



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	球減速材付6LiF・ZnS (Ag) 中性子シンチレーションカウンタ
Author(s)	成田, 正邦; Narita, Masakuni; 小澤, 保知 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 86, 9-20
Issue Date	1978-02-03
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41440
Type	departmental bulletin paper
File Information	86_9-20.pdf



球減速材付 ${}^6\text{LiF}\cdot\text{ZnS}(\text{Ag})$ 中性子 シンチレーションカウンタ

成田正邦* 小澤保知** 大友詔雄***
澤村貞史^{†1} 東條隆夫^{†2} 三角智久^{†3}

(昭和52年8月24日受理)

A ${}^6\text{LiF}\cdot\text{ZnS}\cdot\text{Polyethylene}$ Mixed Neutron Counter with Spherical Moderators

Masakuni NARITA Yasutomo OZAWA Norio OHTOMO
Sadashi SAWAMURA Takao TOJO Tomohisa MIKADO

(Received August 24, 1977)

Abstract

The variation with neutron energy of the sensitivity of a spherical paraffin moderated ${}^6\text{LiF}\cdot\text{ZnS}\cdot\text{polyethylene}$ mixed scintillation counter was experimentally investigated. The extrapolation sensitivity $S_0(E)$ defined for the opaque scintillator ZnS, was determined using time of flight method from thermal to 10 keV and ${}^{252}\text{Cf}$, ${}^{241}\text{Am-Be}$, D-D and D-T neutrons. The counter with 6.1 cm diameter has an excellent sensitivity from thermal to 10 keV and is particularly useful for determining the rem dose and the fluence rate of intermediated energy neutrons. The good γ -ray discrimination of the counter allows it to be used under a high γ -rays and neutron mixed field.

1. ま え が き

本論文は、東條によって製作された ${}^6\text{LiF}\cdot\text{ZnS}(\text{Ag})$ 混合シンチレータに、球形のパラフィン、またはポリエチレン減速材を被せた中性子カウンタの試作と特性について述べたものである。1967年に製作せられて以来、高感度の中速中性子カウンタとして、そのエネルギー特性の測定と計算、感度の決定、空間分布の測定、直交展開法による線量決定などに広く利用されて来たものである。しかし、その有効性にもかかわらず、その特性などについて発表していなかったため、ここで、その構成と特性の概要を報告する。

1.1 本中性子カウンタの考え方と特徴

中性子の存在する空間は多くの場合、他の放射線(特に γ 線)が同時に存在する混合放射線場である。中性子の検出器としては、 γ 線に対する感度の小さいものが望ましい。そのようなカウンタとして、理想的なものは少なく、 BF_3 カウンタ、核分裂カウンタそれにシンチレータで

* 本研究は基礎原子核工学講座で行った研究であるが、著者の現所属は*印を除いて

** エネルギー変換工学講座 *** 放射線源工学講座

†1 放射体応用学講座 †2 日本原子力研究所原子炉研修所 †3 電子技術総合研究所放射能研究室

は (n, α) 反応と ZnS を組み合わせたものがその候補となる。幸い ${}^6\text{LiF}\cdot\text{ZnS}(\text{Ag})$ シンチレータは γ 線に対する感度は、ほとんどゼロにできる。このため、中性子・ γ 線混合場での中性子カウンタとして、本カウンタは秀れたものである。

中高速中性子の測定に、減速材を用いて、効率を上げるという単純な考え方を進めて、中高速中性子の物質への効果、特に生体への効果を直接に示すカウンタを作ることは、放射線防護の立場から重要である。この観点から、本カウンタの効率の中性子エネルギー特性を、線量等量曲線²⁾ (Snyder 曲線ともいう) に一致させるなら、中性子に対するレム (rem) 単位の線量を、直ちに読み取ることができる。この種の中性子測定器をレムカウンタと呼ばれることがある。本カウンタは、直径 6.1 cm の球減速材で、中速中性子に対して、ほぼレムカウンタになる。さらに、中速中性子に対しては、線量等量曲線は、ほぼ平坦なエネルギー特性を示すから、中性子フルエンス率も直接に読みとることもできる。この種の平坦カウンタ (代表的なものはロング・カウンタ) は、中性子の数の比較に便利である。ここで述べるカウンタは、ロング・カウンタの重量に比べて小型軽量に作られる。これらのレムカウンタとしての特性や平坦カウンタとしての用途を考えて我々のカウンタエネルギー特性は、なるべく線量等量曲線に近い減速材の直径を見つけることに注意をはらっている。

以上のことをまとめると、本中性子カウンタは

- (1) 中速から高速領域にかけての線量計、およびフルエンス率測定器
- (2) 小型サーベイメータ用としての空間分解能が高い
- (3) 入射中性子に対する方向依存性も小さい
- (4) 中性子・ γ 線混合場での中性子測定の容易さ

などの特徴をもっている。また色々な半径の減速材球を利用して、中性子の線質や線量決定に利用できる方法も考えられた。

1.2 現在までに利用されている中速中性子線量計

今までに、種々の線量等量曲線に一致するというカウンタが製作されている。その中で著名なもので、本カウンタに類似のものをあげる。

(1) Andersson 型³⁾ 円筒形ポリエチレン減速材の中間にボロンプラスチック層を設け、 BF_3 カウンタを包んだもの。測定エネルギー範囲は、熱中性子 \sim 10 MeV といわれ、 (n, γ) 識別は良好であるが重量がある。

(2) Bonner 型⁴⁾ ${}^6\text{LiF}$ シンチレータを球形ポリエチレン減速材で包んだもので、測定範囲は熱中性子 \sim MeV で、 γ 線に感じ易い。球の直径で種々の感度になる。

