

## レーザー光を用いた中性子・X線同時生成技術による シングルショットラジオグラフィ



余語 覚文  
Yogo Akifumi

### 1 はじめに

光は物質の構造や性質を探り、制御するツールとして、現代の科学と産業に欠かせないものとなっている。近年では、レーザー技術と加速器技術の発展と融合が、新たな展開を迎えつつある。レーザーを極めて短い時間、高い強度に集光する技術 (Mourou and Stickerland, 2018年ノーベル物理学賞) は、1ミリ以下の領域から数千万電子ボルトのイオンや $\gamma$ 線を発生することを可能とした。このような新しい光の技術を駆使して、原子核の構造や性質を探索すると共に、原子核の変換や新しい原子の創成、そしてその産業利用を含んだ新しい学術領域として「ニュークリアフォトンクス (Nuclear Photonics)」<sup>1)</sup> が世界的に勃興しつつある。

ニュークリアフォトンクスにおいて関心を集めるテーマの1つに「レーザー駆動中性子源」(図1)がある。厚さ数ミクロンの薄膜(1次ターゲット)に高強度のレーザーを集光すると、照射スポットは瞬間的にプラズマとなり、レーザーの強力な電磁相互作用によって電子が裏面へ向けて掃き出され、プラズマの周りを周回する(図1上)。この時、電子が染み出したシース (Sheath: 鞘) と呼ばれる荷電分離が発生する。発生する電場の強さは1~10 MeV/ $\mu\text{m}$ におよび、レーザーのパルス幅(1 ps)と同程度の時間が保持され、瞬間的にイオン(陽子や重陽子)が加速される。直近に2次ターゲット(Be

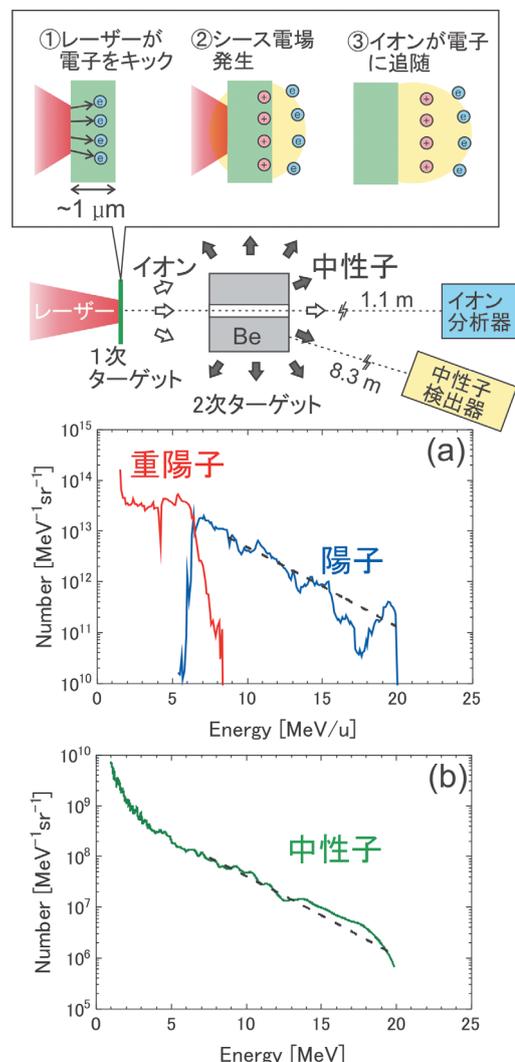


図1 レーザー駆動中性子源の概要  
(a)1次ターゲットから発生したイオンのスペクトル,  
(b)イオンと同時計測した中性子スペクトル

等)を設置することで、核反応から中性子を発生する。

筆者らは、レーザー駆動中性子源の特徴とは何か?その特徴に最適な利用研究とは何か?を追求することで、原子炉、加速器に次ぐ第3の中性子源としての可能性を検証している。

## 2 レーザー駆動中性子源の特徴とは?

レーザー駆動中性子源の特徴として (1) コンパクトな線源サイズ, (2) 短時間パルス性能, (3) 他の短パルス量子ビームと同時に発生が可能, の3点が挙げられる。(1)の特徴は「レーザー光を伝送して、狭隘部で中性子を発生できる」ことにつながる。また, (2)の特徴は「高い時間分解能で計測できる」ことにつながる。(3)の特徴は中性子とX線等の放射線を同時に使用することで複合的な非破壊検査を可能とする。以上の特徴によって、これまで中性子が利用できなかった空間的・時間的領域に中性子をもたらすことができる。筆者らは特に、1回のレーザー照射で発生する1パルスの中性子で1計測を完了するシングルショット中性子分析を提案している。本稿では、10万分の1秒の熱中性子パルスとX線による同時ラジオグラフィ<sup>2)</sup>について紹介する。

