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

有川 安信¹, 池田 裕二郎², 清水 裕彦³, 花山 良平⁴, 近藤 治靖⁵, 黒澤 俊介^{6,7}

¹大阪大学 レーザー科学研究所 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-6)

²J-PARC (〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4)

³名古屋大学 (〒464-8602 愛知県名古屋市中種区不老町)

⁴光産業創成大学院大学 (〒431-1202 静岡県浜松市西区呉松町1955-1)

⁵浜松ホトニクス株式会社 (〒434-8601 静岡県浜松市浜北区平口5000)

⁶東北大学 (〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平2-1-1)

⁷山形大学 (〒990-8560 山形市小川町1丁目4-12)

Recent Development of Neutron Detectors for Pulsed Compact Neutron Sources

Yasunobu ARIKAWA,¹ Yujiro IKEDA,² Hirohiko M. SHIMIZU,³ Ryohei HANAYAMA,⁴

Haruyasu KONDO,⁵ and Shunsuke KUROSAWA^{6,7}

¹Institute of Laser Engineering, Osaka University, 2-6 Yamadaoka Suita, Osaka 565-0871

²J-PARC, 2-4 Oaza shirakata Tokaimura Nakagun, Ibaraki 319-1195

³Nagoya University, Furocho, Chikusa, Nagoya 464-8602

⁴The Graduated school for photon industry, 1-1955 Kurematsu Nishiku Hamamatsu, Shizuoka 431-1202

⁵HAMAMATSU PHOTONICS K.K., 5000 Hirakuchi, Hamakita-ku, Hamamatsu, Shizuoka 434-8601

⁶Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aobaku, Sendai, Miyagi 980-8577

⁷Yamagata University, 4-12-1 Koshirakawa, Yamagata 990-8560

(Received July 7, 2018)

Compact neutron sources have been used as a various diagnostics such as neutron diffraction, neutron resonant analysis, and neutron radiography. The developments of the neutron detectors are essential for all of these applications, while the techniques are strongly dependent on the neutron energy and the aim of the measurement. This paper reviews neutron detection techniques pertinent to promote compact neutron source uses. Along with general neutron detection systems with conventional counters for slow neutrons, we have highlighted detectors for high energy neutrons with high time resolution and high sensitivity which could be applied in a laser-driven compact neutron source.

Key Words: Neutron diagnostics, Scintillator, Activation measurement

1. はじめに

小型パルス中性子源の開発¹⁻³⁾は急速に進んでいる。小型中性子源は、中性子ラジオグラフによる非破壊検査⁴⁾、中性子回折を用いた物質の構造解析⁵⁾、中性子共鳴吸収を利用した金属材料の元素分析⁶⁾、BNCT(Boron Neutron Capture Therapy)⁷⁾に代表される中性子医療など、広範囲の利用で期待されている。どの利用においても、中性子フラックス、エネルギースペクトル、中性子による画像計測技術はその研究の根幹をなす。中性子はそのエネルギーによって適用可能な計測手法はさまざまであり、感度・時間応答・画像計測をする場合の空間分解能の特徴は計測手法ごとに大きく異なる。本稿では中性子計測技術開発とその基盤技術を、特に画像計測をすることを念頭に置いた観点から、熱中性子領域、エピサーマ

ルから中間領域エネルギー、高速中性子に分けてレビューする。特に、最近進展が目覚ましいレーザー駆動中性子源開発で重要な短パルス高輝度中性子源で活躍が期待される計測技術を展望する。

2. 熱中性子計測技術

中性子応用の中で最も歴史が長く、応用も多いのが熱中性子(室温の運動エネルギーを持つ中性子, 0.025 eV 付近を言う)である。熱中性子領域(ここでは0.025 eVから0.5 eVと定義)の計測は、中性子捕獲反応によって中性子を捕獲し、発熱反応で荷電粒子を放出するいくつかの反応に限定される。Fig. 1 に、低エネルギー中性子計測で用いられる代表的な元素の反応断面積を示す。断面積はJENDLデータベース⁸⁾を用いた。水素の散乱反応

Fig. 1 Neutron reaction cross sections for thermal neutron detection.