(3) Basson 型⁵⁾ ${}^{10}\text{B}\text{-ZnS}\cdot$ プラスチックシンチレータ NE 401 を球形パラフィンで包んだもので、重量は軽い。測定範囲は 1 eV \sim 10 keV で Snyder 曲線に一致する。

後の 2 つは、いずれもパラフィンまたはポリエチレン球に包んだもので、この球を Bonner ball あるいは Basson sphere と呼ぶこともある。

ここで述べる中性子カウンタも、検出部を除くと、Basson sphere と同じ考えに立っているが、シンチレータは、東條によって調製された新しいものである。上記のものとの比較では、直接のレム・カウンタとしてのエネルギー範囲は、Basson 型と同じく熱中性子 \sim 10 keV であるが、 ${}^6\text{Li}$ の利用と、異った直径の球の使用で、Bonner 型のような利用方法もできる。重量は軽い。

2. 試作中性子カウンタの構成

試作した中性子カウンタの検出部を図 1 に示す。円板状の ${}^6\text{LiF}\cdot\text{ZnS}$ シンチレータは、アク

Construction of Neutron Detector

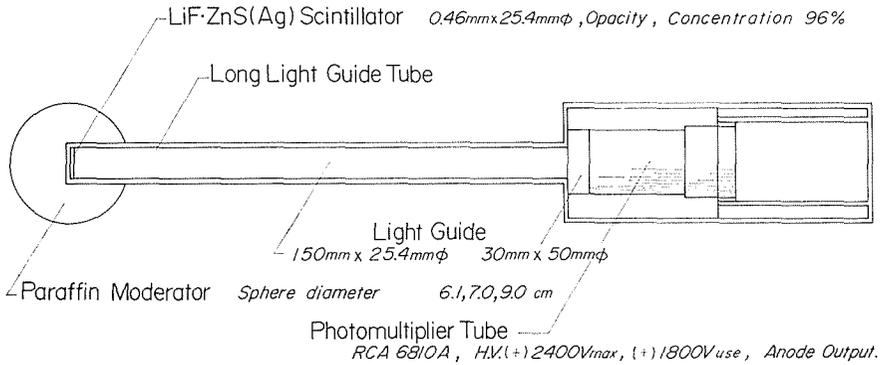


図1 本中性子カウンタの構成

リル樹脂製のライトガイドの片端に、シリコン化合物で装着され、光電子増倍管へ光伝送される。シンチレータと減速球は以下に述べるが、ライトガイドはアルミケースで外被されており、光電子増倍管ケース内部のライトガイドを除いて、25.4 mmφ×150 mm 長である。後で述べる TOF 実験には 450 mm 長のものも利用した。使用した直径のもので、1 m の長さであっても約 40% は光輸送できる。光電子増倍管は、試作器では RCA 6810 A を使用したが、もっと低価格の 7696 程度のもので、多少の効率を犠牲にして波高を大きくとるように薄い ${}^6\text{LiF}\cdot\text{ZnS}$ シンチレータを用いることで使用可能であろう (図 2 参照)。

2.1 ${}^6\text{LiF}\cdot\text{ZnS}\cdot$ ポリエチレン混合シンチレータ

使用したシンチレータは、 $\text{LiF}\cdot\text{ZnS}\cdot$ ポリエチレン混合シンチレータである¹⁾。このシンチレータは熱せられて柔らかくなったポリエチレン基材中に ${}^6\text{LiF}$ (${}^6\text{Li}$ の濃縮度 96%) と $\text{ZnS}(\text{Ag})$ の細粉を混入して、 $120^\circ\text{C}\sim 130^\circ\text{C}$ の温度に保たれたアルミ箔でおおわれた鉄板の間で圧縮して整形された。最大の効率を示す重量混合比は、ここで使用したもので

