



小特集 高繰り返しレーザー核融合実験の現状と展望

5. レーザー生成中性子源への応用

5. Applications to Laser-Produced Neutron Sources

掛布 光孝

KAKENO Mitsutaka

株式会社 豊田中央研究所

(原稿受付：2015年 5 月29日)

レーザー生成中性子源から得られるパルス中性子は、パルス周波数を可変にできる可能性があり、しかも、高速中性子ビームの光源としての大きさは数 mm 以下と小さく、パルス幅がナノ秒以下と短くできる可能性がある。これらの特長は、現状の原子炉中性子源や加速器中性子源では実現困難と考えられ、レーザー生成中性子源は、次世代中性子源として大いに期待される。

Keywords:

Laser, fuel compression, TNSA (Target Normal Sheath Acceleration), neutron source, J-PARC, JRR-3, compact D-T neutron source, explosives detection, flow measurement

5.1 はじめに

中性子は、核分裂反応や核融合反応をはじめとする様々な核反応により原子核から取り出すことができる[1]。

例えば、核分裂反応の利用では、JRR-3 (Japan Research Reactor-3) において、最大熱出力の 20 MW 時に最大熱中性子束約 $3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ が得られ、核破砕反応の利用では、J-PARC/MLF (Japan Proton Accelerator Research Complex / Materials and Life Science Facility) において、1 MW での加速器運転時に、約 10^{17} s^{-1} の高速中性子の生成が見込まれている。

また、核融合反応の利用では、DD 反応や DT 反応が加速重水素イオンビームを使った荷電粒子核反応として容易に実現でき、FNS (Fusion Neutronics Source)[2]では、400 keV, 40 mA の重水素(D)イオンビームをトリチウム(T)ターゲットに照射し、 $7.2 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$ の 14 MeV 中性子が得られている。さらに、持ち運び可能な小型中性子源も市販されており(以下では、仮に、シールドチューブと呼ぶ)、DT 反応を利用するタイプでは、約 10^{10} s^{-1} の 14 MeV 中性子が、DD 反応を利用するタイプでは、約 10^8 s^{-1} の 2.45 MeV 中性子が得られる。生成中性子のエネルギーが異なるので、利用目的により使い分けられる。そうしたなか、2013年、NIF (National Ignition Facility) が、レーザー照射を使った熱核融合反応(DT 反応)において、1 レーザーショットあたり約 10^{16} 個の中性子の生成を達成した。レーザー核融合は、将来のエネルギー源としての核融合炉の実現とともに、パルス中性子源としても、その活用が期待できるのである。将来のレーザー核融合炉では、1 ショットで $10^{18} \sim 10^{20}$ 個の中性子生成が見込まれ[3]、巨大なパルス中性子源の実現も期待されるが、現状の中性子

源から考えると、核融合炉の実現は必要不可欠な条件ではない。NIF の設備が 10 Hz で運転可能できようになれば、J-PARC/MLF と同等の約 10^{17} s^{-1} の中性子の生成が見込まれるのである。特に、レーザー核融合装置では、直径が高々数 mm のターゲットにおいて全ての中性子が生成されるため、同じ熱核融合装置のトカマク型やヘリカル型に比較して、生成中性子を非常に効率よく利用できる。レーザー核融合装置は、核融合反応の中性子源への応用において、極めて有利な特長を持つのである。例えば、高速中性子ラジオグラフィーを行う場合、非常に輝度の高い点光源として、ターゲットで生成される中性子がそのまま利用できる可能性が高い。

同様の特長は、ナノ粒子クーロン爆発や TNSA (Target Normal Sheath Acceleration) 機構などを活用したレーザー生成中性子源にも期待される。前者では、約 10^6 s^{-1} の中性子生成[4]が、後者では、1 ショットあたり約 10^8 s^{-1} の中性子生成[5]が既に報告され、将来、前述のシールドチューブの中性子生成量を大きく超えるものと期待されている。