## 3 中性子・X線同時ラジオグラフィ

本研究では、大阪大学レーザー科学研究所に設置された高強度レーザー施設LFEXにおいて実施した実験結果を紹介する。

イオンを加速する1次ターゲット薄膜として重水素置換ポリスチレンを使用して水素と重水素のイオン(陽子, 重陽子)を最大エネルギーとして約30 MeVまで加速した(図1下(a))。同時に、1次ターゲットのレーザー集光部からプラズマ電子の輻射によるX線が発生するため、後述する透過撮像に使用できる。プラズマの持続時間がレーザーのパルス幅程度(1 ps)であるため、イオンとX線のパルス幅もps程度となる。

これを直近に設置したベリリウム(Be)の2次ターゲットに照射し、 ${}^9\text{Be}(p, n){}^9\text{B}$ ,  ${}^9\text{Be}(d, xn)$ といった核反応から中性子を発生する。イオンの運動エネルギーの一部が中性子に移行するため、発生する中性子もイオンと同程度のエネルギーを持つ(図1下(b))。

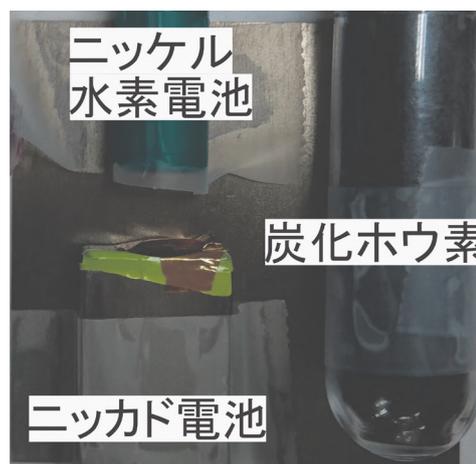
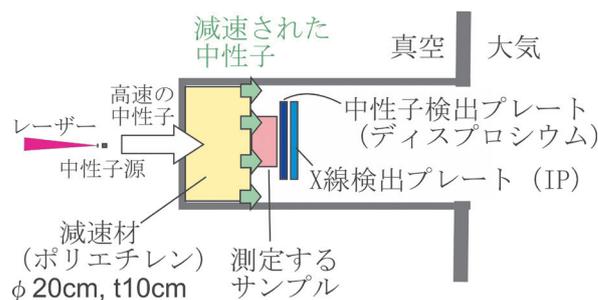


図2 (上) 中性子減速材と計測サンプル位置, 検出デバイスの概要。(下) 撮像試験に使用したサンプル

先述したレーザー駆動中性子の特徴を実証するために、1パルスのレーザーで発生したX線と中性子を用いて透過画像を計測する試験を実施した。ここでは、ニッカド電池、ニッケル水素電池、炭化ホウ素粉末の3種類のサンプルを用意し試験した(図2)。炭化ホウ素は原子番号が小さいためにX線の透過画像ではほとんど写らない。一方、カドミウム(Cd)は人体に有害であるため識別できることが期待されている物質である。このような小型のサンプルを撮像するには、MeVエネルギーの中性子では透過力が強すぎるため、厚さ10cmのポリエチレンの壁を透過させて減速し、室温程度(エネルギーは約25 meV, 熱中性子と呼ばれる)としてから撮像を行った(図2)。

中性子画像の計測にはディスプロシウム(Dy)転写法を用いた。これは ${}^{164}\text{Dy}$ が中性子を吸収して ${}^{165}\text{Dy}$ となった後、約2時間の半減期でベータ崩壊した時の電子画像を記録する手法である。 ${}^{164}\text{Dy}$ が中性子を吸収する確率は、1 eV以上で急激に減少するため、それより高エネルギーの中性子による信号は極めて低い。また、本手法はポストプロセスで

