

国内外の中性子利用と中性子検出器の現状に関する調査研究

藤原 健*

(平成 28 年 3 月 10 日受理)

A Survey on Neutron Applications and Neutron Detector Development

Takeshi FUJIWARA

Abstract

The use and demands for neutrons are expanding rapidly in many fields such as science, industry, medical application and homeland security. Especially recent development of accelerator driven neutron source opened a new field of time of flight (TOF) neutron measurement. Nowadays, TOF neutron measurement is recognized as one of the important probes for material science. At the same time, neutron detector plays an important role for this new probe. There are three fundamental requirements for neutron detectors in neutron science and industrial applications: 1) high neutron detection efficiency, 2) low intrinsic gamma ray sensitivity of the detector and 3) high spatial and timing resolution. In addition, detectors may need to meet specific requirements of the application area including 1) cost; 2) radiation hardness; 3) long term stability; 4) low or zero maintenance.

In spite of increasing demand for the use of neutron and remarkable progress in neutron source development, serious shortage of ^3He gas (which was the mainly used material for neutron detection) caused a crisis of neutron measurement. Several ^3He alternative detectors are currently available as near-term replacement for ^3He detectors that could potentially meet the above requirements. These include Boron trifluoride (BF_3) filled proportional counters, ^{10}B lined gas counters, ^6Li loaded scintillators, and other newly developed technologies. The capabilities of these alternatives are reviewed with respect to the neutron scatter and neutron imaging experiments. Performance is compared to the ^3He detector with potential capability improvements that each alternative detector could offer.

1. 序論

中性子は陽子と共に原子核を構成している粒子であり、極めて身近に存在しているものである。しかし、中性子は原子核の内部に結合された状態で存在しており、通常は中性子単体で存在することはない。また、中性子を単体で発生させることは困難であり、中性子を何らかの方法で取り出したとしても、中性子は集光することや曲げること、検出することも難しく、これらがX線と

比較して中性子の利用が広く普及していない要因の一部となっている。一方、中性子は波動性と粒子性を併せ持ち、X線とは違った特性を持つ材料研究のプロブとして重要視されている。中性子をビーム化して、サイエンス・産業のために有効に利用するために、中性子を取り出す技術（発生技術）と、中性子を計測・検出する技術、利用する技術が多くの科学者達によって研究が進められてきている。本報告では高まりつつある中性子ビーム利用の需要に伴い、中性子ビーム利用を中心とした中性子源の現状と、中性子検出器について調査を行ったので報告する。

* 分析計測標準研究部門放射線イメージング計測研究グループ

2. 中性子の利用と中性子源

2.1 中性子の利用

中性子の利用方法は大きく2つに分けられる。その第一は核反応を利用し、対象物の性質を変えるというものである。半導体分野における核変換を利用したシリコンへのドーピングや、Radio-Isotope (RI) と呼ばれる放射性同位体の製造、ホウ素捕捉療法と呼ばれる医療応用などがそれにあたる。また、近年では原子炉からの放射性廃棄物処分的大幅な負担軽減を目指し、高レベル放射性廃棄物をいくつかのグループに分離し、長寿命のものを核変換して短寿命化する「分離変換技術」の研究開発が進められており、中性子の有効な利用法として注目されている¹⁾。

第二の中性子の利用方法は「中性子で物質を調べる」というものである。調べる手法の中でもさらに、「元素分析」「ラジオグラフィ（イメージング）」「散乱」という3つに大別することができる。元素分析では中性子と物質の反応によって起こる放射化を利用した放射化分析や、即発ガンマ線分析によって数%～ppbに至るオーダーで物質中の元素濃度を非破壊で測定することが可能になる²⁾。

中性子ラジオグラフィは物質中の元素（核種）の中性子透過率（断面積）の差を利用してその分布を可視化するもので、X線ラジオグラフィと類似したものである。X線と中性子では物質との反応断面積が異なるため、一般的にX線は金属等の重元素、中性子は水素やリチウム等の軽い元素と良く反応する。この違いは用途の違いにも繋がり、相補的に利用することで物質内部の可視化や非破壊検査の範囲を飛躍的に拡大することが可能となる。中性子ラジオグラフィはアルミ部材の腐食検査や、ロケット部品の全数検査、リチウム電池内部のリチウムの可視化、燃料電池の可視化など様々な分野で利用されている³⁾。

中性子散乱・回折は、中性子の散乱・回折パターンを解析することで物質内部の原子の配列を調べる手法である。これにより結晶構造の解析や、金属部材の残留応力の測定や、バルク材料中のナノ析出物の同定が可能となることから、学術のみならず産業用途でも重要視されている利用法である。他にも、磁性の研究に中性子磁気散乱や、物質の表面・界面を観察するために中性子反射率計などが開発され利用されている。また、近年では中性子の回折とイメージングの原理を組み合わせたブラッグエッジイメージングが新しい材料解析手法として期待されている⁴⁾。中性子の波長を結晶の原子核間距離と同程

度とすることで中性子の回折現象が起き、結晶構造解析に用いることができる。中性子はX線と同様に物質中でブラッグの回折条件

$$2 \cdot d \cdot \sin(\theta) = n \cdot \lambda$$

(d : 格子定数, θ : 中性子線入射角, n : 整数, λ : 中性子波長) を満たした場合に回折する。これにより試料を透過した中性子の波長スペクトルには、試料中の結晶構造（格子間隔）との回折現象に起因するブラッグエッジと呼ばれる構造が現れる。この波長スペクトル中のブラッグエッジ解析することで試料中の結晶の組織や配向や歪み、析出物などの情報を得ることが可能になる。ブラッグエッジイメージングでは、中性子の検出に時間分解能を有する2次元検出器を用いることで、試料中の結晶構造の分布が一度に得られる任意の中性子波長においてイメージングできるという利点がある。

2.2 中性子源

中性子の発生方法は主に3つあり、放射性同位体を用いる方法、原子炉を用いる方法、そして加速器を用いる方法に大別される。本稿では中性子ビーム源としての原子炉中性子源と加速器中性子源について述べる。

2.2.1 原子炉中性子源

原子炉は高フラックスの中性子ビームを安定かつ連続的に発生させることができるため、中性子利用のための研究炉が世界中に存在している⁵⁾⁻¹⁰⁾。ここでは中性子散乱やイメージングなど中性子を分析のプロブとして研究が行われている施設を中心に、我が国と世界の代表的な研究炉について表1にまとめた。フランスのグルノーブルにある ILL (Institut Laue-Langevin) は2015年現在、最も強い中性子ビームを発生できる施設であり、中性子科学をリードしている研究機関である。現在稼働中である多くの研究炉の最大熱出力は20 MW以下となっているが、研究炉の高出力化の流れは1970年代頃までに終止符が打たれ、中性子ビームを利用した科学の利用については後述する大強度の中性子ビームを発生可能な加速器中性子源の開発にシフトしつつある。原子炉は安定して大強度の中性子ビームを取り出すことが可能だが、設置及び維持にかかる経費が高いことや、昨今の核セキュリティの厳格化、各国の規制強化などの影響を受けて研究炉の新規建設はもとより、多くの現存する研究炉も休止や廃止に追い込まれているのが現状である。それでも原子炉は医療用放射性核種の製造やシリコンのドーピング等に重要な役割を果たしており、今後も必要とされることに変わりはないだろう。