は、高エネルギーの中性子に対しては反跳(リコイル)に対応し、主に高速中性子計測で用いられる。 ^3He に中性子が吸収されると陽子とトリトン(T)を放出し、その電離をもちいた比例計数管が中性子検出に用いられる⁹⁾。熱中性子領域に吸収断面積が非常に高く、一般的な ^3He ガス比例計数管はほぼ100%の効率で中性子を検出することができる。この装置はガス管からなる装置であり、0次元検出器(フラックスモニター)として用いられるほか、抵抗分割読み出しによる1次元検出器として用いられる。 ^3He をコンバーターとするガス検出器には、マルチワイヤー比例計数管(MWPC)、またはマイクロパターン読み出しのドリフト検出器などいくつかのタイプがあり、2次元検出器として用いられる。マイクロパターンの検出器については、参考文献10)に特徴がまとめられている。マイクロパターン読み出しのドリフト検出器は高い計数率で利用でき、飛跡を解析することで高い位置分解能を達成できる。近年では、マイクロピセルカウンタ($\mu\text{-PIC}$)装置で100 μm の空間分解能が得られており、中性子イメージングの応用が急速に広がっている¹¹⁾。比例計数管の立ち上がり時間は熱中性子や冷中性子の飛行時間計測に用いるのに十分な程早い。Gas Electron Multiplier (GEM)は高い計数率(数百 kHz)と位置分解能($\sim 1\text{ mm}$)¹²⁾を比較的単純な読み出し系で実現する柔軟性の高い検出器である。さらにGEM検出器の電極に ^{10}B をつけて、 $\text{B}(\text{n}, \alpha)$ 反応によって生じる α 粒子を検出するタイプの2次元検出器として開発が進んでいる¹²⁾。また ^{10}B を用いた材料で作られたマイクロチャンネルプレートによる画像検出装置は非常に優れた空間分解能(55 μm)を実現している¹³⁾。中性子イメージングインシファイアとよばれる、ガドリニウムドープシンチレーターを中性子コンバーターとして用いたフォトカソードと電子加速管からなり、中性子画像を可視画像にするデバイスも知られている¹⁴⁾。 ^6Li は固体で存在し、化合物にすると結晶やガラスにすることもできるため、シンチレーター材料として有用である。中性子散乱実験において広く用いられてきたものは $^6\text{LiF/ZnS}(\text{Ag})$ である¹⁵⁾。この材料は不透明であるため、位置敏感型光電子

増倍管の光電窓上に薄い $^6\text{LiF/ZnS}(\text{Ag})$ 板を密着させて、中性子画像計測として用いられている¹⁶⁾。 $^6\text{LiF/ZnS}(\text{Ag})$ は発光量が多い(100,000 photons)という利点があるが、発光の減衰時間が長く(蛍光寿命2 μs)検出効率を高くすることが難しい。より高速応答のシンチレーターとして ^6Li ガラスシンチレーター(^6Li 濃縮原料を用いた $\text{LiO}_2\text{-SiO}_2$ のガラスにCeが添加されたもの)がある。またピクセル化した Li ガラスシンチレーターをマルチアノード光電子増倍管につけたもの¹⁷⁾が存在する。光電子増倍管から直接読み出しを行うことで最大28 MHzまでの超高速読み出しが実現している。空間分解能はマルチアノード光電子増倍管のピクセルサイズである2 mm程度に制限される。重心計算解析によって分解能が1 mm程度まで向上する技術も知られている¹⁸⁾。これらピクセル系装置とGEMについては¹⁹⁾に最近の進展がまとめられている。