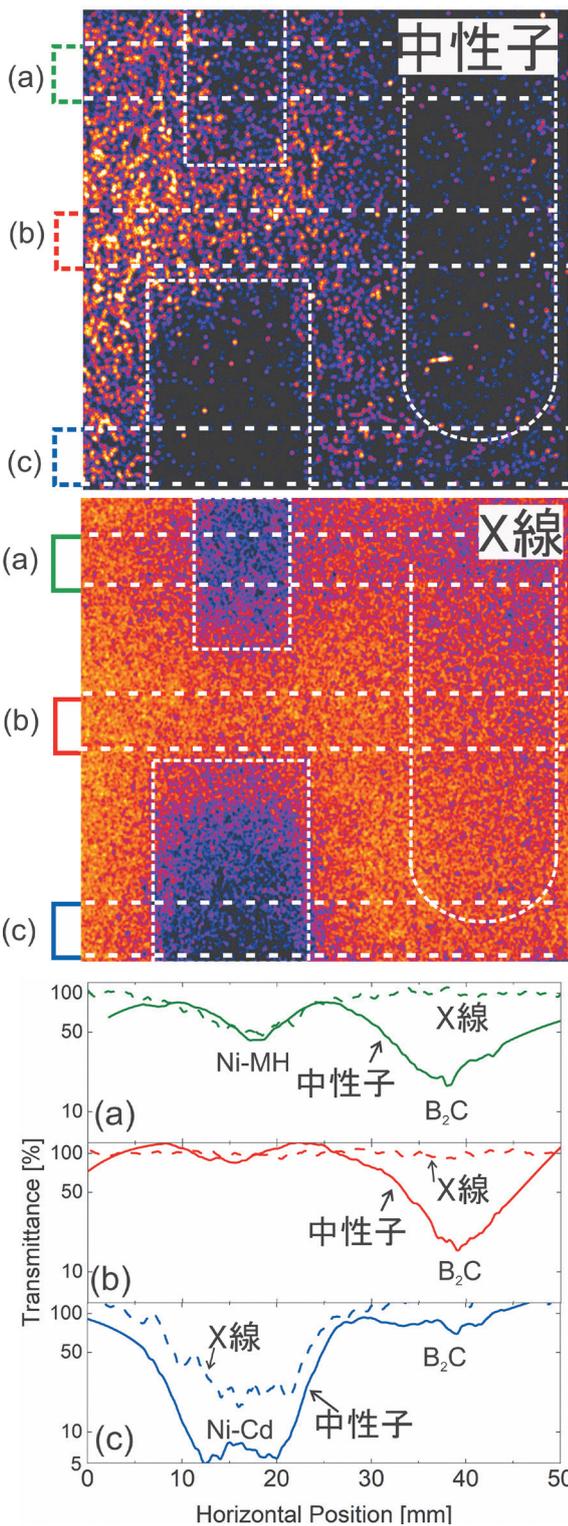


図3 レーザーで同時生成した中性子とX線を瞬間撮影した画像<sup>2)</sup>

上が中性子、中央がX線。X線画像では軽い炭化ホウ素は写っていないが、中性子画像には炭化ホウ素も写っている。(a-c)画像の横軸方向の帯(白点線内)での透過率をプロットしたもの。下に(a)上段、(b)中段、(c)下段の3つを示す。中性子の透過率は実線、X線は破線。(c)で中性子透過率が特に低いことから、中性子を良く吸収するCdが含まれていると分かる

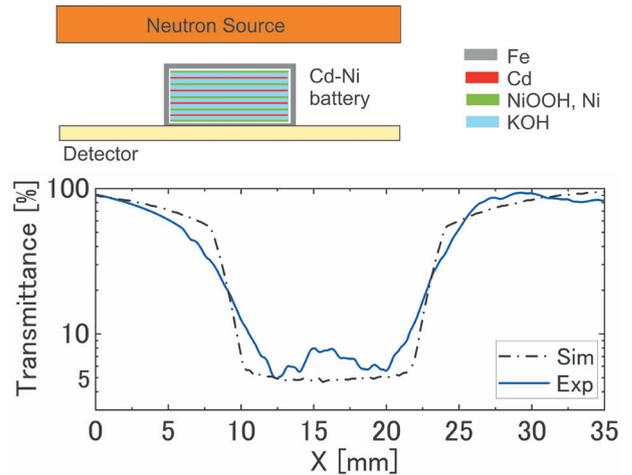


図4 ニッカド電池内のCd厚さの評価

中性子透過率の計算結果と実験値の比較。実験値は図3下(c)に示したものの。Cdの厚さを0.76mmとした場合良く一致した

あるため、レーザー照射に伴うバックグラウンドノイズの少ない画像を得ることができる。X線画像はDyのすぐ後ろに設置したX線IPに記録する。Dyからのベータ崩壊電子が記録されないよう、被覆を施してある。

