

JNC TJ 4440 2003-007

環境放射線の測定手法に関する研究

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

2004年3月

(財)若狭湾エネルギー研究センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

**核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課**

Inquires about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute) 2004

環境放射線の測定手法に関する研究¹ (中性子測定技術の開発)

久米 恭²、大谷 暢夫³

要旨

現在、放射線利用は原子力分野をはじめ幅広い産業分野での応用が進んでいる。放射線測定技術の開発はそれらの分野において一定の波及効果が見込める課題である。

本研究では、前年度に引き続き、検出技術の困難さから開発余地の大きく残る中性子測定技術の開発を行った。

本年度は、前年度に引き続き、熱中性子測定に使用した液体シンチレーション検出器を速中性子測定に応用する技術開発を行った。特に、速中性子に対する感度の検証を、シミュレーション計算やビーム試験データ、中性子線源を使用することにより、実施した。

並行して、中性子測定について取り扱いの簡便なプラスチックシンチレーション検出器の応用の可能性を検証した。

更に、液体シンチレータ使用時に発生する設置場所や容器等の問題をクリアするため、前年度に引き続き中性子線束測定器としての無機シンチレータの性能評価も実施した。特に、BGO、GSO、NaI検出器について、中性子測定の応用の可能性を研究した。

¹本報告書は(財)若狭湾エネルギー研究センターが核燃料サイクル開発機構との契約により実施した業務の成果である。

サイクル機構担当課及び担当者 : 敦賀本部 技術企画部 環境監視課 野崎達夫

² (財)若狭湾エネルギー研究センター 粒子線医療研究室

³ (財)若狭エネルギー研究センター 研究部

Development of the Environmental Neutron Detection System⁴

Kyo Kume⁵, Nobuo Otani⁶

Abstract

Environmental neutron detection system is proposed. The main goal of this system was set to detect fast and thermal neutrons with the identical detector setup without degraders.

A detector setup for the system with a ¹⁰B doped liquid scintillator, which had been optimized for thermal neutron counting in previous years, was developed first. Feasible study of this detector system for fast neutron counting was done, with help of Monte Carlo simulation and analysis of experiments with both a neutron source and neutron beam at an accelerator facility.

In addition, ¹⁰B doped plastic scintillator was studied for measurement of environmental neutrons. This was done through experiments with an Am-Be neutron source, with help of Monte Carlo simulation.

In the meantime, possibility of the use of inorganic scintillators in neutron counting was verified, to solve the problems occurring at the long term use of the organic liquid scintillators. The detectors checked were BGO, GSO and NaI. BGO was shown that it has little possibility for use at neutron measurement, while GSO and NaI were shown that these detectors have trivial sensitivity in neutron measurement.

⁴This work was performed by the Wakasa Wan Energy Research Center under Contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison : JNC Tsuruga Head Office, Planning Division, Environmental Monitoring Section, Tatsuo Nozaki

⁵Medical Division, The Wakasa Wan Energy Research Center

⁶Research and Development Department, The Wakasa Wan Energy Research Center

目 次

第I部 序論	8
1 序説	8
2 中性子計測方法	9
2.1 熱中性子測定方法	9
2.2 速中性子測定方法	12
2.3 既存の中性子検出器	13
2.3.1 比例計数管	13
2.3.2 シンチレータ	14
第II部 液体シンチレータを用いた速・熱中性子同時検出システムの開発	18
3 ^{10}B混入の液体シンチレータを中心とした中性子線束測定システム	18
3.1 熱中性子線束測定	18
3.1.1 LiI シンチレーターによる測定	18
3.1.2 BC-523A を用いる測定	18
3.2 BC-523A による速中性子線束測定	21
3.2.1 BC-523A	21
3.2.2 $^{10}\text{B}(\text{n},\alpha)^7\text{Li}$ 反応	21
3.2.3 測定回路系	22
3.3 データ収集(DAQ)システム	23
3.4 検出器大型化の技術的裏付け	24
4 シミュレーション	27
4.1 Geant4	29
4.1.1 基礎データ	29
4.1.2 シミュレーションからの出力	30
4.1.3 中性子の発生	31
4.1.4 エネルギー依存性	52
4.1.5 検出器の大きさ	70
4.2 MCNP	104
5 検出効率の測定	111
5.1 中性子線源を使用した測定	111
5.1.1 ^{252}Cf 中性子線源の強度決定	111
5.1.2 BC-523A 液体シンチレーターを用いた測定装置のセットアップ	127
5.2 加速器ビームを用いた速中性子に対する測定効率の検証	130
5.2.1 実験	136

5.2.2 シミュレーションによる感度検証	156
6 まとめ	163
第III部 プラスチックシンチレータを用いた中性子検出システムの開発	164
7 プラスチックシンチレータによる中性子の検出	164
8 検出器および実験装置	166
8.1 中性子線源	166
8.2 BC454 と NE102A	170
8.3 実験機器	170
9 実験	172
9.1 エネルギー較正	172
9.2 NE102A での実験結果	172
9.3 BC454 での実験結果	172
9.4 検出効率	172
10 シミュレーション	180
10.1 シミュレーション1	187
10.2 シミュレーション2	187
10.3 シミュレーション3(シンチレータの厚さの影響)	187
10.4 厚さについて	187
10.5 シンチレーターの面積について	196
11 結論と課題	197
第IV部 無機シンチレータを用いた中性子検出システムの開発	198
12 目的	198
13 手段	199
13.1 GSO シンチレーター	199
13.2 NaI(Tl) シンチレーター	199
14 熱中性子の捕獲反応による中性子の測定	201
14.1 GSO(Ce) 検出器について	201
14.2 固有バックグラウンドの評価	204
14.3 中性子照射実験	207
14.4 検出効率の評価	207

15 非弾性散乱による高速中性子の測定	212
15.1 低エネルギー励起状態への励起現象の観測	214
15.2 低バックグラウンド環境におけるバックグラウンド測定	214
15.3 低バックグラウンド環境における高速中性子測定	219
15.4 検出効率	233
15.5 通常環境における測定	234
16 感度評価	238
17 シミュレーション計算による無機シンチレータの中性子計測への応用の検討	239
17.1 BGO 検出器に関するシミュレーション計算	239
17.2 GSO 検出器に関するシミュレーション計算	265
17.3 中性子計測における無機シンチレータの有用性の評価	305
18 応用の可能性について	306
18.1 GSO(Ce) シンチレーターについて	306
18.2 NaI(Tl) シンチレーターについて	306
19 まとめ	309
第 V 部 結語	310

第Ⅰ部

序論

1 序説

本報告は、核燃料サイクル開発機構との契約により、平成15年度に実施された業務の成果を記述するものである。核燃料サイクル開発に代表される放射線発生によって経済活動を行う際に、避けて通れない放射線測定技術開発について、研究業務を実施した。本業務実施の背景には、基幹エネルギーの一つである原子力発電とその燃料サイクルについて、その安全性を更に保証する技術を開発することにより、その有用性が一般社会に受容される必要性があることがあげられる。また現代社会においては、原子力産業以外の産業分野においても、放射線発生装置は経済活動と切り離せなくなりつつあり、それらの分野においても原子力技術の応用が避けられないことも見逃せない。

原子炉で発生する多量の高速中性子は、通常の運転においては十分な遮蔽材によって外部への漏れを防いでいる。しかし、異常時においては、外部への中性子の漏れが発生することが予想される。原子炉外部への中性子の漏れは、周辺環境及び人体に大きな悪影響を及ぼすため、わずかな異常を検出し、迅速に対応する体制を整える事は緊急かつ重要な課題である。中性子線束を高感度かつ高精度に計測し、モニターするシステムを開発することによって緊急事態の迅速な発見を目指す姿勢は、原子力技術の普遍化には欠かせない。

本報告の目標とする放射線測定技術開発については、昨年度に引き続き、今回の業務では開発余地の大きく残る中性子測定技術の開発を主目標においた。中性子測定については、熱中性子と速中性子の同一システムにおける測定には困難が伴うため、作業環境中の中性子を測定する際にはどちらかに測定目標を絞って測定せざるを得なかった。今回開発業務を実施した検出概念では、熱中性子と速中性子を基本的に同一のシステムにより測定可能であり、応用範囲が広いことが予想される。

以下、本報告書について簡単に述べる。

第Ⅰ部において、中性子測定技術について概説した

第Ⅱ部においては有機液体シンチレータを利用した熱中性子・速中性子同時測定システムの開発状況について述べた。昨年度に速中性子測定も可能である事が示された同システムについて、その速中性子に対する感度の評価を、線源を用いた実験、シミュレーション計算により実施した。また、核破碎反応を用いて、加速器からの陽子ビームを速中性子束に変換し、検出器の速中性子に対する感度調査実験を実施した。

第Ⅲ部においては、長期保守の比較的容易なプラスチックシンチレータを用いた環境中性子モニタシステムの開発研究について述べた。

第Ⅳ部においては、長期保守の比較的容易な無機シンチレータを用いた環境中性子モニタシステムの開発研究について述べた。今回は、BGO、GSO、そしてNaIについて中性子線に対する応答を測定した。また、BGO、GSOについてはシミュレーション計算により、速中性子に対する感度の評価を実施した。

第Ⅴ部においては、本年度研究開発事項について総括を行った。

2 中性子計測方法

中性子は陽子と同じ原子核を構成する粒子で強い相互作用を行い原子核と散乱する。しかし陽子と異なり電荷をもたないために電磁相互作用を行なわないので、遮蔽することが難しい。また同様の理由により計測することも難しい。その計測のためには何らかの原子核反応を引き起こして荷電粒子に変換する必要がある。このために中性子に関しては全ての力学的変数（エネルギーと運動量）を一度に測定できる確立した検出方法が存在しない。

中性子は多くの場合物質を素通りするが、ひとたび原子核と反応すると比較的大きなエネルギーを解放することになり、例えば人体に関しては体内深部での影響が無視できない。一方ではこういった特性を利用して体内内部の癌の治療にも使われている。こういった一般的な被爆を避けることや治療時の線量の最適化のためには中性子線の線量の測定が不可欠であるが、それぞれのケースに応じた最適な方法を用いる必要がある。

中性子が物質に入射するとその物質内の原子核と強い相互作用を行い荷電粒子を生成する。荷電粒子としては陽子が主であるが、より重い原子核（ α 粒子等）を生成することもある。特に重い原子核が反跳される場合は半導体メモリーでのエラー率の評価に重要になってくる [1]。どういう粒子が発生するかは主に中性子のエネルギーと標的の原子核によって決まっている。自然界で生成される中性子は地上ではほとんどが宇宙線起源である。宇宙線の主成分であるミューオンが原子核と相互作用してまず比較的高いエネルギーの高い中性子が生成される。これは数から数 10MeV の領域のエネルギーの中性子である。こういうエネルギーの高い中性子を速中性子と呼んでいる。中性子は廻りの物質との各種の反応（散乱）を通してエネルギーを失っていき、やがて平均のエネルギーが環境の温度と等しい熱中性子となる。熱中性子と呼ばれるエネルギーの中性子は原子核を壊す様な反応は比較的起こさず、いずれは (n, γ) 反応で原子核に吸収される。熱中性子となっている時間が長いので自然界の中性子線束は熱中性子が主である。しかし速中性子は影響が大きいのでその線束の測定は重要である。同じ中性子であるが、熱中性子と速中性子の測定方法はかなり異なる。

参考に熱中性子から速中性子までのエネルギーレベルでの分類を以下に表 1 に示す。

表 1: 中性子の種類

高速中性子	0.5MeV 以上
中速中性子	0.1~500keV
遅い中性子	0.1keV 以下
熱中性子	~0.025eV

2.1 熱中性子測定方法

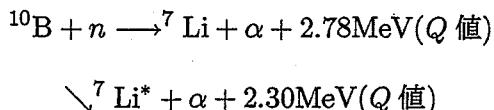
中性子は物質との散乱を通してエネルギーを失っていく。エネルギーの高いものはかなり急速にエネルギーが減少していく。最終的には周囲の物質の温度 T と熱平衡に達する。このときエネルギー分布はマクスウェル・ボルツマン分布に従う。熱中性子 1 個が持つ平均の運動エネルギーは $\frac{1}{2}mv^2$ は $\frac{3}{2}kT$ (k はボルツマン定数) で $T=293K$ で $E_0=0.0252eV$ である。熱中性子の運動エネルギーは基本的にゼロといえる。中性子の検出にはなんらかの原子核反応を用いる必要があるが、熱中性子の

場合反応の Q 値が正である発熱反応が必要である。また反応の断面積が大きいことも重要になる。典型的な例として中重核をとれば中性子は平均して 8MeV ほどの束縛エネルギーで束縛されているので、中性子を吸収する反応 (n, γ) 反応は発熱反応である。多くの Q 値の高い標的核が知られており、特に全エネルギーを測定できるカロリメーター的な検出器では比較的バックグラウンドも少なく用いられることが多い。しかし γ 線は非常に一般的なバックグラウンドであり、また多くの γ 線があるので、どの反応から発せられたかを同定するには高分解能な検出器 (Ge など) が必要で、これまでは簡便な汎用性のある検出器には向かないと考えられている。 γ 線のバックグラウンドの少ない測定をするには原子核反応で終状態に荷電粒子を発生させ、かつそのエネルギーが高い反応が向いている。

現在のところ、実際に検出に用いられるのは概ね、以下の 4 つの反応である。

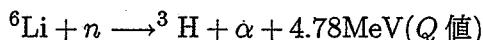
- $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$
- $^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$
- $^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$
- ^{235}U の核分裂

以下それぞれの反応の特徴を考察する。まず ^{10}B 標的の反応過程と Q 値は以下のようである。



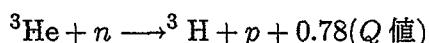
終状態の ^7Li は約 94% が励起状態にいる。励起状態は更に γ 線を放出して基底状態におちる。 α 粒子と ^7Li に分かれるが、運動エネルギーの $7/11$ は α 粒子が持つ。自然界でホウ素 (B) は ^{11}B が約 80 % と主でこの反応を引き起こす ^{10}B は 20 % と少ない。検出器を作るときは ^{10}B を濃縮したものを使うことが多い。

次に ^6Li 標的の反応過程と Q 値は



となる。この反応の Q 値は大きく検出が容易である。また γ 線を一切発生させない。 ^6Li は 7.5 % しか存在せず、残りは ^7Li である。この場合も ^6Li 同位体を濃縮させた物質で検出器を作ることが多い。

3 番目の ^3He 標的の反応過程



である。この反応は特に Q 値が大きいわけでもないが、中性子のエネルギーがある程度高くてこの反応しか起こらないことと、放出される陽子の運動エネルギーの測定が比較的正確に出来ることから中性子のエネルギーを直接測定できるほとんど唯一ともいえる検出器である。しかし標的となる ^3He は非常に高価でかつ密度をあげることが出来ないために大量に用意することもかなわず、検出効率の点からは限界がある。

^{10}B , ^6Li , ^3He の反応断面積を図 1 に示した。

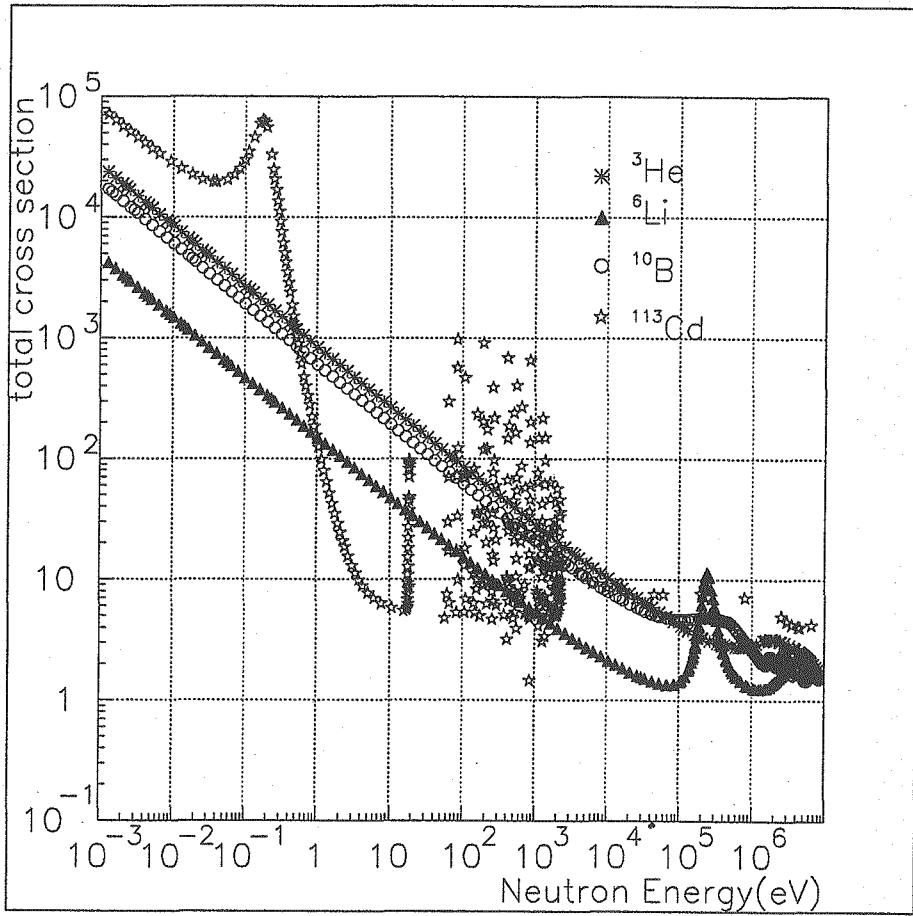


図 1: 热中性子 (Thremal Neutron) と ^{10}B などの反応の断面積

重いために複雑な構造をもつ ^{113}Cd 標的を除けば反応断面積のエネルギー依存性は素直にほぼ $1/v$ 法則に従っている。これは中性子の波長が断面積のエネルギー依存性を決めていることを意味し、量子力学が端的に現れる例である。熱中性子のスペクトルは

$$\frac{dI}{dE} = \sqrt{E_n} \exp(-E_n/T)$$

と表されるので、このエネルギースペクトルで断面積のエネルギー依存性を平均したものが熱中性子の断面積と呼ばれるものである。断面積が $1/v$ 法則に従うので評価が解析的に可能になる。

本報告においては、有機シンチレータとの組み合わせとしては ^{10}B の反応を利用するものとした。それは最終的には速中性子の線量を環境放射線よりさらに小さなところまで測定することを目的としているからである。ホウ素は液体シンチレーターに溶かし込むことが出来、同時にホウ素の入手の容易さのために大型化に適している。小さな線量を測りたいとき検出器の大型化が可能であることは本質的に重要である。また γ 線を放出するのは一見バックグラウンドの点から問題になりそうだが後に説明するように連続する信号を捕らえることで中性子を同定でき、またその方法が正しく行われているかどうかを γ 線の測定を通して確認できる。

2.2 速中性子測定方法

熱中性子の測定では発熱反応を用いる必要があった。しかし速中性子はもともと持っているエネルギーが高いために反応が特に発熱反応であることを要求しない。反応率に関してはエネルギーが上がると低下することは避けられない。低エネルギー領域で断面積が大きいことは中性子の波長に関係する本質的な特徴といえる。よって速中性子の測定にはある程度以上の大きさの検出器が不可欠である。

高速中性子の測定方法でよく用いられるのは、陽子を反跳させて測定する方法である。この方法は、高速中性子が物質中の陽子と衝突することで陽子にエネルギーを移行させることから始まる。中性子と原子核との間に働く力は、両者がきわめて短い距離まで近づかないと働くないので、中性子と核との衝突は二つの剛体球の間の弾性衝突とよく似ている [25]。陽子は中性子とほぼ同じ質量を持つために前方に散乱されれば中性子の持つほぼ全てのエネルギーを受け取ることになる。非常な高エネルギー領域では陽子は中性子によって反跳されるというよりは中性子と陽子の間に電荷をもった π 中間子が交換されることであたかも陽子が中性子に反跳されるというより元々の中性子が陽子に変わってそのまま進むといった過程の方が多くなる。それは数 10 から 100 MeV を超えるあたりで主たる過程になる。エネルギーを得た陽子は荷電粒子であるので通常の検出器で容易に検出できる。

このように高速中性子が物質中をどのように減速していくかを追ってみる。高速中性子は特に弾性散乱で多くのエネルギーを失う。高速中性子のエネルギー領域では非相対論的に扱っても十分であることから、中性子の速度を v_0 とすると中性子のエネルギー E_0 は $m_n v_0^2 / 2$ と書ける。いま、中性子の質量を $m_n=1$ で考えると、質量数 A の原子核の質量は A である。重心系の散乱角を θ_{cm} とすると、散乱後の中性子のエネルギーは、

$$E = E_0 \frac{A^2 + 1 + 2A \cos \theta_{cm}}{(A + 1)^2}$$

と計算される。このように中性子と原子核との弾性散乱を考えれば、原子核の質量数 A が小さい程、中性子が失う運動エネルギーは大きくなる。したがって、中性子は $A=1$ の陽子との衝突で運

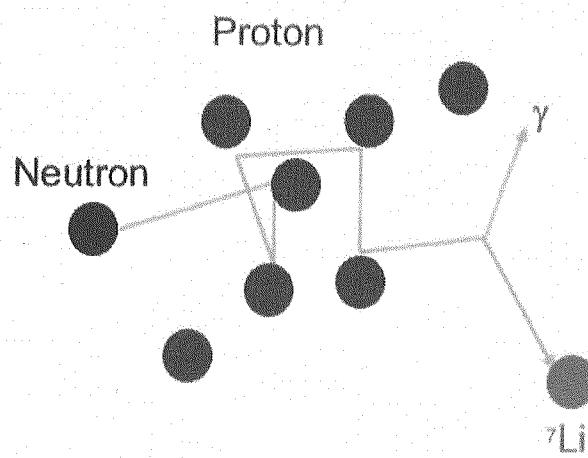


図 2: 陽子反跳法の概念図 1

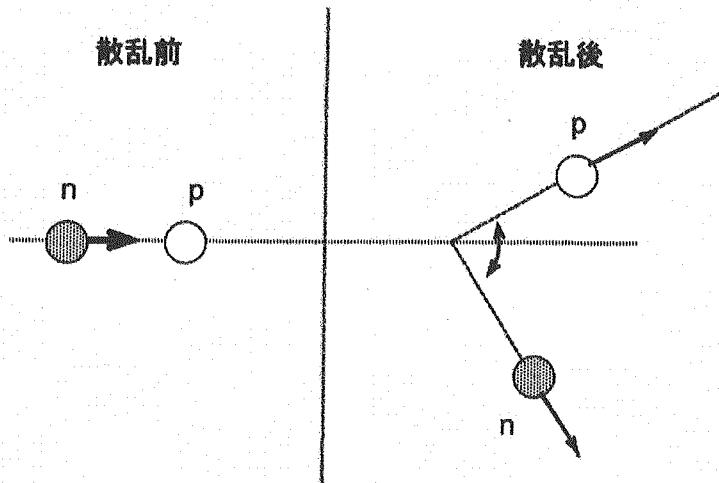


図 3: 陽子反跳法の概念図 2

動エネルギーをもっとも大きく失うので、高速の中性子は水やパラフィンのような水素を含む物質の中を拡散していく間にどんどん減速されて、数十回の衝突で熱中性子になる。

2.3 既存の中性子検出器

2.3.1 比例計数管

BF₃ 比例計数管 比例計数管の充填ガスに濃縮した ¹⁰B を含む BF₃ として封入すると低速中性子の計測装置として機能する。上記で述べたように、低速中性子は ¹⁰B と中性子捕獲反応を起こして α 線を発生する。この反応の Q 値は $Q = 2.8\text{MeV}$ [15] である。発生した α 線による電離作用を利用して中性子を計測する。上の反応に対する反応断面積は $\sigma(n, \alpha) = 3838.0\text{barn}$ [15] の大きな値を持つため、熱中性子に対しては 90% の絶対効率を有する。

ロングカウンター BF_3 比例計数管の周囲を、パラフィンなどの減速材で包んだ計数管をロングカウンターとよぶ。これは $10\text{keV} \sim 3\text{MeV}$ にわたる広いエネルギー領域の中性子に対して同程度の検出効率をもつ。しかし、検出効率は 1% 程度である。

^3He 比例計数管 比例計数管の充填ガスに ^3He を封入すると、熱中性子の計測装置として機能する。 ^3He の熱中性子捕獲断面積は ^{10}B のそれよりも大きい $\sigma(n, p) = 5330\text{barn}$ を持つため、高い検出効率が得られる。この反応の Q 値は $Q = 0.76\text{MeV}$ [15] である。

2.3.2 シンチレータ

有機液体シンチレーター 高速中性子計測に用いられる代表的な液体シンチレーターには、NE213 や BC501A などがある。これらの有機液体シンチレーターでは陽子と高速中性子の弾性散乱によって発生する高速陽子による蛍光を観測する。有機液体シンチレーターの蛍光信号波形は、入射放射線の種類によってその時定数が異なることが知られている。

CAMAC などのデジタルモジュールが開発される以前は、NIM 規格の波形弁別装置と高時間分解能のディスクリミネーター (Constant Fraction Discriminator; CFD) との組み合わせによって中性子と γ 線とを弁別していた。最近は廉価で集積度の高いデジタル回路が CAMAC, VME 規格の回路で販売されるようになったため、NIM 規格の回路で波形弁別を行う実験は少なくなり、Analog-to-Digital Converter (ADC) へ入力する信号のタイミングを調整して波形弁別を行っている[16]。

信号のタイミングを調整して波形弁別を行う方法の原理図を図 4 に示す。

図に示すように、一つの光電子増倍管から出力される電流パルス信号を二つに分け、それぞれ異なるタイミングで ADC に入力する。図の信号波形のうち、実線で示す波形は γ 線による信号波形、破線で示す波形は中性子による信号波形をしめす。この図では差がわかるように二種類の信号波形を同時に示している。縦の破線で囲まれた時間に入力された電流パルスによる電荷を積分すると、 γ 線による信号と、中性子による信号では、信号全体を積分しない方の電荷量に大きな差が現れることがわかる。この電荷量の違いはシンチレーターの蛍光の減衰時間の違いによるものであるから、両者の積分値の違いを比較することによってシンチレーターで反応した放射線 (γ 線と中性子線) の弁別ができる。

このような原理で、高速中性子を比較的高い効率で検出し、蛍光量は反跳陽子の運動エネルギーに比例することから、有機液体シンチレーターを用いて中性子のエネルギースペクトルを測定することも可能である。しかしながら、異常な中性子束の測定にとってエネルギースペクトルを測定できることは重要な性能ではない。原子炉施設においては、長期間にわたる安定なモニタリングが必要とされる性能であるが、有機液体シンチレーターは、溶存酸素によるクエンチングを防ぐため、定期的に抜気作業を行わなければならない。また、密度は高くないため、高い計数効率で中性子束を計測するためには、大容量の装置が必要になる。従って広範囲かつ多種多様な場所における中性子モニタリングには問題がある。

プラスチックシンチレータ プラスチックシンチレータは、中性子に対する反応としては液体シンチレータと同じ機構を持ち、取り扱いがしやすく、パルス計数ができる特性を持つ。特に、組成が人体のそれと似ていることから、放射線治療施設等での人体への線量評価にも資することが可能で

ある。

無機固体シンチレーター 無機固体シンチレーターは密度が高いうえ、物性が安定であるため、長期間の連続運転に適している。そのため、この研究では無機固体シンチレーターによる中性子モニタリングの可能性を検討した。図5にみられるように、同等の検出効率を持つ有機液体シンチレーターと無機固体シンチレーターでは、後者の大きさが圧倒的に小さいため、モニタリングシステムの小型化によって、多種多様な場所への設置が可能になると考えられる。

中性子測定には、



反応による陽子を検出する LiI(Eu) シンチレーターが広く使われている。これは熱中性子に有効であるが、高速中性子の計測のためには大きな減速材を使用する必要がある。さらに、中性子による反応で生成される ${}^3\text{H}$ による放射線の影響が無視できなくなり、長期間のモニタリングおよび強い中性子束の照射によって検出器としての性能を劣化させる。

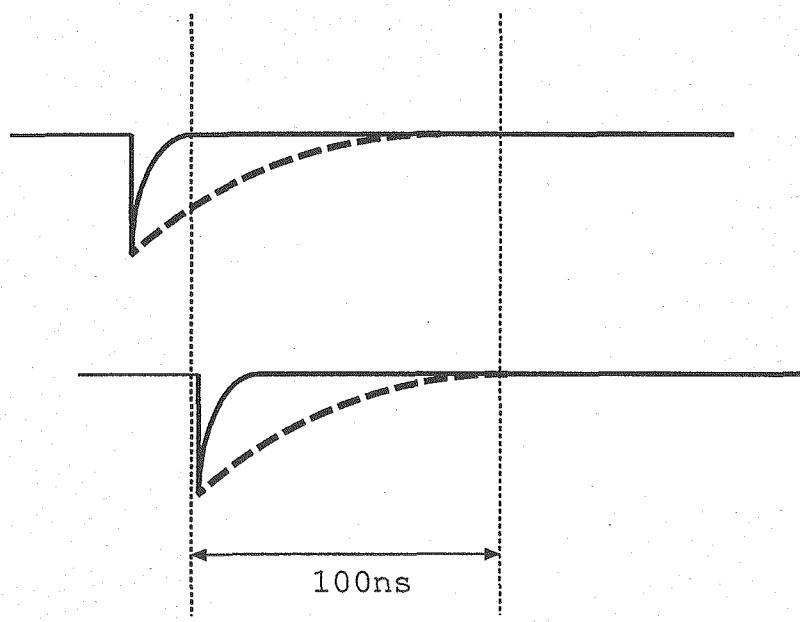


図 4: 光電子増倍管の出力信号を二つに分割し、異なるタイミングで積分している。それぞれの信号において、実線は γ 線による信号、破線は中性子による信号を示す。2 本の縦線で囲んだ時間領域に入力した電荷を積分する。

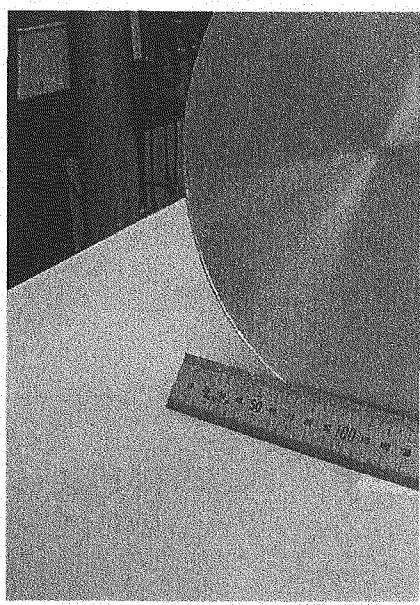


図 5: 右側: NaI(Tl) シンチレーター。左側: 有機液体シンチレーター (BC501A)

第II部

液体シンチレータを用いた速・熱中性子同時検出システムの開発

第II部では¹⁰Bをドープした液体シンチレーターであるBC-523Aを用いた速中性子線束測定について報告する。本検出器の採用により、熱・速中性子の同時検出システムの開発が可能であり、これまでに本研究において熱中性子に対しては測定法を開発してきた。同検出器を用い、中性子線の線束測定法を確立することで、速・熱同時検出システムは実現可能である。

以下、これまでの研究経緯、検出システムの概略説明、シミュレーション計算による速中性子への応答反応の感度評価、中性子線源と加速器ビームを用いた感度評価試験について述べる。

3 ¹⁰B混入の液体シンチレータを中心とした中性子線束測定システム

本項目では以下の様な今までの研究経過を紹介する。

3.1 热中性子線束測定

3.1.1 LiIシンチレーターによる測定

⁶Liを含む検出器としてはLiIシンチレーターを用いて中性子線束測定を行った。結晶は2"φx2"のサイズで⁶Liを93%まで濃縮したものを用いた。地下の実験室で約2日間の測定の結果100 keV以上のfast neutronのflux積分値として、

$$Flux = 6.4 \times 10^{-3} n/cm^2/s$$

という値を得た。LiIシンチレーターは光電子増倍管を取り付けるだけで測定が可能で計測システムが比較的簡便という利点がある。しかしLiIに含まれるヨウ素はγ線に対する感度が高く、γ線のバックグラウンドの評価に不定性がどうしても残る。よってより感度の高い測定に向けては次節で説明するBC-523(A)を使う測定の研究を進めた。⁶Liを用いる検出器にはLiを含むガラスのシンチレーターなどもあるが、小型で熱中性子のみを測定する目的に使われており、本研究の目的である速中性子に計測には向いていない。

3.1.2 BC-523Aを用いる測定

続いてBICRON社のBC-523(A)を使った熱中性子線束測定を行なった[3][4]。BC-523は液体シンチレーターにホウ素をドープしたシンチレーターであるが、その中のホウ素を¹⁰Bがほとんどになるように濃縮したものをBC-523(A)と呼んでいる。一般に中性子検出器はγ線にも感度があり、それを如何に分けるかが重要なポイントとなる。このときは液体シンチレーターが一般的にもつパルス波形の違いを利用して弁別する技法を用いた。これはPulse shape discriminator(略してPSD方法)と呼ばれている。低レベル地下実験施設での熱中性子束は $3.6 \times 10^{-6} n/cm^2/s$ であった。液体シンチレーターの信号は時間的に非常に早い。図6に典型的なパルスが描かれているが、ほぼ

表 2: 様々な検出器の比較

	Gran Sasso	INS	OULNS	LiH	BC-523A
形状	円筒形	球形	円筒形	円筒形	箱型
大きさ	$5\phi \times 1m$	5ϕ	$2.5\phi \times 34.8cm$	$2.54\phi \times 2.54cm$	$4.5cm \times 4.5cm \times 6cm \times 6cm$
検出器	3He (気体)	3He (気体)	BF_3 (気体)	LiH(固体)	^{10}B (液体)
圧力	3atom	10atom	0.789atom		
感度	844.3	93.9	13.8	2195.6	1070
参照	[7]	[8]	[9]	[2]	[3][4]

表 3: 様々な場所での高速中性子束

場所	Gran Sasso	神岡	Modane	Broken Hill	Oto
depth(w.e.)	3950	3000	4800	3200	~ 1200
中性子束 ($/cm^{-2}s^{-1}$)					
高速	2.56×10^{-6}	3.3×10^{-6}	4.0×10^{-6}		4.0×10^{-5}
中速	1.28×10^{-6}	2.5×10^{-5}		1.55×10^{-5}	
熱中性子	2.05×10^{-6}	1.4×10^{-5}	1.6×10^{-6}	1.94×10^{-5}	3.6×10^{-6}
検出器	3He (気体)	3He (気体)	6Li (液体)	3He (気体)	^{10}B (液体)
参照	[7]	[8]	[6]	[10]	[3]

20nsec程度の幅の信号である。 γ 線と荷電粒子の間のパルスの違いは非常に微妙であり、その計測は注意深く行わなければならない。一般的にはパルスを立ち上がりの部分と立下りの部分に分けてそれぞれの面積を測定すると言った方法が用いられている。また実質的にそういった操作を行うPSD回路が市販されている。PSDは低エネルギーの信号ではノイズ等の影響でパルスの形が安定せず波形の測定が難しい。よって低エネルギー領域での中性子と γ 線の弁別は一般的には難しい。

このときの測定では最終的に 7Li の励起状態からの γ 線まで同時計測して中性子を計測したのでバックグラウンドはかなり抑えられた測定に出来たが、一方では速中性子にはほとんど感度を持たない測定になっている。

この測定による結果とその他の中性子束測定の比較を表2,3に示した。

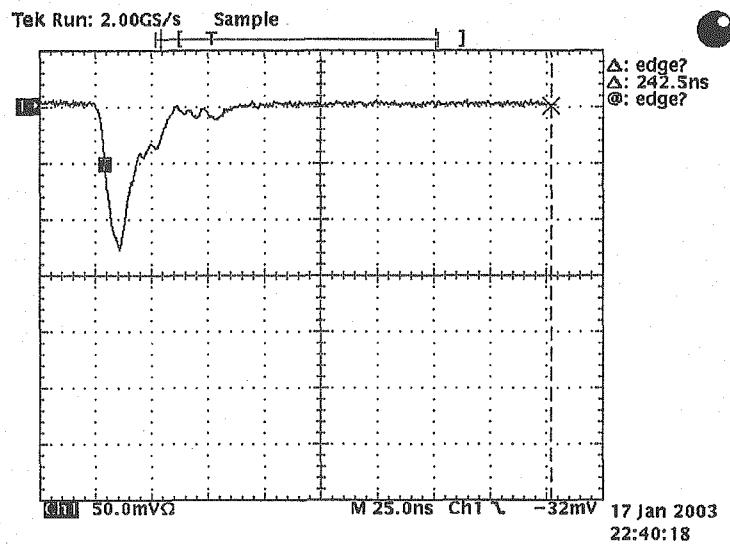


図 6: BC-523A の PMT 信号

表 4: Properties of BC-523A

¹⁰ B Content	4.41%
Density	0.916 g/cm ³
Light output	65% anthracene
Decay time,short component	3.7nsec
Wavelength of maximum emission	424nm
Bulk light attenuation	> 4 meters
Refractive	1.415

表 5: Atomic Composition

No. of H atoms per cm ³	4.98 × 10 ²²
No. of C atoms per cm ³	2.86 × 10 ²²
No. of O atoms per cm ³	0.811 × 10 ²²
No. of ¹⁰ B atoms per cm ³	0.243 × 10 ²²
No. of ¹¹ B atoms per cm ³	0.027 × 10 ²²

3.2 BC-523A による速中性子線束測定

本項目では BC-523(A) 液体シンチレーターを用いた速中性子線束測定について報告する。実施方法は以下のとおりである。

3.2.1 BC-523A

BC-523A [11] は BICRON 社の製品の一つで、¹⁰B を多量に含んだ 1,2,4-trimethylbenzene (以下 Pseudocumene) ベースの液体シンチレータである (表 4,5)。BICRON 社製の液体シンチレーターで ¹⁰B を含む BC-523 と呼ばれる製品があるが、¹⁰B の濃度は BC-523A は BC-523 の約 5 倍に濃縮されている。今回使用する BC-523A は比較的高価なため、安価な Pseudocumene により希釈し容量を増やして使用できるかの可能性も探ること、また速中性子に対する感度を向上させるため、希釈した上での使用する可能性を追求した。

3.2.2 ¹⁰B(n,α)⁷Li 反応

今回の研究では高速中性子を測定するために、高速中性子と陽子そして熱中性子と ¹⁰B の二段階の反応を利用し測定する。具体的には、高速中性子が液体シンチレータ中の陽子と反発ながら高速中性子自身の運動エネルギーを落としていく。反発された陽子はもちろん荷電粒子なのでシンチレーション信号を発生させ、その信号を PMT で捕まえることができる。エネルギーを失った中性子はやがて熱中性子の領域に入り、¹⁰B に吸収され (n,α) 反応を起こす [7]。この反応時に出る α を

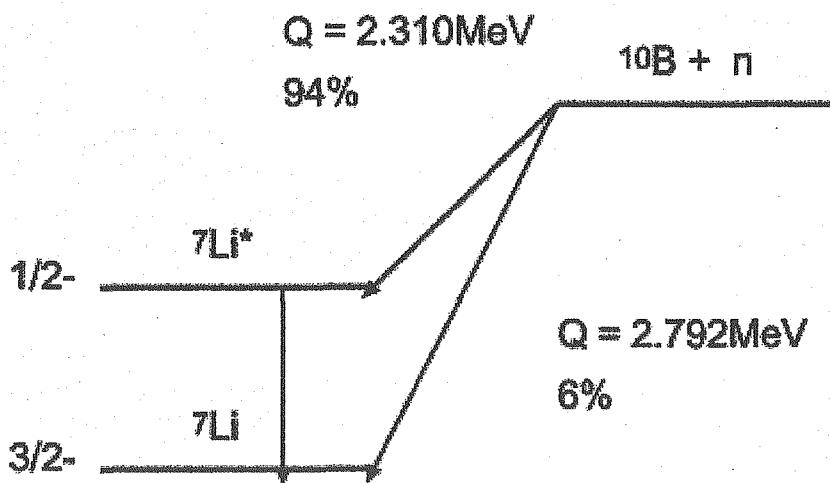


図 7: Decay mode

PMT で検出し、陽子による信号との coincidence を取ることにより速中性子を検出する (Delayed α 測定)。

3.2.3 測定回路系

Delayed α 測定は図 8 に示される回路で達成できる。 (n,α) 反応により出てきた二次粒子の α はこれまでの BC-523 などでの中性子測定により [5] 約 60keV のエネルギーを持っていることが予想される。実際には Q 値に対応する 2.3 MeV のエネルギーが解放されるが、電子より重い荷電粒子は液体シンチレーター中でもとのエネルギーより小さく見えることが知られており、その因子を quenching factor と呼んでいる。この場合正しくは約 60keVee と書くべきで、付け足された ee は electron equivalent の略である。よって 60keV になるかどうかは液体シンチレーターの特性による。今回使用した検出器では 60 keV になっており、よって Discri.(Low) と Discri.(High) で

$$40\text{keV} \leq \text{Threshold} \leq 80\text{keV}$$

の領域を選定する。また、この二次粒子が一次粒子（反跳陽子）によって作られた信号と遅延同時計数するように Interval generator や Delay, OR, AND 回路等を組み合わせており、一次粒子による信号の後、ある時間内に約 60keV の信号が来た時だけ一次粒子による信号を測定する回路となっている。

これらの回路によって、60keV 付近の α を選ぶことはできる。さらに、陽子を反蹴した時の信号と Discri. によって Energy 選定した二次粒子である α を Coincidence する Delayed α 法により高速中性子を測定していく。反蹴陽子の信号と α の信号のタイミングは、図 9 に示すように、二次粒子が約 60keV の α の信号で Coincidence Gate 幅の中に入ってくるような場合を ADC で一次粒子を測定するようにしている。CoincidenceGate と 60keV の信号が Coincidence するような場合、ADC の信号を取る (図 9)。もし二次粒子として 60keV の信号を得られない場合、ADC をクリアーするようにしている (図 10)。

得られるエネルギースペクトルは電子換算エネルギー (e.e.) となる。そこで、目安として得られ

表 6: 回路説明

回路	説明
Divider	信号を分ける
Discri.	閾値を決める
Logic Unit	AND 回路
OR	OR 回路
Int. Gen.	Interval 作成回路
Gate Gen.	Gate 作成回路
OutPut Gen.	LAM を立てる
Delay	信号を遅らせる
ADC	アナログ信号をデジタル信号に変える

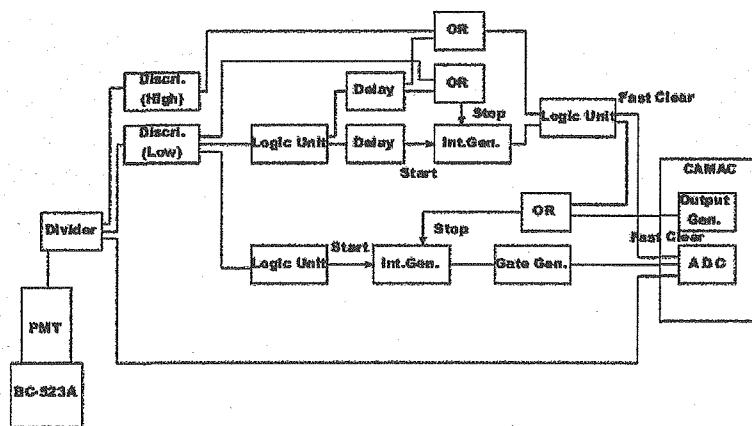


図 8: Fast Neutron 測定システム

たスペクトルを中性子のエネルギーに換算するために、[5] から引用したグラフを載せる(図 11)。

3.3 データ収集 (DAQ) システム

本研究では測定装置自体のポータビリティの向上も目指している。このために測定装置のコンパクト化を行い持ち運びを容易にした。その結果電源さえあればすぐにでも測定できるシステムが構成できた。計算機をノート型 PC にて CAMAC Crate は半分の Half Crate を選択した(表 7)。また、データを取るためのソフトウェアには以上の様な構成に対応している KODAQ を採用した。

中性子の計測には比較的標準的な NIM の回路系とコンピューターを基礎にしたデータ収集系を用いるのが一般的である。これらのシステムは各種の測定に対応でき汎用性が高いが、一方でシステムが比較的大がかりになり、携帯性に欠ける。そこで我々は比較的高い汎用性を維持しながら、携帯性も満たす上記の組み合わせで計測システムを構築した。データをコンピューターで処理可能な信号に変換する為に CAMAC を使用した。現在これよりハンディなシステムでは測定上の自由

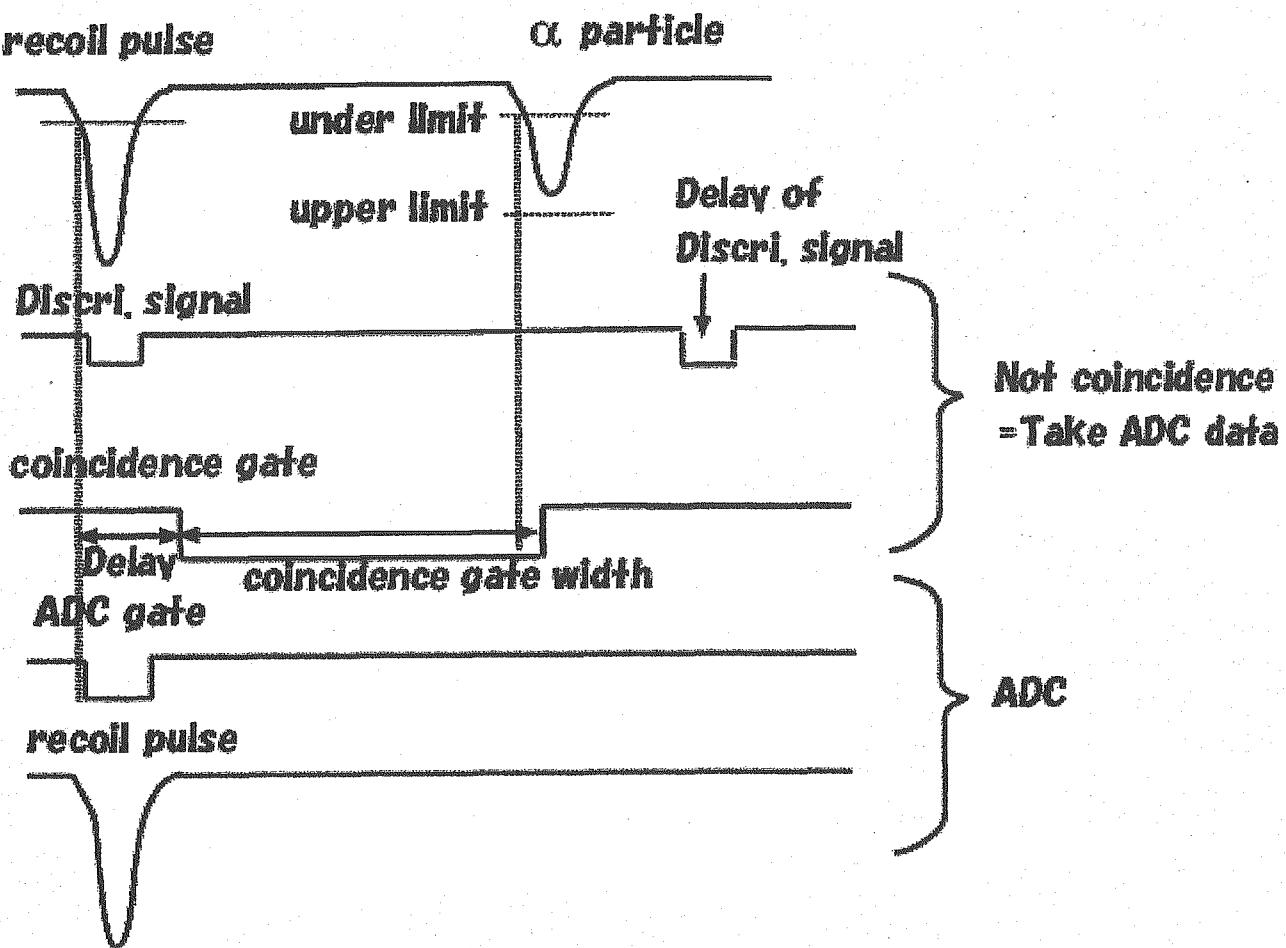


図 9: 1st pulse を ADC でとる場合

度が制限されてしまい、適応力がそがれる。

但し、大きな場所をとり且つ重いクレートを、半分のサイズにすることで利便性を達成した。サイズが半分になることで使用するモジュールの電源容量が非常に少なくなったので電源部がコンパクト化され実感としては重さは半分以下である。半分のサイズになったことで使える信号処理モジュール数には制限があるが、実際に必要なモジュールは十分サポートできるので今回の様に中性子に特化した測定では半分でも十分で、汎用性は損なわれない。コンピューターは CAMAC からの信号を処理するためにバスに直接インターフェースカードを繋げる必要がある。そのため、信号処理用としてデスクトップパソコンが良く使われているが、ノートブックサイズのコンピューターでも ISA バスのあるものを使用することで実用上問題ない測定が可能になっている。

3.4 検出器大型化の技術的裏付け

検出器を検討する上で必要な要素についてもう一度見ておこう。速中性子が検出器に入ると検出器内の原子核と散乱を行なう。その中で陽子との散乱は確率が大きいだけでなく、散乱で中性子の

recoil pulse

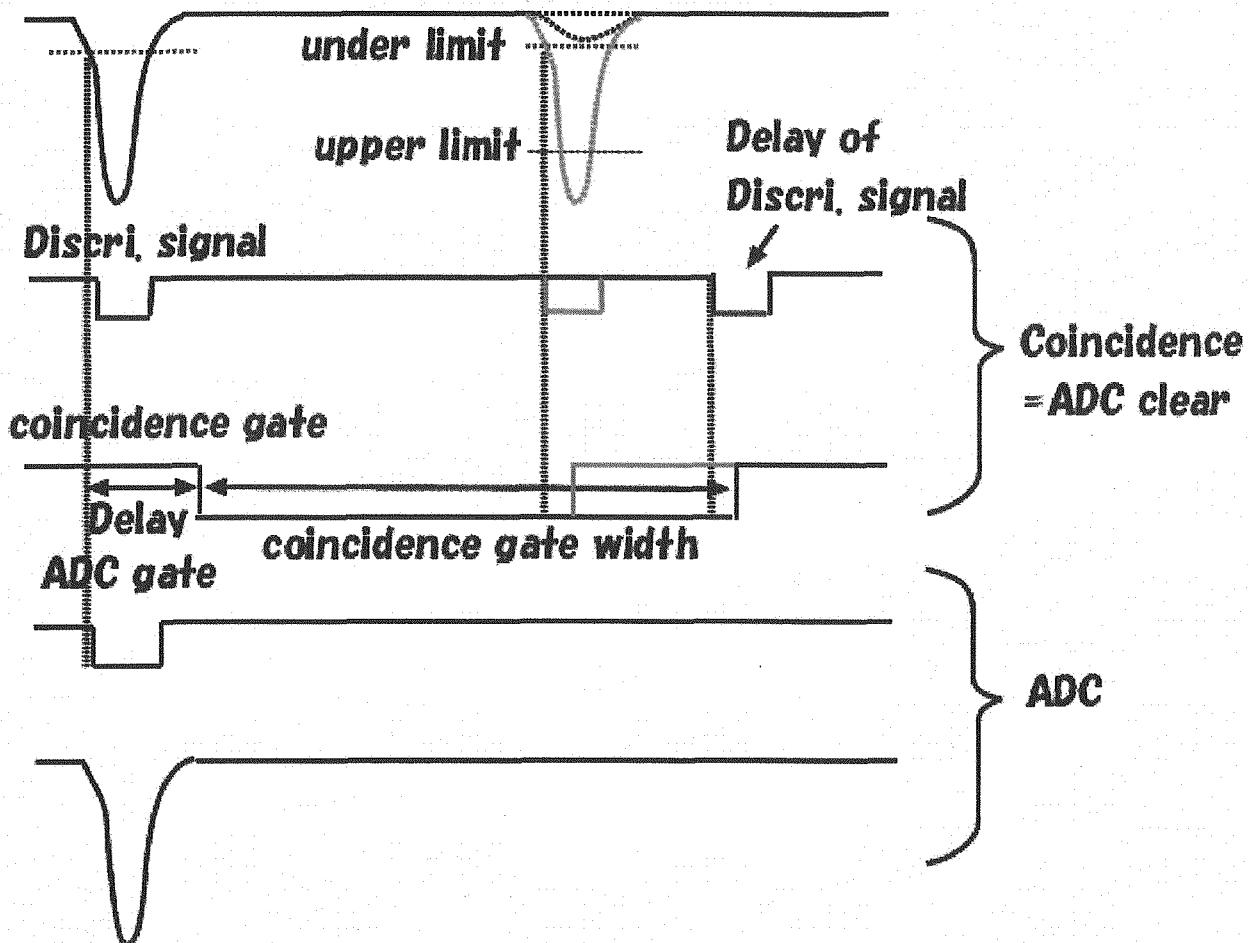


図 10: 1st pulse をクリアーする場合

エネルギーが平均して半分になるという大きな特徴がある。中性子は他の原子核の ^{12}C や ^{16}O とも散乱するが、これらとの散乱は中性子エネルギーの減少が比較的少なく、熱中性子を作る過程には寄与しない。この時、中性子によって反跳された陽子が検出器中でエネルギーを失い、最初の信号を形成する。中性子と陽子との散乱断面積は、中性子のエネルギーが下がるにつれて大きくなる。それ故、速中性子は一度エネルギーを失うと急激に減速していき、ついには熱中性子となる。熱中性子になると散乱は行なうが、標的である陽子のエネルギーと中性子の運動エネルギーが大差無くなる結果、エネルギーの減少は起こらず散乱を繰り返す。この間に検出器中の ^{10}B に吸収され、 (n, α) 反応により荷電粒子となり検出される。ここで ^{10}B に吸収されることを中性子の証拠としているのは測定したい速中性子のエネルギーが数～数 10 MeV のエネルギー領域であることによる。それより更にエネルギーの高い速中性子だと、反跳された陽子のエネルギーが十分高い現象だけを選んでも検出効率が落ちることなく、またその辺りでは γ 線のバックグラウンドが少ない上に PSD による弁別も有効なので単に大きなシンチレーターを用いてることで効率よく中性子を検出できる。但し、エネルギーを決定する方法として TOF (飛行時間法) ぐらいしかないので、いつ何処で中

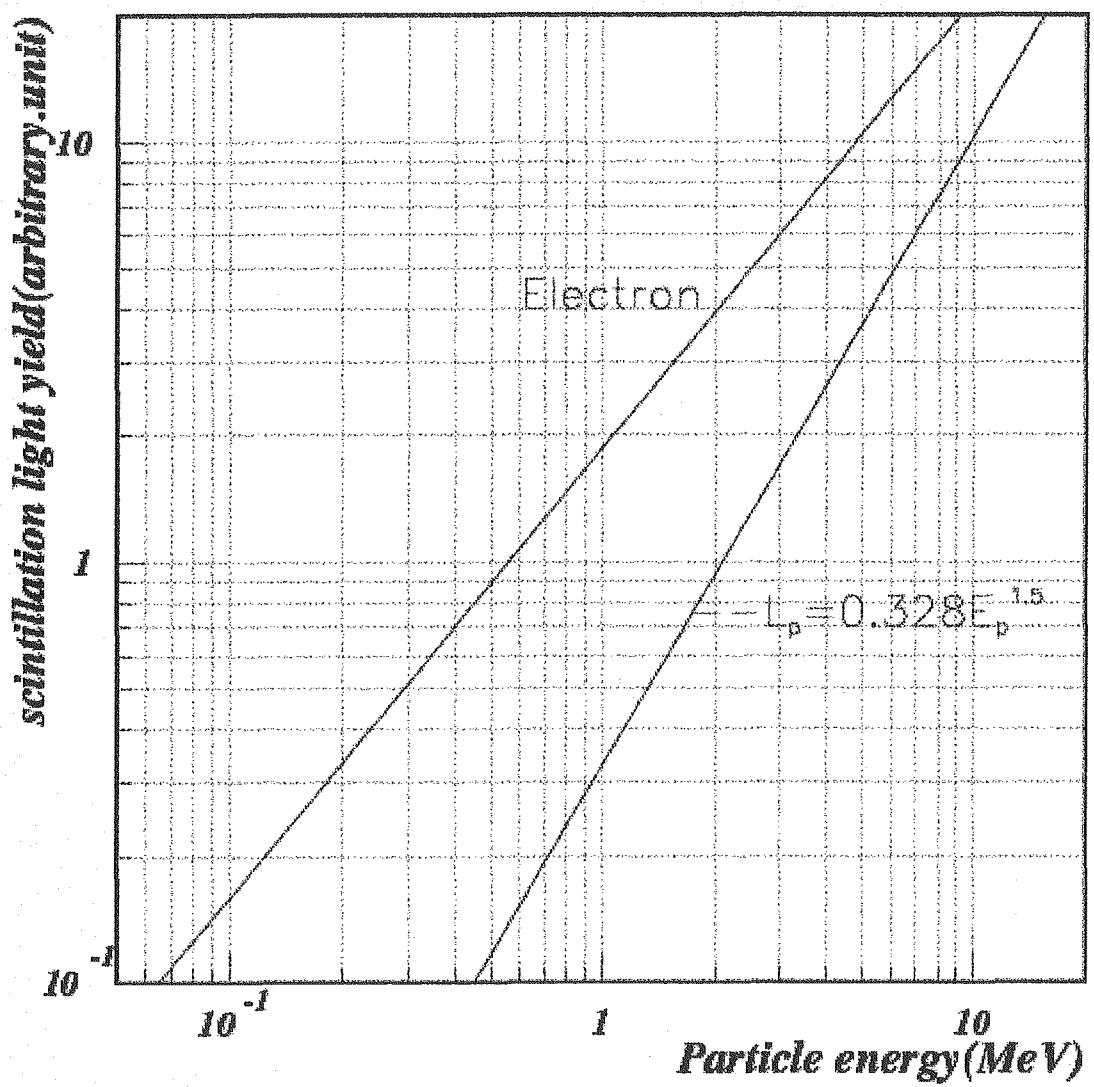


図 11: BC-523 への電子入射時と中性子入射時の相対光量出力比

表 7: モジュール

CAMAC	Hoshin Crate controller(CCP-F) Repic Half Crate
PC	sharp Mebius
OS	Windows98 Me
DAQ	KODAQ [12]

性子が発生したかという情報のない環境中性子の場合はエネルギーの計測が不可能である。

今まで進めて来た研究から微小な環境中性子を測定するためにはバックグラウンドとの弁別を高感度で行うために $^{10}\text{B}(n, \alpha)$ 反応が起こったことを要求することは是非とも必要であると考えられる。この要求は中性子が減速の過程で検出器から逃げ出してしまうと、検出されないことを意味する。また ^{10}B 以外の原子核に吸収されてしまっても検出されない。

速中性子と陽子或いは原子核との散乱断面積はエネルギーの高い速中性子に対しては小さいので検出器を大きくすることが必要である。しかし ^{10}B をドープした液体シンチレーターはかなり高価なものである。また大きくしたことによって実際高い検出効率が得られるかどうかは関連する全ての過程における断面積に関する知識を取り入れたシミュレーションが必要とされる。そしてシミュレーションが正しく答えを求めているかを示す実験が必要である。

最初の散乱を行なう段階では中性子のエネルギーは比較的高いので散乱断面積は小さい。この場合最初の散乱は検出器の中でほぼ一様に起こると考えて良いであろう。陽子との散乱で大きくエネルギーを失った中性子は原子核との散乱断面積が飛躍的に増大しているので比較的その近傍で熱中性子となり、最後に吸収される。一方であまりエネルギーを失わなかった中性子は長い距離を飛ぶ事になりやすく、検出器から逃げ出す確率も高い。またこれらの考察から大型検出器を安価に製作する方法も見えてくる。現在の検出器の構成では ^{10}B をドープしたことで検出器の価格が高くなっているが、 ^{10}B との散乱が検出器の大きさに比較して十分小さな範囲に収まるのであれば主成分である Pseudocumene で薄めることが可能になる。

4 シミュレーション

シミュレーションによって検出器の特性を調べる前に検出器の中で起こっている物理的過程から検出器に要求される特性を考察しておく。測定対象である、環境中性子は自然界に存在しているものと、人工的に作り出されたものの二種類に大別できる。前者の起源としては主に以下にあげる 3 種類になる。

1. 宇宙線ミューイオンの相互作用 (photonuclear interaction, muon capture) によるもの。
2. ^{238}U の自発核分裂によるもの。
3. $^{232}\text{Th}, ^{238}\text{U}$ の崩壊時における (α, n) 反応によるもの。

また、後者としては主に原子炉からのものが考えられる。このように、環境中性子は様々な起源のものの混合であり、一口に速中性子束と言ってもそのエネルギースペクトル・強度はまさに周囲の

環境によって異なることが容易に予測出来る。よって検出器としては、かなり広い範囲にわたるエネルギー領域に感度を持つものが望ましい。しかし現実的には難しいので、今回は速中性子のうち、100 keV - 3 MeV 付近の比較的低いエネルギーを持つ粒子の測定を考えることにする。このエネルギー領域では ^{252}Cf 線源を校正用に使用することが可能である。そのエネルギースペクトルは $T = 1.3 \text{ MeV}$ として

$$\frac{dN}{dE} = \sqrt{E} \exp\left(\frac{-E}{T}\right) \quad (2)$$

で与えられる。

中性子束は、単位面積あたり単位時間あたりの中性子の数として与えられる。前述したように、中性子の発生起源は様々なため、個々の中性子の持つ運動量方向はランダムにほぼ一様に分布していると考えられる。検出器内部に入射した速中性子はシンチレータを構成する原子核（主に陽子）と散乱を起こしエネルギーを失う。これを繰り返し、やがて熱中性子になるのだが、その前に検出器外部に逃げてしまうと測定出来ないことになる。よって検出器はなるべく対称性を持った形状で大体積のものが良いと考えられる。熱化した中性子は最後に ^{10}B に吸収されて (n, α) 反応を起こし、最初の散乱信号との遅延同時係数により計測されることになる。この両者の反応の間の遅延時間は ^{10}B の濃度によって決まり、熱化した中性子が検出器外部へ逃げる前に吸収することが感度を上げる上で重要である。

このように、検出器としてはなるべく大型のものでかつ、 ^{10}B の濃度の高いものが望ましい。しかし、現実的にはシンチレータの光学特性やコストとの関係からある程度の制約が存在する。そこで、今回のシミュレーションでは、市販の液体シンチレータである BC-523A を一定量用意して、そこに比較的安価な溶媒として 1,2,4-trimethylbenzene (pseudocumene; PC) を混ぜることにより大型化を図る場合を考える。この場合は最初の散乱反応に寄与する陽子の数密度 n_p はほぼ一定であるのに対し、吸収反応にかかる ^{10}B の総量は BC-523A 中に含まれていた量で一定であり、数密度 n_B は体積に反比例して減少 ($n_B \propto V^{-1}$) することになる。 ^{10}B の吸収断面積を $\sigma(E)$ とすると、エネルギー E を持つ中性子の平均自由行程は $(n\sigma)^{-1}$ で与えられる。この値が検出器の典型的な長さ ℓ 以下である時、検出器内部でほぼ確実に吸収されると考えてよい。

$$\frac{1}{n\sigma(E)} \leq \ell \quad (3)$$

(3) 式において、右辺は体積 V に対し、 $\ell \propto V^{1/3}$ なる関係を持つ。よって、(3) 式が常に成り立つためには、 $\sigma(E) \propto V^{2/3}$ 。また、よく知られているように ^{10}B の吸収断面積は熱領域から $E \sim 100 \text{ keV}$ 程度までの広い領域に渡って $1/v$ 則に従っており、すなわち $\sigma \propto E^{-1/2}$ とあらわせる。よって、検出器内部でほぼ確実に吸収される中性子の最大エネルギー E_{\max} は、

$$E_{\max} \propto V^{-4/3} \quad (4)$$

という関係を持つことがわかる。入射中性子に対し、即発信号たる弾性散乱を起こす確率は V の増加とともに上がるのに対し、エネルギーを失って熱化した中性子の吸収による遅延信号の確率は(4)式で下がっていく。これらを考慮して、100 keV - 3 MeV 程度のエネルギーをもつ中性子束の測定に最適な検出器の大きさ・形状をシミュレーションにより求めることにする。なお、基準とする形状としては、昨年度製作した 5 インチの光電子増倍管に取り付ける円筒状のパイレックス容器にシンチレータを満たしたものを考える。パイレックス容器の形状は外寸で直径 13 cm × 長さ 9 cm で、厚さは 2 mm である。

シミュレーションコードとしては、多くの研究者によって利用されている二つのパッケージ(Geant4とMCNP)を用い、シミュレーションを行うこととした。今回は、オブジェクト指向を採用し、拡張性に富むと思われるGeant4を基本的なシミュレーションコードとして主たる計算を行い、MCNPによって一部の計算を検証するものとした。

4.1 Geant4

Geant4はもともとヨーロッパ合同素粒子原子核研究機構(CERN)によって開発されたFORTRAN言語ベースの素粒子・原子核実験用シミュレーションツールGEANT3の発展版である[13]。このバージョンアップは、主として既に評価の固まったシミュレーションパッケージをC++言語をベースにしてオブジェクト指向を取り入れたものにすることであった。その際、素粒子・原子核実験だけでなく多くの分野に応用可能なようにいくつかの拡張が同時に行われた。 $O(10\text{ MeV})$ 以下の比較的低エネルギーの中性子の相互作用の導入もそのうちのひとつである。取り扱う相互作用としては放射捕獲、弾性散乱、核分裂、非弾性散乱である。非弾性散乱には今回のシミュレーションに必要な (n,α) 反応も含まれており、またすべての反応の断面積はENDF/B-VI評価データライブラリから得ている。

今回のシミュレーション計算には、Geant4 6.0を使用した。OSとしてLinuxを使用した。

4.1.1 基礎データ

シミュレーションに入力した各種パラメータは以下の通りとした。

実験室 現実においては周辺に様々な物質が存在するが、今回は理想的な場合を考えて、空気(窒素75.5重量%、酸素23.2重量%、アルゴン1.3重量%)で充填された $160 \times 160 \times 160\text{ cm}^3$ の大きさの実験室とした。壁は考慮していない。

シンチレータ 前述したようにシンチレータは市販のBC-523Aを溶媒PCで薄めたものになる。BC-523Aの主成分は、販売元によるとホウ酸メチル(methyl borate, trimethyl borate, CAS RN:121-43-7)とPCである。ホウ酸メチルの化学式は $\text{C}_3\text{H}_9\text{BO}_3$ (分子量103.9123)であり、PCの化学式は C_9H_{12} (分子量120.1938)であらわされる。BC-523Aの密度は 0.916 g/cm^3 である。またPC単独の密度は 0.876 g/cm^3 である。

形状は前述したように昨年度製作した容器を基準とし、直径 $12.6\text{ cm} \times$ 長さ 8.6 cm とした。これは約100 c.c.のBC-523AをPCで10倍に希釈した場合(すなわちBC-523Aの体積濃度10%)に相当する。体積を n 倍に変化させる場合は直径・長さ共に $n^{1/3}$ 倍にすることにした。

シンチレータ容器 シンチレータ容器はパイレックスガラス製で、厚さ 2 mm でシンチレータのすぐ外側に配置した。なお、パイレックスガラスの組成は $\text{SiO}_2: 80.6\%$ 、 $\text{B}_2\text{O}_3: 13.0\%$ 、 $\text{Na}_2\text{O}: 3.8\%$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3: 2.2\%$ 、 $\text{K}_2\text{O}: 0.4\%$ であり、密度は 2.32 g/cm^3 である。

4.1.2 シミュレーションからの出力

最終的には検出器の検出効率を入射中性子のエネルギーごとに求める必要がある。そのため、シミュレーションにおいては実際の検出器のトリガー回路も再現する必要がある。具体的には

1. 即発信号である、(主として) 弹性散乱された陽子から付与されたエネルギー。実験においては閾値として電子換算エネルギーで約 40 keV 程度をとっているが今回のシミュレーションでは考慮に入れていない。
2. 遅延信号として、 (n, α) 反応の生成物である $\alpha \cdot {}^7\text{Li}$ から付与されたエネルギー。即発信号からの遅延時間 t が、 $t_1 < t < t_2$ の遅延ゲート内で (n, α) 反応の Q 値に相当するものを遅延信号と考える。

そこでシミュレーションからの以下のものを取り出すこととした。それぞれの見出しあはヒストグラムのタイトルを示している。

Total Energy deposit (E_{tot}) 1 個の入射中性子によって引き起こされた一連の反応により検出器に付与された全エネルギー。

Energy deposit in first (E_1) $t < t_1$ で起こったエネルギー付与の総和。

Energy deposit in second (E_2) $t_1 < t < t_2$ で起こったエネルギー付与の総和。

Energy deposit by electron (E_e) 電子・陽電子からのエネルギー付与の総和。 γ 線が光電効果・コンプトン散乱・電子対生成などにより電子・陽電子を経由してエネルギー付与した分も含まれる。

Energy deposit by proton (E_p) 陽子からのエネルギー付与の総和。

Energy deposit by alpha (E_α) α 粒子からのエネルギー付与の総和。

Energy deposit by Li7 (E_{Li7}) ${}^7\text{Li}$ イオンからのエネルギー付与の総和。

Energy deposit by other Ions (E_{ion}) その他のイオン (C, O, ${}^{11}\text{B}$ など) からのエネルギー付与の総和。

Time distribution of Last Proton Hit (T_p) 陽子からのエネルギー付与の内、100 keV を超えるもので遅延時間の最も長いものの t 。

Time distribution of Alpha Hit (T_α) α 粒子からのエネルギー付与の起こった時間 t 。

Energy deposit(cut) (E_{cut}) E_2 が ${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$ 反応の Q 値付近にある事象の E_1 。

Energy deposit in ADC Gate(cut) (E_{Gate}) E_2 が ${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$ 反応の Q 値付近にある事象のうち、 t が ADC の gate 内 ($t < 40$ nsec) に起こったエネルギー付与の総和。

なお、今回のシミュレーションでは検出器のエネルギー・時間分解能は考慮していない。

4.1.3 中性子の発生

シミュレーションで発生させる中性子にはエネルギー(E_n^0)と運動方向を与える必要がある。エネルギーについては単色とし、運動方向については以下に述べるように乱数による一様分布を作った。

- 検出器を中心として、検出器より十分大きい半径の仮想球を考える。
- 仮想球の内表面から中心に向かって 2π 方向に乱数で一様の角度分布を作る。

Geant4 パッケージ内の General purpose Source Particle Module (GSPM) を使用した。

この方法では仮想球の中心付近では一様分布が成立していると考えられる。確認のため、この仮想球の中心と検出器の中心をずらして（このずれを d とする）シミュレーションを行った。このときの各パラメータは以下のとおりである。

- 中性子の入射エネルギーは $E_n^0 = 100 \text{ keV}$ 。
- 仮想球の半径は 60 cm。
- シンチレータの形状は直径 5.85 cm × 長さ 3.99 cm で構成は BC-523A が 100 % である。
- $t_1 = 200 \text{ nsec}$, $t_2 = 6 \mu\text{sec}$ 。
- $d = 0, 4, 8, 12, 16, 20, 30, 40, 55, 110 \text{ cm}$ 。
- 発生させた中性子イベント数は各 d あたり 3×10^7 個

このシミュレーションから得られたエネルギー及び時間の各スペクトルを図 12-31 に示した。32 には、実験における観測値である E_{Gate} のイベント数を横軸を d としてプロットした。図 32 に示されているように $d = 16 \text{ cm}$ まで検出効率はほぼ一定であり、検出器の外寸がその値以内である限りにおいては一様分布が成り立っていると考えてよい。