Li 系シンチレーターの近年の進展としては、従来のガラスシンチレーターよりも発光減衰が早くまた高速応答な結晶シンチレーターとして、 $\text{LiCAF}(\text{Eu}^{2+}:\text{LiCaAlF}_6, \text{Ce}^{3+}:\text{LiCaAlF}_6)$ が登場している²⁰⁾。これらは固体密度の10%程度の数密度で ^6Li を含んでおり、1 mm厚や100 μm 粉末状態でも熱中性子に対してほぼ100%の検出効率を出すことができる。粉末にして透明材料に塗布すれば中性子画像計測用シンチレーターパネルとなり、シンチレーター発光画像を高感度カメラでとらえる中性子画像装置として期待できる。時間分解能は Li ガラスシンチレーターは60 ns程度、 $\text{Ce}:\text{LiCAF}$ は20 ns程度であり、その他著者らのグループでは既存のシンチレーターと比べて高速応答(減衰時定数5 ns)の ^6Li ガラスシンチレーターAPLF80²¹⁾を開発した。シンチレーション発光効率をさらにたかめる試みとして、発光量とバンドギャップエネルギーは反比例の関係にあることから、小さいバンドギャップエネルギーを持つ塩化物や臭化物などに注目した材料探索が米国などを中心に行われている。具体的には、 $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6:\text{Ce}(\text{CLYC})$ ²²⁾および $\text{Cs}_2\text{LiLaBr}_6:\text{Ce}(\text{CLLB})$ ^{23,24)}などは、発光量がそれぞれ20,000および60,000 フォトン/MeV以上と、 $\text{Ce}:\text{LiCAF}$ に比べて数倍以上の発光量を持つ。さらに、ガンマ線にたいしてもエネルギー分解能が非常によく、中性子計測においてノイズとなるガンマ線の分別能力も高い。一方で、これらの塩化物や臭化物シンチレーターの蛍光寿命は、短寿命であるが、遅発成分も存在し、全体的には数マイクロ秒程度以上の蛍光寿命を有するものもある。そのため、熱中性子のTOF弁別計測は不向きであるとの指摘がある。さらに、潮解性があることから、結晶育成およびパッケージ技術などの加工の困難性や経年劣化しやすいなどの課題、またコストがかかるなどの課題を抱えている。

熱中性子のTOF弁別計測には ^6Li か ^{10}B が添加された高速シンチレーターが有効である。TOF弁別を必要としない最も簡単な画像計測としてはイメージングプレートにガドリニウムや ^6Li や ^{10}B がドープされた中性子イメージングプレートが市販されており²⁵⁾、高感度に熱中性子画像を計測することができる。この手法は大面積の測定が比較的容易であるという利点を有する。

シンチレーションをもちいたアクティブ検出器以外に金属箔の中性子との反応による放射能を計測するいわゆる放射化法が広く中性子計測に用いられる。熱中性子の計測では、金、インジウム、ディスプロシウム等が使われる²⁶⁾。これらは中性子照射した後に、放射化反応で生成した各種の崩壊に伴い放出するガンマ線をゲルマニウム検出器で計測する。その他放射化箔をフィルムあるいはイメージングプレートに密着させて一定時間感光し、スキャンする中性子イメージング計測がある。最後にTable 1に熱中性子測定に利用される元素、素子についてその特性を示す。それらを利用した、実際に使用されている検出器の空間分解能を最後に示す。

3. エピサーマルから中速中性子計測技術

熱中性子(0.5 eV)以上から100 eV領域をエピサーマル(熱外)中性子や低速中性子と呼び、100 eV-100 keVを中速中性子とここでは呼ぶ。BNCT治療では深くの腫瘍まで中性子を届ける必要があることから、0.5 eVから10 keVの中性子が重要視される。また多くの中性子共鳴吸収がこれらのエネルギー領域に存在するため応用研究が多い。この領域での中性子計測は基本的に熱中性子と同じく、³He比例計数管や、放射化法が用いられる。多くの放射化材が熱中性子領域に感度が高いため、熱外中性子はポリエチレンなど減速材を用いて減速させてから検出することが多い。熱中性子と区別して計測する必要がある場合は、カドミウムなど熱中性子を吸収する物質で取り囲んだ比例計数管を用いることがある。有機シンチレーターの場合、中性子-水素反跳の断面積は大きいですが、反跳陽子のエネルギーが小さいため、1個の中性子信号は非常に小さな電流値となり、一般に検出が困難である。

エピサーマル領域では共鳴吸収が多数存在し、これらは元素によって異なる。Fig. 2はJENDLデータベース⁸⁾から、いくつかの核種の中性子共鳴ピークを比較したものである。他にも、P. Schillebeeckxらのまとめ²⁷⁾が参考になる。レーザー駆動中性子源など短パルス性にすぐれた中性子源があり、そのエネルギースペクトルが連続的である場合、時間分解計測によって中性子エネルギーが特定できるため、元素の非破壊による特定が可能である。この技術はNeutron Resonance Capture Analysis

Fig. 2 Neutron absorption resonances for various nuclear.

