに成功した。レーザー中性子源における冷中性子の発生は世界初である。

以上、いずれの研究テーマに関しても十分な研究成果が得られ開発目標を達成しており、本研究課題を全体として高く評価する。

4-2. 今後の研究に向けて

本研究課題により中性子発生数のスケーリング則が解明され 50J/100Hz のピコ秒レーザーを用いれば加速器中性子源と同程度の時間平均中性子数 (10^{11}n/s) に到達できることが明らかになったことは、本研究課題の重要な成果であり、今後そのような仕様を満足するレーザーの開発と、高繰り返し連続中性子発生試験の実施を期待する。また並行して開発された

高速中性子イメージャを活用した撮像試験は、レーザー駆動中性子源の特徴を明らかにし加速器駆動中性子源の産業利用との棲み分けを提案する重要な研究開発活動である。今後とも着実に撮像試験を積み重ねることによりレーザー駆動中性子源の産業利用への方向性を指し示していただきたい。

4-3. 総合評価

総合評価 S

本研究課題では 3 種の中性子発生方式の試行と実証実験により、その物理的機構およびスケールリング則を解明し、いずれの発生方式においても最適化が進められた。取り分け軽元素核反応方式においては、世界最高記録となる中性子発生数 $1 \times 10^{11} \text{n/shot}$ を記録した。発生方式の選択に関しては、テーブルトップ型フェムト秒レーザーと光核反応方式の組合せと、大エネルギーピコ秒レーザーと軽元素核反応方式の組合せが時間平均発生量としてはほぼ拮抗していると結論されている。また、高速中性子イメージャの開発においては、アバランシェ光増幅パネルの開発により、著しく感度を向上させることに成功し、1shot 撮像にも成功した。モデレータの開発においても冷中性子モデレータを開発し、レーザー駆動中性子源における冷中性子の発生の実証実験に世界に先駆けて成功した。いずれの設定テーマにおいても期待以上の成果を上げるとともにイメージャとモデレータの開発について 2 件の特許出願も果たし、見事であると賞賛すべき研究成果である。

以上