中性子は、研究開発や産業、医療、あるいはセキュリティなどの多くの分野で活用されており、大容積の中性子照射場や中性子ビームを安定して供給する中性子源は、わが国の今後の科学技術や産業の進展に不可欠と考えられる。大地震等の災害により研究用原子炉が長期間停止する現状を考えると、核融合炉の開発途上における派生技術として、高繰り返しレーザーモジュールなどを活用したレーザー生成中性子源の早期の実現が期待される。しかも、レーザー生成中性子源では、複数のレーザーモジュールから得られる何本ものレーザービームを束ねてターゲットに

照射する構成になるものと考えられており、同時に照射するビームの本数や、小分けしたビームの照射タイミングを制御することにより、中性子パルスのパルス周波数を可変にできる可能性がある。固定周波数のパルス中性子源では困難と考えられる周期的現象や過渡現象の解明が可能になるものと期待されるのである。さらに、利用するレーザーモジュールの数により、J-PARC/MLF 以上の大規模中性子源からシールドチューブと同等の可搬性を有する小型中性子源まで様々なパルス中性子源の実現が期待され、大学や企業の研究室への普及や、あるいは医療や生産工場などの様々な現場での活用が期待される。また、前述のようにイメージングの高輝度点光源として活用すれば、半影に起因する像のぼけが低減され、従来のラジオグラフィー装置では実現困難な鮮明な透過像の取得が期待される。さらに、中性子パルスのパルス幅がナノ秒以下と短くできる可能性があり、様々な計測やイメージングにおいて高精度な飛行時間法 (TOF 技術) の活用が可能となる。レーザー生成中性子源は、次世代の中性子源として大いに期待される。

本章では、中性子源を、JRR-3 や J-PARC/MLF と同様な大規模中性子源施設と、持ち運びが可能で、中性子の利用目的毎に装置が設計される小型中性子源の二種類に分けて考え、レーザー生成中性子源を使ってそれらを実現する場合、どのような中性子源が可能か、構想してみた。多くは想像と可能性の域を脱しないが、従来の中性子源にはない特長が期待されるレーザー生成中性子源について解説を試みたい。

5.2 大規模中性子源施設

5.2.1 中性子の応用と現状装置の例

研究開発分野では、分析・計測やイメージングなどで中性子が利用されている。分析・計測では、中性子回折や小角散乱、反射率測定、熱中性子放射化分析、中性子即発 γ 線分析などの様々な手法により、例えば、電池の電極材料の解析や、鋼材の残留応力測定などが行われている[6]。イメージングにおいては、JRR-3の熱中性子ラジオグラフィー設備で熱中性子束 $1.2 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の連続中性子ビームが利用でき[7]、自動車エンジン内部の潤滑油の動きなど[8]が撮影されていた。2014年には、J-PARC/MLF に物質情報3次元可視化装置 (RADEN) が設置され、 $9.8 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (1 MW 運転時) の 25 Hz のパルス中性子ビームが利用できるようになった。RADEN では、パルスビームの特長を活かした新しいイメージングが可能となり、偏極単色中性子を使った車載モーター内部の磁場分布測定や中性子の共鳴吸収を使ったパワーデバイスユニット内部の温度分布測定などが期待される。しかし、その反面、従来の連続ビームで容易にできた周期現象の撮影が難しくなった。撮影用ビームが 25 Hz で照射されるので、例えば、23 Hz の周波数で流れ方が変動する冷却水の撮影と解析が非常に複雑なものとなるのである。

生産分野では、JRR-3の直径 170 mm の照射孔で、シリコン中性子ドーピングが行われていた。外径 161 mm、長さ

740 mm の試料ホルダーにシリコン単結晶を入れて照射が行われ、 $2.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の最大熱中性子束で、1 時間～26 日間 (1 cycle)、試料を回転させながら照射が行われた。J-PARC/MLF に同様な設備はない。

5.2.2 レーザー生成次世代型中性子源の構想

冒頭で触れたように、J-PARC/MLF 相当の中性子強度を得るには、NIF 相当の装置を 10 Hz 以上で運転する必要がある。中性子の生成には、ターゲットの爆縮を行う熱核融合が必要と考えられる。また、前節の応用例では、熱中性子などの低エネルギー中性子が主に利用されており、レーザー生成中性子源においても、DT 反応で生成する 14 MeV 中性子のエネルギーを数十 keV～数 meV 以下まで低下 (減速) させる減速体系が必要となる。そこで、熱核融合装置に組み込む減速体系の設計に必要とされる工夫と、レーザー生成中性子源ならではの特長について想像してみた。