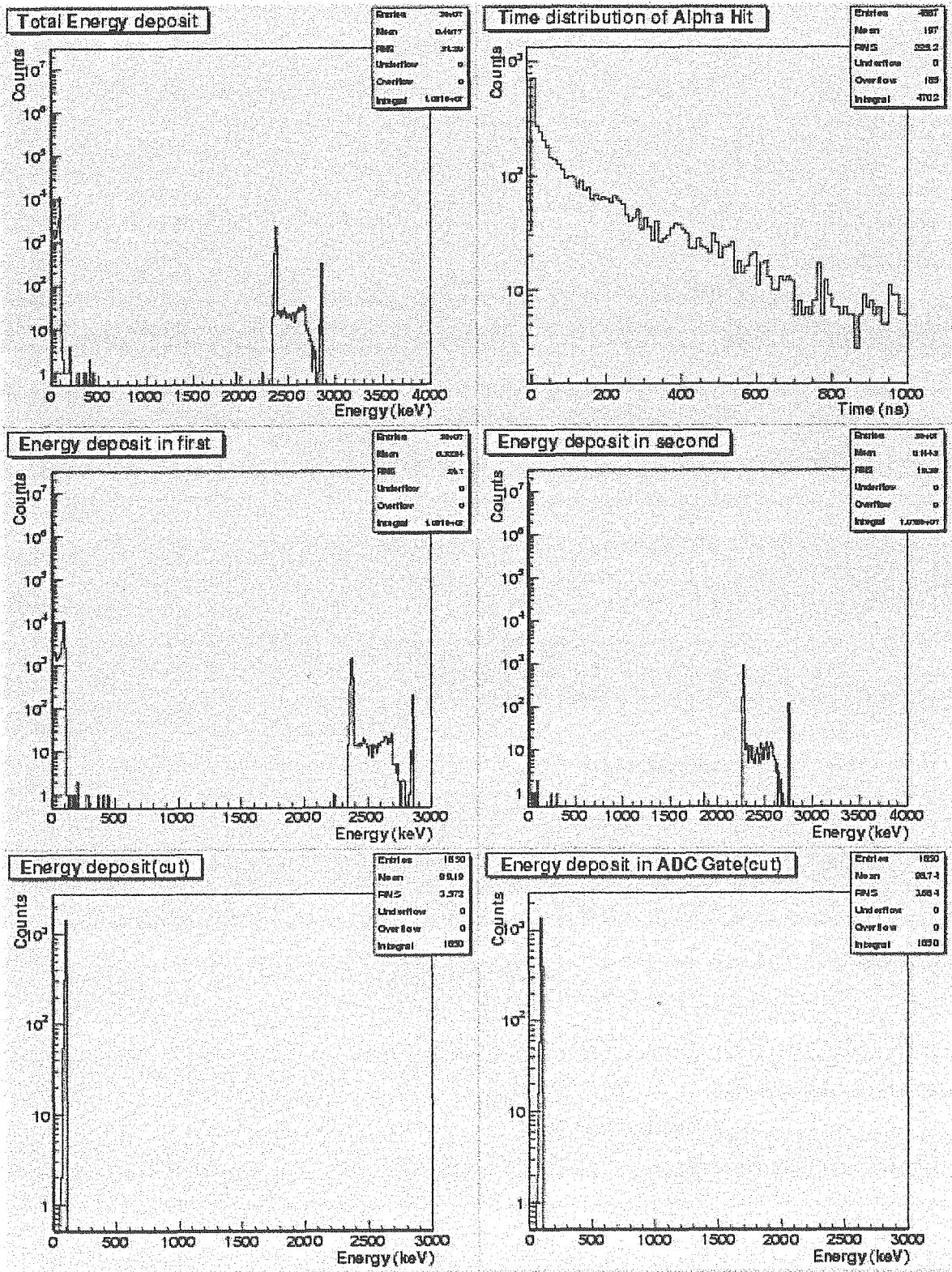


図 12: $d = 0$ cm におけるスペクトル (1)。

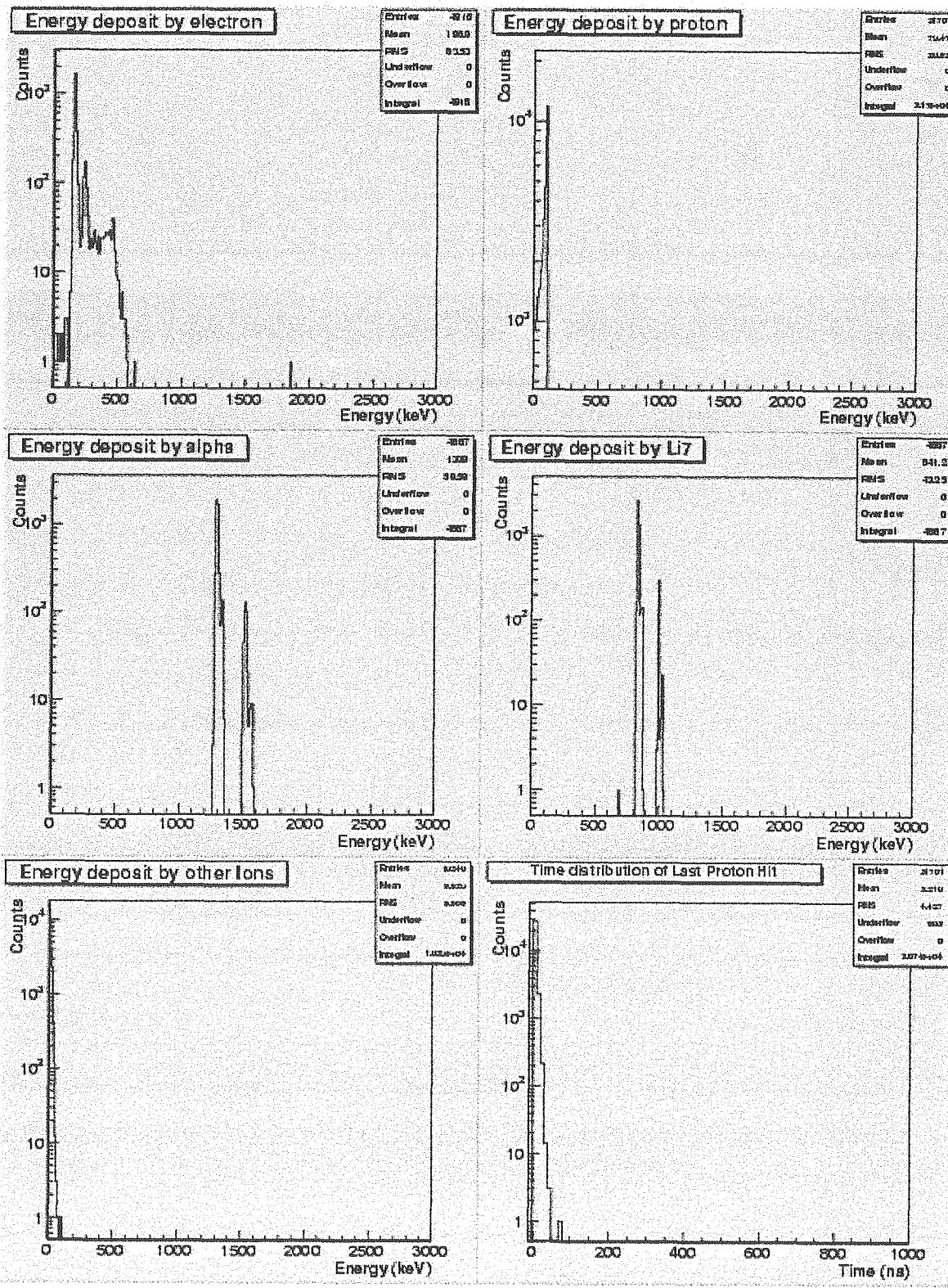


図 13: $d = 0$ cm におけるスペクトル (2)。

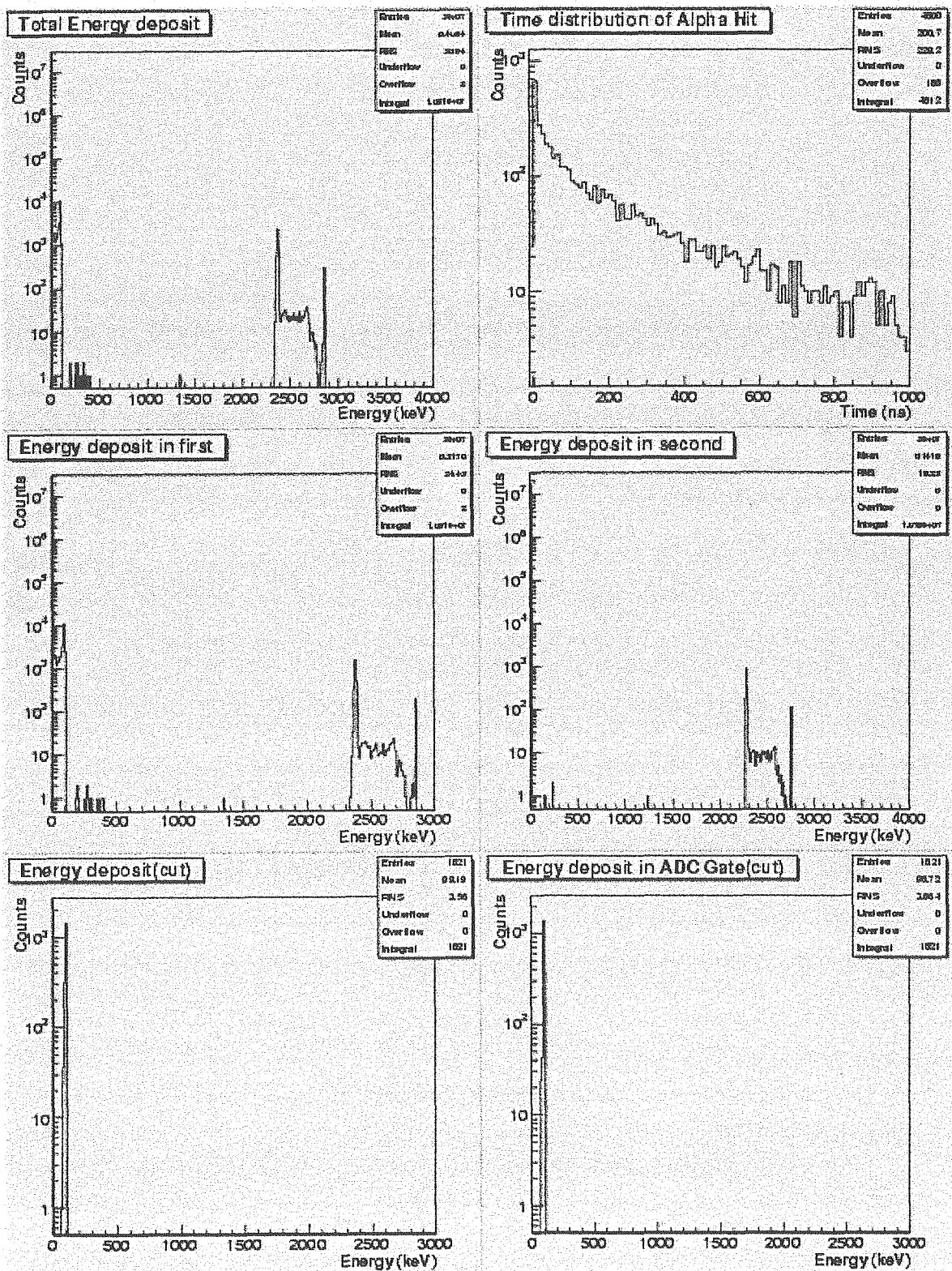


図 14: $d = 4$ cm におけるスペクトル (1)。

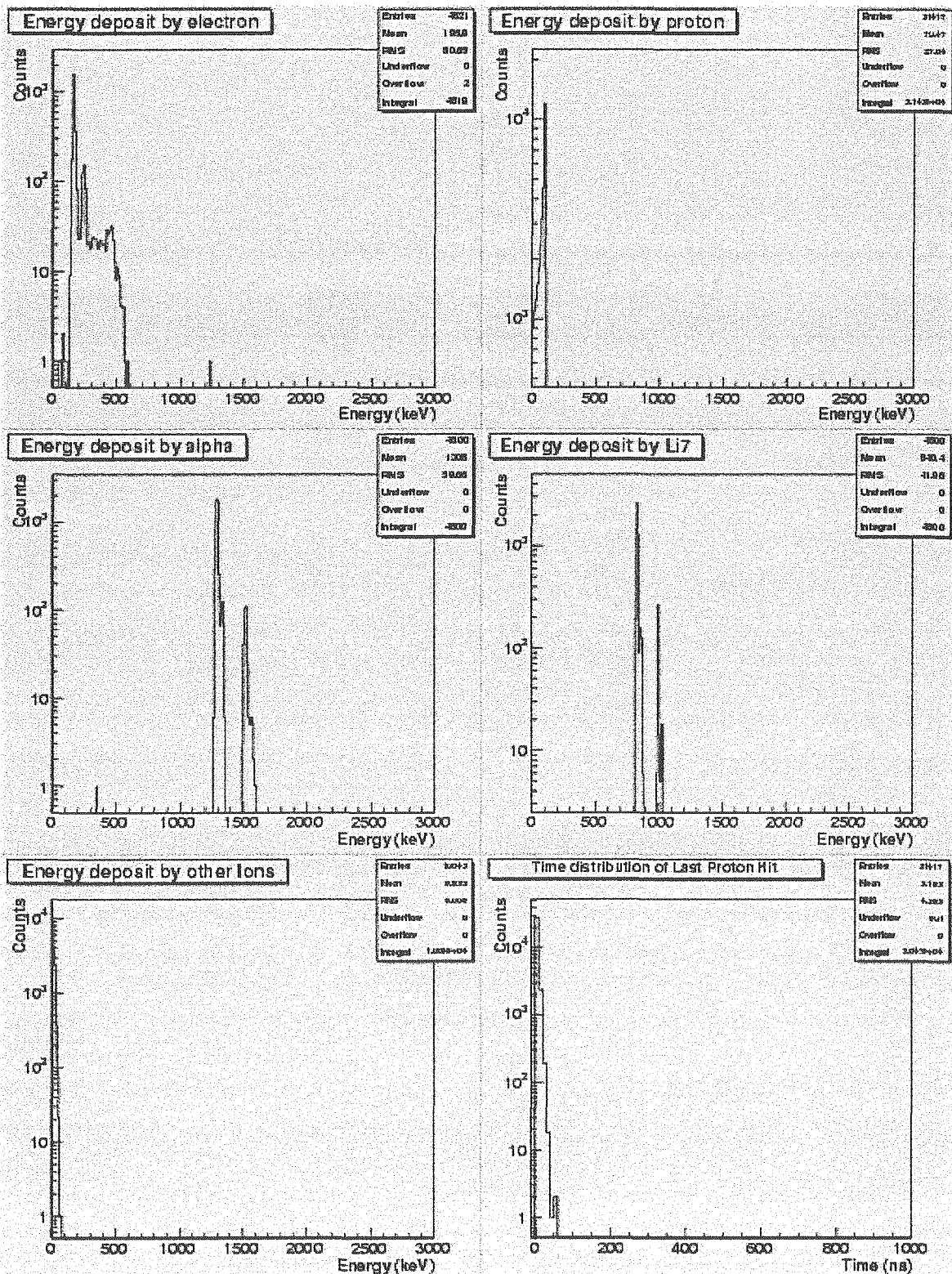


図 15: $d = 4$ cm におけるスペクトル (2)。

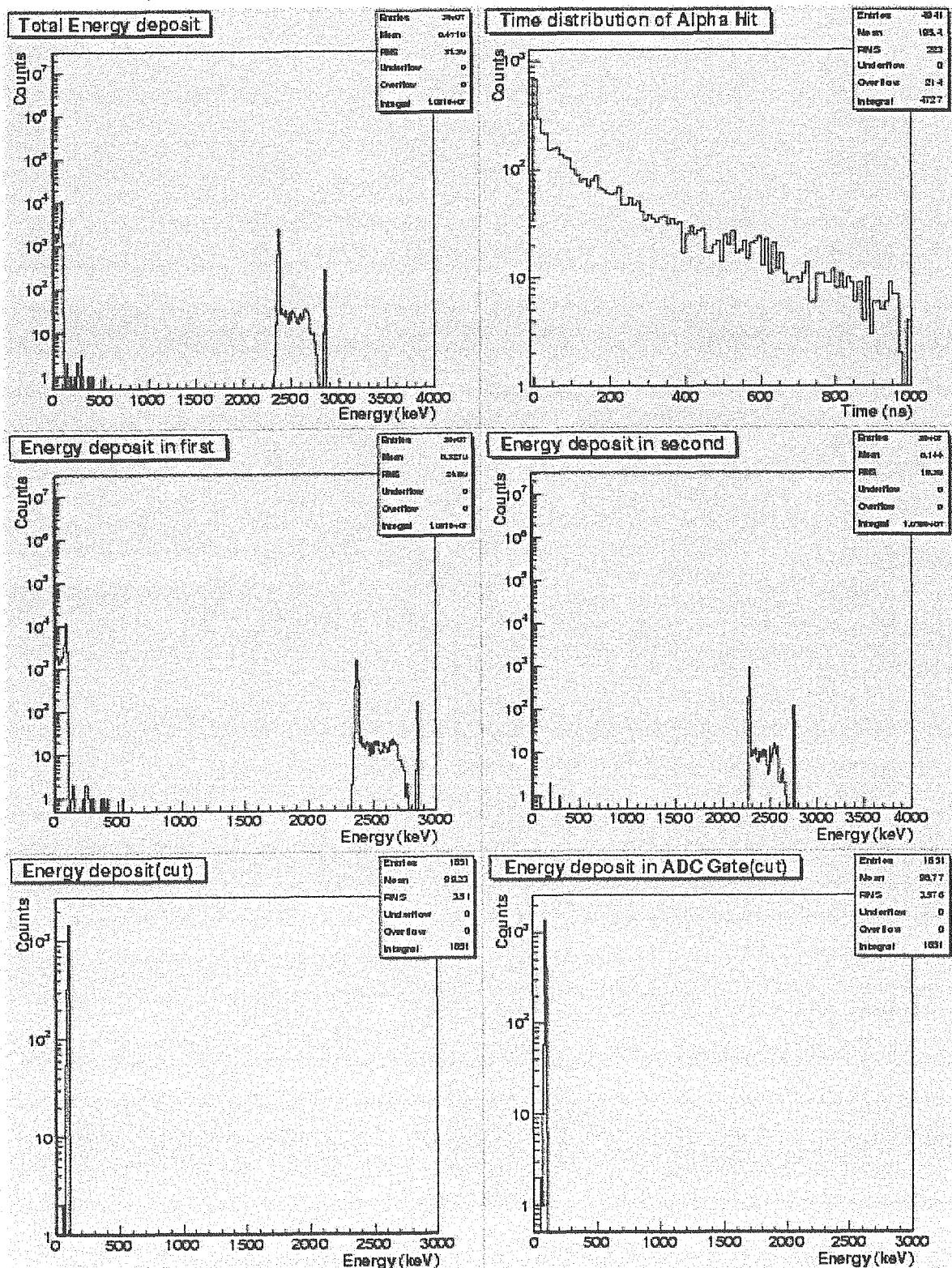


図 16: $d = 8 \text{ cm}$ におけるスペクトル (1)。

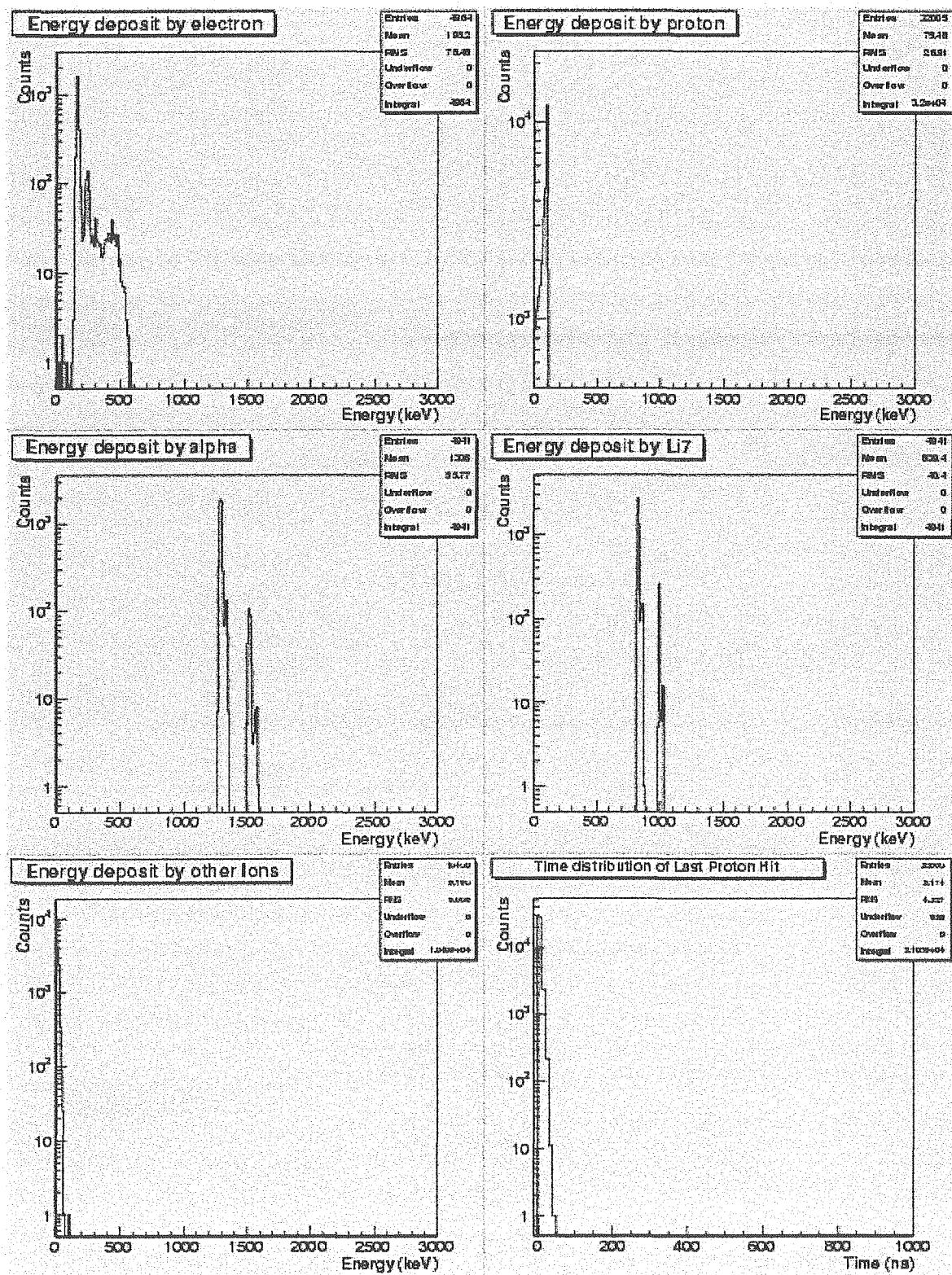


図 17: $d = 8 \text{ cm}$ におけるスペクトル (2)。

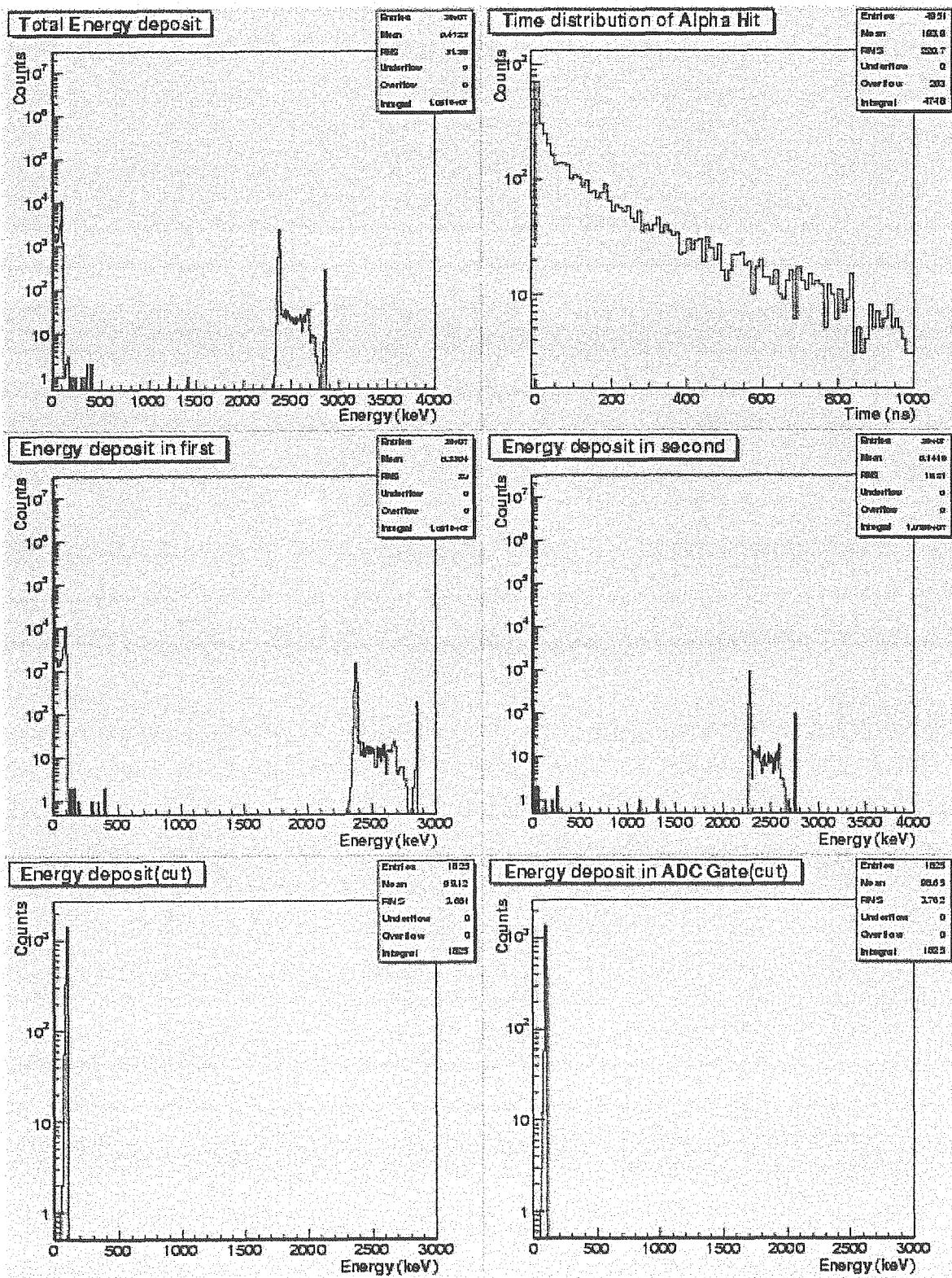


図 18: $d = 12$ cm におけるスペクトル (1)。

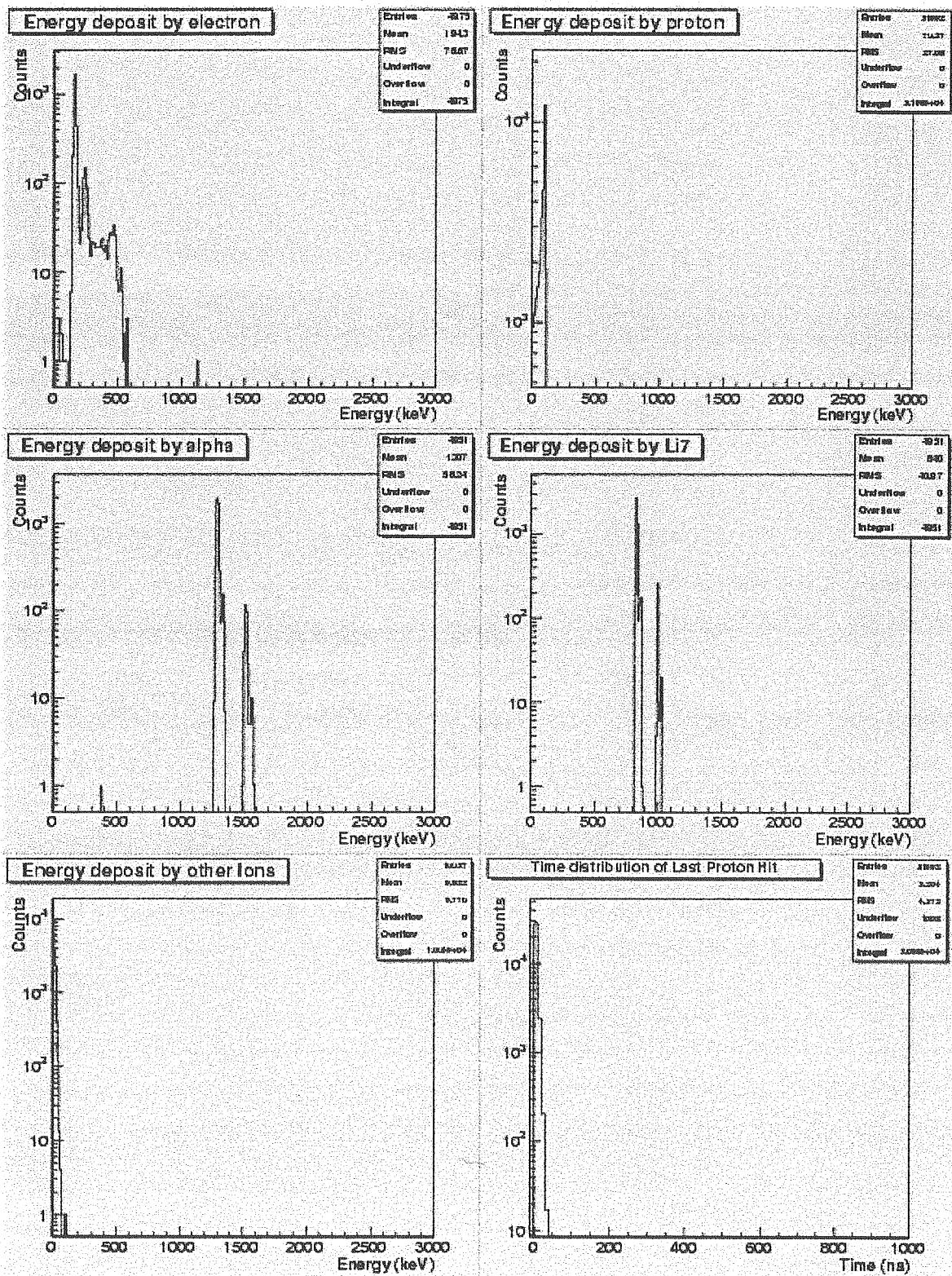


図 19: $d = 12$ cm におけるスペクトル (2)。

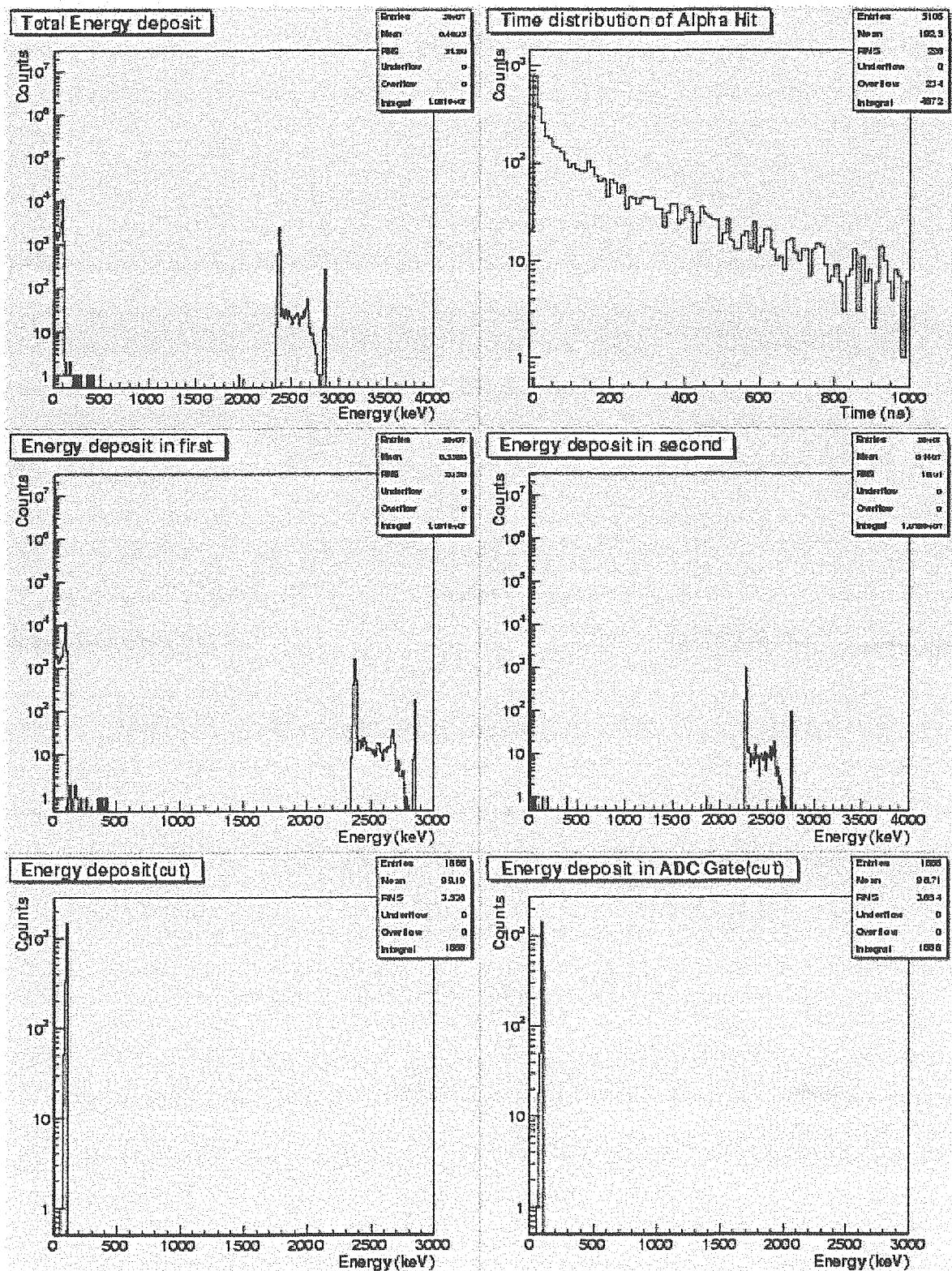


図 20: $d = 16$ cm におけるスペクトル (1)。

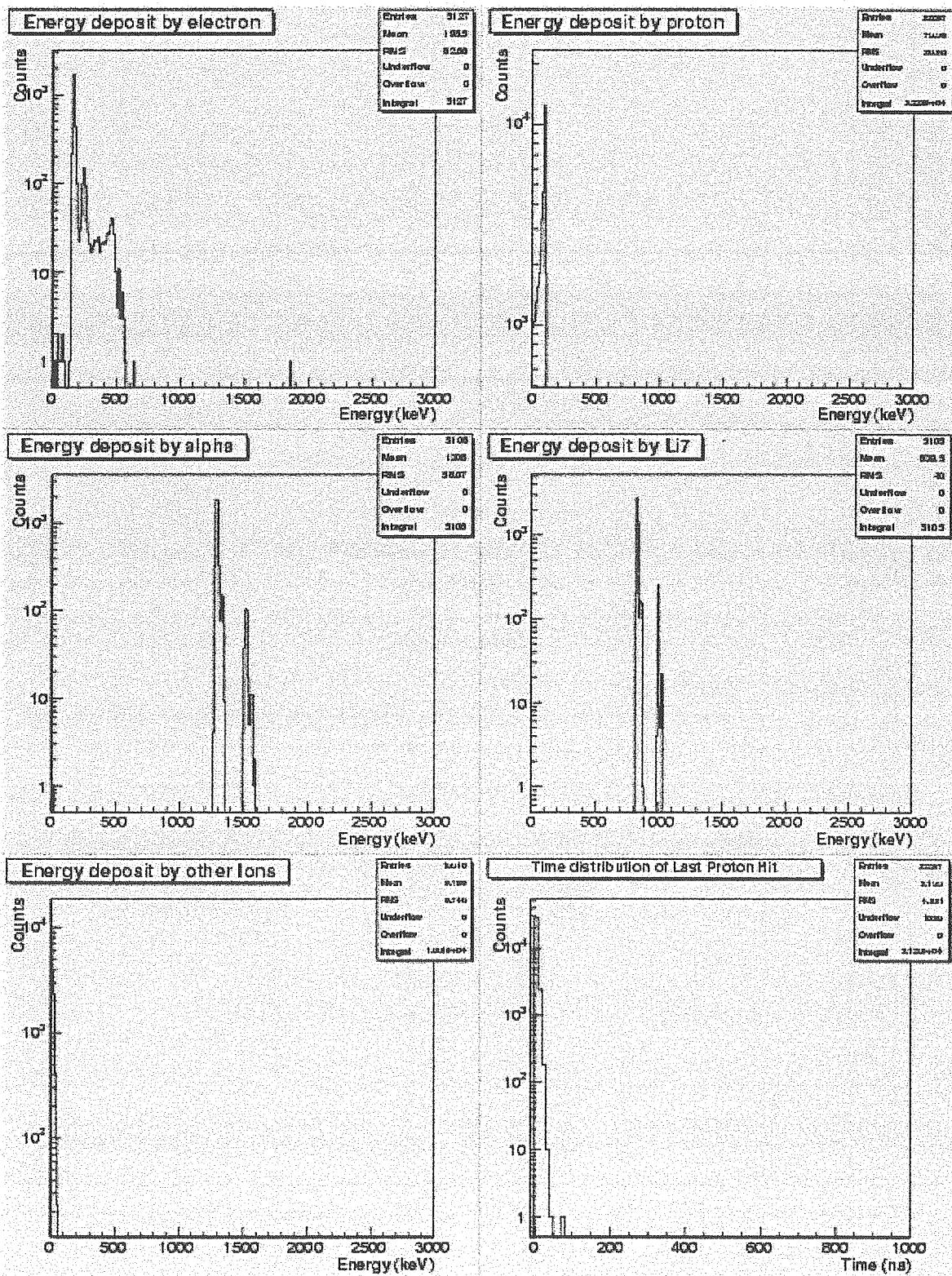


図 21: $d = 16$ cm におけるスペクトル(2)。

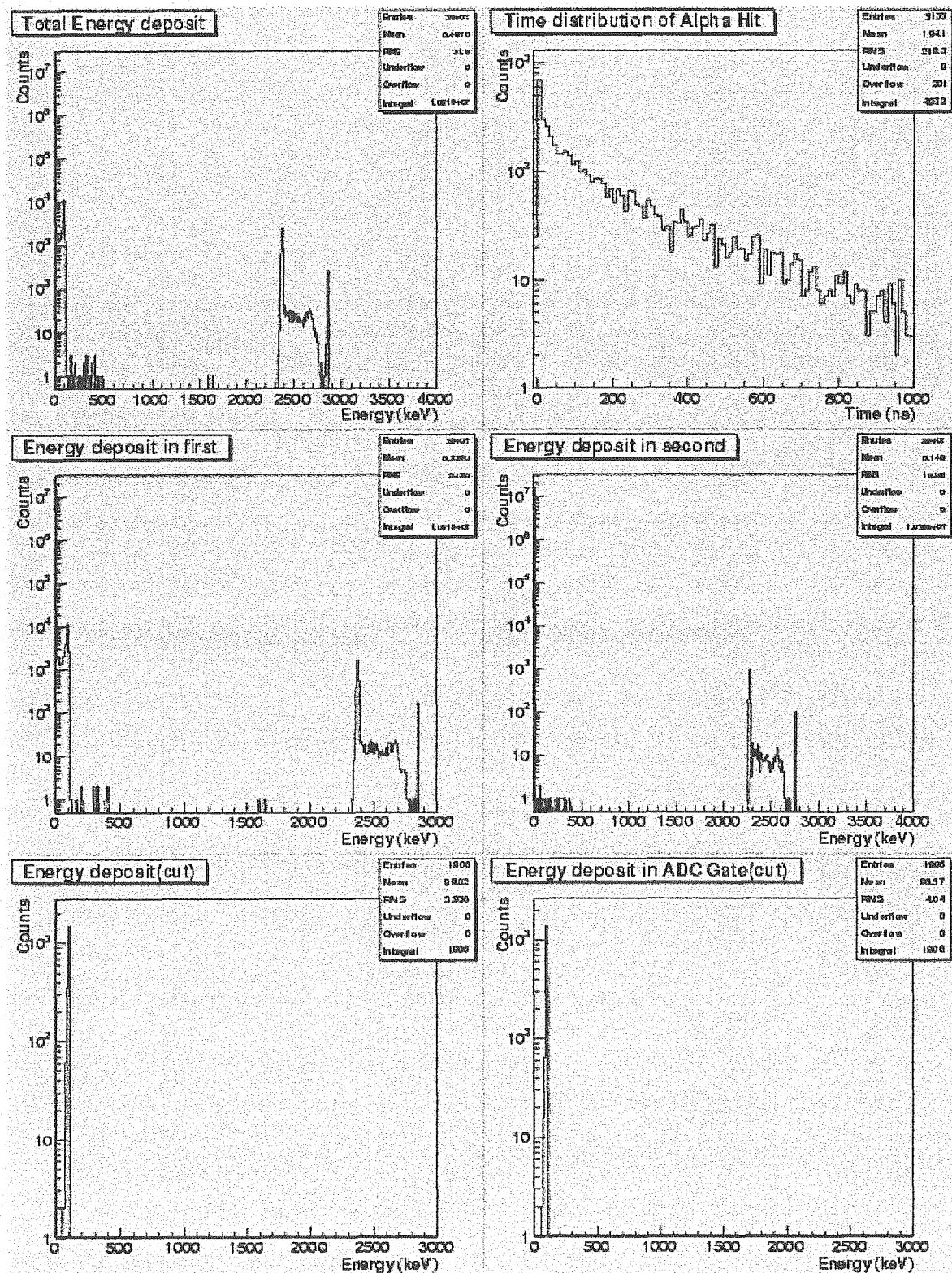


図 22: $d = 20$ cm におけるスペクトル (1)。

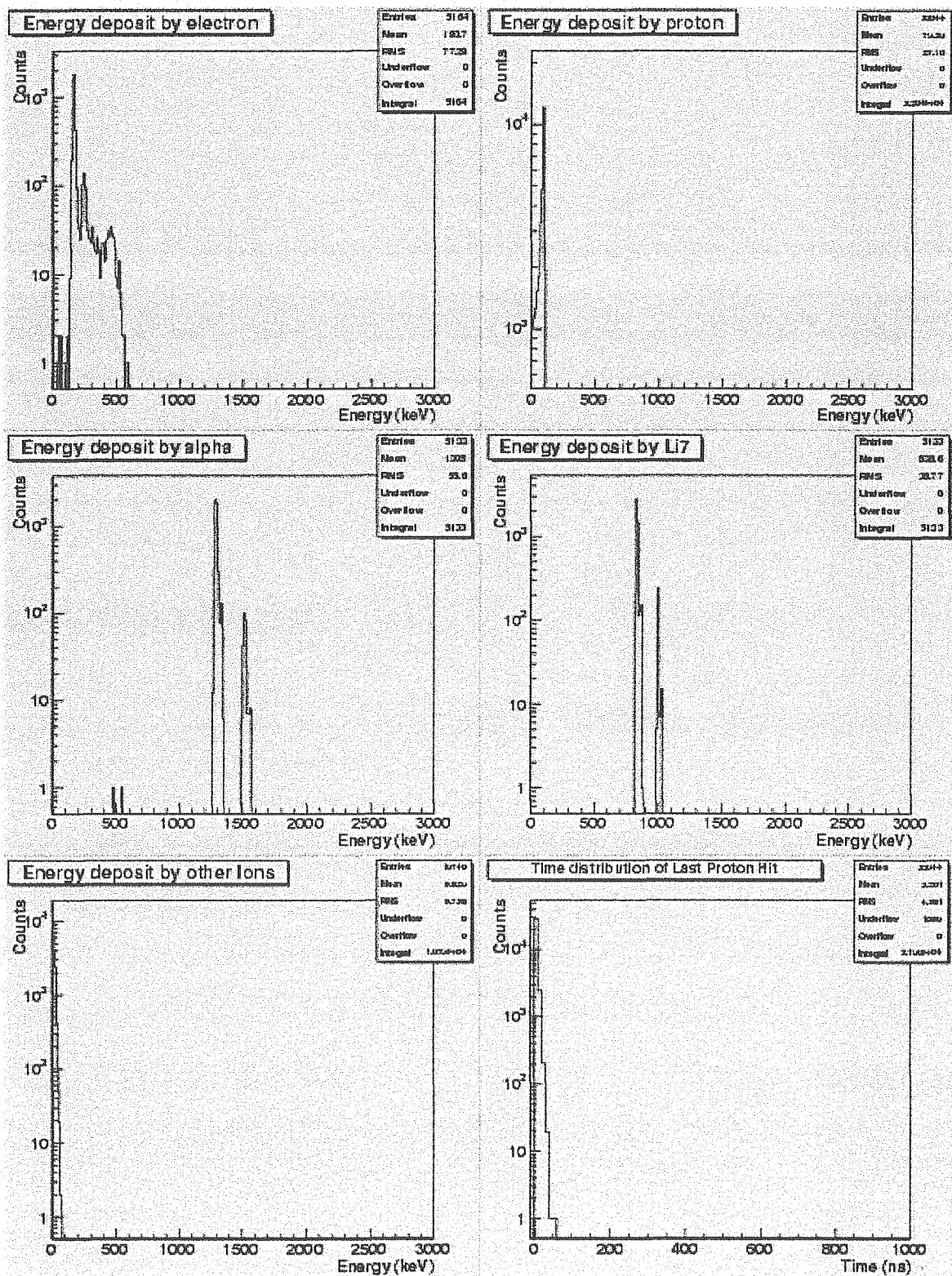


図 23: $d = 20$ cm におけるスペクトル(2)。

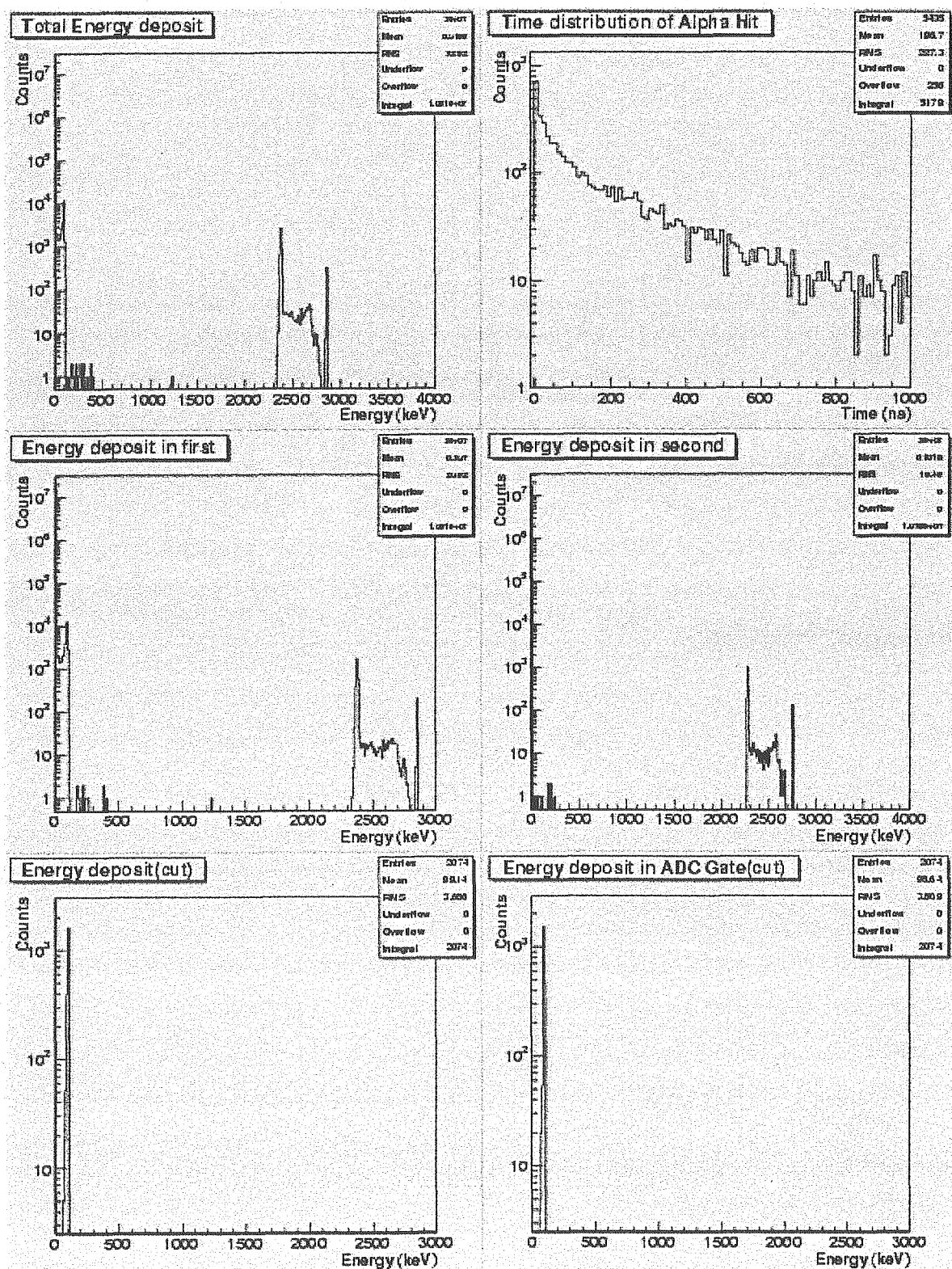


図 24: $d = 30$ cm におけるスペクトル (1)。

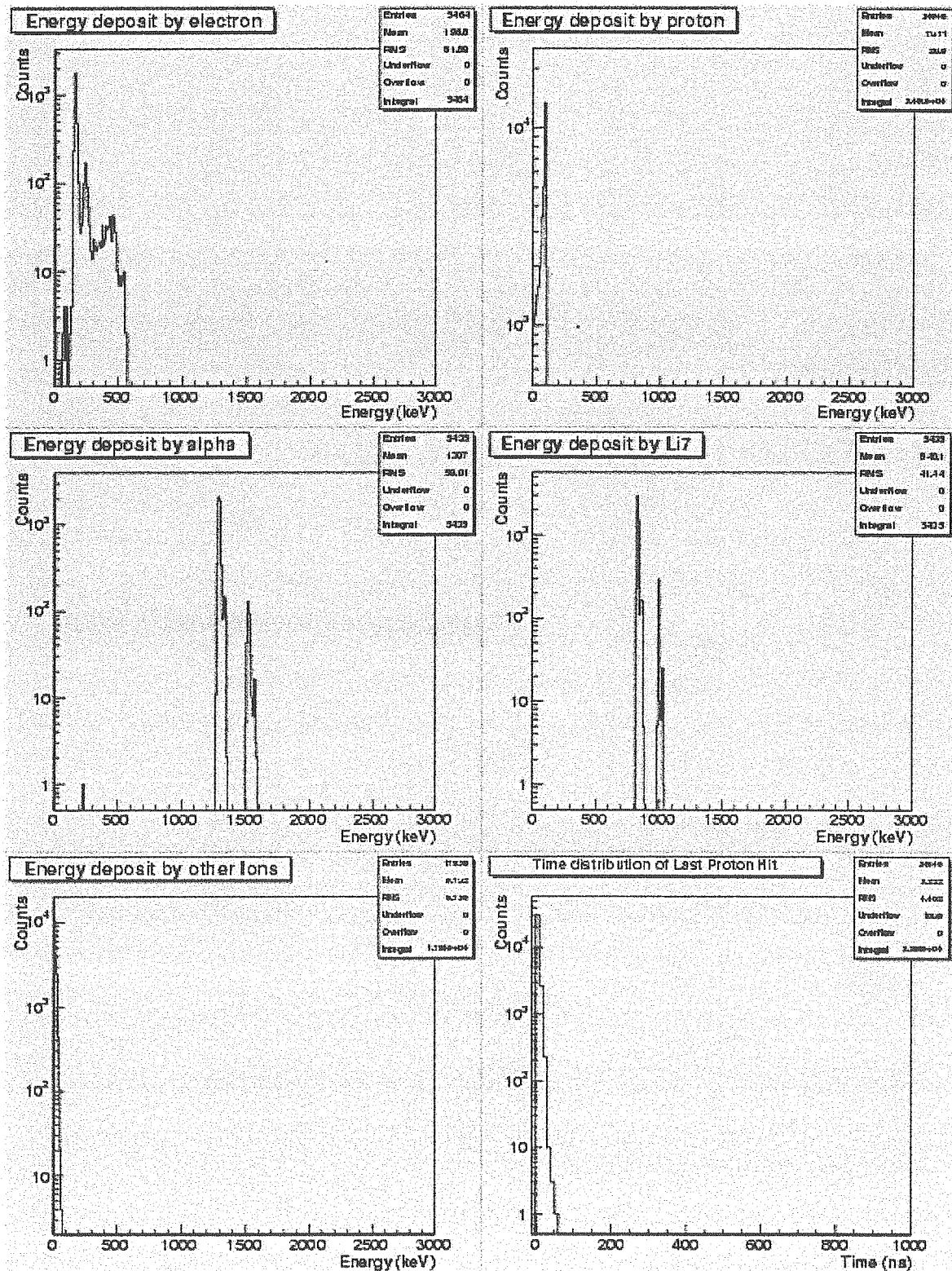


図 25: $d = 30$ cm におけるスペクトル (2)。

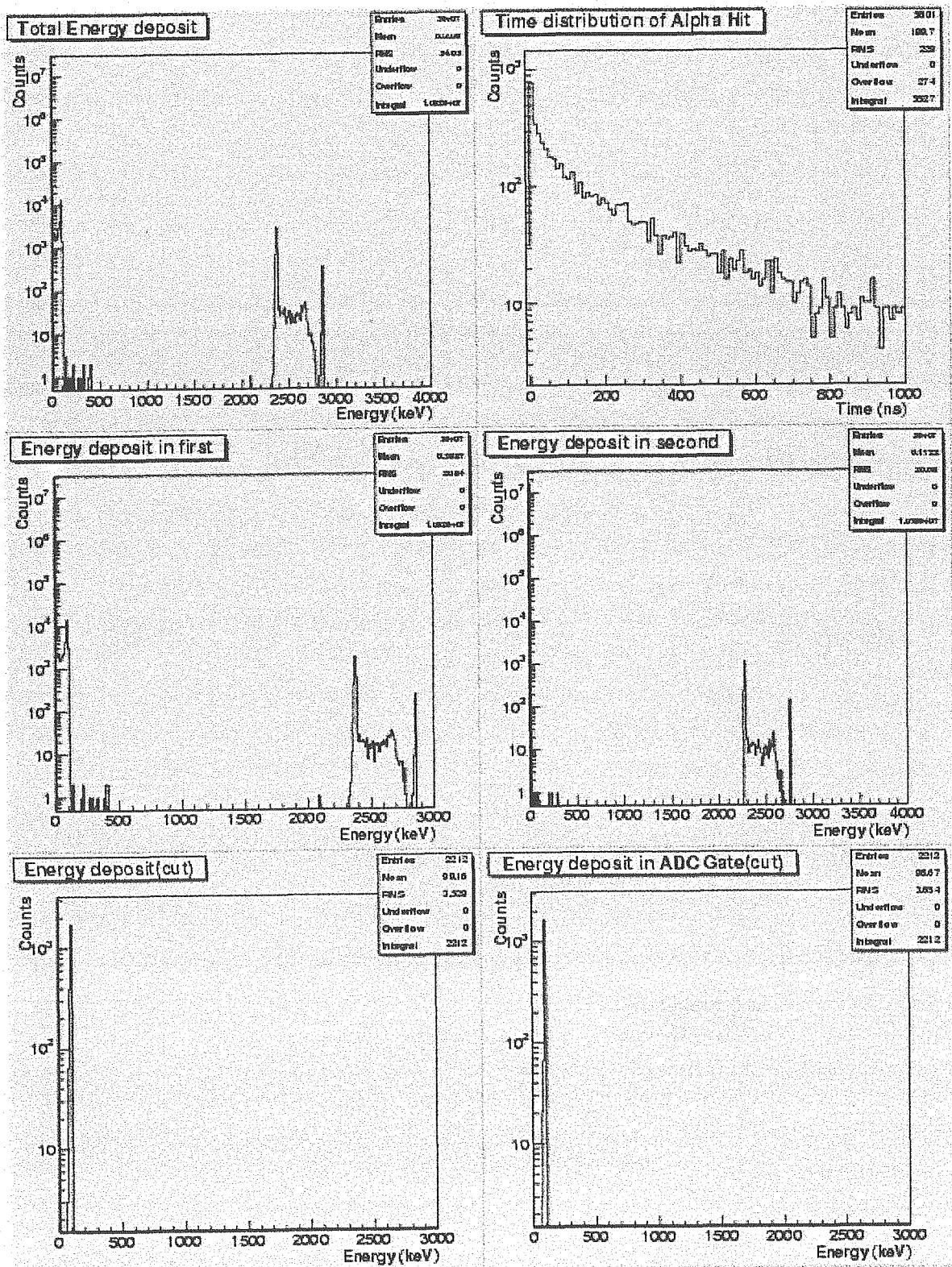


図 26: $d = 40$ cm におけるスペクトル(1)。

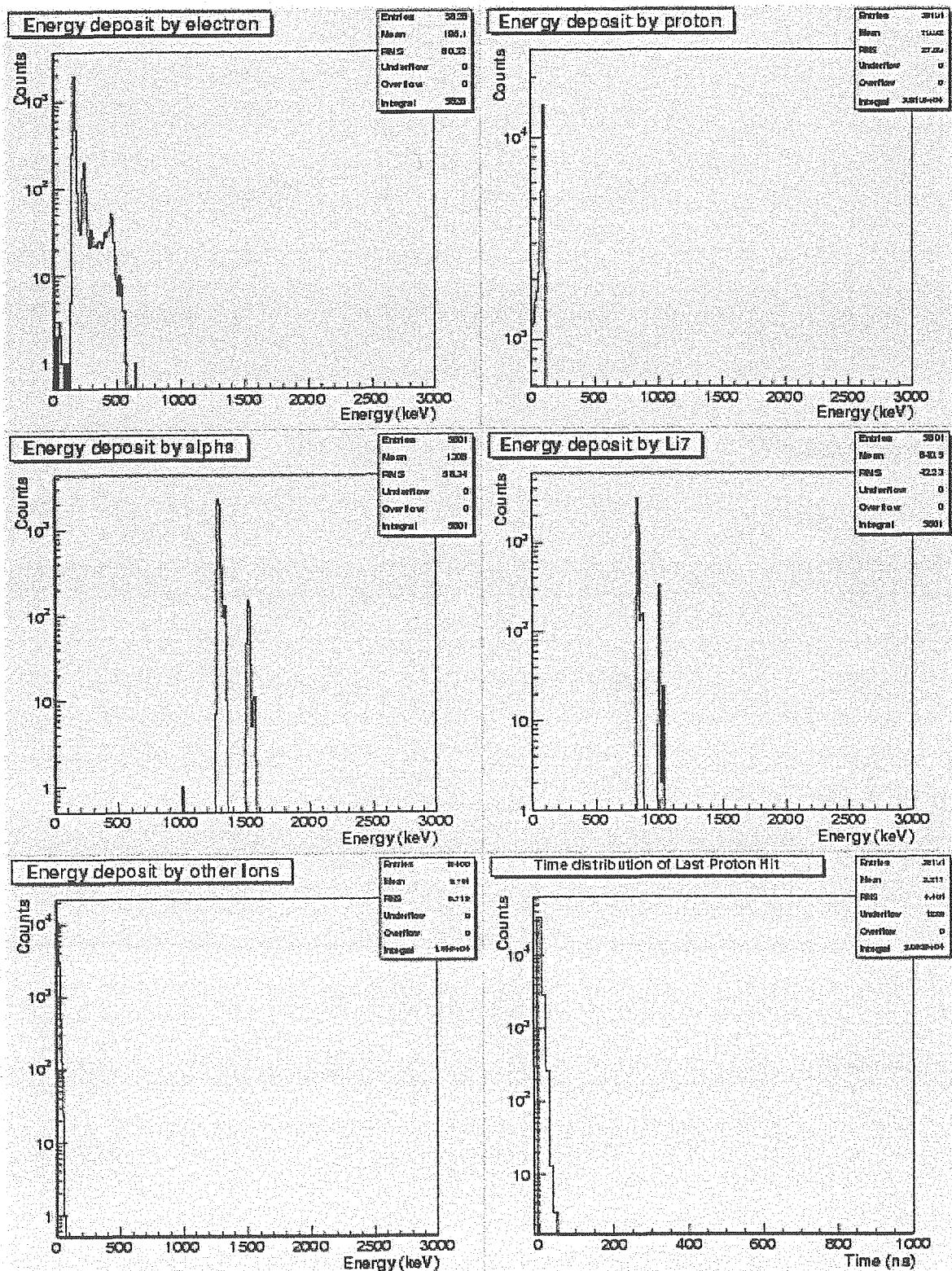


図 27: $d = 40$ cm におけるスペクトル (2)。

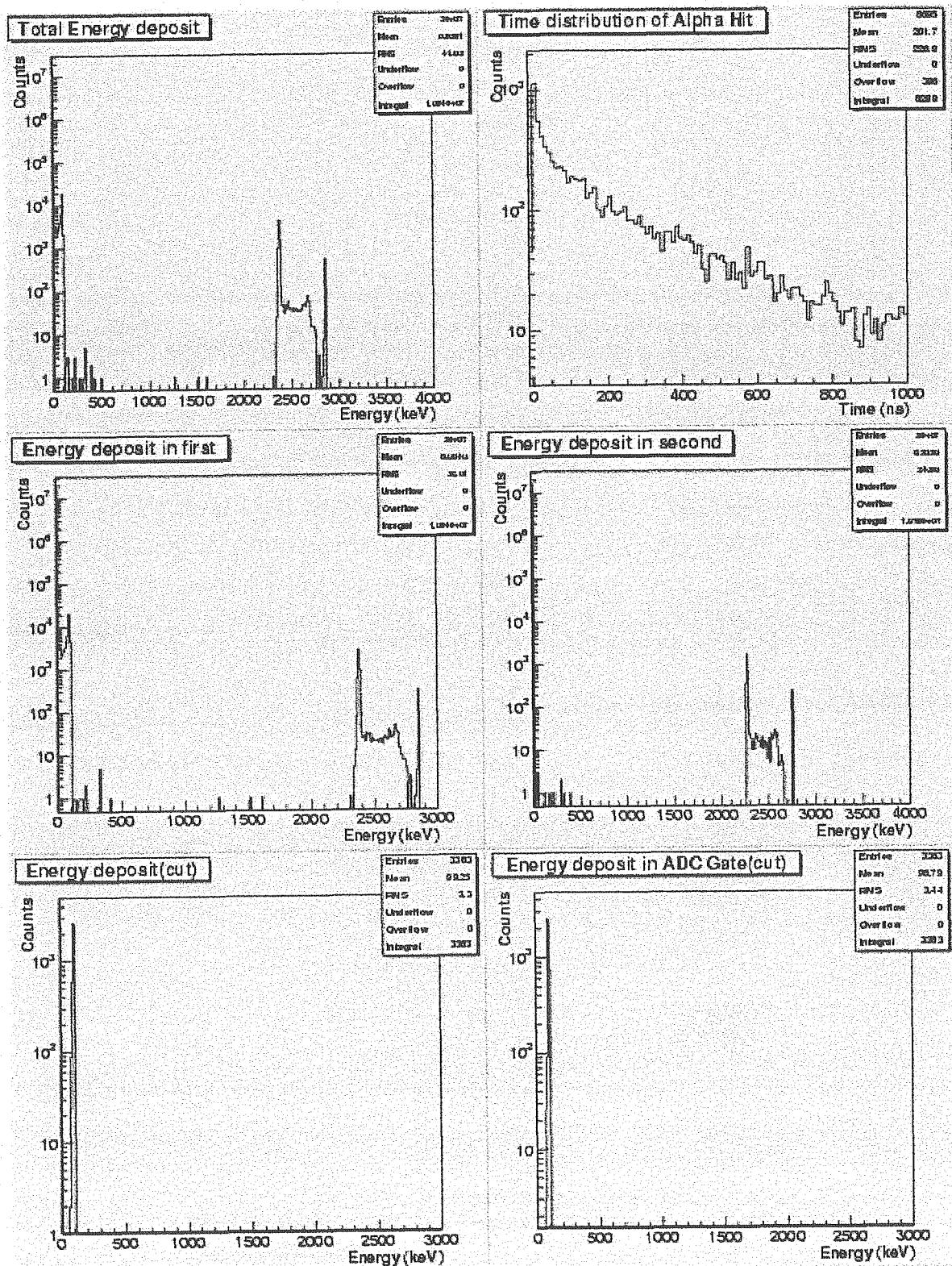


図 28: $d = 55$ cm におけるスペクトル (1)。

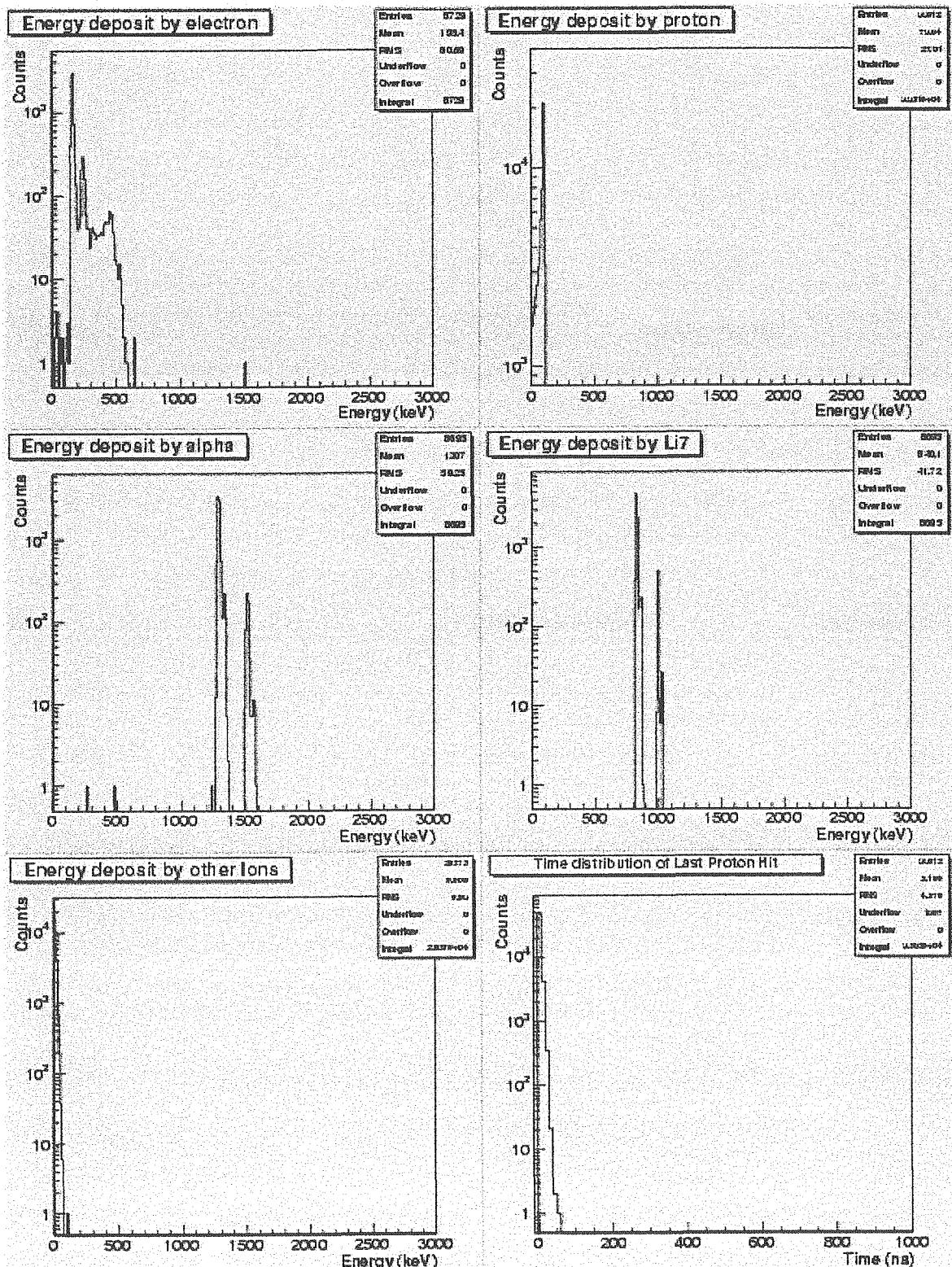


図 29: $d = 55$ cm におけるスペクトル (2)。

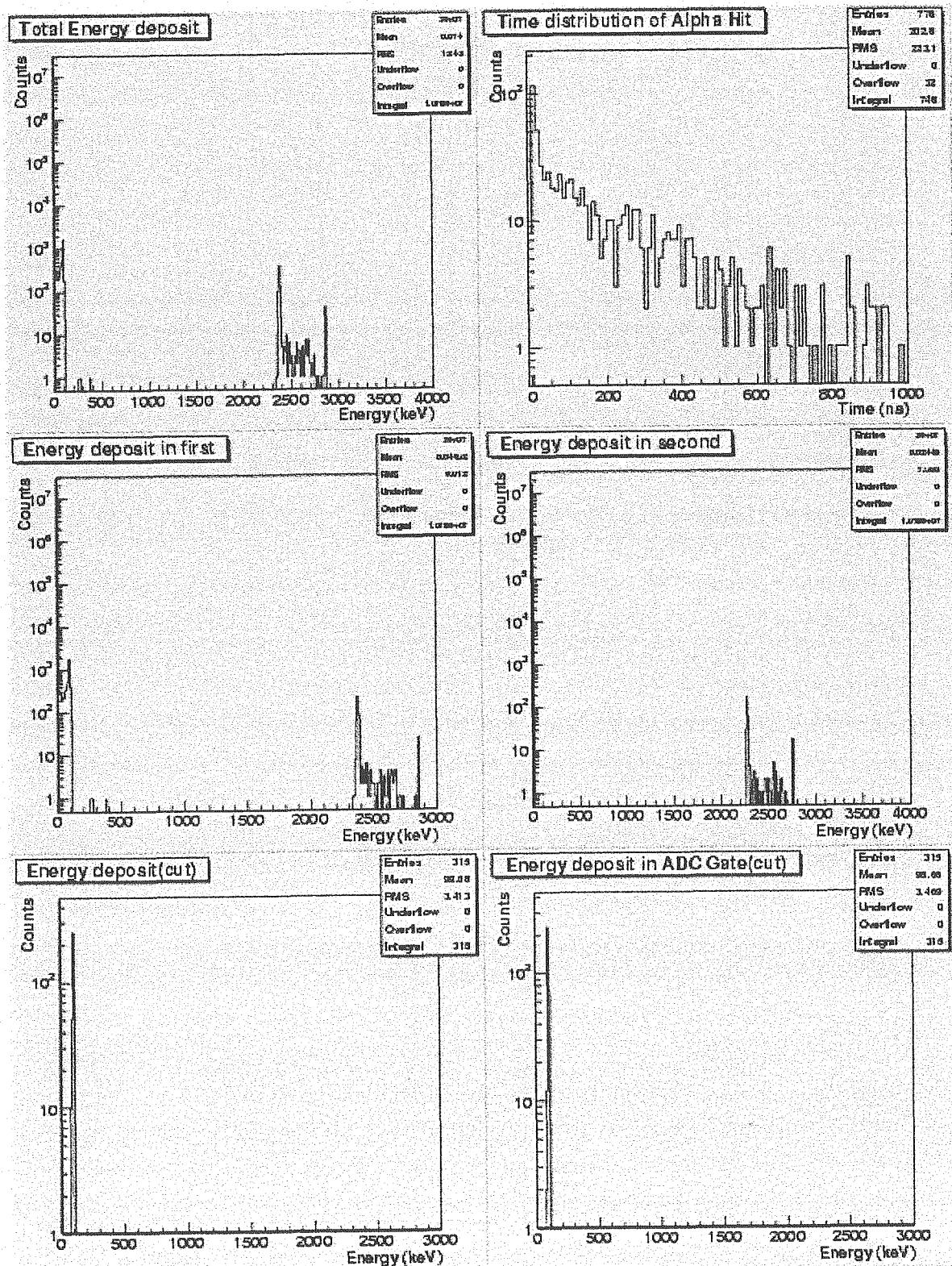


図 30: $d = 110$ cm におけるスペクトル(1)。

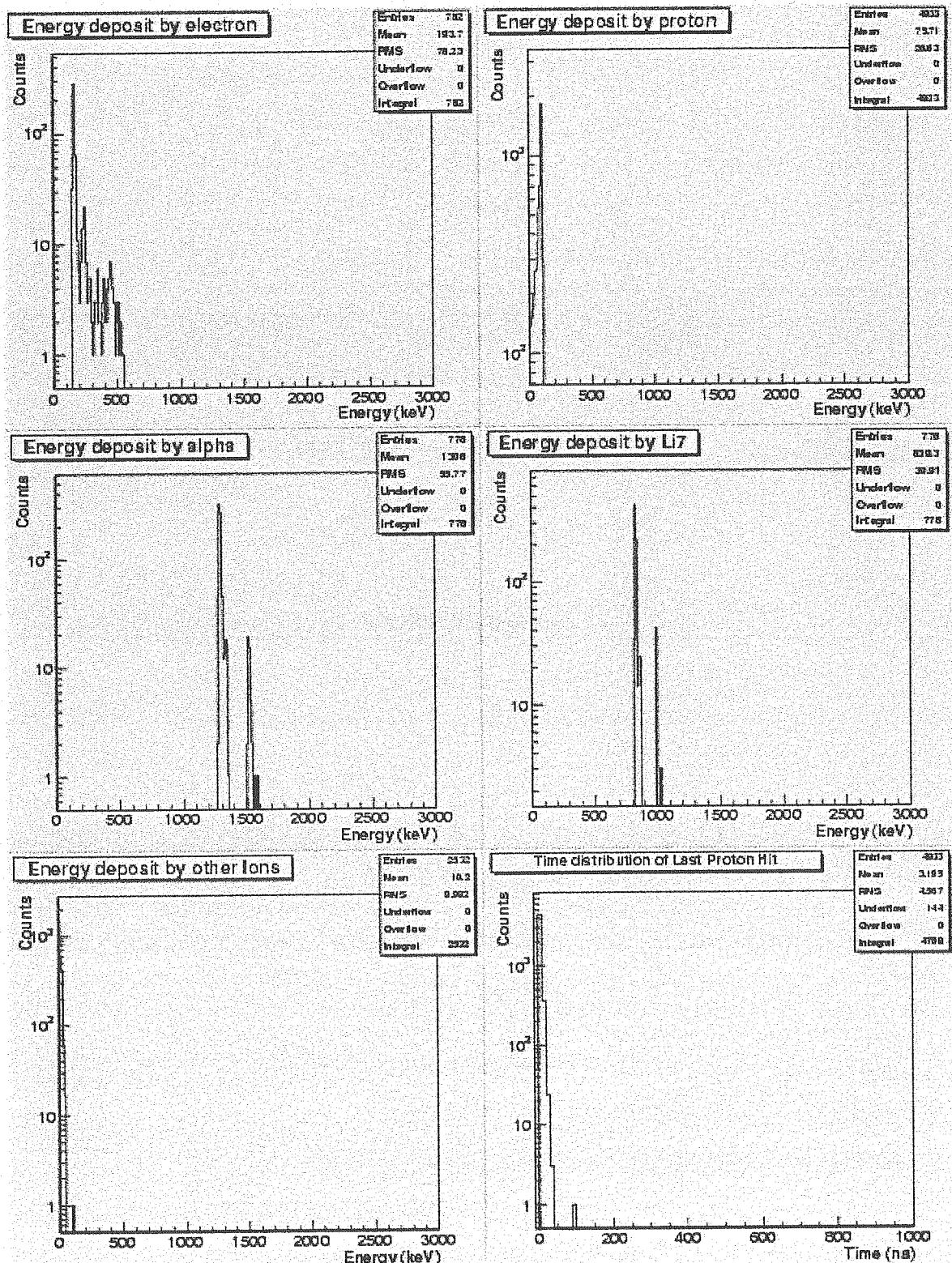


図 31: $d = 110$ cm におけるスペクトル(2)。

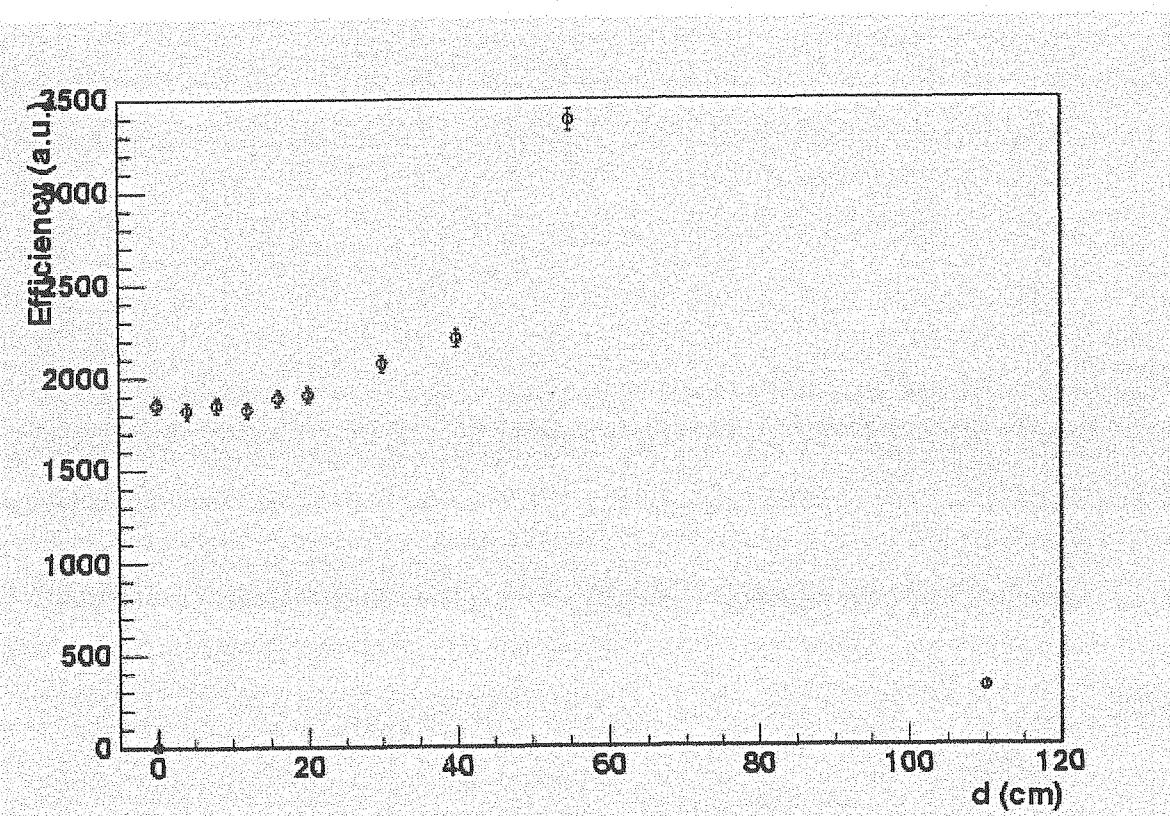


図 32: 検出器と仮想球の位置関係による検出効率の違い。横軸は検出器中心と仮想球中心のずれ d で、縦軸は任意単位での検出効率である。

4.1.4 エネルギー依存性

検出器の、入射中性子のエネルギーによる違いを調べるために、次のようなシミュレーションを行った。

- $E_n^0 = 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 1, 2, 2.8 \text{ MeV}$
- 仮想球の半径は 60 cm とし、その中心と検出器の中心は一致させる。
- シンチレータの形状は直径 5.85 cm × 長さ 3.99 cm で構成は BC-523A が 100 % である。
- $t_1 = 200 \text{ nsec}, t_2 = 6 \mu\text{sec}$ 。
- 発生させた中性子イベント数は各 E_n^0 あたり 2×10^7 個。

得られたスペクトルを図 33-48 に示した。これらの図から以下のようことがわかる。

1. 陽子との弾性散乱はシミュレーションを行った全エネルギーにおいて最大 50 nsec 以内に終了している。

2. α 粒子の発生は $t = 0$ 付近に大きなピークを持ち、その後は指数関数的に減衰している。これは中性子が完全に熱化する (thermalize) より前の epi-thermal の状態で ^{10}B に吸収されるものがかなりあることを示している。
3. E_{Gate} のスペクトルは入射中性子エネルギー E_n^0 付近に鋭いピークを持つが、低エネルギー側に若干のテールが存在する。

検出効率の向上のためには、上記 1. より ADC gate は 50 nsec 程度にすればよい事がわかる。また、2. に関しては 1. より $t = 0$ 付近のピークを取ることは出来ないが、 t_1 はなるべく小さい値にする必要がある。3. から検出器により得られたエネルギースペクトルがほぼ入射中性子のエネルギースペクトルを再現していることがわかる。ただし、実際には検出器のエネルギー分解能による広がりを考慮する必要がある。このシミュレーションで得られた E_{Gate} のイベント数を横軸を E_n^0 として図 49 にプロットした。