$${}^6\text{LiF} : \text{ZnS} : \text{Polyethylene} = 1 : 5 : 1$$

のものである。中性子検出の核反応は ${}^6\text{Li}$ の (n, α) 反応を用いており、この Q 値は 4.67 MeV

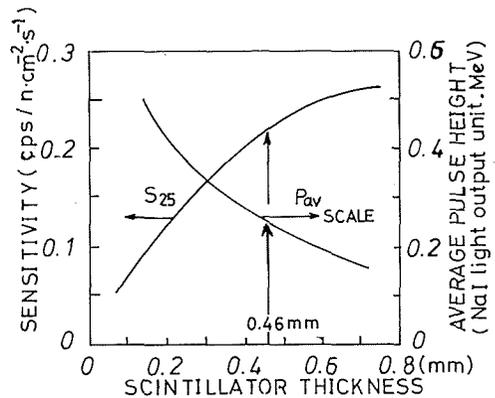


図2 シンチレータ (10 mmφ) の厚さに対する感度 S_{25} keV と平均パルス波高。0.46 mm は本カウンタに使用した厚さ。¹⁾

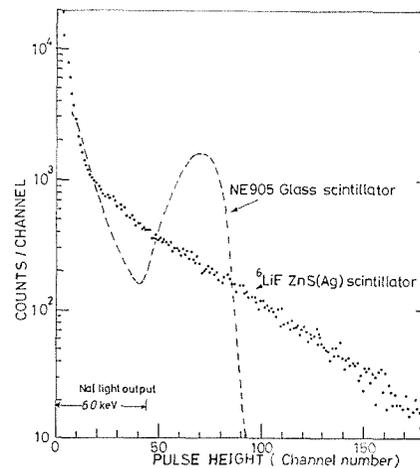


図3 ${}^6\text{LiF}\cdot\text{ZnS}(\text{Ag})$ シンチレータのパルス波高分布

で $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ の2.79 MeVなどよりも大きく、シンチレータ自身は不透明であるために、余り厚くすることができない、このことが中性子と γ 線の分離検出を容易にしている。このシンチレータからの微分波高分布を図3に示す。不透明なシンチレータのために、一定の波高分布を示さず、指数的に波高分布が減少しており、低波高部に γ 線などの急な計数増加がみられる。NE 905と呼ばれる標準的な中性子検出用ガラスシンチレータ(6.6%リチウムでその中で ^6Li 95%)と比べて、この特性が良くできていることがわかる。平均波高も十分に高く、 γ 線との識別は容易である。低波高部の雑音あるいは γ 線などのバックグラウンドと思われる25 keV(25 keVの γ 線をNaI(Tl)シンチレータで測定した場合の光電ピークに等価なこのシンチレータ光出力。以下でバイアスあるいはディスクリミネータレベル何keVというときは、この単位である)以下をディスクリミネータで落とすと γ 線に対する感度はほぼゼロである。

ここで使用しているシンチレータの大きさは、直径25.4 mm、厚さ0.46 mm、容積 0.233 cm^3 の円板状のものである。この厚さは、最大感度(0.76 mm)に近く、かつ不透明シンチレータによるパルス波高の減少の少ない点を考慮して選ばれた。図2に、シンチレータの厚さに対する感度を平均波高の変化を示し、ここで使用する厚さを示してある。この図の感度は直径10 mm ϕ のもので

ある。計算その他に使用した構成元素の原子密度を表1に示す。測定密度は2.35であった。

2.2 減速球

減速材は、カウンタ効率の等方性の要求から、球状のパラフィンを採用した。製作は丸底フラスコに溶融パラフィンを均一に、空孔のできないように流し込み固化したあと、割り砕き、その後任意の大きさにパラフィン球を整形した。パラフィンの構成元素は $(\text{CH}_2)_n$ の分子式からできているから、同じ組成のポリエチレンとは置換可能であり、ポリエチレン素材からの球も作成したが空孔を作らないような整形は難しかった。本実験での使用球は、ほとんどパラフィン球によるものである。平均密度0.9で構成元素の原子密度は表1にある。製作された球の直径は、5.5, 6.1, 7.0, 8.3, 9.0, 10.5, 12.4 cm ϕ である。この中から実験に適当なものを選び使用した。特に熱中性子に対して感度があって困まる場合は、0.5 mm厚さのカドミウム板、多くの場合は、球に密着していないキャップで取りはずしが自由なものを用いた。初期の実験では、球面にカドミウム板を密着させて作成したが、大きな違いがなかったためにキャップにした。

3. 計数特性

3.1 熱中性子感度

カウンタの感度(Sensitivity)は、W. J. Priceのテキスト⁶⁾にしたがって、単位中性子束当

表1 カウンタ構成々分の原子密度(個/cm³)

ISOTOPE		ISOTOPE DENSITY ($\times 10^{24}$)
REGION 1 Scintillator		
H		0.00289
C		0.01446
Li-6		0.00776
Li-7		0.00032
F		0.00808
Zn		0.01038
S		0.01038
REGION 2 Al-case		
Al		0.06025
REGION 3 Moderator		
H		0.07730
C		0.03870

りの計数率と定義しよう。一方、計数効率とは、1中性子がカウンタに入射したとき、1カウントをもたらす割合というのが Price の定義であるが、ここでは、相対感度など、一般的に感度も含めて広い意味で用いることにした。

3.1.1 理論熱中性子感度

上記の感度の定義を用いると、中性子の拡散媒質中のように、種々の方向からやって来るマックスウェル分布の熱中性子に対する感度は次のように求められる。ここで利用する ${}^6\text{LiF}\cdot\text{ZnS}$ シンチレータは $12.5\text{ mm}\phi\times 0.46\text{ mm}$ の円板であって、熱中性子の理論感度 S_{thermal} は

$$S_{\text{thermal}} = NV\sigma_0 f / 1.128 = 0.972\text{ cps}/(n\text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$$

で与えられる。 N は ${}^6\text{Li}$ の原子密度、 V はシンチレータ容積、 σ_0 は ${}^6\text{Li}(n, \alpha)\text{T}$ 反応の断面積で 945 barns 、 f は自己しゃへい係数で、無限平板と仮定すると、衝突確率から計算できて今の場合 $f=0.642$ である。

3.1.2 平行ビーム熱中性子感度

入射中性子が平行ビームの場合は、Price の定義では、計数効率に対応するものになり、シンチレータの片面の面積 $A=5.067\text{ cm}^2$ に、単位中性子束が入射すると、この面への全入射中性子束 $I_0=5.067\text{ n/s}$ である。平行ビーム熱中性子感度 S_{beam} は

$$S_{\text{beam}} = 1.128^{-1} \int_0^d \sum_0 I_0 e^{-\Sigma r^x} dx = (I_0 \sum_0 / 1.128 \sum_r) (1 - e^{-\Sigma r^d}) = 1.30\text{ cps}/(n\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$$

となる。ここで \sum_r はシンチレータの全断面積で、今の場合 $\sum_r=7.35\text{ cm}^{-1}$ 、 $\sum_0 \equiv \sigma_0 N=7.33\text{ cm}^{-1}$ 、 d はシンチレータの厚さである。