2.2.2 加速器中性子源

イギリスとスイスは世界に先駆けて中性子ビーム源としての中性子源を研究炉から加速器へと移行しているが、ドイツや米国、日本、中国など世界中で加速器中性子源の研究開発が盛んになっている。加速器中性子源は、原子炉を置き換える大型の加速器中性子源（主に核破砕）と、大学等に設置されている小型中性子源に大別される。本稿では両者の中でも主にパルス中性子源について述べる。

原子炉から発生する中性子は核分裂によって発生するため、連続的に絶え間なく流れてくる中性子になっているのに対し、通常、加速器から発生する中性子は、パルス状の陽子や電子ビームを標的に照射した際に起こる光核反応や核破砕反応によって発生する。発生する中性子はパルス状になることからパルス中性子ビームと呼ばれる。序論で述べたように中性子は波動性と粒子性を併せ持つことから、粒子としての運動エネルギーと波としての波長を定義することができる。中性子はそのエネルギー帯により、高速中性子 ($0.5 < E < 20$ MeV)、熱中性子 ($0.001 < E < 0.01$ eV)、冷中性子 ($E < 0.025$ eV) に大別される。中性子を材料分析のプロブとして使用するためには、使用している中性子のエネルギー（波長）を

把握した上で測定する必要がある。一般的に、分析などで用いられる熱中性子や冷中性子の運動エネルギーは、X線などの分析で利用される電離放射線のエネルギーと比較して極めて低い。そのため中性子検出器内に付与される、中性子の運動エネルギーを直接計測することは現実的に不可能である。そこで、中性子のエネルギー（波長）を把握するために、パルス中性子源と飛行時間法 (TOF: Time of flight) を組み合わせた測定が用いられる。中性子の発生がパルス状になることで、中性子の発生時間を決めることができ、発生点から検出器までの到達時間を計測することで、中性子のエネルギー（波長）を計測することが可能になる。また、原子炉のような連続中性子源でも十分な中性子フラックスがあればチョッパーと呼ばれる装置を用いてパルス化することで中性子のエネルギー分解測定が可能になる。

2.2.2.1 核破砕中性子源

核破砕中性子源は、加速器からの陽子等の高エネルギー粒子を原子核に衝突させて、大量の中性子を発生させる核破砕反応に基づく中性子源である。高エネルギー粒子が、主に重金属の原子核に衝突して、原子核から複数個の陽子や中性子、または複合粒子を生成する。入射粒子は GeV 程度のエネルギーまで加速され、このよう

表 1 世界の中性子分析用の研究用原子炉⁵⁾⁻¹⁰⁾

ステータス(2015年)	施設名称	設置機関	設置年	国	中性子強度 (中性子/秒/cm ²)	出力
稼働中	HFR	ILL	1967	フランス	1.5×10^{15}	60 MW
休止中	JRR3	JAEA	1962	日本	3×10^{14}	20 MW
廃止	JRR4	JAEA	1965	日本	7×10^{13}	3.5 MW
休止中	KUR	KURRI	1964	日本	3×10^{13}	5 MW
稼働中	HANARO	KAERI	1996	韓国	2×10^{14}	30 MW
稼働中	BR2	BNRC	1962	ベルギー	10×10^{15}	100 MW
廃止	NRU	AECL	1947	カナダ	3×10^{14}	120 MW
廃止予定(2019)	BER-II	HZB	1972	ドイツ	2×10^{14}	10 MW
稼働中	ORPHEE	CEA	1971	フランス	3×10^{14}	14 MW
稼働中	FRM-II	TUM	2004	ドイツ	8×10^{14}	20 MW
廃止	BRR	KFKI	1959	ハンガリー	2×10^{14}	10 MW
稼働中	NBSR	NIST	1967	米国	3×10^{14}	20 MW
稼働中	HFIR	ORNL	1965	米国	1.5×10^{15}	85 MW
稼働中	ACRR	SNL	1979	米国	4×10^{13}	2 MW
稼働中	OPAL	ANSTO	2006	オーストラリア	3×10^{14}	20 MW
稼働中	HFR	IE-JRC	1962	オランダ	3×10^{14}	45 MW
廃止	DIDO	AERE	1956	イギリス	2×10^{14}	25 MW
稼働中	CARR	CIAE	2010	中国	8×10^{14}	60 MW

な粒子をターゲットに入射させると、核との相互作用を起こして、核子や複合粒子のほかに中間子が作られ、これらが厚いターゲット中で連鎖的に起こる反応を引き起こす。原子核は入射粒子のエネルギーを受けて全体として励起された状態になる。核破砕中性子源は、重い核の中での入射粒子によって誘起される熱励起と数 MeV のエネルギーを持つ中性子の蒸発による核の崩壊を利用する。最初の励起過程で放出される数 100 MeV のエネルギーの高い粒子は厚いターゲット中の別の核において二次反応を引き起こし、次々に中性子を放出するため、高輝度の中性子ビームが得られる。代表的な核破砕中性子源を表 2 にまとめた。我が国では 2008 年より J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) が運用を開始しており、2015 年には 500 kW の出力を達成しており、世界でも最高クラスの大強度パルス中性子源である(将来的に 1 MW まで増強予定)。

2. 2. 2. 2 小型中性子源

核破砕中性子源は、中性子の発生に GeV 程度まで粒

子を加速する必要があるため線形加速器の他、シンクロトロン等の大型加速器を必要とする。一方、X 線の世界では SPring-8 のような大型施設の他、ラボ X 線回折装置など小型の X 線分析装置が普及している。中性子でも J-PARC のような大型施設だけでなく、使い勝手のよい小型中性子源が望まれるようになり、Indiana 大学の LENS や、北海道大学の HUNS (Hokkaido University Neutron Source)、理化学研究所の RANS (RIKEN Accelerator Neutron Source) など、TOF 測定のできるラボ中性子源が近年脚光を浴びている。これまで小型中性子源は学術利用が主であったが、近年、産業界も中性子を新しいプローブとして期待しており、次世代の分析装置として小型中性子源の導入が検討されている。小型中性子源は、Be や Li をターゲットとする陽子加速器型と、重金属をターゲットとした電子加速器型が存在するが、どちらも一長一短があり、優劣をつけるのは现阶段では難しい。表 3、4 に国内外の代表的な小型中性子源についてまとめた。この他にも Be をターゲットとした