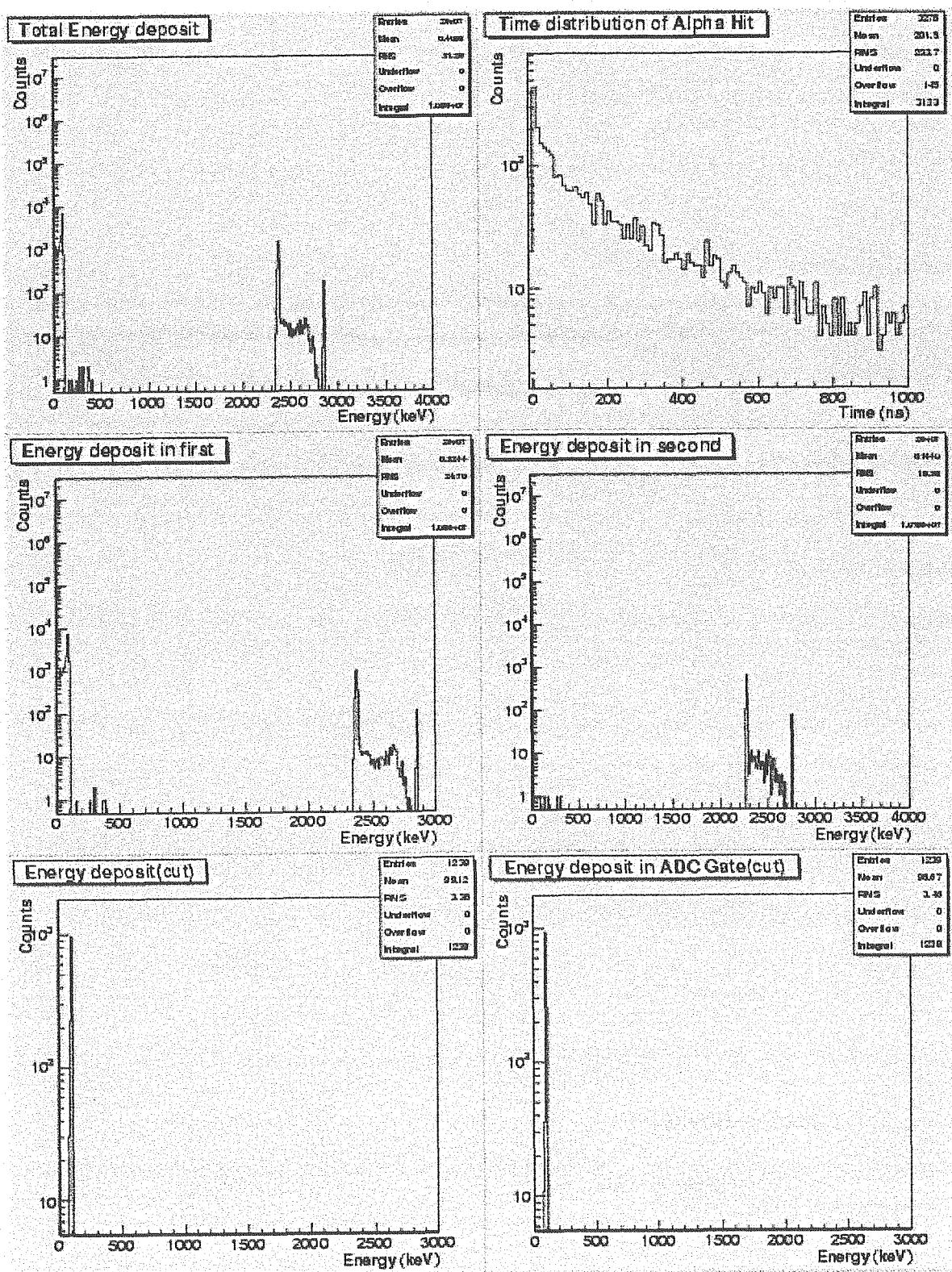


図 33: $E_n^0 = 0.1$ MeV、BC-523A;100 %の検出器によるスペクトル(1)。

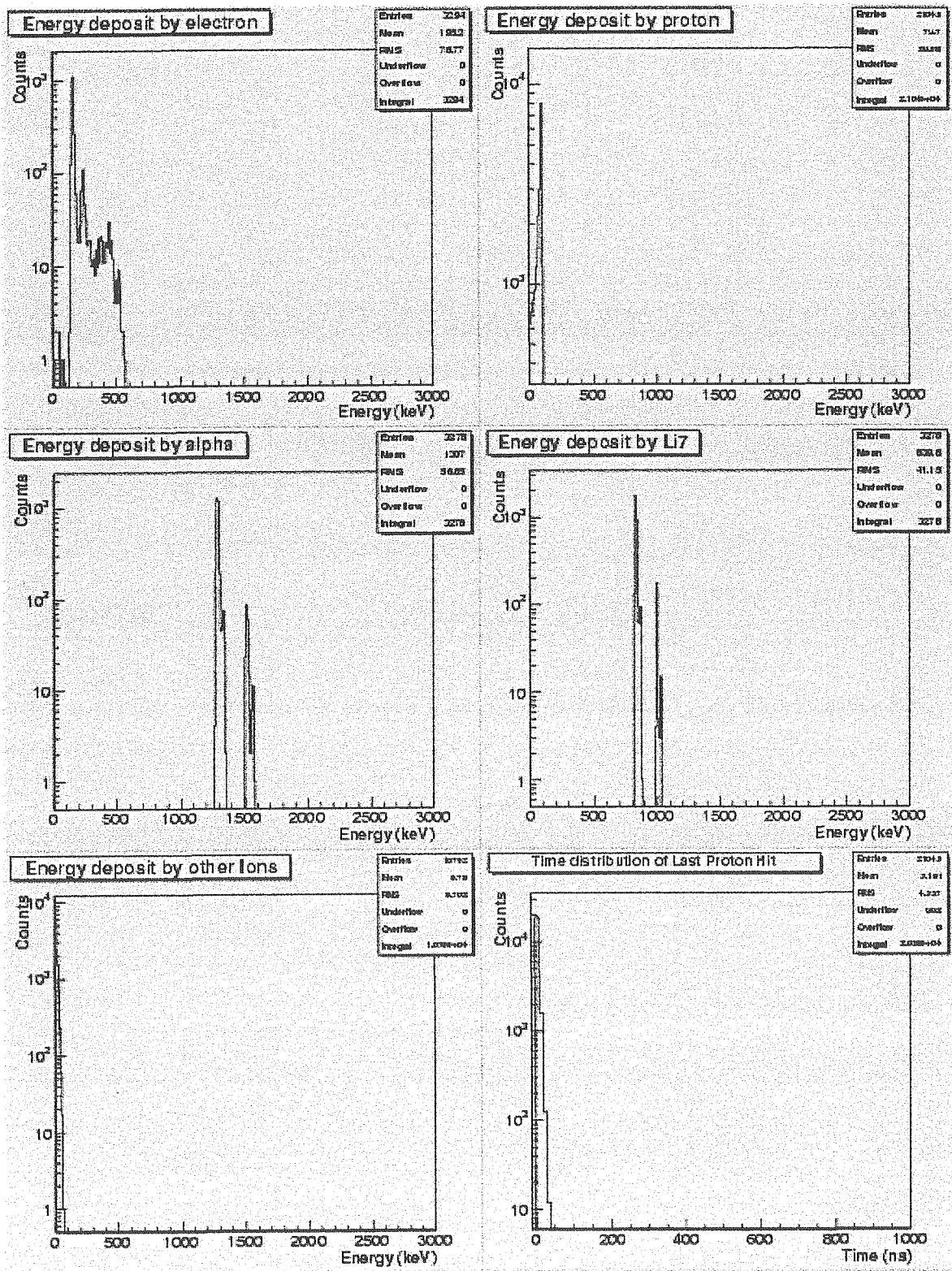


図 34: $E_n^0 = 0.1$ MeV、BC-523A;100 %の検出器によるスペクトル (2)。

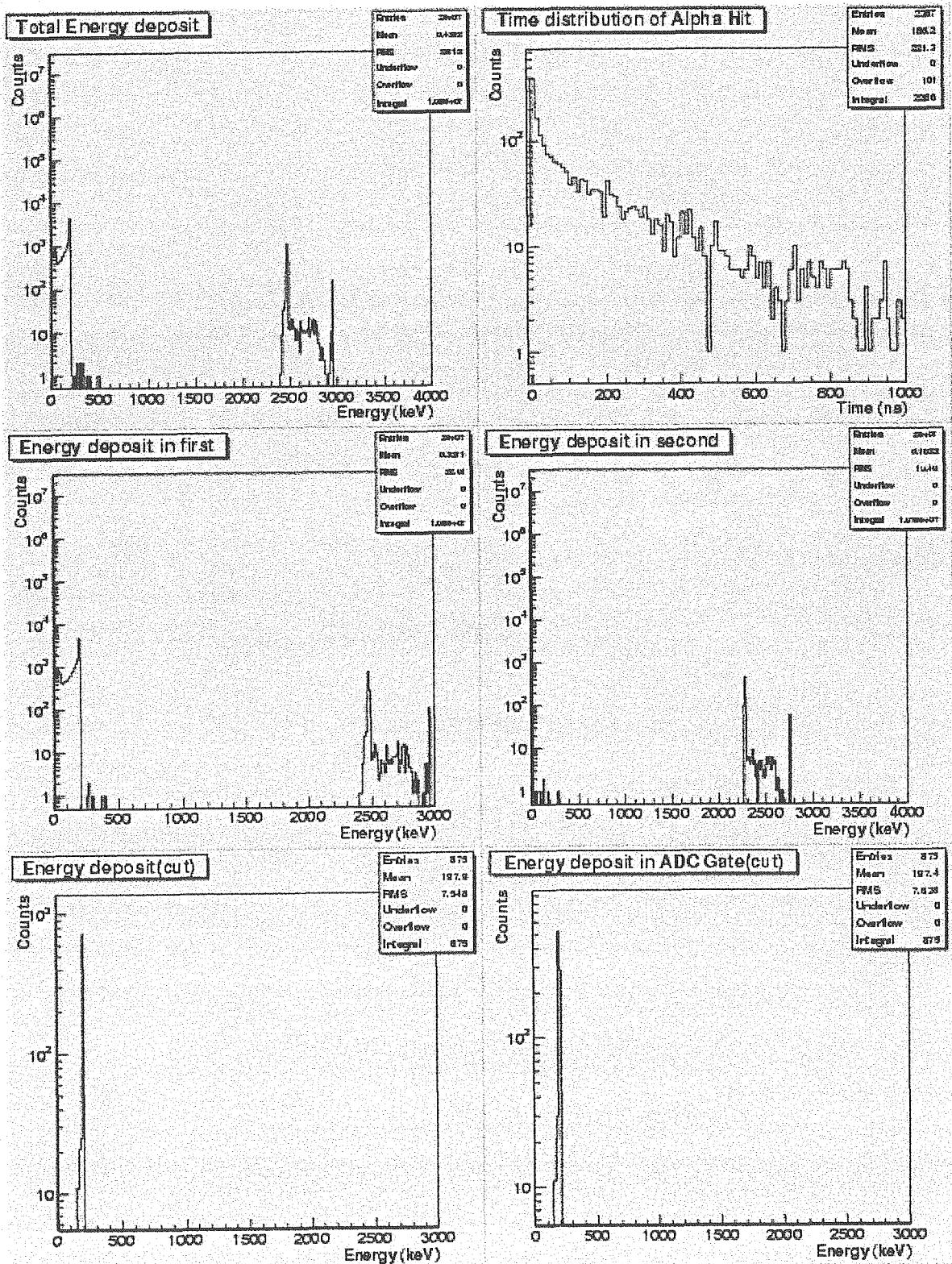


図 35: $E_n^0 = 0.2$ MeV、BC-523A;100 %の検出器によるスペクトル (1)。

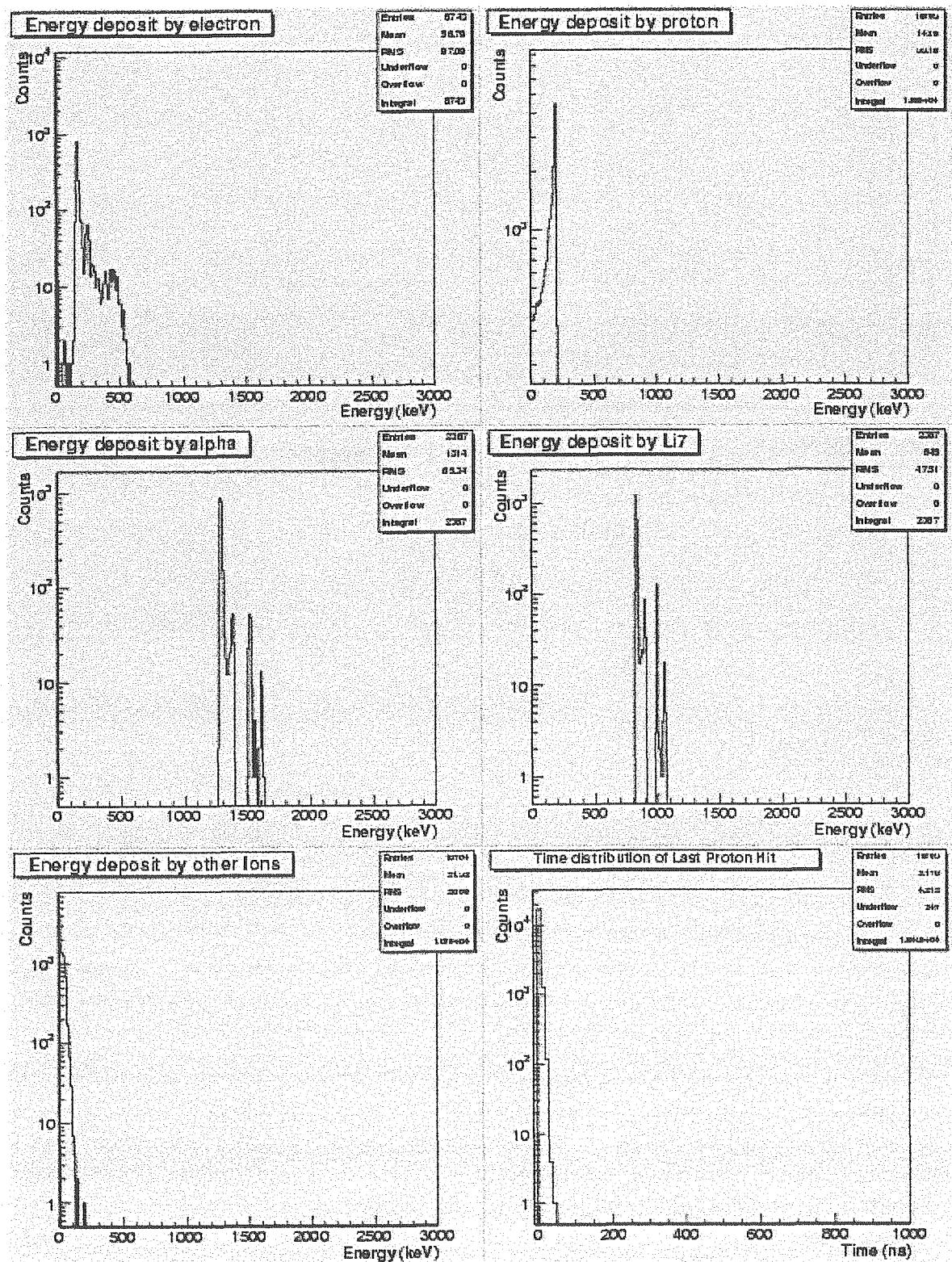


図 36: $E_n^0 = 0.2 \text{ MeV}$ 、BC-523A;100 %の検出器によるスペクトル(2)。

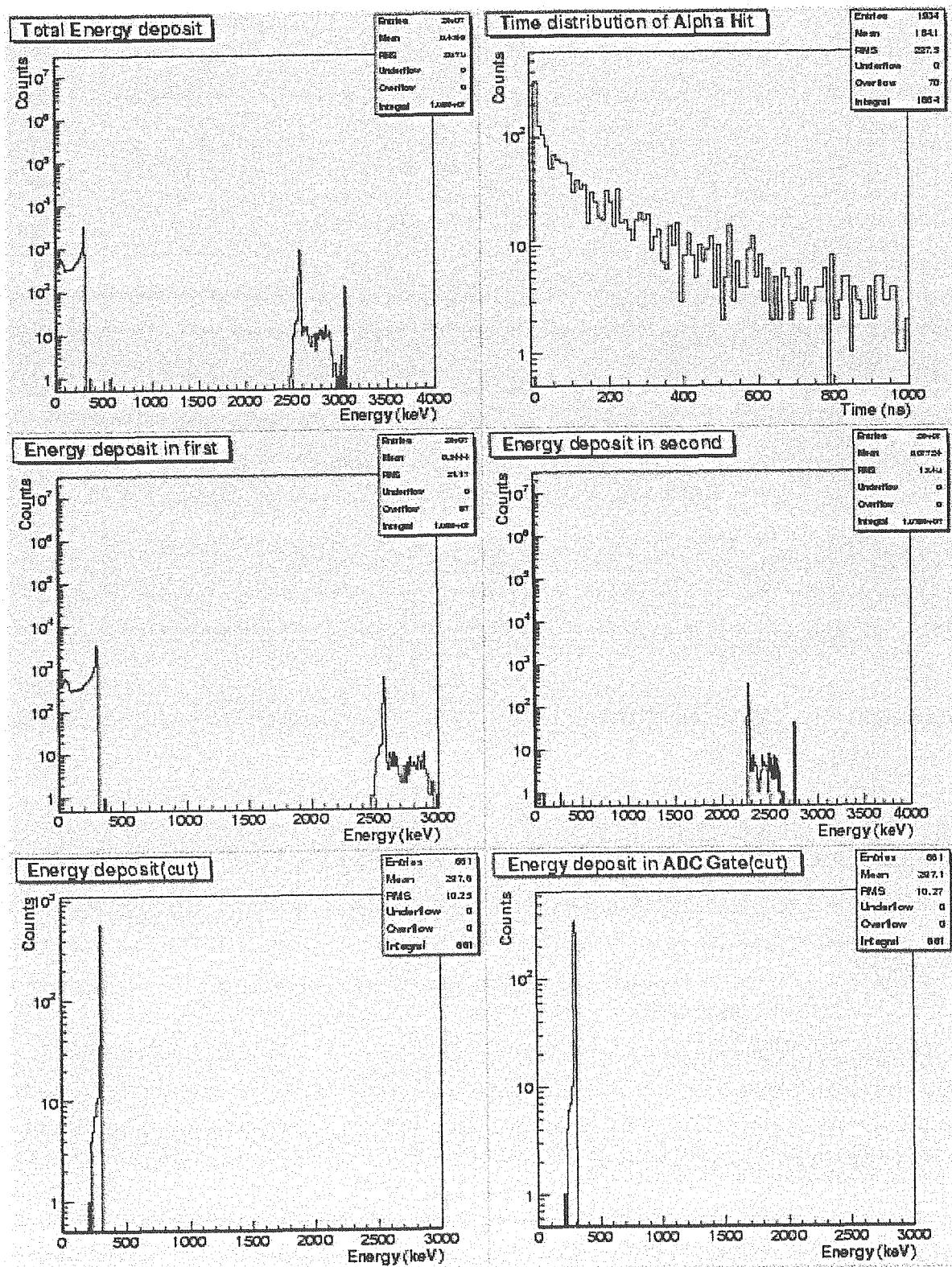


図 37: $E_n^0 = 0.3 \text{ MeV}$ 、BC-523A;100 %の検出器によるスペクトル(1)。

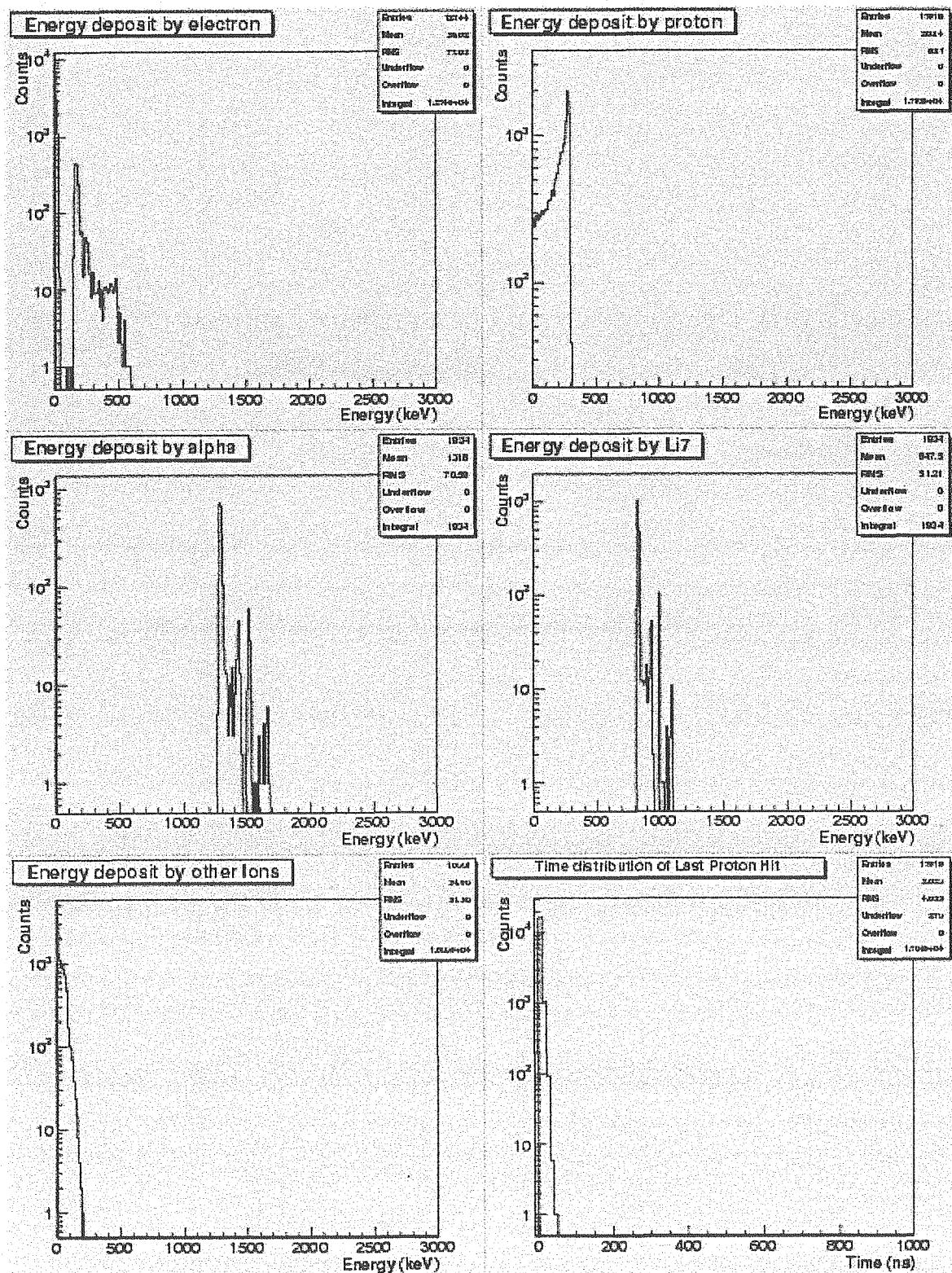


図 38: $E_n^0 = 0.3$ MeV、BC-523A;100 %の検出器によるスペクトル(2)。

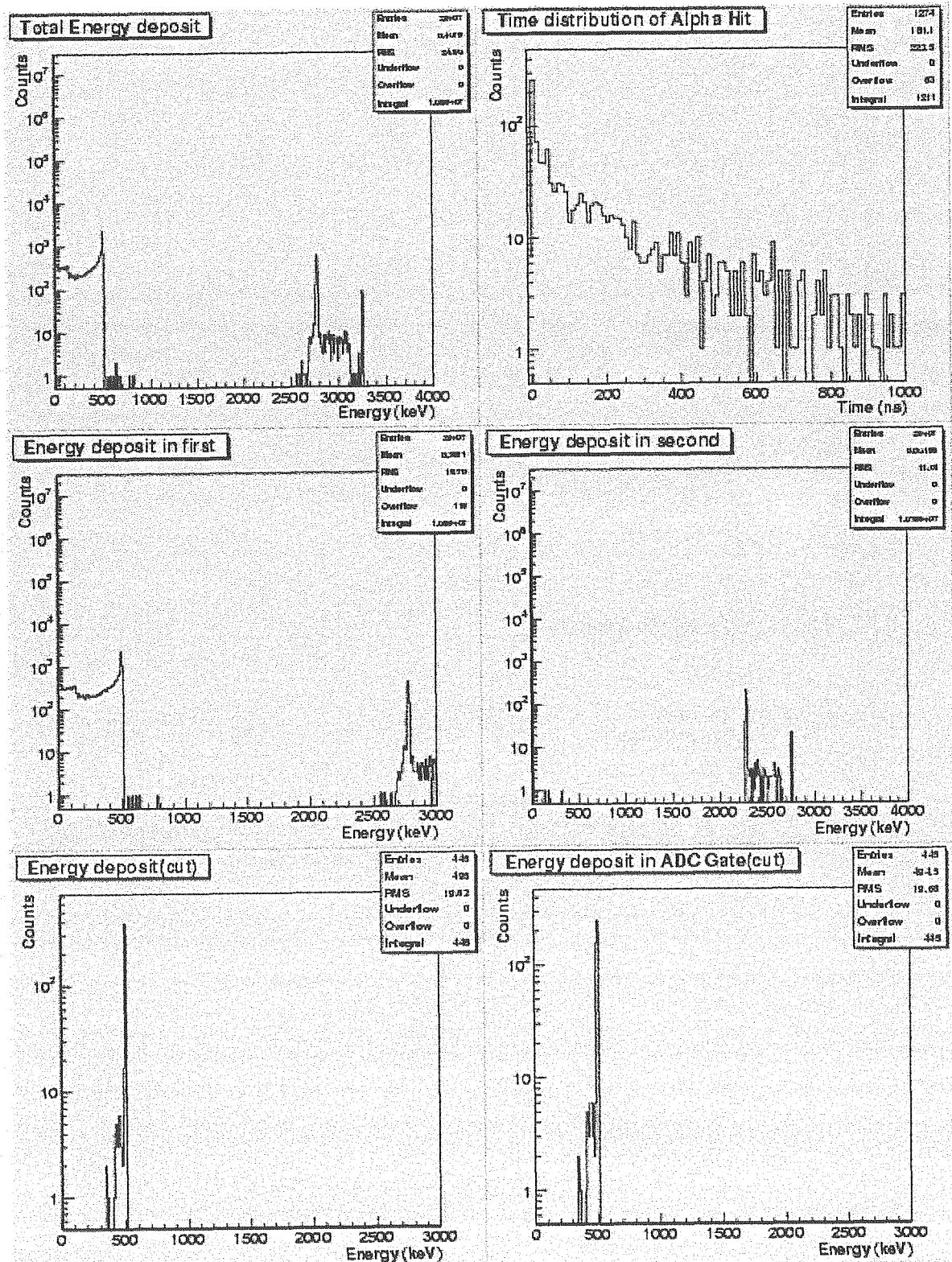


図 39: $E_n^0 = 0.5$ MeV、BC-523A;100 %の検出器によるスペクトル(1)。

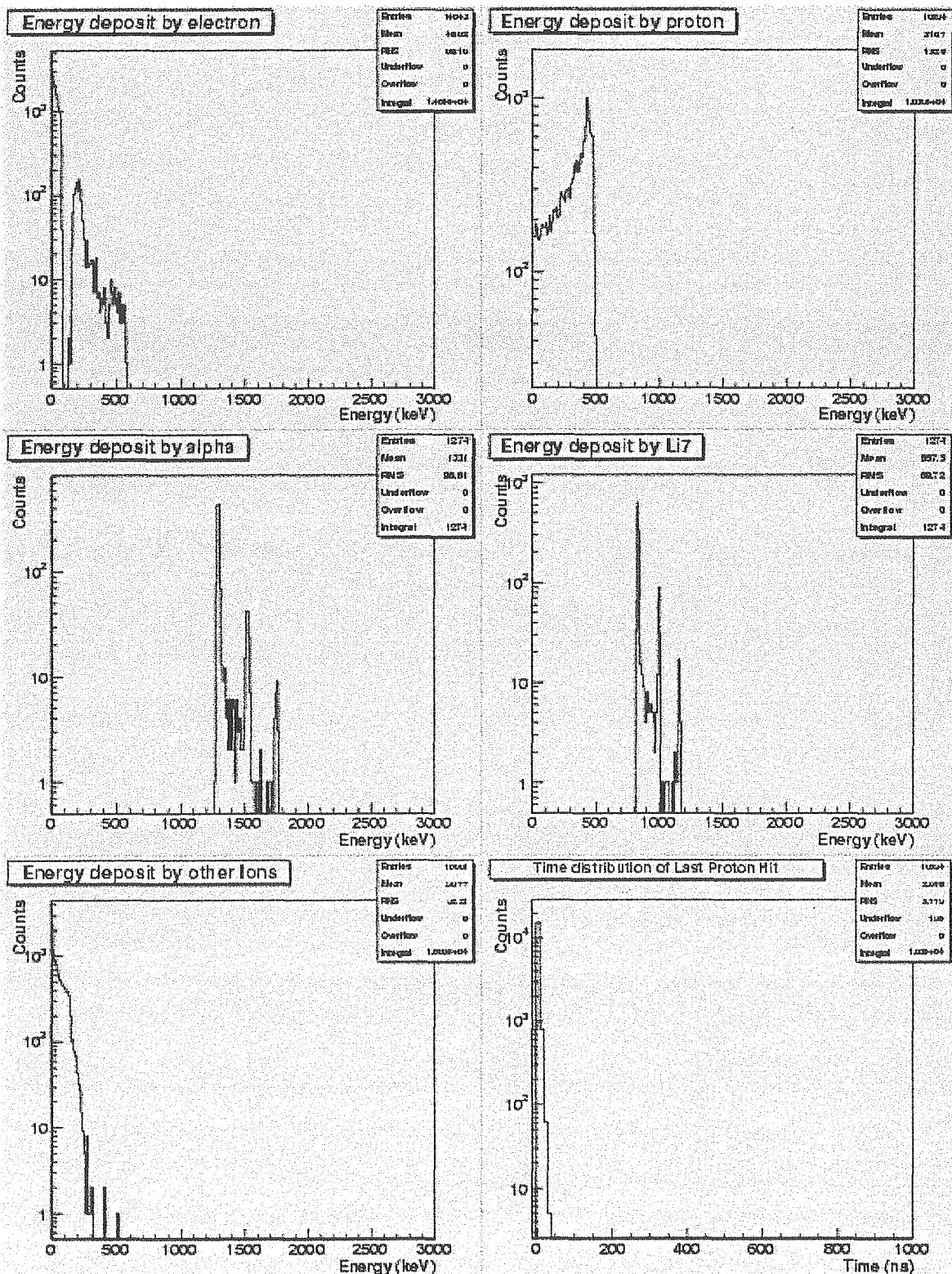


図 40: $E_n^0 = 0.5$ MeV、BC-523A;100 %の検出器によるスペクトル(2)。

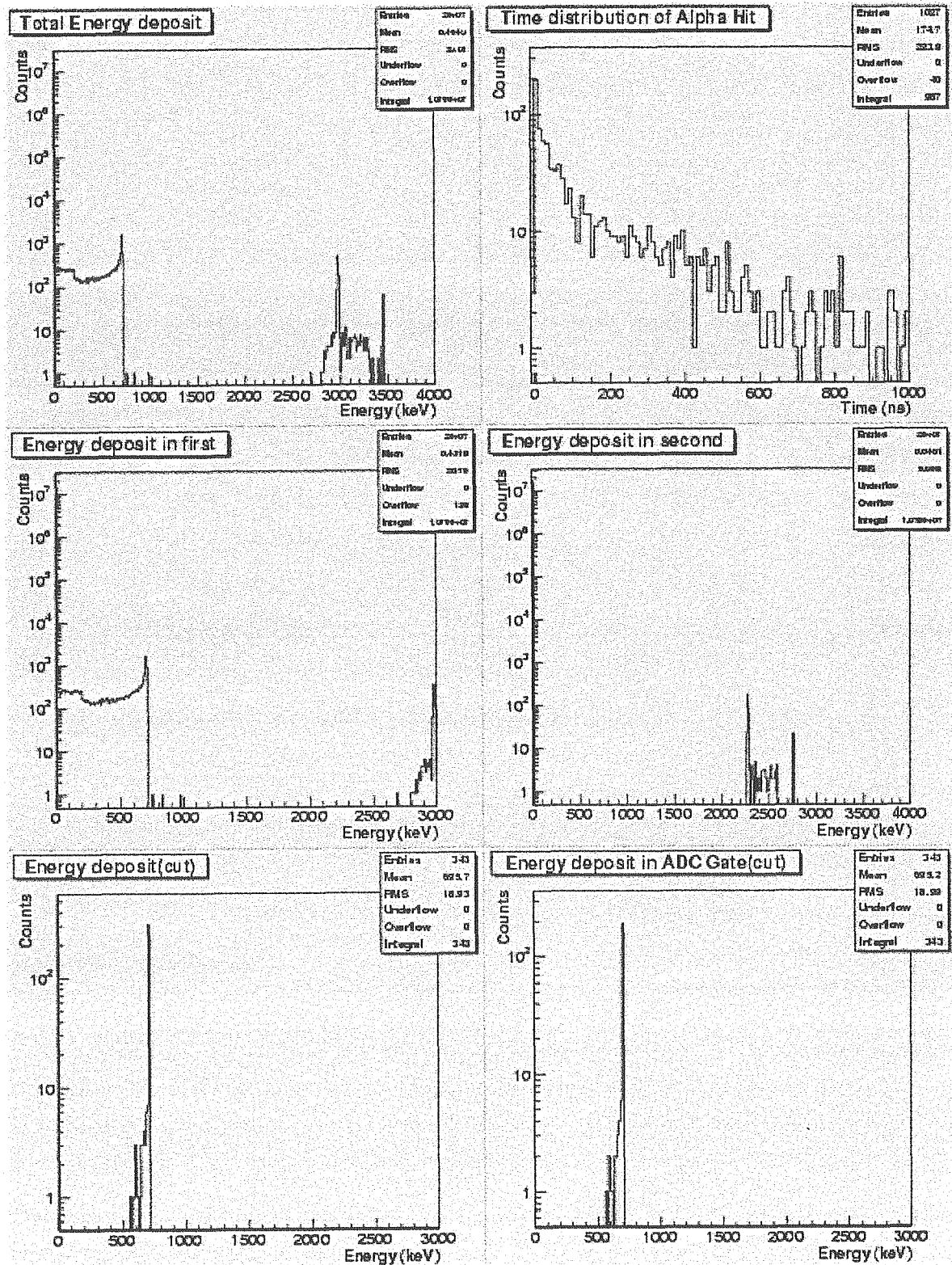


図 41: $E_n^0 = 0.7$ MeV、BC-523A;100 %の検出器によるスペクトル(1)。

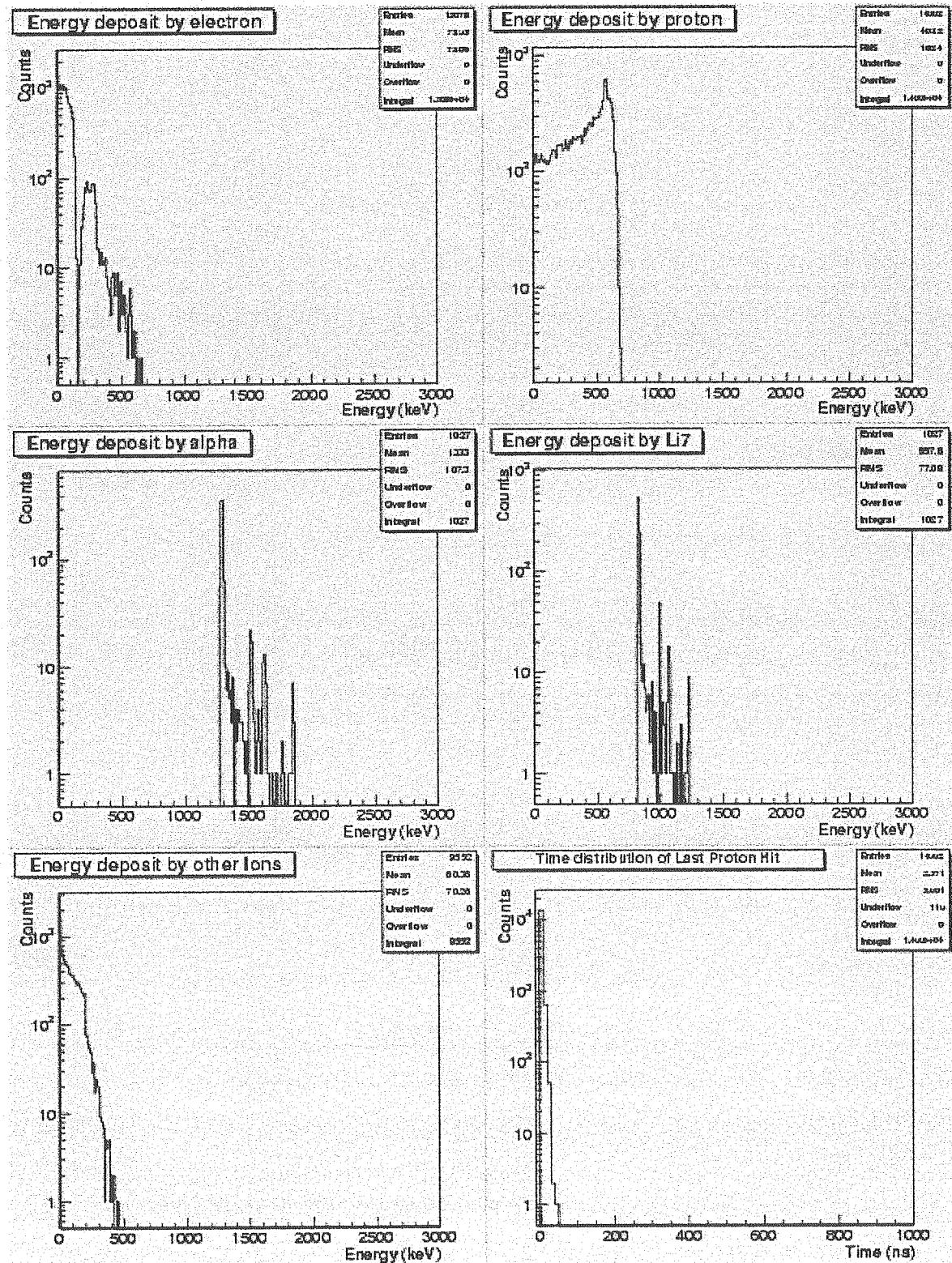


図 42: $E_n^0 = 0.7$ MeV、BC-523A;100 %の検出器によるスペクトル(2)。

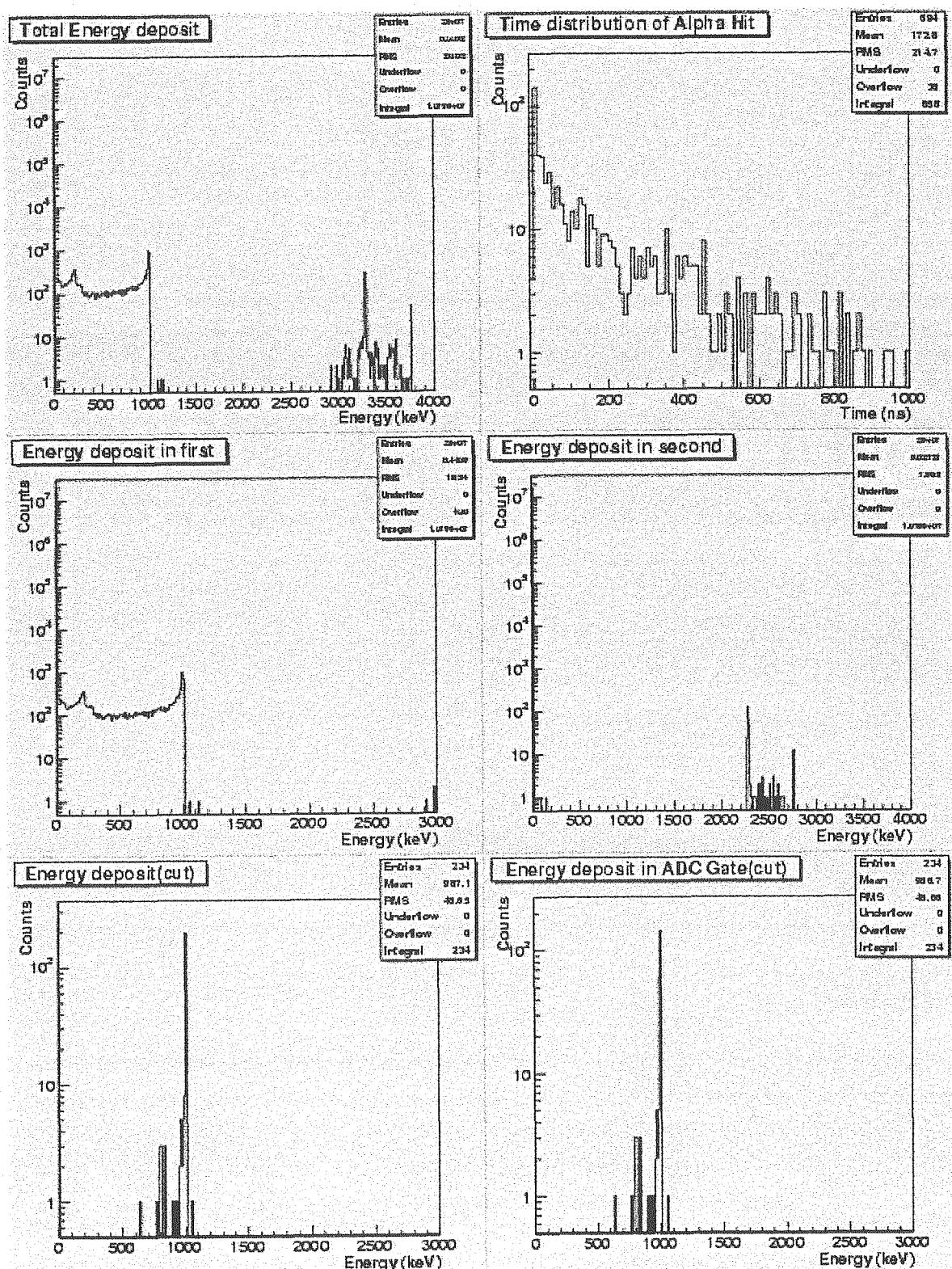


図 43: $E_n^0 = 1 \text{ MeV}$ 、BC-523A;100 %の検出器によるスペクトル (1)。

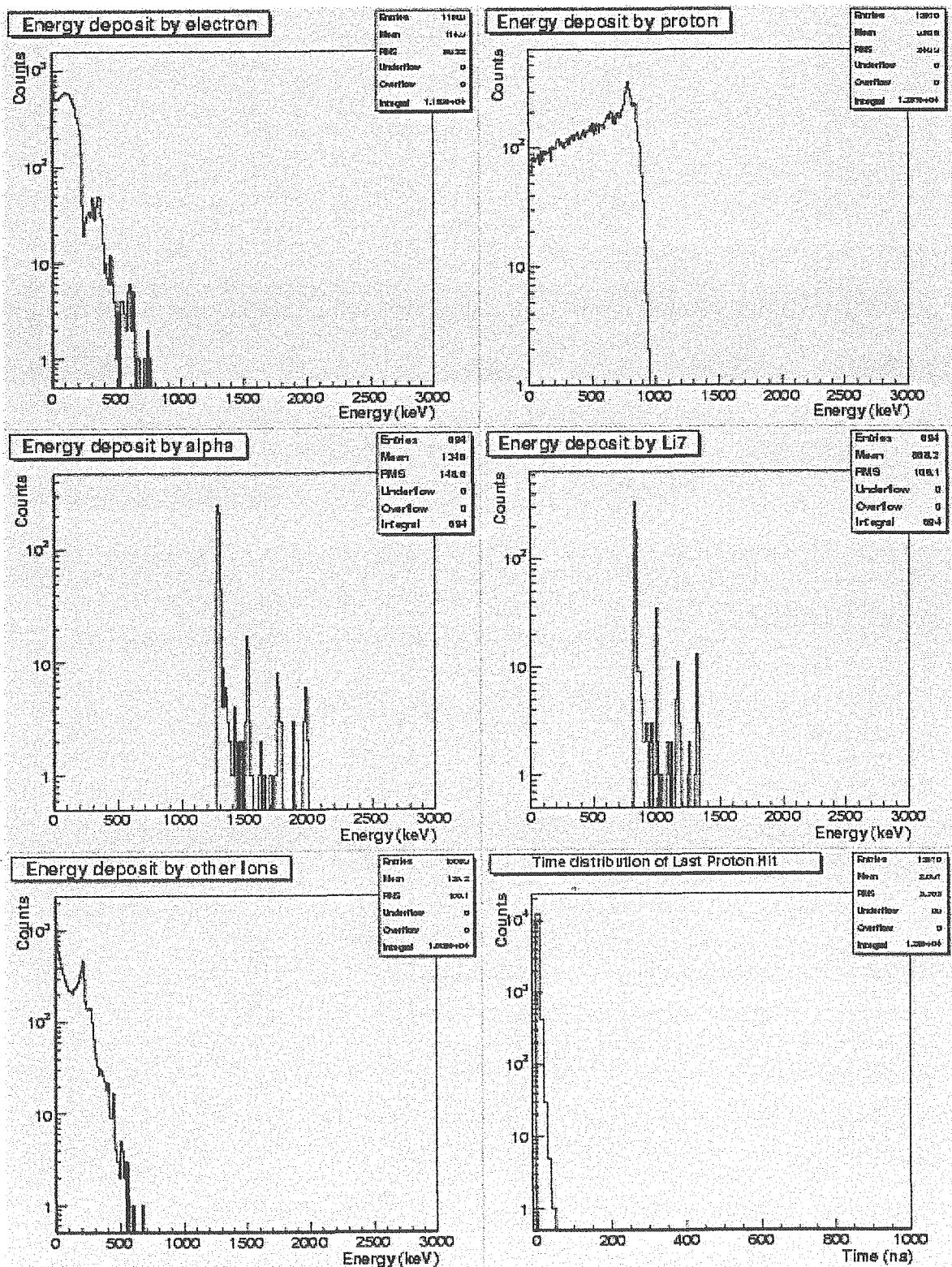


図 44: $E_n^0 = 1 \text{ MeV}$ 、BC-523A;100 %の検出器によるスペクトル(2)。

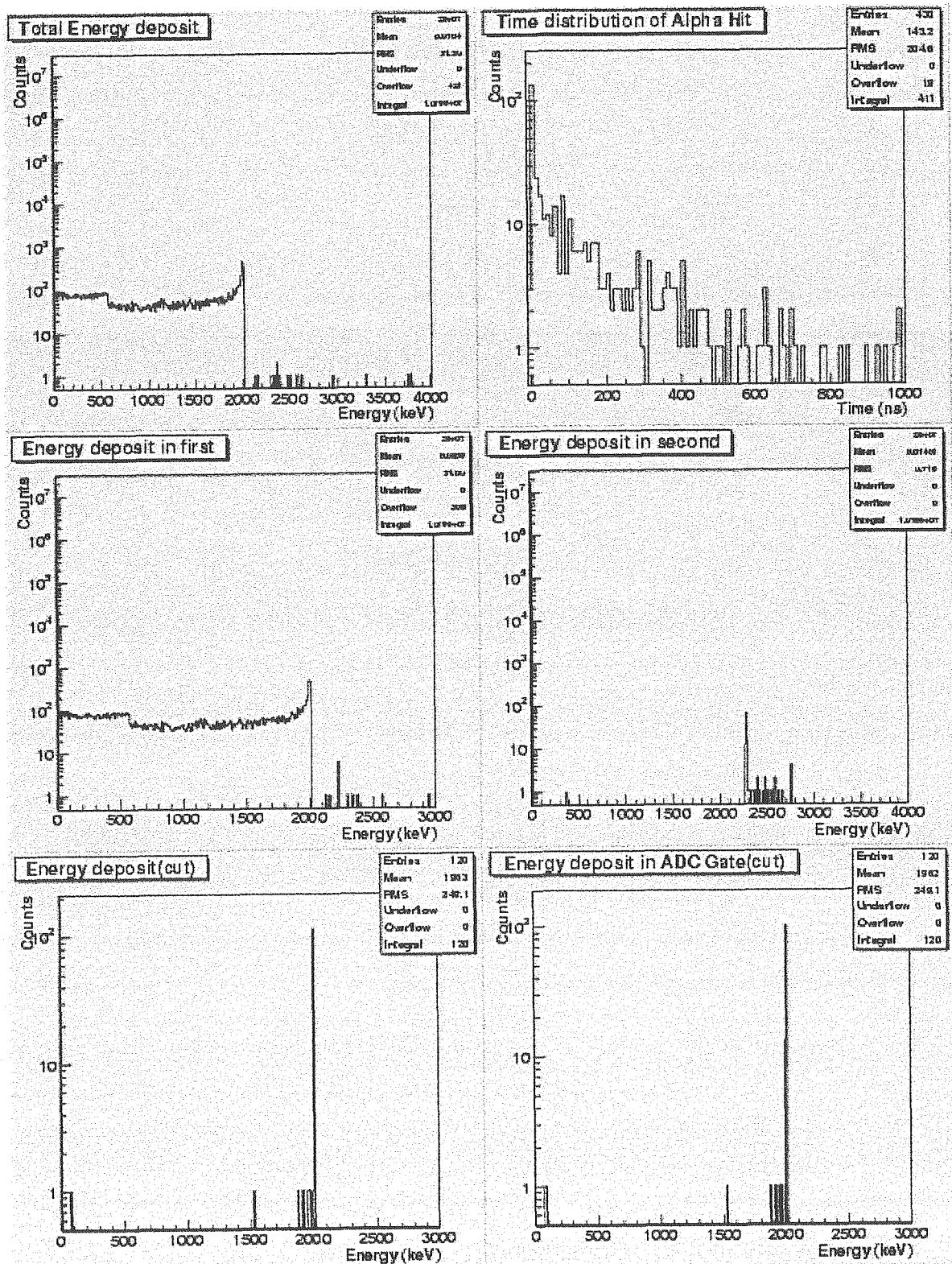


図 45: $E_n^0 = 2 \text{ MeV}$ 、BC-523A;100 %の検出器によるスペクトル(1)。

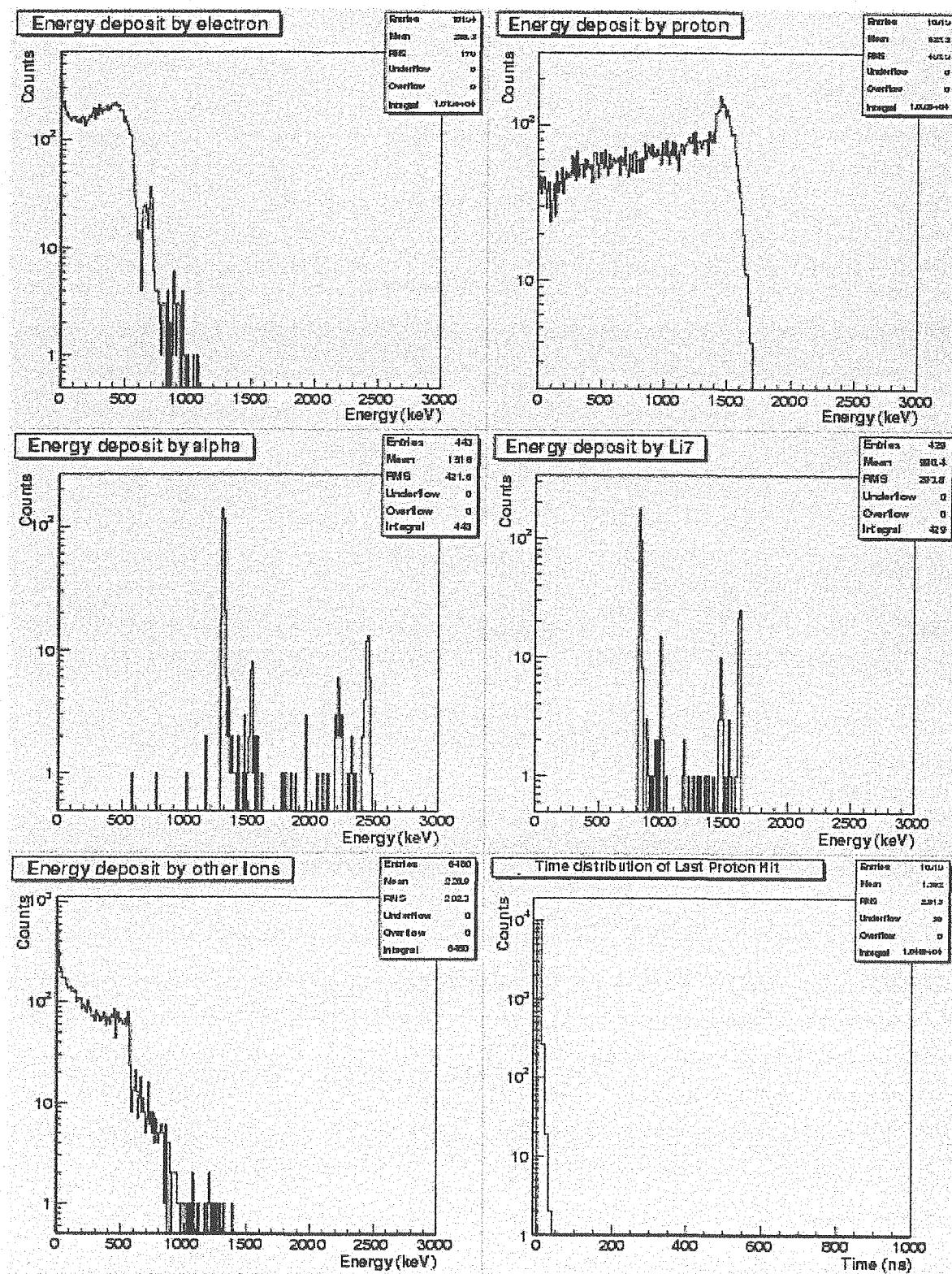


図 46: $E_n^0 = 2$ MeV、BC-523A;100 %の検出器によるスペクトル(2)。

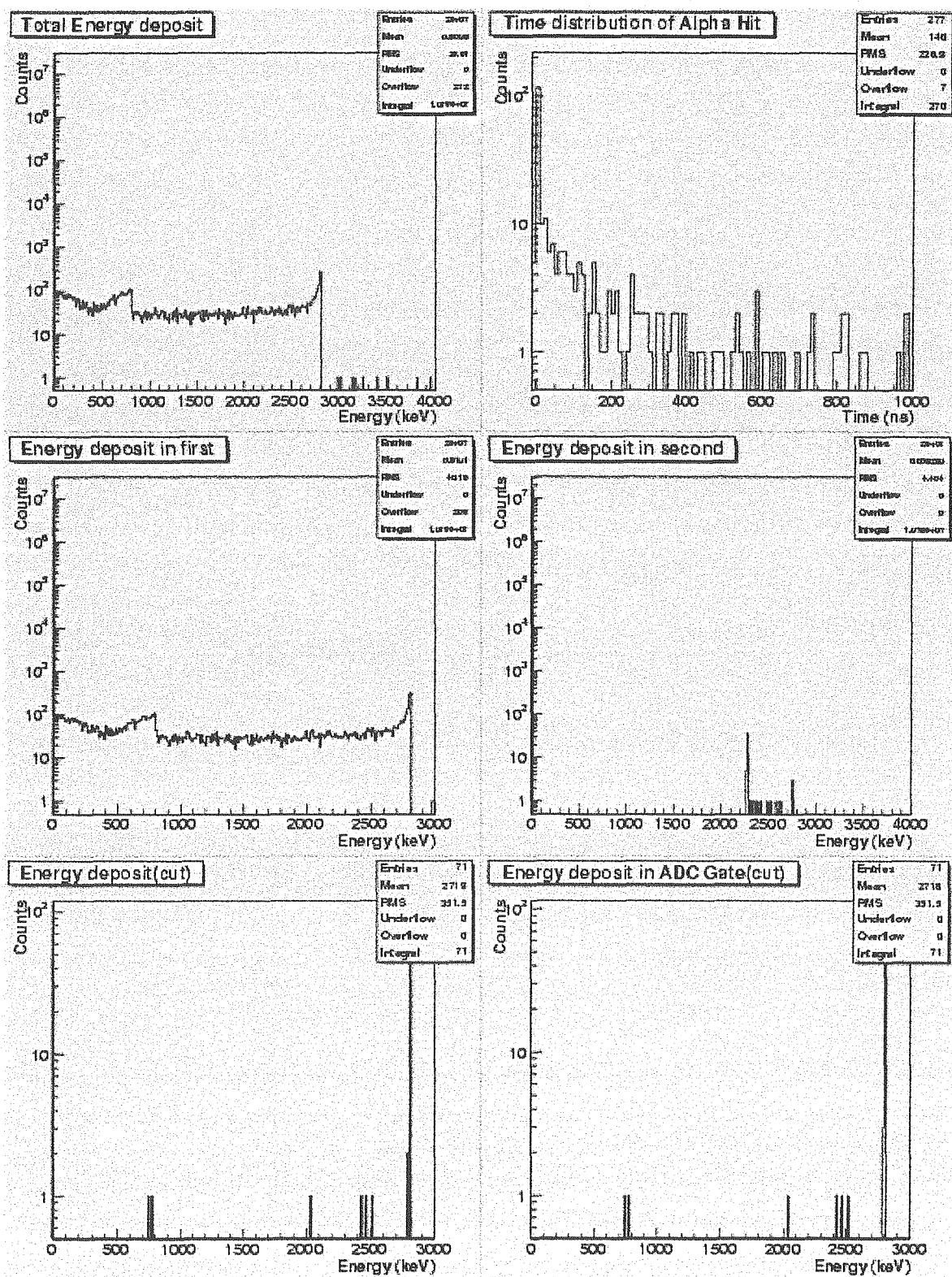


図 47: $E_n^0 = 2.8$ MeV、BC-523A;100 %の検出器によるスペクトル(1)。

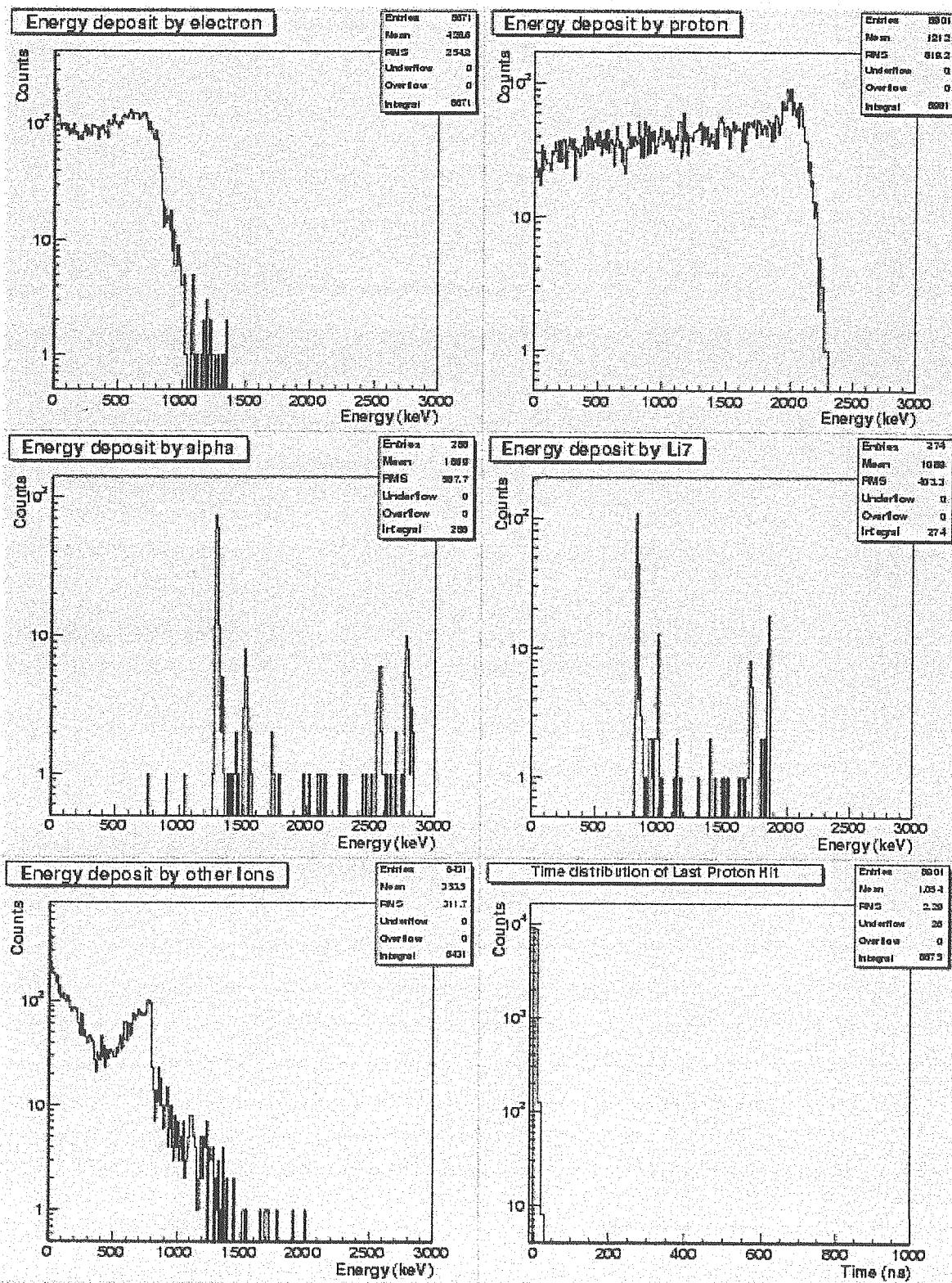


図 48: $E_n^0 = 2.8 \text{ MeV}$ 、BC-523A;100 %の検出器によるスペクトル (2)。

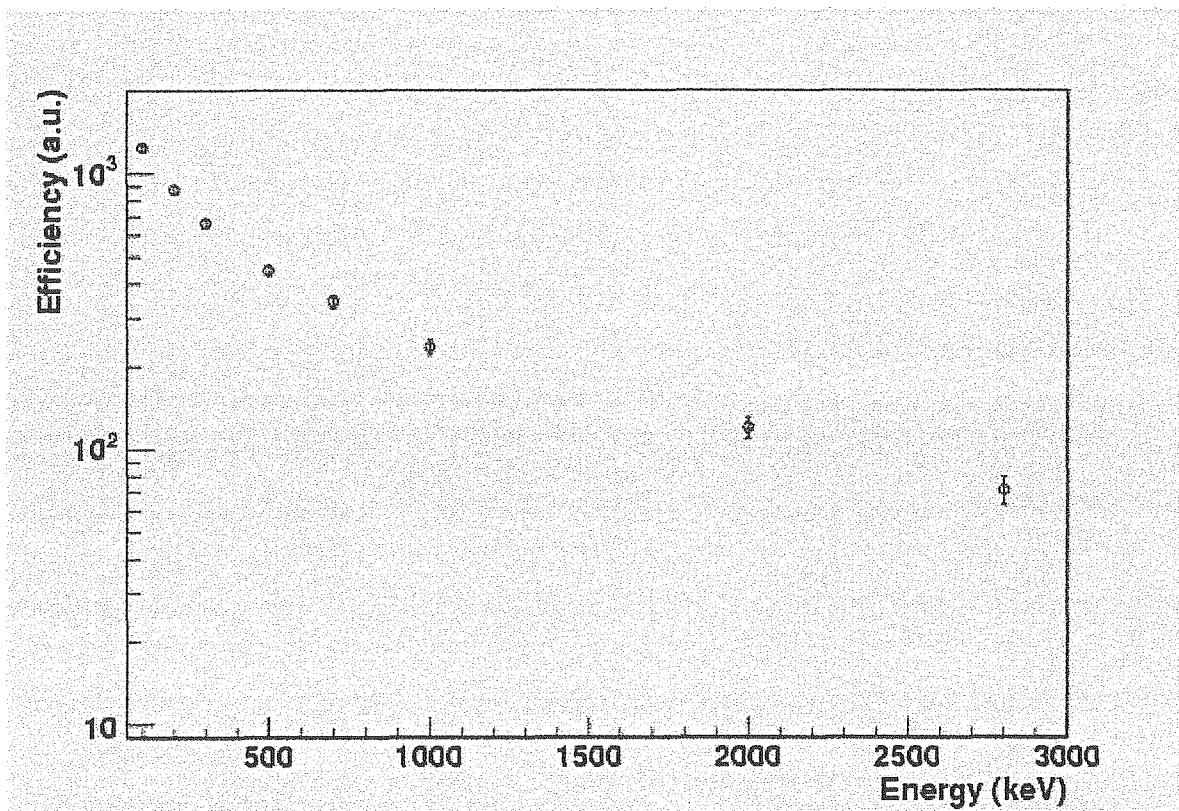


図 49: 入射中性子エネルギーによる検出効率の違い。

4.1.5 検出器の大きさ

続けて、検出器の大きさを実際の装置にあわせたもの、すなわちシンチレータ直径 12.6 cm × 長さ 8.6 cm、BC-523A を 10 % に希釈してシミュレーションを行った。今回、発生させた中性子イベント数は各 E_n^0 あたり 4×10^7 個である。得られたエネルギー分布を図 50-65 に示した。図 49 とあわせて、この形状での検出効率を示したものが図 66 になる。この図からわかるようにシミュレーションを行った全エネルギー領域において検出器の検出効率が下がっていることがわかる。それぞれのスペクトルを詳細に見ると、弾性散乱した陽子からのエネルギー付与のイベント数は、大きい検出器のほうが多いのに対して、 α 粒子によるそれは小さい検出器のほうが多くなっている。これは ^{10}B の濃度が十分でなく epi-thermal な中性子に対する吸収効率が落ちていることが原因だと考えられる。

そこで、BC-523A の濃度 10 % と 100 % の間に最適値が存在するかを確認するため、以下のようなシミュレーションを行った。

- $E_n^0 = 0.1, 0.5 \text{ MeV}$
- BC-523A の濃度を 20, 50 % として、それに合う形状のシンチレータを考える。
- 発生させた中性子イベント数は各シンチレータ形状、及び E_n^0 あたり 4×10^7 個。

得られたスペクトルを図 67-74 に示した。また図 75 には、このシミュレーションで得られた E_{Gate} のイベント数を横軸をシンチレータの体積としてプロットした。これらからわかるように、入射エネルギー 100, 500 keVにおいては BC-523A 100 % の検出器が最も検出効率が良いことになる。また、他の入射エネルギーにおいても同様の結果が得られると考えられる。