(NRCA) や Neutron Resonance Transmission Analysis (NRTA) としてしられる²⁸⁾。パルス幅がピコ秒にできるレーザー駆動中性子源は、時間分解能に優れた飛行時間弁別計測が可能になるため、エネルギー分解能の高い分析が可能となるため、今後の研究展開が期待されている。

Table 1 The comparisons of the thermal neutron detection methods.

Element	³ He		⁶ Li		¹⁰ B	Au, In, Dy
Device	³ He gas	LiF / ZnS (Ag)	Li glass scintillator	Crystals such as Ce:LiCAF	¹⁰ B doped materials	Nuclear activation metals
Sentitivity (for thermal neutron)	~100%	~100%	~100%	~100%	~100%	~100%
Time resolution	~1 μs		about 60 ns (APLF80: 5 ns)	~20 ns	~few 10 ns	Time integrated
Spatial resolution	100 μm : for MWPC or u-PIC	~200 μm: Coupled with CCD	~200 μm (for ⁶ Li scintillator coupled with CCD), ~1 mm (for multi anode PMT)		55 μm (B dope MCP)	~100 μm (for activation foil coupled with Imaging Plate)

Table 2 The comparisons of the epi-thermal neutron detection methods.

Method	Nuclear activation with moderator	Nuclear activation without moderator	Plastic scintillator	Ce:LiCAF
Sensitivity, (for 1 keV neutron)	about 1%. (determined by losses in neutron moderator)	about 1% for 1 mm thick Silber (cross section of material)	about 1% (about 10 counts of neutron-hydrogen recoil)	0.1% for a count
Spatial resolution	Several hundreds of micron by using imaging plate	Several hundreds of micron by using imaging plate	~ 1 mm, (determined by pixel size of scintillator array)	~2 mm (determined by pixel size of scintillator array)
Time resolution	Time integrated (life time of the activation nuclear)	Time integrated (life time of the activation nuclear)	~2 ns (decay time of scintillator)	~20 ns (decay time of scintillator)

4. 高速中性子計測技術

4.1 高速中性子計測用シンチレーター

一般に0.1 MeV以上の中性子を高速中性子と呼ぶ。Fig. 1に示すように、1 MeVを超えるエネルギーの中性子計測には、水素の反跳反応の断面積が比較的高いため、水素含有率の多い有機材料が用いられ、プラスチックや液体性のシンチレーターが一般的に用いられる。1 MeVの中性子に対して、プラスチック内で水素と反跳する確率はおよそ10%/cmであるから、高感度検出のためには5-10 cm程度の厚さが必要とされる。有機シンチレーターはポリビニルトルエンなどのポリマーに“PPO”や“bisMSB”といった有機色素が添加された構造をしており、これら有機色素のシンチレーション発光減衰時定数は一般的に1-2 nsと高速応答である。

一方、発光効率は無機結晶シンチレーター (Ce:LiCAF など) が有機シンチレーターは~1000 フォトン1中性子リコイルあたりの光信号では十分な電気信号をとらえるのは無機シンチレーターにくらべて困難になる。

Fig. 3に典型的な高速中性子計測器の設計例を示す。このようにシンチレーターを光電子増倍管にオプティカルマッチンググリッド等で接着させて計測する場合は1中性子の検出は可能となる。中性子の検出効率を50%程度にするため、シンチレーターの厚さを10 cm程度にする設計がほとんどである。一方で、Fig. 4に示すように、中性子画像計測器の場合はシンチレーターピクセルパネルとイメージンシファイアカメラからなる装置が一般的である。一般的にシンチレーターパネルの光が微弱なため、イメージンシファイアカメラによって光を増倍させCCDで計測する。イメージンシファイアは、光電面によって光電変換された電子をマイクロチャンネルプレート (MCP) によって増倍し、

Fig. 3 Structure of the fast neutron scintillation detector.

Fig. 4 Experimental setup of the fast neutron imaging detector.