中性子とX線で同時に撮影した透過画像を図3に示す。X線の透過画像では、予想された通りに炭化ホウ素が写っていない。Cdを含むニッカド充電電池と、Cdを含まないニッケル水素充電電池は写っているが、X線の透過率から、両者の成分を識別することはできない。

一方、中性子で撮影した画像では、3種類の試料がすべて写っている。X線画像に写らず中性子画像のみ写る物体の組成は、炭化ホウ素のような原子番号が小さい物質であることが分かる。中性子の画像を詳細に分析すると、画像の濃さ(中性子透過率)から、Cdを含む充電電池と含まない充電電池を識別することができた。更に、シミュレーション計算と比較することで、電池に内蔵されているCdの厚さを評価することができた。

図4に、実験で得られた中性子の透過率からニッカド電池内のCd厚さの評価した方法を示す。実線は図3下(c)に示した中性子透過率の実験結果である。一点破線はシミュレーションであり、図4に示したようなニッカド電池の構造を簡略したモデルを用いた。Cdの厚さを0.76mmとした場合の計算結果が実験結果と良く一致した。この厚さはニッカド

電池の発売元が開示しているデータシートから得た値 ( $0.76 \pm 0.31$  mm) と一致した。

現状の中性子透過画像の位置分解能としては、5 mm 程度であると考えられる。これは、減速材から発生する熱中性子が指向性を有していないためである。サンプルの設置位置を減速材から遠ざけてコリメートすれば、熱中性子の指向性が得られてより高い位置分解能の画像が計測できる。ただし、距離を離しすぎると中性子量が減少してシングルショットで画像を得ることが困難となるため、ハニカム状中性子コリメータ<sup>4)</sup>等、比較的コンパクトなデバイスを用いることを検討している。

## 4 まとめと今後の展望

レーザー駆動中性子源の研究は、日本、英国、ドイツ等の各国で進められており、国際的関心が高い。しかしながら、現段階では中性子発生に関する基礎的研究の段階にあり、発生した中性子の利用研究は未だその途に就いたばかりである。本研究では、中性子と X 線の同時瞬間撮影を行い、画像から写っている物質を推定できることを示した。特筆すべきは、**図 3** に示した画像が、レーザーパルス 1 ショットで生じた中性子で得られたことである。熱中性子の時間幅はサンプル位置でおよそ 10 万分の 1 秒であるので、この短い時間で撮像できたことになる。積算計測ではないので、時間平均した画像ではなく、

瞬間を撮像することができる。今回は静止したサンプルを使用しているが、動的なサンプルを撮像すれば、「中性子高速カメラ」となり威力を発揮するだろう。加えて、ドライバとなるレーザー装置としては、100 Hz のレートで動作するハイパワーレーザーの開発<sup>5)</sup>が日本で進められている。これらの技術と、オンライン中性子画像検出器を導入すれば、連続撮像も可能となる。

以上では熱中性子に関する研究例を紹介したが、筆者らはレーザー駆動方式として初めて 1 meV 級の冷中性子を発生する原理実証実験<sup>6)</sup>や、瞬間的に恒星内部に匹敵する密度の 10 MeV 級高速中性子による放射化分析法<sup>3)</sup>、等の研究を開始している。瞬間的な分析を可能とするレーザー駆動中性子源を、新たに「ダイナミック（動的）中性子源」と定義して提案していきたい。

## 参考文献

- 1) 余語覚文, 民井淳, 日本物理学会誌 **77** (1), 55 (2022)
- 2) A. Yogo, *et al.*, *Appl. Phys. Express.*, **14**, 106001 (2021)
- 3) T. Mori, A. Yogo, *et al.*, *Phys. Rev. C.*, **104**, 015808 (2021)
- 4) M. Oda, *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A.*, **379**, 323 (1996)
- 5) 河仲準二, 他, *Rev. Laser Engineering.*, **46**, 576 (2018)
- 6) S. R. Mirfayzi, *et al.*, *Scientific Reports*, **10**, 1 (2020)

(大阪大学レーザー科学研究所)