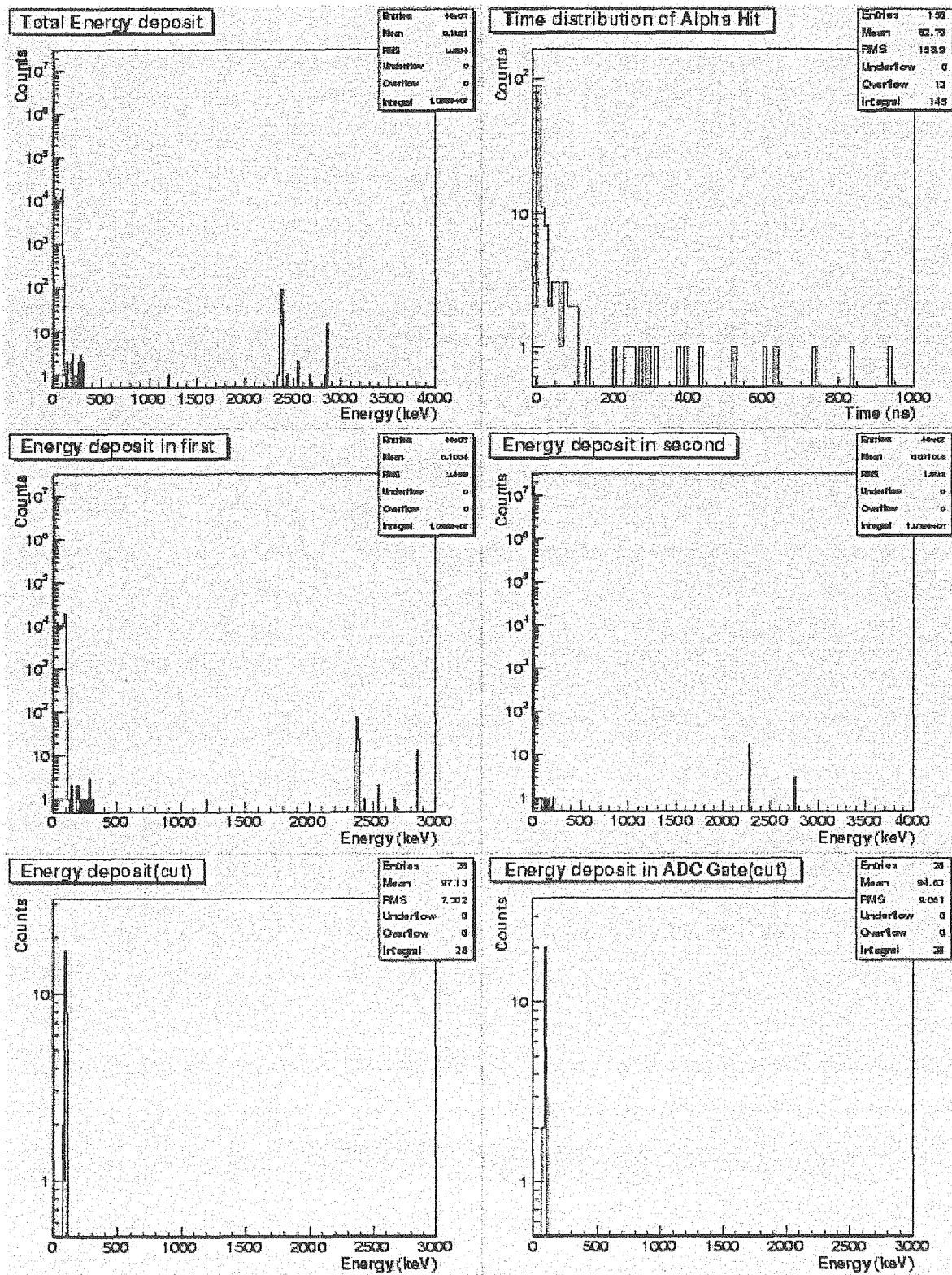


図 50: $E_n^0 = 0.1$ MeV、BC-523A; 10 %の検出器によるスペクトル (1)。

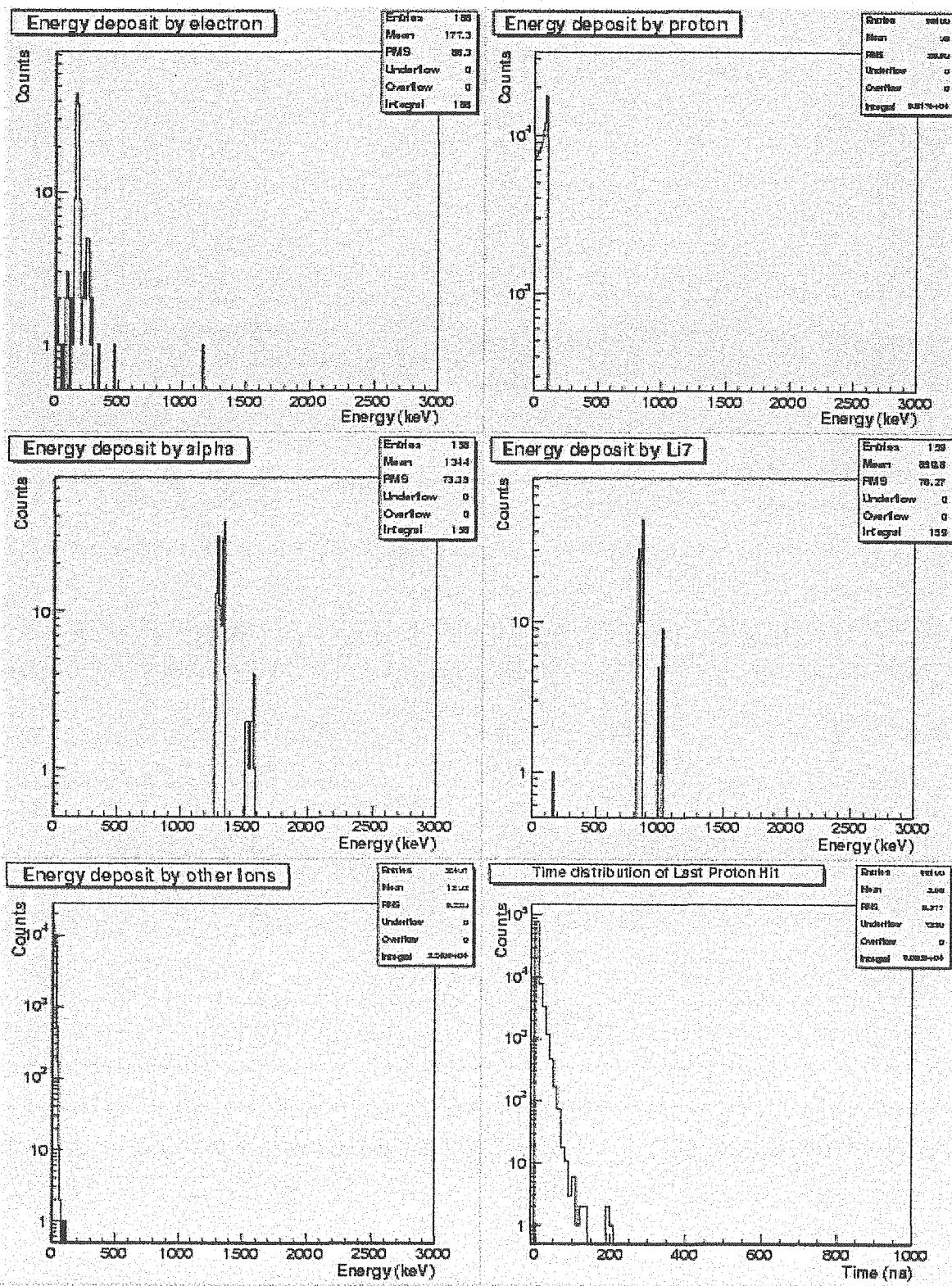


図 51: $E_n^0 = 0.1 \text{ MeV}$, BC-523A; 10 %の検出器によるスペクトル(2)。

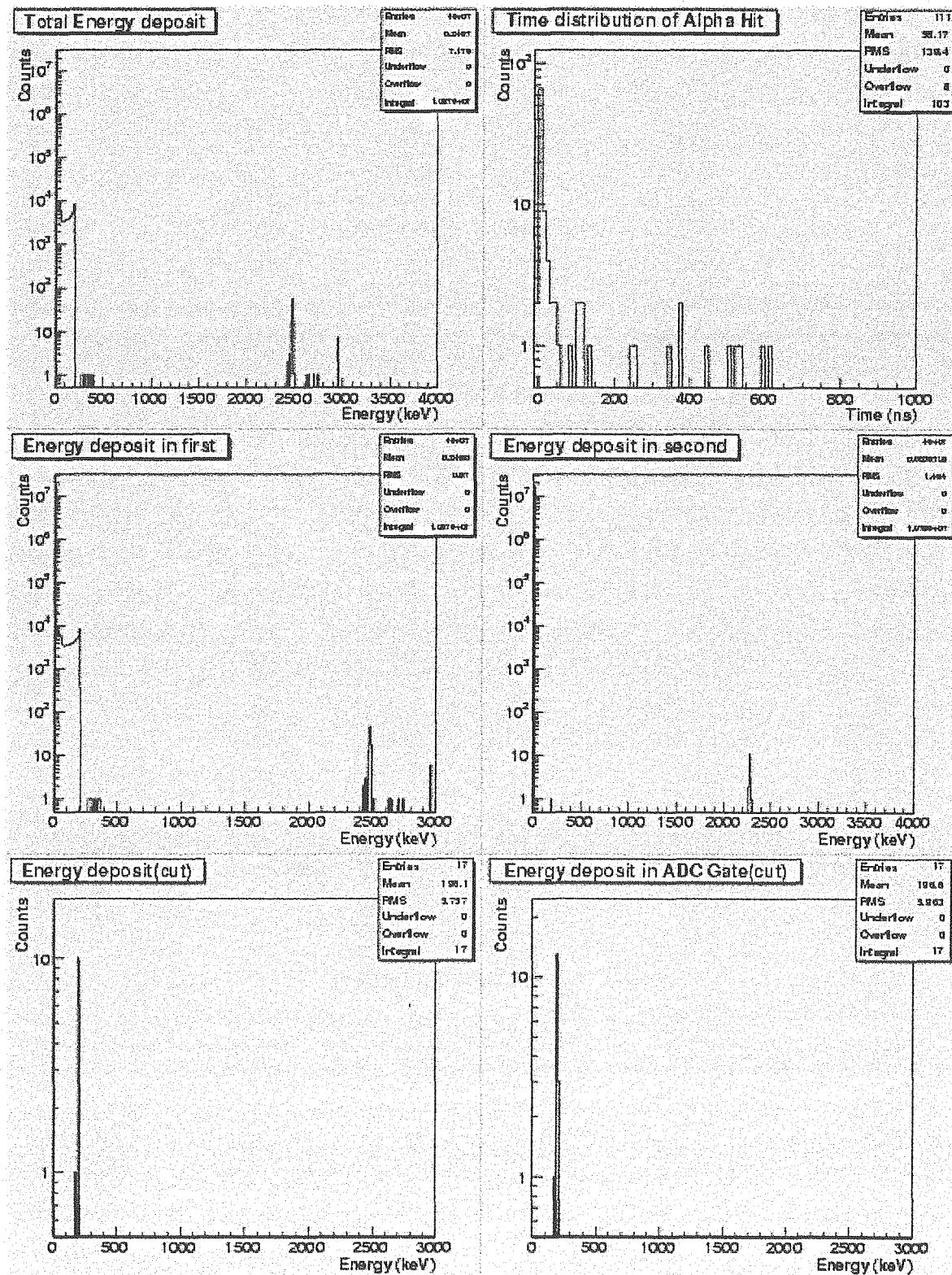


図 52: $E_n^0 = 0.2 \text{ MeV}$ 、BC-523A;10 %の検出器によるスペクトル(1)。

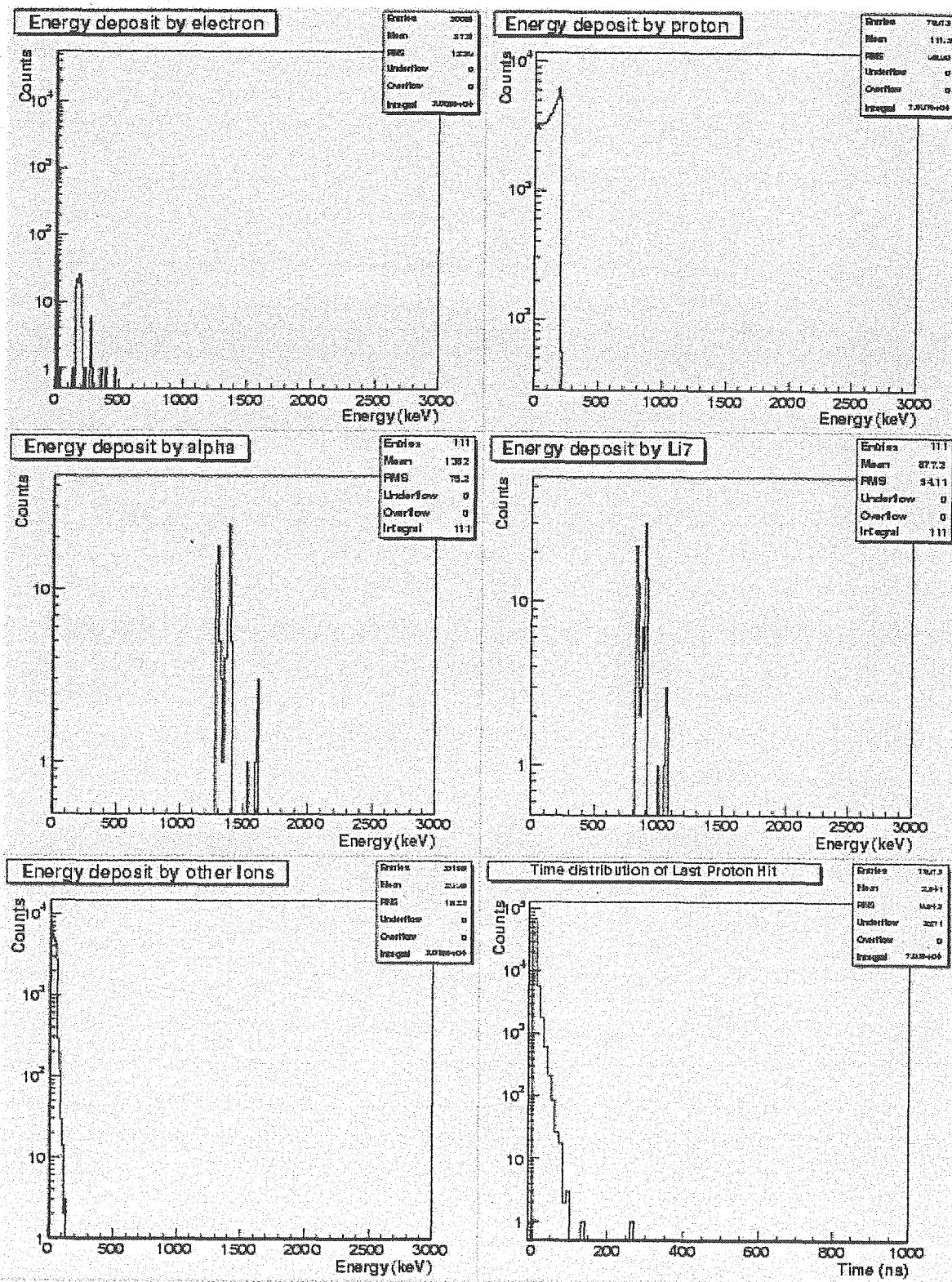


図 53: $E_n^0 = 0.2 \text{ MeV}$ 、BC-523A;10 %の検出器によるスペクトル(2)。

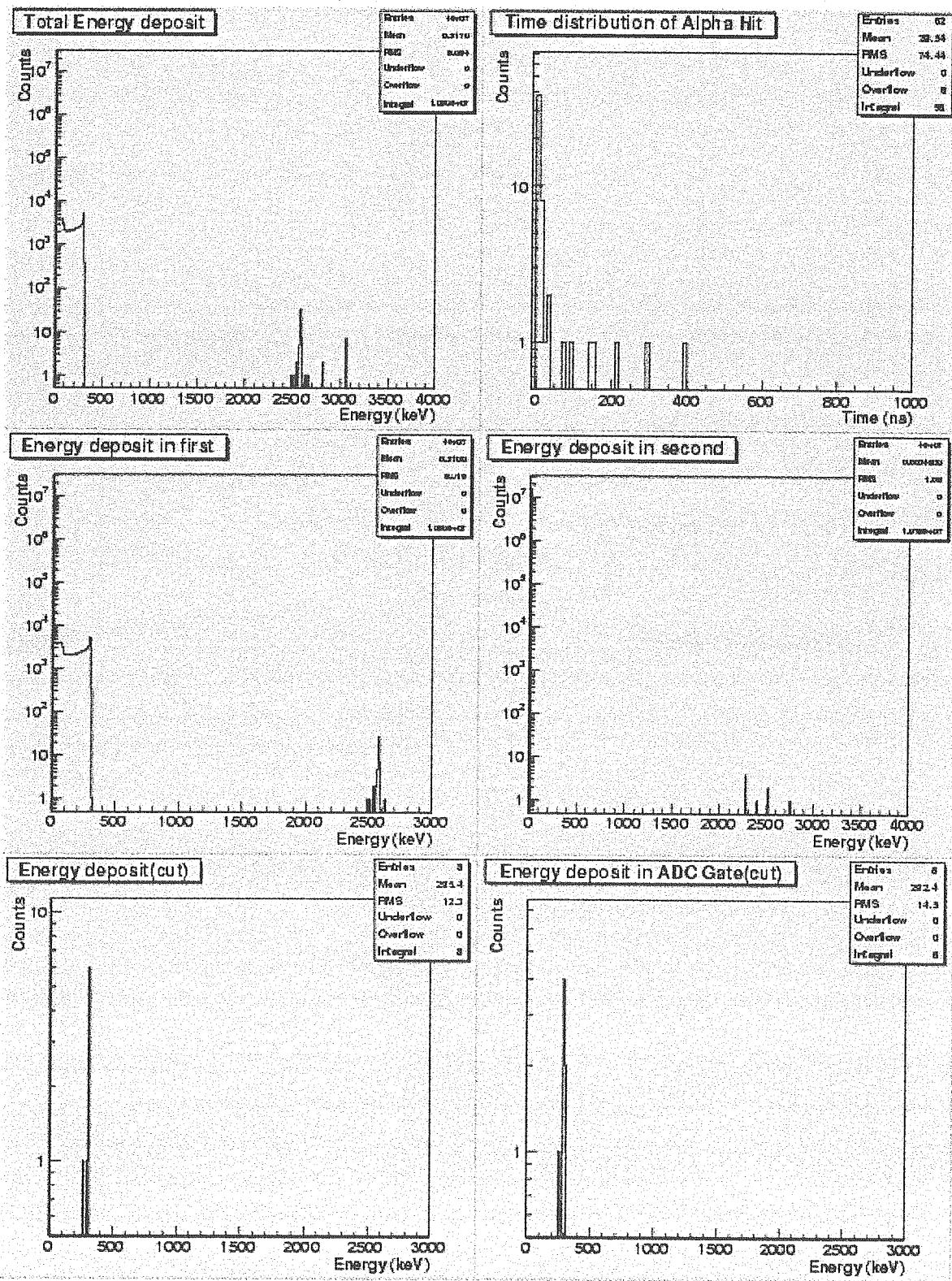


図 54: $E_n^0 = 0.3$ MeV、BC-523A;10 %の検出器によるスペクトル(1)。

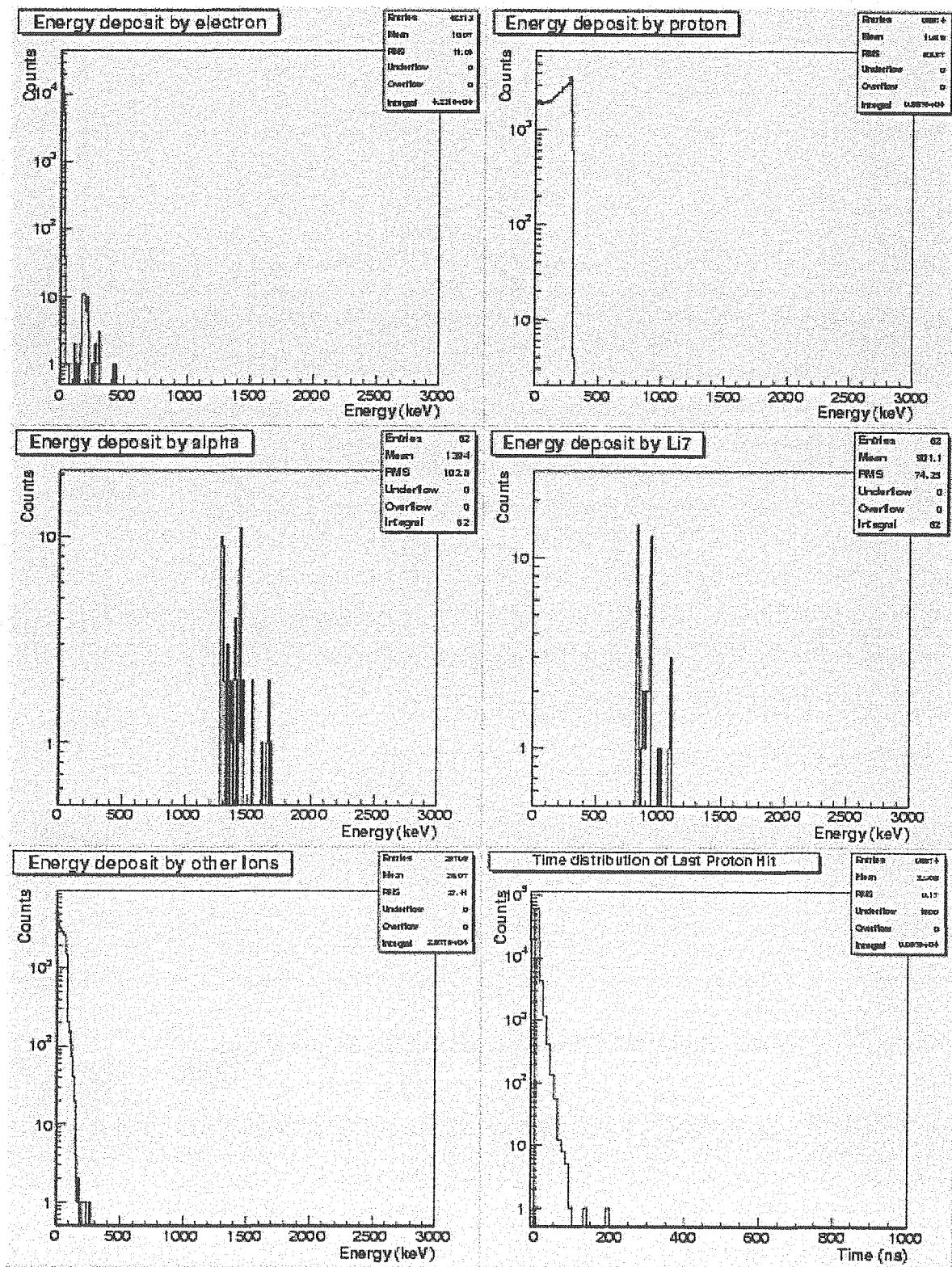


図 55: $E_n^0 = 0.3 \text{ MeV}$ 、BC-523A; 10 %の検出器によるスペクトル(2)。

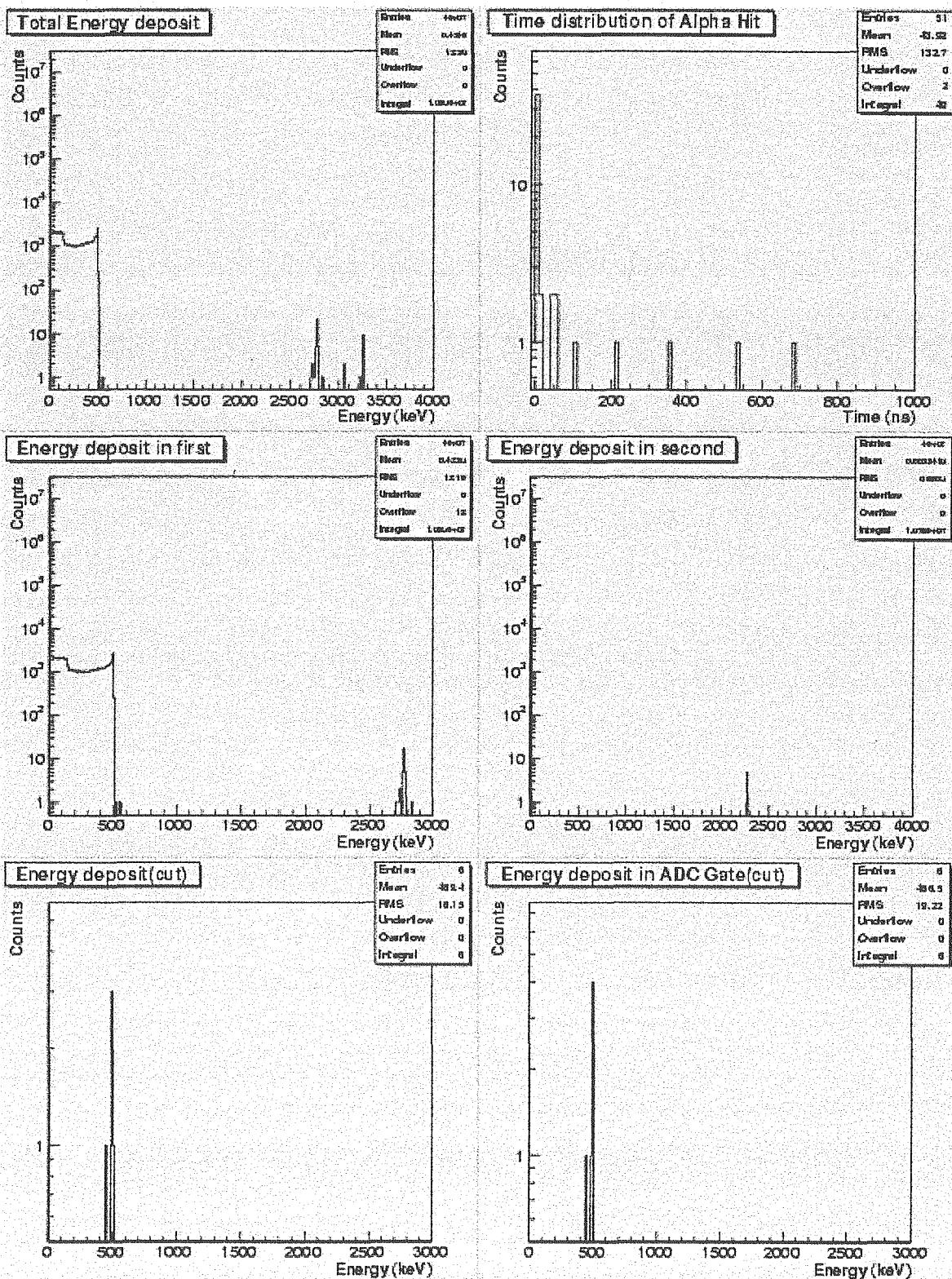


図 56: $E_n^0 = 0.5 \text{ MeV}$ 、BC-523A;10 %の検出器によるスペクトル(1)。

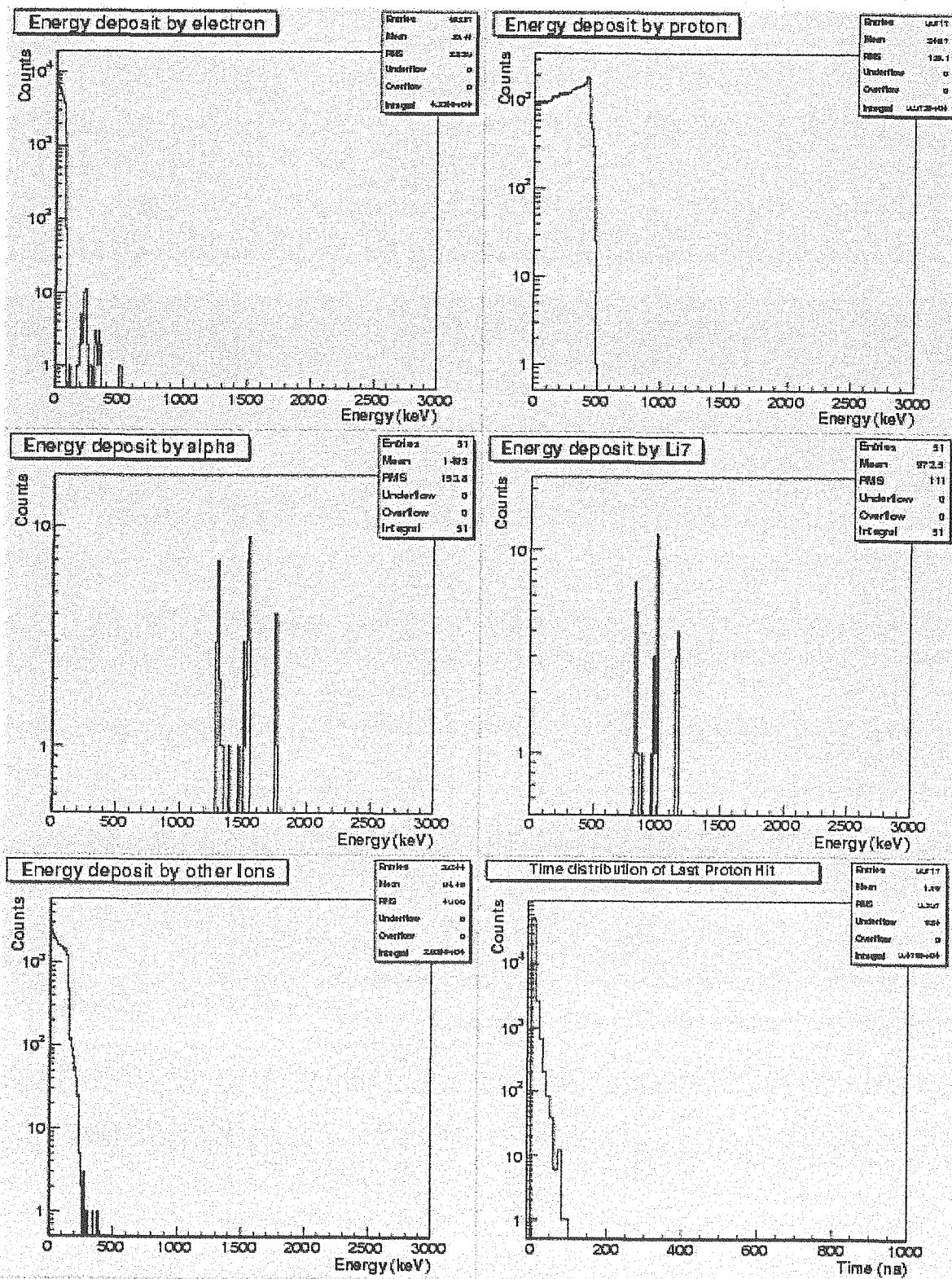


図 57: $E_n^0 = 0.5 \text{ MeV}$ 、BC-523A;10 %の検出器によるスペクトル(2)。

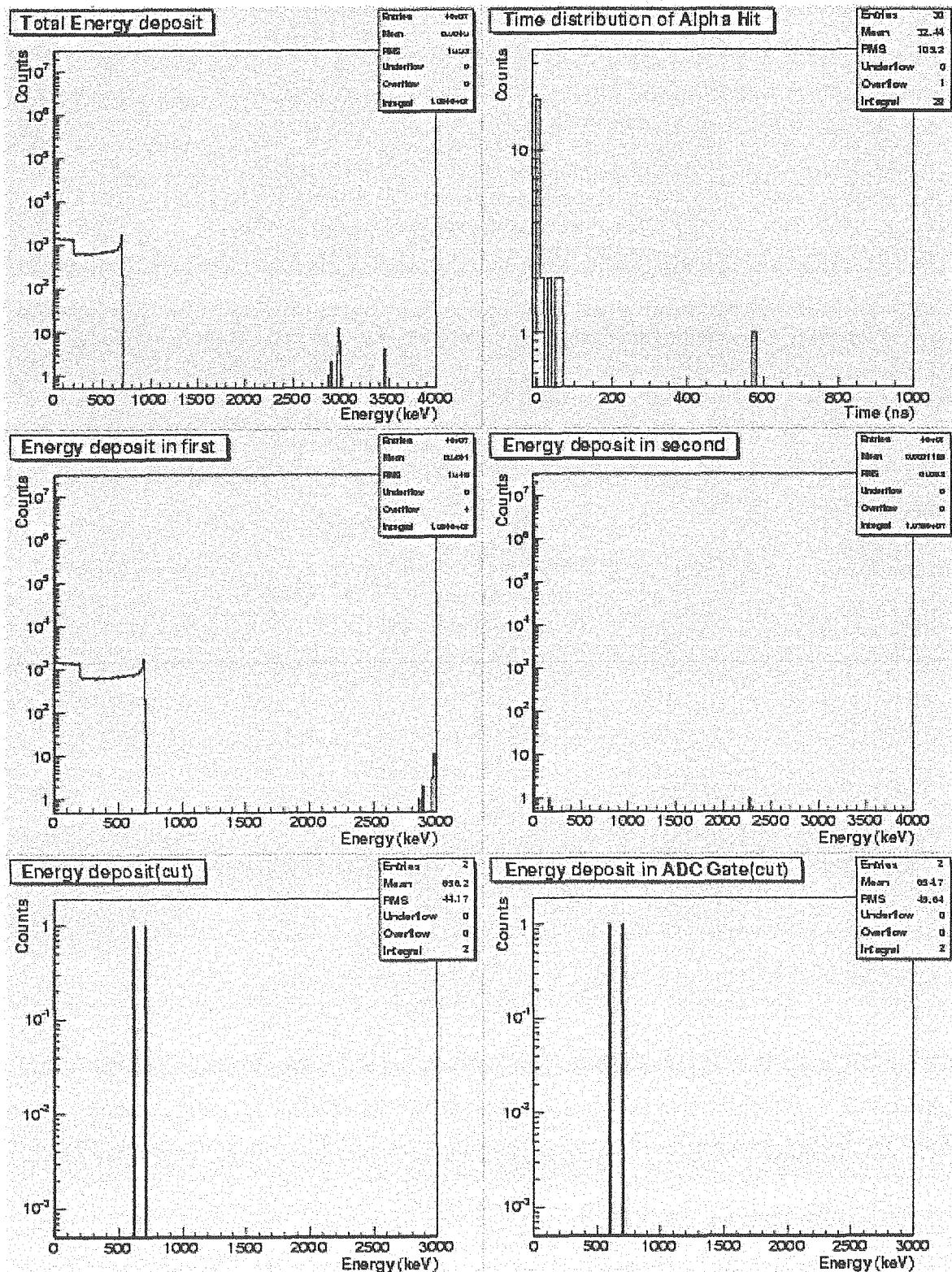


図 58: $E_n^0 = 0.7$ MeV、BC-523A;10 %の検出器によるスペクトル(1)。

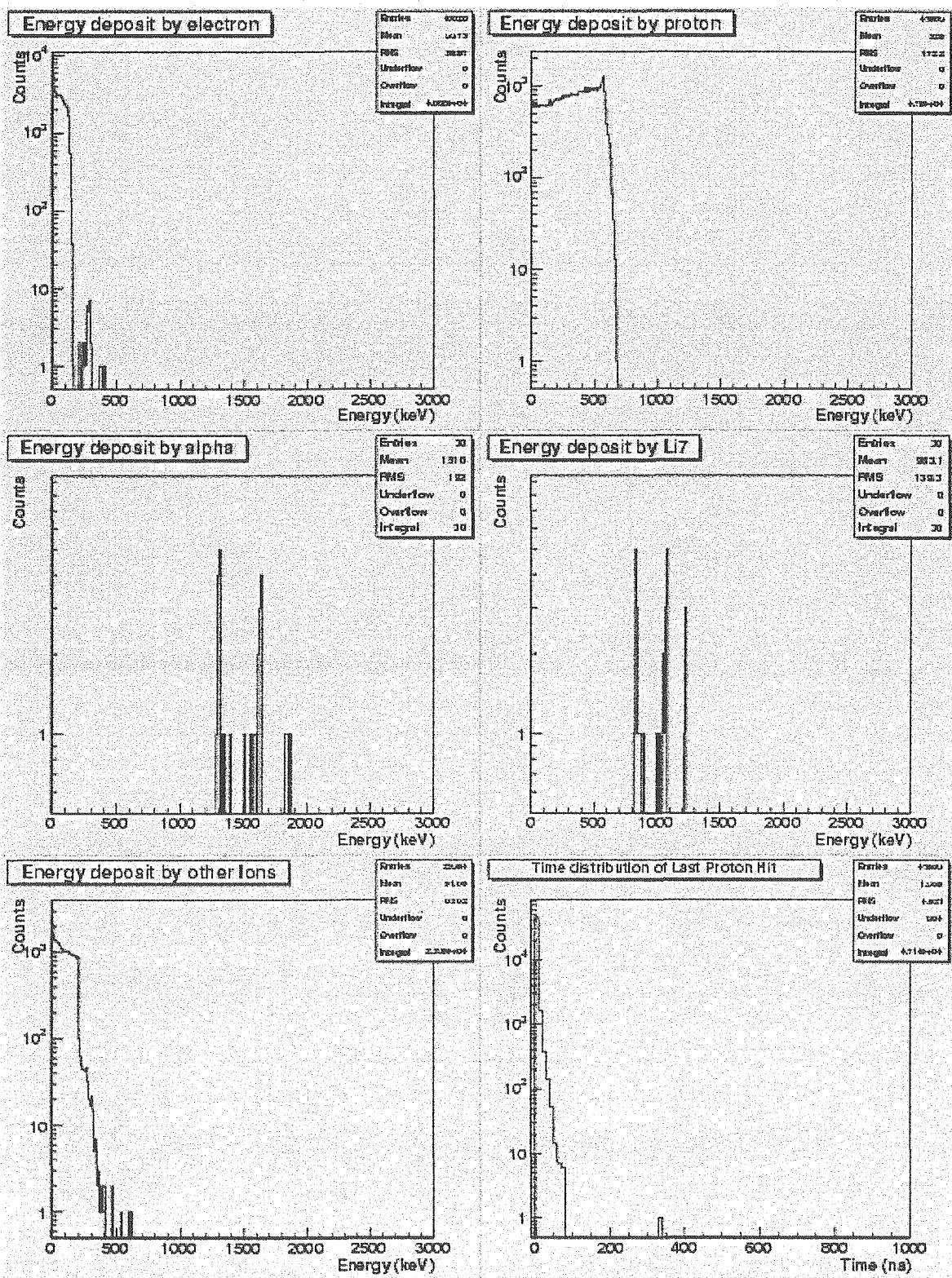


図 59: $E_n^0 = 0.7$ MeV、BC-523A;10 %の検出器によるスペクトル(2)。

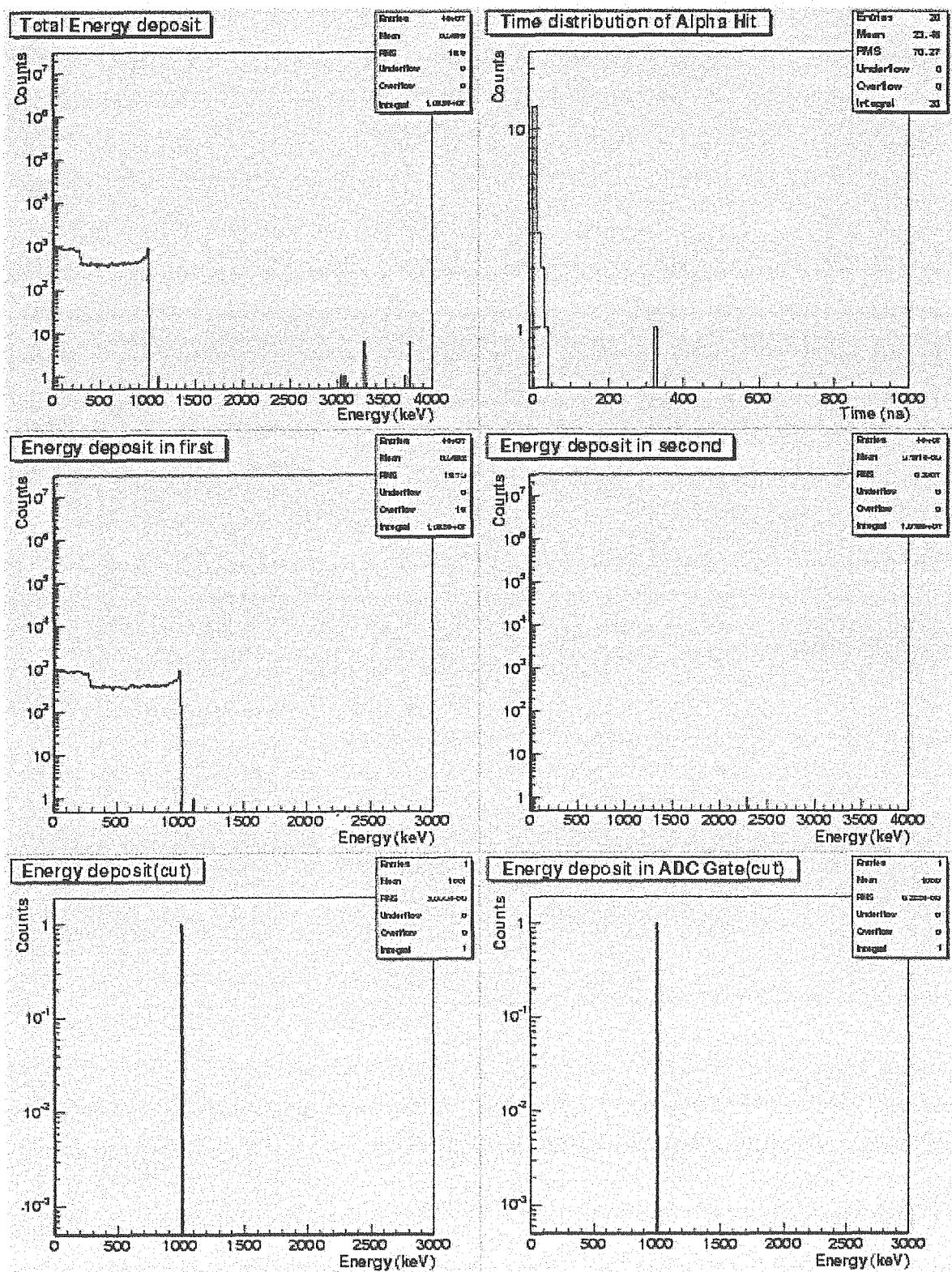


図 60: $E_n^0 = 1 \text{ MeV}$ 、BC-523A;10 %の検出器によるスペクトル (1)。

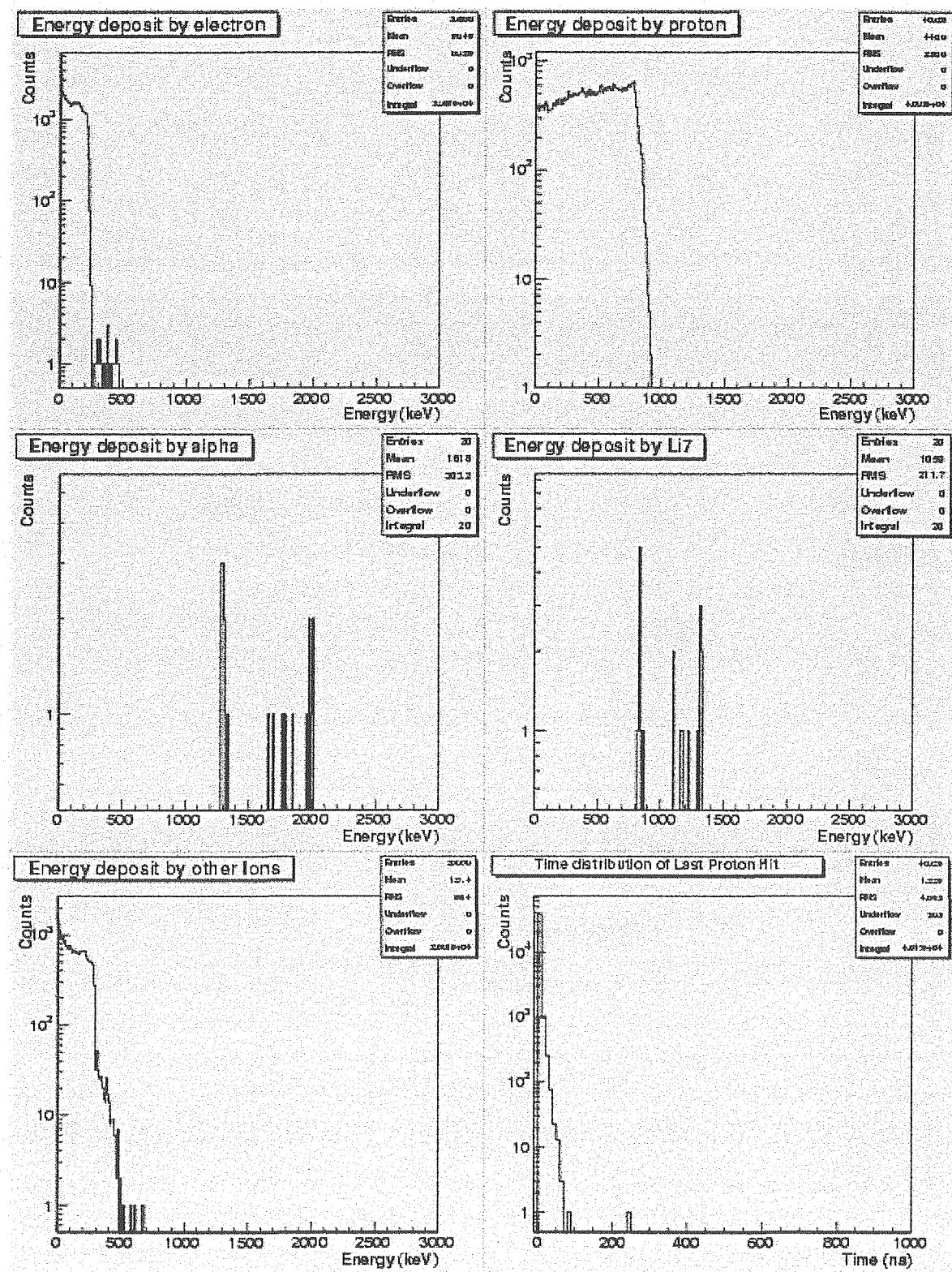


図 61: $E_n^0 = 1 \text{ MeV}$ 、BC-523A; 10 %の検出器によるスペクトル (2)。

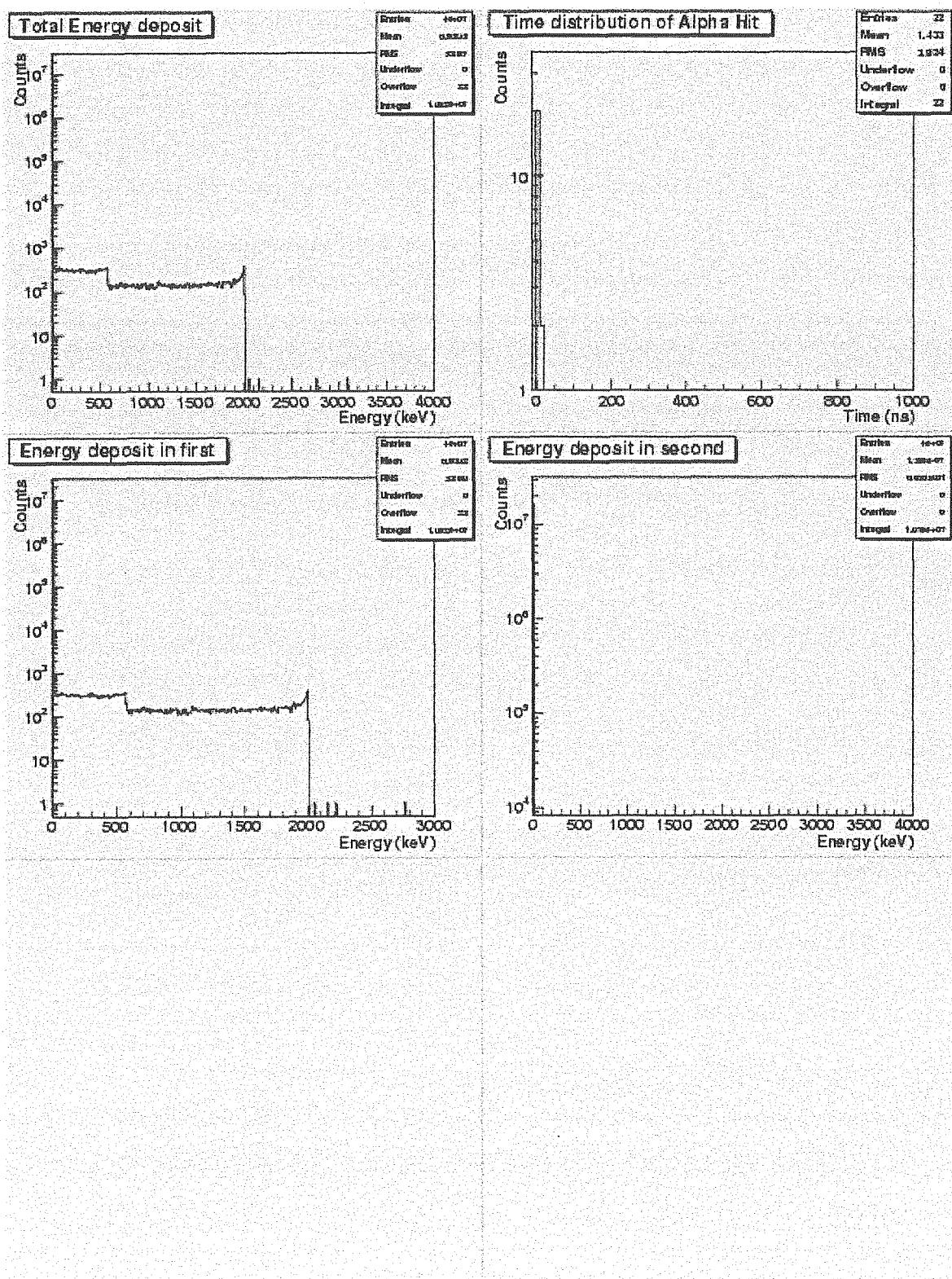


図 62: $E_n^0 = 2 \text{ MeV}$ 、BC-523A;10 %の検出器によるスペクトル(1)。最下段の2つのスペクトルが空欄なのは総数がゼロだったため。

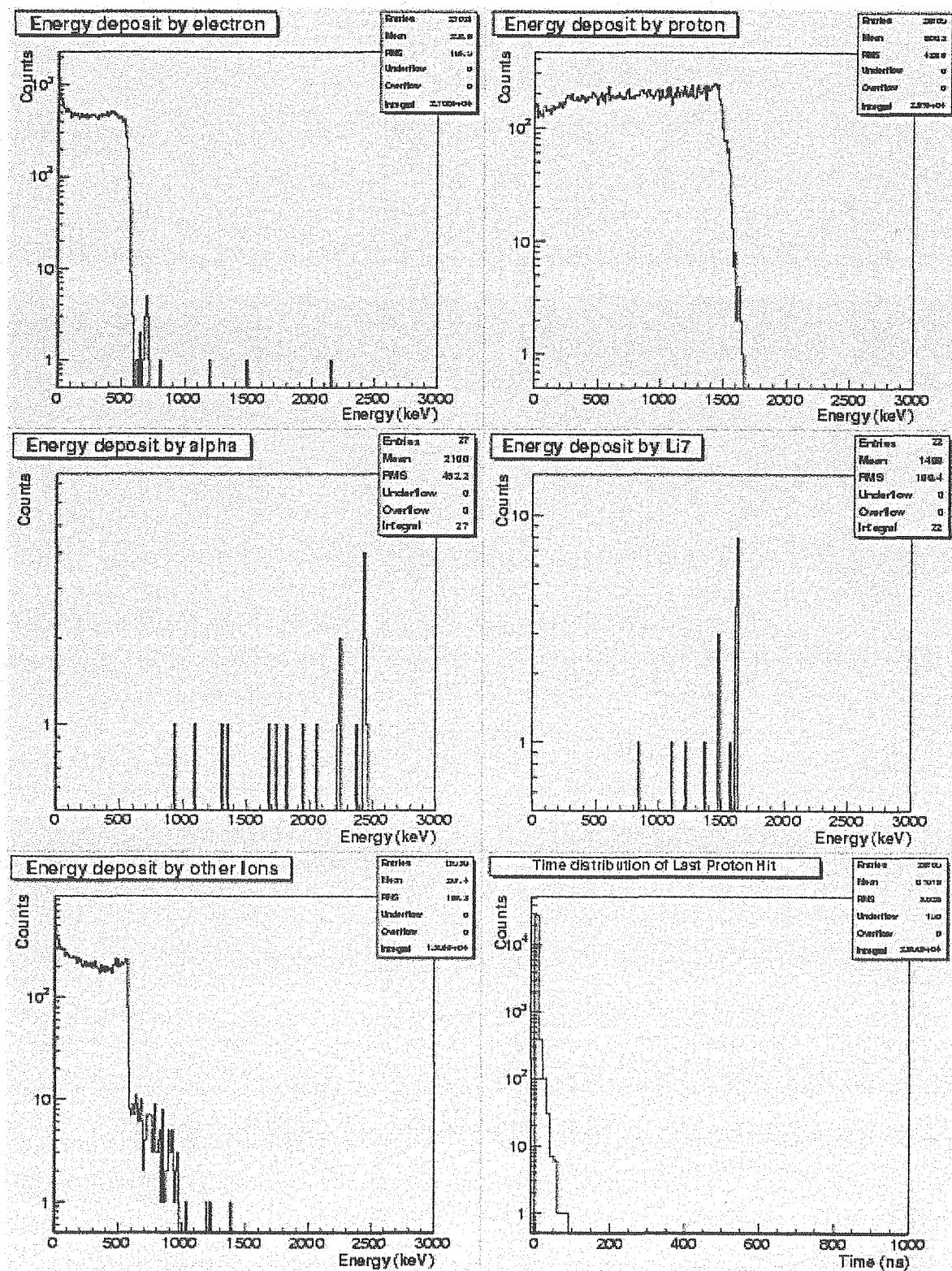


図 63: $E_n^0 = 2 \text{ MeV}$, BC-523A; 10 %の検出器によるスペクトル (2)。

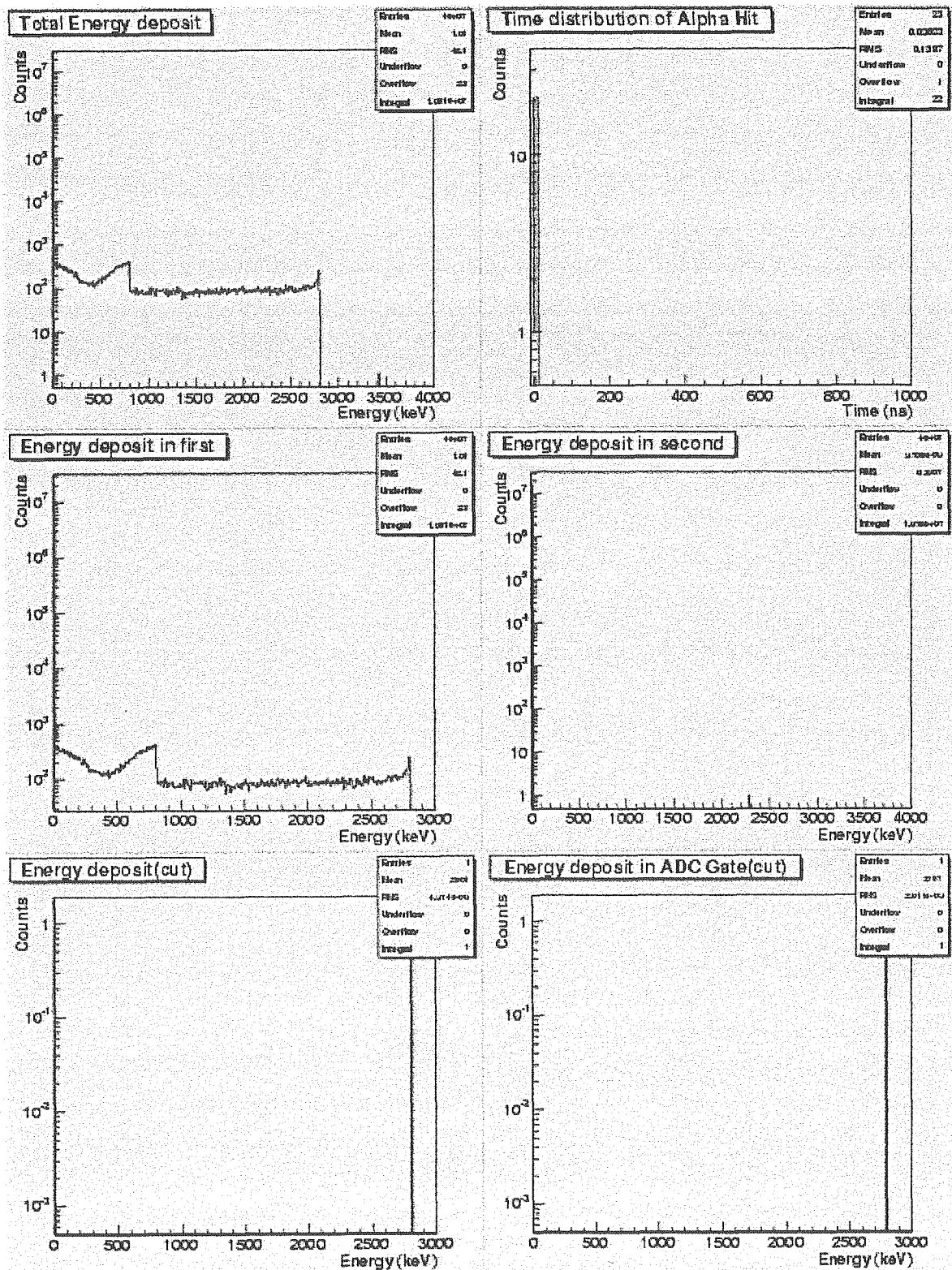


図 64: $E_n^0 = 2.8 \text{ MeV}$ 、BC-523A;10 %の検出器によるスペクトル(1)。

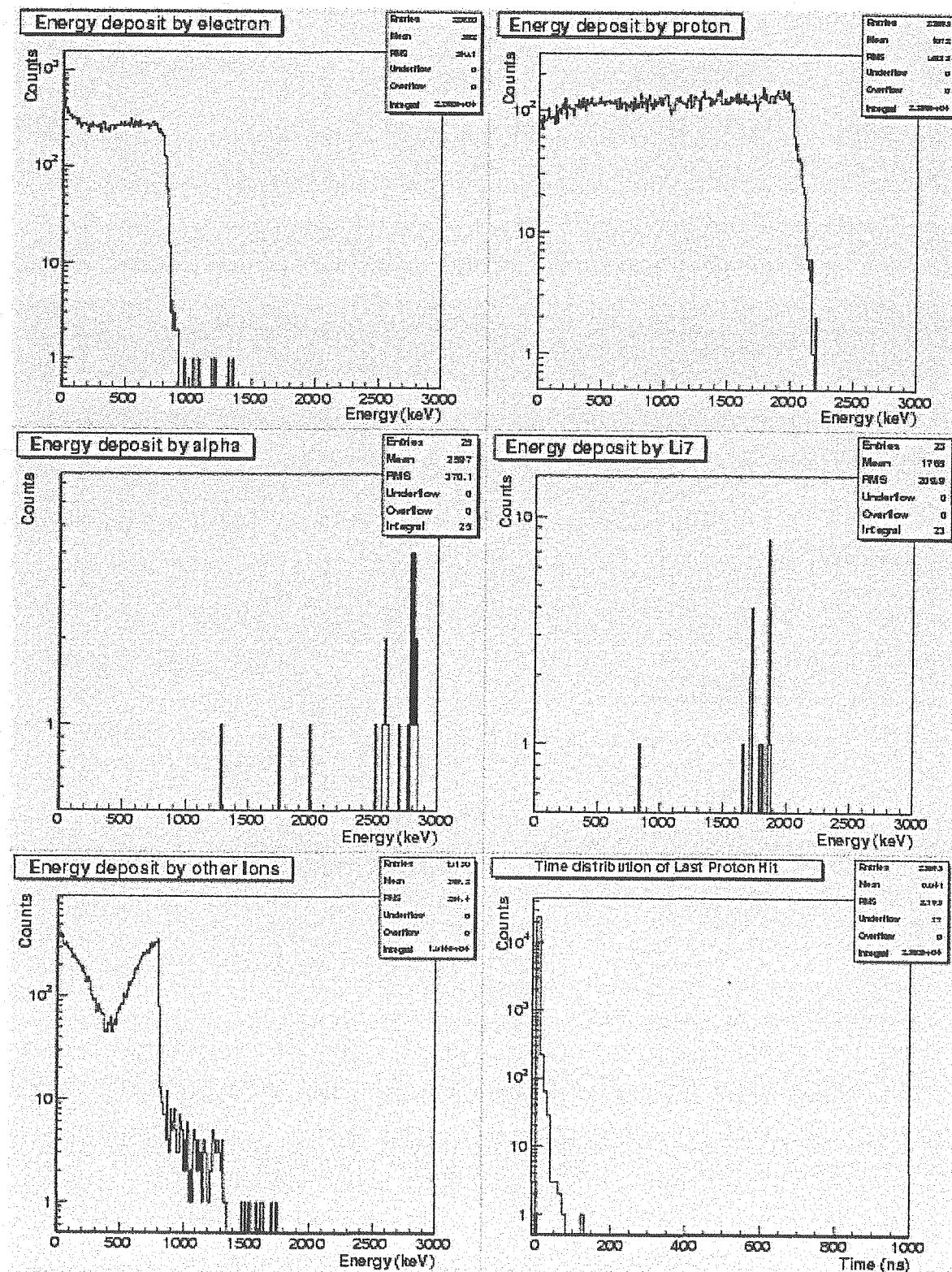


図 65: $E_n^0 = 2.8 \text{ MeV}$, BC-523A; 10 %の検出器によるスペクトル (2)。

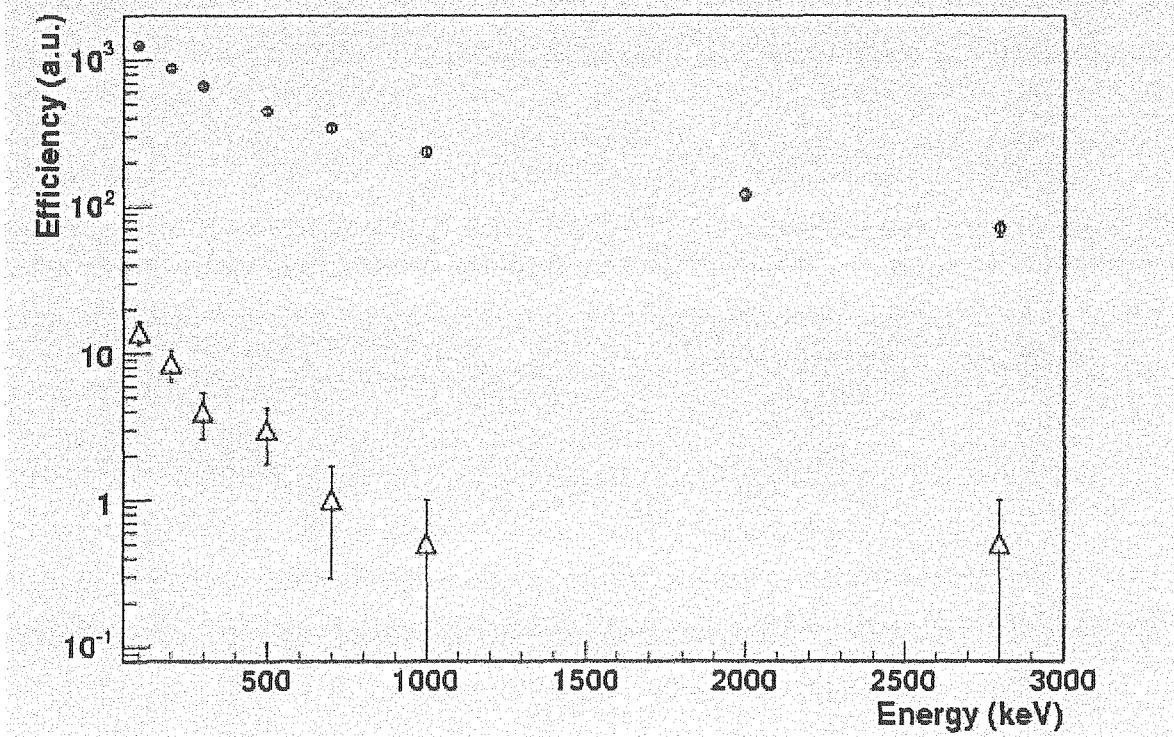


図 66: 2種類の検出器形状における、入射中性子エネルギーによる検出効率の違い。図中の○は BC-523A; 100 %の検出器のデータを、△は BC-523A; 10 %の検出器のデータを示している。

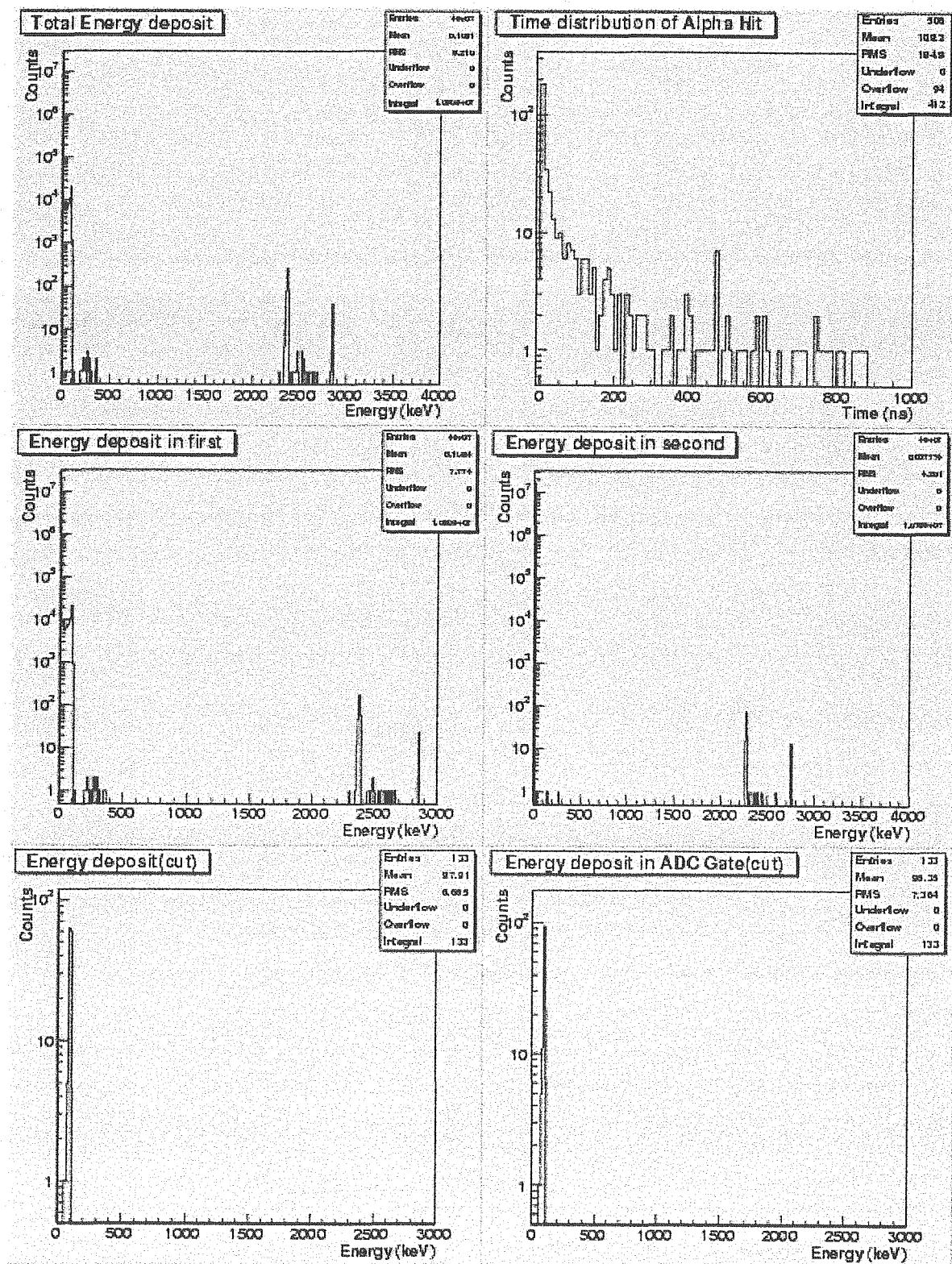


図 67: $E_n^0 = 0.1$ MeV、BC-523A;20 %の検出器によるスペクトル(1)。

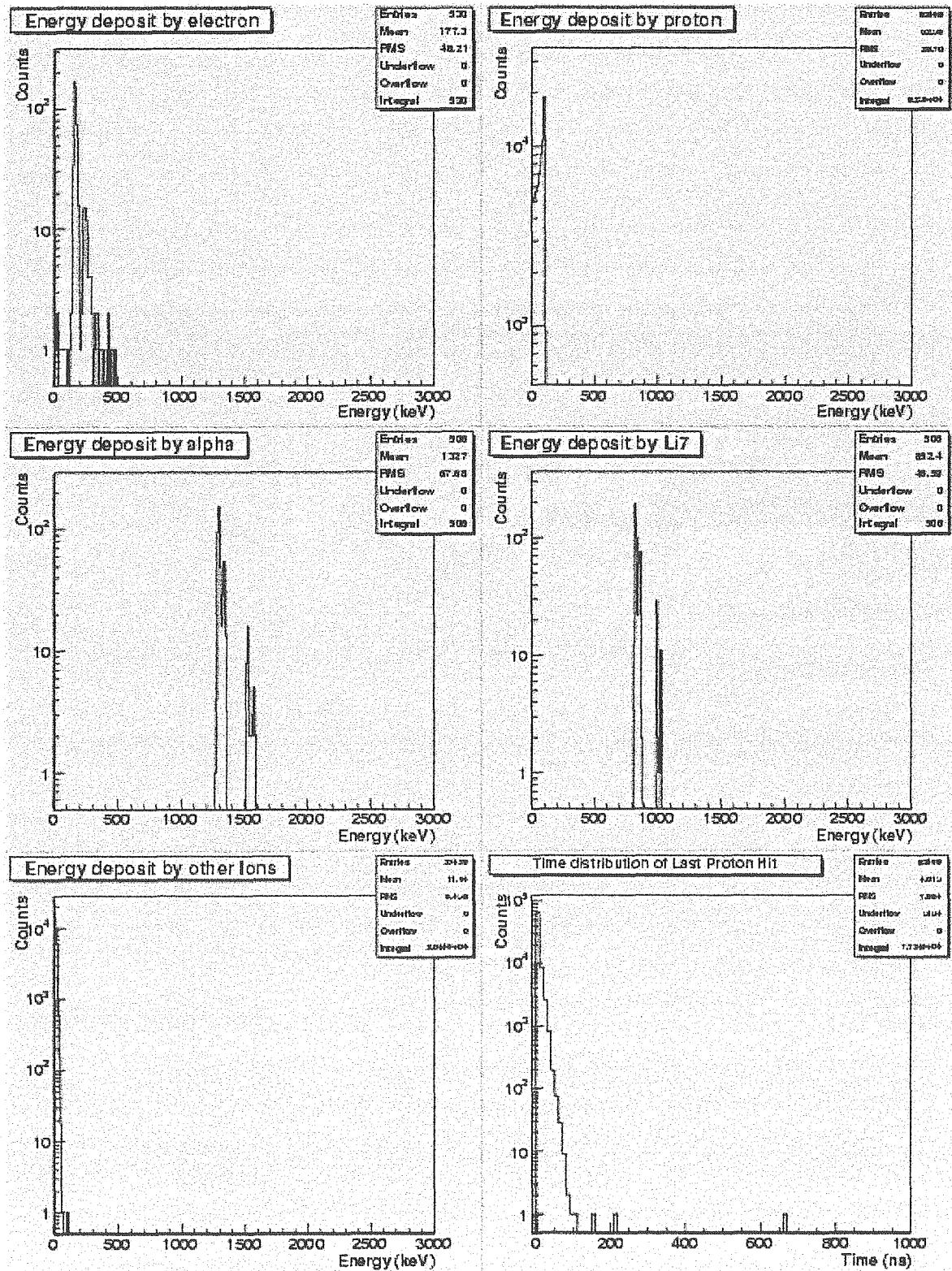


図 68: $E_n^0 = 0.1$ MeV、BC-523A;20 %の検出器によるスペクトル(2)。

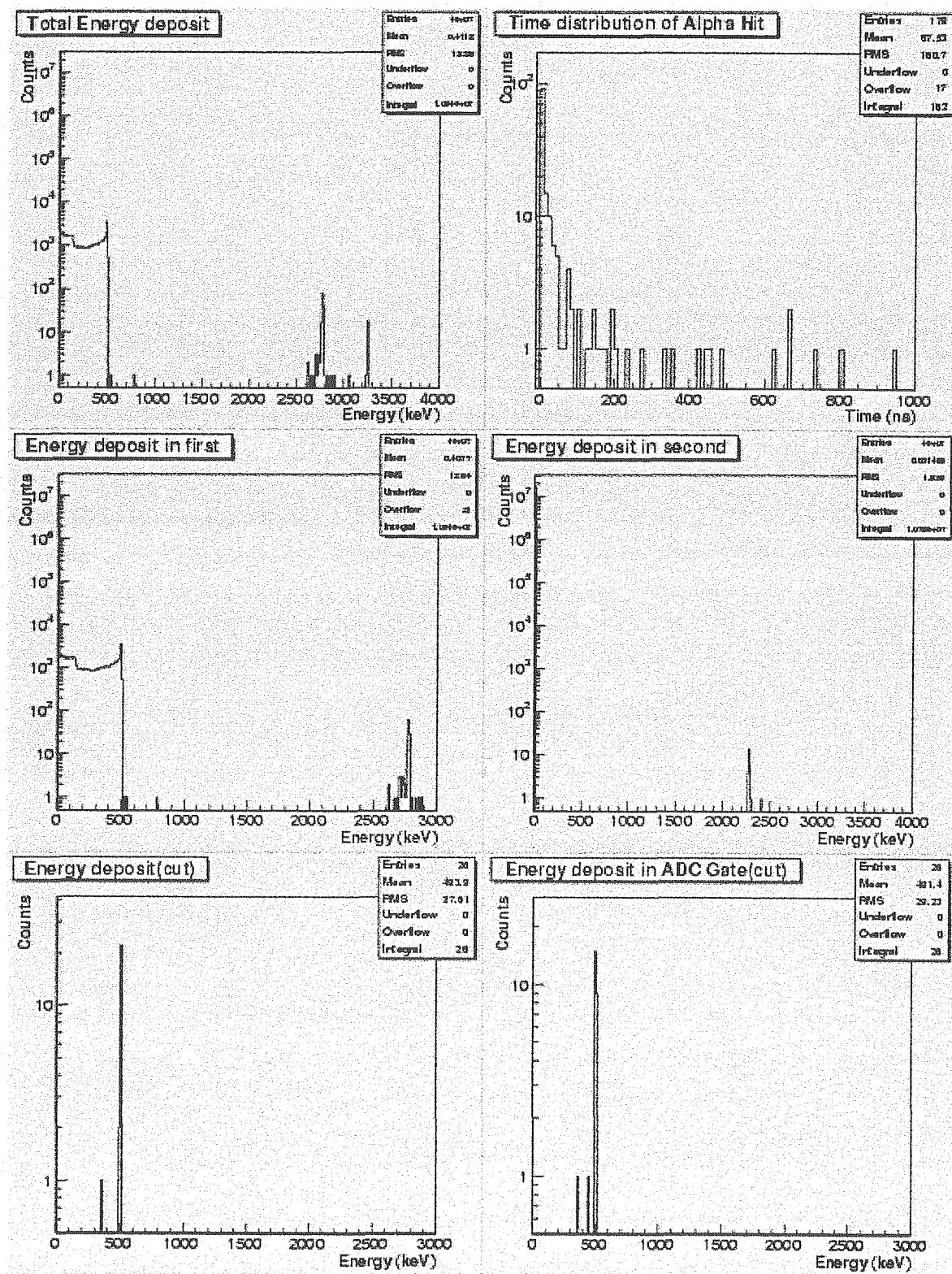


図 69: $E_n^0 = 0.5 \text{ MeV}$ 、BC-523A;20 %の検出器によるスペクトル(1)。

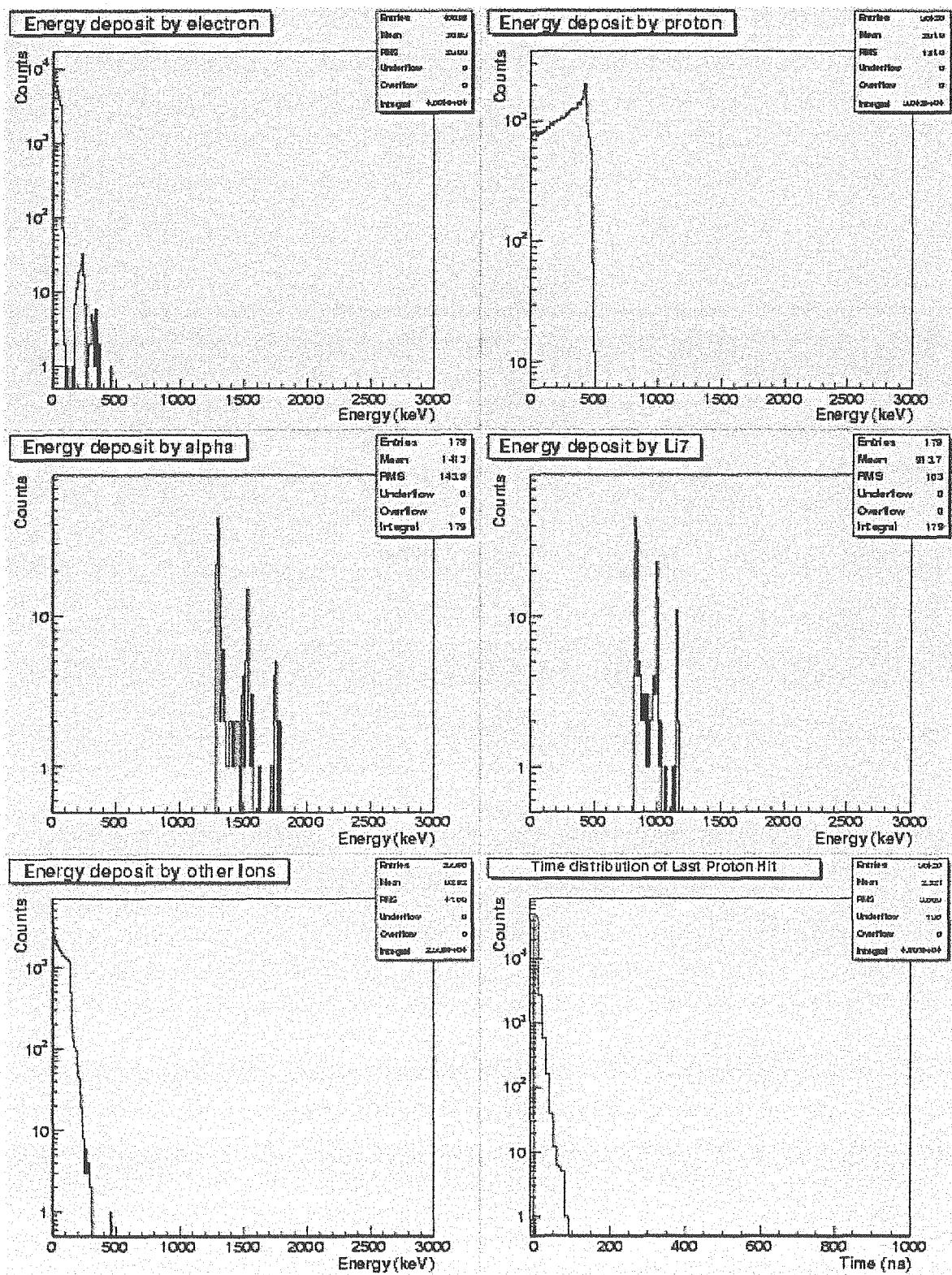


図 70: $E_n^0 = 0.5 \text{ MeV}$ 、BC-523A;20 %の検出器によるスペクトル(2)。

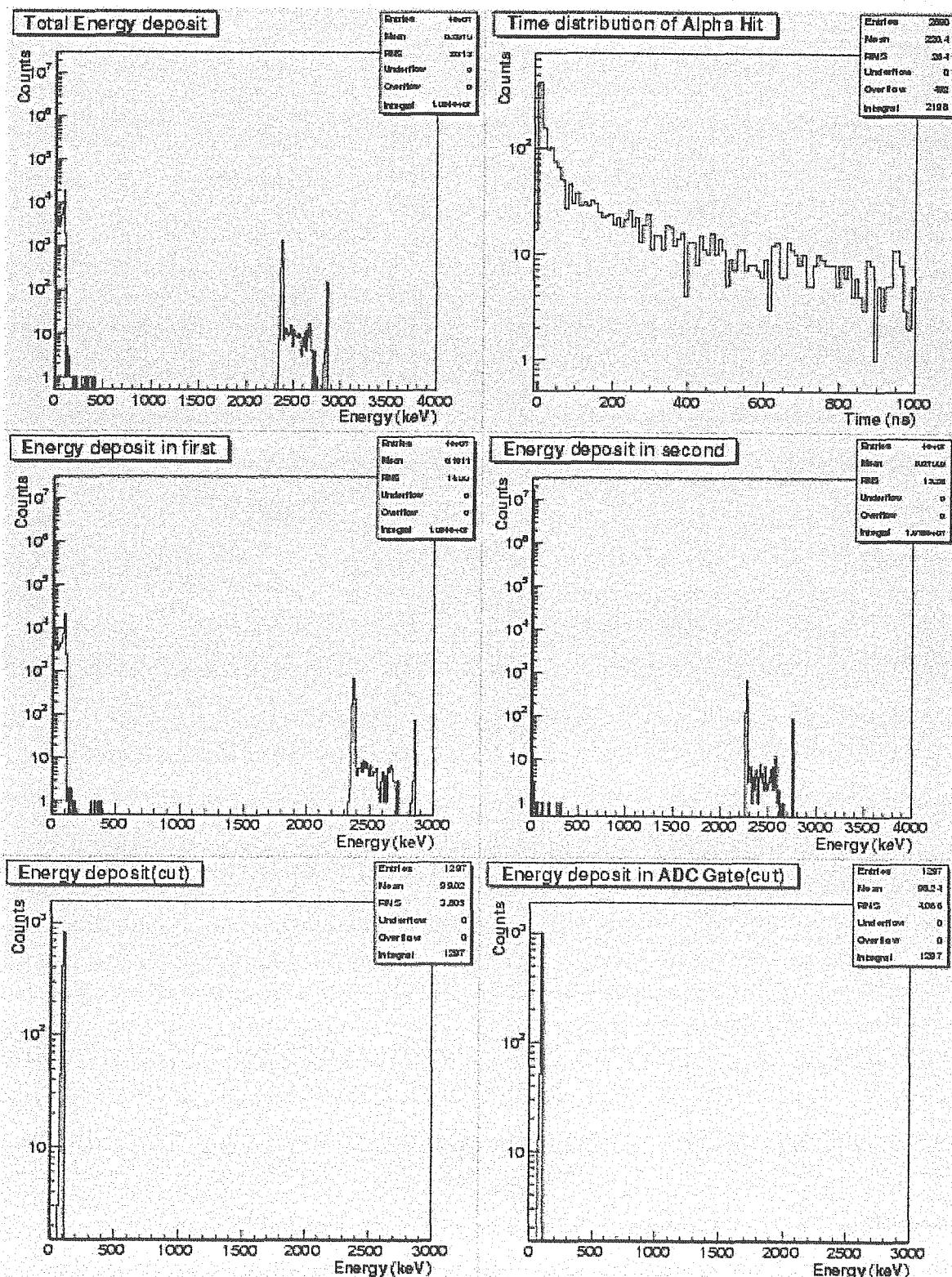


図 71: $E_n^0 = 0.1 \text{ MeV}$ 、BC-523A;50 %の検出器によるスペクトル(1)。

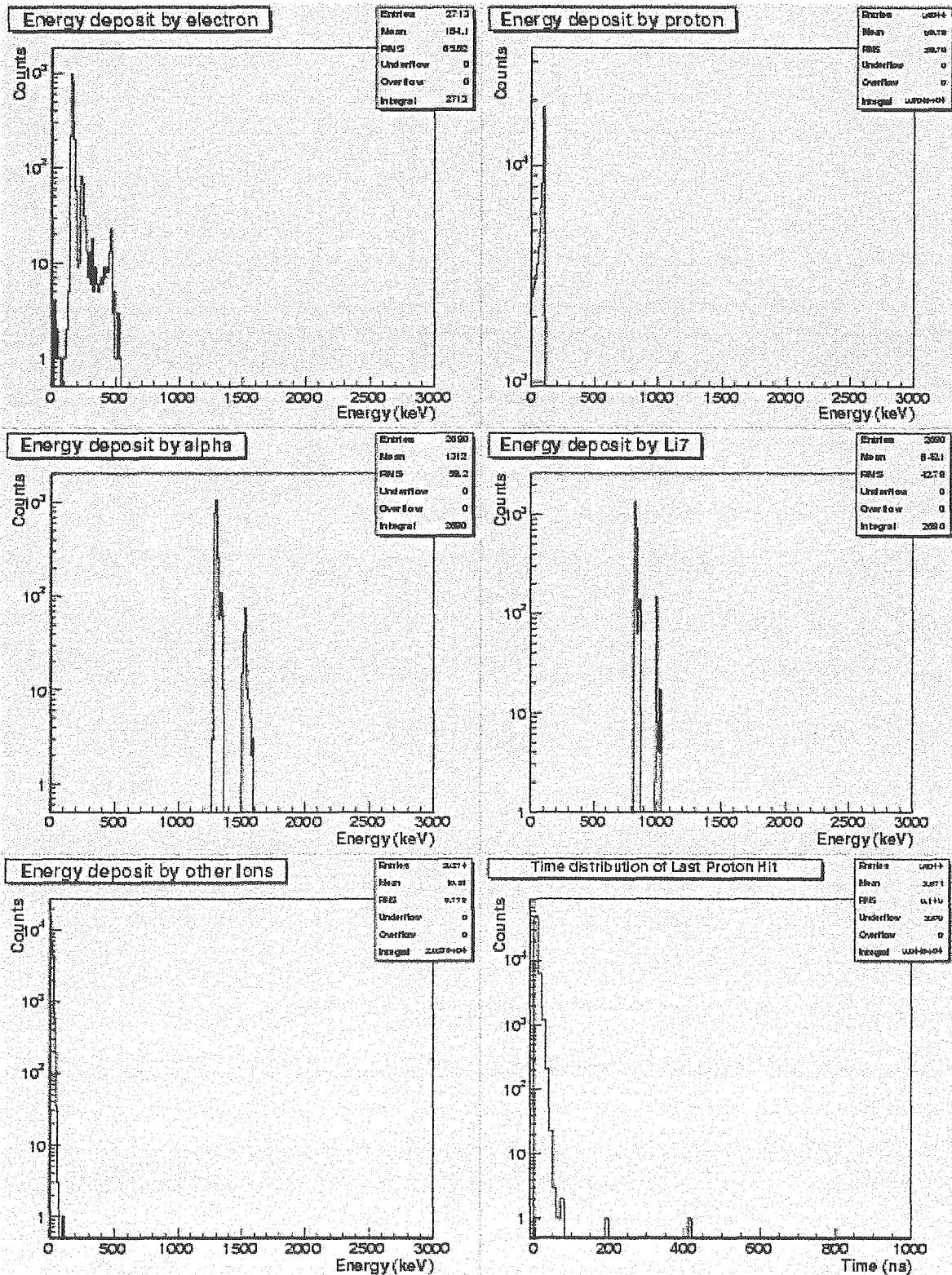


図 72: $E_n^0 = 0.1 \text{ MeV}$ 、BC-523A;50 %の検出器によるスペクトル(2)。

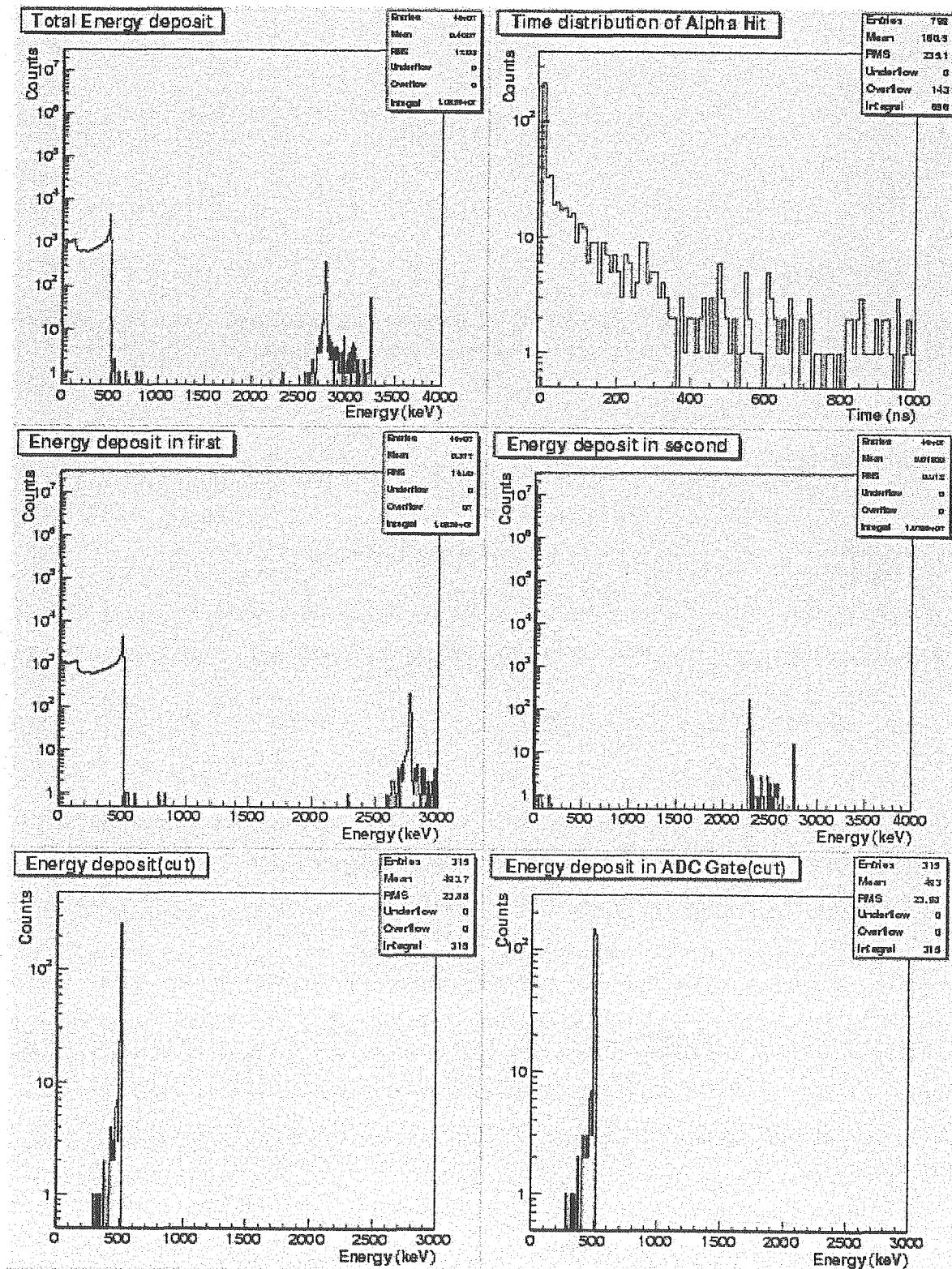


図 73: $E_n^0 = 0.5$ MeV、BC-523A;50 %の検出器によるスペクトル(1)。

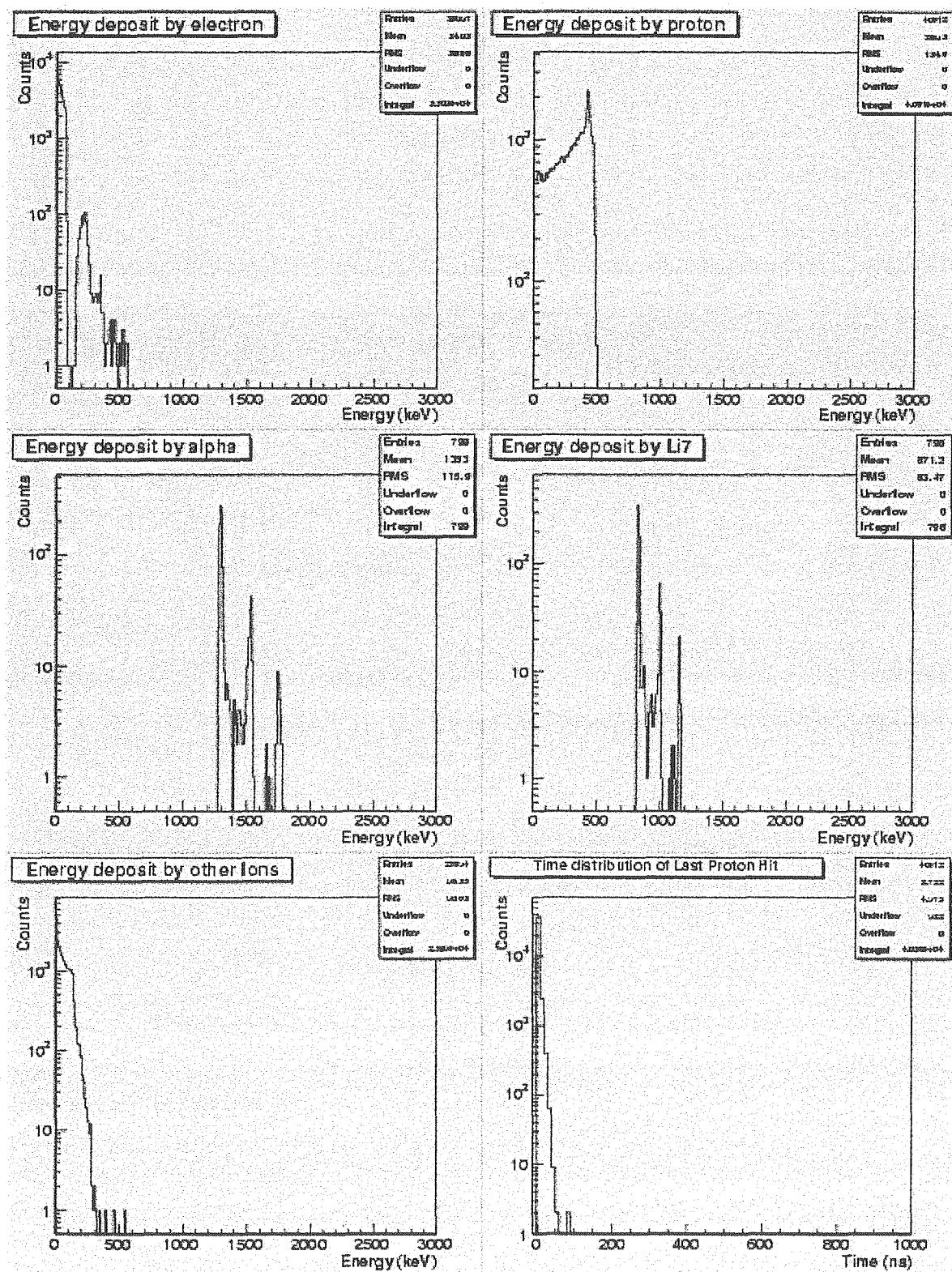


図 74: $E_n^0 = 0.5 \text{ MeV}$ 、BC-523A;50 %の検出器によるスペクトル(2)。

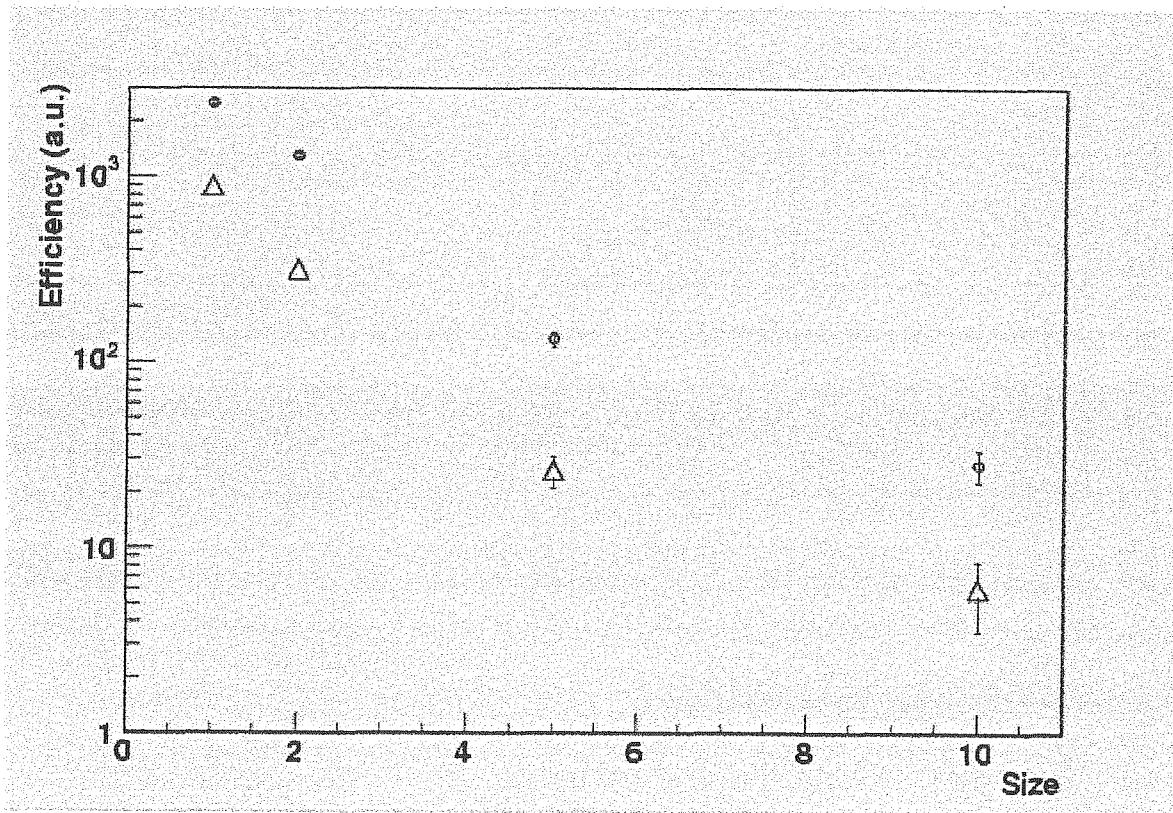


図 75: 検出器の形状による検出効率の違い。BC-523A の濃度が 100 % の検出器の体積を 1 とした時の体積の比を横軸にしている。図中の。は $E_n^0 = 100 \text{ keV}$ のデータを、△は $E_n^0 = 500 \text{ keV}$ のデータを示している。

プログラミリスト 1 に、Geant4 に入力したプログラムを示した。なお、このプログラムは、Geant4 開発グループにより公開されたサンプルプログラムを報告者が修正したものである。

プログラムリスト 1 Geant4 検出器部の定義

```

// ****
// * DISCLAIMER
// *
// * The following disclaimer summarizes all the specific disclaimers *
// * of contributors to this software. The specific disclaimers, which *
// * govern, are listed with their locations in:
// *   http://cern.ch/geant4/license
// *
// * Neither the authors of this software system, nor their employing *
// * institutes, nor the agencies providing financial support for this *
// * work make any representation or warranty, express or implied,
// * regarding this software system or assume any liability for its *
// * use.
// *
// * This code implementation is the intellectual property of the *
// * GEANT4 collaboration.
// * By copying, distributing or modifying the Program (or any work *
// * based on the Program) you indicate your acceptance of this *
// * statement, and all its terms.
// ****

// $Id: MD01DetectorConstruction.cc,v 1.12 2004/03/01 01:48:00 ogawa Exp $
// GEANT4 tag $Name: $
// 
```

```

#include "MD01DetectorConstruction.hh"
#include "MD01DetectorMessenger.hh"

#include "G4UnitsTable.hh"
#include "G4Material.hh"

#include "G4Box.hh"
#include "G4Tubs.hh"
#include "G4LogicalVolume.hh"
#include "G4ThreeVector.hh"
#include "G4PVPlacement.hh"
#include "G4VisAttributes.hh"
#include "G4UserLimits.hh"

#include "G4GeometryManager.hh"
#include "G4PhysicalVolumeStore.hh"
#include "G4LogicalVolumeStore.hh"
#include "G4SolidStore.hh"

#include "G4SDManager.hh"
#include "MD01ScintSD.hh"

#include "globals.hh"
#include <stdio.h>
#include <math.h>

MD01DetectorConstruction::MD01DetectorConstruction()
: expHall_solid(0), expHall_LV(0), defaultMaterial(0),
scintContainer_tube(0), scintContainer_LV(0), scintContainer_PV(0), contMaterial(0),
scintillator_tube(0), scintillator_LV(0), scintillator_PV(0), scintMaterial(0)
{
    DefineMaterials();

    detectorMessenger = new MD01DetectorMessenger(this);

    //Set default material
    defaultMaterial = G4Material::GetMaterial("Air");
    contMaterial = G4Material::GetMaterial("Pyrex");
    scintMaterial = G4Material::GetMaterial("BC-523A");

    theUserLimitsForRoom = 0;
    theUserLimitsForDetector = 0;
    // default time cut = infinite
    // - note also number of steps cut in stepping action = MaxNoSteps
    theMaxTimeCuts = DBL_MAX;
    theMaxStepSize = DBL_MAX;
    theDetectorStepSize = DBL_MAX;
    theRoomTimeCut = 1000. * nanosecond;
    theMinEkine = 250.0*eV; // minimum kinetic energy required in volume
    theRoomMinEkine = 250.0*eV; // minimum kinetic energy required in volume
}

MD01DetectorConstruction::~MD01DetectorConstruction()
{
    delete theUserLimitsForRoom;
    delete theUserLimitsForDetector;
    delete detectorMessenger;
}

G4VPhysicalVolume* MD01DetectorConstruction::Construct()
{
    return ConstructScintillator();
}

void MD01DetectorConstruction::DefineMaterials()
{
    //----- elements
    G4double a; // atomic mass
    G4double ze; // effective atomic number
    G4int z; // atomic number
    G4int n; // number of nucleons
    G4int ncomponents; // number of components
    G4double abundance;
    G4double density;
    G4String name;
    G4String symbol;

    // H
    name = "Hydrogen";
    symbol = "H";
    ze = 1.0;
    a = 1.00794 * g/mole;
    G4Element* elH = new G4Element( name, symbol, ze, a );
    // B
    name = "Boron";
    symbol = "B";
    ze = 5.0;
    a = 10.811 * g/mole;
    G4Element* elB = new G4Element( name, symbol, ze, a );
    // B (enriched)
}

```

```

name = "B10";
z   = 5;
n   = 10;
a   = 10.0 * g/mole;
G4Isotope* B10 = new G4Isotope( name, z, n, a );
name = "B11";
z   = 5;
n   = 11;
a   = 11.0 * g/mole;
G4Isotope* B11 = new G4Isotope( name, z, n, a );
name   = "enriched Boron";
symbol = "enB";
ncomponents = 2;
G4Element* elemB = new G4Element( name, symbol, ncomponents );
elemB->AddIsotope( B10, abundance = 90.0 *perCent );
elemB->AddIsotope( B11, abundance = 10.0 *perCent );
// C
name   = "Carbon";
symbol = "C";
ze    = 6.0;
a    = 12.011 * g/mole;
G4Element* elC = new G4Element( name, symbol, ze, a );
// N
name   = "Nitrogen";
symbol = "N";
ze    = 7.0;
a    = 14.00674 * g/mole;
G4Element* elN = new G4Element( name, symbol, ze, a );
// O
name   = "Oxygen";
symbol = "O";
ze    = 8.0;
a    = 15.9994 * g/mole;
G4Element* elO = new G4Element( name, symbol, ze, a );
// F
name   = "Fluorine";
symbol = "F";
ze    = 9.0;
a    = 18.9984032 * g/mole;
G4Element* elF = new G4Element( name, symbol, ze, a );
// Al
name   = "Alminium";
symbol = "Al";
ze    = 13.0;
a    = 26.981539 * g/mole;
G4Element* elAl = new G4Element( name, symbol, ze, a );
// Na
name   = "Sodium";
symbol = "Na";
ze    = 11.0;
a    = 22.989768 * g/mole;
G4Element* elNa = new G4Element( name, symbol, ze, a );
// Si
name   = "Silicon";
symbol = "Si"; // Scintillator
ze    = 14.0;
a    = 28.0855 * g/mole;
G4Element* elSi = new G4Element( name, symbol, ze, a );
// Ar
name   = "Argon";
symbol = "Ar";
ze    = 18.0;
a    = 39.948 * g/mole;
G4Element* elAr = new G4Element( name, symbol, ze, a );
// K
name   = "Potassium";
symbol = "K";
ze    = 19.0;
a    = 39.0983 * g/mole;
G4Element* elK = new G4Element( name, symbol, ze, a );
// Ca
name   = "Calcium";
symbol = "Ca";
ze    = 20.0;
a    = 40.078 * g/mole;
G4Element* elCa = new G4Element( name, symbol, ze, a );
// I
name   = "Iodine";
symbol = "I";
ze    = 53.0;
a    = 126.90447 * g/mole;
G4Element* elI = new G4Element( name, symbol, ze, a );
// Cs
name   = "Cesium";
symbol = "Cs";
ze    = 55.0;
a    = 132.90543 * g/mole;
G4Element* elCs = new G4Element( name, symbol, ze, a );

```

```

//----- Materials
G4int nel;
G4int natoms;
G4double fractionmass;

// Air
name = "Air";
density = 1.29*mg/cm3;
G4Material* Air = new G4Material(name, density, nel=3);
Air->AddElement(elN, .755);
Air->AddElement(elO, .232);
Air->AddElement(elAr, .013);

// Pyrex glass
/// SiO2 : 80.5 %
name = "SiO2";
density = 2.32 * 0.805 * g/cm3;
G4Material* SiO2 = new G4Material( name, density, nel = 2 );
SiO2->AddElement( elSi, natoms = 1 );
SiO2->AddElement( elO, natoms = 2 );
/// B2O3 ; 12.9 %
name = "B2O3";
density = 2.32 * 0.129 * g/cm3;
G4Material* B2O3 = new G4Material( name, density, nel = 2 );
B2O3->AddElement( elB, natoms = 2 );
B2O3->AddElement( elO, natoms = 3 );
/// Na2O ; 3.8 %
name = "Na2O";
density = 2.32 * 0.038 * g/cm3;
G4Material* Na2O = new G4Material( name, density, nel = 2 );
Na2O->AddElement( elNa, natoms = 2 );
Na2O->AddElement( elO, natoms = 1 );
/// Al2O3 ; 2.2 %
name = "Al2O3";
density = 2.32 * 0.022 * g/cm3;
G4Material* Al2O3 = new G4Material( name, density, nel = 2 );
Al2O3->AddElement( elAl, natoms = 2 );
Al2O3->AddElement( elO, natoms = 3 );
/// K2O ; 0.4 %
name = "K2O";
density = 2.32 * 0.004 * g/cm3;
G4Material* K2O = new G4Material( name, density, nel = 2 );
K2O->AddElement( elK, natoms = 2 );
K2O->AddElement( elO, natoms = 1 );
/// Pyrex Glass
name = "Pyrex";
density = 2.32 * g/cm3;
G4Material* Pyrex = new G4Material( name, density, nel = 5 );
Pyrex->AddMaterial(SiO2, fractionmass = 80.6 * perCent );
Pyrex->AddMaterial(B2O3, fractionmass = 13.0 * perCent );
Pyrex->AddMaterial(Na2O, fractionmass = 3.8 * perCent );
Pyrex->AddMaterial(Al2O3, fractionmass = 2.2 * perCent );
Pyrex->AddMaterial(K2O, fractionmass = 0.4 * perCent );

// CaF2
name = "CaF2";
density = 3.18 * g/cm3;
G4Material* CaF2 = new G4Material( name, density, nel = 2 );
CaF2->AddElement( elCa, natoms = 1 );
CaF2->AddElement( elF, natoms = 2 );
// NaI
name = "NaI";
density = 3.67 * g/cm3;
G4Material* NaI = new G4Material( name, density, nel = 2 );
NaI->AddElement( elNa, natoms = 1 );
NaI->AddElement( elI, natoms = 1 );
// CsI
name = "CsI";
density = 4.53 * g/cm3;
G4Material* CsI = new G4Material( name, density, nel = 2 );
CsI->AddElement( elCs, natoms = 1 );
CsI->AddElement( elI, natoms = 1 );
// BC-523A
name = "BC-523A";
density = 0.916 * g/cm3;
G4Material* BC523A = new G4Material( name, density, nel = 4 );
BC523A->AddElement( elH, natoms = 4980 );
BC523A->AddElement( elC, natoms = 2860 );
BC523A->AddElement( elO, natoms = 811 );
BC523A->AddElement( elenB, natoms = 270 );
// Pseudodumene
name = "PC";
density = 0.894 * g/cm3;
G4Material* PC = new G4Material( name, density, nel = 2 );
PC->AddElement( elH, natoms = 12 );
PC->AddElement( elC, natoms = 9 );
// diluted BC-523A
G4double conc;
G4Material* diBG[9];
char c[20];
for (G4int i=1;i<10;i++) {