表 2 核破砕中性子源¹¹⁾

ステータス (2015年)	施設名称	設置機関	国	加速 粒子	ターゲット	加速器	Energy	繰り返し	中性子強 度(中性子/ 秒)	出力
稼働中	J-PARC	KEK/JAEA	日本	陽子	Hg	400 MeVライナック +シンクロトロン	3 GeV	25 Hz	10 ¹⁵	1 MW
運転終了	KENS	KEK	日本	陽子	W + Ta cladding	40 MeVライナック + シンクロトロン	500 MeV	20 Hz	10 ¹²	3 kW
稼働中	SNS	ORNL	米国	陽子	Hg	1 GeVライナック +蓄積リング	1 GeV	60 Hz	10 ¹⁵	1.4 MW
稼働中	ISIS	RAL	英国	陽子	U, Ta, W + Ta cladding	70 MeV Linac +シンクロトロン	800 MeV	50 Hz(TS-1) 10 Hz(TS-2)		160 kW(TS-1) 32 kW(TS-2)
運転終了	IPNS	Argonne	米国	陽子	Enriched U	50 MeV Linac + シンクロトロン	500 MeV	30 Hz	-	7.5 kW
稼働中	Lujan Center	Los Alamos	米国	陽子	W	800 MeVライナック + 蓄積リング	800 MeV	120 Hz	-	80 kW
運転終了	MLNSCE	Los Alamos	米国	陽子	W	800 MeVライナック +蓄積リング	800 MeV	20 Hz	-	56 kW
建設中	CSNS	China	中国	陽子	W	ライナック +シンクロトロン	1.6 GeV	25 Hz	-	100 kW
稼働中	SINQ	PSI	ス イ ス	陽子	zircaloy	サイクロトロン +サイクロトロン	590 MeV	連続	-	885 kW
計画中	ESS	ESS	ス ウ エ ー デン	陽子	W	2 GeVライナック + 蓄積リング	2 GeV	14 Hz (2.86 ms)	10 ¹⁶	5 MW

電子加速器や、レーザー加速中性子源などの研究開発も行われており、小型中性子源開発は世界中で盛んになっている。

3. 中性子の検出

3.1 中性子検出方法

中性子は放射線の一つであるが、 α 線や β 線、 γ 線などとは違い、中性子そのものは電荷を持たない。そのため中性子を検出するには、核反応により荷電粒子を発生して、その荷電粒子と検出器の反応を間接的に計測することが必要となる。そこで中性子を荷電粒子に変換するための核反応が起こるコンバータが必要になるが、コンバータに使用できる核種は表5に示すように数種類しか存在しない。ここで重要な指標になるのが中性子と原子核との核反応の発生のしやすさを示す barn という単位である。barn は、原子核物理学における核反応の反応断面積の単位であり、 $1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ m}^2$ で定義される。この数値が大きいほど中性子検出器に用いる際に中性子検出効率が高くなる。

また、中性子検出器に要求される共通の課題として、ガンマ線に対する感度をいかに低減するかということが挙げられる。中性子がある場には必ずガンマ線が存在す

るため、中性子検出器にバックグラウンドとしてガンマ線が入射してくる。このガンマ線は中性子減速材や遮蔽材など、中性子ビームラインを構成するほぼ全ての物質から“即発ガンマ線”と呼ばれるガンマ線が発生する事に起因しており、ガンマ線そのものを中性子の場から無くすることは不可能である。したがって、検出器側でガンマ線バックグラウンドの影響を可能な限り除去、または低減する必要があり、ガンマ線と中性子の弁別能は中性子検出器の性能の重要な指標の一つである。検出器に要求される中性子・ガンマ線弁別能はアプリケーションや測定環境によって異なるが、中性子散乱実験ではガンマ線感度を 10^{-7} 以下にすることが求められる。注意しなくてはならないのが、多くの報告で検出器のガンマ線感度の評価を⁶⁰Co 線源 (E=1.17 MeV, 1.33 MeV) を用いて行っているが、実際に中性子の測定を行う中性子ビームラインでは、ポリエチレンや水などの減速材に含まれる水素と中性子が反応してより高エネルギーのガンマ線 (E=2.2 MeV) が支配的であり、ガンマ線のエネルギーによって検出器の応答は大きく変わるため⁶⁰Co のみでの評価では不十分といえる。言い換えると、実用に供する中性子検出器のガンマ線感度評価手法が確立しておらず、一刻も早いガンマ線感度評価手法の確立が望まれる。

表3 小型加速器パルス中性子源 (国内施設)¹²⁾⁻¹⁴⁾

Status	装置名	設置機関	加速粒子	ターゲット	加速エネルギー	n/s	出力
稼働中	HUNS	北大	電子	W + Pb	35 MeV	10^{12}	1 kW
稼働中	KURRI-LINAC	京大	電子	Ta	35 MeV	10^{13}	10 kW
稼働中	RANS	理研	陽子	Be	7 MeV	10^{12}	0.7 kW
稼働中	KUANS	京大	陽子	Be	3.5 MeV	10^{11}	0.35 kW
建設中	NUANS	名大	陽子	Li	2.8 MeV	-	40 kW

表4 小型加速器パルス中性子源 (国外施設)¹⁵⁾

Status	装置名	設置機関	国	加速粒子	ターゲット	加速エネルギー	n/s	出力
稼働中	LENS	Indiana大	米国	陽子	Be	13 MeV	10^{14}	30 kW
稼働中	CPHS	精華大	中国	陽子	Be	3 MeV	10^{13}	16 kW
稼働中	PKUNIFTY	北京大	中国	重陽子	Be	2 MeV	10^{12}	1 kW
稼働中	n-TOF	CERN	スイス	陽子	Pb	20 GeV	10^7	1.25 kW
稼働中	GELINA	IRMM	ベルギー	電子	U	150 MeV	10^{13}	7.5 kW
稼働中	ORELA	ORNL	米国	電子	Ta	180 MeV	10^{14}	60 kW
稼働中	Gaertner-Linac	RPI	米国	電子	Ta	60 MeV	10^{13}	20 kW
計画中	IREN	JINR	ロシア	電子	W/Pu	200 MeV	10^{12}	10 kW
稼働中	PNF	KAERI	韓国	電子	Ta	100 MeV	10^{12}	1 kW

その他、有感面積、中性子検出効率、空間分解能、時間分解能、高計数率特性など中性子検出器に要求される仕様についても用途によって異なるため、用途に合わせた最適な中性子コンバータを選択し中性子検出器を設計する必要がある。