上述の2つの感度の $S_{\text{thermal}} < S_{\text{beam}}$ の結論は、中性子輸送理論に慣れないと、逆ではないかと思われるかも知れない。 S_{thermal} は、シンチレータの両面から粒子が入射するからである。しかし、この結論は次のように考えれば理解できる。強い中性子吸収体であるうすい円板の ${}^6\text{LiF}\cdot\text{ZnS}$ シンチレータに、様々な方向から中性子が入射するときシンチレータを横切る中性子の弦の長さ (chord length⁷⁾) を考えると、径方向 (周辺) から入射するものは、軸方向 (平面) から入射するものよりずっと長くなる (平均弦長 $\bar{l}=0.40\text{ cm}$ で平行ビームの 0.046 cm の10倍)。中性子到来方向が一樣であると、この弦の長さの長い中性子が多くなり、この長い弦を飛行する中性子は周辺で吸収されて、シンチレータ内部へ侵入できない。このために、円板シンチレータの内部の中性子束分布のくぼみが大きくなり、内部での ${}^6\text{Li}(n, \alpha)\text{T}$ 反応は見掛上小さくなってしまふ。この効果は自己しゃへい係数という形であらわされる。一方、平行ビームでは、うすい板であるために、中性子束の減少は小さく、充分反応することができるわけである。

3.2 熱中性子感度の測定

3.2.1 外挿感度 S_0

図3の波高分布からわかることは、不透明シンチレータである ZnS の感度を決定するには、波高弁別レベルを確定しなければならないということである。そうでなければその感度は波高弁別レベルで大きく変化するので、何を測定したかわからなくなってしまふ。実際、ここでの中性子測定でも一定の波高弁別レベルを設定してなされた。しかし、人によって設定値が異なったりしては意味がないし、また上記の理論感度などと比べることもできない。そこで、これを一般化するために次のような外挿感度 S_0 を用いる。

波高弁別レベルを変化させたときの積分計数特性をとると、図4のようになる。図4によると雑音やバックグラウンドレベル以上では、きれいな指数分布を示していることがわかる。この分

布は熱中性子と高速中性子，放射線の強さなどにはよらずほぼ同じである。主たる理由は，ZnS シンチレータの不透明さによるものであろう。そこでこの指数分布を，ゼロの弁別レベルまで外挿した計数率 C_0 を考える。これは，透明なシンチレータと仮定した計数率と考えても良い。この計数率を与えた中性子束を ϕ すれば，外挿感度 $S_0 \equiv C_0/\phi$ で定義する。これによれば，弁別レベル V に対する感度 S_V は

$$S_V = S_0 e^{-\alpha V} \quad (1)$$

と実験式で与えられる。図4より，この測定の場合の弁別電圧では $\alpha = 0.859 \text{ (V}^{-1}\text{)}$ であって，一般的に NaI (TI) スケールの γ 線エネルギー単位では $\alpha = 0.0191 \pm 0.0010 \text{ (keV}^{-1}\text{)}$ と表わされることがわかった。以下の議論では，すべて外挿感度 S_0 を用い，直接の測定値を扱うときは S_V とサフィックスでその波高弁別レベルを示すことにする。

3.2.2 熱中性子感度の測定

熱中性子感度の測定は，減速球を被せないはだかの ${}^6\text{LiF}\cdot\text{ZnS}$ シンチレータでは， ${}^{241}\text{Am-Be}$ 5 Ci を中心に入れた $49 \times 49 \times 49 \text{ cm}$ の立方体のポリエチレン積層中の熱中性子束分布を，金箔の放射化とシンチレータの両方によって測定し，金箔の断面積とカドミ比より決定した。金箔の放射化の測定は $\beta\text{-}\gamma$ 同時計数法によった。この際，BF₃ カウンタ (富士電機製 PR-5015, 公称感度 $0.94 \pm 0.04 \text{ cps}/(n \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$), PR-5235 公称感度 $5.47 \pm 0.13 \text{ cps}/(n \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$, 及び He-3 カウンタ (20 th Century 9³He/304/25 B) も比較測定した。この際，中性子束分布が管長にわたって一定でないので，この感度決定は，管長中性子束分布の数値積分によった。測定結果を表2に示す。またビームに対する測定は，Am-Be 源 (最近の追実験では ${}^{252}\text{Cf}$ 自発核分裂中性子源) からの中性子を厚さ約 12 cm の

パラフィンを通させたあと，そのもれ中性子を，上記 BF₃ カウンタ，He 3 カウンタ等と比較測定した。

パラフィン球を被せた場合も，パラフィンブロックや黒鉛パイルのもれ中性子束によって，比較測定した。

測定結果を表3と図5に示す。表3の熱中性子束 ϕ_{th} は，シンチレータ測定点と異なった場

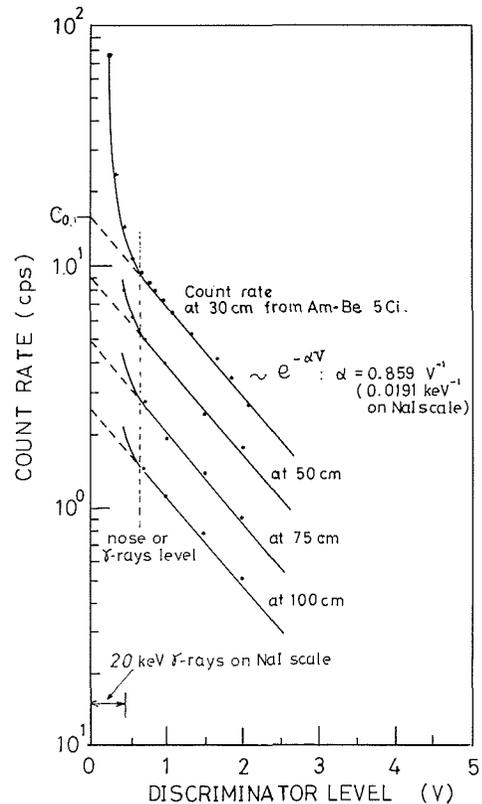


図4 積分計数特性 (波高弁別レベルの変化に対する計数率) と外挿計数率 C_0 の定義

表2 ポリエチレン積層中で測定された各種カウンタの熱中性子感度

Counter	Thermal neutron sensitivity [cps/($n \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)]
BF ₃ PR-5015 (12 cm)	1.12 ± 0.03
BF ₃ PR-5235 (30 cm)	3.11 ± 0.04
He-3 /304/25 B	3.52 ± 0.04
LiF·ZnS Scintillator S_0	0.954 ± 0.038