図 1 (a) に示すように、従来の中性子源と同様に高速中性子発生源 (ターゲット) の周りに減速材を置く体系の場合、レーザービーム貫通孔やターゲット供給装置などによる高速中性子の漏洩が考えられ、高速中性子の利用効率の低下が懸念される。図 1 (b) は、北川らが提唱する対向照射型の核融合システム[9]の活用により中性子利用効率の向上を図った案 (コリメーターを追記した) である。図 1 (c) は、減速材をあえて一か所に集め、減速材に投入されない中性子を、ブランケットで活用する改良案である。従来の中性子源では、活用できなかった高速中性子は遮蔽体により装置外への漏洩を止めるだけであったが、レーザー核融合では、高速中性子からのエネルギー回収やトリチウム生産の機能を持つブランケットが積極的に活用されるものと考えられる。また、図 1 (d) は、JRR-3 で行われていたシリコン単結晶への中性子照射を念頭に置いた構成であり、容積が大きく、熱中性子束が一般的な中性子照射場の構想を示している。図 1 の (a)～(c) の配置では、熱中性子束の空間的一様性が実現できないので、北川らの対向照射型核融

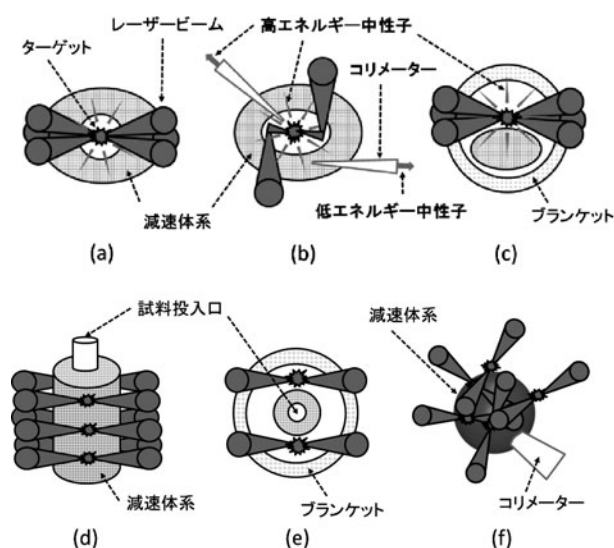


図1 レーザービームと減速体系の構成例。

合システムを複数用意し、減速体系を取り囲む配置を考案した((d)~(f)). 中性子束分布の一様性を最適化するためには、さらに、様々な配置の可能性が考えられる。図1(e)は、図1(d)の断面図にブランケットを追記したものであり、図1(c)と同様に、高速中性子の有効活用を意図している。将来のレーザー核融合炉で使われるパルス出力 MJ、平均出力 MW のエネルギードライバーは、平均出力 100 kW クラスのレーザービーム (10 kJ×10 Hz) を多数束ねるモジュール構造になるものと考えられており[10]、図1のような複数ターゲットへのレーザービームの分配は容易に実現できるものと期待される。

さらに、複数ターゲットによる中性子発生は、中性子ビームのパルス周波数を可変にできる可能性も考えられる。図1(f)に示すようなレーザービームと減速体系の構成例は実現できないだろうか(ブランケットの記入は省略)。コリメーター入り口での熱中性子束が等しくなる複数の位置で高速中性子を発生させるのである。仮に、周波数が 10 Hz の対向照射型レーザー照射システムを10台用意する。10台を同時に点火する使い方に対し、1台ずつ 10 ms 毎に順次点火すれば、中性子強度は 1/10 となるが、100 Hz のパルス中性子源が実現できる。また、一定の時間間隔で並べた10発のレーザーパルスの塊を、周期現象の波形上で、照射位置(位相)をずらしていく現象解明法も実現できると考えられる。あるいは、試料からトリガ信号を得て、現象に同期させた中性子の照射も可能かも知れない。このように、中性子ビームの照射周波数が利用目的に応じて変調できれば、連続ビームのようにあらゆる周波数の周期的現象を対象として、しかも、パルスビームの特長をいかした撮影(あるいは測定)が実現できるのではないだろうか。ただし、高速中性子の減速には、数十 μ s オーダーの中性子減速時間[1]が必要と考えられるので、複数のレーザーパルスの照射時間間隔によっては、中性子ビームパルスのテールが後続のパルスの高速成分と重畳する可能性はある(先の RADEN では、ビームのテールをカットするディスクチョッパーが備えられている)。減速体系の最適設計に向けた詳細な検討が期待される。