```

```

sprintf(c,"%d",i);
name    = "diBC"+G4String(c);
conc    = i/10.0;
density = 0.894*conc + 0.916*(1.0-conc) * g/cm3;
diBC[i-1] = new G4Material(name, density, nel = 2 );
diBC[i-1]->AddMaterial(BC523A, 1.0-conc);
diBC[i-1]->AddMaterial(PC,      conc);
}

// G4cout << * (G4Material::GetMaterialTable()) << G4endl;
}

G4VPhysicalVolume* MD01DetectorConstruction::ConstructScintillator()
{
    // Clean old geometry, if any
    //
    //G4GeometryManager::GetInstance()->OpenGeometry();
    //G4PhysicalVolumeStore::GetInstance()->Clean();
    // G4LogicalVolumeStore::GetInstance()->Clean();
    // G4SolidStore::GetInstance()->Clean();

    //----- volumes

    //----- experimental hall (world volume)
    //
    G4double expHall_x = 160.0 * .5 *cm;
    G4double expHall_y = 160.0 * .5 *cm;
    G4double expHall_z = 160.0 * .5 *cm;
    expHall_solid
        = new G4Box("expHall_box",
            expHall_x, expHall_y, expHall_z );      // Name
    expHall_LV
        = new G4LogicalVolume(expHall_solid,
            defaultMaterial,                      // Solid
            "expHall_log");                     // Name
    expHall_PV
        = new G4PVPlacement(0,
            G4ThreeVector(),                  // Position
            expHall_LV,                      // Logical volume
            "expHall",                       // Name
            0,                                // Mother volume
            false,                            // no boolean operation
            0);                              // copy number
    G4VisAttributes* expHall_VA
        = new G4VisAttributes( TRUE, G4Colour(1., 1., 1.) );
    expHall_VA-> SetForceWireframe( TRUE );
    expHall_LV-> SetVisAttributes( expHall_VA );

    //----- scintillator & container
    G4double scint_l = 8.6 * 0.5 * cm; // Original size
    G4double scint_r = 12.6 * 0.5 * cm;

    G4double sizeFactor = pow( 0.1, 1.0/3.0); // Adjust size
    scint_l *= sizeFactor;
    scint_r *= sizeFactor;

    G4double pyrexThickness = 0.2 * cm;      // container glass tube thickness
    G4double scintContainer_l = scint_l + pyrexThickness * 2 * 0.5;
    G4double scintContainer_r = scint_r + pyrexThickness * 2 * 0.5;

    G4cout << "scintillator length = " << G4BestUnit(scint_l*2, "Length") << G4endl;
    G4cout << "scintillator radius = " << G4BestUnit(scint_r, "Length") << G4endl;

    scintContainer_tube
        = new G4Tubs( "scintContainer_tubs",
            0, scintContainer_r, scintContainer_l,
            0, 2*pi );
    scintContainer_LV
        = new G4LogicalVolume(scintContainer_tube,
            contMaterial,
            "scintContainer_log");
    G4double sconPos_x = 0.0*cm;
    G4double sconPos_y = 0.0*cm;
    G4double sconPos_z = 0.0*cm;
    scintContainer_PV
        = new G4PVPlacement( 0,
            G4ThreeVector(sconPos_x, sconPos_y, sconPos_z),
            scintContainer_LV,
            "scintContainer",
            expHall_LV,
            false,
            0 );

    G4VisAttributes* scintContainer_VA
        = new G4VisAttributes( TRUE, G4Colour(0., 1., 0.) );
    scintContainer_LV->SetVisAttributes( scintContainer_VA );

    //----- scintillator
    //
}

```

```

scintillator_tube
    = new G4Tubs( "scint_tube",
      0, scint_r, scint_l,
      0, 2*pi );
scintillator_LV
    = new G4LogicalVolume( scintillator_tube,
      scintMaterial,
      "scintillator_log");
G4double scintPos_x = 0.0*cm;
G4double scintPos_y = 0.0*cm;
G4double scintPos_z = 0.0*cm;
scintillator_PV
    = new G4PVPlacement( 0,
      G4ThreeVector(scintPos_x, scintPos_y, scintPos_z),
      scintillator_LV,
      "scintillator",
      scintContainer_LV,
      false,
      0 );

G4VisAttributes* scintillator_VA
    = new G4VisAttributes( TRUE, G4Colour(1., 0., 0.) );
scintillator_LV->SetVisAttributes( scintillator_VA );

// .....
// attach user limits ......

G4cout << G4endl << "User Limits: " << G4endl
<< "\t theMaxTimeCuts:      " << G4BestUnit(theMaxTimeCuts,"Time")
<< G4endl
<< "\t theRoomTimeCut:     " << G4BestUnit(theRoomTimeCut,"Time")
<< G4endl
<< "\t theMaxStepSize:     " << G4BestUnit(theMaxStepSize,"Length")
<< G4endl
<< "\t theMinEkine:        " << G4BestUnit(theMinEkine,"Energy")
<< G4endl
<< "\t minRoomMinEkine:   " << G4BestUnit(theRoomMinEkine,"Energy")
<< G4endl << G4endl;

if (theUserLimitsForRoom != 0)    delete theUserLimitsForRoom;
if (theUserLimitsForDetector != 0) delete theUserLimitsForDetector;

theUserLimitsForRoom = new G4UserLimits(theMaxStepSize, // step length max
                                         DBL_MAX,           // track length
max
                                         theRoomTimeCut, // Time cut
                                         theRoomMinEkine); // min energy
theUserLimitsForDetector = new G4UserLimits(theDetectorStepSize,
                                         DBL_MAX,           // Track Max
                                         theMaxTimeCuts,
                                         theMinEkine);

expHall_LV->SetUserLimits(theUserLimitsForRoom); // Scintillator
scintContainer_LV->SetUserLimits(theUserLimitsForDetector);
scintillator_LV->SetUserLimits(theUserLimitsForDetector);

// set detector sensitivity
MD01ScintSD* scintillator_SD =
    new MD01ScintSD(G4String("/mydet/scintillator"),this);
G4SDManager::GetSDmPointer()->AddNewDetector( scintillator_SD );
scintillator_LV->SetSensitiveDetector( scintillator_SD );

return expHall_PV;
}

void MD01DetectorConstruction::setScintMaterial(G4String materialName)
{
  G4Material* checkMat = G4Material::GetMaterial(materialName);
  if (checkMat) {
    scintMaterial = checkMat;
    if (materialName == "BC-523A") contMaterial = G4Material::GetMaterial("Pyrex");
    else                           contMaterial = defaultMaterial;
    scintillator_LV->SetMaterial(scintMaterial);
    scintContainer_LV->SetMaterial(contMaterial);

    G4cout << "\n----> Scintillation Material is "
          << materialName << G4endl;
  }
}

void MD01DetectorConstruction::setConcentration(G4int conc)
{
  // diluted BG-523A
  char c[20];
  sprintf(c,"%d",conc);
  G4String name = "diBG"+G4String(c);
  G4Material* checkMat = G4Material::GetMaterial(name);
  if (checkMat) {
    scintMaterial = checkMat;
}

```

```

contMaterial = G4Material::GetMaterial("Pyrex");

scintillator_LV->SetMaterial(scintMaterial);
scintContainer_LV->SetMaterial(contMaterial);

G4cout << "\n----> Scintillation Material is "
    << name << G4endl;
G4cout << "    concentration of PC is "
    << G4double(conc/10.0) << G4endl;
}

//....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....

// specific method to G4UserLimits:= SetUserMinEkine
void MD01DetectorConstruction::SetRoomEnergyCut(G4double val)
{
    // set minimum charged particle energy cut - NB: for ROOM
    theRoomMinEkine = val;
    if (theUserLimitsForRoom != 0)
    {
        theUserLimitsForRoom->SetUserMinEkine(val);
        G4cout << " Changing Room energy cut to: " << G4BestUnit(val,"Energy")
            << G4endl;
    }
}

//....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....

// specific method to G4UserLimits:= SetUserMinEkine
void MD01DetectorConstruction::SetEnergyCut(G4double val)
{
    // set minimum charged particle energy cut - NB: for Xenon Detector
    theMinEkine = val;
    if (theUserLimitsForDetector != 0)
    {
        theUserLimitsForDetector->SetUserMinEkine(val);
        G4cout << "Changing Detector energy cut to: " << G4BestUnit(val,"Energy")
            << G4endl;
    }
}

//....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....

// specific method to G4UserLimits:= SetUserMaxTime
void MD01DetectorConstruction::SetRoomTimeCut(G4double val)
{
    // set room time cut:
    theRoomTimeCut = val;
    if (theUserLimitsForRoom != 0)
    {
        theUserLimitsForRoom->SetUserMaxTime(val);
        G4cout << " Changing Room Time cut to: " << G4BestUnit(val,"Time")
            << G4endl;
    }
}

//....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....

// specific method to G4UserLimits:= SetUserMaxTime
void MD01DetectorConstruction::SetTimeCut(G4double val)
{
    // set detector time cut:
    theMaxTimeCut = val;
    if (theUserLimitsForDetector != 0)
    {
        theUserLimitsForDetector->SetUserMaxTime(val);
        G4cout << " Changing Detector Time cut to: " << G4BestUnit(val,"Time")
            << G4endl;
    }
}

/*
#include "G4RunManager.hh"

void MD01DetectorConstruction::updateGeometry()
{
    G4RunManager::GetRunManager()->DefineWorldVolume(ConstructScintillator());
}
*/

```

4.2 MCNP

MCNP 自体については、本報告書では解説を割愛する。なお、Geant4との比較において使用したバージョンは MCNP4B2, 使用環境は Intel Pentium 2.4GHz, メモリ 768MB, Linux (RedHat6.2 gcc-2.95.2+g77), である。なお、MCNP4B2 には次の独自の改良を加え、ヒストグラムパッケージとして、CERN library 2000 の HBOOK、NTUPLE をリンクし、使用した。

1. 検出器中での反跳陽子のエネルギー損失を、発生中性子毎にヒストグラムに落とすようにした。
2. $^{10}\text{B}(\text{n},\alpha)^7\text{Li}$ 反応発生時、 $Q_\alpha=2.5\text{MeV}$ とし、中性子が最後に持っていた運動エネルギーを α 粒子にそのまま付与するようし、その α 粒子のエネルギーをヒストグラムに落すようにした。
3. 検出器中での最初の陽子反跳イベント発生時を原点とし、検出器内で発生する最後のイベントまでの時間をヒストグラムに落すようにした。

プログラムリスト 2 に、希釈した BC523A 検出器を中心とし、半径 60cm の球の内表面から球の内部方向へランダムに 1MeV 中性子を 4×10^7 回発生させる場合のインプットファイルを例としてあげた。なお、tally としては、E6 tally により、検出器に与えられる中性子の運動エネルギーを記録した。また、中性子の散乱断面積として、ENDF60 を使用した。

検出器としては、希釈しない BC523A 検出器、希釈した検出器の 2 種類を考慮し、入射中性子のエネルギーとしては、25meV、1keV、1MeV の 3 種類を考慮したため、合計 6 種類のシミュレーションを行った。この時の上記の条件 (1)~(3)、および各発生中性子に対して検出器内部で最初に発生した陽子反跳現象からの時刻 t が、 $200\text{nsec} < t < 6\mu\text{sec}$ になる際の α 粒子のエネルギーをそれぞれヒストグラムに落し、図 76~81 に示した。

前節以前に述べた Geant4 の結果と比較すると、以下のように矛盾する点はあるが、相互の計算精度の検証については今後の課題とする。

- 希釈検出器への単色 1MeV 中性子入射 4×10^7 回に対し、Geant4 では遅延 α ゲートに入るイベント数は 1 回のみ、MCNP では 3.5×10^4 回が計数されている。
 1. Geant4 については速中性子と熱外中性子の間の連続性が満足されているかどうかはあまり検証されていない可能性もある。
 2. MCNP については、今回の計算においては、MCNP が入射中性子の追跡を中性子の見かけ質量により判断し中止する機会全てを α 線発生の機会とみなしたため、過剰にカウントしている可能性はある。

プログラムリスト 2

MCNP 入力ファイル

```

c -----
c Cells
c -----
11 12 -0.880 -10 14 -15
12 13 -2.320 10 -11 16 -17
29 14 -1.2929e-3 -40 (#11 #12)
31 0        40

c -----
c Surfaces
c -----
10 cz 6.3
11 cz 6.5
14 pz -4.3
15 pz 4.3
16 pz -4.5
17 pz 4.5
40 sc 60.0

c -----
c Materials
c -----
m12 1001 5.24 6012 3.84 8016 0.0808 5010 0.0216 5011 0.0053 $
mt12 benz.01t
m13 14000 -.806 8016 -2.11 5010 -.052 5011 -.208 11023 -.08 $
13027 -.044 19000 -.008 $
m14 7014 -.755 8016 -.232 18000 -.013 $

c -----
c Source
c -----
sdef sur = 40 erg = 1e0 par = 1 nrm = -1
c sdef sur = 40 erg = 1e0 par = 1 nrm = -1 dir = d1
c sii .5 1.
c spi 0 1
c -----
c Options
c -----
imp:n,p,e 1 1 1 0
phys:n 280 5j 1
phys:p
phys:e
mode n p e
c mode n h p
c -----
c Tallies
c -----
F6:n 11
F28:p 11
c F38:p,e 11
E0 0.01 98I 1. 39I 5. T
E6 2.5e-8 1e-7 1e-6 1e-5 1e-4 1e-3 1e-2 1e-1 1. 3I 5. T
c F4:n 11
c FU4 0 1 2 3 4
c SD4 1
c E38 0. 99I 1. 3I 5. T
c -----
print
nps 40000000
c prdmp 2j -1
c ssw 40 sym=2
c histp
c print table number, 10= source coefficients and distribution
c 30= tally description
c 35= coincident detector
c print 10 30 35
c prdmp 1250 1250 -1 i
c dbcn j 1000 512 513 2j 100 10000 5 $ non-multitask version.
c   dbcn 6j 100 10000 5 $ dbcn card for multitask version.
c ptrac file=bin max=1000 meph=10 nps=1,100 cell=1 surface=1

```

BC523A with 1MeV neutron

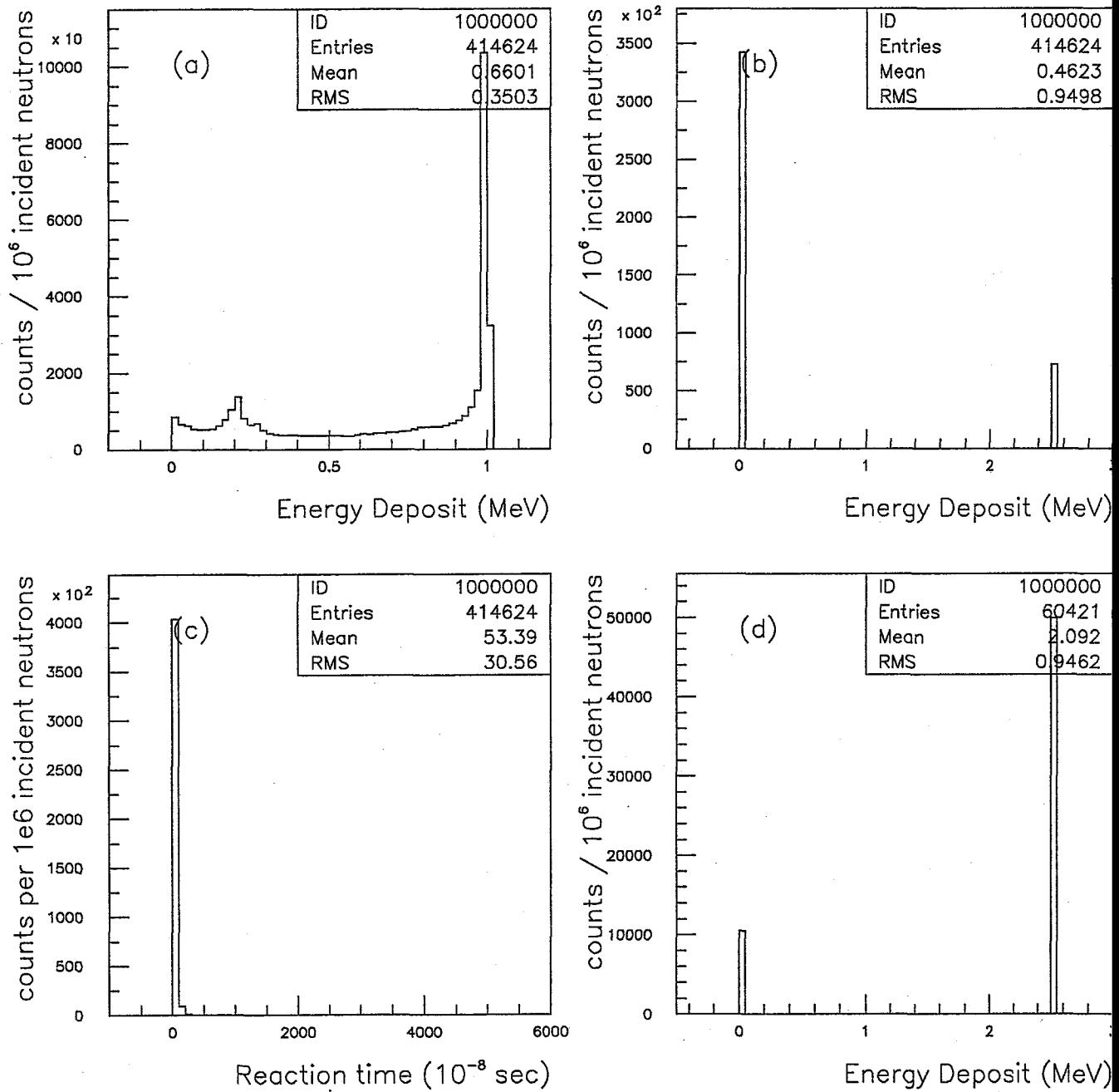


図 76: 1MeV 中性子に対する BC523A 中のシミュレーション結果

BC523A with 1keV neutron

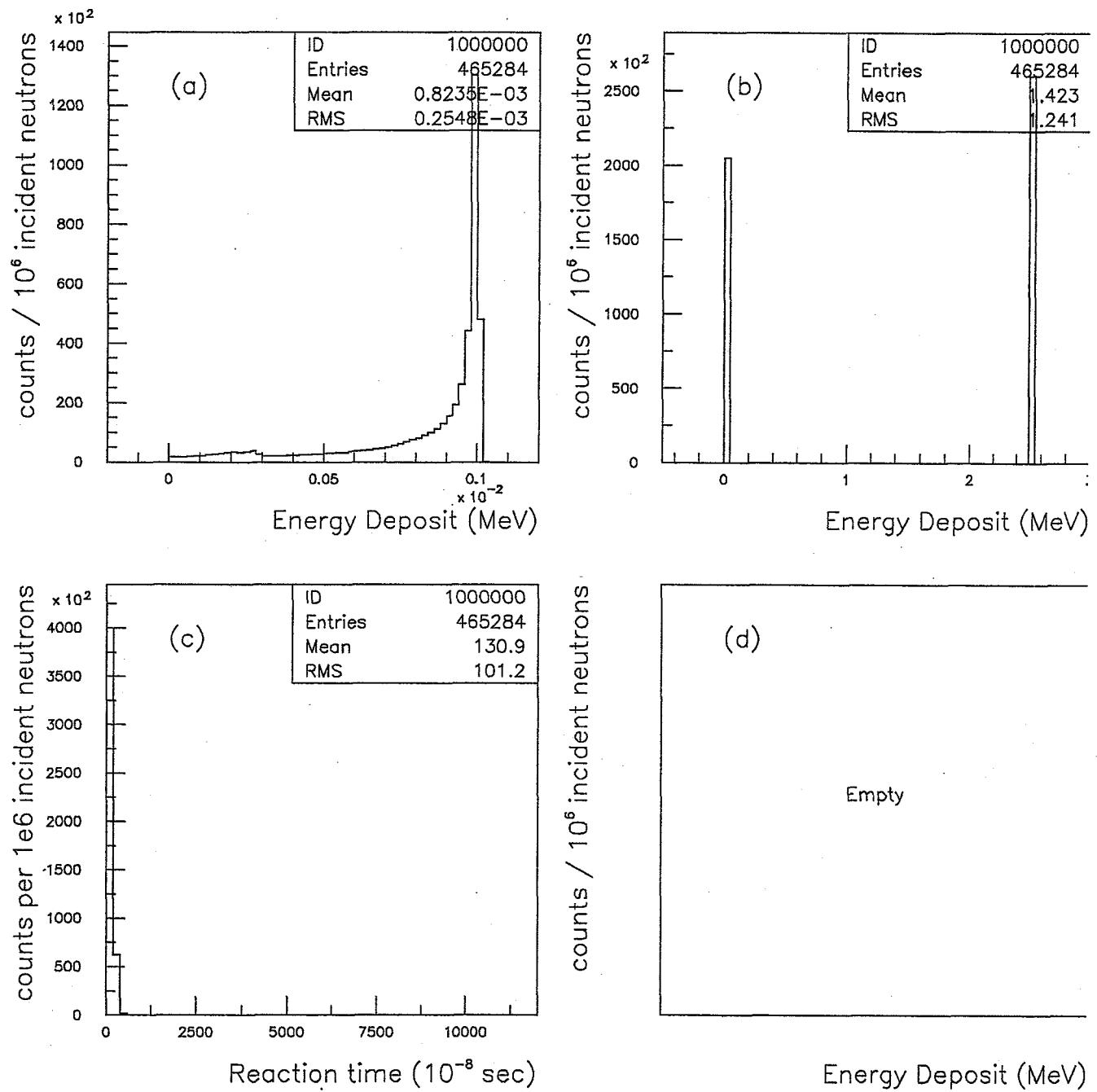


図 77: 1keV 中性子に対する BC523A 中のシミュレーション結果

BC523A with 25meV neutron

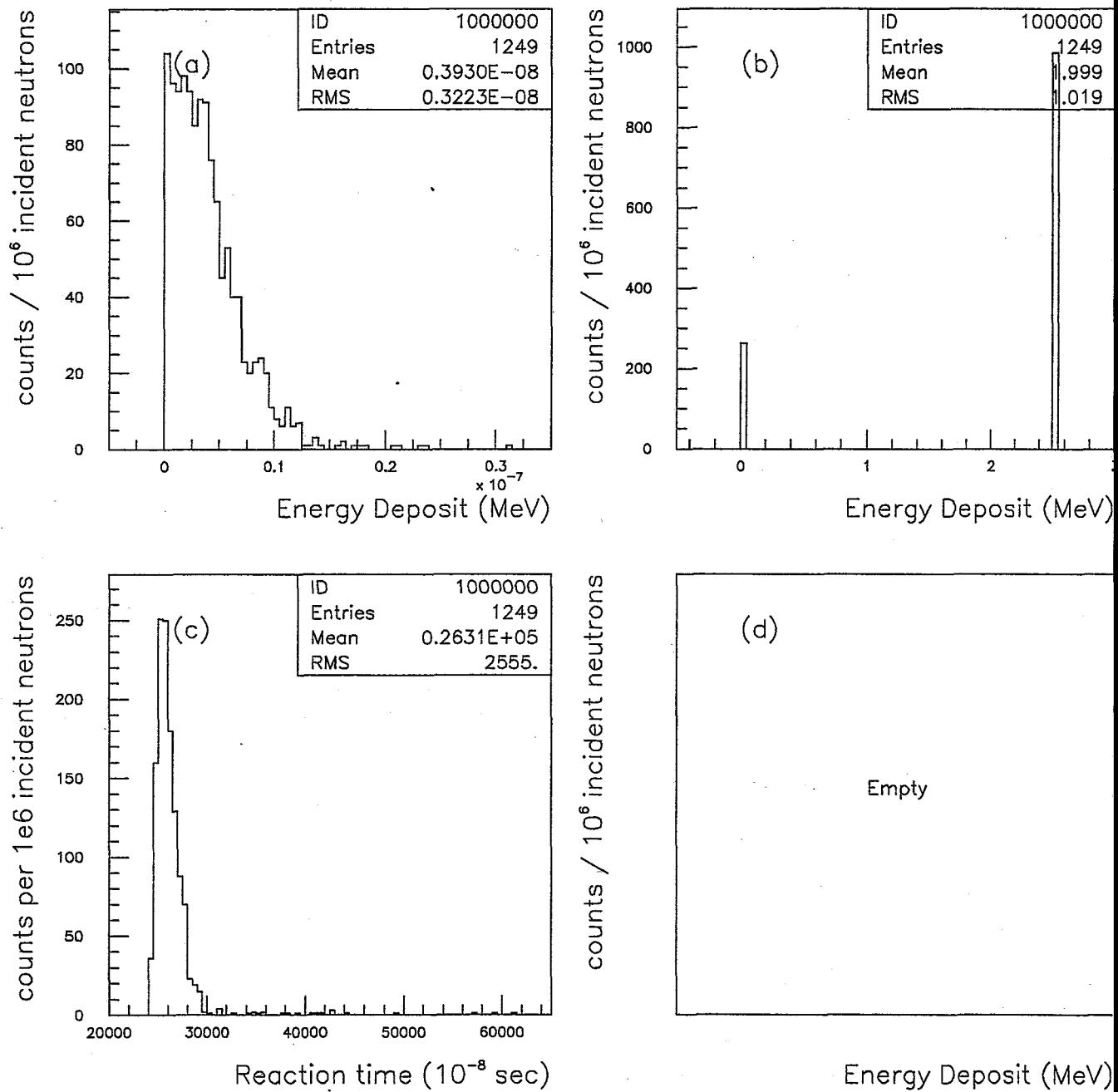


図 78: 25meV 中性子に対する BC523A 中のシミュレーション結果

BC523A distilled with 1MeV neutron

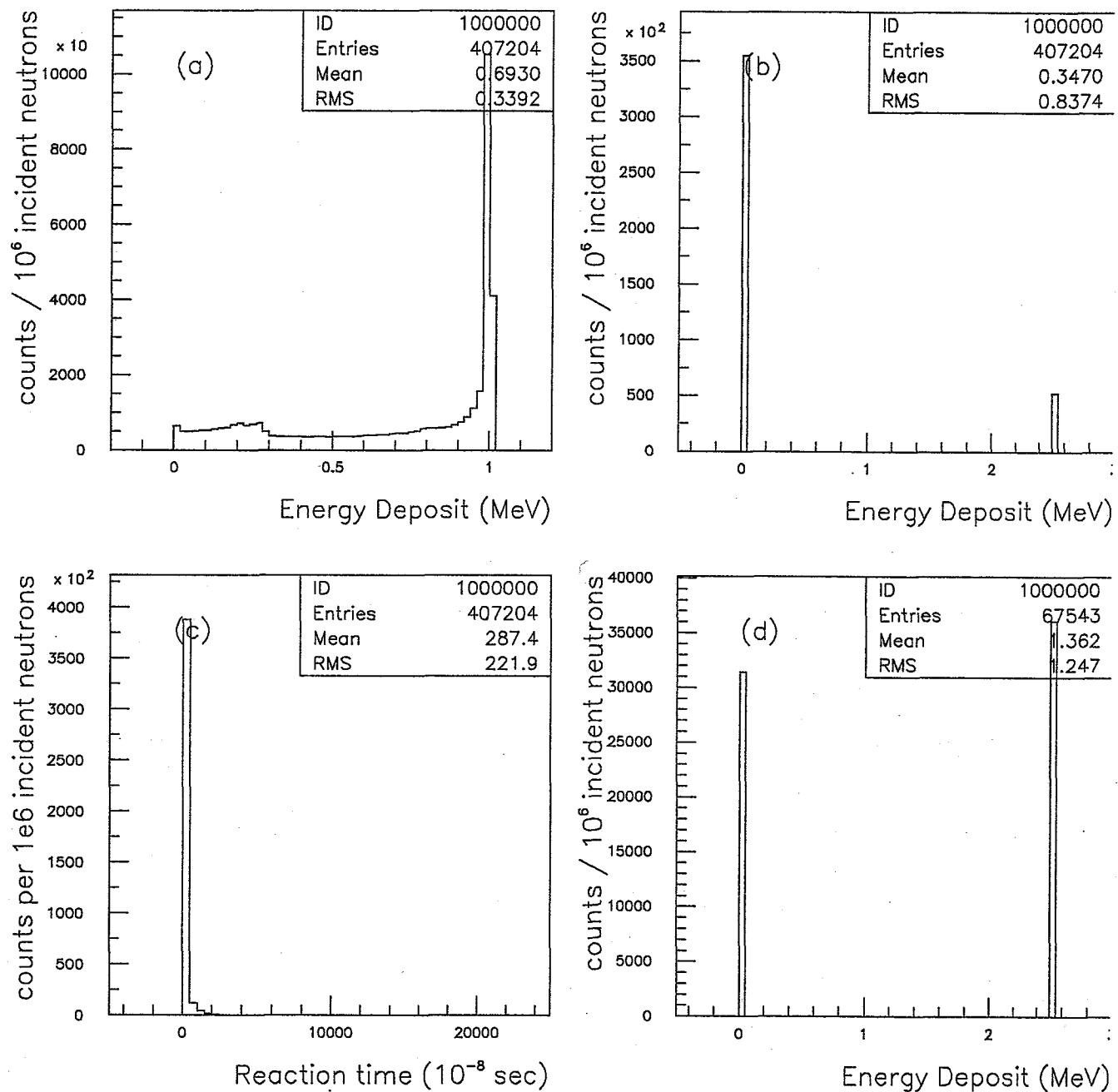


図 79: 1MeV 中性子に対する希釈液体シンチレータ中のシミュレーション結果

BC523A distilled with 1keV neutron

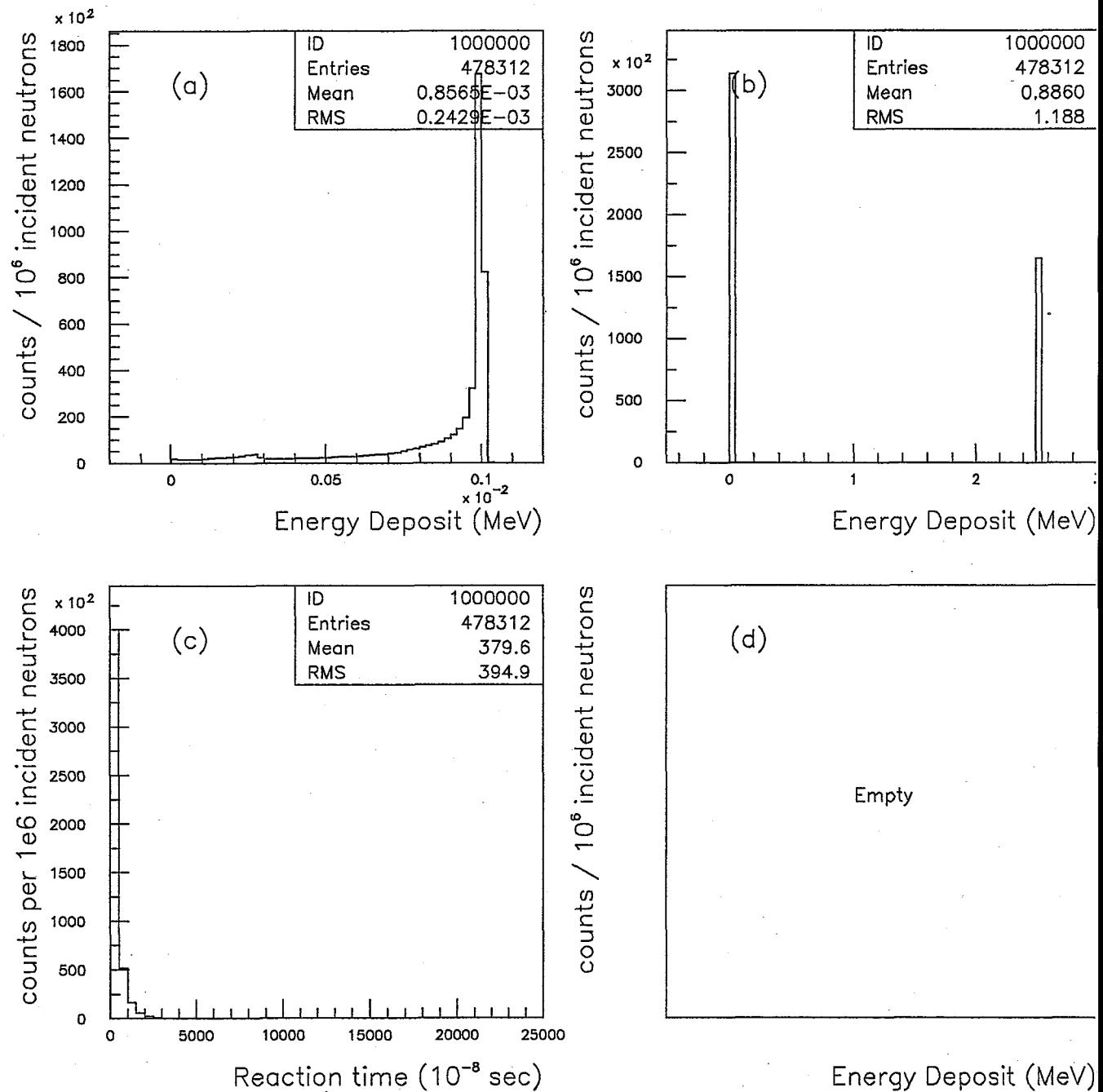


図 80: 1keV 中性子に対する希釈液体シンチレータ中のシミュレーション結果

5 検出効率の測定

今回開発している検出システムについて、中性子に対する検出効率を測定する手段として、次の二種類の方法が考えられる。

1. 中性子線源を使用し実施する測定
2. 加速器や原子炉等、人為的に中性子を発生させ実施する測定

本項目において、上記1.は ^{252}Cf 線源を使用した測定を報告する。上記2.については、加速器からの陽子ビームを利用した測定について報告する。

5.1 中性子線源を使用した測定

中性子線源 ^{252}Cf を使用し、液体シンチレータの検出効率を測定した。

この線源強度とスペクトルは良く調べられており、その ^{252}Cf のエネルギースペクトルは、 $T = 1.3\text{MeV}$ として

$$\frac{dN}{dE} = \sqrt{E} \exp\left(\frac{-E}{T}\right) \quad (5)$$

と表され、エネルギーが単一でない事を除けば検出効率の校正に使用することが出来る。

検出効率の測定を行う手順として、次のステップを踏んだ。

1. ^{252}Cf 中性子線源の強度決定
2. 液体シンチレータの検出効率測定

5.1.1 ^{252}Cf 中性子線源の強度決定

まず、 252 中性子線源の強度決定を実施した。

熱中性子線束とモデレーターでの ^{252}Cf 線源の強度測定 ^{252}Cf 線源の強度は日本アイソトープ協会から購入した段階で与えられているが、この ^{252}Cf 線源をパラフィン製の球形モデレーターの中心に設置して周囲に熱中性子を吸収しやすい物質を置くことにより放射化測定を行なった。

具体的には、モデレーターから出るまでに線源からの(5)式のスペクトルをもった中性子はほぼ完全に熱中性子に変換し、吸収等で若干減少するが、シミュレーションで評価して良い程度の補正に取まつていて、その熱中性子を標的原子核に吸収させ放射化した後、放射化した原子核からの γ 線をGe検出器で測定を行った。

標的原子核として食塩(NaCl)を採用した。その選択理由としては、熱中性子に対する吸収断面積($\sigma = 0.531\text{ barn}$)が比較的大きい事と、放射化した原子核(^{24}Na からの γ 線(1368 keV)をGe検出器で測定するのに最適な半減期(14.96 h)をもつ為である。

BC523A distilled with 25meV neutron

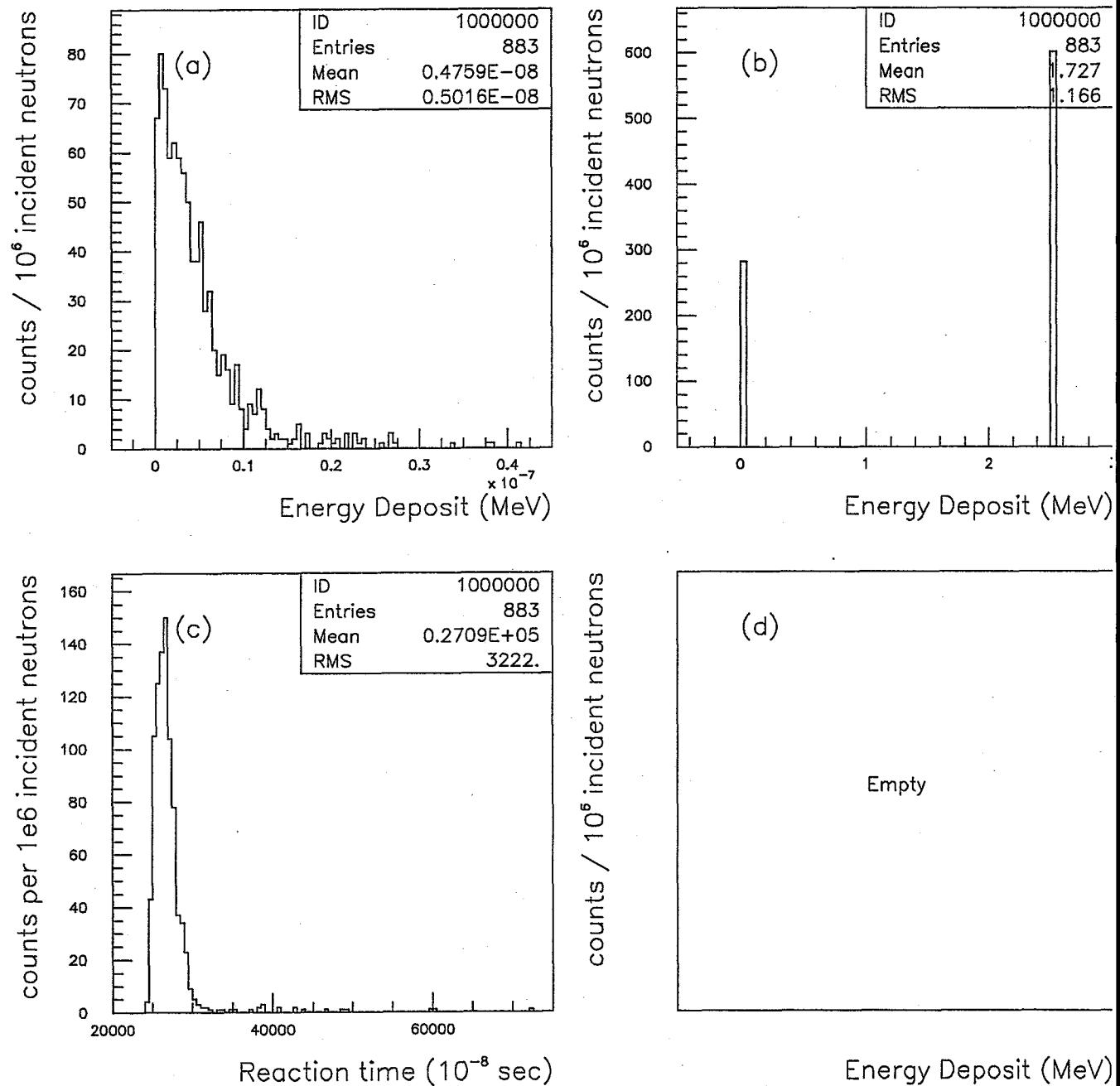
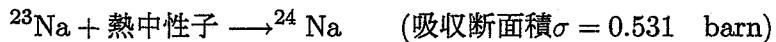
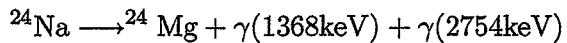


図 81: 25meV 中性子に対する希釈液体シンチレータ中のシミュレーション結果

^{252}Cf の強度測定の実験 中心に ^{252}Cf 線源を入れ、モデレーターを支えるものは木製の台だけにして 2 次的な散乱を極力押えたうえで、モデレーターの周りに食塩 (NaCl) を置き



という反応により、熱中性子化した中性子が食塩の ^{23}Na に吸収され、その ^{24}Na が



と崩壊することにより出来た γ 線 (1368 keV) の数を測ることで ^{252}Cf 線源から出る中性子の線束を見積もった。

そのために、 ^{252}Cf 線源をパラフィンでできた球状のモデレーター (直径 2.5 cm) の中に入れて、その周りに約 600g の食塩 (NaCl) を 6 袋に分けてなるべく薄く平らになるように張り付けた。

表 8: 食塩 (NaCl) 6 袋の内容

	1番目	2番目	3番目	4番目	5番目	6番目
質量 [g]	128.46	103.33	79.03	97.04	103.49	110.29
縦 × 横 [cm]	10.5×14.5	11×8.5	7×11	7×11	12×7	9×9.5
厚さ d [cm]	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
表面積 S [cm ²]	152.25	93.5	77	77	84	85.5
数密度 n [10 ²² /cm ³]	1.739	1.139	1.058	1.299	1.270	1.329

^{252}Cf の照射は周囲の物質量が少ない大きな実験室内にて行なった。照射時間は ^{24}Na の半減期 (14.96 h) に比べて充分長い 4 日 13 時間 ($= 3.924 \times 10^5 [\text{sec}]$) で、その実験風景については図 83 と図 84 に示した。

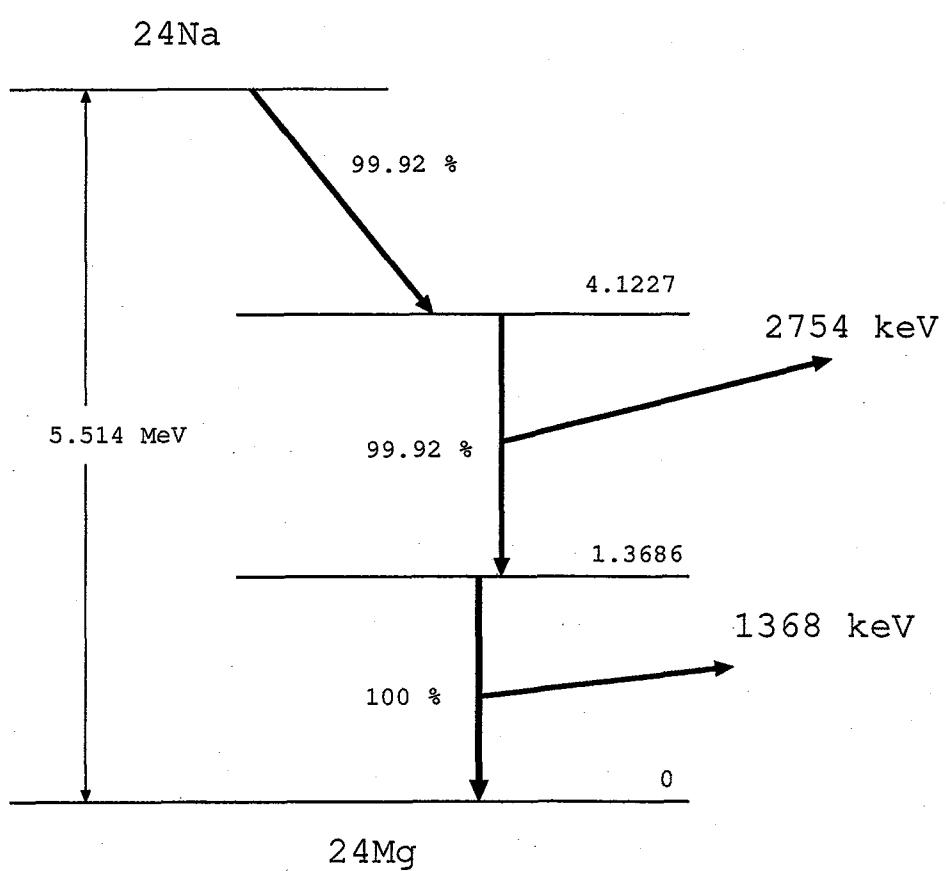


図 82: ^{24}Na の崩壊図

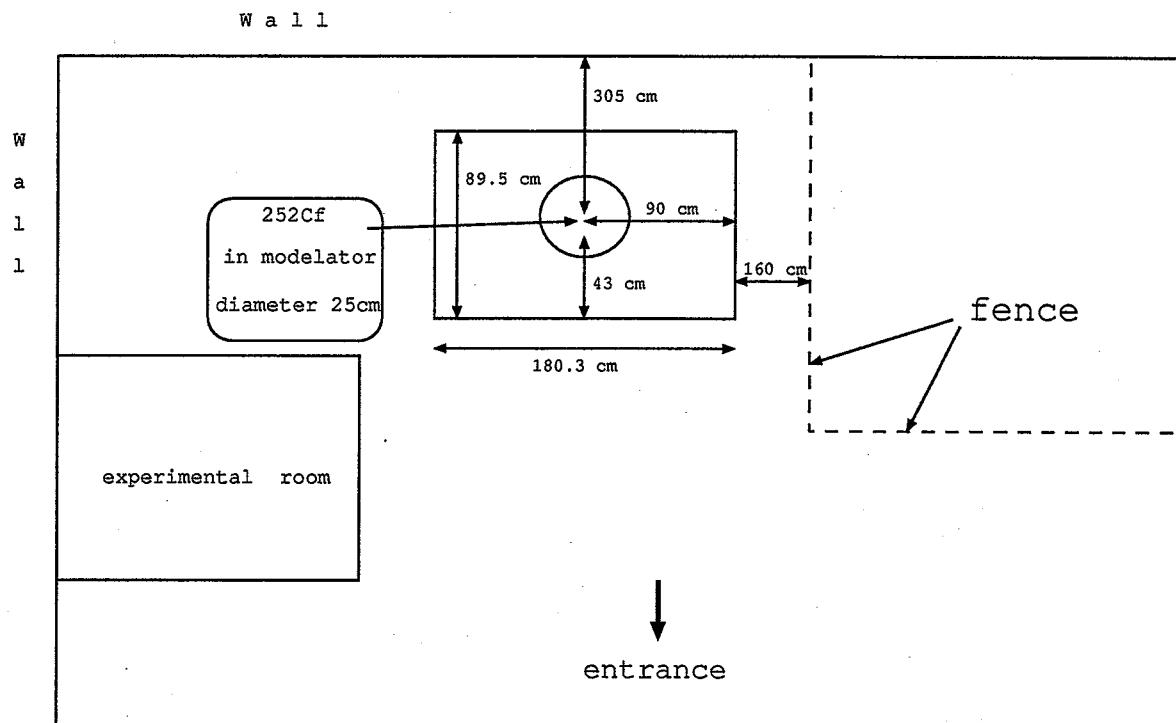


図 83: ^{252}Cf の照射実験の上から見た図

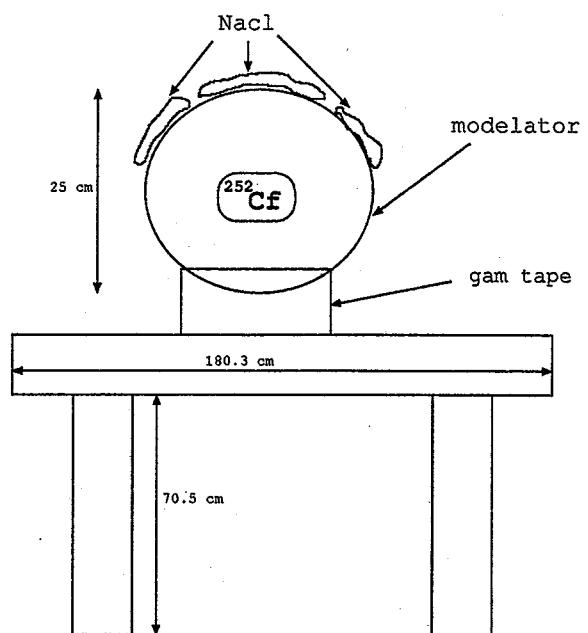


図 84: ^{252}Cf の照射実験の横から見た図

その後照射を停止して45分後Ge半導体検出器により、 ^{24}Na からの γ 線(1368 keV)の量を測定した。測定時間は実時間が2日6時間20分(=196149.5[sec])でLive timeが193394[sec]でその実験風景については図85と図86に示した(ただし、丸囲みの数字は表8にある食塩の袋の番号を示す)。

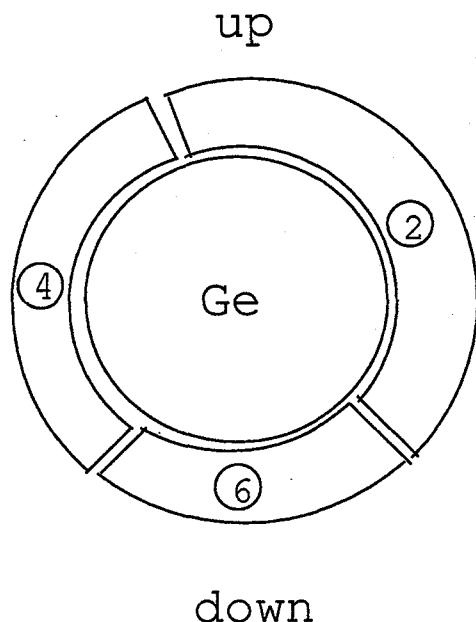


図85: Ge半導体での γ 線(1368 keV)の測定概念図(正面から見た図)

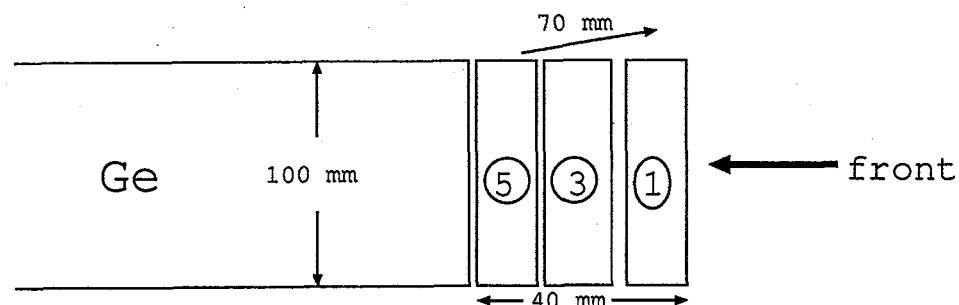


図86: Ge半導体での γ 線(1368 keV)の測定概念図(側面から見た図)奥行70mm

最後に、線源強度がわかつており放出 γ 線のエネルギーも比較的近い ^{60}Co を用いて、Ge半導体検出器の検出効率を求める測定を行った。

Ge半導体検出器での測定結果 実際に、Ge半導体検出器取れたエネルギースペクトルを示した。

放射化した食塩(NaCl)の1368 keVの γ 線を図83や図84の様にして測定した際のエネルギースペクトル及び関数フィッティングの結果を図87, 88に示した。次に ^{60}Co を図89の様に中心1

箇所と側面 2 箇所の合計 3 箇所において Ge 検出器の *gamma* 線の検出効率を測定した際のエネルギースペクトル及び関数フィッティングの結果 (1333 keV の γ 線) を図 90, 91, 92 に示した。

関数フィッティングはバックグラウンドを exponential 型として、その上にガウシアン型のピークがのっていると考え行った。

表 9: gaussian 型 fitting の parameter の値

	^{24}Na	中心	サイド 1	サイド 2
$P_3(\text{const})$	9128	4648	2811	2513
$P_4(\text{mean})$	1368	1333	1332	1333
$P_5(\text{sigma})$	0.9583	1.196	1.120	1.195

^{252}Cf の強度測定の計算結果 以下の様に、Ge 半導体検出器で実際に得られるカウント数を計算して見積もった。

^{252}Cf の半減期と線源の強度は、購入先の日本アイソトープ協会によると表 10 に与えられる仕様を保持していたものと考えられる。

よって、実験日現在 (2004/1/20) の線源強度は

$$t = 2004/1/20 - 2000/6/15 = 3 \text{ 年 } 7 \text{ カ月 } 5 \text{ 日} = 1313 \text{ 日}$$

表 10: ^{252}Cf 購入時仕様

半減期: $T_{1/2}^0 = 2.645 \text{ year} = 965.425 \text{ day}$

線源強度: $N_0 = 4.48 \times 10^5 \text{ n/sec}$

測定日 2000/6/15

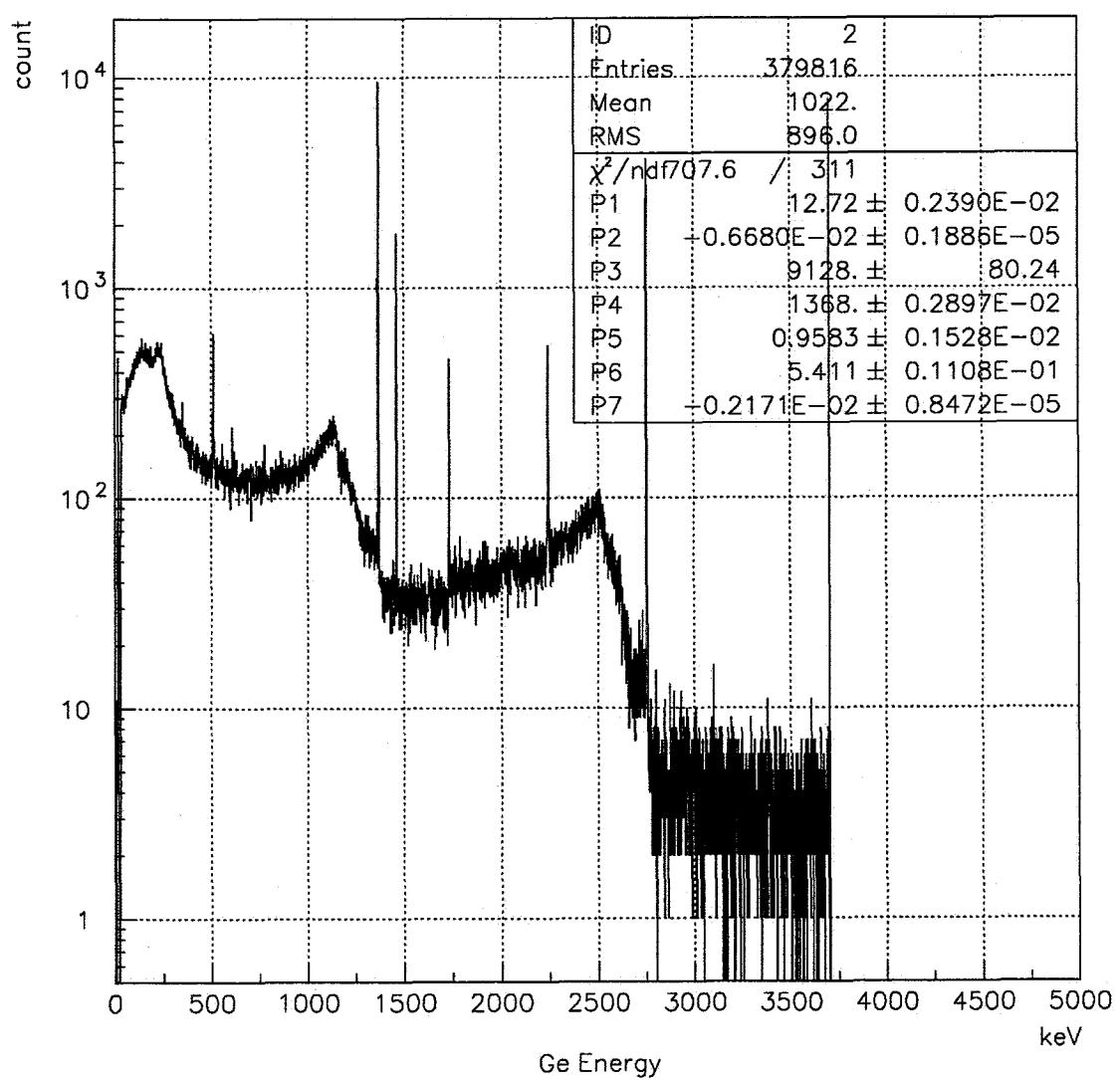


図 87: ^{24}Na からの γ 線 1368 keV

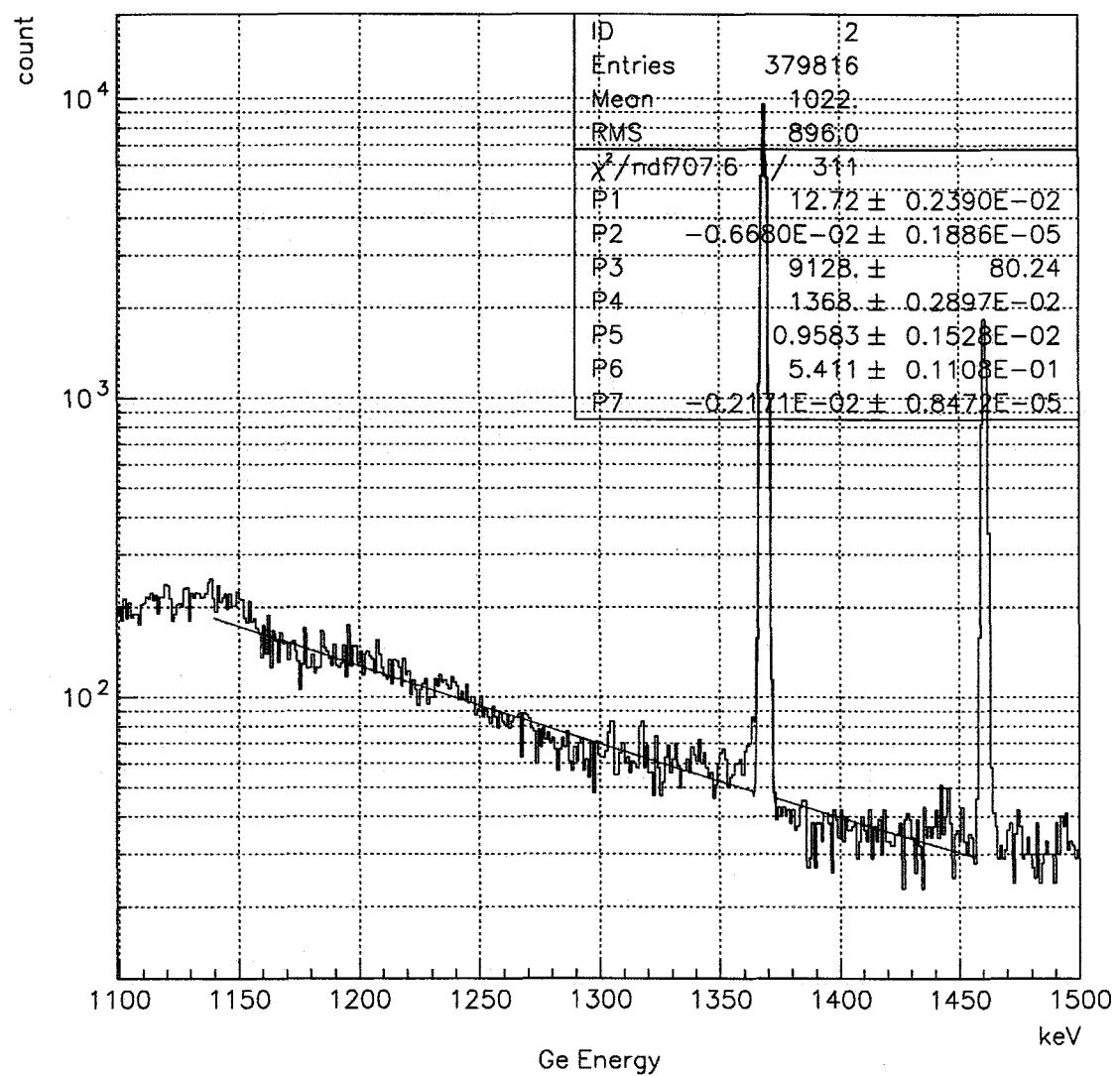


図 88: 図 87 を拡大したもの

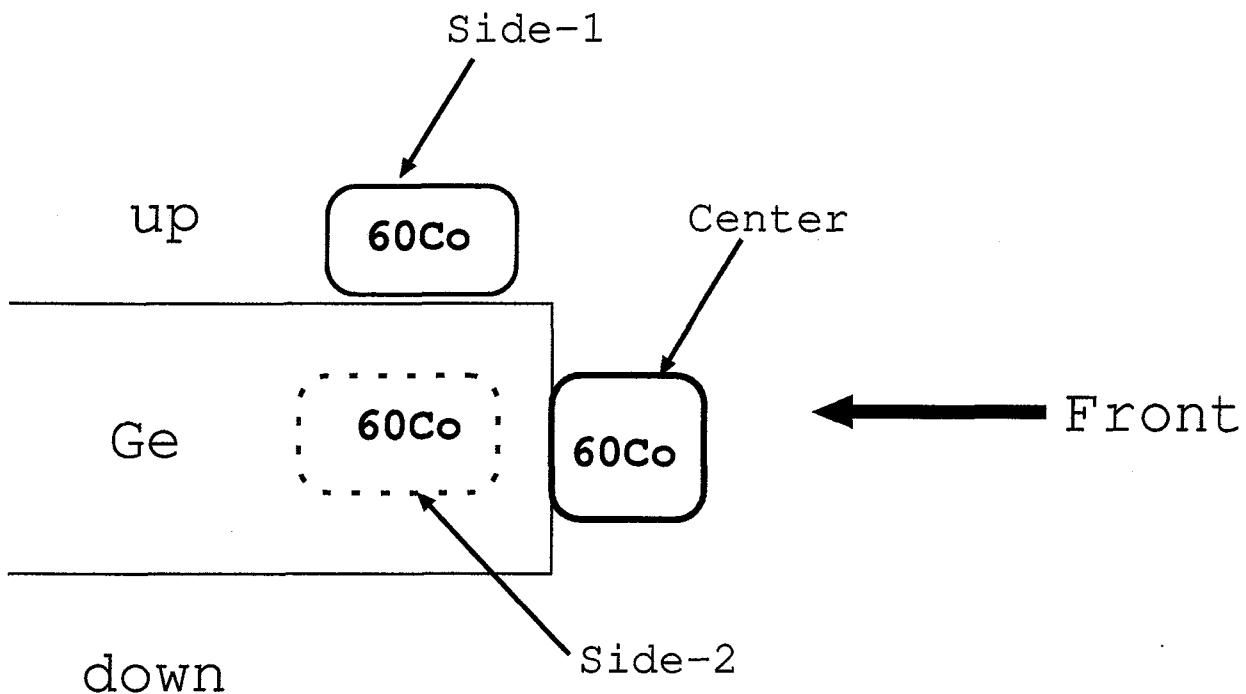


図 89: Ge 半導体の効率測定でのセットアップ

また、 $\lambda_0 = \frac{\ln 2}{T_{1/2}^0}$ とすると、

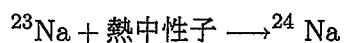
$$\begin{aligned}
 N &= N_0 \exp(-\lambda_0 t) \\
 &= N_0 (\exp \ln 2^{-1})^{\frac{t}{T_{1/2}^0}} = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}^0}} \\
 &= 4.48 \times 10^5 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{1813}{965.425}} = 1.745 \times 10^5 \quad [n/sec]
 \end{aligned} \tag{6}$$

より、実験日(2003/1/20)現在で ^{252}Cf の中性子の強度は $N = 1.7453 \times 10^5 \text{ n/sec}$ となる。

モデレーターの半径は実測値で 12.5 cm であるから、表面積は $1.963 \times 10^3 \text{ cm}^2$ となり、モデレーター表面における中性子のフラックス f は

$$\begin{aligned}
 f &= \frac{N}{4\pi \cdot 12.5^2} \\
 &= 0.8891 \times 10^2 \quad [n/sec/cm^2]
 \end{aligned} \tag{7}$$

また 1 個の熱中性子が食塩中の ^{23}Na に吸収され



となる確率 α は

$$\alpha = 1 - \exp(-n\sigma d) \tag{8}$$

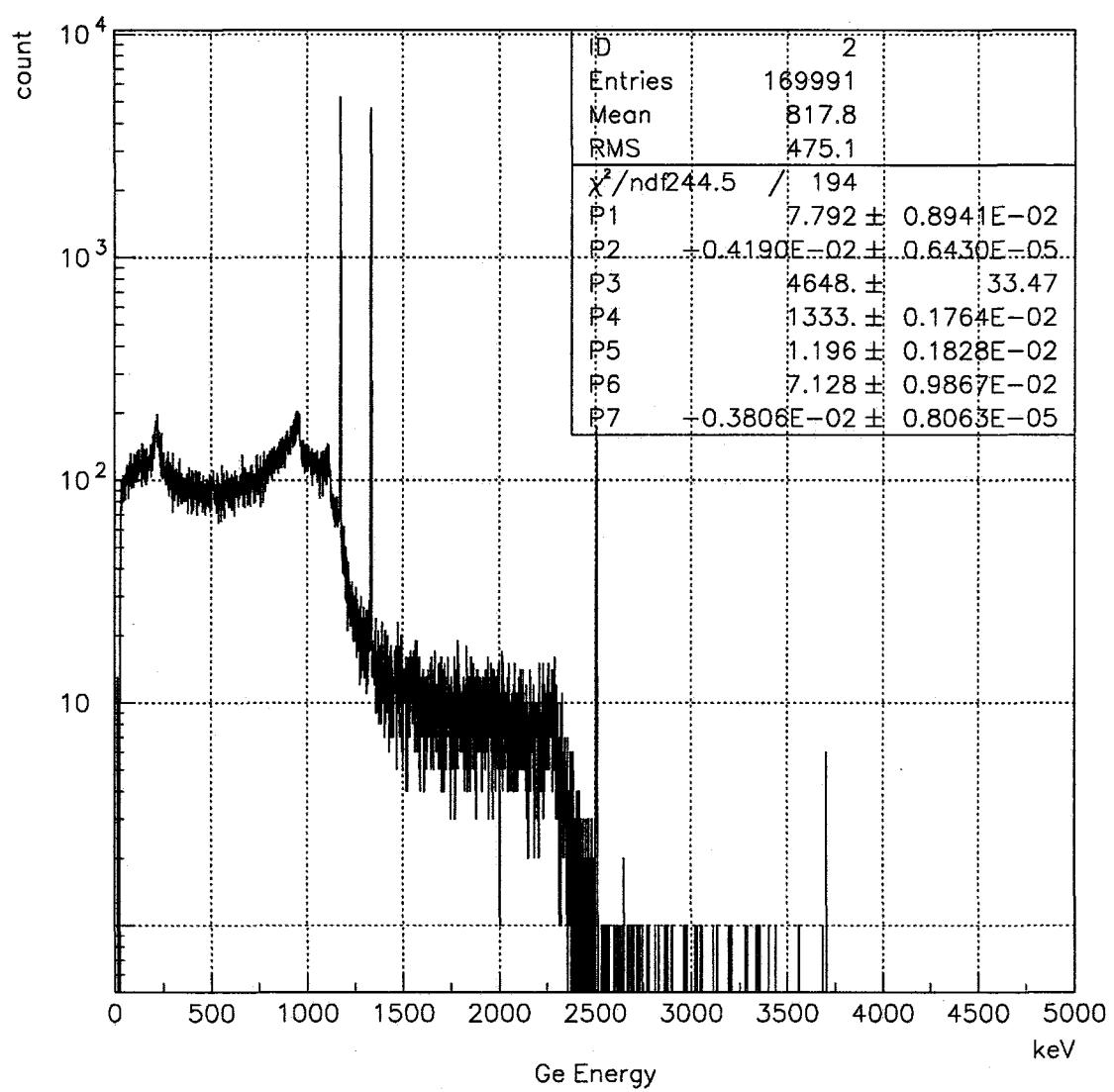


図 90: Ge 半導体の効率測定(中心)

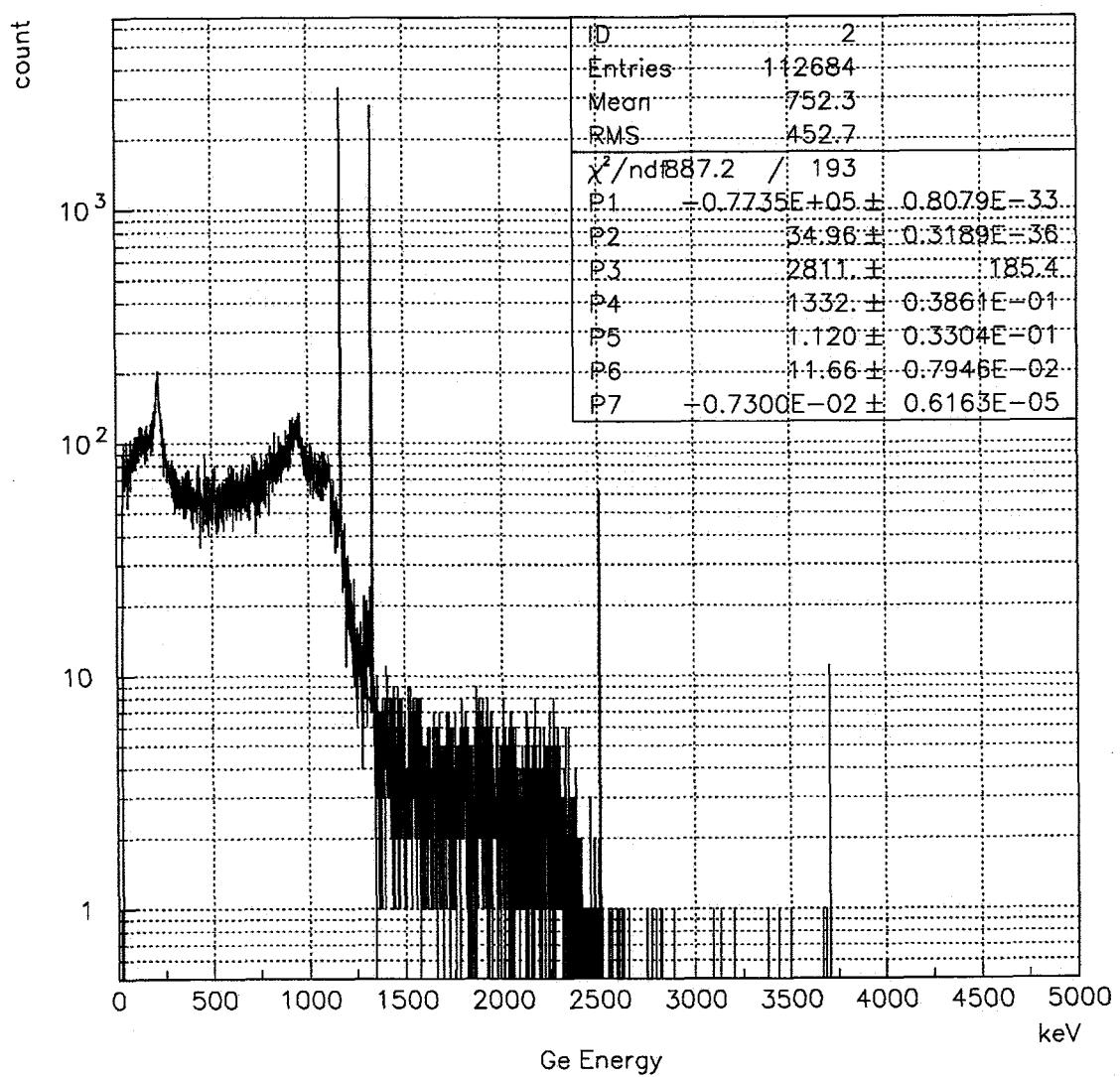


図 91: Ge 半導体の効率測定 (サイド 1)

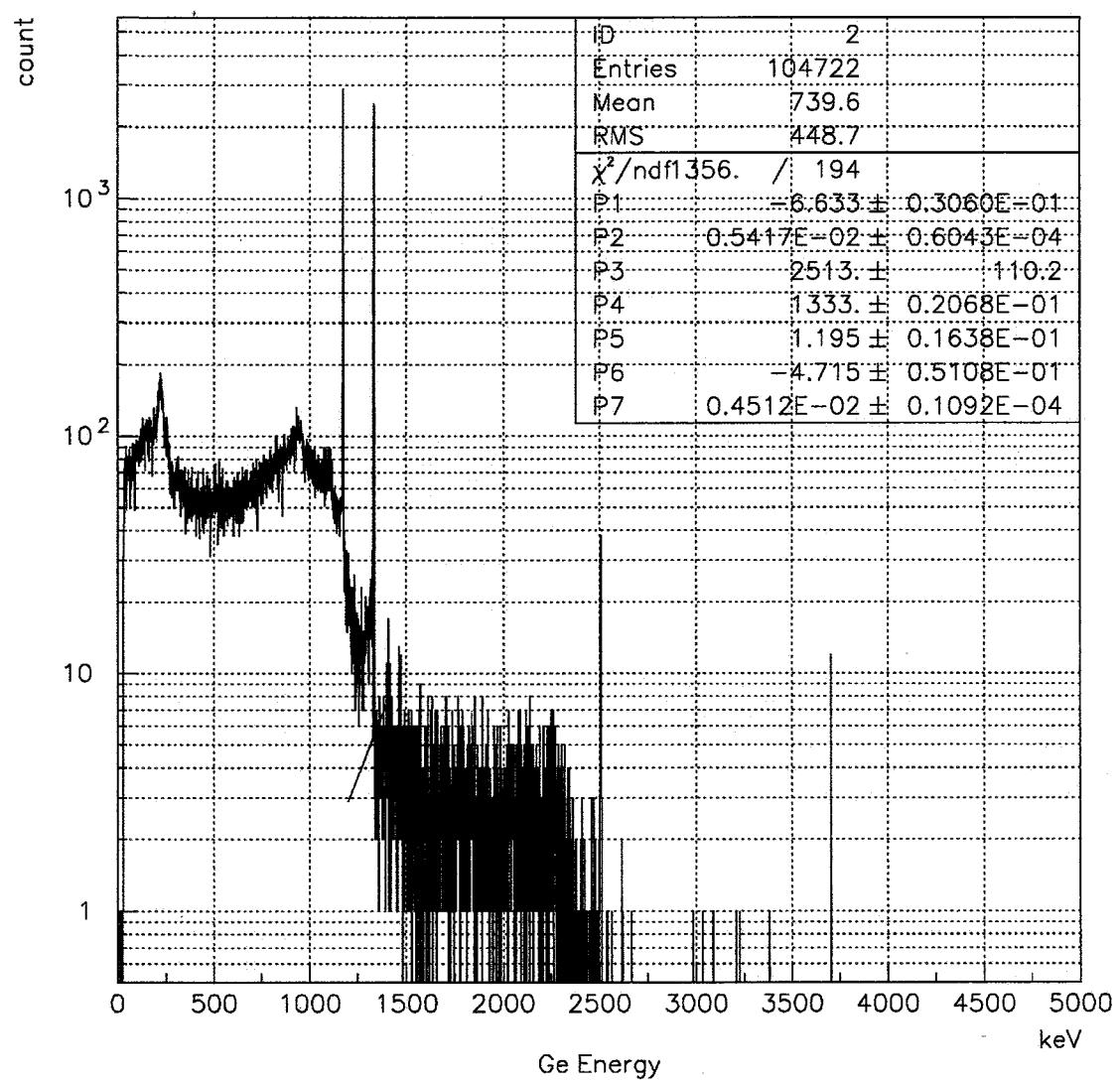


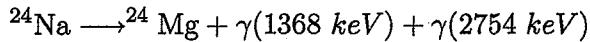
図 92: Ge 半導体の効率測定 (サイド 2)

で与えられる。よって ^{252}Cf を照射している間、単位時間当たりに ^{24}Na が出来る個数 β は

$$\beta = f \cdot S \cdot \alpha \quad (9)$$

と求まる。

一方、



と崩壊する半減期は、

$$\begin{aligned} T_{1/2} &= 14.96 \text{ hour} = 5.3856 \times 10^4 \text{ sec} \\ \lambda &= \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = 1.287 \times 10^{-5} \text{ sec}^{-1} \end{aligned}$$

^{252}Cf を照射している間は、 ^{24}Na は β の rate で増えて崩壊定数 λ で崩壊するので、微分方程式

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N + \beta \quad (10)$$

が成立し、 ^{252}Cf を照射する直前は ^{24}Na が食塩中に存在しなかった ($t = 0 \text{ sec}$ で $N = 0$) とすると

$$N = \frac{\beta}{\lambda} (1 - \exp(-\lambda t)) \quad (11)$$

となり、照射時間は 4 日 13 時間 ($t_1 = 3.924 \times 10^5 \text{ sec}$) から照射直後にできる ^{24}Na の数 N_1 は

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{\beta}{\lambda} (1 - \exp(-\lambda t_1)) \\ &= \frac{\beta}{1.287 \times 10^{-5}} (1 - \exp(-1.287 \times 10^{-5} \cdot 3.924 \times 10^5)) \\ &= \frac{\beta}{1.287 \times 10^{-5}} \times 0.9936 = 7.720 \times 10^4 \beta \end{aligned} \quad (12)$$

と求まる。

また、照射終了後、Ge 検出器での測定開始までに $t_2 = 45 \text{ 分} = 2700 \text{ sec}$ かかったが、その時点で、残存している ^{24}Na の個数は

$$N_2 = N_1 \exp(-\lambda t_2) = 0.96585 N_1 \quad (13)$$

Ge 検出器での測定期間に中に ^{24}Na が崩壊する個数は測定時間を $t_3 = 196149.5[\text{sec}]$ として

$$N_3 = N_2 (1 - \exp(-\lambda t_3)) = 0.9199 N_2 \quad (14)$$

と求まる。

以上の計算式と表 8 から食塩 (NaCl) 6 袋のそれぞれについて各値を求めて表 11 にまとめた。

ここで、食塩 (NaCl) の自己吸収がなく、6 袋とも全て立体角が 2π だったとすると、Ge 半導体検出器に入つて来る 1368 keV の γ 線は、図 85 と図 86 の場合、表 11 の N_3 の総和の $1/2$ より

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \sum N_3 &= \frac{1}{2} \cdot 20.682 \times 10^6 \\ &= 1.0341 \times 10^7 \end{aligned} \quad (15)$$

表 11: 食塩 (NaCl) 6 袋についての計算結果

	1番目	2番目	3番目	4番目	5番目	6番目
質量 [g]	128.46	103.33	79.03	97.04	103.49	110.29
縦 × 横 [cm]	10.5×14.5	11×8.5	7×11	7×11	12×7	9×9.5
厚さ d [cm]	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
表面積 S [cm ²]	152.25	93.5	77	77	84	85.5
数密度 n [10 ²² /cm ³]	1.739	1.139	1.058	1.299	1.270	1.329
α [×10 ⁻³]	4.606	6.029	5.600	6.872	6.7185	7.0332
β [n/sec]	62.35	50.12	38.34	47.046	50.177	53.465
N ₁ (×10 ⁶ 個)	4.813	3.869	2.960	3.632	3.874	4.127
N ₂ (×10 ⁶ 個)	4.649	3.737	2.859	3.508	3.742	3.987
N ₃ (×10 ⁶ 個)	4.277	3.438	2.630	3.227	3.442	3.668

となる。

次に、Ge 検出器の検出効率を ⁶⁰Co 線源の強度と実際に Ge 検出器で得られた γ 線 (1333 keV) のスペクトルより算出した。⁶⁰Co の半減期と線源の強度は

$$\begin{aligned} \text{強度: } A &= 1.45(\mu\text{Ci}) = 5.365 \times 10^4 \text{ Bq} \\ \text{半減期: } T_{1/2} &= 5.271 \text{ 年} = 1923.915 \text{ days} \\ \text{測定日} &= 86 \text{ 年 2 月 28 日} \end{aligned}$$

実験日の 2004 年 2 月 3 日 現在 ($t_0 = 6545$ 日後) の強度

$$\begin{aligned} \left(\frac{dN}{dt} \right) &= A \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t_0}{T_{1/2}}} = 0.946065 A \\ &= 5.0756 \times 10^3 \text{ Bq} \end{aligned} \quad (16)$$

$$T_{1/2} = 1.66226 \times 10^8 \text{ sec}$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = 4.169902 \times 10^{-9} \text{ sec}^{-1}$$

より、2003 年 2 月 3 日の ⁶⁰Co 原子の数 N_0 は

$$N_0 = \frac{\beta}{\lambda} = 1.2172077 \times 10^{12} \text{ 個} \quad (17)$$

⁶⁰Co を Ge 検出器に照射した Live time を t_n とするとその間に ⁶⁰Co が崩壊した数を C_n は

$$C_n = N_0 \left(1 - \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t_n}{T_{1/2}}} \right) \quad (18)$$

また、立体角を考慮して 1333 keV の γ 線が Ge 半導体に入つて来る個数 I_n は

$$I_n = \frac{1}{2} C_n = \frac{1}{2} N_0 \left(1 - \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t_n}{T_{1/2}}} \right) \quad (19)$$