それを蛍光体に衝突させ増強された画像をCCDで撮像する。イメージンシファイアの受光面サイズは一般的なもので2 cm程度、特殊なものでも10 cmが最大であり、いずれも非常に高価である。シンチレーターパネルは中性子検出感度を高めるため数センチの厚さが必要になるが、空間分解能は小さい方が望ましい。そのためシンチレーターピクセルは厚さ数センチ、細さは1 mm程度 (製作技術の限界) のものが多数並んだものが利用される。Fig. 5(a)のようにプラスチックシンチレーターファイバを配列したものが市販されているが、製作費用が高価になり大型化は困難であった。Fig. 5(b)は最近開発され液体シンチレーターをアルミハニカムパネルに浸して、ガラスで封じ込めたものである²⁹⁾。プラスチックシンチレーターファイバより細かい分解能と高感度を維持しつつ、圧倒的な低価格を実現し、メートルサイズでも容易に作れるようになった。プラスチックシンチレーターも液体シンチレーターも中性子1 リコイルあたりでシンチレーターの発光量は1000 フォトン程度であるが、シンチレーターファイバ内を伝送する間にロスが発生し、表面までたどり着けるのはおよそ10%程度に

Fig. 5 (a) Plastic scintillator pixel array (Saint Gobain), and (b) Liquid scintillator based pixel panel.

なってしまう。また10 cm以上の画角のシンチレーターアレー面の発光パターンをレンズ等で縮小してイメージインテンシファイアカメラの受光面(2 cm程度)まで伝送するときの光伝送効率 η は、 $F\text{値} = 1$ の非常に光収率の良いレンズを使ったとしても0.01%程度であるので、1中性子検出あたり中性子画像検出装置に到達できるフォトン数は1個以下になってしまう。このため、高速中性子画像計測は一般的に非常に感度が低く、実用的な画像を取得するためには、各ピクセルに数千個中性子が入射するような、すなわち 10^7 n/cm^2 といった非常に高いフラックスの中性子ビームが必要となる。Fig. 6に示すのは、理化学研究所RANSを用いて高速中性子フラックス 10^6 n/cm^2 を発生させ、Fig. 5の液体シンチレーターピクセルパネルの手前に被写体としてコンクリートブロックと水を設置し、1000秒間の画像することで得られた画像である。液体シンチレーターの感度は高速中性子に高く、熱中性子には感度が低い(反応断面積は同程度であるが、1中性子検出に対する発光フォトン数は中性子エネルギーに比例するため、1 MeV中性子と0.025 eV中性子で 4×10^7 の信号強度差)ことから、この画像は主に高速中性子によるものであると推定される。しかしなが

Fig. 6 Fast neutron radiograph image of the water behind the 10-cm thick concrete.

ら、この実験ではガンマ線と中性子は弁別できておらず、ガンマ線と中性子の混合画像である。モンテカルロシミュレーション計算を用いて加速器から発生する中性子とガンマ線を模擬し、この画像に混入したガンマ線の割合を推定した。水・パラフィン・鉛の影の濃さについて、中性子とガンマ線の混合比を50%:50%にした場合に実験データに近い画像が再現できたことから、高速中性子とガンマ線50%:50%程度の混合画像であると推定している。この画像では10 cm厚のコンクリートは透けて見えており、その背面にペットボトルに入った水があることが鮮明にわかる。この実験によって高速中性子によるラジオグラフィがコンクリート壁やコンクリート橋の中に雨水がたまり、崩壊の危険性があるものを非破壊で検査することができることが証明された。