また、図2は、減速体系から低エネルギー中性子をビーム状に取り出すコリメーター(図1)と半影($U_g = L_f/L_s \times D$)の関係を示したものである。通常の熱中性子ラジオグラフィでは、被写体位置における熱中性子ビームの中性子

束がコリメーター入り口近傍(図2の①)における減速材中の熱中性子束と入り口の面積(例えば $D^2 \text{ cm}^2$)に概略比例する[11]。したがって、撮影に大きな熱中性子束が欲しい場合は D を数 cm の大きさに設計するが、その場合、半影が大きくなり、像がぼける。そのため、撮影では、可能な限り試料をスクリーンに密着させる。RADEN では L/D が 180~7500 の範囲で選択できるようになっており、コリメーターについては、レーザー生成中性子源も RADEN と同様な設計になると考えられる。なお、 L/D の本来の定義は、 L としてコリメーターの長さが使われるが、実用上の観点から、 L として試料までの距離 L_s (CT 用の回転ステージのある場合は、ステージの中心位置など)や、スクリーンまでの距離 ($L_s + L_f$) などが使われる場合が多いので注意を要する。

また、冒頭で述べたように、ターゲットを点光源として高速中性子をそのままラジオグラフィーに利用する場合(図1(b))は、ターゲットの大きさに爆縮位置のゆらぎの大きさを加えた長さが D の大きさと考えられ、数 mm 以下の値が期待される。半影 U_g の非常に小さい鮮明な画像の得られる可能性が高いのである。さらに、 D が小さい分、 L_f を大きく取ることができ、より大きな被写体の撮影が可能となる。

5.3 小型中性子源

5.3.1 中性子の応用と現状装置の例

高速中性子をそのまま利用する場合は、減速体系が不要なので、中性子源が非常に小型化できる。冒頭で触れたシールドチューブは、地雷探査[12]や貨物コンテナの検査などへの活用が検討され、さらに、様々な現場での流体測定技術[13]への応用も期待されている。

地雷探査では、吉川ら[12]が、DD 反応で得られる 2.45 MeV 高速中性子を地面向けて照射する方法を提案している。地雷の有無の判定は、火薬中の ^1H により弾性散乱され、地上に出てくる後方散乱中性子の検出により行い、地中で熱化された中性子の火薬中の ^1H および ^{14}N による吸収で放出される捕獲 γ 線の検出により、地雷の種類を同定する。吉川らは、実証実験において、自ら開発中の超小型静電慣性閉じこめ型核融合中性子源を用いている。また、Vourvopoulos[14]らは、DT 反応で得られる 14 MeV 中性子を 10 μ s 間照射し、火薬中の ^{16}O と ^{12}O による非弾性散乱で生成される即発 γ 線を検出した後、続く 90 μ s 間、熱中性子の ^{14}N 、 ^1H などによる吸収で放出される捕獲 γ 線を検出している。この手法は、パルス高速中性子&熱中性子解析 (PFTNA) として知られ、冒頭の可搬型小型中性子源等が利用される。

地雷の種類と同定は、上記の窒素と水素の他、炭素や酸素などからの γ 線も利用でき、 γ 線収量や収量比が火薬の種類によって異なる性質を利用する。この手法は、貨物コンテナ内部の爆薬や麻薬などの違法物質探査にも活用され、コンテナ内部の爆薬探査では、爆薬の有無や種類に加え、位置の情報が必要とされることから、随伴粒子検知式 3 次元元素分布計測 (ATP) や飛行時間法パルス高速中性子解