表3 熱中性子感度のポリエチレン中での測定結果

中心からの距離 (cm)	18.5	19.9	21.3	22.7
計 数 率 (cps)	2926.2	2436.8	1942.2	1573.3
熱 中 性 子 束 ϕ_{th} ($n\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	6098.	5078.	4045.	3278.
$S_{36\text{ keV}}$	0.4796	0.4799	0.4802	0.4800
S_0	0.9543	0.9544	0.9551	0.9547

合もあるので、内挿した結果である。図5によると、 ${}^6\text{LiF}\cdot\text{ZnS}$ シンチレータの感度は

平行ビームに対して

$$S_{0\text{ beam}} = 1.51 \pm 0.07 \text{ cps}/(n\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$$

パイル中の測定に対して

$$S_{0\text{ pile}} = 0.954 \pm 0.038 \text{ cps}/(n\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$$

となる。誤差は、主として熱中性子束測定の同時計数法の同時計数によっているが、カウンタの測定を併用し、平滑化されているので本来は、もっと小さいはずである。

これらの値は、前記の理論値にかなり近い値を示している。 $S_{0\text{ beam}}$ の値は、理論値より若干大きめであるが、これは完全な平行ビームでないこと、はだかのカウンタでも、背後にアクリル樹脂の反射体となるライトガイドの存在することなどによるものであろう。

パラフィン球を被せた場合の熱中性子感度は、図5の他に図8にも示してある。

4. 感度の中性子エネルギー依存性

検出効率のエネルギー依存性の測定は、2通りの方法で行われた。一つは定ったエネルギー分布をもつ ${}^{241}\text{Am}\text{-Be}$ 中性子源 (平均エネルギー $=\bar{E} \cong 4.5 \text{ MeV}$)、 ${}^{252}\text{Cf}$ 核分裂中性子源 ($\bar{E} \cong 2 \text{ MeV}$)、またコッククロフト・ワルトン型加速器よりの D-T 反応中性子 ($E=14 \text{ MeV}$) と D-D 反応中性子 ($E=2.45 \text{ MeV}$) による特定のエネルギーの感度の測定である。もう一つは、LINAC をパルス中性子源として、20 m 中性子飛行時間分析 (TOF) による相対感度の測定である。この方法は、主として低エネルギー領域について行い、3節の方法と併せて熱中性子領域で絶対感度に一致させた。

4.1 中性子飛行時間 (TOF) 法による感度のエネルギー依存性測定⁹⁾

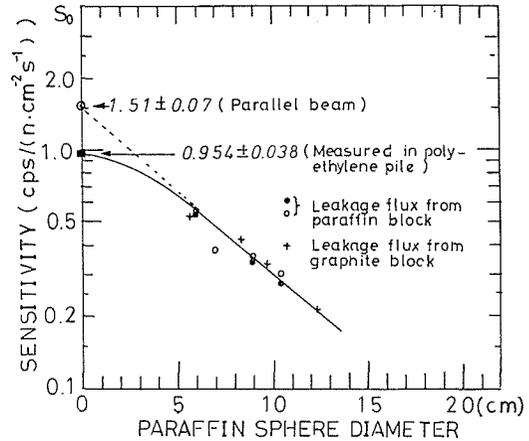
4.1.1. 測定法

TOF 法による実験は KUR LINAC (京都大学原子炉実験所線型電子加速器) をパルス状中性子源として、これに付属している 20 m 中性子飛行時間分析装置を用いて行われた。実験装置のブロック図を図6に示す。中性子源は鉛ターゲットからの光中性子で LINAC のビーム幅 $2.5 \mu\text{s}$ 、繰返し周波数 50 pps に従って発生する。飛行管の長さは 20 m で、ターゲット中央から検出器の中央までの実効距離は 22.3 m である。参照測定用の検出器は BF_3 カウンタ・バンクである。 ${}^6\text{LiF}\cdot\text{ZnS}$ シンチレータはバンクと同じ位置で相対測定した。

測定法は次の通りである。中性子場 $\phi(E)$ の中に、効率 (相対感度の意味で用いる) $\eta(E)$ である検出器をおいたとき、エネルギーが $E \sim E+dE$ の間の計数率 $C(E) dE$ は

$$C(E) dE = \eta(E) \phi(E) dE$$

である。この場合、 $\phi(E)$ は中性子束に比例する量という意味である。これから

図5 熱中性子外挿感度 (25.4 mm ϕ × 0.46 mm)