4.2 シンチレーター以外の高速中性子計測法

シンチレーターは感度に優れてはいるが、ガンマ線と中性子の弁別が問題になる場合がある。高速中性子に感度の高い放射材料がいくつかあり、レーザー核融合中性子の計測などで広く用いられている³⁰⁾。計測手法は熱中性子のそれと同様である。飛跡検出器はCR-39と呼ばれるプラスチックが一般的に用いられ、高速中性子が入射すると陽子を反跳する原理を用いている³²⁾。この手法は電子やX線には感度がなく、他のイオン粒子も1枚目に金属フィルタを入れるなどして止めることのできるため、中性子のみを検出したい場合に効力を発揮する。その陽子がCR-39のポリマー鎖を切断する。そのダメージが入ったCR-39を強アルカリ水溶液でエッチングすると、ダメージ穴が数ミクロンまで大きくえぐられた状態になり、顕微鏡を用いれば観察できるようになる。検出効率はCR-39の厚さで決定され、中性子と陽子の衝突断面積はプラスチックシンチレーターのそれとほぼ同じ断面積である。CR-39の厚さは反跳陽子の平均自由行程以下としなければならない。反跳陽子がCR-39内で止まってしまった場合、CR-39の内部にできたダメージはエッチングされないため検出することが不可能であるからである。例えば2 MeVの中性子の反跳で発生する最大エネルギー2 MeVの陽子が貫通できるCR-39の厚さがおよそ100 μm である。1枚のCR-39厚さ0.1 mmの場合0.1%の検出効率しかないので、通常は10枚程度重ねて合計

Fig. 7 CR-39 etch pits of the proton.

で1%の検出効率として使用する。しかしエッチングには化学実験設備と、作業時間がかかる(例えば水酸化カリウム6 mol/L, 70°C, 数時間エッチングでようやくピット解析ができる)ため、中性子線照射実験のその場で解析することは困難な技術である。実質的には $10^4/\text{cm}^2$ 程度の中性子が入射すれば解析できる信号になる。

バブル検出器³²⁾は有機性ゲル材の中に有機材料の液滴が拡散されており、その液滴は常温では過飽和状態になっている。中性子が液滴に衝突すると反跳粒子を生成し、それらのイオンは液滴内でエネルギーを落として、その熱で液滴は気体になり泡となる。バブル検出器もX線や他のイオンに感度を持たず、中性子のみを検出したい場合に有効である。Fig. 8の写真のように目視できるようになるため、その場で中性子を観測できる優れたツールである。中性子が液滴に衝突してから泡ができるまでの時間が1秒程度かかるため、高速時間分解はできない。エネルギー閾値があり、閾値以下のエネルギーでは泡が出来ない構造になっている。検出効率は典型的に $10^4/\text{cm}^2$ で1カウント程度であるため $10^5/\text{cm}^2$ 程度から実用的な計測ができるようになる。泡ができても加圧により泡を潰して再利用できるため、非常に便利な計測ツールである。バブル検出器にはいくつかエネルギー感度が違う種類があり、keV領域から10 MeV領域まで非常に広いエネルギーをカバーすることができる。Fig. 8³³⁾に示すように、BDS-10は10 keV以上で感度があることを示し、BDS-10000は10000 keV以上で感度があることを示す。ガンマ線に対してはほぼ感度がないことを示すため、著者らが行った実験によると、1.17 MeVと1.33 MeVのコバルト60ガンマ線に対して、 $10^{13}/\text{cm}^2$ のガンマ線入射に対してもバブルは1個も検出されなかった。著者らはバブル検出器をシート状にしたものを開発しており、それを用いれば中性子画像計測も可能である。バブル検出器は簡易で、ガンマ線には感度がなく、熱中性子への感度が小さく、リアルタイムに可視化できる。加圧によって泡を潰すと再利用できることから、中性子計測の強力なツールである。最後に高速中性子計測手法の特徴をTable 3に比較する。

Fig. 8 (a) Bubble detector photo and (b) the sensitivity.³³⁾

5. まとめと今後の展望

本稿ではエネルギーに分けて中性子の検出方法、画像計測手法をレビューしてきた。中性子はエネルギー領域や用途に応じて適切な原理手法を用いることが重要である。モデレーターを使って全てを熱中性子に減速してしまつて計測する手法を除いて、一つの手法で熱中性子から高速中性子まですべてを高感度に検出することは困難である。熱中性子領域は比較的薄い素子で中性子の検出

Table 3 The comparisons of the fast neutron detection methods.