3.2 ³He を用いた検出器

³He を用いた検出器はガンマ線弁別能に優れた検出器として最も普及している検出器といえる。特に高圧ガスを封入した比例計数管は中性子の検出効率が高く、ガンマ線感度も低いため、小角散乱装置や中性子回折実験装置用の検出器として現在も J-PARC 等の最新施設で広く使われている。³He 比例計数管を用いたパルス波高分布の例を図1に示す。³He 比例計数管のデメリットは、検出時のガス増幅中に生成されたイオンがカソードに回収されるまでは不感時間となるため、中性子の計数が 10 kcps を超えると数え落としが出てきてしまい、高計数の測定には向かないことである。J-PARC 等の大強度パルス中性子源における多くの測定では計数率で限界がきており、より高計数の測定に適した検出器が必要とされている。また、昨今の³He の枯渇により、検出器のボリュームを小さくし、必要なガスの量を少なくして、代わりに検出器の空間分解能を向上させるアプローチが近年の研究開発のメインストリームとなっている。ガスチャンバー内に電荷の位置を検出するための電極を多数配置し、中性子の位置を1次元、あるいは2次元で検出

することが可能になる。しかし、³He を用いたガスカウンタの場合は中性子と³He の核反応により生成する2つの荷電粒子（陽子：Proton、およびトリトン：³H）に分配されるエネルギーがそれぞれ、573 keV、191 keV と大きく異なることと、このうち Proton の飛程が長く、ブラッグピークにより飛程の終端で大きくエネルギーを落とすため、検出器内の電荷の中心と、実際に中性子が入射して反応が起きた位置との相違が生じる（図2）。これにより空間分解能が劣化してしまうことが問題となる。そこで荷電粒子の飛程を短くするために³He に加え、ストップングガスと呼ばれる低原子番号からなる重いガ

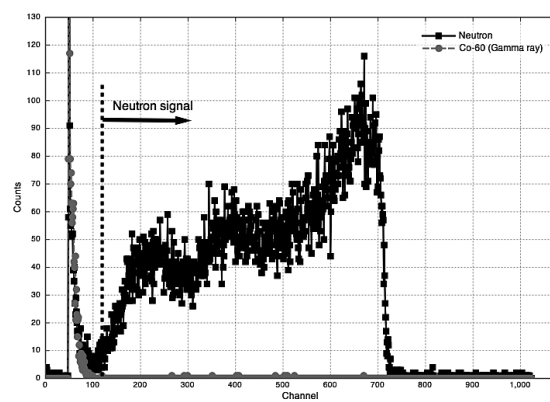


図1 ³He 比例計数管で測定した中性子エネルギースペクトル。波高値でガンマ線と中性子を明瞭に弁別が可能。

表5 中性子検出に使用できる元素とその特徴

核種	核反応	熱中性子断面積	備考
³ He	$n + {}^3\text{He} \rightarrow {}^3\text{H} + {}^1\text{p} + 0.764 \text{ MeV}$	5330 barns	気体、希少 天然には存在しない
⁶ Li	$n + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{H} + 4.78 \text{ MeV}$	940 barns	シンチレータ、半導体検出器、MCP等 天然存在比：7.5%
¹⁰ B	$n + {}^{10}\text{B} \rightarrow {}^7\text{Li} + {}^4\text{He} + 2.310 \text{ MeV} + 0.48 \text{ MeV } \gamma (94 \%)$ $n + {}^{10}\text{B} \rightarrow {}^7\text{Li} + {}^4\text{He} + 2.792 \text{ MeV} (6 \%)$	3840 barns	BF ₃ ガス、ボロン膜、シンチレータ、半導体 天然存在比：19.9%
¹⁵⁷ Gd	$n + {}^{157}\text{Gd} \rightarrow {}^{158}\text{Gd} + \gamma\text{線} + \text{内部転換電子}$	255,000 barns	同位体の分離精製が困難、高価
¹⁴ N	$n + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^1\text{p} + {}^{14}\text{C} + 0.627 \text{ MeV}$	1.8 barns	断面積が小さい

ス分子 (CF₄, C₄H₁₀ など) を数気圧添加する。空間分解能を 1 mm 以下にするためには CF₄ などのストップングガスを 5 bar 程度必要とするが、ガス圧を上げると、耐圧の高い大型のガスチェンバーが必要になり、チェンバーの入射窓が厚くなることに伴い、入射窓内での中性子散乱が問題となる場合もある。他にも、検出器のオペレーションにより高い印加電圧が必要になり、後述するマイクロパターンガス検出器では安定的に動作させるのが難しくなるといった問題が発生する。

MWPC (Multi Wire Proportional Counter) はガス増幅用の芯線を多数張った比例計数管をベースとした検出器で、中性子回折実験などで実際に使用されている。Brookhaven National Laboratory (BNL) では MWPC 型の³He 検出器が開発されており、空間分解能は 0.4 mm を達成している。MWPC は多数の芯線を均質なテンションで張る必要があり、一様性に課題があったが BNL では弦楽器の調律の手法を取り入れこの課題を解決した。BNL では一様性を向上させた上で、各芯線からの信号を重心演算することで、高空間分解能を実現している¹⁶⁾。BNL で開発された MWPC は NIST の小角散乱装置等に採用されている。しかし、MWPC は GEM (Gas Electron Multiplier) や MSGC (Micro Strip Gas Counter) と比較して、アノード・カソードの間隔が広い計測が必要な中性子反射率計等には使用できない。

また、BNL では計測用の集積回路 (ASIC) を金属容器 (チェンバー) 内に内蔵した重心演算型の位置敏感型電離箱も開発されている。こちらはエネルギー分解能が高く、空間分解能も 1 mm 以下を達成している¹⁷⁾。しかし、ASIC を載せた基板からのアウトガスが発生するため³He ガスを浄化する装置が別途必要になる他、基板を接地させる必要があるため、ガスチェンバー全体が負の高電圧が印加されており、実用には課題が残る。

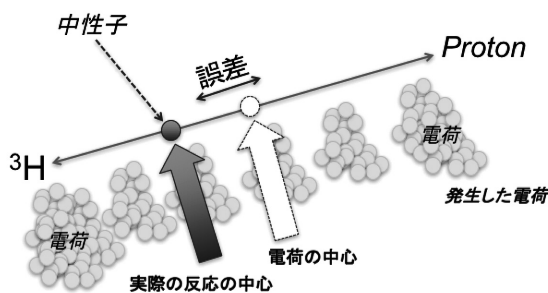


図 2 ³He の検出器における二次粒子 (陽子, トリトン) の飛程が長い為、検出位置の相違が起こる。

ILL では MSGC (Micro Strip Gas Counter) と呼ばれるマイクロパターンガス検出器が実用化されている。MSGC は Oed によって発明され、高計数、高分解能、高ゲインが実現可能である¹⁸⁾。MSGC はガラス上に、微細加工技術により微細電極のパターニングを施し、一つ一つのストリップ状の電極が比例計数管として動作する。10~20 μm の電極が³~1 mm 間隔で配置されており、イオンの回収が比例計数管や MWPC に比べ速いため 100 kHz 以上の高速動作が可能である。当初は絶縁体であるガラスへのチャージアップが問題となっていたが、ILL では Schott 社の S8900 と呼ばれる導電性ガラスを基板とすることでその問題を克服した¹⁹⁾。MSGC はすべて無機物質で構成されているためアウトガスの問題もなく、高価な³He を使用する場合でもガスの入れ替えが不要という優れた特性を持っている。また、高圧ガスでも動作可能であるという点でも他のマイクロパターンガス検出器と比較して優れている。しかし、ストリーマー放電等の予期せぬ放電による電極の損傷が報告されている他、検出器自体のキャパシタンスが大きいため、電磁ノイズの影響を受けやすいなど、機器の扱いに専門的知識と経験が必要とされることから、広く普及するには至っていない。