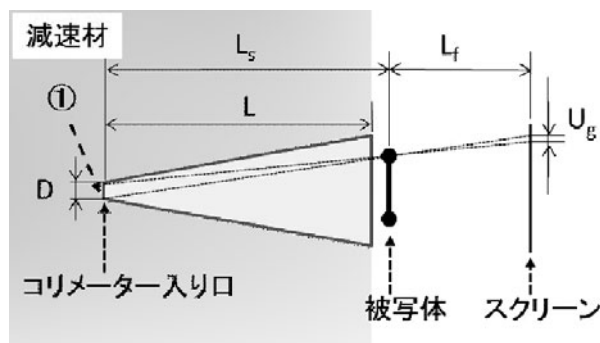


図2 コリメーターと半影。

析法 (TOF-PFNA) が利用される。ATP では、市販の随伴粒子検知器付き密閉型中性子源が使用され、DT 反応時に、高速中性子と反対方向に放出される α 線を検出し、中性子の飛行方向を知る。TOF-PFNA では、DD 反応による 8 MeV の中性子を半値幅 1 ns のパルス状にして、 γ 線の発生時間を知る [15]。いずれも、2 次元に配置した多数の γ 線検出器からの信号と、飛行方向や γ 線発生時間を合わせて解析し、爆薬の位置を特定する。

5.3.2 レーザー生成次世代型中性子源の構想

レーザー生成中性子源でも、持ち運び可能な小型中性子源の実現が期待されている。中性子源用のエネルギードライバーには、平均出力 10~100 kW クラスのレーザーが考えられており、100 kW クラスのレーザーモジュールでトラック 1 台に乗る大きさが実現できるものと考えられている [10]。前述の大規模中性子源施設用レーザーモジュールの 1 台をトラックに乗せて移動するイメージであり、例えば、図 3 (a) に示すように、トラックから伸ばした可動アームの先端に、任意の位置と角度からの中性子ビーム照射を可能にする小型中性子照射部品 (仮に、可動ヘッドと呼ぶ) を設置できないだろうか。アーム内部にレーザービームを通し、冒頭のナノ粒子クーロン爆発や TNSA 機構などにより生成される加速イオンビームを使った中性子発生ユニットを可動ヘッドに内蔵するのである。ただし、レーザー源からユニットまでレーザービームを輸送する必要がある分、装置が大掛かりになり、DT チューブに比較して可動性が若干劣る点是否めない。

TNSA 型ユニットの活用では、例えば、2 MeV 弱の陽子を Li ターゲットに照射し、 ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ 反応により中性子を生成させる。この時、生成中性子のエネルギーは高々数百 keV と DD 反応時に比較して低く、しかも、高い指向性をもつため [16, 17]、装置面では、側方や後方に発生する中性子量が減る分、遮蔽体を小型軽量化できる可能性が高く (図 3 (a))、応用面では、爆薬検出の空間分解能が高くなる上、不要な放射化も低減できる可能性が高い。また、低エネルギー中性子ビームを取り出す場合、減速体系内部の中央近傍に向けてビームを照射すれば (図 3 (b))、生成中性子のエネルギーが低いことから、減速材による中性子散乱の平均自由行程が短く、減速体系を小型化できる可能性が考えられる。同様の高指向性中性子ビームは、10 MeV 以上の重水素イオンを重水素 (D) ターゲットに照射しても得られる [18] (ただし、中性子エネルギーは最大エネルギーが 20 MeV を超える連続スペクトルで、DD 反応の断面積も小さい)。10 MeV~20 MeV 前後の高速中性子は、火薬の探査原理が活用できる上、流体計測への利用可能性も考えられる。即発 γ 線と崩壊 γ 線の同時計測による流体計測法 (ib-DATA: in-beam Double Activation Tracer Analysis) [13] では、数 ms の間、中性子ビームを流体に照射し、照射開始からの数十 ms の間、崩壊 γ 線をリストモードで時系列計測し、崩壊 γ 線強度の減衰過程を解析する。自動車用燃料や潤滑油など炭素を多く含む有機物の流体では、核反応 ${}^{12}\text{C}(n,p){}^{12}\text{B}$ に伴って ${}^{12}\text{C}$ から放出される γ 線を計測し、数 cm/s~数 m/s までの流速測定が考えられる。また、