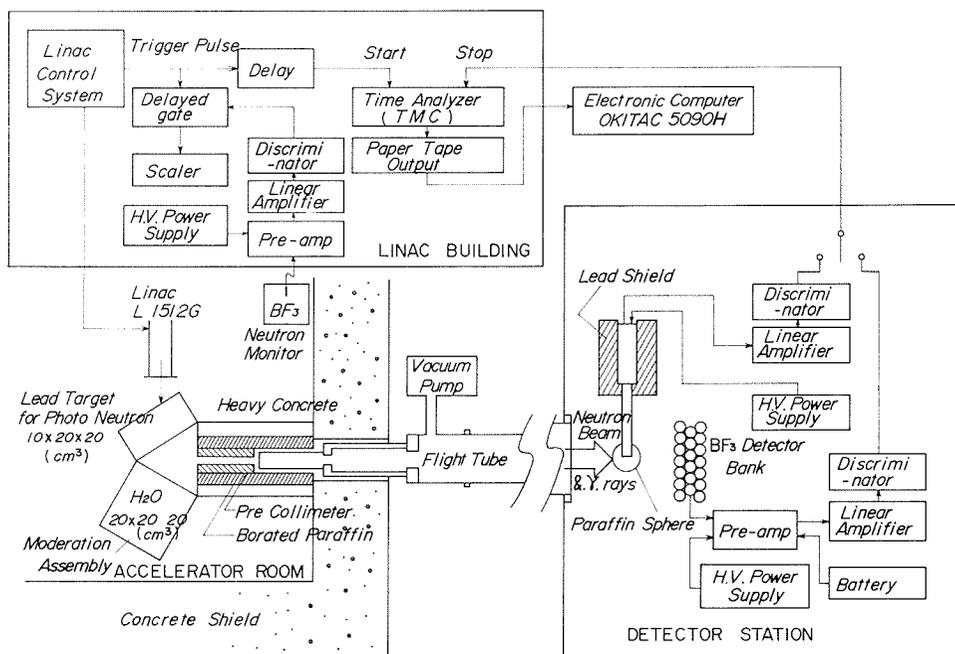


図6 飛行時間測定 (TOF) ブロック図

$$\eta(E) = C(E)/\phi(E) \quad (2)$$

と求められる。あらかじめ、 $\phi(E)$ は参照とする BF_3 カウンタバンクによって測定され、計算される。

測定は BF_3 カウンタによる中性子束 $\phi(E)$ の決定と、 ${}^6\text{LiF}\cdot\text{ZnS}$ シンチレータの減速球を変化させて、3度にわたって行われた。実際に測定したパラフィン球は $6.1\text{ cm}\phi$ 、 $7.0\text{ cm}\phi$ 、 $9.0\text{ cm}\phi$ の3種と、ボロン入りのパラフィン球についても測定した。ボロン入りの球については、ここでは述べない。 ${}^6\text{LiF}\cdot\text{ZnS}$ シンチレータの方向依存性を測定するために、中性子飛行方向に 0° 、 45° 、 90° の3つの方向について調べた。

TOF 測定の結果は、時間分析器に飛行時間分布としてあらわれる。この時間分析器の出力のエネルギー分布に変換するのに、京都大学原子炉実験所の計算コードを使用した。このプログラムでは、この TOF 系の平均放出時間、バックグラウンド、 BF_3 カウンタの検出効率、飛行管窓や空気による損失、分析器の不感時間補正がなされている。

このようにして、得られた中性子束のエネルギー分布とシンチレータの検出効率 $\eta(E)$ は、熱中性子の点で、3節の外挿感度と一致させると、外挿感度 $S_0(E)$ がエネルギー依存として求められる。

4.1.2 測定結果

TOF 測定結果を、外挿感度にして表わしたのが図7である。Bare とあるのは減速材をつけていないときの感度であり、パラフィン球付の場合は $6.1\text{ cm}\phi$ と $9.0\text{ cm}\phi$ について示した。

Bare の場合、ほぼ対数軸で直線的にエネルギー増加と共に下っており $1/v$ 特性を思わせる。しかし、 $1/v$ 特性よりは、若干高エネルギー側で増加しており、これはライトガイドなどが減速材として働いたためであろう。 $6.1\text{ cm}\phi$ の減速球の場合、 $0.5\text{ eV}\sim 1\text{ keV}$ までほぼ一定の計数感度を示している。これは、球の減速材の効果が感度を増加させたもので、平坦カウンタとしては

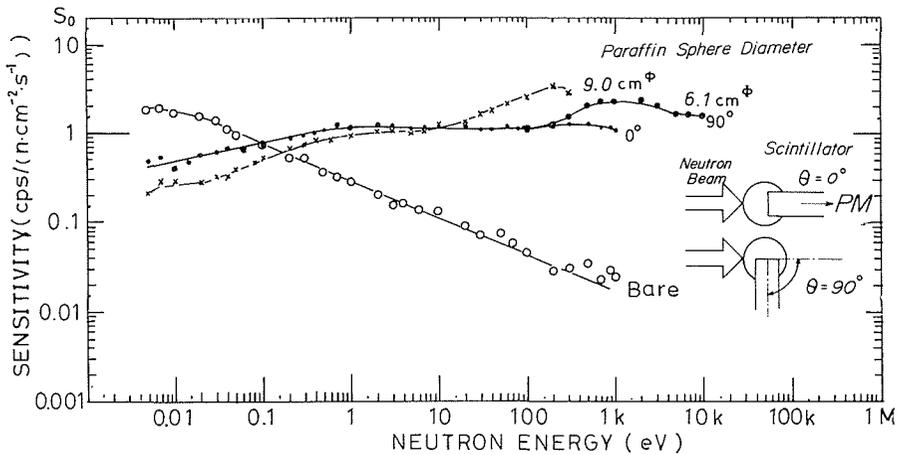


図7 TOF 測定結果よりの外挿感度のエネルギー特性

理想的な応答を示している。この結果は、図9で比べるように Basson の結果 (6.3 cm ϕ) とかなり良い一致を示している。1 keV \sim 10 keV 附近にわずかに感度の高い部分があらわれている。詳しい原因は明らかではないが、Basson の 6.3 cm ϕ の結果 (図9 参照) にも存在することを指摘しておこう。