京大で開発された μ-PIC は MSGC の欠点を克服した新しいタイプのマイクロパターンガス検出器で、³He と中性子の反応によって生じる荷電粒子の飛跡を計測する (トラッキング) ことで高空間分解能を実現した検出器である^{20), 21)}。μ-PIC は構造上、高いガス圧での安定動作が難しい検出器であるが、³He と組み合わせるストップングガスのガス圧は ~3 bar と通常のストップングガスのガス圧よりも低めにし、代わりに α 線とトリトンの飛跡をトラッキングすることで分解能の劣化を克服している。アナログ-デジタル変換の信号処理は Time over Threshold 方式を用いていて、信号処理に必要な配線・回路を大幅に減らしていることも特徴として挙げられる。しかし、μ-PIC はプリント基板技術をベースに作られているため、基板に有機物質を含んでおり、アウトガスによるチェンバー内のガスが経年劣化するため、一定期間でガスの入れ替えが必要になる。

本稿で紹介したいずれの検出器も解決が望まれる課題は残されているが、前述の通り、³He の枯渇から開発が自由に行えないこと、また量産が望めないことから、2000 年代からは世界的に開発のリソースが³He を使用しない検出器に重点的に割かれるようになってきている。

3.2 ^{10}B を用いた検出器

ホウ素は ^3He と比較して入手性も高く、 ^3He 代替のコンバータとして最も注目されている材料の一つである。 ^{10}B はホウ素の同位体だが、天然中に約20%存在し、安定元素である上、比較的同位体濃縮も容易である。中性子のコンバータに ^{10}B を用いた検出器は主に以下の4つに分類される。(1) BF_3 ガスを用いたガス検出器、(2) ^{10}B 濃縮ボロン膜ガス検出器、(3) Bシンチレータ、(4) Bドープ半導体検出器

3.3.1 BF_3 比例計数管

比例計数管に BF_3 ガスを封入したものは、 ^3He 検出器に代わられる以前は中性子散乱実験に主として用いられていた。 BF_3 検出器は核反応の際に放出されるエネルギーであるQ値も高く、ガンマ線感度が低いことが特徴で、図3に示すように明瞭な中性子ピークが得られる。しかし、検出効率は ^3He 検出器の約1/5しかなく、非常に限られた装置(冷中性子に特化)には使用できる可能性がある。(例：検出効率75%，中性子波長10 Å，検出器直径1インチ，充填ガス圧1~2 atm，充填ガス種 $^{10}\text{BF}_3$)。 BF_3 ガスは電荷を吸着する特徴があるため、ガス圧を上げると核反応によって生成された電荷が信号となる前に比例計数管内で消えてしまう。従って、 ^3He のようにガス圧を上げることができず、結果的に検出効率が低下してしまう。また、 BF_3 は強い毒性を持つガスであることもラボレベルでの開発の妨げとなっており、なかなか開発が進まない要因の一つである。その他にも、ガス中のフッ化物により基板等を劣化させるためマイクロパターンガス検出器と組み合わせることも難しく、散乱実験用の検出器としてファーストチョイスとはならないだろう。2015年現在、 BF_3 ガス検出器を販売しているのは2社のみであり、今後改善を目指して開発

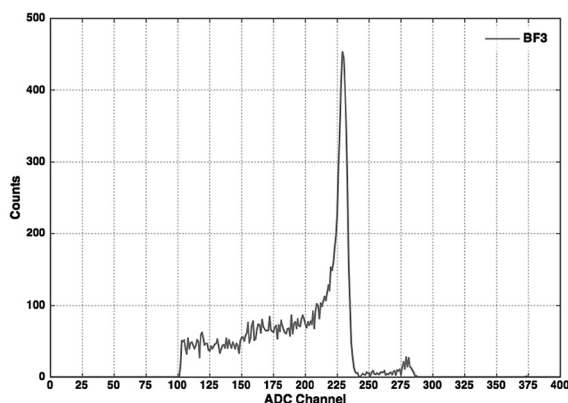


図3 BF_3 比例計数管で測定した中性子エネルギースペクトル (AmBe 線源)。明瞭な中性子のピークが得られる。

が行われており、低検出効率、ガスの毒性、長期安定性の解決が望まれる。

3.3.2 固体 ^{10}B コンバータ

ホウ素を用いた中性子検出器として、濃縮した固体の ^{10}B をコンバータとする手法が近年注目されている。固体の ^{10}B は毒性もなく、扱いも容易である上、他のコンバータと比較して価格も安い。例えば、 ^{10}B を計数管の内壁に塗った比例計数管が開発されているが、中性子散乱に使用するには検出効率が低い(熱中性子で~5%)。 ^{10}B は中性子との相互作用により、 α 粒子とLi粒子を荷電粒子として放出するが、これら二次粒子の飛程は固体ホウ素中では2 μm しかなく、 ^{10}B コンバータの厚みにより、コンバータ内で二次粒子の自己吸収が起きる。そのためコンバータとして使用できる ^{10}B の厚みは~2 μm までであり、それ以上厚くしても検出効率の向上は見込めない。米国ではホームランドセキュリティ用途として、検出効率を向上させるためにストロー型検出器(多重にして高効率化)等が開発中である^{22), 23)}。

一方、ILLとESS (European Spallation Source) を中心としたヨーロッパの研究グループでは、 ^{10}B と炭素の化合物である B_4C をコンバータとした大型の検出器の開発を進めている²⁴⁾。 B_4C は単体の ^{10}B よりも化学的な安定性に優れており、ヨーロッパの研究グループではRFスパッタ装置を用いて、アルミ板上に B_4C コンバータを高速でスパッタする技術を確立している。 B_4C の層をアルミ板の両面に形成し、そのコンバータを積層することで検出効率を向上させている。15層、 B_4C 両面のコンバータを用いて、図4のようにセル上に配置する。各セル内には比例計数管の芯線が通っており、多芯で構成さ