一方、図 90 と図 91 と図 92 より得られた fitting の結果よりその gauss 関数

$$f(x) = P_3 \exp \left[-\frac{(x - P_4)^2}{2P_5^2} \right] \quad (20)$$

を積分して、

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx &= P_3 \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left(-\frac{x^2}{2P_5^2} \right) dx \\ &= P_3 P_5 \sqrt{2\pi} \end{aligned} \quad (21)$$

実際に Ge 検出器で測定された γ 線 (1333 keV) のカウント数 $I_0 = P_3 P_5 \sqrt{2\pi}$ を中心、側面 1、側面 2 の合計 3箇所で求めた。

表 12: 1333 keV における Ge 検出器の検出効率の測定結果

	中心	側面 1	側面 2
Live time t_n [sec]	125	131	128.5
Ge 検出器で検出された個数 $I_0 (\times 10^4)$	1.3934	0.78917	0.75275
Ge 検出器に入つて来る個数 $I_n (\times 10^5)$	3.172	3.325	3.276
検出効率 (%)	4.393	2.373	2.298

この検出効率と表 11 の N_3 から、実際に Ge 検出器で検出される γ 線 (1368 keV) を見積もつた。

Ge 検出器の中心の部分の効率を 4.393 %、側面を約 2.3 %と考えて、その効率と N_3 を掛けたものの和に立体角を考慮して 1/2 を掛けた N_{sum} が実際に Ge 検出器が検出するカウント数になる。

表 13: 放射化食塩 (NaCl) からの γ 線のカウント数の計算結果

	1 番目	2 番目	3 番目	4 番目	5 番目	6 番目
$N_3 (\times 10^6$ 個)	4.277	3.438	2.630	3.227	3.442	3.668
効率 (%)	4.39	2.3	4.39	2.3	4.39	2.3
効率 $\times N_3 (\times 10^5$ 個)	1.88	0.791	1.16	0.74	1.512	0.84

より、効率 $\times N_3$ の 6 袋の場合の総和に 1/2 を掛けたものは

$$\begin{aligned} N_{sum} &= \frac{1}{2} \cdot 6.923 \times 10^5 \\ &= 3.46 \times 10^5 \end{aligned} \quad (22)$$

一方、放射化した NaCl からの 1368 keV の γ 線を Ge 検出器で測ったカウント数は図 87 や図 88 から、 ^{60}Co と同じように得られたガウス関数の P_3 と P_5 から

$$\begin{aligned} I_{1368\text{keV}} &= P_3 P_5 \sqrt{2\pi} \\ &= 2.19 \times 10^4 \end{aligned} \quad (23)$$

と求まる。

(22) 式と (23) 式で一桁以上の差が生じている。これは、検出効率を考える際に線源や食塩の袋からみた Ge 半導体検出器部分の立体角を 2π としているのに対し、実際にはもっと小さい値が考えられ、特に図 86 において 3 番や 1 番と検出器から離れるに従い、より小さい値になると考えられる。さらに、今回の計算では食塩中での自己吸収を考慮していないことや、 ^{252}Cf 線源からの中性子束のパラフィン中での熱化の効率を 100 % としているが、実際にはもっと小さい値を取るかもしれないことを考慮すると、(22) 式に得られた値は妥当な値に落ち着くことが考えられる。今後は ^{252}Cf 線源とパラフィンモデレーター・食塩の組み合わせ、及び Ge 検出器と食塩の組み合わせなどをシミュレーションなどを用いてより精密に計算していく必要がある。

5.1.2 BC-523A 液体シンチレーターを用いた測定装置のセットアップ

検出器の校正 本研究では、外部から検出器に入射する中性子の陽子との散乱信号や検出器内で生成された α 粒子などからのエネルギー付与をシンチレータの蛍光として光電子増倍管で電気的パルス信号に変換して、そのパルス信号の波高を ADC でデジタルデータに A/D 変換している。そのため、 α 粒子による second pulse の電子換算エネルギー約 60 keV が ADC の何チャンネルに相当するか、 ^{241}Am の 59.5 keV の full energy peak を用いて校正することにした。

液体シンチレーター BC-523A は主に、H, O, C などの比較的原子番号の小さい元素から成るために、 ^{241}Am の 59.5 keV の γ 線を除くと、比較的エネルギーの高い ^{57}Co 線源からの 122 keV や ^{22}Na や ^{60}Co 線源からの γ 線はほとんど full energy peak を作ることは無い。

まず、遅延同時計数で重要な second pulse を同定するために、2 台のディスクリミネータを用意した。これらにより lower threshold と upper threshold をかけてエネルギー情報を用いて信号を識別する。この second pulse は ^{10}B の熱中性子吸収反応によって生成される α 粒子と ^7Li による信号であって、その電子換算エネルギーは約 60 keV である。この 2 つのディスクリミネータの閾値をそれぞれ決定するため、以下の実験を行った。

測定回路としては図 93 の回路を使った。そして、高圧電源を -2.23 kV に設定し、バックグラウンド及び ^{241}Am , ^{57}Co 線源を検出器の直近に設置した際のデータを取った。

次に、実際に取得したエネルギースペクトルを図 94 に示した。ここで、図中の青線は実際に線源を使用して得られたエネルギースペクトル、赤線はバックグラウンド測定時のデータを live time で補正したもの、緑線は青線と赤線の差である。最後の図はペデスタルの測定結果である。

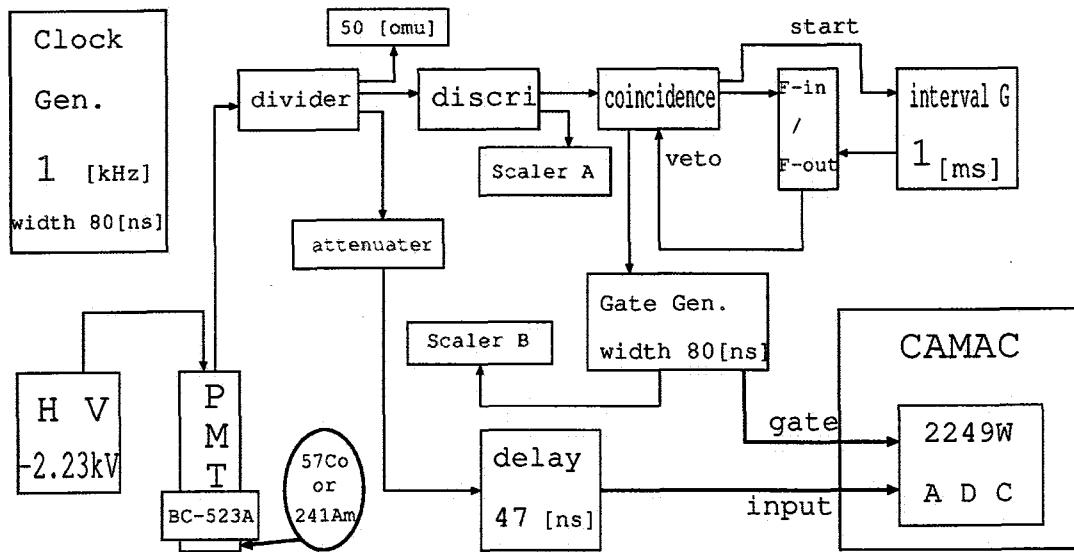


図 93: 閾値を決定する為に使用した回路図

表 14: ディスクリミネータの閾値電圧と ADC チャンネルの相關測定値

閾値	70 mv	100 mv	150 mv	200 mv	300 mv	400 mv
実時間 [sec]	2122	2283	1080	1300	1046	1101
Live time [sec]	182.6	290.76	244.4	481.85	649.1	821.9
上の比	1.0	1.5921	1.3384	2.639	3.5548	4.50075

	background	241Am	57Co
実時間	2131 [sec]	1220 [sec]	2122 [sec]
カウント数	944416 c	1082834 c	1921889 c
scaler A	2156033 c	10528339 c	22332128 c
scaler B	944384 c	1082728 c	1921863 c
B / A	43.80193 %	10.28394 %	8.60582 %
Live time	933.419 [sec]	125.46406 [sec]	182.61553 [sec]
上の比	1.0	0.134413	0.1956415

図 94 にあるように、 ^{241}Am の 59.5keV の γ 線の full energy peak が 200 ch 付近を中心に見える。この結果を受けて、検出器の分解能を考慮し lower threshold を約 100 ch に、upper threshold を約 300 ch に設定することにした。続いて、ディスクリミネータの閾値の電圧値と ADC チャンネルとの関係を調べるために、検出器直近に ^{57}Co 線源をセットし、閾値の電圧値を変化させて対応するチャンネル数の変化を測定した（表 14）。

得られたエネルギースペクトルを図 95 に示した。ここで、青線は各 threshold 値で得られたスペクトルを、赤線は threshold が最小値 (70 mV) のスペクトルを live time 補正したものを表し、その比（青線/赤線）を 1000 倍したものが黒線である。以上の結果、lower threshold として約 100 mV、

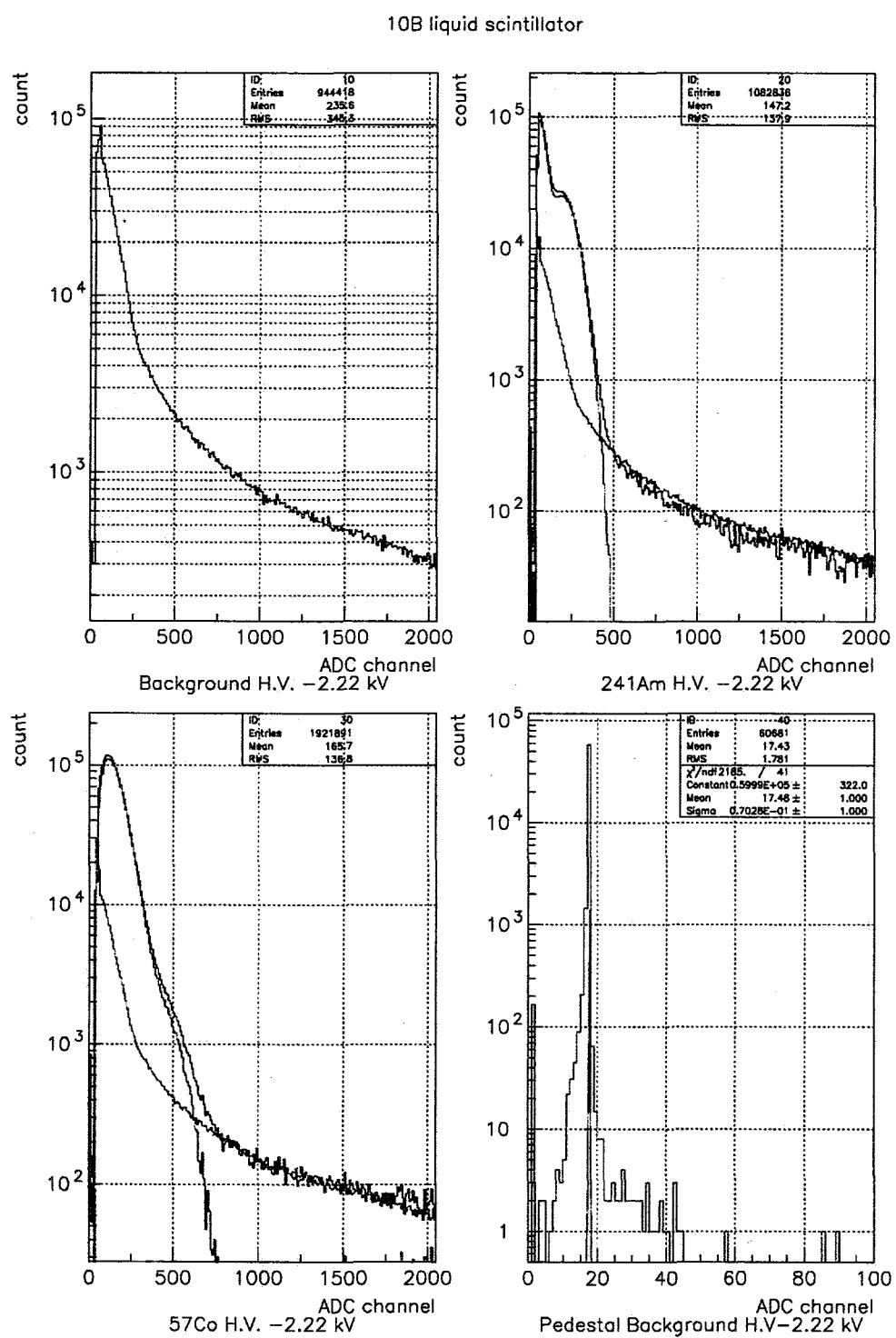


図 94: ²⁴¹Am の 60keV 付近のスペクトル

upper threshold としては約 200 mV が適当であることがわかった。今後、この値を 2 台のディスクリミネータの閾値として採用するものとした。

液体シンチレーターの検出効率の測定実験 効率の測定の為に検出器系を以下の様に用意した。

線源を検出器の中心と同じ高さになる位置で検出器から約 10 cm 離れた位置に設置した。 ^{252}Cf から出た放射線が直接成分以外に反射して検出器に入らないように、線源の周りにはなるべく物を置かないようにした。以上により線源から出た中性子が他の物質で散乱されて検出器に入り、効率を間違えて計測することのないように設定した。距離は線源からだけの影響を見る為に出来るだけ近くに置いたが、一方近過ぎると中心と端で立体角に大きな差があるので線源からの距離が検出器表面の場所によって 10 % 程度までは変化して良いとして決めた。

^{252}Cf からは中性子以外にも γ 線が大量に発生しているが、鉛の遮蔽を置く事で γ 線だけを有効に落すことが出来る。今回は first pulse 信号である反跳陽子と、second pulse の信号である α 粒子のエネルギースペクトルと、first pulse と second pulse の時間差を同時に測定できるように測定回路を改造した(図 96)。

^{252}Cf 中性子線源を検出器から約 10 cm 程度離して測定した。得られたエネルギースペクトルを図 97 に示した。ここで、“10B scinti TDC data” が first pulse から second pulse までの時間差を示している。具体的には 5 MHz のクロックジェネレータからのパルス信号をスケーラで数えたものであり、横軸は 1 ch あたり 200 ns に相当する。Second pulse 用の delayed coincidence gate の最大値は 10 μsec にセットした。図 97 下段のスペクトルは同一のものを、後半成分のみを 1 成分(slow component) の exponential でフィットしたもの(左) と 2 成分(fast and slow component) でフィットしたもの(右) を並べてある。検出器中の ^{10}B の数密度から予想される遅延時間は slow component にほぼ一致する。

そこで、slow component が主となる、時間差が 1.7 μsec から 10 μsec 間のイベントのみを選び出し、それぞれのエネルギースペクトルをプロットした(図 98)。念の為、 ^{22}Na を用いた first pulse 用 ADC のエネルギースペクトルと、 ^{241}Am を用いた second pulse 用 ADC のエネルギースペクトルを図 99 に示した。

図 98 では電子換算エネルギーにして約 60 keV に相当する ADC チャンネル付近にはピークはみにくいが、その後 ^{10}B の熱中性子吸収反応で生成される $^7\text{Li}^*$ が基底状態に崩壊する際に放出される 478 keV の γ 線を液体シンチレータの周囲に置いた NaI 検出器により測定し、triple coincidence による測定を行ったところ、有意にピークを確認した。今後はより定量的な測定を目指して研究を進めていく。

5.2 加速器ビームを用いた速中性子に対する測定効率の検証

今回報告している、BC523A を希釈した中性子検出器の、速中性子に対する感度を評価するため、中性子源として陽子加速器で加速された陽子ビームを鉄ターゲットに照射し、核破碎反応により生じた速中性子を中性子検出器で検出する実験を平成 14 年度に実施した。今年度は、平成 14 年度の実験について、核破碎反応により生じた速中性子の線束密度を測定するための追試を実施し、シミュレーションとの比較により、液体シンチレーション検出器の速中性子への感度を求めるものとした。

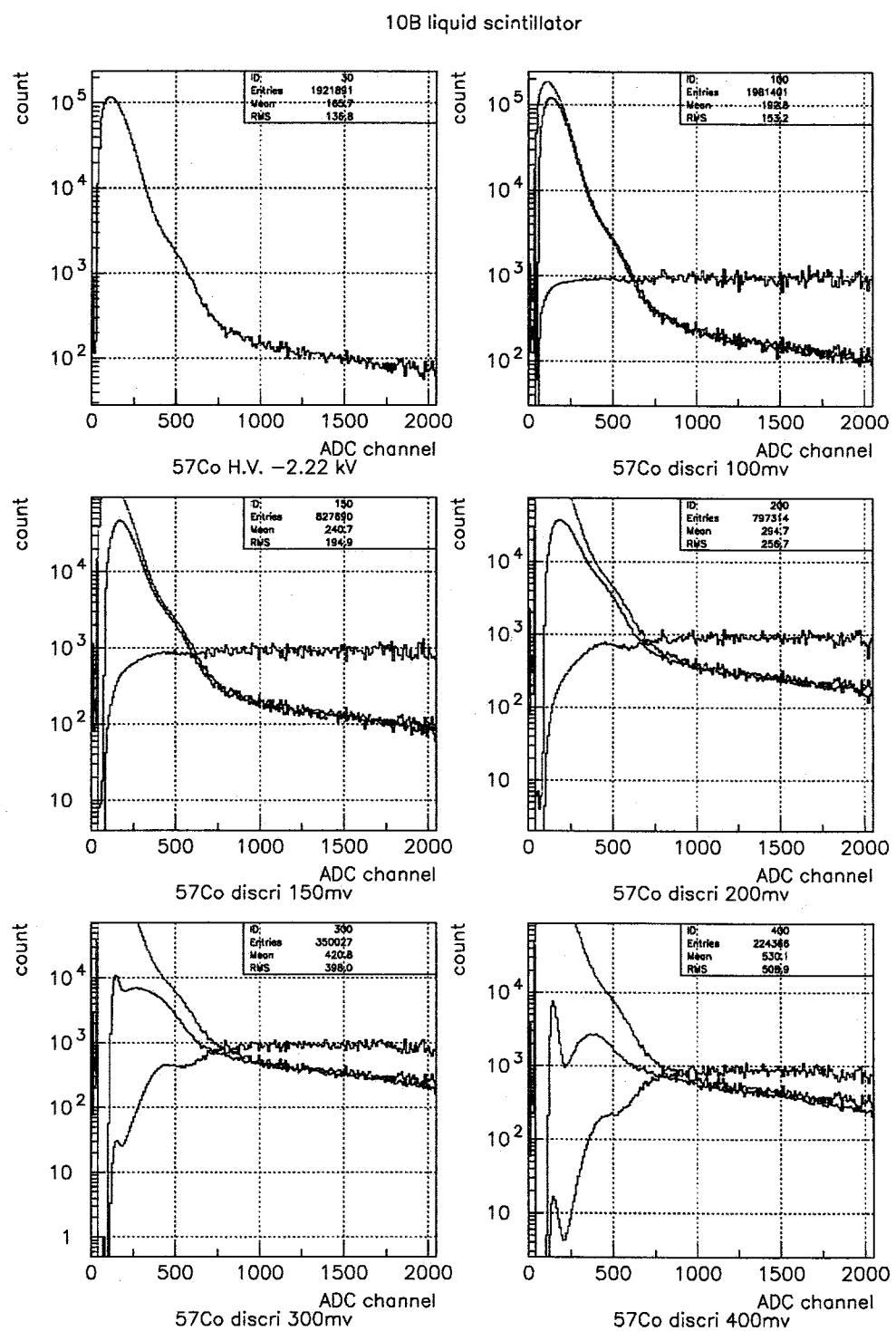


図 95: ディスクリミネータの閾値を変えたデータ

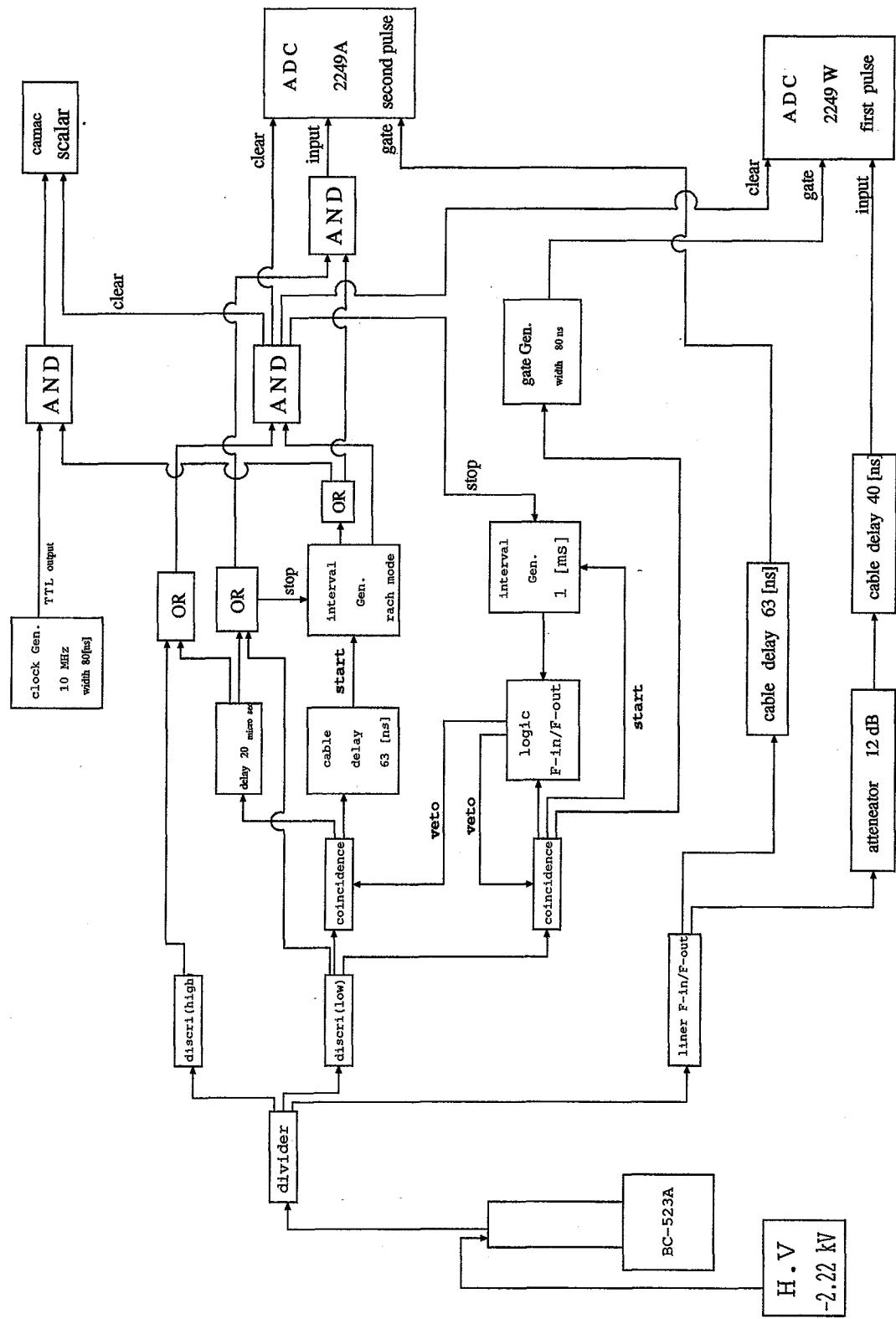


図 96: 測定回路の図

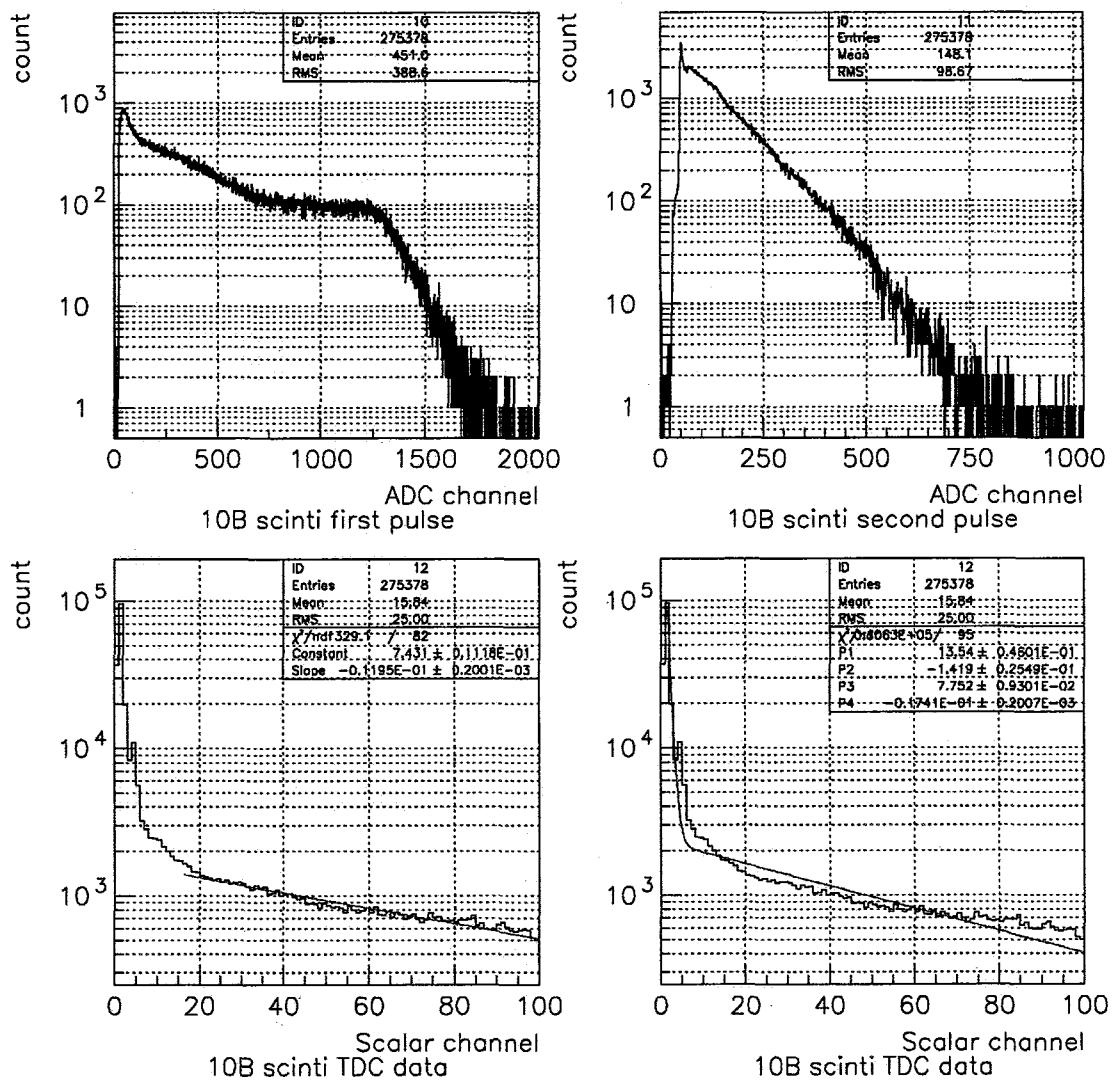


図 97: ^{252}Cf 線源を使用した際のスペクトル

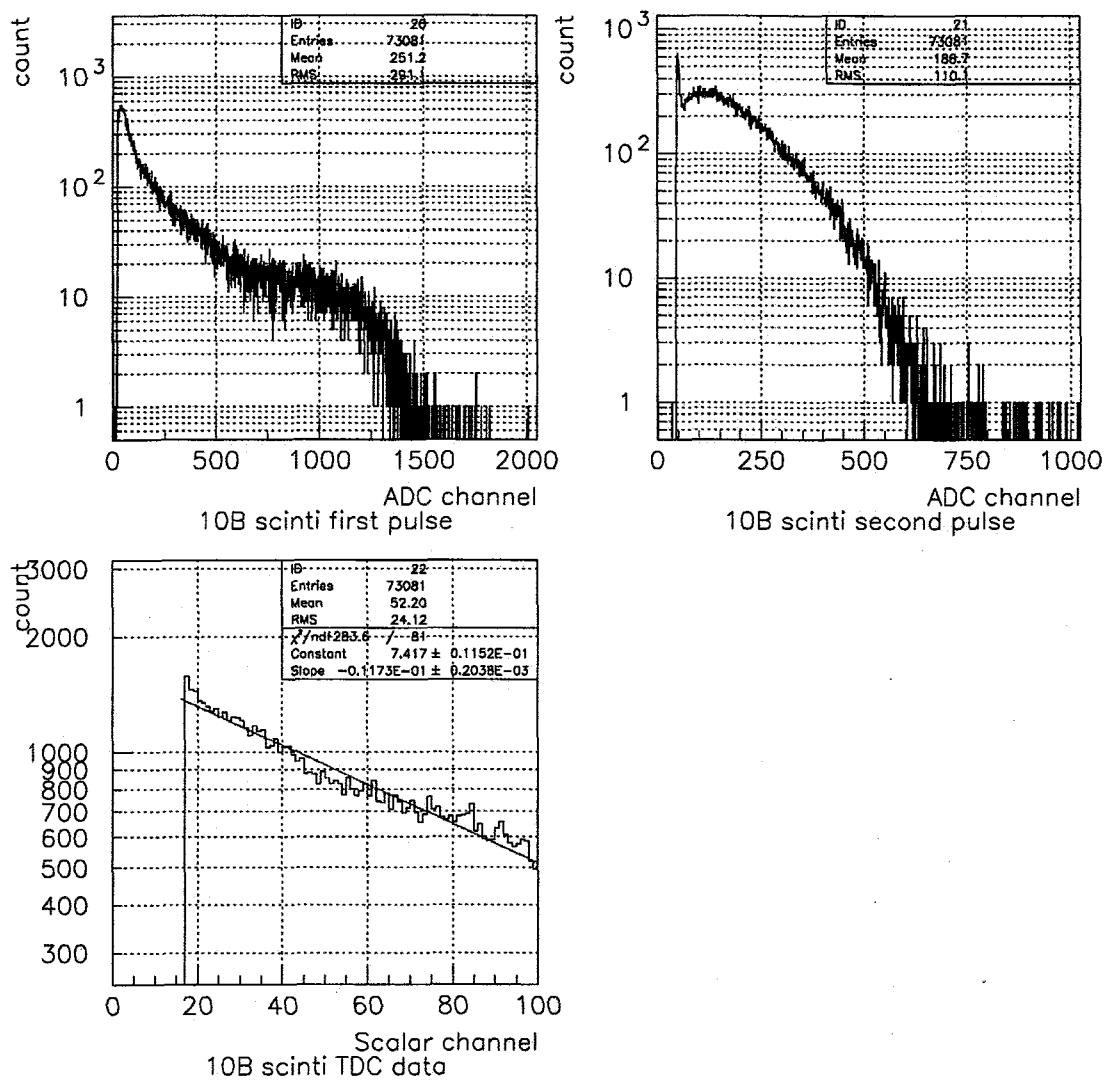


図 98: 時間差 1.7μsec～10μsec 間のエネルギースペクトル

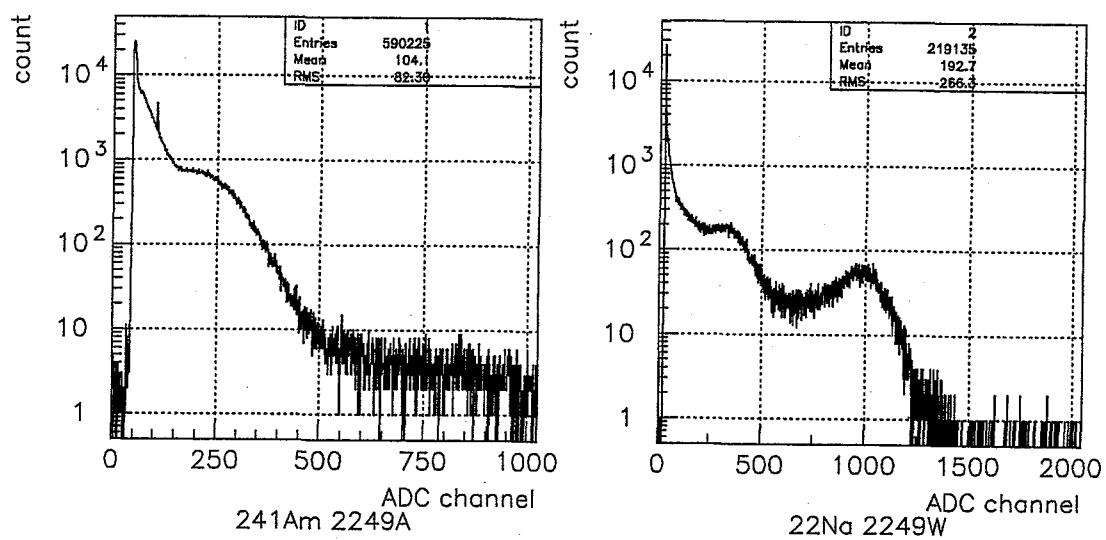


図 99: 線源を使用した際のエネルギースペクトル

5.2.1 実験

実験では、福井県若狭エネルギー研究センターに設置された、タンデム・シンクロトロン複合型多目的加速器システムを使用した。ビームライン全景を図 100-102 に示した。陽子ビームのエネルギーは 80MeV、中性子発生用の核破碎ターゲットとして 5mm 厚の鉄を用意し、照射室 4 高エネルギー生物照射コースへ図 103 のように配置した。陽子ビームの電流値は、シンクロトロン出口の真空中ビームダンプ (BS)、およびターゲット上流の大気中電離箱 (DM402) からの出力電流値を、] カレントインテグレータにより電圧変換し、スケーラで読みとった (図 104)。速中性子線束測定器としては、レムカウンタ (富士電機 NSM10014) (図 105) を採用し、パルス信号出力をスケーラに直接入力してカウント値を読みとった。測定器周辺への飽和ホウ酸水 (水 100g に対しホウ酸 3g を溶解) で充填されたポリタンクの配置により減速材とした (図 106)。測定器から中性子ターゲット向きの上流側の減速材厚 (図 107-109) を変更していく、その際の中性子カウントレートのビーム電流値依存性を取得した (表 15~17)。この結果を図 110-113 にまとめた。

これらの結果から、BS 電流値が 0.5nA 以上になった際に、レムカウンタのカウントレートが飽和することがわかる。

平成 14 年度実施の実験では、陽子ビーム電流値はビームストップ (BS) 電流値が 0.02nA であったことから、電離箱における電流値に換算すると 4×10^{-3} nA に相当する際のレムカウンタの計測率が、その際の速中性子束に相当する、ということになる。今回の場合、電流値 0.02nA の際のレムカウンタ計数率は 8×10^1 cps であった。

表 15: 減速材厚 0mm

BS 計測値 (nC /20sec)	電離箱 測定値 (10nC/20sec)	レム 測定値 (counts/20sec)	BS 電流値 nA	電離箱 電流値 10pA	レム 電流値 kcps
20000	4000	46464	$1.000 \times 10^{+00}$	2.000×10^{-1}	$2.323 \times 10^{+00}$
null	4000	46857	null	2.000×10^{-1}	$2.343 \times 10^{+00}$
null	4500	50015	null	2.250×10^{-1}	$2.501 \times 10^{+00}$
null	5400	49161	null	2.700×10^{-1}	$2.458 \times 10^{+00}$
null	4400	48722	null	2.200×10^{-1}	$2.436 \times 10^{+00}$
13040	2500	43524	6.520×10^{-1}	1.250×10^{-1}	$2.176 \times 10^{+00}$
null	2600	44968	null	1.300×10^{-1}	$2.248 \times 10^{+00}$
null	2500	43965	null	1.250×10^{-1}	$2.198 \times 10^{+00}$
null	2500	46070	null	1.250×10^{-1}	$2.304 \times 10^{+00}$
null	2800	47149	null	1.400×10^{-1}	$2.357 \times 10^{+00}$
8140	1794	33474	4.070×10^{-1}	8.970×10^{-2}	$1.674 \times 10^{+00}$
null	1759	32618	null	8.795×10^{-2}	$1.631 \times 10^{+00}$
null	1634	30246	null	8.170×10^{-2}	$1.512 \times 10^{+00}$
null	1584	29235	null	7.920×10^{-2}	$1.462 \times 10^{+00}$
null	1596	29692	null	7.980×10^{-2}	$1.485 \times 10^{+00}$
4362	804	15480	2.181×10^{-1}	4.020×10^{-2}	7.740×10^{-1}
null	786	15254	null	3.930×10^{-2}	7.627×10^{-1}
null	755	14682	null	3.775×10^{-2}	7.341×10^{-1}
null	777	14982	null	3.885×10^{-2}	7.491×10^{-1}
null	768	14989	null	3.840×10^{-2}	7.495×10^{-1}
3247	493	9577	1.624×10^{-1}	2.465×10^{-2}	4.789×10^{-1}
null	314	6086	null	1.570×10^{-2}	3.043×10^{-1}
null	398	7414	null	1.990×10^{-2}	3.707×10^{-1}
null	380	7396	null	1.900×10^{-2}	3.698×10^{-1}
null	346	6850	null	1.730×10^{-2}	3.425×10^{-1}
1891	330	6524	9.455×10^{-2}	1.650×10^{-2}	3.262×10^{-1}
null	331	6606	null	1.655×10^{-2}	3.303×10^{-1}
null	371	7313	null	1.855×10^{-2}	3.657×10^{-1}

1058	212	4113	5.290×10^{-2}	1.060×10^{-2}	2.057×10^{-1}
null	224	4517	null	1.120×10^{-2}	2.259×10^{-1}
null	245	4857	null	1.225×10^{-2}	2.429×10^{-1}
null	236	4714	null	1.180×10^{-2}	2.357×10^{-1}
null	255	4953	null	1.275×10^{-2}	2.477×10^{-1}
488	95	1880	2.440×10^{-2}	4.750×10^{-3}	9.400×10^{-2}
null	100	1888	null	5.000×10^{-3}	9.440×10^{-2}
null	80	1592	null	4.000×10^{-3}	7.960×10^{-2}
null	71	1394	null	3.550×10^{-3}	6.970×10^{-2}
null	75	1435	null	3.750×10^{-3}	7.175×10^{-2}
502	159	3032	2.510×10^{-2}	7.950×10^{-3}	1.516×10^{-1}
null	148	2813	null	7.400×10^{-3}	1.407×10^{-1}
null	119	2298	null	5.950×10^{-3}	1.149×10^{-1}
null	105	2025	null	5.250×10^{-3}	1.013×10^{-1}
589	125	2339	2.945×10^{-2}	6.250×10^{-3}	1.170×10^{-1}
null	75	1498	null	1.875×10^{-3}	3.745×10^{-2}
null	70	1322	null	1.750×10^{-3}	3.305×10^{-2}
null	93	1787	null	2.325×10^{-3}	4.468×10^{-2}
null	66	1303	null	1.650×10^{-3}	3.258×10^{-2}
517	96	1821	8.617×10^{-3}	2.400×10^{-3}	4.553×10^{-2}
284	23	430	4.733×10^{-3}	1.150×10^{-3}	2.150×10^{-2}
null	32	642	null	1.600×10^{-3}	3.210×10^{-2}
null	17	355	null	8.500×10^{-4}	1.775×10^{-2}
null	5	93	null	2.500×10^{-4}	4.650×10^{-3}
null	11	194	null	5.500×10^{-4}	9.700×10^{-3}
null	20	389	null	1.000×10^{-3}	1.945×10^{-2}
225	15	300	3.750×10^{-3}	7.500×10^{-4}	1.500×10^{-2}
100	10	180	1.667×10^{-3}	5.000×10^{-4}	9.000×10^{-3}
null	7	132	null	3.500×10^{-4}	6.600×10^{-3}
null	8	175	null	4.000×10^{-4}	8.750×10^{-3}
null	9	172	null	4.500×10^{-4}	8.600×10^{-3}
101	6	93	1.683×10^{-3}	3.000×10^{-4}	4.650×10^{-3}

表 16: 減速材厚 100mm

BS 計測値 (nC /20sec)	電離箱 測定値 (10nC/20sec)	レム 測定値 (counts/20sec)	BS 電流値 nA	電離箱 電流値 10pA	レム 電流値 kcps
null	8	32	null	4.000×10^{-4}	1.600×10^{-3}
null	7	32	null	3.500×10^{-4}	1.600×10^{-3}
null	6	22	null	3.000×10^{-4}	1.100×10^{-3}
null	7	35	null	3.500×10^{-4}	1.750×10^{-3}
null	8	35	null	4.000×10^{-4}	1.750×10^{-3}
236	22	110	3.933×10^{-3}	1.100×10^{-3}	5.500×10^{-3}
null	26	124	null	1.300×10^{-3}	6.200×10^{-3}
null	23	97	null	1.150×10^{-3}	4.850×10^{-3}
null	21	116	null	1.050×10^{-3}	5.800×10^{-3}
344	21	105	5.733×10^{-3}	1.050×10^{-3}	5.250×10^{-3}
null	64	308	null	3.200×10^{-3}	1.540×10^{-2}
null	43	200	null	2.150×10^{-3}	1.000×10^{-2}
null	46	234	null	2.300×10^{-3}	1.170×10^{-2}
583	48	259	9.717×10^{-3}	2.400×10^{-3}	1.295×10^{-2}
1335	81	380	2.225×10^{-2}	4.050×10^{-3}	1.900×10^{-2}
null	87	414	null	4.350×10^{-3}	2.070×10^{-2}
null	86	447	null	4.300×10^{-3}	2.235×10^{-2}
null	87	437	null	4.350×10^{-3}	2.185×10^{-2}
1225	90	440	2.042×10^{-2}	4.500×10^{-3}	2.200×10^{-2}
2893	221	1050	4.822×10^{-2}	1.105×10^{-2}	5.250×10^{-2}
null	180	876	null	9.000×10^{-3}	4.380×10^{-2}
null	194	920	null	9.700×10^{-3}	4.600×10^{-2}
null	215	1031	null	1.075×10^{-2}	5.155×10^{-2}
2833	167	792	4.722×10^{-2}	8.350×10^{-3}	3.960×10^{-2}
1535	275	1352	7.675×10^{-2}	1.375×10^{-2}	6.760×10^{-2}
null	171	798	null	8.550×10^{-3}	3.990×10^{-2}
null	262	1224	null	1.310×10^{-2}	6.120×10^{-2}
null	234	1135	null	1.170×10^{-2}	5.675×10^{-2}
1173	224	1107	5.865×10^{-2}	1.120×10^{-2}	5.535×10^{-2}

2331	460	2202	1.166×10^{-1}	2.300×10^{-2}	1.101×10^{-1}
null	512	2485	null	2.560×10^{-2}	1.243×10^{-1}
null	491	2394	null	2.455×10^{-2}	1.197×10^{-1}
null	400	1910	null	2.000×10^{-2}	9.550×10^{-2}
2081	446	2142	1.041×10^{-1}	2.230×10^{-2}	1.071×10^{-1}
3563	674	3178	1.782×10^{-1}	3.370×10^{-2}	1.589×10^{-1}
null	670	3144	null	3.350×10^{-2}	1.572×10^{-1}
null	691	3324	null	3.455×10^{-2}	1.662×10^{-1}
null	701	3327	null	3.505×10^{-2}	1.664×10^{-1}
4587	606	2741	2.294×10^{-1}	3.030×10^{-2}	1.371×10^{-1}
10876	2270	10937	5.438×10^{-1}	1.135×10^{-1}	5.469×10^{-1}
null	1898	9144	null	9.490×10^{-2}	4.572×10^{-1}
null	2096	9912	null	1.048×10^{-1}	4.956×10^{-1}
null	1994	9626	null	9.970×10^{-2}	4.813×10^{-1}
8956	1972	9454	4.478×10^{-1}	9.860×10^{-2}	4.727×10^{-1}
14812	2901	12931	7.406×10^{-1}	1.451×10^{-1}	6.466×10^{-1}
null	3157	13947	null	1.579×10^{-1}	6.974×10^{-1}
null	3303	14379	null	1.652×10^{-1}	7.190×10^{-1}
null	3554	15364	null	1.777×10^{-1}	7.682×10^{-1}
16389	3081	13377	8.195×10^{-1}	1.541×10^{-1}	6.689×10^{-1}

表 17: 減速材厚 200mm

BS 計測値 (nC /20sec)	電離箱 測定値 (10nC/20sec)	レム 測定値 (counts/20sec)	BS 電流値 nA	電離箱 電流値 10pA	レム 電流値 kcps
15086	2374	8277	7.543×10^{-1}	1.187×10^{-1}	4.139×10^{-1}
null	2692	9298	null	1.346×10^{-1}	4.649×10^{-1}
null	2693	9442	null	1.347×10^{-1}	4.721×10^{-1}
null	2505	8584	null	1.253×10^{-1}	4.292×10^{-1}
12388	2741	9667	6.194×10^{-1}	1.371×10^{-1}	4.834×10^{-1}
10657	1814	6697	5.329×10^{-1}	9.070×10^{-2}	3.349×10^{-1}
null	1979	7220	null	9.895×10^{-2}	3.610×10^{-1}
null	1927	7096	null	9.635×10^{-2}	3.548×10^{-1}
null	1966	7222	null	9.830×10^{-2}	3.611×10^{-1}
11704	1945	7030	5.852×10^{-1}	9.725×10^{-2}	3.515×10^{-1}
3520	628	2251	1.760×10^{-1}	3.140×10^{-2}	1.126×10^{-1}
null	466	1718	null	2.330×10^{-2}	8.590×10^{-2}
null	713	2578	null	3.565×10^{-2}	1.289×10^{-1}
null	567	2061	null	2.835×10^{-2}	1.031×10^{-1}
2729	585	2061	1.365×10^{-1}	2.925×10^{-2}	1.031×10^{-1}
2196	339	1216	1.098×10^{-1}	1.695×10^{-2}	6.080×10^{-2}
null	302	1110	null	1.510×10^{-2}	5.550×10^{-2}
null	348	1298	null	1.740×10^{-2}	6.490×10^{-2}
null	423	1556	null	2.115×10^{-2}	7.780×10^{-2}
2090	395	1448	1.045×10^{-1}	1.975×10^{-2}	7.240×10^{-2}
684	133	463	3.420×10^{-2}	6.650×10^{-3}	2.315×10^{-2}
null	134	496	null	6.700×10^{-3}	2.480×10^{-2}
null	138	550	null	6.900×10^{-3}	2.750×10^{-2}
null	141	499	null	7.050×10^{-3}	2.495×10^{-2}
595	145	556	2.975×10^{-2}	7.250×10^{-3}	2.780×10^{-2}

1041	34	143	1.735×10^{-2}	1.700×10^{-3}	7.150×10^{-3}
null	46	173	null	2.300×10^{-3}	8.650×10^{-3}
null	52	196	null	2.600×10^{-3}	9.800×10^{-3}
null	51	181	null	2.550×10^{-3}	9.050×10^{-3}
948	45	178	1.580×10^{-2}	2.250×10^{-3}	8.900×10^{-3}
411	37	137	6.850×10^{-3}	1.850×10^{-3}	6.850×10^{-3}
null	13	51	null	6.500×10^{-4}	2.550×10^{-3}
null	32	134	null	1.600×10^{-3}	6.700×10^{-3}
null	31	110	null	1.550×10^{-3}	5.500×10^{-3}
352	25	90	5.867×10^{-3}	1.250×10^{-3}	4.500×10^{-3}
193	18	80	3.217×10^{-3}	9.000×10^{-4}	4.000×10^{-3}
null	13	48	null	6.500×10^{-4}	2.400×10^{-3}
null	14	56	null	7.000×10^{-4}	2.800×10^{-3}
null	12	42	null	6.000×10^{-4}	2.100×10^{-3}
null	7	22	null	3.500×10^{-4}	1.100×10^{-3}
147	12	38	2.450×10^{-3}	6.000×10^{-4}	1.900×10^{-3}
null	7	33	null	3.500×10^{-4}	1.650×10^{-3}
null	5	18	null	2.500×10^{-4}	9.000×10^{-4}
null	3	18	null	1.500×10^{-4}	9.000×10^{-4}
null	4	23	null	2.000×10^{-4}	1.150×10^{-3}