Methods	Plastic / Liquid Scintillator	CR-39	Bubble detectors	Nuclear activation
Sensitivity (for 1 MeV neutrons)	~10% detection efficiency. Single-hit detector can measure a neutron, neutron imaging detector require > 100 counts per pixel	0.1 % (for 100 μm thickness CR-39)	0.01% for a bubble detector	About 1% for 1 mm thick nuclear activation material
Spatial resolution	several hundreds of micron (determined by pixel size of scintillator array)	Several hundreds of micron (for 100 μm thickness CR-39)	Few mm (bubble size)	Several hundreds of micron by using imaging plate
Time resolution	~2 ns (decay time of scintillator)	Time integrated (etching time is ~ several hours)	about 10 ms (determined by time for bubble creation)	Time integrated (life time of the activation nuclear)

が可能であり、すでに満足な感度が得られている。市販品も普及しており、応用研究も多い。高速中性子はここで述べた手法が代表的であり、まだまだ感度が足りないのが現状である。中性子の検出効率は中性子-陽子の反応断面積で決まっており、大幅に向上させることは不可能であるため、今後の課題はシンチレーション光をいかに高感度に検出できるか、すなわち光検出デバイスの開発が求められている。現状は高価なイメージインテンシファイアが用いられているが、よりコンパクトで安価なデバイスが開発されることで、高速中性子の応用が広がると期待される。

謝 辞

本研究の一部は、科学技術振興機構研究成果最適展開支援プログラムA-STEP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の支援を受けました。