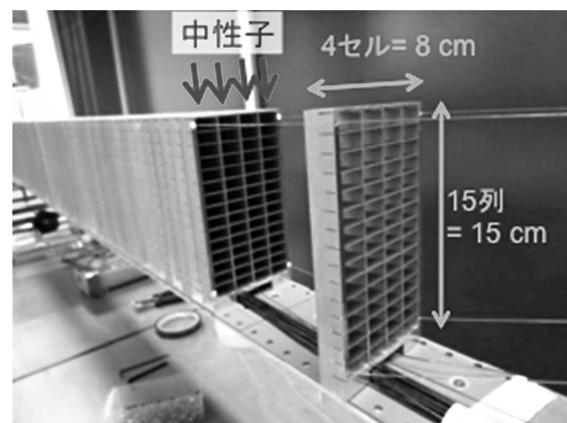


図4 ILL/ESSからヨーロッパの研究グループが開発した B_4C コンバータ型の比例計数管。セル状に配置したものを積層化することで検出効率を向上させている。

れた大型の比例計数管として、ESS で建設予定の大型中性子散乱実験装置にインストールされる予定である。中性子の検出効率は、熱中性子領域で 50 % を達成しており、大型散乱実験用途ではこの検出器がファーストチョイスとなるであろう。

また、小型の検出器としてはハイデルベルグ大学や KEK などが開発中の GEM 検出器がある^{25), 27)}。こちらは GEM と呼ばれる多孔が形成されたマイクロパターンガス検出器の両面に¹⁰B を蒸着し、多層化することで中性子を検出する。2 次元で高計数率が得られることが特徴であるが、システムが複雑になること、大面積化、検出効率向上、コスト低減が課題である。

検出効率向上とシステムを簡便化するアプローチとして、単体の¹⁰B コンバータに 200 微細構造を持たせたマイクロストラクチャ¹⁰B コンバータも提案されている²⁷⁾。

他に固体ボロンの検出効率を向上させるアプローチとして、米国の BNNT 社が開発した窒化ホウ素をナノチューブ化し、綿状に加工したコンバータが開発されている²⁸⁾。このコンバータはわずかだが光を通すため、ガスチャンバー内に、窒化ホウ素コンバータと一緒にシンチレーションガスを封入することで、中性子との反応によって生じるシンチレーション光を光センサで検出することで中性子の検出が可能になる。コンバータが綿状になっているため核反応によって生じる二次粒子の自己吸収が少なく、原理的に高い中性子検出効率が得られるものと期待される。こちらはまだプロトタイプができたばかりで今後の定量的な評価が待たれる。

3.4 ⁶Li を用いた検出器

リチウムの同位体である⁶Li も比較的入手性が高く、中性子との反応による Q 値も高いため、中性子のコンバータに適した元素の一つである。特に Li を用いたシンチレータは様々なものが開発されており、計数率特性

や検出効率などは³He 検出器を凌駕する性能を有しており、中性子回折装置やブラッグエッジイメージングなどの測定で実用化されている。また、シンチレータ本体の開発に加え、シンチレーション光を読み出す光電子増倍管などの光センサや、光ファイバーなどの技術開発も重要な要素となる。

3.4.1 Li シンチレーション検出器

⁶Li を中性子のコンバータとした中性子検出器としては原料に Li を用いた中性子シンチレータが広く普及している。表 6 に代表的な中性子検出用のシンチレータとその特性を示す²⁹⁾⁻³¹⁾。シンチレータに求められる性能は多岐にわたるが、総じてシンチレータに言える事はガスカウンタと比較して密度が高いためガンマ線の影響を受けやすい。ガンマ線の影響の受けやすさを評価する指標の一つとして、 α/β 比という値がある。 α/β 比とは、シンチレータの α 線励起 (⁶Li と中性子との核反応によって生じる α 線) による単位エネルギーあたりの発光量を、 γ 線励起による単位エネルギーあたりの発光量で割ることで算出できる。 α/β 比が高いほど、中性子による発光量がガンマ線による発光量が大きくなるため、発光量の差によってガンマ線と中性子のイベントを弁別することが容易となる。具体的には発光量に閾値を設定することにより、発光量の低い光検出信号（主として γ 線励起によるもの）を除去することができ、ガンマ線の影響を少なくすることができる。他にもガンマ線の影響を低減する手法として、波形弁別法がある。こちらは古くから液体シンチレータになどで用いられてきた手法で、中性子イベントによるパルスと、ガンマ線イベントによるパルスの波形の違いによって弁別するものである。この手法は Ce:LiCAF (LiCaAlF₆(Ce)) や CLYC (Cs₂LiYCl₆(Ce)) といった無機シンチレータにも適用可能であることが報告されている³²⁾。しかし、波形弁別には高性能なデータ取得システムが必要となるため、多チャンネル化は難し

表 6 代表的な中性子検出用のシンチレータとその特性

シンチレータ	発光量 (photons/neutron)	密度 (g/cm ³)	Li含有量 (atoms/cm ³)	発光波長 (nm)	発光減衰時 間 (ns)	α / β 比	透明性	潮解 性	波形弁 別
Li glass	6,000	2.5	~1.6x10 ²²	395	75	0.23	Yes	No	-
LiI	49,500	4.06	1.8x10 ²²	470	1,400	0.9	Yes	Yes	-
LiF/ZnS	~160,000	2.6/4.0	~2.0x10 ²²	450	2,000	-	Opaque	No	-
LiCaAlF ₆ (Ce)	5,000	2.99	9.6x10 ²¹	285	40	0.4	Yes	No	可
LiCaAlF ₆ (Eu)	40,000	2.99	9.6x10 ²¹	375	1,600	0.2	Yes	No	不可
Cs ₂ LiYCl ₆ (Ce)	64,000	3.31	3.5x10 ²¹	370	1/50/1,000	0.67	Yes	Yes	可

いとされてきた。今後、ASIC 技術の発展とともにこの課題が解決されることに期待したい。

また、シンチレーション検出器を検討する上で光電子増倍管などの光検出器の発展にも注視する必要がある。光電子増倍管は従来の位置分解能を持たないカウンティングタイプのものから、抵抗分割型やマルチアノード型などの位置分解能を持つもの、マイクロ PMT と呼ばれる MEMS 技術を用いた小型のものが登場している。一方、APD (Avalanche Photo Diode) や SiPM (Silicon Photo Multiplier) など半導体技術で作られた光検出器の発展も目覚ましい。これらの半導体ベースの光検出器は集積度と価格、スケーラビリティの点で優れており、医療分野のガンマ線検出や X 線検出等では広く普及しており優れた成果が上げられている。これらを中性子検出器への応用も検討されているが、半導体ベースの光検出器は放射線耐性 (特に高速中性子) に難があることと、素子自体にガンマ線感度があるため中性子への応用は一部の用途に限られている。