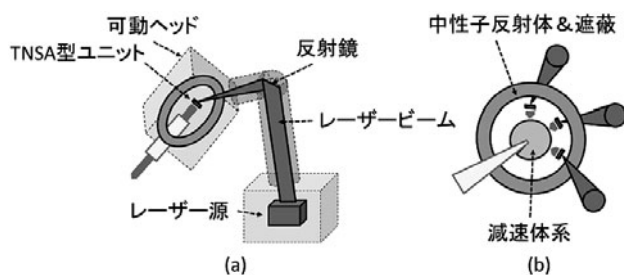


図 3 可動ヘッドを備えた可搬型中性子源の構成例。

軽水など酸素を含む流体やフッ素を含む冷媒などでは、 ${}^{16}\text{N}$ を利用し、流体の滞留領域などにおける数 cm/s 以下の流速計測が期待される。さらに、この手法は鉛やアルミニウム、マグネシウムなどの金属の流れ (移動) の計測に利用でき、例えば、液体ブランケット内部における鉛の流体計測やアルミダイキャストにおける溶湯の流体計測が可能になるものと考えられる。

さらに、TNSA 型ユニットの替わりにクーロン爆発型ユニットを使えば、パルス幅がナノ秒以下の単色高速中性子が得られるので、上記の火薬検出の他、TOF を使った高速中性子ラジオグラフィーなどへの利用が期待される。なお、クーロン爆発型ユニットでは、高速中性子が 4π 方向に放出されるので、中性子の利用効率が非常に低い。中性子の利用目的に沿った装置設計が必要となる。

5.4 まとめと展望

大規模中性子源施設では、レーザー源のモジュール構成による複数ターゲットの活用に着目し、周波数可変型パルス中性子ビーム源の実現可能性とその応用などについて概観した。また、小型中性子源では、指向性の高い中性子生成が可能な核反応を活用した小型中性子源の構想とその応用などについて概観した。

将来、図 3 (b) の TNSA 型ユニット数を増やし、被写体位置で $10^8 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 以上の熱中性子束が得られるレーザー生成中性子源が大学や企業の研究所に普及するかも知れない。レーザー生成中性子源には、原子炉や加速器を用いた従来の中性子源にはない特長が期待され、早期の実現が望まれる。

参考文献

- [1] K.H. Beckurts and K. Wirtz, NEUTRON PHYSICS, SPRINGER-VERLAG, 1964.
- [2] 今野力: 核データニュース 93, 33 (2009).
- [3] S. Nakai *et al.*, J. Phys. Conf. Series, 244, 042027 (2010).
- [4] 阪部周二, 橋田昌樹: レーザー研究 43, 82 (2015).
- [5] H. Daido *et al.*, Rep. Prog. Phys. 75, 056401 (2012).
- [6] 林眞琴: 非破壊検査 60, 65 (2011).
- [7] 松林政仁: RADIOISOTOPES 57, 329 (2008).
- [8] 日本原子力研究開発機構: JAEA-Review, 2013-040, 180 (2013).
- [9] Y. Kitagawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. 105, 155001 (2012).
- [10] 中井貞雄 他: OPTRONICS 1 (2012).
- [11] P. VON. DER HARDT and H. ROTTGER, eds., NEU-

- TRON RADIOGRAPHY HANDBOOK, Nuclear Science and Technology (D. REIDEL PUBLISHING COMPANY, DORDRECHT, LONDON, 1981).
- [12] 吉川 潔 他：プラズマ・核融合学会誌 **83**, 795 (2007).
- [13] 掛布光孝：レーザー研究 **43**, 77 (2015).
- [14] G. Vourvopoulos *et al.*, TALANTA **54**, 459 (2001).
- [15] D.R. Brown *et al.*, Instrum. Methods Phys. Res. B **99**, 75 (1995).
- [16] G.D. Kim *et al.*, J. Korean Physical Society, **55**, 1404 (2009).
- [17] C.L. Lee and X.L. Zhou, Instrum. Methods B **152**, 1 (1999).
- [18] M. Drosge and D.M. Drake, LA-5732-MS (1974).