参考文献

- 1) Y. Ikeda, A. Taketani, M. Takamura, H. Sunaga, M. Kumagai, Y. Oba, Y. Otake, and H. Suzuki: Nucl. Instr. Meth. A. **833** (2016) 61.
- 2) M. Roth, D. Jung, K. Falk, N. Guler, O. Deppert, M. Devlin, A. Favalli, J. Fernandez, D. Gautier, M. Geissel, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **110** (2013) 044802, 24.
- 3) J. Alvarez, J. Fernández-Tobias, K. Mima, S. Nakai, S. Kar, Y. Kato, and J. M. Perlado: Physics Procedia **60** (2014) 29.
- 4) Von der Hardt Heinz Rotger: *Neutron Radiography Handbook: Nuclear Science and Technology* (Springer Science & Business Media, 2012).
- 5) H. Rauch and D. Petrascheck: *Dynamical neutron diffraction and its application* (Topics in Current Physics V. **6** Springer; Berlin, Germany, F. R., 1978).
- 6) K. Kaneko, T. Kamiyama, Y. Kiyonagi, T. Sakuma, and S. Ikeda: Journal of Physics and Chemistry of Solids **60** (1999) 1499.
- 7) H. Hatanaka: Radiology and Nuclear Medicine (Kluwer Academic Publishers; Norwell, MA USA, 1987).
- 8) K. Shibata, O. Iwamoto, T. Nakagawa, N. Iwamoto, A. Ichihara, S. Kunieda, S. Chiba, K. Furutaka, N. Otuka, T. Ohsawa, *et al.*: J. Nucl. Sci. Technol. **48** (2011) 1.
- 9) M. Manolopoulou, M. Fragopoulou, S. Stoulos, E. Vagena, W. Westmeier, and M. Zamani: J. Phys. Conf. Ser. **366** (2012) 012033.
- 10) A. Oed: Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., A **471** (2001) 109.
- 11) S. Uno, T. Uchida, M. Sekimoto, T. Murakami, K. Miyama, M. Shoji, E. Nakano, T. Koike, K. Morita, H. Satoh, *et al.*: Phys. Proc. **26** (2012) 142.
- 11) J. D. Parker, M. Harada, K. Hattori, S. Iwaki, S. Kabuki, Y. Kishimoto, H. Kubo, S. Kurosawa, Y. Matsuoka, K. Miuchi, *et al.*: Nucl. Instr. Meth. A **726** (2013) 155.
- 12) T. Fujiwara: AIST Bulletin Metrology **9** (2018) p. 439.
- 12) M. Köhli, M. Klein, F. Allmendinger, A.-K. Perrevoort, T. Schröder, N. Martin, C. J. Schmidt, and U. Schmidt: J. Phys. Conf. Ser. **746** (2016) 012003.
- 13) A. S. Tremsin, J. V. Vallerger, J. B. McPhate, O. H. W. Siegmund, and R. Raffanti: IEEE Trans. Nucl. Sci. **60** (2013) 578.
- 14) K. Nittoh, C. Konagai, T. Noji, and K. Miyabe: Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A **605** (2009) 107.
- 15) K. Wilhelm, J. Nattress, and I. Jovanovic: Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A **842** (2017) 54.
- 16) T. Yanagida, A. Yoshikawa, Y. Yokota, K. Kamada, Y. Usuki, S. Yamamoto, M. Miyake, M. Baba, K. Kumagai, and K. Sasaki: IEEE Trans. Nucl. Sci. **57** (2010) 1492.
- 17) K. Hirota, T. Shinohara, K. Ikeda, K. Mishima, T. Adachi, T. Morishima, S. Satoh, T. Oku, S. Yamada, H. Sasao, *et al.*: Phys. Chem. Chem. Phys. **7** (2005) 1836.
- 18) A. Gektin, N. Shiran, S. Neicheva, V. Gavriluk, A. Bensalah, T. Fukuda, and K. Shimamura: Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A **486** (2002) 274.
- 19) Y. Kiyonagi, T. Kamiyama, K. Kino, H. Sato, S. Sato, and S. Uno: J. Instrumentation **9** (2014) C07012.
- 20) K. Takahashi, S. Tazaki, K. Neriishi, and M. Etho: Fujifilm Research & Development **43** (1998).
- 21) Y. Arikawa, K. Yamanoi, T. Nakazato, E. S. Estacio, T. Shimizu, N. Sarukura, M. Nakai, T. Norimatsu, H. Azechi, T. Murata, *et al.*: Rev. Sci. Instrum. **80** (2009) 113504.
- 22) C. M. Combes, P. Dorenbos, C. W. E. v. Eijk, K. W. Krmer, and H. U. Gdel: J. Luminescence **82** (1999) 299.
- 23) U. Shirwadkar, J. Glodo, E. V. D. van Loef, R. Hawrami, S. Mukhopadhyay, A. Churilov, W. M. Higgins, and K. S. Shah: Nucl. Instr. and Meth. A **652** (2011) 268.
- 24) J. Glodo, E. V. D. van Loef, R. Hawrami, W. M. Higgins, A. Churilov, U. Shirwadkar, and K. S. Shah: IEEE Trans. Nuc. Sci. **58** (2011) 333.
- 25) Y. K. Haga, K. Neriishi, K. Takahashi, and N. Niimura: Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A **487** (2002) 504.
- 26) Z. B. Alfassi: Activation Analysis, Volumes I and II (CRC Press: Boca Raton, FL., 1990).
- 27) P. Schillebeeckx, B. Becker, H. Harada, and S. Kopecky: JRC Science and Policy Reports (European commission, 2014).
- 28) C. Paradela, J. Heyse, S. Kopecky, P. Schillebeeckx, H. Harada, F. Kitatani, M. Koizumi, and H. Tsuchiya: EPJ Web of Conf. **146** (2017) 09002.
- 29) Y. Arikawa, S. Matsubara, Y. Abe, Y. Kato, H. Kishimoto, A. Yogo, H. Nishimura, M. Nakai, H. Shiraga, S. Fujioka, *et al.*: Proc. SPIE **10328** (2017) 103280T.
- 30) D. L. Bleuel, C. B. Yeamans, L. A. Bernstein, R. M. Bionta, J. A. Caggiano, D. T. Casey, G. W. Cooper, O. B. Drury, J. A. Frenje, and C. A. Hagmann: Rev. Sci. Instrum. **83** (2012) 10D313.
- 31) J. A. Frenje, C. K. Li, F. H. Séguin, D. G. Hicks, S. Kurebayashi, R. D. Petrasso, S. Roberts, V. Yu. Glebov, D. D. Meyerhofer, T. C. Sangster, *et al.*: Rev. Sci. Instrum. **73** (2002) 2597.
- 32) B. J. Lewis, M. B. Smith, H. Ing, H. R. Andrews, R. Machraf, L. Tomi, T. J. Matthews, L. Veloce, V. Shurshakov, I. Tchernykh, *et al.*: Radiation Protection Dosimetry **150** (2011) 1.
- 33) H. Ing, R. A. Noulty, and T. D. McLean: Radiat. Meas. **27** (1997) 1.