3. 4. 1. 1 LiF/ZnS 検出器

実用化されているシンチレーション型の検出器の代表的なものとして、LiF/ZnS シンチレータ検出器が挙げられる。LiF/ZnS シンチレータは大面積化が比較的容易である上、中性子イベントによる発光量が多いため抵抗分割型の光電子増倍管と組み合わせた位置敏感型検出器として実用化されている他、光ファイバーを用いた間接読み出しが可能になる。前者は中性子イメージングの他、中性子反射率計にも採用されており、後者は ISIS、J-PARC、SNS のような大強度パルス中性子源の中性子回折装置などで優れた成果を上げている。近年、J-PARC では新に B₂O₃/ZnS シンチレータの開発で中性子検出効率をより高めることにも成功しており、今後より高性能シンチレータの開発が期待される³³⁾。特に ZnS の欠点である、発光減衰時間が長い点は最も改善が望まれる。

3. 4. 1. 2 Li-glass

Li-glass はサンゴバン社製のものが流通しているが、明瞭な中性子のピークが得られ、かつ中性子検出効率が高く、光減衰時間が 75 ns と高速であるため、高い時間分解能と高計数測定が必要なブラッグエッジイメージングや、核データ測定等で使用されている³⁴⁾。しかし、 α/β 比が低いことが弱点である。一つ中性子で得られる発光量が 6000 光子であることにに対し、1 MeV のガンマ線で 4000 光子発生してしまうため、ガンマ線の影響を完全に取り除くのは難しい。従って、ある程度中性子の検出効率を犠牲にし、信号のしきい値を高めにとる

(中性子由来の信号を一部切り捨てる) ことで対応したり、核データ測定では、ガンマ線による応答を統計的に補正するといった手法がとられている。Li-glass の代替候補として、トクヤマ社から製品化されている Ce:LiCAF が挙げられる。Ce:LiCAF は発光量こそ少ないが、 α/β 比も 0.4 と高く、また減衰時間も 40 ns と短い。ため、ガンマ線感度の低い高速シンチレータであり、核データ測定などに適していると考えられる³⁵⁾。

3. 4. 1. 3 TRUST LiCAF シンチレータ

無機結晶のシンチレータは中性子波高ピークが得られるが、大面積化に難があった。この欠点を克服する次世代型中性子シンチレータとして、近年名古屋大学を中心とした研究グループで TRUST LiCAF シンチレータが開発された³⁶⁾。TRUST LiCAF は無機結晶 (Eu:LiCAF) を粉碎し、透明樹脂中に分散した材料を用いたガンマ線分別能を持つ中性子用シンチレータである。ガンマ線によってシンチレータ内で発生する電子線に比べ、中性子によって発生する α 線の飛程が短いことを利用して、無機結晶の粒径を 100 μm 程度に微細化することで、ガンマ線が結晶内で落とすエネルギーを物理的に小さくした。これにより優れたガンマ線弁別能を有しつつ、微細結晶を樹脂で固めることで、大面積化も容易となる。放射線耐性や樹脂中に含まれる水素による中性子の吸収など、実用化にはさらなる検証が必要だが形状の自由度も高いため、ガスカウンタに替わる中性子検出器のブレイクスルーとなる可能性がある。

4. まとめ

中性子は材料分析のプロープとして学術利用のみならず産業利用の需要が高まっている。また、原子炉に代わり、世界中で、SNS (米国)、ISIS (英国) など大強度パルス中性子源の建設されており、我が国でも世界最高クラスの大強度核破砕中性子源である J-PARC が 2008 年に運転を開始した。これに伴い、大強度パルス中性子源で行われる中性子散乱実験では、従来中性子源は不可能であったナノスケール構造の動的な解析が実現するものと期待されており、構造工学の他、構造生物学や物性物理学の分野で様々な発展が期待されている。そのために、従来の検出器を超えた高速、高位置分解能、高計数率、高時間分解能で長時間安定動作、大面積測定が可能な検出器の開発が強く望まれている。

一方で、小型の電子加速器や陽子加速器を用いた小型中性子源の開発も盛んになってきており、小型中性子源の性能を補完する意味でも高性能な中性子検出器の開発

が必要である。本調査研究を通じて、一口に中性子検出器といっても小角散乱、中性子回折、ブラッグエッジイメージング、反射率計など測定手法は多岐にわたり、検出器に要求される性能もそれぞれ異なるため、用途に合わせた最適な中性子検出器を開発する必要があることを強く実感した。高まりつつある中性子利用の需要に応えるためにも中性子検出器の高度化は急務であり、他の分野とも連携しながら、その一旦を担えれば本望である。

謝辞

本調査研究を行うにあたり、貴重な見学の機会をいただいた Institut Laue-Langevin (仏)、Brooklyn National Laboratory (米国)、Oakridge National Laboratory (米国)の皆様に深く感謝いたします。産業技術総合研究所の放射線イメージング計測研究グループ、X線・陽電子計測研究グループの皆様にも多くの助言をいただきましたことを厚く御礼申し上げます。特に、豊川弘之グループリーダーの手厚いご指導に感謝申し上げます。また本報告書のドラフト段階からご丁寧にレビューいただき、貴重なコメントを多くを頂きました山田善郎首席研究員に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 高野秀機, “加速器駆動炉核変換における核データ”, 日本原子力学会 **43-7**, 659 (2001).
- 2) 米沢伸四郎, “原子炉中性子による即発ガンマ線分析分析化学”, 日本分析化学会 **51-2**, 61 (2002).
- 3) J. B. Siegel, X. Lin, A. G. Stefanopoulou, D. S. Hussey, D. L. Jacobson, and D. Gorsich, “Neutron imaging of lithium concentration in LFP pouch cell battery”, *J. Electrochem. Soc.* **158**, A523 (2011).
- 4) 佐藤博隆, “ブラッグエッジ透過分光法による結晶組織構造情報のイメージング”, *RADIOISOTOPES* **61**, 449 (2012).
- 5) J. Iijas, “Directory of Nuclear Reactors”, *IAEA* (1971).
- 6) IAEA (ed.), “Nuclear Research Reactors in the World”, *Reference Data Series 3* (2000).
- 7) 前田豊, “研究用原子炉の現状と将来”, 日本原子力学会誌 **38**, 11 (1996).
- 8) H. Kim, H. R. Kim, K. H. Lee, J. B. Lee, Design “Characteristics and Startup Tests of HANARO The Newly In-service Korean Research Reactor”, *J. Nucl. Sci. Technol.* **33-7**, 527 (1996).
- 9) J. J. Rush, “US Neutron Facility Development in the Last Half-Century: A Cautionary Tale”, *Physics in Perspective*. **17-2**, 135 (2015).
- 10) C. D. West, “The advanced neutron source: A new reactor-based facility for neutron research”, *Trans. American Nucl. Soc.*, **61** (1997).
- 11) A. W. Chao and W. Chou, “Reviews of Accelerator Science and Technology 6” (2006).
- 12) M. Furusaka, H. Sato, T. Kamiyama, M. Ohnuma and Y. Kiyonagi, “Activity of Hokkaido University Neutron Source, HUNS”, *Physics Procedia* **60** 167-74 (2014).
- 13) Y. Yamagata, K. Hirota, J. Ju, S. Wang, S. Y. Morita, J. I. Kato, Y. Otake, A. Taketani, Y. Seki, M. Yamada, H. Ota, U. Bautista and Q. Jia, “Development of a neutron generating target for compact neutron sources using low energy proton beams”, *J Radioanal Nucl Chem* **305-3**, 787 (2015).
- 14) M. Uesaka and H. Kobayashi, “Compact Neutron Sources for Energy and Security”, *Reviews of Accelerator Science and Technology* **8**, 181-207 (2015).
- 15) D. V. Baxter, J. M. Cameron, V. P. Derenchuk, C. M. Lavelle, M. B. Leuschner, M. A. Lone, H. O. Meyer, T. Rinckel and W. M. Snow, “Status of the low energy neutron source at Indiana University”, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **241**, 209-12 (2005).
- 16) <http://www.inst.bnl.gov/GasDetectorLab/Neutron-Detectors/Brochure/Brochure.html>.
- 17) B. Yu, G. J. Mahler, N. A. Schaknowski and G. C. Smith, “A position-sensitive ionization chamber for thermal neutrons”, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **48** 336-40 (2001).
- 18) A. Oed, “Position-sensitive detector with microstrip anode for electron multiplication with gases”, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **263**, 351-9 (1988).
- 19) J. F. Clergeau, P. Convert, D. Feltin, H. E. Fischer, B. Guerard, T. Hansen, G. Manzin, A. Oed, and P. Palleau, “Operation of sealed microstrip gas chambers at the ILL”, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **471**, 60 (2001).
- 20) J. D. Parker, K. Hattori, H. Fujioka, M. Harada, S. Iwaki, S. Kabuki, Y. Kishimoto, H. Kubo S. Kurosawa, K. Miuchi, T. Nagae, H. Nishimura, T. Oku, T. Sawano, T. Shinohara, J. Suzuki, A. Takada T. Tanimori, and K. Ueno, “Neutron imaging detector based on the μ PIC micro-pixel chamber”, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **697**, 23-31 (2013).
- 21) J. D. Parker, M. Harada, K. Hattori, S. Iwaki, S. Kabu-