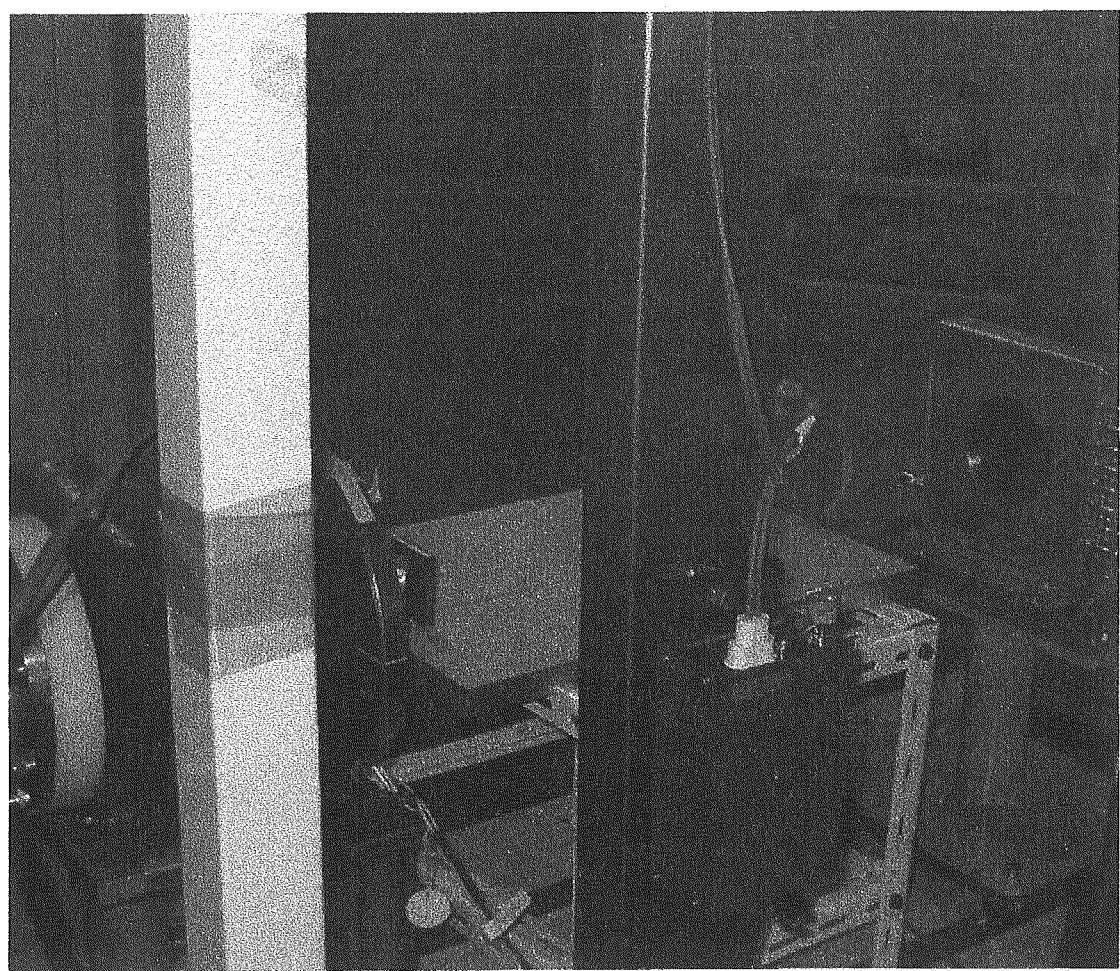


図 100: 若狭湾エネルギー研究センター多目的加速器システムの照射室 4 ビームライン全景

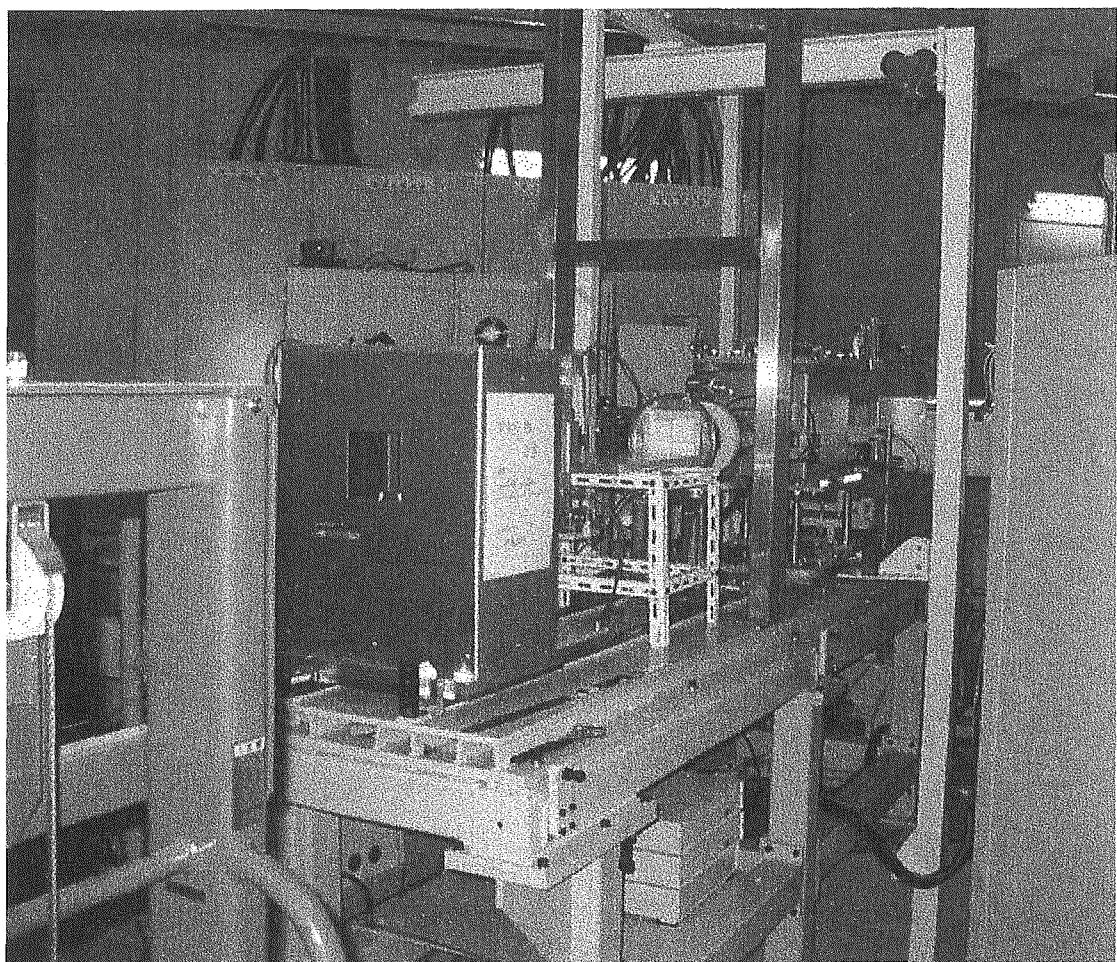


図 101: 若狭湾エネルギー研究センター多目的加速器システムの照射室 4 ビームライン全景を下流から見た所

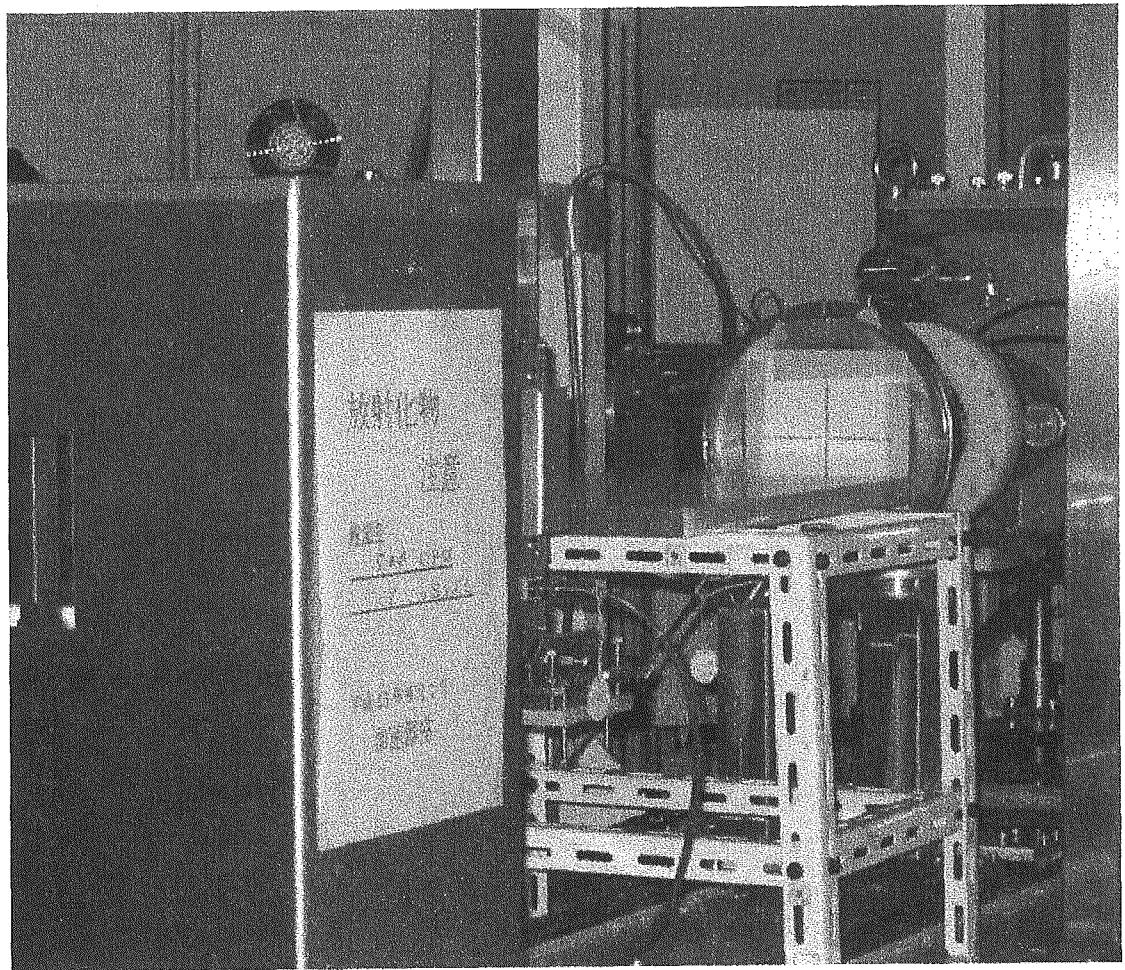


図 102: 若狭湾エネルギー研究センター多目的加速器システムの照射室 4 ビームライン全景を下流
から見た所 2

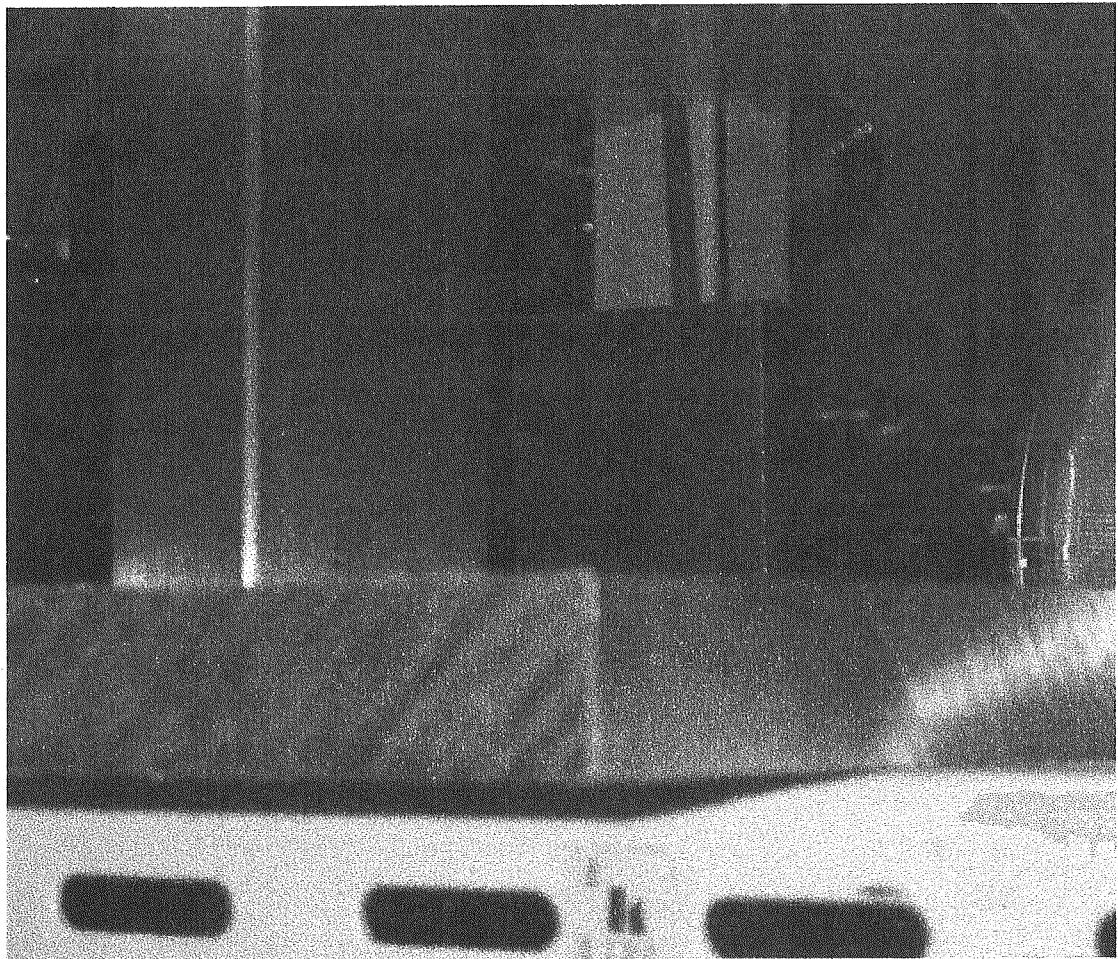


図 103: 中性子発生用の鉄ターゲット

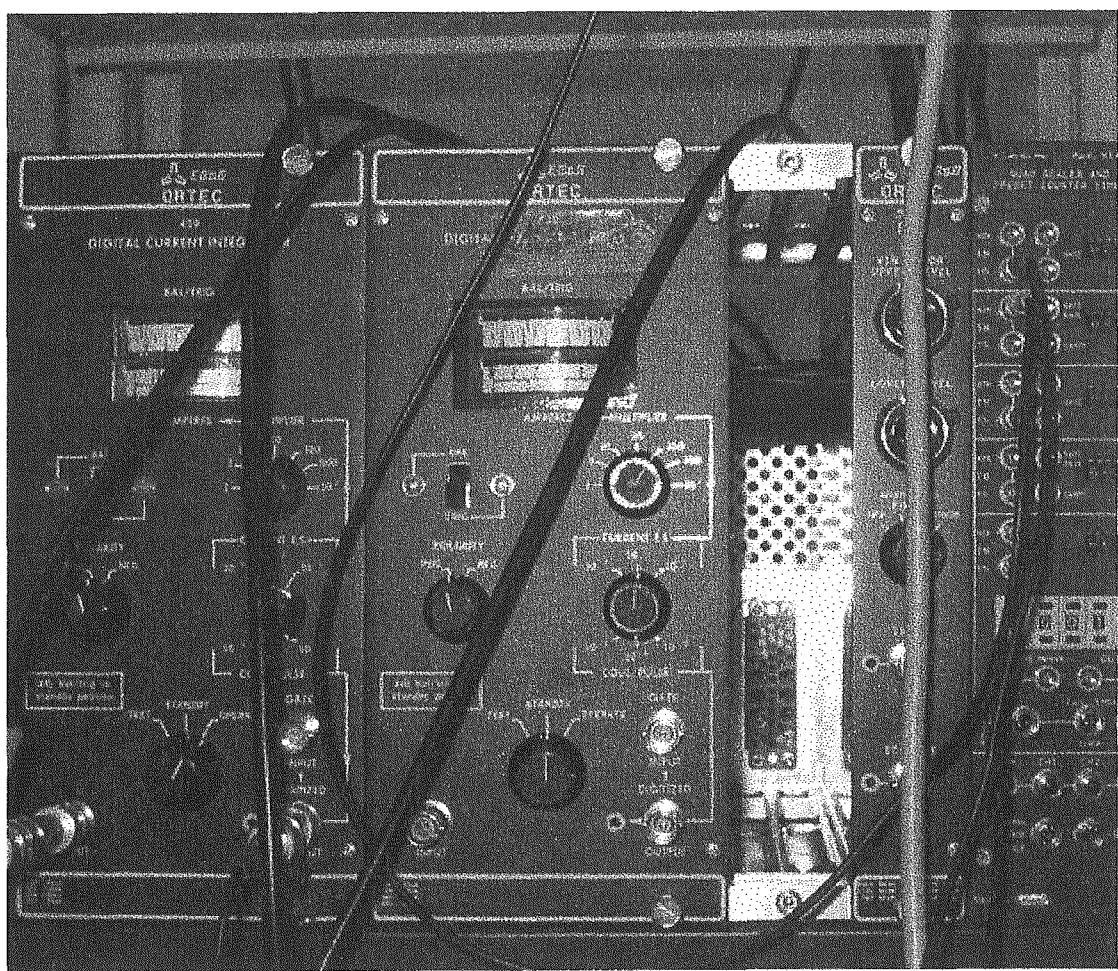


図 104: ビーム実験実施時の測定回路

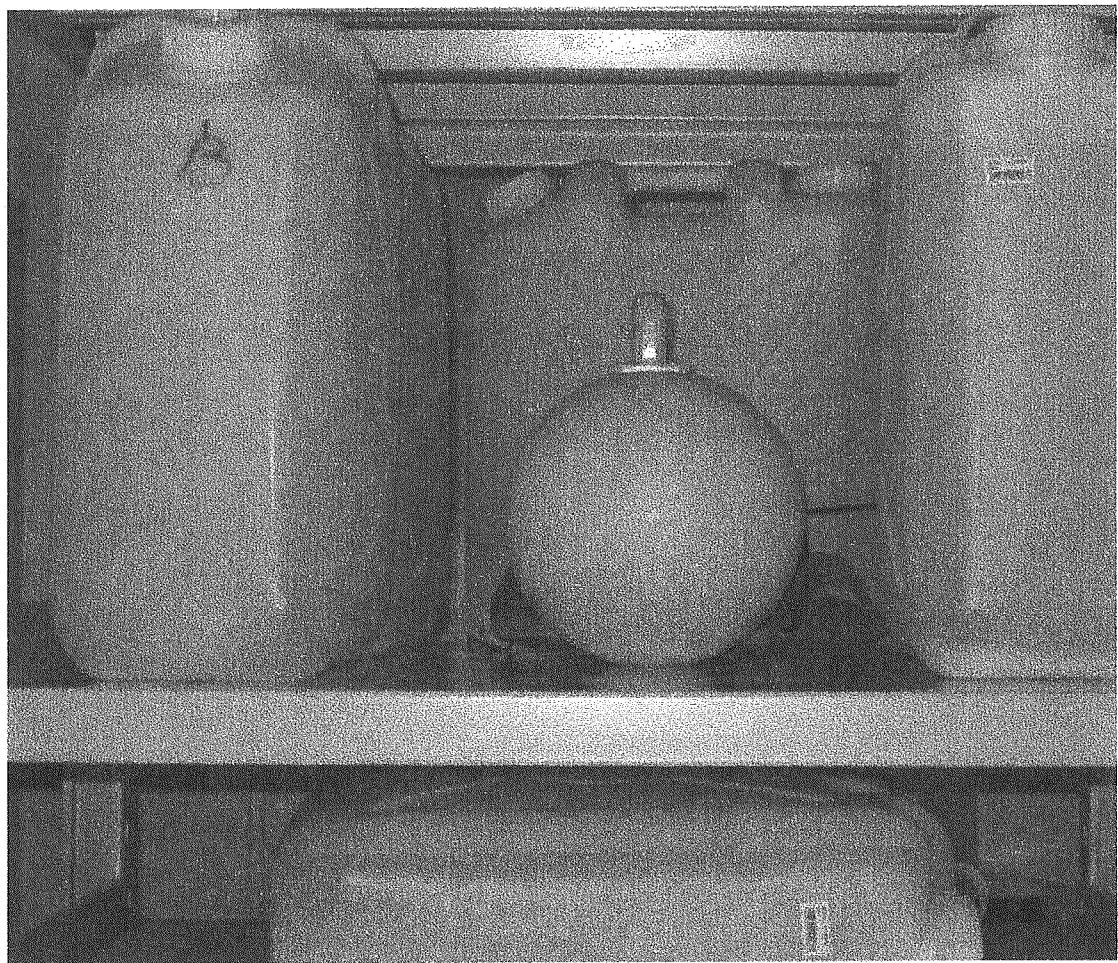


図 105: 測定に使用したレムカウンタ NSN10014

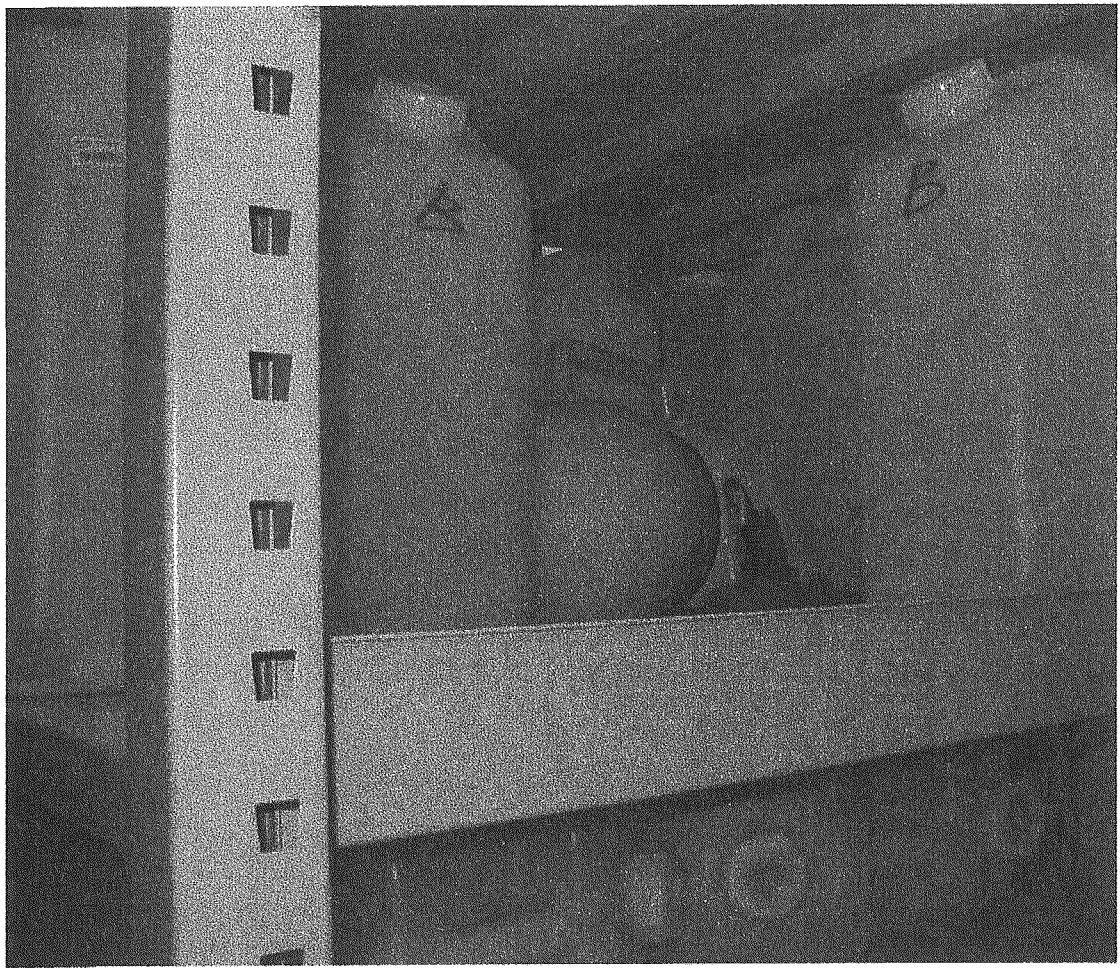


図 106: 減速材中に設置したレムカウンタ

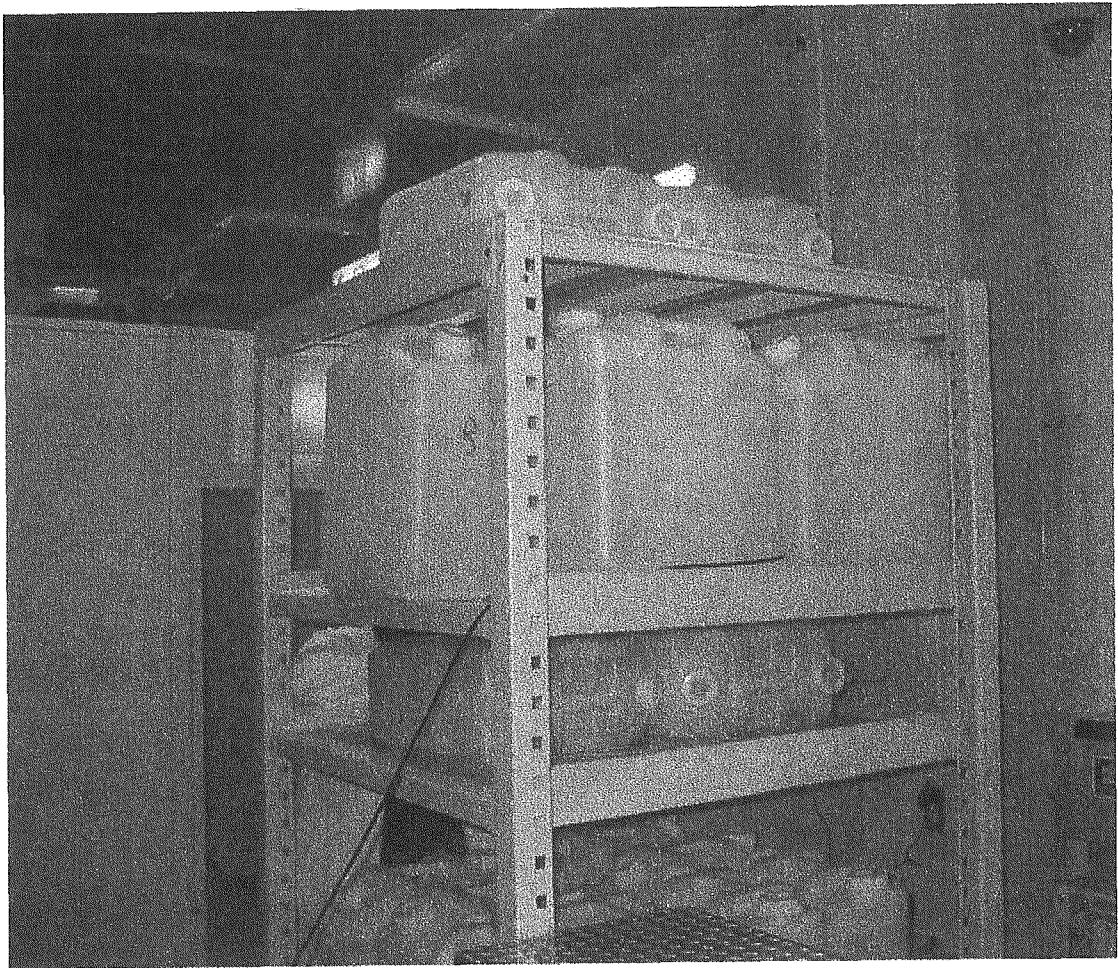


図 107: レムカウンタのビーム上流側も減速材にて遮蔽したところ

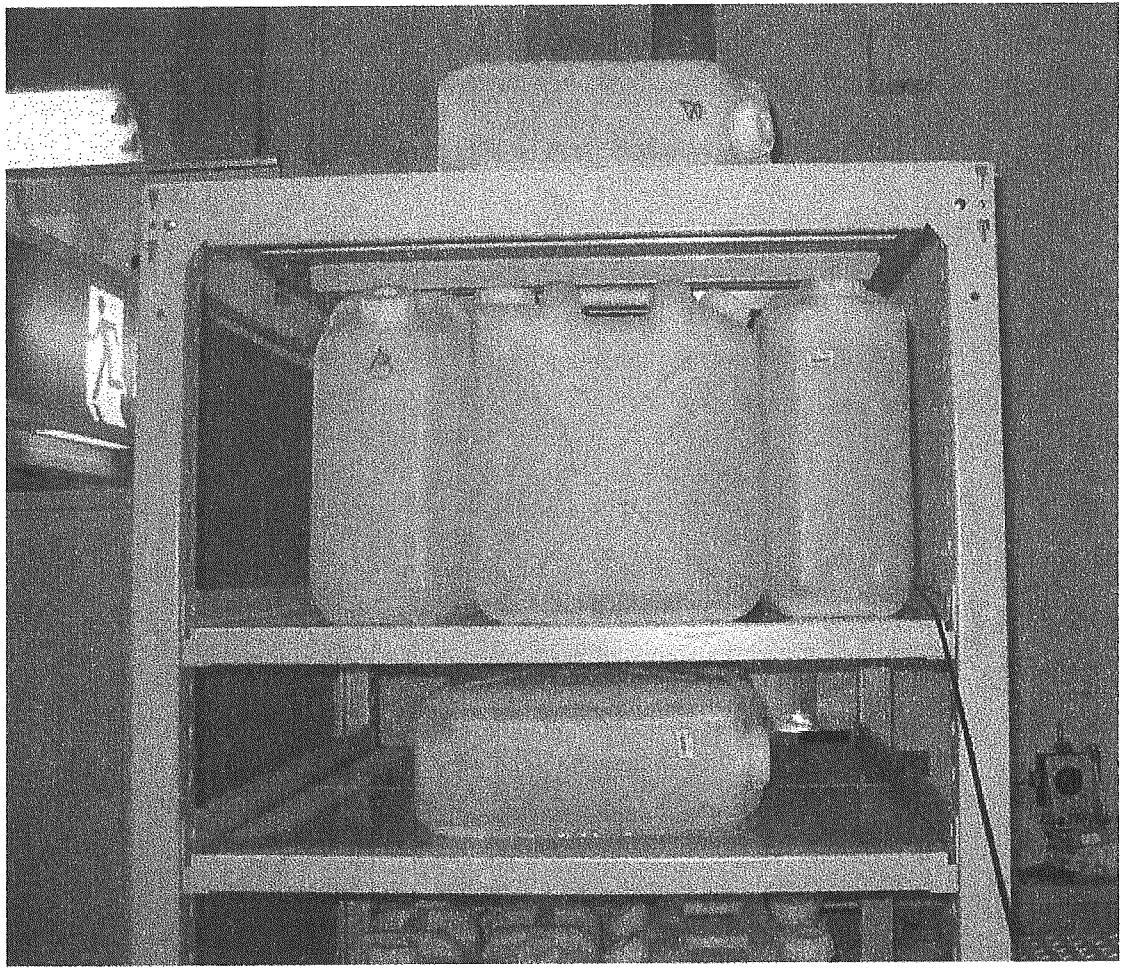


図 108: レムカウンタのビーム上流側も減速材にて遮蔽したところ

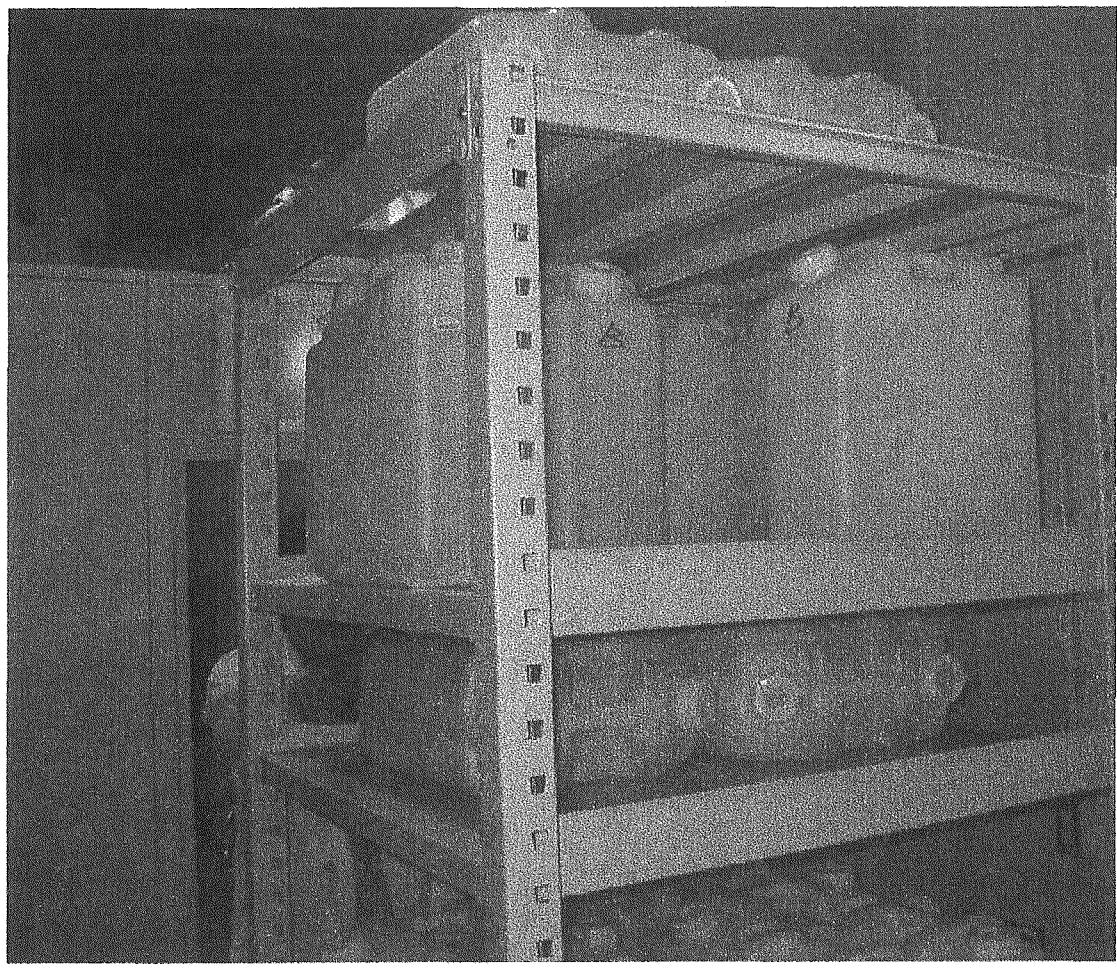


図 109: レムカウンタのビーム上流側も減速材にて遮蔽したところ

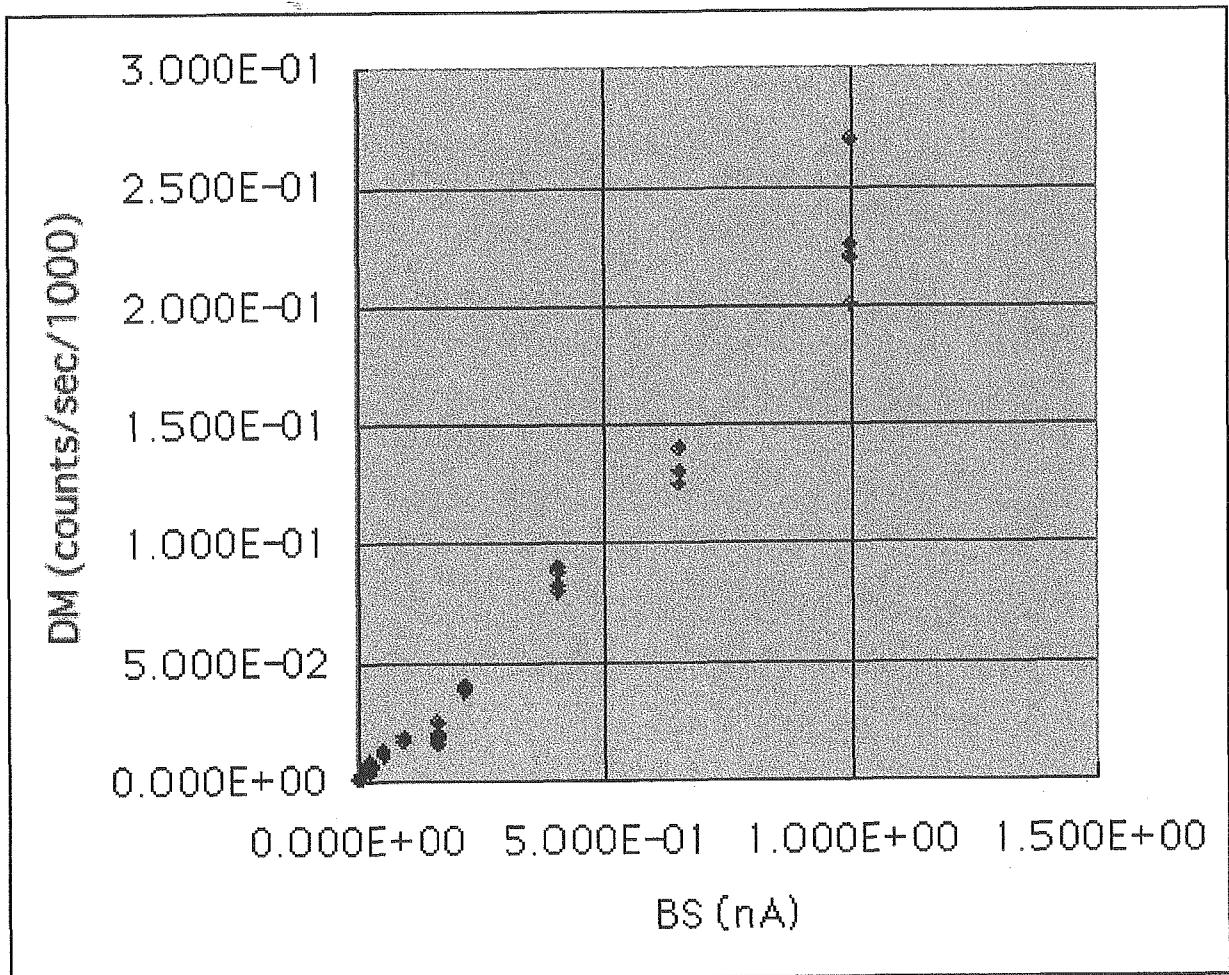


図 110: BS 電流値と電離箱測定値の相関

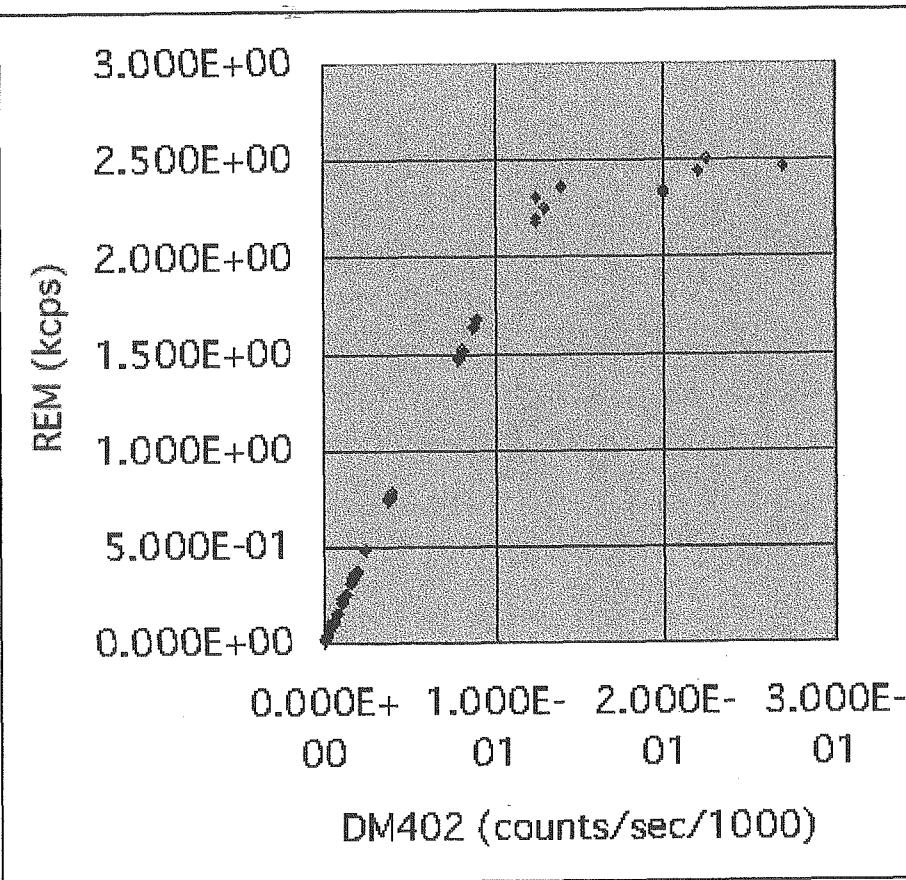


図 111: 電離箱測定率とレムカウンター測定率の相関（減速材厚 0cm）

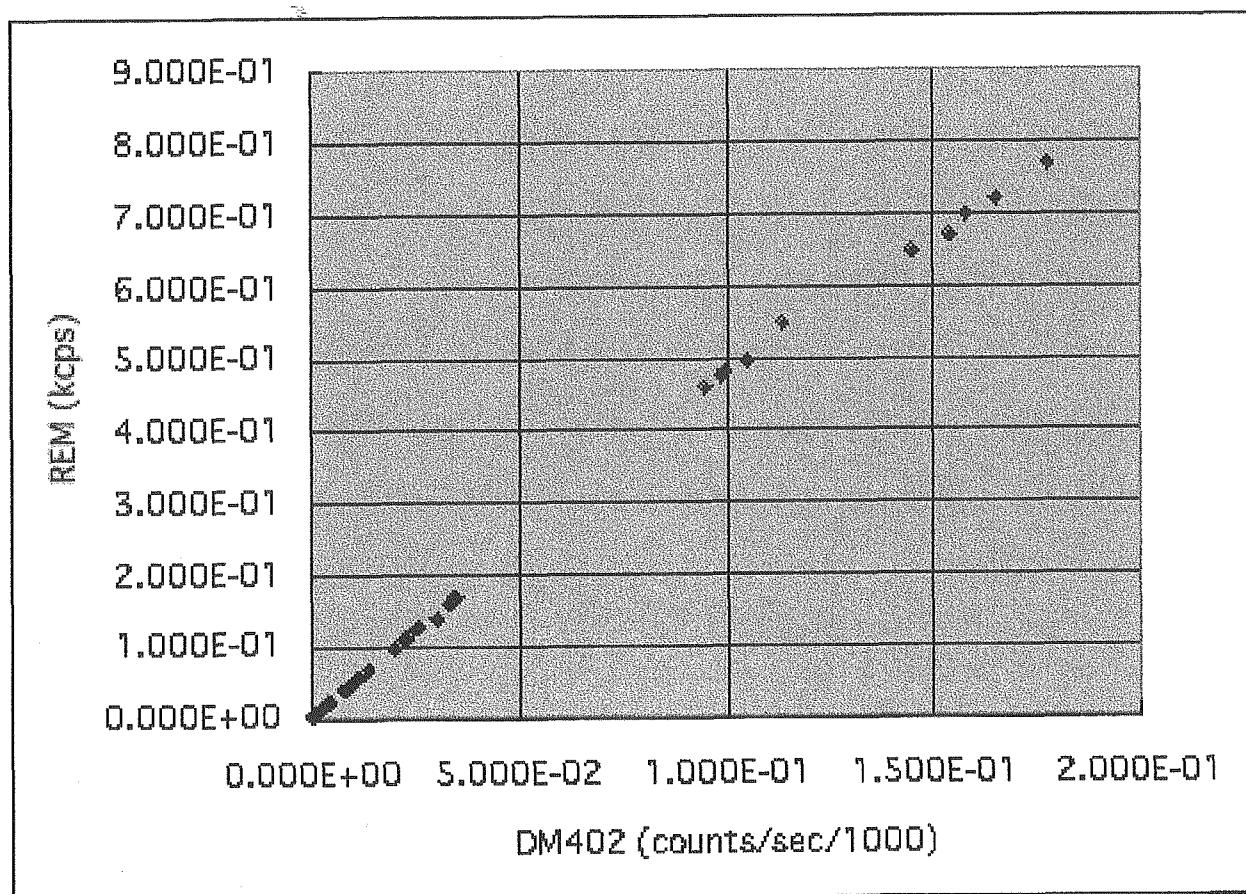


図 112: 電離箱測定率とレムカウンター測定率の相関（減速材厚 10cm）

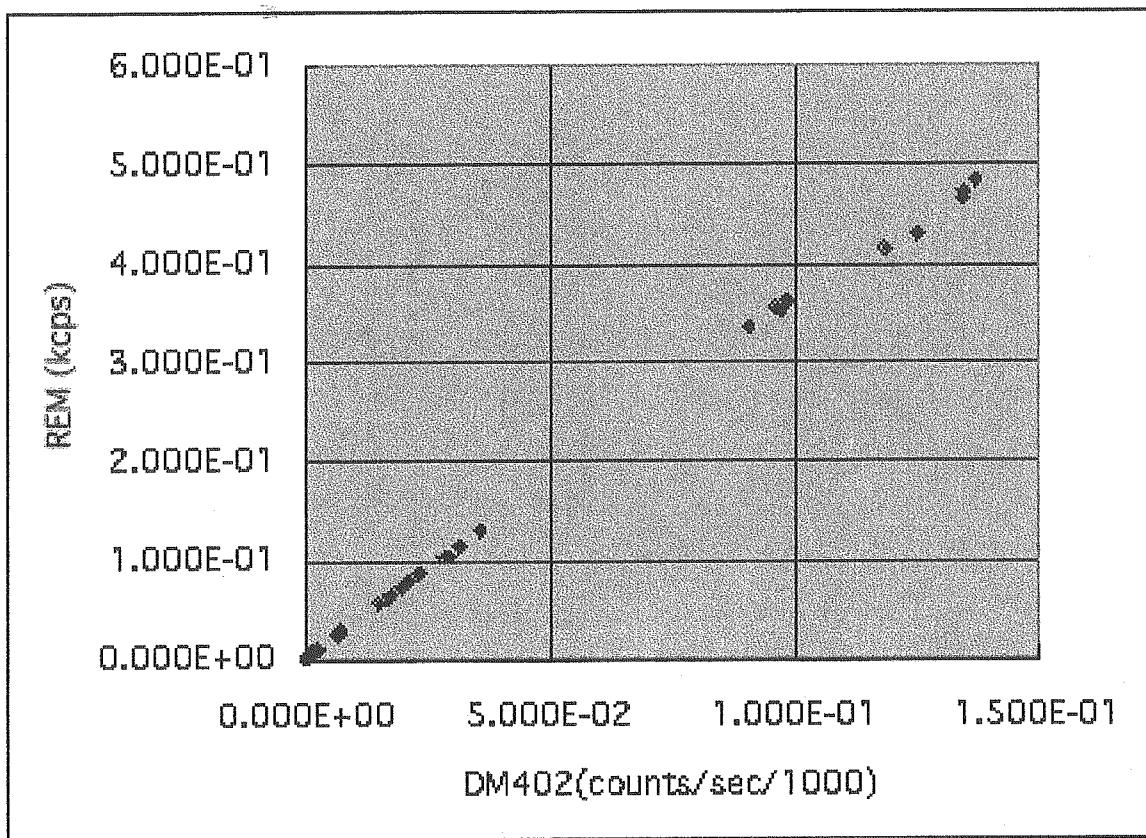


図 113: 電離箱測定率とレムカウンター測定率の相関（減速材厚 20cm）

5.2.2 シミュレーションによる感度検証

次に、同条件のセットアップについて、シミュレーションコード MCNPX-2.4.0 を使用し、陽子ビーム起源の核破碎中性子に対するレムカウンタの検出効率を計算によって導出した。この計算結果と上記の実験結果を併せることにより、平成 14 年度に実施した実験時の陽子ビームに対する検出効率を求めることができる。

プログラムリスト 3 に、今回の実験用セットアップの MCNPX からの出力ファイルを示した。なおこの出力中に、MCNPX への入力も紹介している。

発生する最初の粒子として、鉄ターゲットへ入射する陽子を 10^7 回発生させ、tally として、検出器における中性子、陽子、光子のエネルギーデポジット (F6 tally)、検出器における中性子の全反応断面積を考慮した反応イベント数 (E4 tally) を計算し、これもプログラムリスト 2 に述べた。

検出器の全体積は、球の半径が 2.94cm なので体積は 64.7cm^3 である。E4 tally 出力の結果、1 陽子の鉄への入射毎に、 1.02×10^{-8} 回/ cm^3 の中性子の反応が検出器中で発生することがわかるので、鉄ターゲットへ入射する陽子 100pA あたり、 $4.0 \times 10^2 \text{ cps}$ の反応が検出器に生じていることとなり、今回の実験で計測して 5.2.1 節で述べた、 80cps 0.02nA と一致する。よって、このシミュレーション計算は、概ね正しいものと言える。

平成 14 年度に実験を実施した、液体シンチレータの速中性子測定実験データの評価として、MC-NPX にこの検出器形状を入力し、陽子ビーム-核破碎反応起源の中性子に対するシミュレーション計算を実施したが、 10^7 の陽子発生回数に対し、検出器中で発生するはずの中性子反応事象は発生せず、シミュレーションの陽子発生回数が大幅に不足していることが示唆される。結局、1 陽子の鉄への入射毎に 10^{-8} 回/ cm^3 以下しか中性子の反応が検出器中で発生しない。

そこで、平成 14 年度のデータにより、検出効率の定量化を試みた。上記の議論により、1 陽子あたり、検出器近傍では 1.02×10^{-8} 回/ cm^3 の中性子線束が存在する。検出器の体積 (920cm^3)、陽子電流値 (0.02nA) を考慮すると、検出器で発生するはずの中性子起源のイベントの最大値は単位時間あたり 1.38×10^3 回である。これにたいし、平成 14 年度のデータ [14] では、1800 秒あたり 1.7×10^4 回のイベントが記録されており、これは単位時間あたり 9.6 回のイベント数であることになる。よって、検出効率は 6.9×10^{-3} となる。

プログラムリスト3 ビーム試験用セットアップのMCNPXからの出力ファイル

```

1-      MCNPX test problem i:
2-      c -----
3-      c Cells
4-      c -----
5-      11 12 -7.96 11 -10 13 -12 20 -14
6-      26 13 -8.79e-4 -32
7-      27 12 -7.96 32 -41
8-      28 16 -1.00 41 -42
9-      29 15 -2.00 42 -43
10-     30 16 -1.00 43 -44
11-     31 14 -1.00 34 -33 36 -35 38 -37
12-     32 0          -40 (#11 #26 #27 #28 #29 #30 #31)
13-     33 0          40
14-
15-      c -----
16-      c Surfaces
17-      c -----
18-      10 px 5.0
19-      11 px -5.0
20-      12 py 5.0
21-      13 py -5.0
22-      14 pz 5.0
23-      20 pz 0.0
24-      32 s 110. 0. 190. 2.49
25-      33 i px -10.
26-      34 i px 10.
27-      35 i py -5.1
28-      36 i py 5.1
29-      37 i px -7.5
30-      38 i px 2.5
31-      40 so 250.0
32-      41 s 110. 0. 190. 2.54
33-      42 s 110. 0. 190. 6.54
34-      43 s 110. 0. 190. 6.654
35-      44 s 110. 0. 190. 12.654
36-
37-      tri 100 0 173 .864 .0 -.5 .0 1. .0 .5 .0 .864 i
38-
39-      c -----
40-      c Materials
41-      c -----
42-      m12 26000 1.000 $ iron target
43-      m14 1001 2 8016 1 5010 1.5e-3 5011 3e-2 $ water shield
44-      mt14 lwtr.01t $ water shield
45-      m13 2003.42c 1.000 $ He3 counter
46-      m15 5010 0.1 5011 3.9 6000 1 $ B4C moderator
47-      m16 1001 2 8016 1 $ polyethene
48-      mt16 poly.01t $ poly
49-
50-      c -----
51-      c Source
52-      c -----
53-      sdef sur = 20 erg = 80 par = 9 dir = 1 pos = 0 0 0 rad = d1
54-      si1 0.5
55-
56-      c Options
57-      c -----
58-      impin i i i i i i i i 0
59-      impin i i i i i i i i 0
60-      impip i i i i i i i i 0
61-      impia i i i i i i i i 0
62-      impit i i i i i i i i 0
63-
64-      phys:n 260
65-      phys:p 260 3j -i
66-      phys:p
67-      phys:a 4j -i
68-      phys:t 4j -i
69-      phys:d 4j -i
70-      mode n h p a t d
71-
72-      warning. photonuclear physics may be needed (phys:p).
73-      lca 2 i
74-      lea 2j 0
75-      cut:h j 0
76-      warning. proton ecf will be raised to scut_min( 9).
77-      cut:a j 0
78-      warning. alpha ecf will be raised to scut_min(34).
79-      cut:t j 0
80-      warning. triton ecf will be raised to scut_min(32).
81-      cut:d j 0
82-      warning. deuteron ecf will be raised to scut_min(31).
83-
84-      c -----
85-      c Tallies
86-      c -----
87-      F6:n 26
88-      F16:h 26
89-      F26:p 26
90-      c F46:a 26
91-      c F56:t 26
92-      c F66:d 26
93-      F4:n 26

```

```

88-      FM4 -1 13 1
89-      F14:n 26
90-      FM14 -1 13 103
91-      F24:n 26
92-      FM24 -1 13 104
93-      FS4:p 26
94-      c F44:h 26
95-      E0 2.5e-8 ie-7 ie-6 ie-5 ie-4 ie-3 ie-2 ie-1 0.5
96-      1.8I 10 3I 20 5I 50 4I 100 T
97-      E4 2.5e-8 ie-7 ie-8 ie-5 ie-4 ie-3 ie-2 ie-1 1 10. 50. 80. T
98-      E14 2.5e-8 ie-7 ie-6 ie-5 ie-4 ie-3 ie-2 ie-1 1 10. 50. 80. T
99-      E24 2.5e-8 ie-7 ie-6 ie-5 ie-4 ie-3 ie-2 ie-1 1 10. 50. 80. T
100-     E34 2.5e-8 ie-7 ie-6 ie-5 ie-4 ie-3 ie-2 ie-1 1 10. 50. 80. T
101-     c -----
102-     print
103-     nps 1000000
104-     prdmp 2j -1
105-     ssw 40 sym=2
106-     c histp

*** omitted ***

```

itally 4 nps = 1000000
tally type 4 track length estimate of particle flux.
particle(s): neutron

volumes
cell: 26
6.46676E+01

cell 26
multiplier bin: -1.00000E+00 13 1
energy
2.5000E-08 5.80999E-09 0.5845
1.0000E-07 3.63685E-09 0.6361
1.0000E-06 1.75678E-09 0.7386
1.0000E-05 3.83198E-10 1.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 1.29813E-10 0.9426
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 1.39934E-11 0.7952
1.0000E+00 5.42881E-12 0.7318
1.0000E+01 1.21207E-11 0.4358
5.0000E+01 9.74152E-12 0.3262
8.0000E+01 0.00000E+00 0.0000
total 1.17579E-08 0.3682

analysis of the results in the tally fluctuation chart bin (tfc) for tally 4 with nps = 10000000 print table 160

normed average tally per history = 1.17579E-08
estimated tally relative error = 0.3682
relative error from zero tallies = 0.1715

unnormed average tally per history = 7.60356E-07
estimated variance of the variance = 0.2425
relative error from nonzero scores = 0.3258

number of nonzero history tallies = 34
history number of largest tally = 5674016
(largest tally)/(average tally) = 2.31252E+06

efficiency for the nonzero tallies = 0.0000
largest unnormalized history tally = 1.75834E+00
(largest tally)/(avg nonzero tally)= 7.86256E+00

(confidence interval shift)/mean = 0.0857

shifted confidence interval center = 1.27651E-08

*** omitted ***

itally 6 nps = 10000000
tally type 6 track length estimate of heating. units mev/gram
particle(s): neutron

masses
cell: 26
5.68428E-02

cell 26
energy
2.5000E-08 5.02244E-06 0.5845
1.0000E-07 3.14368E-06 0.6361
1.0000E-06 1.51808E-06 0.7386
1.0000E-05 3.30518E-07 1.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 1.10538E-07 0.8430
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 1.04166E-08 0.8161
5.0000E-01 3.23812E-09 0.7358
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 4.81798E-09 0.8738
4.0000E+00 4.73268E-09 1.0000
5.0000E+00 5.40405E-09 1.0000
6.0000E+00 5.21220E-10 1.0000
7.0000E+00 5.76846E-09 1.0000
8.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
9.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+01 4.77604E-09 1.0000
1.2500E+01 6.25695E-09 1.0000

```

1.5000E+01 0.00000E+00 0.0000
1.7500E+01 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+01 0.00000E+00 0.0000
2.5000E+01 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+01 0.00000E+00 0.0000
3.5000E+01 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+01 0.00000E+00 0.0000
4.5000E+01 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+01 0.00000E+00 0.0000
6.0000E+01 0.00000E+00 0.0000
7.0000E+01 0.00000E+00 0.0000
8.0000E+01 0.00000E+00 0.0000
9.0000E+01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+02 0.00000E+00 0.0000
total 1.01712E-05 0.3679
ianalysis of the results in the tally fluctuation chart bin (tfc) for tally 6 with nps = 10000000 print table 160

normed average tally per history = 1.01712E-05 unnormed average tally per history = 5.78159E-07
estimated tally relative error = 0.3679 estimated variance of the variance = 0.2426
relative error from zero tallies = 0.2085 relative error from nonzero scores = 0.3031

number of nonzero history tallies = 23 efficiency for the nonzero tallies = 0.0000
history number of largest tally = 5674016 largest unnormalized history tally = 1.33607E+00
(largest tally)/(average tally) = 2.31090E+06 (largest tally)/(avg nonzero tally)= 5.31507E+00

(confidence interval shift)/mean = 0.0856 shifted confidence interval center = 1.10418E-05

*** omitted ***

itally 14 nps = 10000000
tally type 4 track length estimate of particle flux.
particle(s): neutron

volumes
cell: 26
6.46676E+01

cell 26
multiplier bin: -1.00000E+00 13 103
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+01 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+01 0.00000E+00 0.0000
8.0000E+01 0.00000E+00 0.0000
total 0.00000E+00 0.0000

there are no nonzero tallies in the tally fluctuation chart bin for tally 14
itally 24 nps = 10000000
tally type 4 track length estimate of particle flux.
particle(s): neutron

volumes
cell: 26
6.46676E+01

cell 26
multiplier bin: -1.00000E+00 13 104
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+01 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+01 0.00000E+00 0.0000
8.0000E+01 0.00000E+00 0.0000
total 0.00000E+00 0.0000

there are no nonzero tallies in the tally fluctuation chart bin for tally 24
itally 26 nps = 10000000
tally type 6 track length estimate of heating. units mev/gram
particle(s): photon

masses
cell: 26
5.68428E-02

```

```

cell 26
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 4.65755E-11 0.6067
5.0000E-01 1.29805E-09 0.2444
1.0000E+00 1.02224E-09 0.4323
2.0000E+00 1.37572E-09 0.4584
3.0000E+00 1.13726E-09 0.5917
4.0000E+00 8.25581E-10 0.7775
5.0000E+00 1.01907E-09 0.7714
6.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
7.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
8.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
9.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+01 0.00000E+00 0.0000
1.2500E+01 0.00000E+00 0.0000
1.5000E+01 0.00000E+00 0.0000
1.7500E+01 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+01 0.00000E+00 0.0000
2.5000E+01 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+01 0.00000E+00 0.0000
3.5000E+01 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+01 0.00000E+00 0.0000
4.5000E+01 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+01 0.00000E+00 0.0000
6.0000E+01 0.00000E+00 0.0000
7.0000E+01 0.00000E+00 0.0000
8.0000E+01 0.00000E+00 0.0000
9.0000E+01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+02 0.00000E+00 0.0000
total 6.72479E-09 0.2195

analysis of the results in the tally fluctuation chart bin (tfc) for tally 26 with nps = 10000000 print table 160

normed average tally per history = 6.72479E-09
estimated tally relative error = 0.2195
relative error from zero tallies = 0.1491
unnormed average tally per history = 3.82256E-10
estimated variance of the variance = 0.1168
relative error from nonzero scores = 0.1611

number of nonzero history tallies = 45
history number of largest tally = 8124579
(largest tally)/(average tally) = 1.08819E+06
efficiency for the nonzero tallies = 0.0000
largest unnormalized history tally = 4.15956E-04
(largest tally)/(avg nonzero tally)= 4.89583E+00

(confidence interval shift)/mean = 0.0342
shifted confidence interval center = 6.95491E-09

*** omitted ***

tally 34 nps = 10000000
tally type 4 track length estimate of particle flux. units 1/cm**2
particle(s): photon

volumes
cell: 26
6.46676E+01

cell 26
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 2.70346E-02 0.5380
1.0000E+00 1.72757E-07 0.1874
1.0000E+01 6.43970E-08 0.3000
6.0000E+01 0.00000E+00 0.0000
8.0000E+01 0.00000E+00 0.0000
total 2.64189E-07 0.1588

analysis of the results in the tally fluctuation chart bin (tfc) for tally 34 with nps = 10000000 print table 160

normed average tally per history = 2.64189E-07
estimated tally relative error = 0.1588
relative error from zero tallies = 0.1474
unnormed average tally per history = 1.70845E-05
estimated variance of the variance = 0.0466
relative error from nonzero scores = 0.0591

number of nonzero history tallies = 46
history number of largest tally = 6765778
(largest tally)/(average tally) = 6.42477E+05
efficiency for the nonzero tallies = 0.0000
largest unnormalized history tally = 1.09764E+01
(largest tally)/(avg nonzero tally)= 2.95539E+00

(confidence interval shift)/mean = 0.0153
shifted confidence interval center = 2.68218E-07

*** omitted ***

```

tally 16 nps = 10000000
 tally type 6 energy deposition
 particle(s): proton

masses	units mev/gram
cell: 26	5.68428E-02

cell 26

energy	
2.5000E-08	0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07	0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06	0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05	0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04	0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03	0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02	0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01	0.00000E+00 0.0000
5.0000E-01	0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00	0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00	0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00	0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00	0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00	0.00000E+00 0.0000
6.0000E+00	0.00000E+00 0.0000
7.0000E+00	0.00000E+00 0.0000
8.0000E+00	0.00000E+00 0.0000
9.0000E+00	0.00000E+00 0.0000
1.0000E+01	0.00000E+00 0.0000
1.2500E+01	0.00000E+00 0.0000
1.5000E+01	0.00000E+00 0.0000
1.7500E+01	0.00000E+00 0.0000
2.0000E+01	0.00000E+00 0.0000
2.5000E+01	0.00000E+00 0.0000
3.0000E+01	0.00000E+00 0.0000
3.5000E+01	0.00000E+00 0.0000
4.0000E+01	0.00000E+00 0.0000
4.5000E+01	0.00000E+00 0.0000
5.0000E+01	0.00000E+00 0.0000
6.0000E+01	0.00000E+00 0.0000
7.0000E+01	0.00000E+00 0.0000
8.0000E+01	0.00000E+00 0.0000
9.0000E+01	0.00000E+00 0.0000
1.0000E+02	0.00000E+00 0.0000
total	0.00000E+00 0.0000

there are no nonzero tallies in the tally fluctuation chart bin for tally 16

*** omitted ***

6 まとめ

速・熱中性子同時測定システムの開発において、本年度の知見として、以下の結論を得た。

1. 本項目については、今までの研究で BC523A を用いた中性子線の測定方法を確立した。特に γ 線と同時計測する事でバックグラウンドの少ない精度の良い測定を達成した。
2. より微小な線束を測定するために検出効率として不利になる γ 線の同時計測を行わず、また 検出器の大型化の可能性を検討した。
3. 検討はシミュレーションと実験の両面から行なった。
 - (a) シミュレーションのソフトウェアを Geant4 と MCNP の 2 種類用意した。そしてその 結果を比較した。Geant4 については熱外領域と熱領域の連続性の検証、MCNP について 中性子捕獲時の α 発生率のオーバーステイションの可能性がある。
 - (b) 実験では中性子線源、加速器ビームの二種類の中性子ソースを使用し、検出効率の測定 に主眼を置いた。
 - i. 中性子線源を使用する実験では、中性子線源強度は放射化の方法を用いて求めるこ とが出来た。検出器に対する検出効率の同定は、定量性を帯びた議論を開始できる 段階にある。検出器が大型化されたのでその特性の理解にはもう少し時間が必要で ある。特に、新たな測定手段法 (triple coincidence) の開発で、精度の良い評価が可 能となった。
 - ii. 加速器ビームを使用する実験では、レムカウンタを使用することで、検出器配置地 点付近の中性子線束が概ね明らかになり、昨年度実施した液体シンチレータを使用 した実験で得たデータの解析と一体となり、検出器の検出効率の理解が進んだ。
 - (c) 今後条件を詰めてシミュレーションとの実験との比較を進めたい。

第III部

プラスチックシンチレータを用いた中性子検出システムの開発

プラスチックシンチレータは取り扱いがしやすく、パルス計数ができ、中性子の計測が可能であり、組成が人体のそれと似ていることから、特に医療方面へのさらなる応用が期待できる。そこで、プラスチックシンチレータの中性子に対する応答特性を調べた。

プラスチックシンチレータを用いた中性子計測はこれまでに一般的に行われているが、今回は一般的なプラスチックシンチレータと併せて熱中性子の検出に有効な ^{10}B をドープした BC454 についても実験的に検討した。

^{10}B 入りプラスチックシンチレータ (Bicron 社製 BC-454) はその内部で $^{10}\text{B}(\text{n},\alpha)^7\text{Li}$ の反応を行うため、中性子のより効率の高い測定が期待される。

7 プラスチックシンチレータによる中性子の検出

シンチレータに入射する高速中性子はエネルギーがゼロから中性子のエネルギーに至るほぼ長方形分布をした反跳陽子を作る(図 114)。通常反跳陽子の飛程はシンチレータの寸法に比べて小さいので、その全エネルギーはシンチレータ内に付与される。したがって予想されるパルス波高分布もまたほぼ長方形に近くなる[26]。有機シンチレータは水素の含有量(炭素原子 1 個当たり水素原子 1.1 個、密度約 10^3 kg/m^3 1 g/cm^3)、水素の断面積(2.5MeV 中性子に対して 2.5b)が比較的大きいことおよび大形に製作でき使用できることが高い検出効率をもたらしている[27]。プラスチックシンチレータでの速中性子の反応の様子を図 115 に示した。

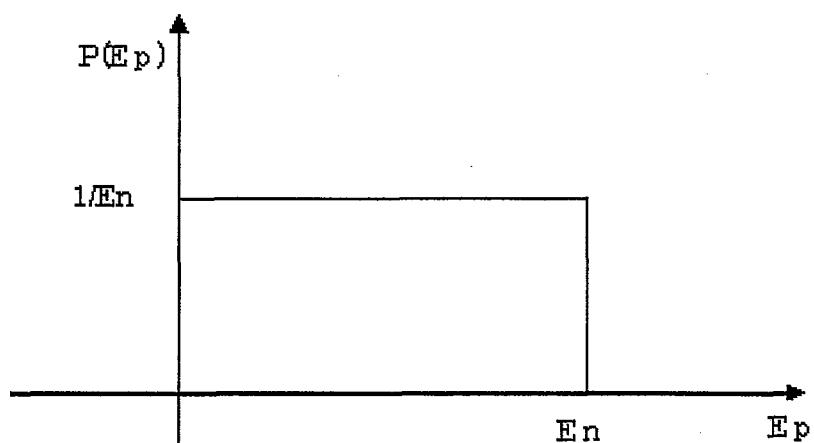
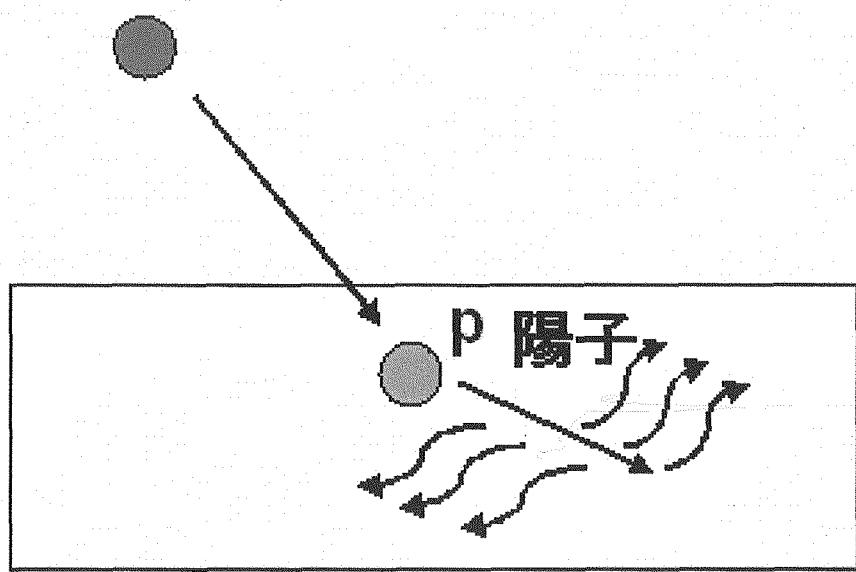


図 114: 単一エネルギーの中性子によって生成した反跳陽子のエネルギー分布

n 速中性子



シンチレーション光

図 115: プラスチックシンチレータでの速中性子の反応

8 検出器および実験装置

今回の実験装置の全体を示し、その主なものについて述べる。図 116 は中性子線源の写真、図 118 は計測装置の全体図、図 119 はエレクトロニクスの配置写真、図 120 は検出部の写真である。

8.1 中性子線源

数多くの便利な放射性核種の崩壊から、エネルギーの高い α 粒子が容易に利用できるので、 α 放射性同位元素 (α 放出体) と適当なターゲット物質を混合することによって、小型の中性子源を作ることが可能である。放射性崩壊によって放出される α 粒子が (α, n) 反応を起こしうるような物質が何種類がある。ベリリウムをターゲットとして選ぶと、最大の中性子収率が得られる [26]。Am-Be 線源では、Be 金属と Am の酸化物の均一な混合物を成型したもの、またはセラミックとしたものを、ステンレス鋼カプセルに二重に溶封してある [29]。今回は研究室にあった Am-Be 線源（図 116）を使用した。図 117 に Am-Be 線源のエネルギースペクトルで文献から調べたものを示す [29]。中性子スペクトルの最大エネルギーは 11.5 MeV でピークのエネルギーは 4~5 MeV になっている。Am-Be 線源では、 ^{241}Am 1 Ciあたり約 $2.5 \times 10^6 \text{n}/\text{s}$ である。 α -Be 線源から発生する中性子のスペクトルは、1 種類だけのエネルギーではなく、3~6 MeV の間に高いピークがあり主に速中性子が発生する [28]。

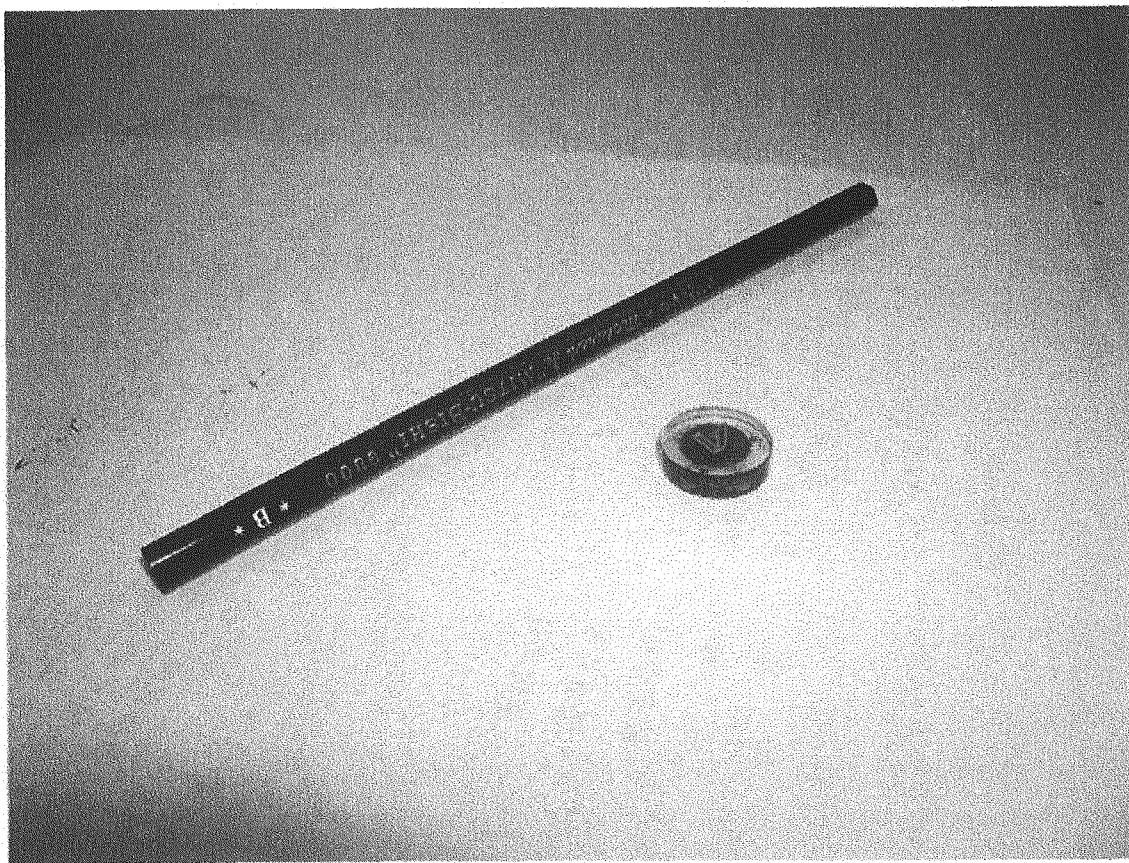


図 116: Am-Be 中性子線源

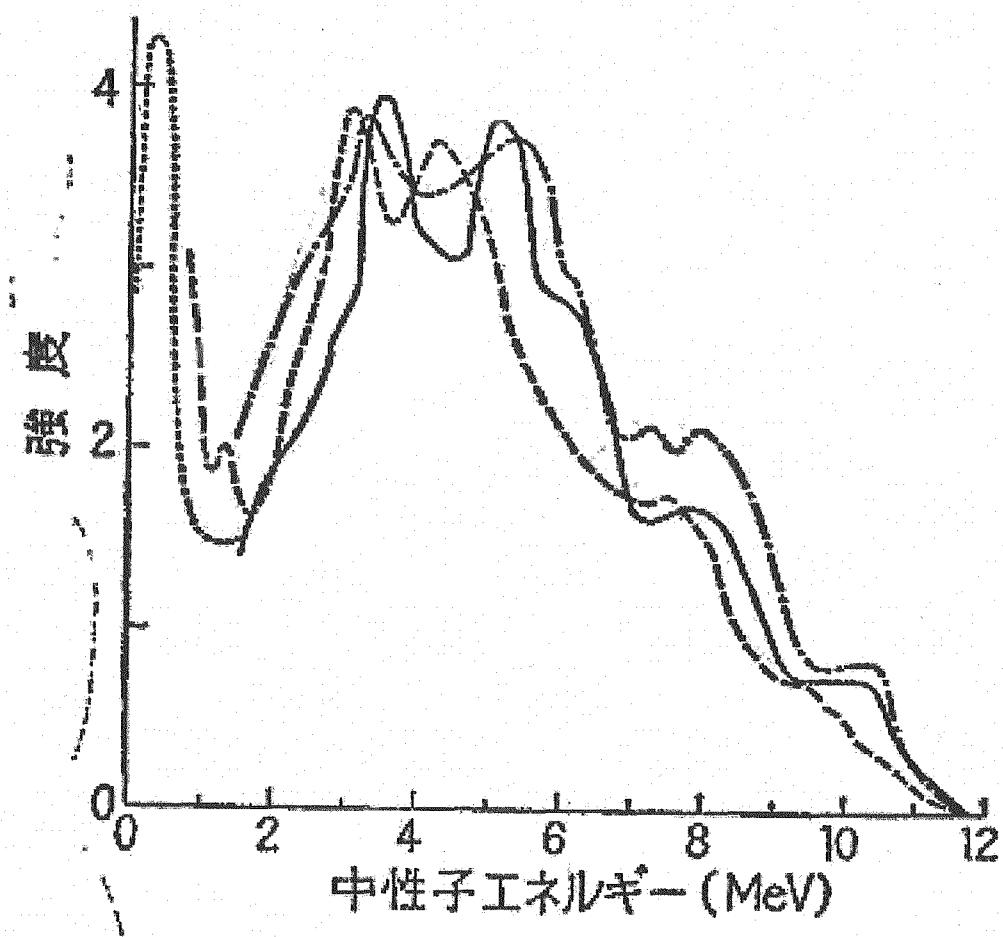


図 117: Am-Be 線源による中性子エネルギー

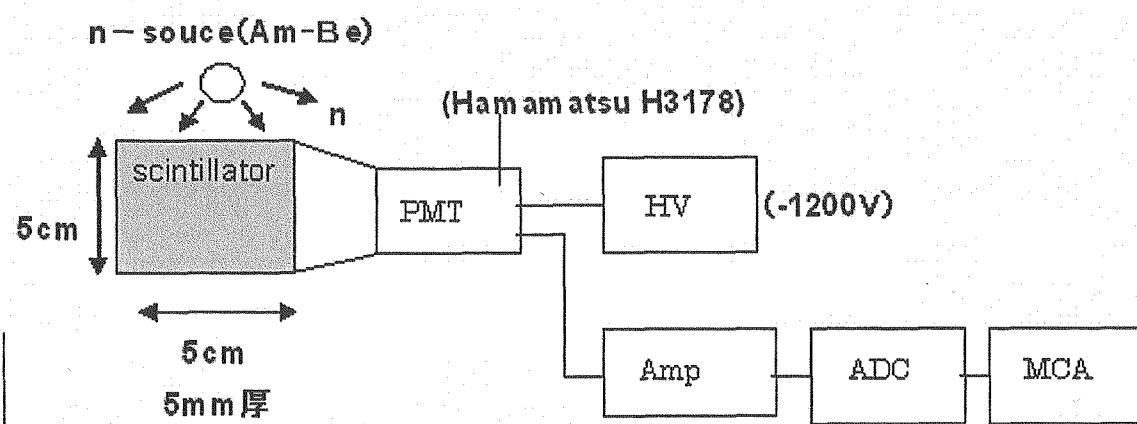


図 118: 実験装置の全体図

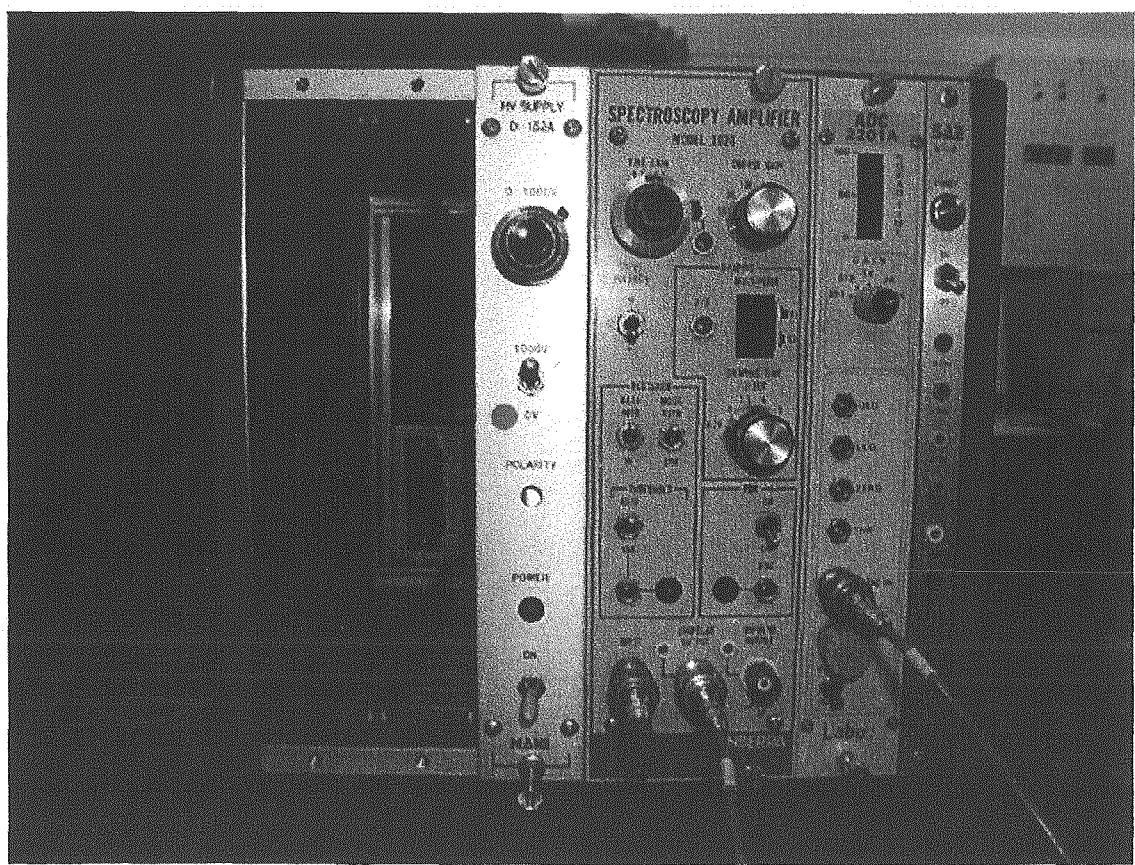


図 119: データ収集回路

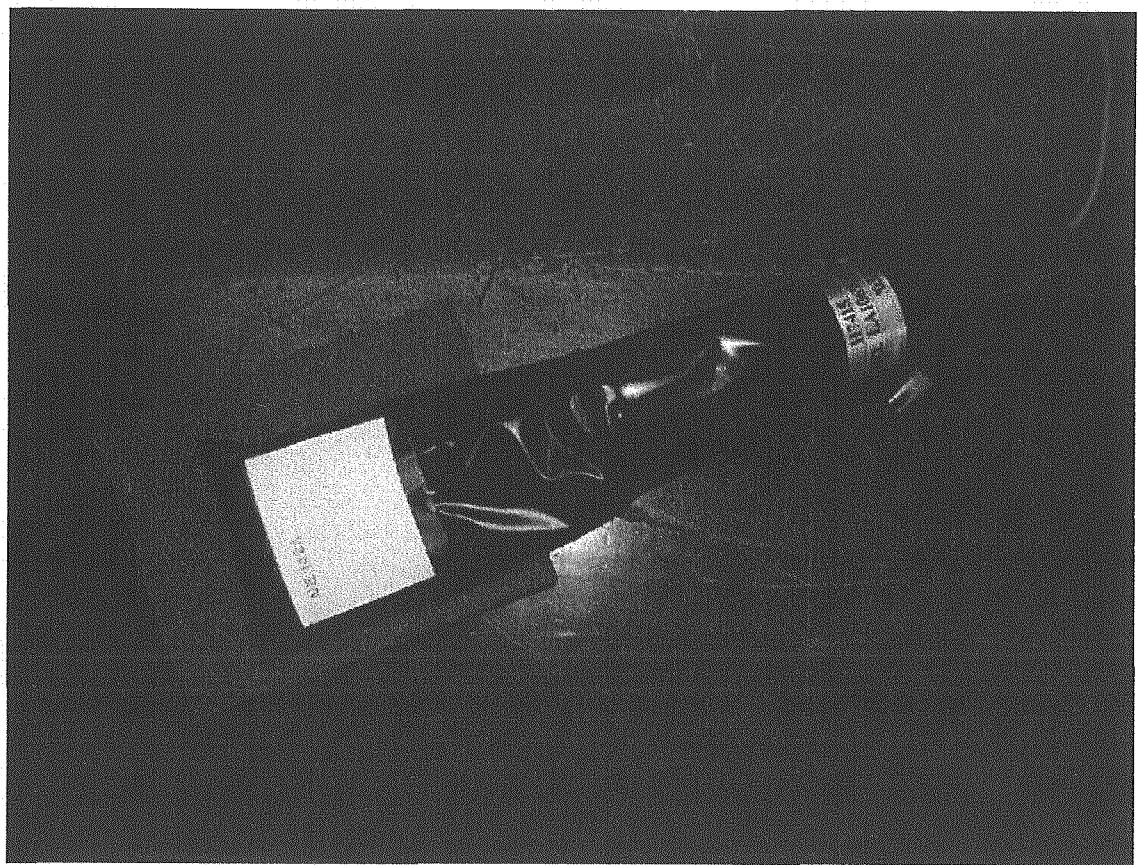


図 120: 検出器部分の写真

表 18: NE102A と BC454 の比較

項目	NE102A	BC454
密度	1.032	1.026
H/C	1.104	1.169
発光量	65%	48%
色	透明	透明
B 濃度	0%	5%

8.2 BC454 と NE102A

今回使用した一般的なプラスチックシンチレータの NE102A と B をドープした BC454 の性質の比較を表 18 に示した。発光量に若干の違いはあるが、密度やプラスチックの水素と炭素の割合や色はほぼ同じで、違いは BC454 にはボロンが重さで 5% 含まれていることである。その 5% のうち ^{10}B が 19%, ^{11}B が 81% の割合になっている [31]。発光量はプラスチックシンチレータのベースとなるアントラゼンの光出力を 100% としたときの割合である。

8.3 実験機器

プラスチックシンチレーターの信号は光電子増倍管を使って読み出した。今回使用したものは Hamamatsu H3178 で -1200V の高電圧をかけた。また、增幅器としては CANBERRA の MODEL2020 を使用し、COARSE GAIN は 30, SHAPING TIME は $0.25\mu\text{s}$ とした。ADC は Laboratory equipment 社製の 2201A で GAIN は 4k である。この ADC の値を PC に転送し、HDD にストアードした後 ネットワークを介して SGI のワークステーション O2 に転送してデータ解析を行った。

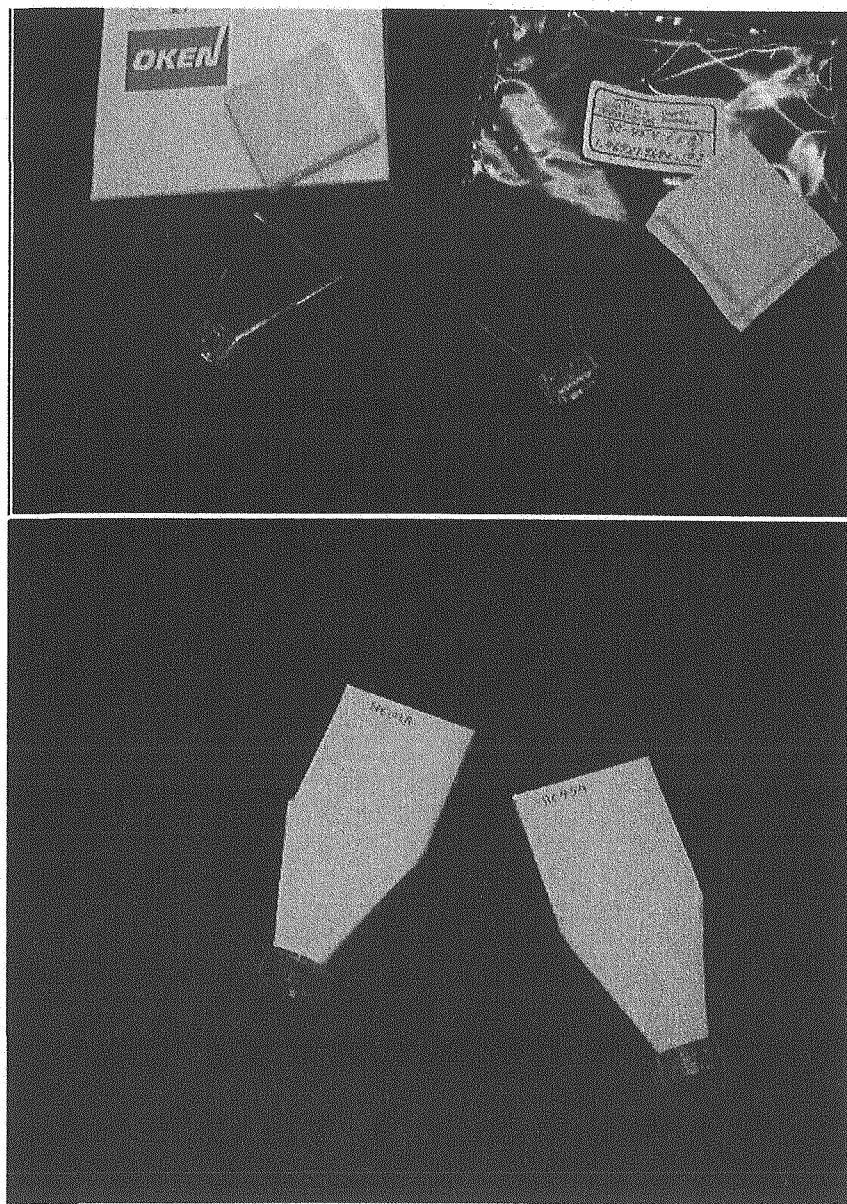


図 121: NE102A と BC454 の写真：上は反射材を巻く前, 下はタイベックス紙で反射処理をした後

9 実験

9.1 エネルギー較正

実験に先立ってセシウムとコバルトの二種類の γ 線源を使い測定した。セシウムからは0.67MeV, コバルトからは1.17MeVと1.33MeVのエネルギーの γ 線が放出されているのでコンプトン端のチャンネル数とエネルギーの関係(式24)からエネルギー較正を行った。

コンプトン効果の式:

$$E_{\max} = h\nu - h\nu'', \\ E_{\min} = h\nu - h\nu/(1 + (2h\nu/mc^2))(\theta = 180^\circ) \quad (24)$$

を使いエネルギーを変換してチャンネル数と比較した[25]。 ^{60}Co の場合のコンプトン端はエネルギーで0.49MeV, ^{137}Cs の場合のコンプトン端はエネルギーで1.038MeVとなる。図122はセシウムとコバルトを同時に測定したものである。コバルトのコンプトン端を295ch, セシウムのコンプトン端を716chと取った。図123にチャンネル数とエネルギーの関係をプロットしたものを示した。フィットをかけ,

$$y = 0.0013x + 0.1 \quad (25)$$

という関係式でエネルギーへの換算式とした。xはチャンネル数で,yはエネルギーである。

9.2 NE102Aでの実験結果

次にNE102A上に中性子線源を置き, 2時間測定した。宇宙線も含んだバックグラウンドを取り除くために線源をはずし同じく2時間測定した。それぞれの結果を図124、125に示した。

そして中性子のスペクトルからバックグラウンドのスペクトルを引いたものを図126に示した。引いた結果、平坦な丘が見られた。これはp-nの弾性散乱による陽子のエネルギーによるものだと考えられる。

9.3 BC454での実験結果

同様にBC454を使って2時間測定した中性子スペクトルを図127に示した。今度は明らかに中性子の影響が見られる。

図128はNE102AとBC454を比較するためにエネルギー較正を行った後、スペクトルを重ねて表示させたものである。2つのスペクトルを比較するとBC454ではピークが二つ多く見られた。このピークはボロンと熱中性子の反応によって発生した α 線によるものだと思われる。

9.4 検出効率

次に今回用いた検出効率を比較した。仮想のディスクリの位置を設定し、それ以上のカウントの総数をそれぞれNE102AとBC454で比較し、BC454ではどれくらい検出効率があがるのか計算した。ディスクリの位置を0.3MeV相当に設定した場合でBC454はNE102Aの1.9倍, 0.6MeVで2.3倍, 1.0MeVで2.2倍となった。計算結果を表19にまとめた。

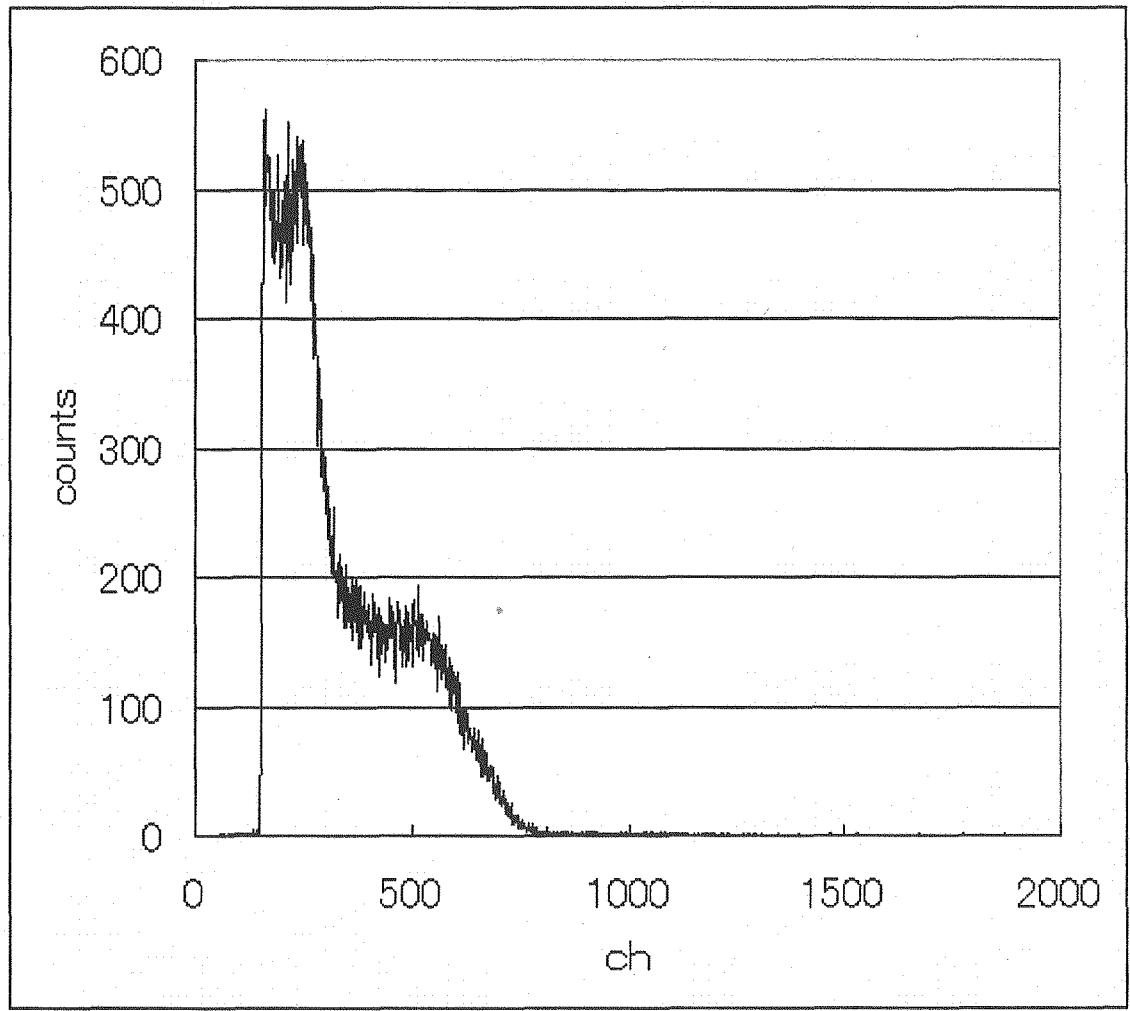


図 122: ^{60}Co と ^{137}Cs のスペクトル

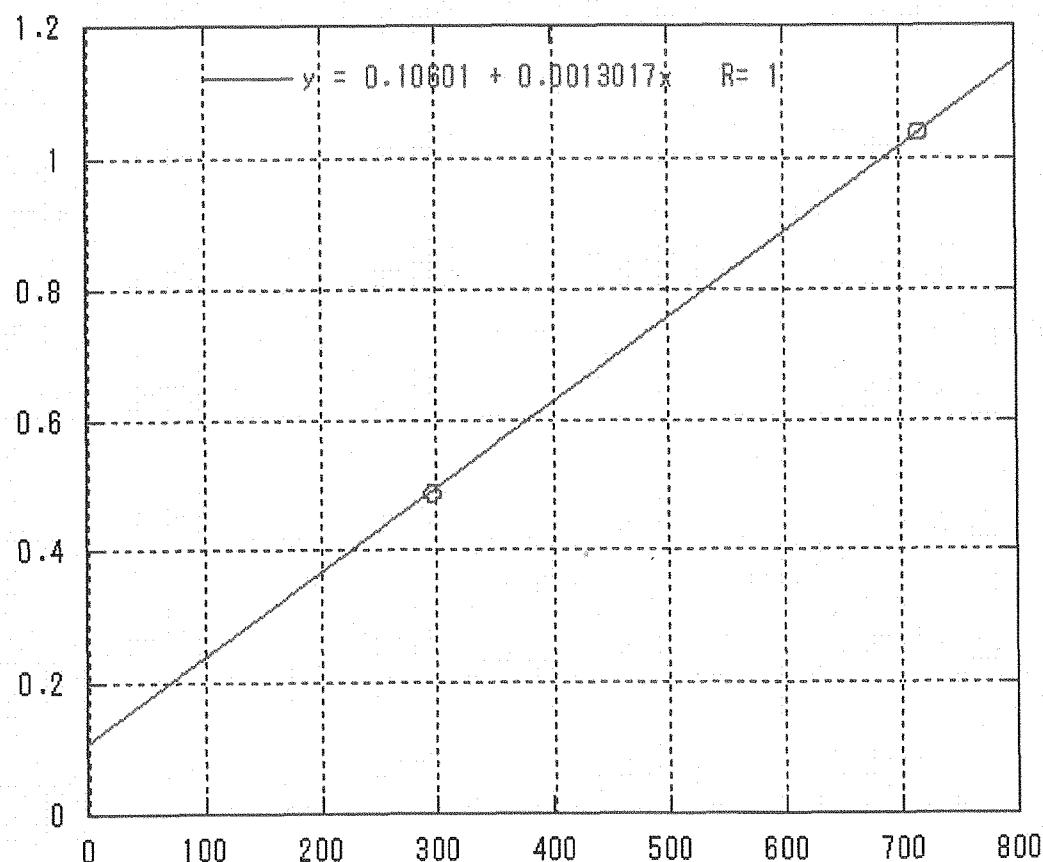


図 123: エネルギー較正のグラフ (縦軸はエネルギー, 横軸はチャンネル数)

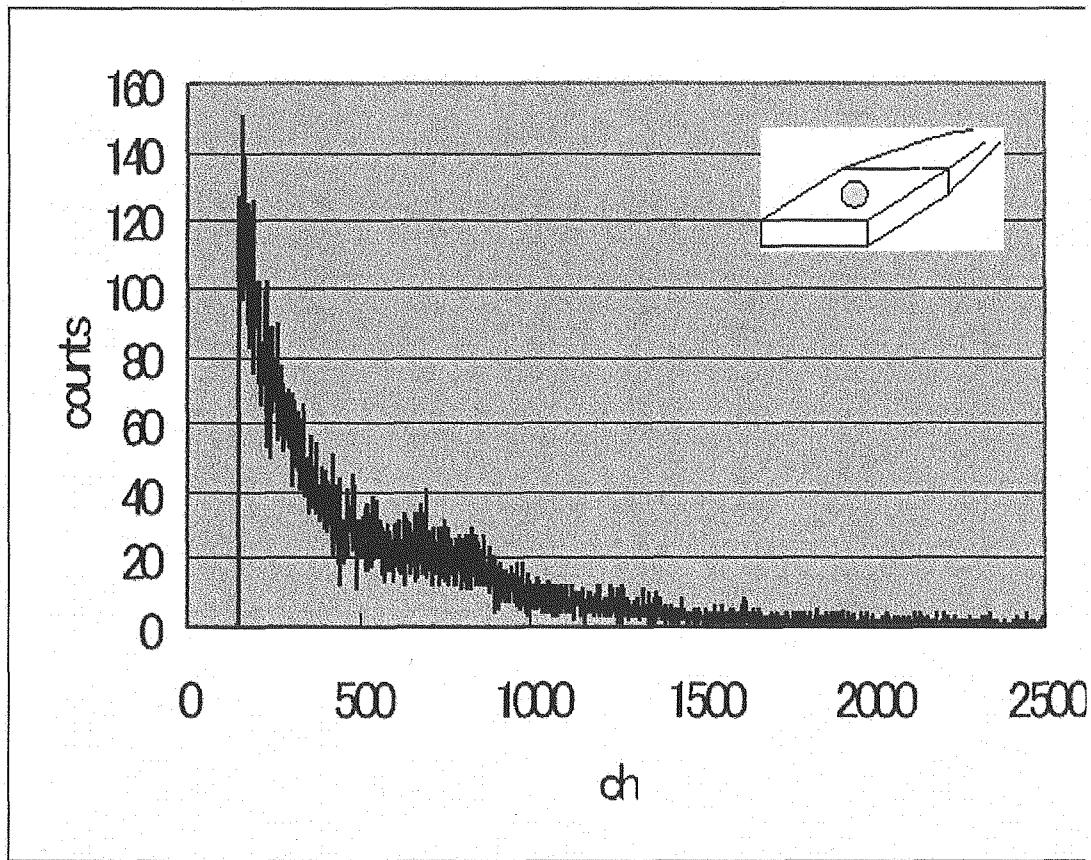


図 124: 中性子+バックグラウンドのスペクトル

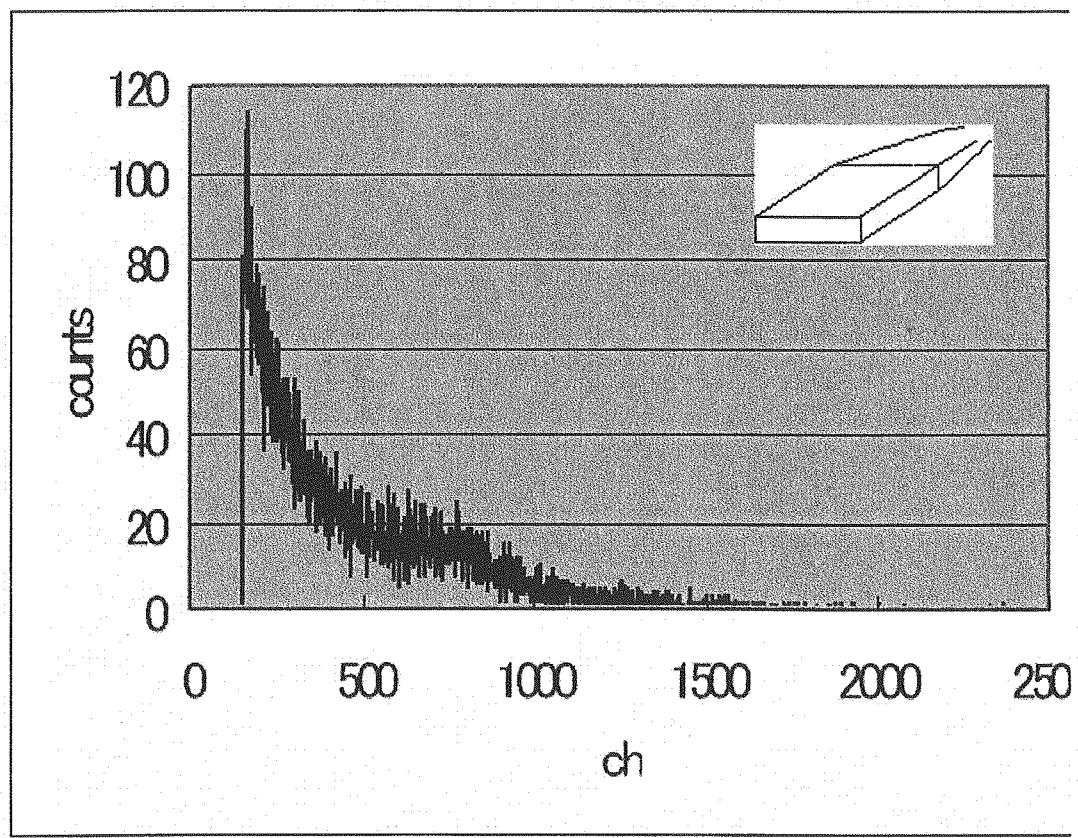


図 125: バックグラウンドのスペクトル

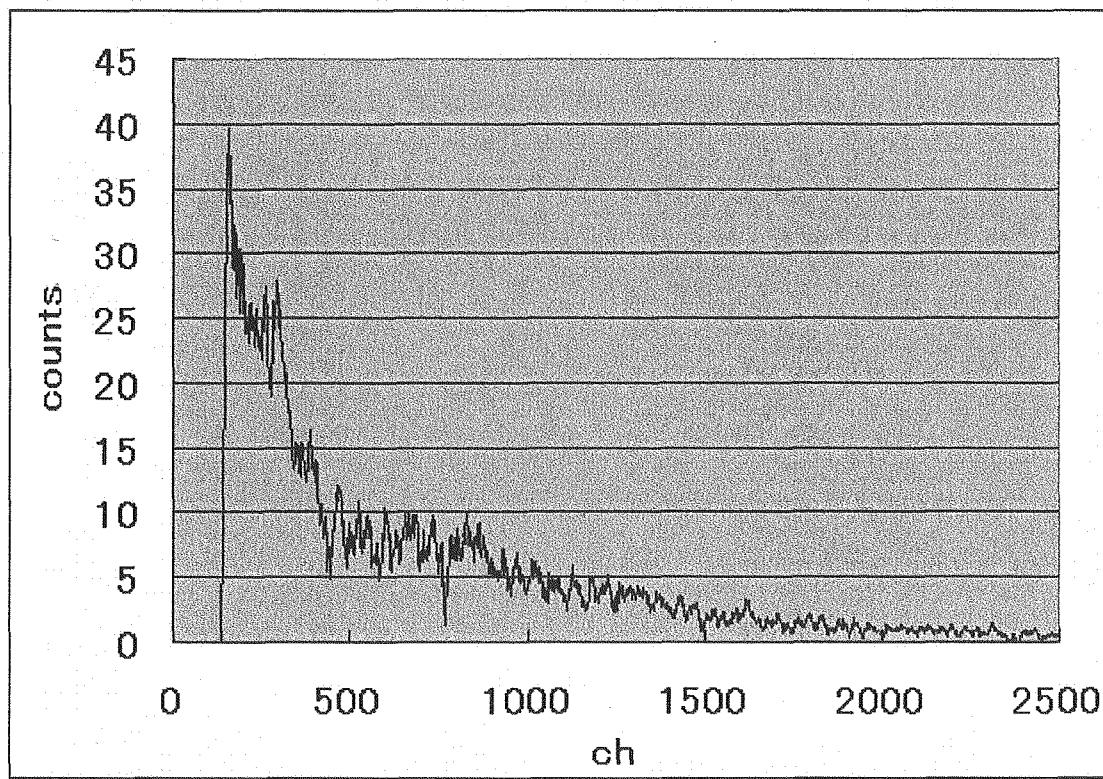


図 126: NE102A での結果

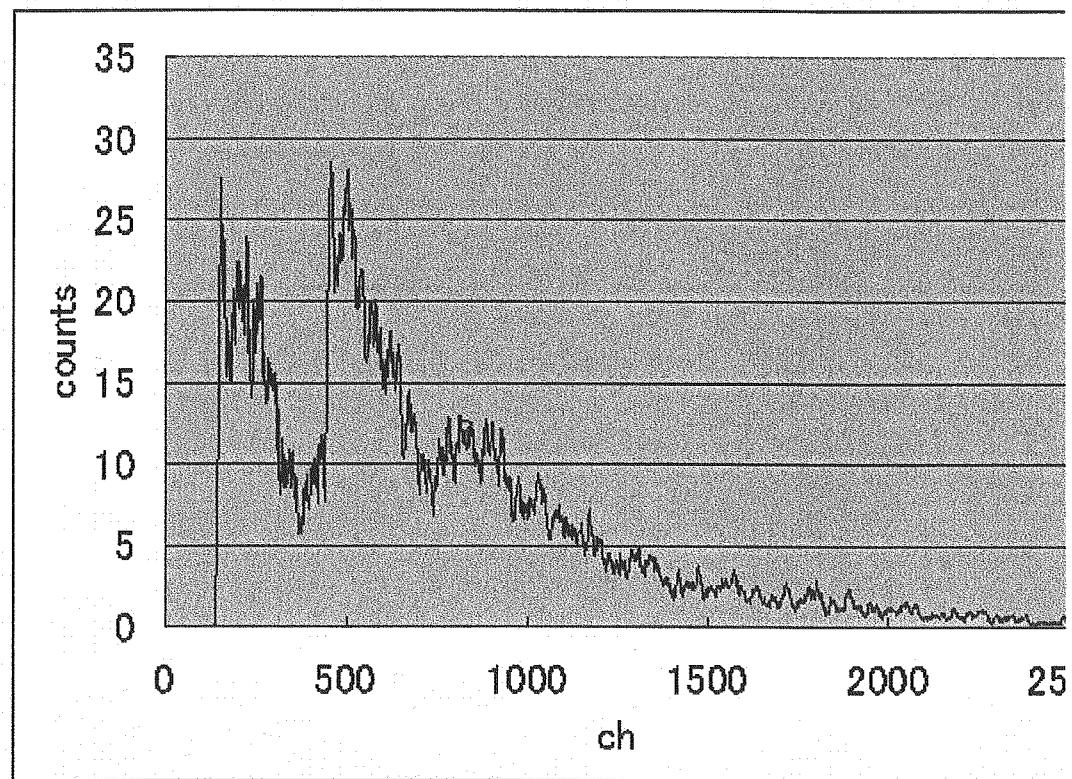


図 127: BC454 での結果

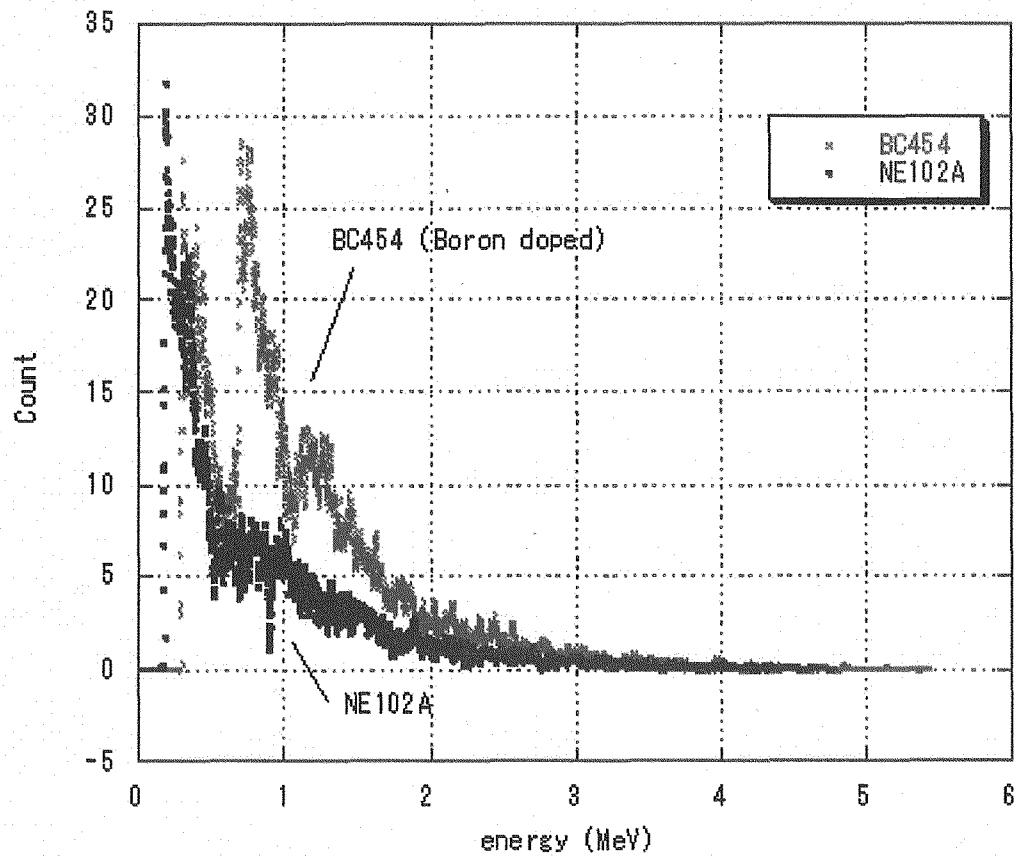


図 128: プラスチックシンチレータによる Am-Beからのスペクトルの比較

表 19: 検出効率

ディスクリの値	NE102A のカウント値	BC454 のカウント値	比 (%)
0.3MeV	8219	15581	1.9
0.6MeV	5237	12035	2.3
1.0MeV	3180	6846	2.2

10 シミュレーション

今回の実験結果がシンチレータ内でどのような過程で起こるのか検討するために計算機シミュレーションとして GEANT3 によるモンテカルロ計算を行った。

電磁力スケードのモンテカルロシミュレーションコードには ETRAN、EGS4、TIGER、SANDYL、GEANT などがあり、その中で今回シミュレーションしたエネルギー領域のような比較的低エネルギーの電磁力スケードを精度よく扱えるコードとしては EGS4、GEANT3 があげられる。今回使用した GEANT3 はヨーロッパ原子核研究所 (CERN) において開発されたシミュレーションコードであり、光子・電子とも 10keV 以上でその輸送が精度よく計算可能である。また、複雑な検出器形状を記述することも比較的容易である。GEANTにおいては、電離損失、制動放射、電子対消滅、シンクロトロン放射、コンプトン散乱、多重散乱が電磁相互作用として考慮されている。GEANT3 の詳細については文献 [33] も参照されたい。今回の研究は予備的な研究であり、予備的な計算コードとして GEANT3 を使用した。

今回のシミュレーション実験では、入射させる中性子は微細な部分では異なるものの Am - Be 線源からなる中性子エネルギーと同じになるように最大 11.5MeV のガウス分布で近似し、10 万個入射させた。

入射中性子のエネルギーを単色とした場合とガウス分布させた場合のシンチレータ内でのエネルギー付与を図 129, 130 に示した。このシミュレーション結果と実験で得られた結果を比較してみると、明らかにガウス分布させてシミュレートした方が実験に近くなるため、今後は入射中性子のエネルギー分布は近似的にガウス分布を用いることにした。また、今回は簡単のため中性子の入射方向はシンチレータ面に垂直とした。プログラムはプログラムリスト 4 に載せた。

シミュレーションのために作成したプログラムは、Geant3 コードを FOTRAN 形式で用いたものである。プログラム名は「neu.f」とした。このプログラム内で、入射させる粒子の種類とそのエネルギー、装置を構成する各物質の種類、位置、大きさなどを設定した。また、この「neu.f」外に「neu.dat」を設定し、粒子の種類、発生させる数、入射粒子の運動量、入射位置を用意に変更できるようにした。このプログラムの使用手順を述べる。

1. neu.dat に数値を入力。(入射粒子の種類、運動量等を設定→プログラムリスト 6)
2. このプログラムをコンパイルする (Makefile4)。これにより、実行ファイル a.out ができる。
3. a.out を実行する。(a.out のデータを使用する)
neu.hst, neu.nt に計算結果が保存される。
a.out|neu.dat
4. paw を実行し、neu.hst をヒストグラムにして表示させ、postscript-file (neu.ps) に保存する。