図7の 6.1 cm ϕ の実験値には、カウンタの方向依存性を見ることと、エネルギー軸の測定の上限を延ばすために、カウンタへの入射中性子ビーム方向に 90 $^\circ$ 傾けた場合の結果も示してある。他の実験はビーム方向に、検出器—光電子増倍管の軸がある。この方向を 0 $^\circ$ とした。1 keV 以下では、ほぼ 0 $^\circ$ と 90 $^\circ$ は一致する (実験では 45 $^\circ$ も行ったが 0 $^\circ$ に一致)。90 $^\circ$ 方向が 10 keV まで測定されているのは光中性子と同時発生する γ 線バーストが光電子増倍管へ直接入らないため、飛行時間の短い部分 (高エネルギー部分) の測定ができたためである。この場合光電子増倍管への光伝送するライトガイドを 470 mm と長くし、充分しゃへいすることが可能であった。9.0 cm ϕ の減速球では、図でわかるように高エネルギーで増加する感度を示す。図に示されていないが、7.0 cm ϕ の実験は 6.1 cm ϕ と 9.0 cm ϕ の中間であった。

4.2 パラフィン球の直径による感度特性

高エネルギー領域での球形減速球の効果をみるために、球直径を変化させた場合の感度特性を調べた。これには上述の TOF の結果と併せて、Am-Be 源、 ${}^{252}\text{Cf}$ 源、D-D 反応、D-T 反応による中性子を直接に用いた。この場合の測定は、熱中性子の場合を除いて、0.5 mm のカドミ板によって、熱中性子のバックグラウンドを減少させた。高速中性子束の評価は、主として源の線源強度からの計算によったけれども、その裏付けとして、フィルムによる飛跡の計数の空間分布を使用した。その結果は空間分布の相対値はほぼ逆二乗則に一致し、絶対値で 18% 小さかった。しかし、線源強度について、Am-Be (5 Ci, 1.25×10^7 n/s) について、前述のポリエチレン積層 (49 \times 49 \times 49 cm) の空間分布を金箔で測定した結果に、拡散理論による計算から線源強度を求めると 1.02×10^7 n/s であり、他の製造業者の Am-Be (10 m Ci, 公称 2.6×10^4 n/s) でこの積層でのカウンタによる相互比較では 1.2% の誤差で一致した。このために、我々は 18% 誤差で Am-Be 5 Ci の公称値は正しいとして利用した。D-D、D-T 反応の測定は、パラフィン円筒を被せた BF_3 カウンタの効率を既知として相互比較したもので相対値のみを問題とした。この場合 BF_3 カウンタの効率は、拡散コードで計算したものによった。

以上のような源を使って得られた結果をまとめたのが図8である。D-D 反応と D-T 反応

の結果は、D-D を ^{252}Cf に重ねた場合の値である。高エネルギーではだかの $^6\text{LiF}\cdot\text{ZnS}$ シンチレータの計数値は予想よりは大きくでる。これは低エネルギー中性子のバックグラウンドによるものであろう。TOFの結果では、色々のエネルギーの曲線が、集まっているところが平坦カウンタになる部分である。

5. ま と め

$^6\text{LiF}\cdot\text{ZnS}$ ポリエチレン混合シンチレータにパラフィン球を装着した場合のカウンタの実験的特性を述べた。以上の結果をまとめ、いくつかの点を考察しておこう。

(1) $^6\text{LiF}\cdot\text{ZnS}$ 混合シンチレータは、単独で熱中性子の高感度の点状検出器(筆者らの用いたもので、 $25.4\text{ mm}\phi\times 0.46\text{ mm}$ で、ほぼ 10 cm 長の BF_3 カウンタ、たとえば PR 5015 に相当)で、ほぼ $1/v$ 特性をもっている。 $1/v$ 特性の若干のずれは、ライトガイドなどの減速効果による。

(2) パルス波高特性が指数分布を示すので、著者らは波高弁別レベル・ゼロへの外挿感度 S_0 を導入し、これがきわめて有用であることを示した。たとえば任意の弁別レベルの感度 S_v は、(1)式で求められる。また理論と実験によってビームとパイル中の感度 S_0 が異なることを示した。