- ki, Y. Kishimoto, H. Kubo, S. Kurosawa, Y. Matsuoka, K. Miuchi, T. Mizumoto, H. Nishimura, T. Oku, T. Sawano, T. Shinohara, J. Suzuki, A. Takada, T. Tanimori, and K. Ueno, "Spatial resolution of a μ PIC based neutron imaging detector", *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **726**, 155 (2013).
- 22) T. L. van Vuure, J. F. Ankner, J. F. Browning, L. G. Clonts, M. L. Crow, R. G. Cooper, I. Remec, J. D. Richards, R. A. Riedel, and J. L. Robertson, "First Measurements of the Inclined Boron Layer Thermal-Neutron Detector for Reflectometry", *IEEE Trans. Nucl. Science* **57**, 323-7 (2010).
- 23) A. Athanasiades, N. N. Shehad, C. S. Martin, L. Sun and J. L. Lacy, "Straw detector for high rate, high resolution neutron imaging", *Proc. IEEE Nucl. Sci. Symp. Med. Imag. Conf. (NSS/MIC)* **2**, 623 (2005).
- 24) T. Bigault, J. Birch, J. C. Buffet, J. Correa, R. Hall-Wilton, L. Hultman, C. Höglund, B. Guerard, A. Khaplanov, F. Piscitelli and P. Van Esch, "10B multi-grid proportional gas counters for large area thermal neutron detectors", *Neutron News* **23** 20-5 (2012).
- 25) S. H. Park, Y. K. Kim, and J. K. Kim, "Neutron detection with a GEM", *IEEE Trans. Nucl. Science* 1689-1692 (2005).
- 26) S. Uno, T. Uchida, M. Sekimoto, T. Murakami, K. Miyama, M. Shoji, E. Nakano, T. Koike, K. Morita, H. Satoh, T. Kamiyama and Y. Kiyonagi, "Two-dimensional Neutron Detector with GEM and its Applications", *Physics Procedia* **26** 142-52 (2012).
- 27) T. Fujiwara, U. Bautista, Y. Mitsuya, H. Takahashi, N. L. Yamada, Y. Otake, A. Taketani, M. Uesaka, and H. Toyokawa, "Microstructured boron foil scintillating G-GEM detector for neutron imaging", *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **838**, 124 (2016).
- 28) <http://www.bnnt.com/>
- 29) C. W. E. van Eijk, A. Bessière and P. Dorenbos, "Inorganic thermal-neutron scintillators", *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **529** 260-7 (2004)
- 30) N. Kawaguchi, T. Yanagida, A. Novoselov, K. J. Kim, K. Fukuda, A. Yoshikawa, M. Miyake and M. Baba, "Neutron responses of Eu²⁺ activated LiCaAlF₆ scintillator," *Proc. IEEE Nucl. Sci. Symp. Med. Imag. Conf. (NSS/MIC)*, 1174-1176. (2008)
- 31) 高橋浩之, 藤原健, 伊予本直子, "大強度パルス中性子計測における検出器の課題と高性能中性子シンチレータへの期待", 応用物理学会放射線分科会 放射線 **35** (4), 261, (2010).
- 32) A. Yamazaki, K. Watanabe, A. Uritani and T. Iguchi, "Neutron-gamma discrimination based on pulse shape discrimination in a Ce:LiCaAlF₆ scintillator", *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **652**, 435 (2011)
- 33) T. Nakamura, E. M. Schooneveld, N. Rhodes, M. Katagiri, K. Sakasai and K. Soyama, "Evaluation of the performance of a fibre-coded neutron detector with a ZnS/(B₂O₃)-B-10 ceramic scintillator", *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **600** 164-6 (2009).
- 34) K. Mizukami, S. Sato, H. Sagehashi, S. Ohnuma, M. Ooi, H. Iwasa, F. Hiraga, T. Kamiyama and Y. Kiyonagi, "Measurements of performance of a pixel-type two-dimensional position sensitive Li-glass neutron detector", *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **529** 310-2 (2004).
- 35) T. Fujiwara, H. Takahashi, T. Yanagida, K. Kamada, K. Fukuda, N. Kawaguchi, Y. L. Yamada, M. Furusaka, K. Watanabe, Y. Fujimoto and M. Uesaka, "Study on Ce:LiCAF scintillator for ³He alternative detector", *Neutron News* **23**, 31-4 (2012).
- 36) K. Watanabe, T. Yamazaki, D. Sugimoto, A. Yamazaki, A. Uritani, T. Iguchi, K. Fukuda, S. Ishidu, T. Yanagida and T. Fujimoto, "Wavelength-shifting fiber signal readout from Transparent RUBBER SHEET (TRUST) type LiCaAlF₆ neutron scintillator", *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **784**, 260-3 (2015).