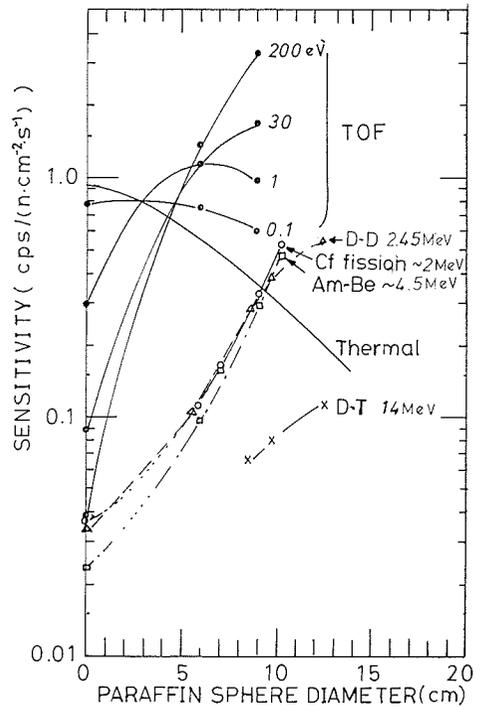


図8 パラフィン球直径に対する外挿感度

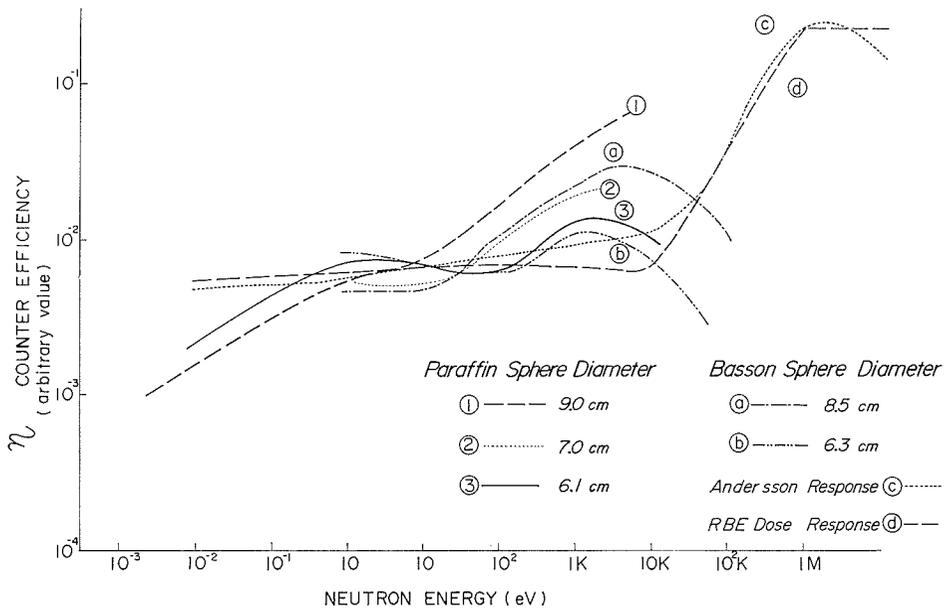


図9 線量等量曲線 ① に対する本カウンタと Basson カウンタの比較

(3) TOF 法と Am-Be, Cf-252 中性子源などによって, カウンタの感度のエネルギー特性を測定して, 熱中性子から 10 keV までと Am-Be, Cf-252 中性子の感度を決定した。

(4) 平坦カウンタとしての球減速材は 6.1 cm ϕ のものが適当であって, 熱中性子から ~10 keV までレムカウンタとして使用できる。このことを Basson カウンタ ④, ⑤, Andersson カウンタ ⑥, 線量等量曲線 ⑦ と比べたのが 図 9 である。この図によると, 大型で重量のある Andersson カウンタは確かにレムカウンタとして数 MeV まで使用できることがわかる。しかし著者や, Basson のものは 10 keV 程度までのレムカウンタになる。しかし, 後の 2 つは小型軽量に特徴があり, サーベイメータとして適当である。

(5) この減速球付カウンタの方向依存性は少くない。

(6) 最も大切なことであるが, γ 線に不感である。

以上の結論は, 本論文に述べた結果である。しかし, 先にも述べたように, 本カウンタは, 1967 年以來, 基礎原子核工学研究室で, 多くの人達が利用研究して来たものであり, その結果が未完成であったり, 未発表であるものも多い。それらのいくつかをあげて, 将来への展望としたい。

実験によってなされたエネルギー特性の数値的検討は, 多群拡散計算, Calson の SN 計算, 衝突確率法などで実施された。この結果は実験結果を充分説明でき, さらに実験の補足になることがわかった。これについては, 本論文の第 2 報以後に述べたい。

レムカウンタとしての特性をより改善するために, パラフィン内部にボロンを挿入したカウンタを製作し, TOF 法によって効率を測定した。このカウンタは, 特徴ある効率のエネルギー特性を示したが, レムカウンタとしては未だ未完成である。

減速球の直径をいくつか組み合わせて測定した結果から, 中性子場のスペクトルの概要を知ることができる。これは中性子束を直交関数展開法で求めることであって, 場のスペクトルに類似の参照スペクトルを最初に与えとかなりの精度で求められ, 中性子場の線量決定に利用できる。東大弥生炉の周辺線量測定に利用した¹⁰⁾。

謝 辞

本研究の中で, LINAC による感度のエネルギー特性の測定は, 京都大学原子炉実験所の共同利用によるものであり, 柴田俊一所長, 木村逸郎助教授, 藤田薫顕講師をはじめ原子炉部門 LINAC 担当の方々の御協力によるものである。

速中性子フィルムのトラック読取りには, ナガセ・ランダウア社, 安淵四郎技術部長の好意によった。

実験および討論については, 基礎原子核工学講座 山崎初男教授, 沢村晃子助手, 本間 彰技官, 原子炉関連施設 村井郁夫技官, 猪田耕一技官, 東海林 功技官, 原子炉材料学講座 水野忠彦助手等の協力によるものである。

最後に本研究の一部あるいはこのカウンタの応用などに協力した学生は, 長瀬由幸, 稲次稔, 斎藤敏男, 斎藤和男, 工藤勝久の諸氏である。

以上の諸氏に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Tojo, T. and T. Nakajima: Nucl. Instrum. Methods **53** (1967) p. 163.
- 2) Snyder, W. S. and J. Neufeld: NBS Hank Book **6** (1956) p. 261.
- 3) Andersson, I. O. and J. Braun: Neutron Dosimetry II (1963) p. 87, IAEA.
- 4) Bramblett, R., R. I. Ewing and T. W. Bonner: Nucl. Instrum. Methods **9** (1960) p. 1.
- 5) Basson, J. K.: Nucl. Instrum. Methods **22** (1963) p. 339.
- 6) Price, W. J.: Nuclear Radiation Detection 2nd Ed., Chap. 10 (1965) p. 315, McGraw-Hill.
- 7) Case, K. M. and P. F. Zweifel: Linear Transport Theory, Chap. 3 (1967) p. 48, Addison-Wesley.
- 8) Ryufuku, H.: Japan. J. Appl. Phys. **5** (1966) p. 903.
- 9) 三角智久: 昭和43年北海道大学工学部電気工学専攻修士論文 (1968).
- 10) 長瀬由幸: 昭和48年北海道大学工学部原子工学専攻修士論文 (1973).