プログラムリスト 5 GEANT3 のメインプログラム neu.f

```

c ///////////////////////////////
c Energy deposite Simulation
c   in the GSO
c programmed by Y.Tamagawa
c   1999.07.06 , 2000.12.01, 2001.2.4,2003.6.25
c ///////////////////////////////

C main program

parameter (ngbank=800000, nhbook=10000)
common /gcbank/q(ngbank)
common /pawc/h(nhbook)

call gzebra(ngbank)
call hlimit(-nhbook)

call uginit
call grun
call uglast

stop
end

c ///////////////////////////////

subroutine uginit

common /gcflag/ idebug,idemin,idemax,itest,idrun,idevt,iesrun,
+ iectri,ievet,iiswrit(10),ifinint(20),nevent,nrndm(2)

common /gconst/ pi,twopi,piby2,degrad,raddeg,cight,big,emass

common /gckine/ ikine,pkine(10),itra,istak,ivert,ipart,itrtyp,
+ napatr(5),amass,charge,tlife,vert(3),pvert(4),ipold

common /udata/ pbeam,ittype,esum(10),maxmed,zstrt,y

call ginit

maxmed=4

c ****
c beam momentum and particle type
c this is default value
c ****
pbeam=11.5
itype=13          デフォルト値
zstrt=-1.0

call ffkey('MOME',pbeam,1,'real')
call ffkey('TYPE',itype,1,'inte')    「neu.dat」の読み込み
call ffkey('ZSTR',zstrt,1,'real')

call gffgo

ikine=ittype
C pkine(1)=pbeam
pkine(1)=sqrt(pbeam*pbeam+1880*pbeam)*0.001

write(*,*)"initial beam momentum:",pkine(1)
write(*,*)"Particle ID:",ikine

open(15,file='beam6.dat',status='old')

call gzinits
c call gdinit
call gpart
call guate
call ugeom
call gphysi
    call gprint('VOLU',0)
call uhinit

return
end

c ///////////////////////////////
subroutine ugeom      ←検出器と周辺物質の設定

common /gctmed/ numed,natmed(5),isvol,ifield,fieldm,tmaxfd,
+ stemax,deemax,epsil,stmin,cfld,prec,iupd,
+ istpx,ncmlcd

common /udata/ pbeam,ittype,esum(10),maxmed,zstrt,y

dimension a(2),z(2),wmat(2),par1(3),par2(3)

```

```

      data a /12.01,1.01/
      data z /6.0,1.0/
      data wmat /52.0,48.0/

      call gsmixt(22,'PLAS',a,z,1.032,-2,wmat)
      call gsmmed(1,'AIR1',15,0,0,0.0,0.0,0.01,0.01,0.001,0.05,0.0,0)
      call gsmmed(2,'PLAS',22,1,0,0.0,0.0,0.0,0.01,0.01,0.001,0.05,0.0,0)

      call gspars(1,'CUTNEU',0.0000000000001)
      call gspars(2,'CUTNEU',0.0000000000001)
      c      call gspars(3,'CUTELE',0.00001)
      c      call gspars(4,'CUTELE',0.00001)

      call vzero(par1,3)                                物質の形状
      par1(1)=50.0
      par1(2)=50.0
      par1(3)=50.0
      call gsvolu('AIR1','BOX ',1,par1,3,ivolu)

      call vzero(par2,3)
      par2(1)=2.5
      par2(2)=2.5
      par2(3)=0.25
      call gsvolu('SCIN','BOX ',2,par2,3,ivolu)

      c call vzero(par3,3)
      c par3(1)=5.0
      c par3(2)=6.0
      c par3(3)=0.25
      c call gsvolu('SCIN','BOX ',3,par3,3,ivolu)

      c      call vzero(par4,3)
      c      par4(1)=0.25
      c      par4(2)=1.0
      c      par4(3)=0.1
      c      call gsvolu('TRG2','BOX ',4,par4,3,ivolu)

      c call gpos('TRG1',1,'AIR1',0.0,0.0,4.0,0,'ONLY')
      c call gpos('TRG2',1,'AIR1',0.0,0.0,6.0,0,'ONLY')          物質の配置
      c      call gpos('SCIN',1,'AIR1',0.0,0.0,0.25,0,'ONLY')
      c call gsord('SAMP',3)
      call ggclos
      call gpvolu(0)

      return
      end

c /////////////////////////////////
subroutine uhinit

common /udata/ pbeam,itype,esum(10),maxmed,zstrt,y

      call hopen(75,'tamagawa','neu.nt','N',4096,istat)
      call hbnt(i,'BETA','')
      call hbnme(i,'betamn',esum,'esum(10):r')

      call hbook1(20,'E-Deposit in air ',100,0.0,0.01,0.0)
      c      call hbook1(21,'E-Deposit in trg1 ',100,0.0,0.002,0.0)    ヒストグラムの定義
      c      call hbook1(21,'E-Deposit in plastic ',100,0.0,0.01,0.0)
      c      call hbook1(23,'E-Deposit in trg2 ',100,0.0,0.002,0.0)

      return
      end

c ///////////////////////////////
subroutine gukine                                ←入射粒子の設定

common /gcfflag/  idebug,idemin,idemax,itest,idrun,idevt,icorun,
+ iecotri,ievent,iiswrit(10),iifinit(20),nevent,nrndm(2)

common /gckine/ ikine,pkine(10),itra,istak,ivert,ipart,itrtyp,
+ napart(5),amass,charge,tlife,vert(3),pvert(4),ipaold

common /udata/ pbeam,itype,esum(10),maxmed,zstrt,y

dimension vert(3),plab(3)

do 100 numed=1,maxmed
  esum(numed)=0.0
100 continue

      call vzero(vert,3)
      vert(1)=0.0
      vert(2)=0.0
      vert(3)=zstrt                         入射粒子の入射位置
                                              (x,y,z)
      call gsvvert(vert,0,0,0,0,nv)

      read(15,*)y
      c      pkine(1)=y*pkine(1)

```

```

call vzero(plab,3)
plab(1)=0.0
plab(2)=0.0
plab(3)=pkine(i)*y
call gskine(plab,ikine,nv,0,nt)

return
end

c /////////////////////////////////
subroutine gutrev

common /gcflag/ idebug,idemin,idemax,itest,idrun,idevt,iseorun,
+ iectri,ievent,iswrit(10),ifinit(20),nevent,nrndm(2)

call gtreve

return
end

c /////////////////////////////////
subroutine gutrak

call gtrack

return
end

c /////////////////////////////////
subroutine guhadr

c      IMPLICIT NONE
c      include"gctrakinc"

call gheish
c call gfmfin
c      call gmcap
c      call gcalor
return
end

c /////////////////////////////////
subroutine guphad

c      IMPLICIT NONE
c      include"gctrakinc"

call gphei
c call gfmdis
c      call gmorin
c      call calsig
return
end

c /////////////////////////////////
subroutine gustep          ←エネルギー損失の計算

parameter(maxmec=30)

common /gcflag/ idebug,idemin,idemax,itest,idrun,idevt,iseorun,
+ iectri,ievent,iswrit(10),ifinit(20),nevent,nrndm(2)

common /gcking/ kcase,ngkine,gkin(5,100),tofd(100)

common /gckine/ ikine,pkine(10),itra,istak,ivert,ipart,itrtyt,
+ napart(5),amaes,charge,tlife,vert(3),pvert(4),ipaold

common /gctmed/ numed,natmed(5),isvol,ifield,fieldm,tmaxfd,
+ stemax,deemax,epsil,stmin,cfield,prec,inpud,
+ istpar,numold

common /gctrak/ vect(7),getot,gekin,vout(7),nmec,lmech(maxmec),
+ namec(maxmec),nstep,maxnst,destep,destol,safety,
+ sleng,step,snext,sifield,tofg,gekrat,upwght,ignext,
+ invwvol,istop,igauto,iekbin,ilosl,imull,ingoto,nldown
+ nlevin,nlvsav,istory

common /udata/ pbeam,ittype,esum(10),maxmed,zstrt,y

call gaxyz

if(numed.ge.1.and.numed.le.maxmed) then
  if(destep.gt.0.0) then
    esum(numed)=esum(numed)+destep
  end if
end if

```

```

if(ngkine.gt.0) then
  do i=1,ngkine
    call gsking(i)
  end do
end if
return
end

c ///////////////////////////////
subroutine gudigi
return
end

c ///////////////////////////////
subroutine guout          ←ヒストグラムの出力
common /udata/ pbeam,itype,esum(10),maxmed,zstrt,y
  if(esum(1).gt.0.0) then
    call hfi(20,esum(1),1.0)
  end if

  if(esum(2).gt.0.0) then
    call hfi(21,esum(2),1.0)
  end if

  c      if(esum(3).gt.0.0) then
  c        call hfi(22,esum(3),1.0)
  c      end if

  c      if(esum(4).gt.0.0) then
  c        call hfi(23,esum(4),1.0)
  c      end if

  call hfnt(1)

return
end

c ///////////////////////////////
subroutine uglast           ←終わり処理
common /gcfflag/ idebug,idemin,idemax,itest,idrun,idevt,ieorun,
+ iectri,ievent,iswrit(10),iininit(20),nevent,nrndm(2)

common /udata/ pbeam,itype,esum(10),maxmed,zstrt,y
call histdo
call hrput(0,'neu.hst','n')

call hrout(0,icycle,' ')
call hrend('tamagawa')
close(75)
close(1)
close(15)

call glast
call igend

return
end

```

プログラムリスト 6 neu.dat

LIST

TRIG	100000	: 入射粒子数 (繰り返し回数)
MOME	11.5	: 粒子に与える運動量 (GeV/c)
TYPE	13	: 粒子の種類 (13 → neutron)
ZSTR	-1.0	: 入射粒子のスタート位置

END

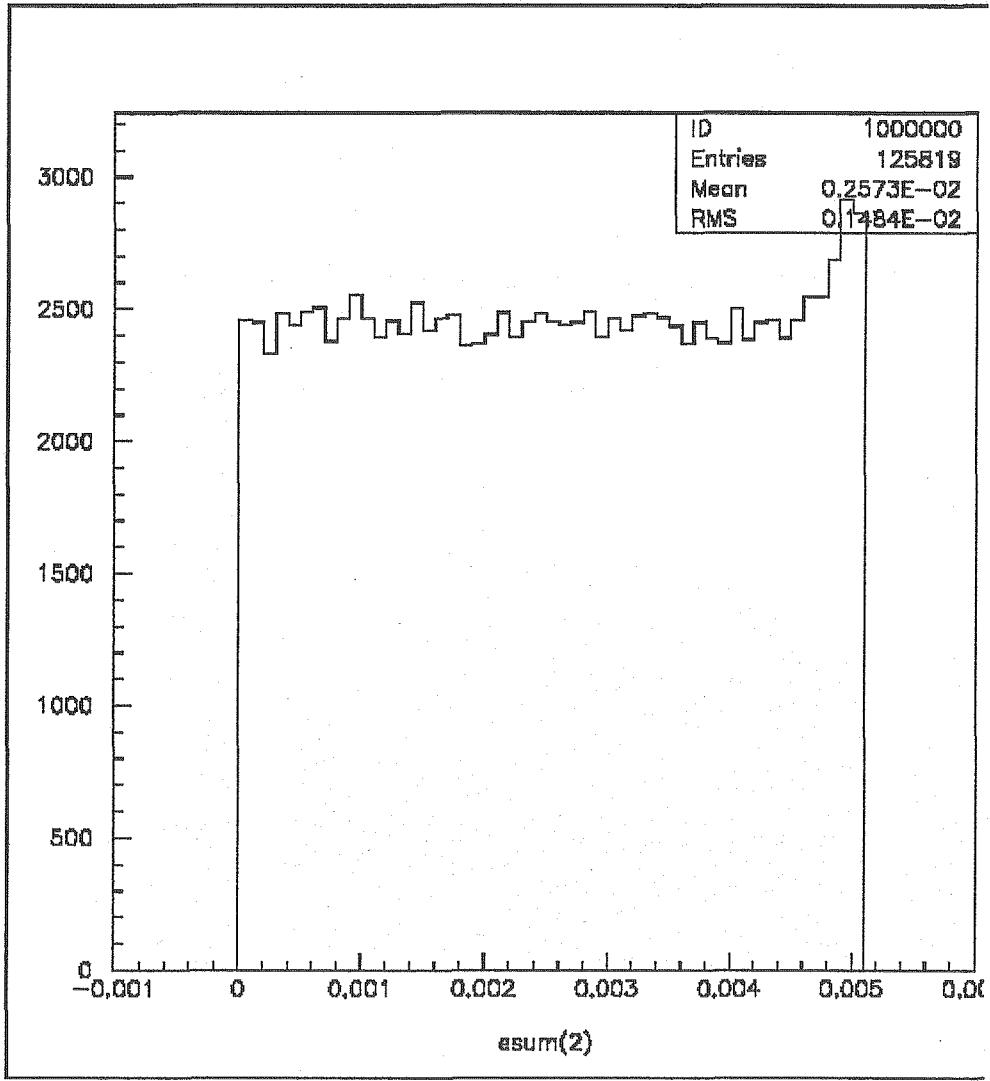


図 129: 入射中性子のエネルギーが单一の場合 (5MeV)

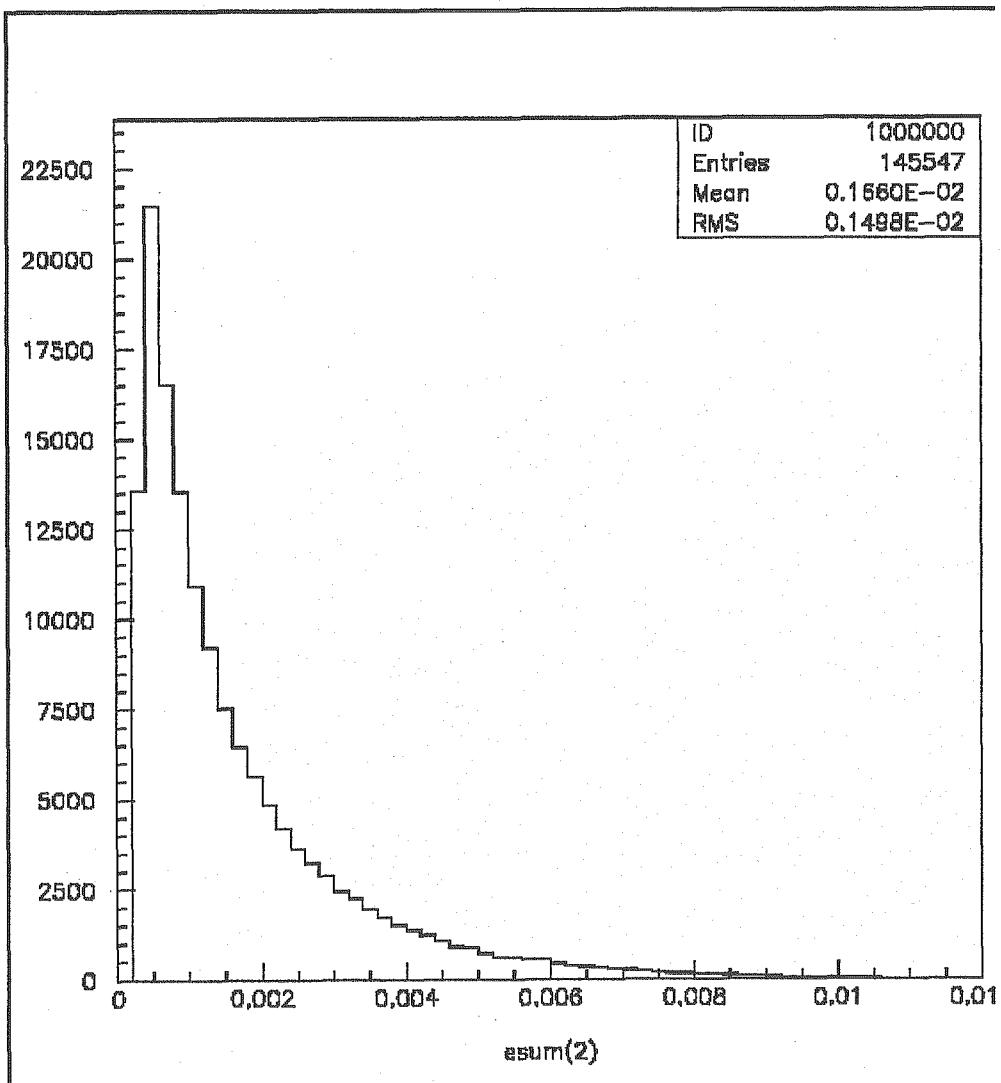


図 130: 入射中性子のエネルギー分布をガウス分布で近似して計算した場合 (0-11.5MeV)

表 20: 厚さによる検出効率の変化 (5cm×5cm)NE102A

厚さ	N	検出効率(%)
5mm	57334	6
1cm	111309	11
2cm	208743	21
5cm	421304	42
10cm	610471	61

10.1 シミュレーション1

実験結果と比較するためシンチレータのサイズは実験で使用した物と同じ大きさ 5cm 角で厚さが 5mm に設定してシミュレーションを行った, NE102A のシミュレーション結果を図 131 に示した。低エネルギー側で指數関数的に減少し, 2MeV~8MeV 付近までほぼ平坦な形を形成する反跳陽子によるエネルギー分布を再現しており実験の結果とほぼ一致した。

10.2 シミュレーション2

NE102A と同じ条件で行った BC454 でのシミュレーション結果を図 132 に示した。プラスチックの成分として実験に用いたものと同じように B を含有させて計算した。NE102A の場合と同じに見えるが, 数が増加した。しかし実験で見られた α 線のピークが見らなかった。これは、GEANT3 の仕様には低エネルギーの中性子に対しての (n,α) 反応が盛り込まれていないことが原因と考えられる。

10.3 シミュレーション3(シンチレータの厚さの影響)

シンチレータの厚さによる影響を調べるため, シンチレータの厚さを 5mm, 1cm, 2cm, 5cm, 10cm と変化させたときにエネルギー損失はどのように変わるかシミュレーションを行った。シンチレータのサイズは大きさによる依存性を調べるために, 実験と同じ 5cm 角の物と 50cm 角の物の二種類を行った。そのときの出力を図 133-139 に示した。シンチレーターは NE102A でシミュレーションした。シンチレーターの厚さを増やしても得られたスペクトルの形に変化はなかったが反応する中性子数 (Entries) には違いが現れた。この場合の入射粒子数は 100 万個である。

結果から得られた反応中性子数とシンチレーターの厚さの関係を表 20 と表 21 に示し, グラフにしたものを見ると図 140 に示した。

10.4 厚さについて

シンチレータの厚さを増すにしたがって, 検出される中性子の数は増大した。しかし, それは直線的に増加するのではなく, はじめは厚さとともに直線的に増加し, 次第にその傾きは小さくなる。こ

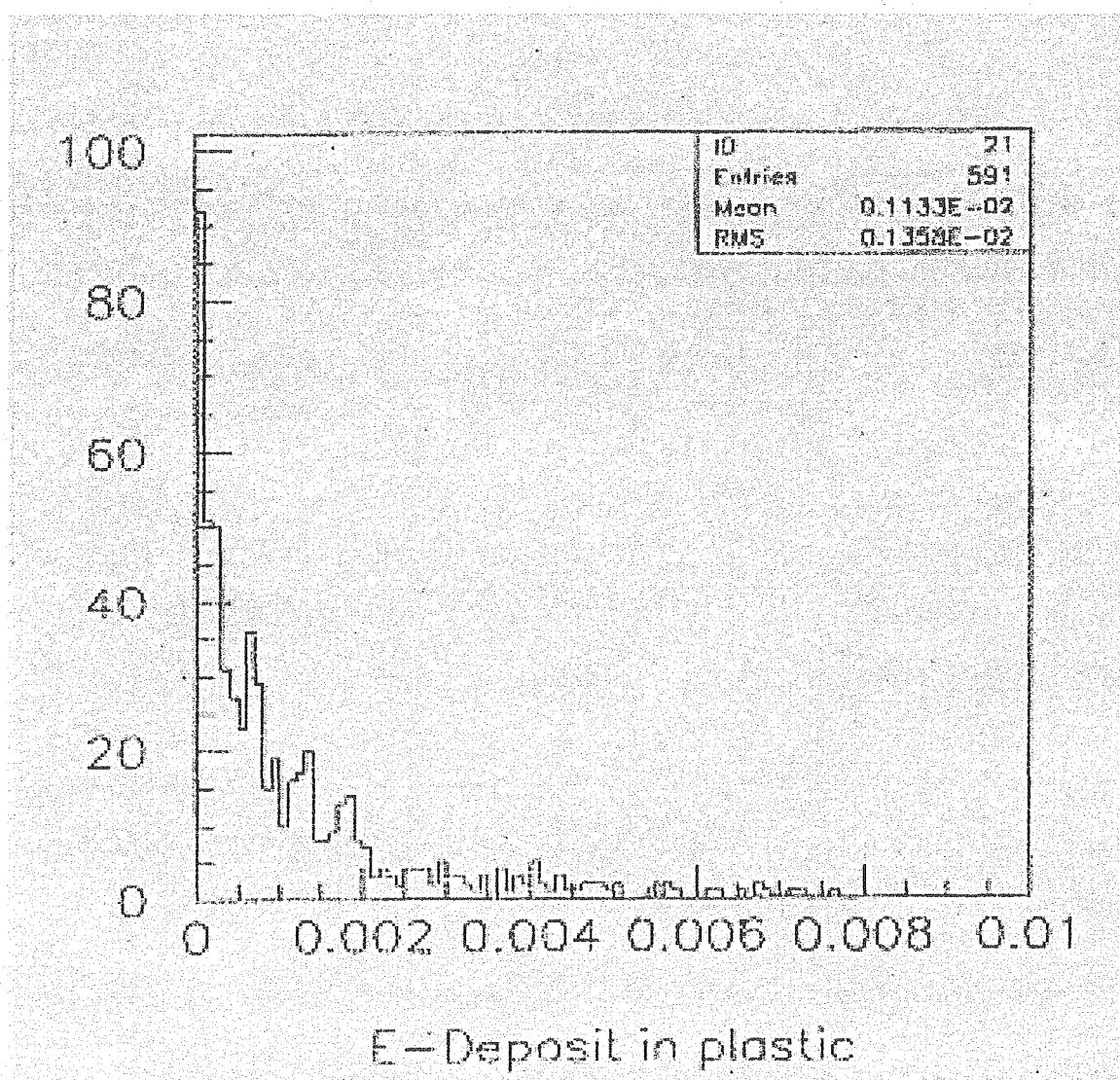
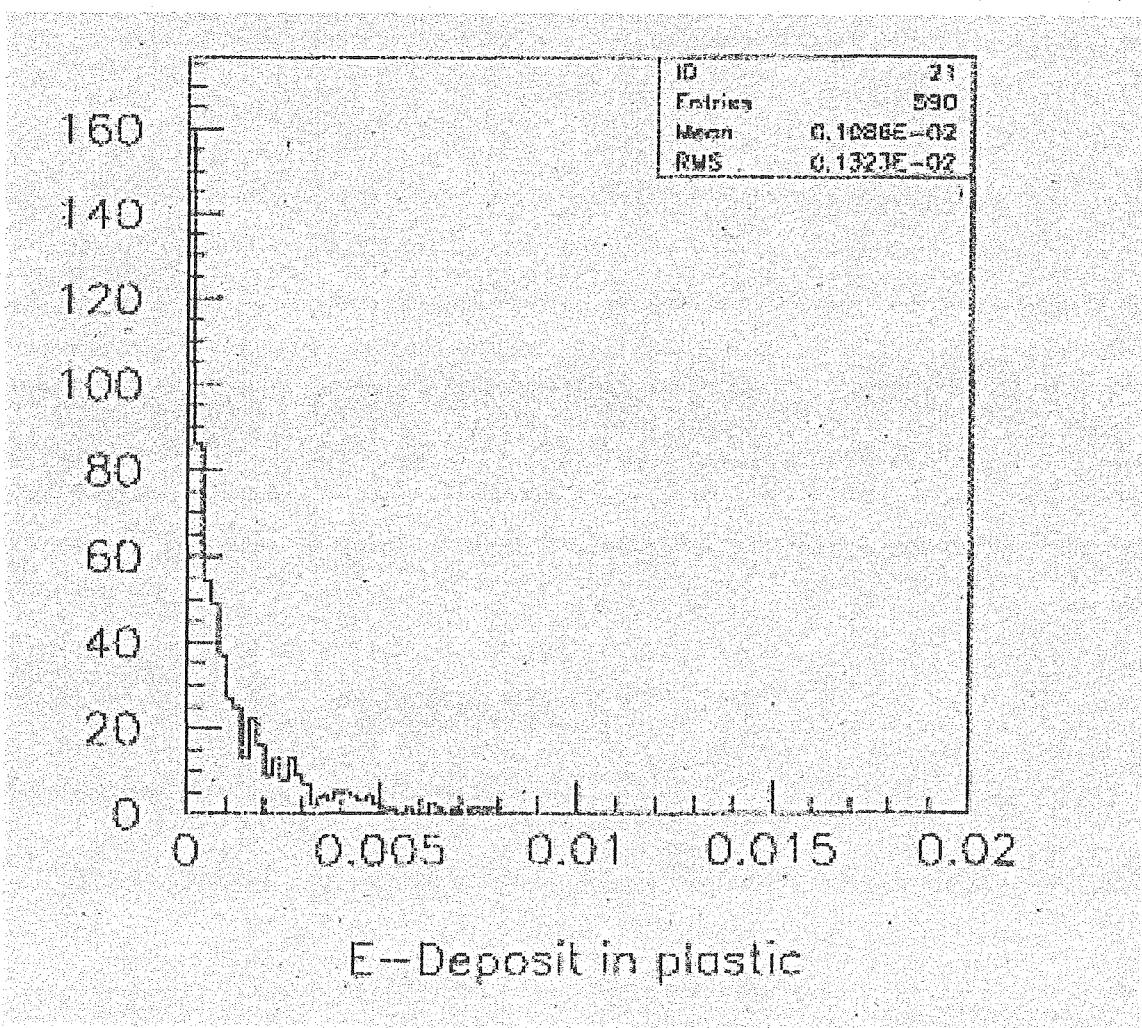


図 131: NE102A(5mm 厚) に Am-Be からの中性子を入射したときの応答



E--Deposit in plastic

図 132: BC454(5mm 厚) に Am-Be からの中性子を入射したときの応答

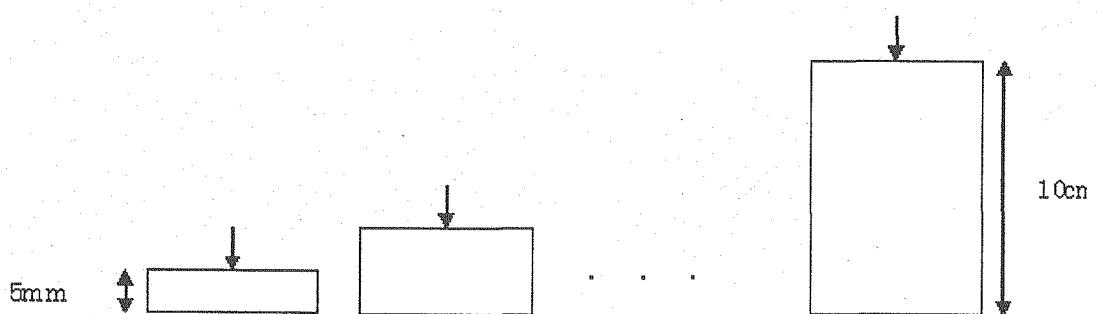


図 133: 厚さ方向の依存性を調べる。(シミュレーション)

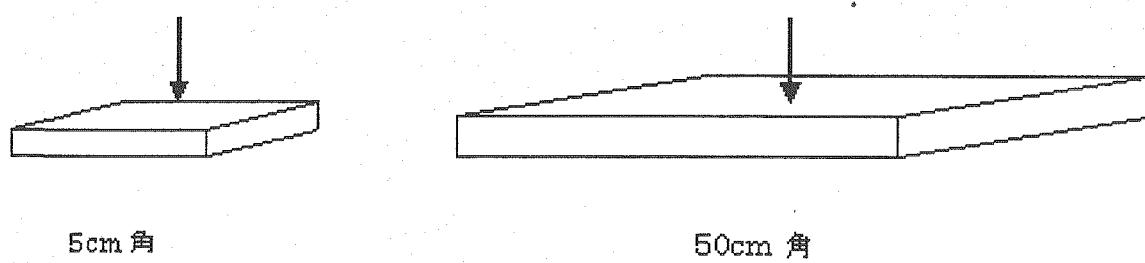


図 134: 面積の依存性を調べる。(シミュレーション)

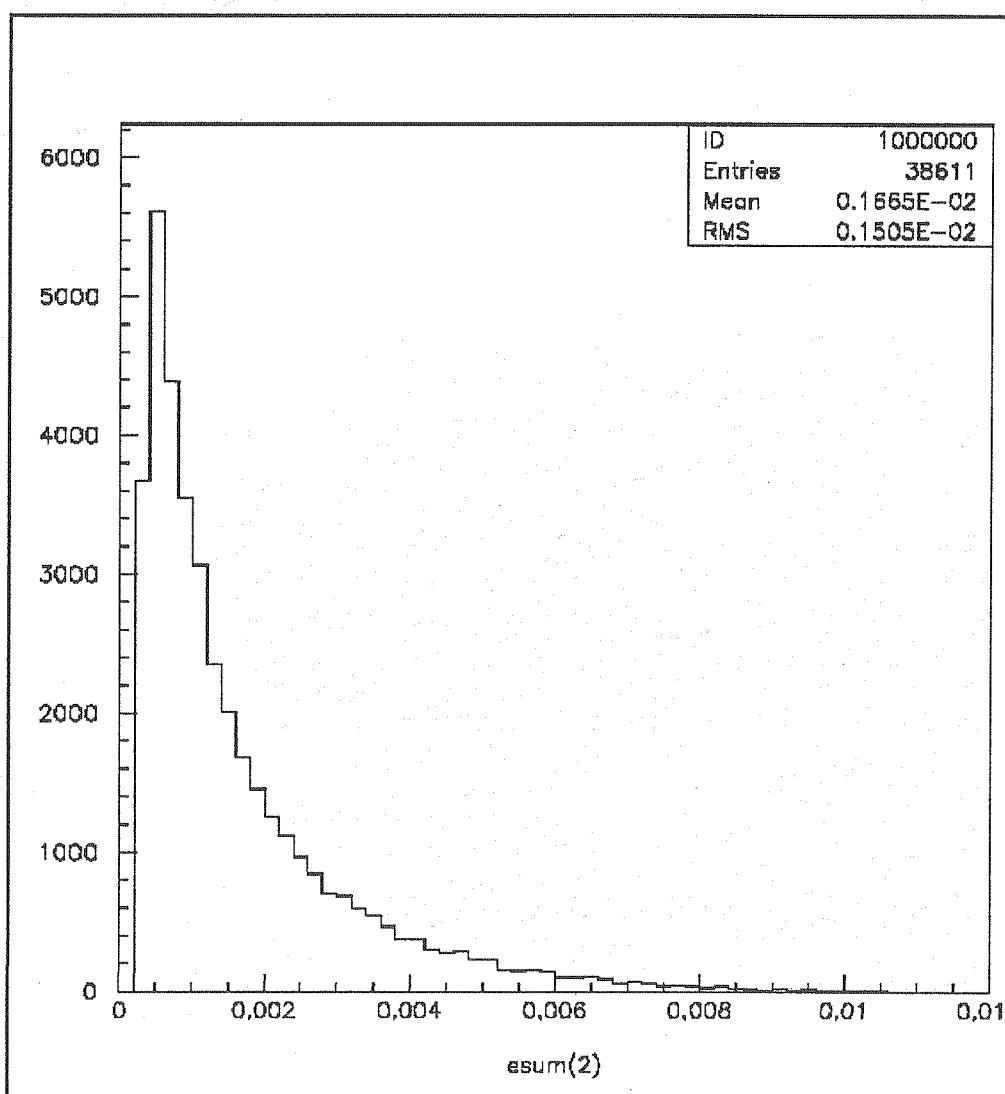


図 135: NE102A(5mm 厚) に Am-Be からの中性子を入射したときの応答

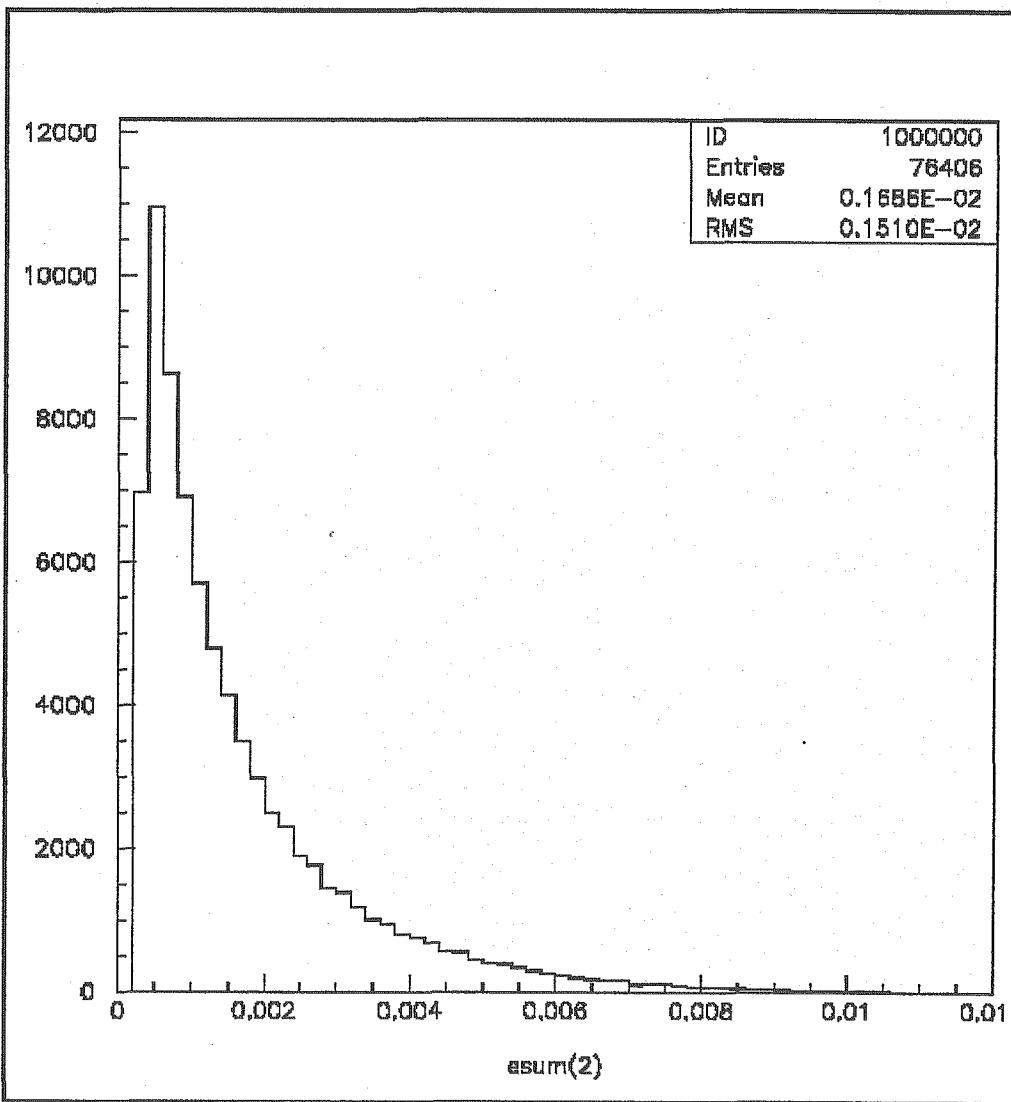


図 136: NE102A(10mm 厚) に Am-Be からの中性子を入射したときの応答

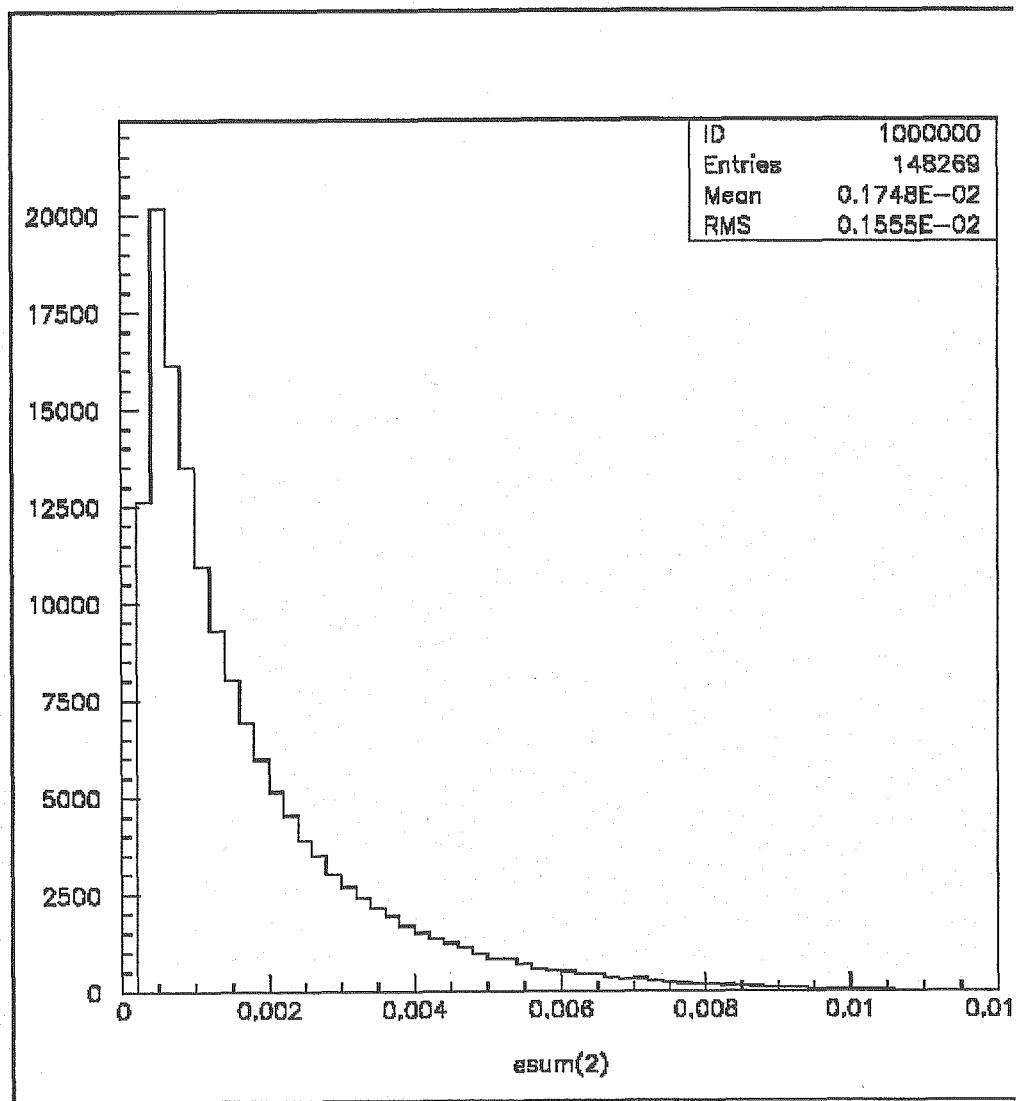


図 137: NE102A(20mm 厚)に Am-Be からの中性子を入射したときの応答

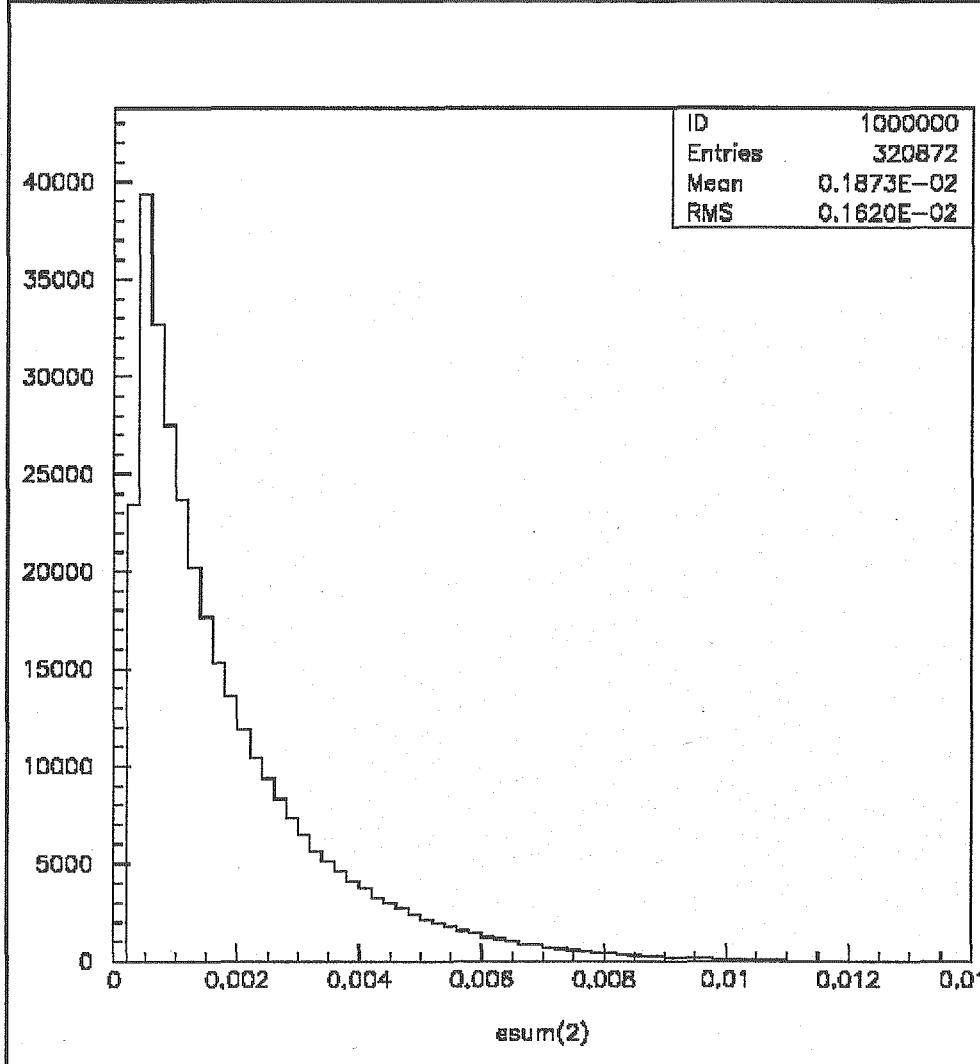


図 138: NE102A(50mm 厚) に Am-Be からの中性子を入射したときの応答

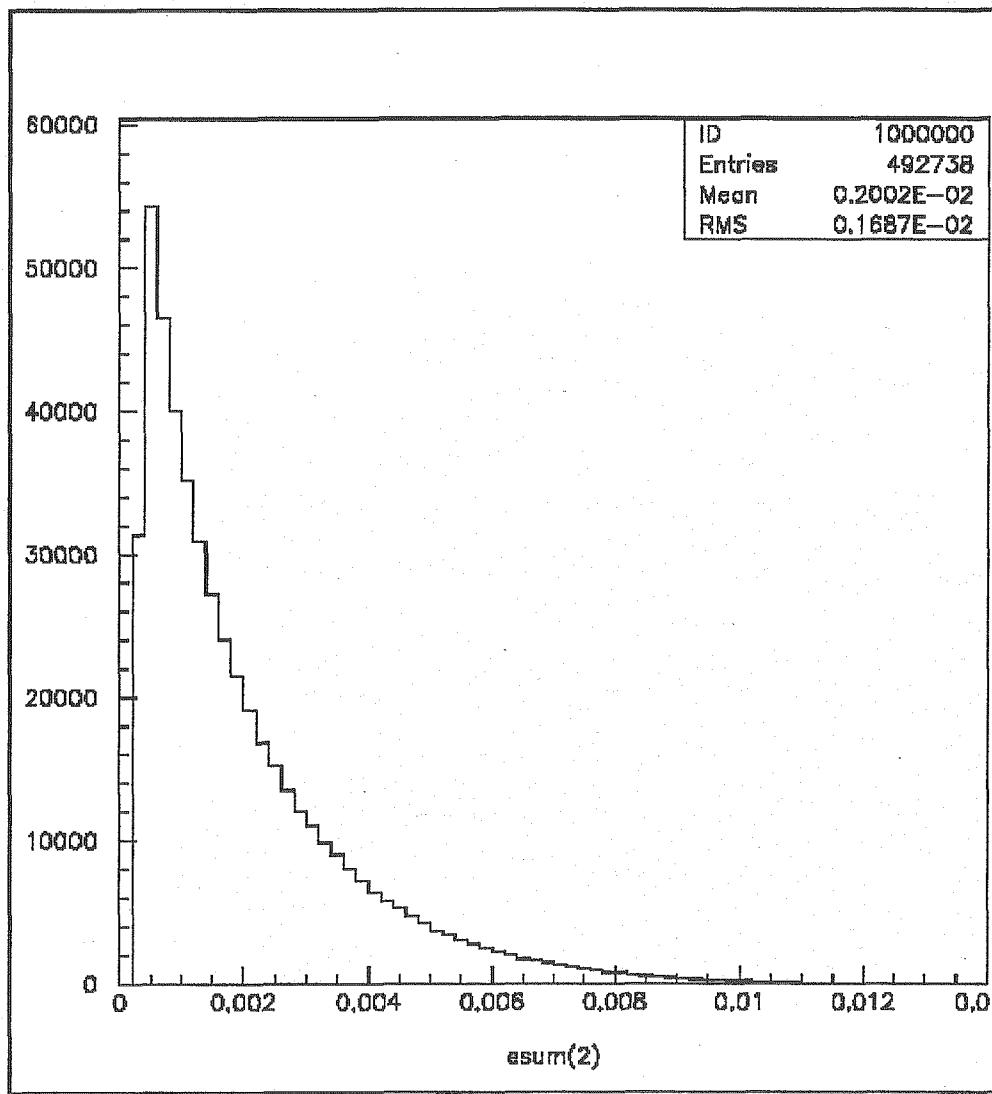


図 139: NE102A(100mm 厚)に Am-Be からの中性子を入射したときの応答

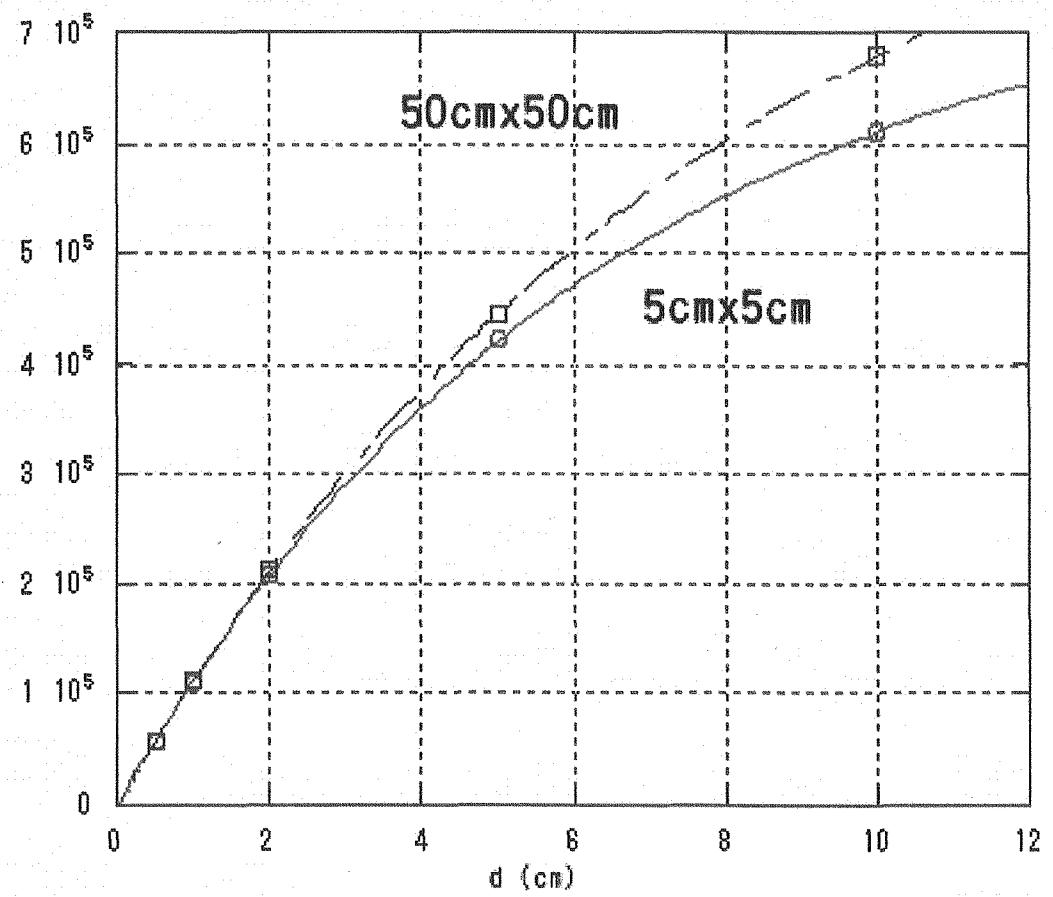


図 140: NE102A に Am-Be からの中性子を入射したときの厚さ依存性：縦軸は 10^6 個の中性子入射に対する反応の数

表 21: 厚さによる検出効率の変化 (50cm×50cm)NE102A

厚さ	N	検出効率(%)
5mm	57214	6
1cm	112408	11
2cm	212906	21
5cm	445524	42
10cm	678871	68

の様子を、指數関数で近似したところ、

$$N = N_0(1 - \exp^{-ad}), \quad (26)$$

$$5\text{cm} \times 5\text{cm} : a = 0.16, N_0 = 7.69 \cdot 10^5$$

$$50\text{cm} \times 50\text{cm} : a = 0.13, N_0 = 9.39 \cdot 10^5$$

となった。これは入射された中性子がシンチレータ中の陽子と弾性散乱をしてエネルギーを失い止まっていくことに起因していると考えられる。

10.5 シンチレーターの面積について

今回シンチレーターの大きさとしては 5cm×5cm のものと、50cm×50cm の 2 種類を想定した。入射方向をシンチレータ面に対して直角としたため厚さが小さな場合には、大きさの依存性は見られないが、厚さが 10cm のときには、その検出効率として 10% 程度の違いが見られた。これは中性子のシンチレータ中での散乱によってその進行方向が変えられ、散乱角が大きくなっていく過程による影響と考えられる。しかしながら、その影響は初め考えていたよりも少ないものだった。中性子は 10cm の深さを進むうちに $\pm 2.5\text{cm}$ 以上進路を変えるものは 10% 程度であることになるからである。実際の検出器としては中性子の入射角はランダムだと考えなければいけないので、より現実に沿ったシミュレーションが必要であろう。

11 結論と課題

今回簡単な中性子検出器であるプラスチックシンチレータを用いて実験を行った。一般的なプラスチックシンチレータであるNE102Aとボロンを5%ドープしたBC454を用いた結果、BC454によるエネルギー付与のスペクトルには熱中性子反応としての α 線の寄与によると思われるピークが見られ、熱中性子が検出されていることが確認された。そして、この熱中性子反応による寄与により、ボロンを含んだBC454は一般的なプラスチックシンチレータであるNE102Aより検出効率として約2倍検出高くなることが分かった。

さらに、シミュレーションにより、中性子とシンチレータとの反応の深さ方向及び面積の依存性を調べることができた。

今後は中性子線源の較正をして正確な検出効率を求め、線量計として人体に対するエネルギー付与を評価できるか検討し、シミュレーションを正確なものにしていく必要がある。シミュレーションでは現在一般的に使われていてGEANT3の新しいバージョンであるGeant4でのシミュレーションを検討する必要があるだろう。更に中性子の入射方向を現在のシンチレータ面に垂直なだけでなく、ランダムに入射するようにプログラムを改良し、線源の大きさのついても設定する必要があると考える。

第IV部

無機シンチレータを用いた中性子検出システムの開発

12 目的

本項目では、高効率かつ長期間安定な無機シンチレーターを用いて中性子を計測するシステムを開発することを目的とした。昨年度検討した各種無機シンチレーターの中から、BGO、GSO(Ce)、NaI(Tl)に注目し、それぞれの中性子に対する特性を評価した。特に NaI(Tl) や GSO(Ce) は、低エネルギー γ 線の測定可能性、散乱断面積、バックグラウンドともに高い性能を示していたため、中性子計測に対して高い感度を有すると期待される。

GSO(Ce) シンチレーターは、大きな熱中性子捕獲断面積を持つ ^{155}Gd が熱中性子を捕獲したあとにできる ^{156}Gd の励起状態から放出される γ 線を計測することで、中性子の検出を行った。

NaI(Tl) シンチレーターは、低エネルギーに励起されやすい励起状態を持つ ^{127}I に注目し、高速中性子の非弾性散乱に伴う特性 γ 線を計測することで、中性子の検出を行った。

BGO、GSO 検出器については、モンテカルロ計算により熱中性子、速中性子に対する感度の評価も実施した。

13 手段

本項目では、小型かつ簡便なシステム構成で、長期間安定な運転が可能な無機シンチレーターによる、各種中性子線のモニタリングを目的としている。このような目的を達成するために、特に GSO(Ce) 検出器と NaI(Tl) 検出器の中性子に対する感度に注目した。

いずれの検出器においても、中性子と原子核との弾性散乱を計測することは念頭に置かない。なぜなら、固体無機シンチレーターは、構成原子核が重いため、中性子との弾性散乱によって原子核に与えられる運動エネルギーは小さい。質量 M_N の原子核と質量 M_n 、エネルギー E_n の高速中性子との弾性散乱によって原子核に与えられるエネルギー E_R は、

$$E_R = \frac{4M_N M_n}{(M_N + M_n)^2} E_n \quad (27)$$

で与えられる。従って、中性子よりもきわめて重い原子核 (^{127}I など) に与えられる反跳エネルギーは原子核の質量に比例して小さくなる。

その上、原子核のような重イオンに対する蛍光効率は、電子に対する蛍光効率のわずか数%にすぎない [17]。その蛍光効率を f と表すと、電子の運動エネルギーで較正された蛍光を基準にしたエネルギー (電子換算エネルギーと呼ぶ) で計測された原子核の反跳エネルギーは

$$E_{ee} = f \times E_R \quad (28)$$

となる。 f はたとえば NaI(Tl) シンチレーターの場合に 0.05 ± 0.02 [17] である。そのため、原子核と中性子の弾性散乱を測定するためには、電子換算エネルギーで数 keV 以下の超低ノイズ測定を必要とする。

このような超低ノイズ測定が可能なシンチレーターは NaI(Tl) など数種類のシンチレーターがあるが、いずれも信号波高が小さすぎるため有機シンチレーターのようなエネルギースペクトルには適さない。

一方、無機シンチレーターは、大きな原子番号の特性を活かした γ 線計測に適している。この研究では、こうした無機シンチレーターの特性を活用した、励起状態からの γ 線計測に基づく中性子計測を試みた。

13.1 GSO シンチレーター

GSO(Ce) は、 Gd_2SiO_4 の結晶で、わずかに Ce を添加している。時間応答が速いうえ、Gd の原子番号が 64 という大きな値であること、密度が 6.71g/cm^3 であることから、高エネルギー γ 線に対して高い効率、高い計数率の環境下でも計数可能であるという特徴がある。Ce の添加濃度の違いによって、蛍光の減衰時間が変わるという報告がなされているが、放射線の違いによる差はないので、この性質を放射線弁別に応用することはできない。この研究では、高濃度で含有される Gd の安定同位体 ^{155}Gd の、熱中性子捕獲断面積が極めて大きいことを利用して、特性 γ 線の強度変化を調べた。

13.2 NaI(Tl) シンチレーター

NaI(Tl) は I の原子番号が 53 と大きいため、 γ 線に対して高い効率を持つ。また、現在広く応用されている無機シンチレーターの中ではもっとも蛍光量の大きなシンチレーターである。最近ラン

タノイドを含有する無機シンチレーターの蛍光量が大きいことが注目されてはいるが、不純物の問題が大きいなどの理由で広い範囲への応用はまだなされていない。

NaI(Tl) シンチレーターは、同位体比率 100% の安定同位体 ^{127}I と高速中性子との非弾性散乱に注目した。 ^{127}I の第 1 励起状態 (57.6keV) は励起断面積が大きいため、比較的高い感度で高速中性子の計数が可能である。

次章以降で、GSO(Ce) シンチレーターによる熱中性子計数、NaI(Tl) シンチレーターによる高速中性子計数を行い、その可能性について評価した。

14 热中性子の捕获反応による中性子の测定

热中性子の计数には、前节で绍介した LiI(Eu) が今まで広く应用されてきた。他の無機シンチレーターの可能性について、昨年度検討した結果、Gd の同位体を含む GSO(Ce) シンチレーターが有効であることを见いだした。Gd 同位体の热中性子に対する中性子捕获断面積と天然存在比を表 22 に示した。表 22 に示すように、 ^{157}Gd の断面積が極めて大きいため、GSO に入射した热中性子の

表 22: 大きな中性子捕获断面積をもつ Gd の同位体と、その存在比 [15]

同位体	热中性子捕获	天然存在比
	断面積 (barn)	(%)
^{152}Gd	1.1×10^3	0.20
^{155}Gd	6.1×10^4	14.8
^{157}Gd	2.54×10^5	15.7

うち、80%が ^{157}Gd に、18%が ^{155}Gd に捕获される。

热中性子捕获反応がおこると、高励起状態から多数の γ 線が放出される。そのうち、低エネルギーの γ 線は、GSO に高い効率で吸収されるため、この研究では、数 100keV 以下の低エネルギーのエネルギースペクトルに注目した。図 141 に、 ^{155}Gd と ^{157}Gd が热中性子を吸収して生成される ^{156}Gd と ^{158}Gd の低エネルギー励起状態の準位図を示した。両方の原子核とともに 80keV 付近の低エネルギー γ 線を放出する。この γ 線は GSO 検出器に高い効率で観測されることが予想される。低エネルギー γ 線が計測される 80keV 付近の計数率の変化に注目すれば、热中性子の効率的な計測が可能になると考へ、热中性子捕获反応に対する検出効率を測定し、応用の可能性を検討した。

この研究では、热中性子源として、Am-Be 中性子線源を使用した。この中性子線源からは平均 5MeV の高速中性子が放出される。しかし、今回の研究で注目した ^{155}Gd と ^{157}Gd は両方とも高速中性子よりも热中性子との反応に注目したいと考えた。そこで、パラフィンで中性子を減速して热中性子を得ることにした。パラフィンは多量の水素を含有するため、高速中性子を効率的に減速することができるうえ、ブロック状の固体パラフィンは成形が容易であるため、検出器の周囲を効果的に囲むことができる。今回の研究では厚さ 10cm のパラフィンブロックを GSO 検出器の周囲に配置した。

14.1 GSO(Ce) 検出器について

今回使用した GSO 結晶は、大きさ $50.8\text{cm}\phi \times 50.8\text{cm}$ の円柱状結晶である。蛍光信号波形は、減衰定数 $42 \pm 1\text{nsec}$ の速い成分と、 $452 \pm 4\text{nsec}$ の遅い成分がある。エネルギー分解能を良くするために、Shaping AMP の時定数を $1\mu\text{sec}$ に設定し、全蛍光を積分出来るようにした。回路図を図 142 に示した。図でわかるように、極めて簡便な測定システムである。この研究では、異常な中性子束のモニタリングを主たる目的としているため、回路をいかに簡単で低成本に抑えるかということを考慮した。

使用した回路および波高データ収集システムは次に示すとおりである。

1. High voltage power supply: ORTEC 556
2. スペクトロスコピーアンプ (S-AMP): ORTEC 673

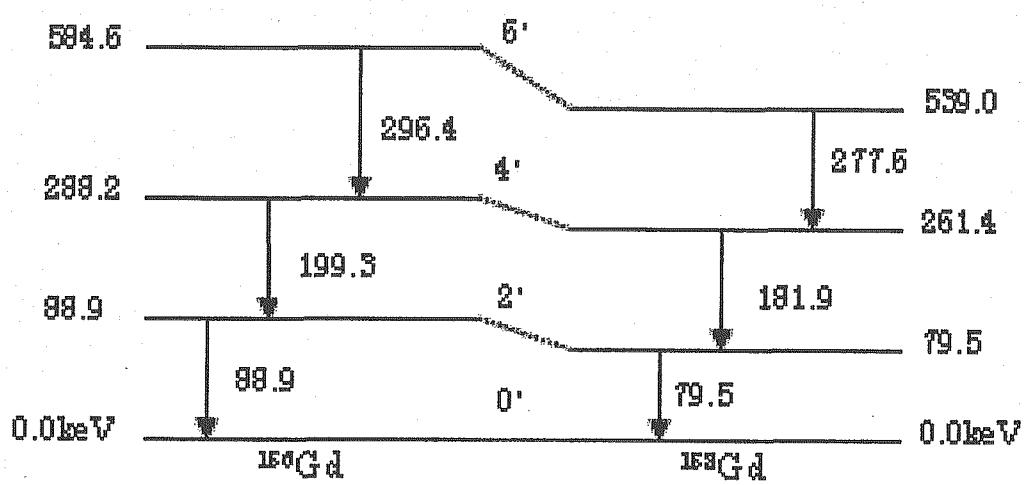


図 141: ^{156}Gd と ^{158}Gd の低エネルギー準位の図。それぞれの準位からの遷移に伴う γ 線のエネルギーも示した。

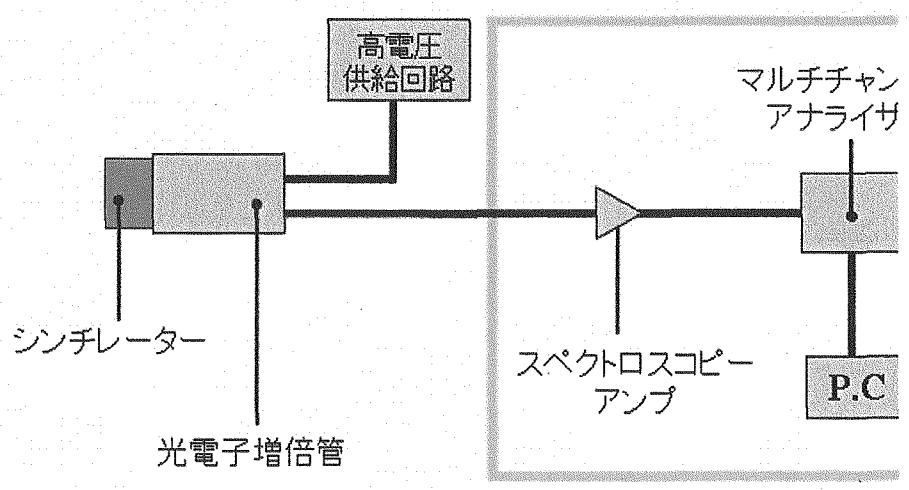


図 142: GSO シンチレーターによる熱中性子測定のための回路図

- Shaping time $1\mu\text{sec}$
- Coarse gain
- Fine gain
- Unipolar output

3. マルチチャンネルアナライザー AMPTEK MCA8000A

4. PC/AT 互換パーソナルコンピューター

今回の研究では、S-AMP の後にマルチチャンネルアナライザーを使用した。これは、エネルギースペクトルの変化を詳細に調べる必要があったためである。実機による応用段階では、 γ 線のエネルギーに対応する信号波高に調整したシングルチャンネルアナライザーを使用すれば、より安価で簡便なシステムにすることができる。

14.2 固有バックグラウンドの評価

GSO に含まれる放射性不純物に起因するバックグラウンドを測定し、GSO シンチレーターによる中性子計数に対する感度の最高値を調べた。

GSO に含まれる同位元素は、熱中性子に対する大きな中性子捕獲断面積を持つため、中性子線源から発生した高速中性子を検出器に最も近い場所で減速した。減速材には厚さ 5cm のパラフィンブロックを組み合わせて GSO(Ce) 結晶と光電子増倍管を覆った。

環境放射線によるバックグラウンドは、この測定方法にとって重大なバックグラウンドになりうる。なぜならば、 ^{155}Gd の熱中性子捕獲に伴って放出される γ 線は 80keV 付近に観測されるが、このエネルギー領域は、ウラン系列等の放射性同位元素の崩壊に伴う X 線の影響を強く受ける。そのため、GSO 検出器の周囲を厚さ 0.5cm の無酸素銅板で囲んで低エネルギー X 線の影響を除去した。また、高エネルギー γ 線のコンプトン散乱などによる連続バックグラウンドは極めて多く、熱中性子捕獲に伴う γ 線の強度に較べて圧倒的に強い。そのため、高感度な熱中性子モニタリングのために、全体を鉛の遮蔽体で覆わなければならない。

今回の実験では、厚さ 5cm の鉛、厚さ 5cm の固体パラフィン、厚さ 0.5cm の無酸素銅板で検出器を覆い、24 時間バックグラウンドを測定した。はじめに 1MeV 付近の高エネルギー領域まで測定して高エネルギーの γ 線の影響の有無を調べた。回路図および遮蔽体の配置図を図 143 に示した。先ほど述べたように簡潔なシステムを構成した。

実時間で 24 時間測定したエネルギースペクトルを図 144 に示した。およそ 400keV に見られる顕著なピークは、 ^{152}Gd の α 崩壊による α 線のピークである。更に高いエネルギー領域には、ウラン系列による α 線のピークが多数見られる。これらのピークが存在するものの、熱中性子に対する影響はほとんど無い。 ^{152}Gd による放射線は α 線だけであるため、 γ 線の様に低エネルギー領域にコンプトン散乱の様な連続スペクトルを作ることは無い。ウラン系列によるバックグラウンドが観測されていることから、ウラン系列の放射性同位元素の崩壊に伴う β 線、 γ 線の影響が懸念される。しかし、最近になって、GSO の高純度結晶を生成する技術が確立し、数 ppt 以下の含有率をもつ超高純度 GSO 結晶が制作されるようになった。このため、ウラン系列の不純物に起因するバックグラウンドは、異常時に発生する熱中性子に起因する γ 線強度にたいして充分に弱いと考えられる。

シンチレーター GSO(Ce): $5.08\text{cm} \times 5.08\text{cm}\phi$

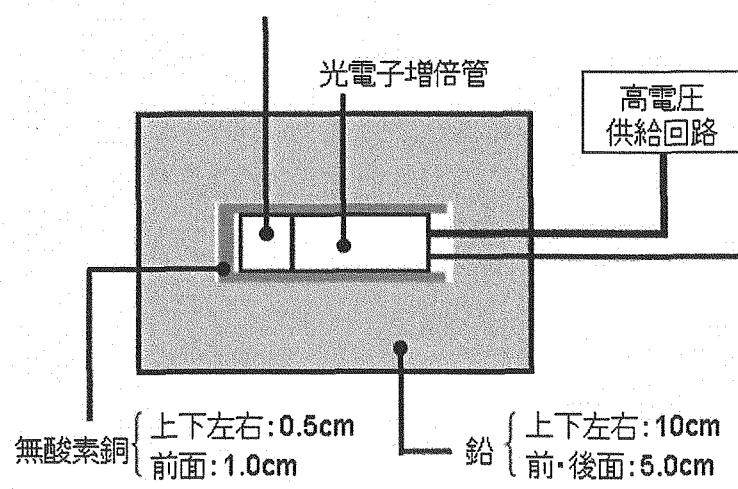


図 143: GSO シンチレーターの遮蔽体および回路の配置図

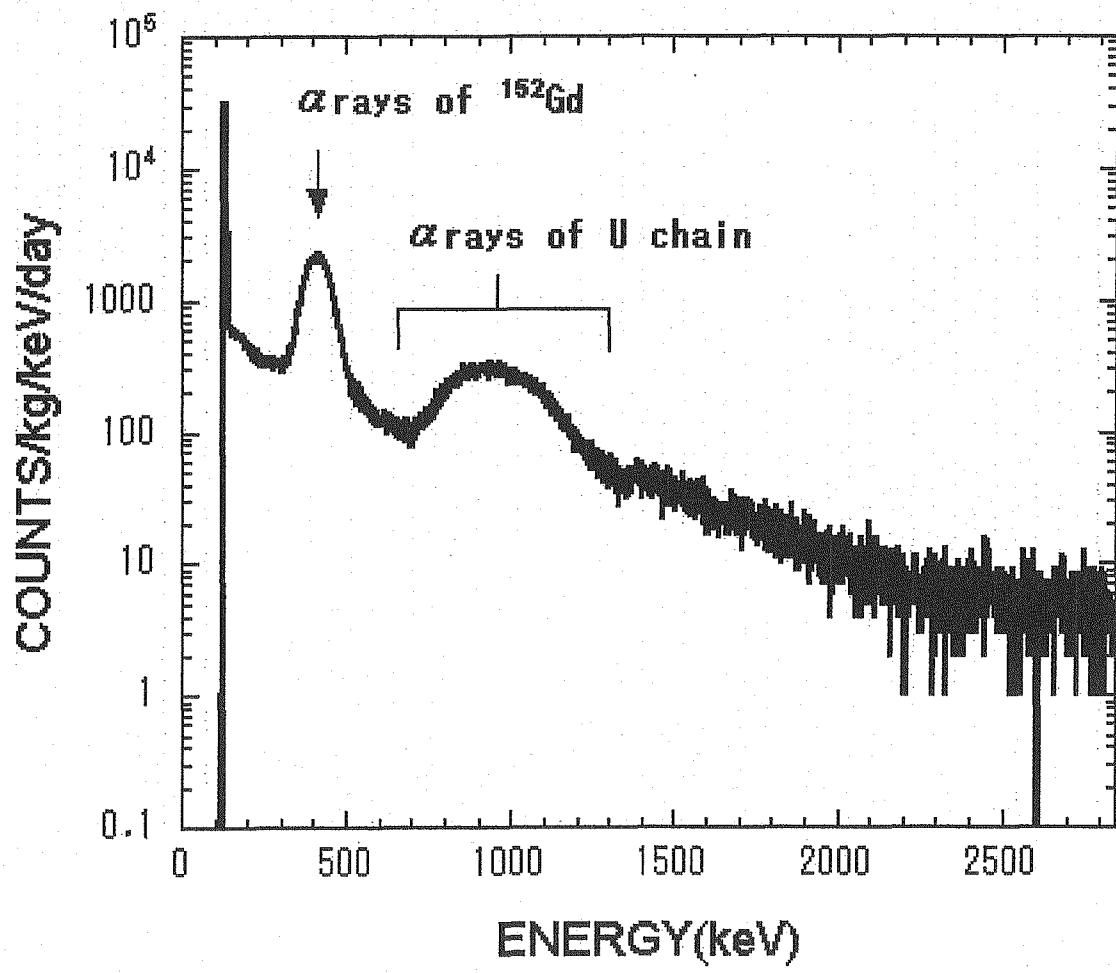


図 144: GSO 検出器に遮蔽体を施し、中性子線源を置かない場合のバックグラウンドエネルギースペクトル

300keV 以下の低エネルギー領域のエネルギースペクトルを図 145 に示した。エネルギー閾値は、80keV 付近に見られる非弾性散乱に起因する γ 線のエネルギーよりも充分低いことがわかる。また、その近辺に妨害ピークは観測されていないため、高い感度と高い精度の計数が可能であると考えられる。

14.3 中性子照射実験

熱中性子の照射実験は、Am-Be 中性子線源から発生する高速中性子を、厚さ 5cm のパラフィンで減速した熱中性子場に GSO を設置した。実験装置の配置図を図 146 に示した。中性子照射の測定は実時間で 24 時間おこなった。この測定によって感度評価を求めるために充分な統計精度を得た。

熱中性子を照射した場合のエネルギースペクトルを図 147 に示した。熱中性子を照射しない場合のバックグラウンドとの比較をおこなうと、80keV の近辺で僅かな違いが見られた。

この違いを詳細に調べるために、照射時と非照射時のエネルギースペクトルの差をとったエネルギースペクトルを調べた。差のエネルギースペクトルを図 148 に示した。差のエネルギースペクトルでは、79keV のピークが顕著に見られた。今回の測定の 80keV におけるエネルギー分解能は 19 %、FWHM は 22keV であった。その他にも、277.6keV や 181.9keV の γ 線によるピークが見られる。更に高いエネルギーの γ 線に起因するコンプトン散乱の連続スペクトルが存在するため、全体に計数率が高くなっていることがわかった。

顕著に観測された 3 つの γ 線ピークのうち、最も明瞭に観測された 79keV のピーク強度をもとに中性子の検出効率を評価した。熱中性子に充たされた実験室が無いため、熱中性子に対する絶対効率の測定は、現有の施設では困難である。そこで、今回の測定では線源から放射された高速中性子に対する計数効率を考えた。

14.4 検出効率の評価

中性子線源は点状の線源で、3.7MBq の ^{241}Am から放出される α 線によって収率は 70neutrons/ $10^6\alpha$ である [18]。従って、毎秒 260 個の高速中性子が一様等方な角分布で放出されている。Am-Be 中性子線源からは ^{241}Am の α 崩壊に伴う 60keV の γ 線が発生するが、線源は鉛シールドの外側に配置したので 60keV の γ 線は鉛によって完全に遮蔽される。

GSO に含まれる ^{155}Gd の熱中性子捕獲断面積は極めて大きいため、熱中性子捕獲反応は殆んどが GSO 結晶の表面で起こる。79keV のピーク強度を Y として今回の検出器システムの高速中性子に対する検出効率は、式(29) によって求めた。

$$\epsilon(\text{cm}^{-2} \cdot \text{Neutrons}^{-1}) = \frac{4\pi Y d^2}{3NS} \quad (29)$$

ここで、 d は、高速中性子線源から GSO 結晶表面までの距離、 N は高速中性子線源から 1 秒に放出される高速中性子の数である。今回の測定によって得られたデータは、中性子照射時のエネルギースペクトルから非照射時のエネルギースペクトルを引いたスペクトル(図 148) を用いた。このエネルギースペクトルに顕著に観測されたピーク、即ち 59keV から 108keV の領域に計数されたカウント数から計数効率を求めた。結果を表 23 に示した。表 23 に示す計数値の差は、 $(8.06 \pm 0.22) \times 10^3$ であった。この計数値から検出効率を求ると、 $7.2 \pm 0.2\%$ になった。

検出効率の検討と比較は、後の章で NaI(Tl) による結果とまとめて議論する。

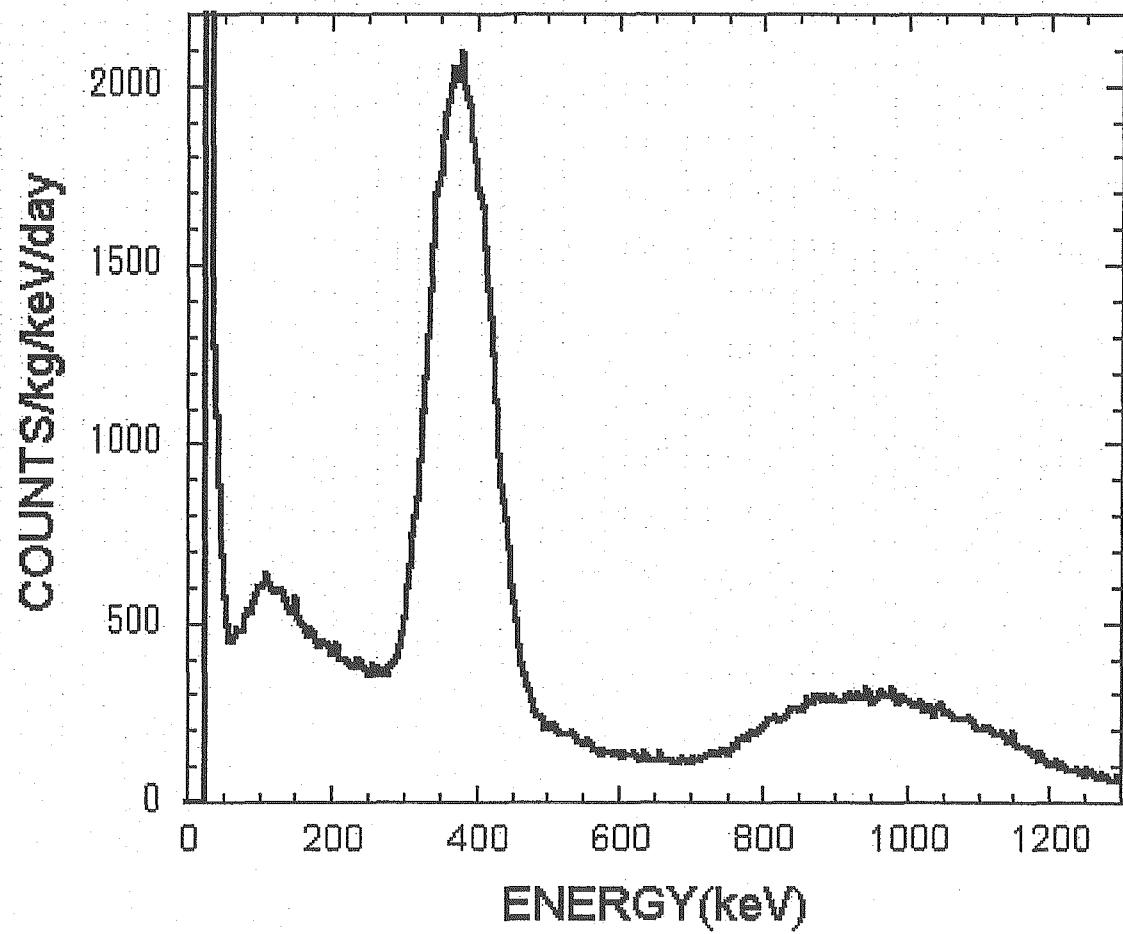


図 145: GSO に遮蔽体を施した場合の低エネルギースペクトル。

表 23: GSO(Ce)による熱中性子計測に対する各測定値。

測定データ	測定値
GSO 表面と線源の距離 d	16.0 cm
GSO の表面積 S	20.26cm^2
非照射時の計数値	19482
照射時の計数値	27546

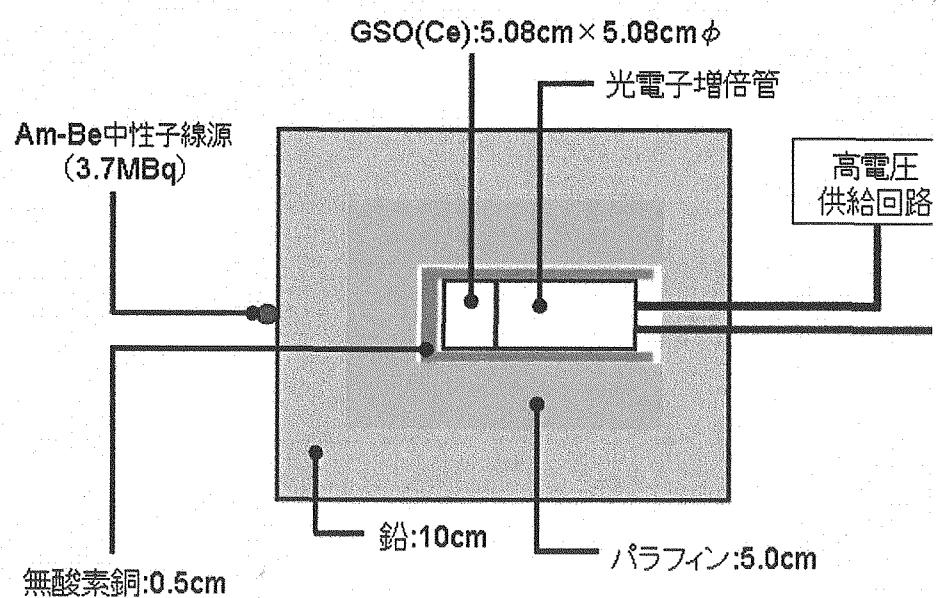


図 146: GSO に熱中性子を照射する実験の配置図。鉛の遮蔽体、パラフィンの減速材の内部に GSO 検出器を設置した。

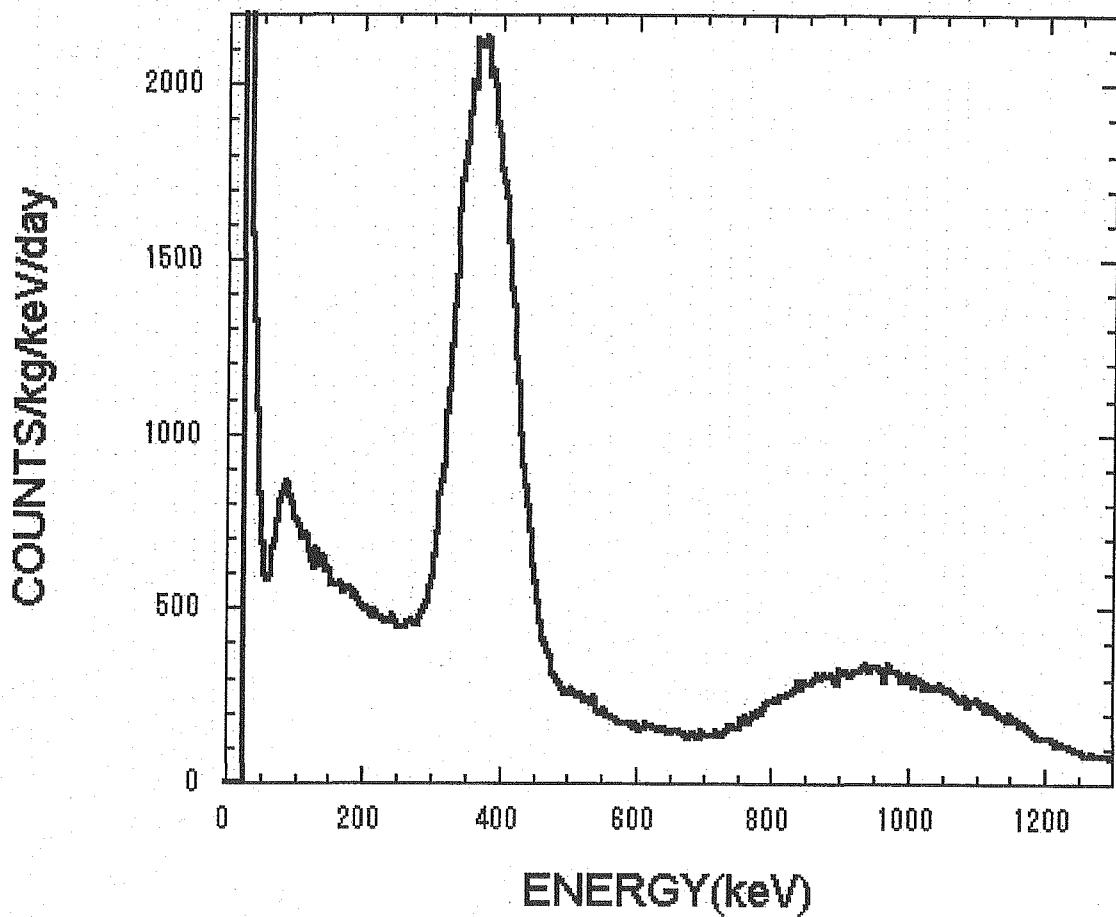


図 147: 熱中性子を照射した場合のエネルギースペクトル。中央に見られる大きなピークは、 ^{152}Gd の α 崩壊による α 線のピークである。

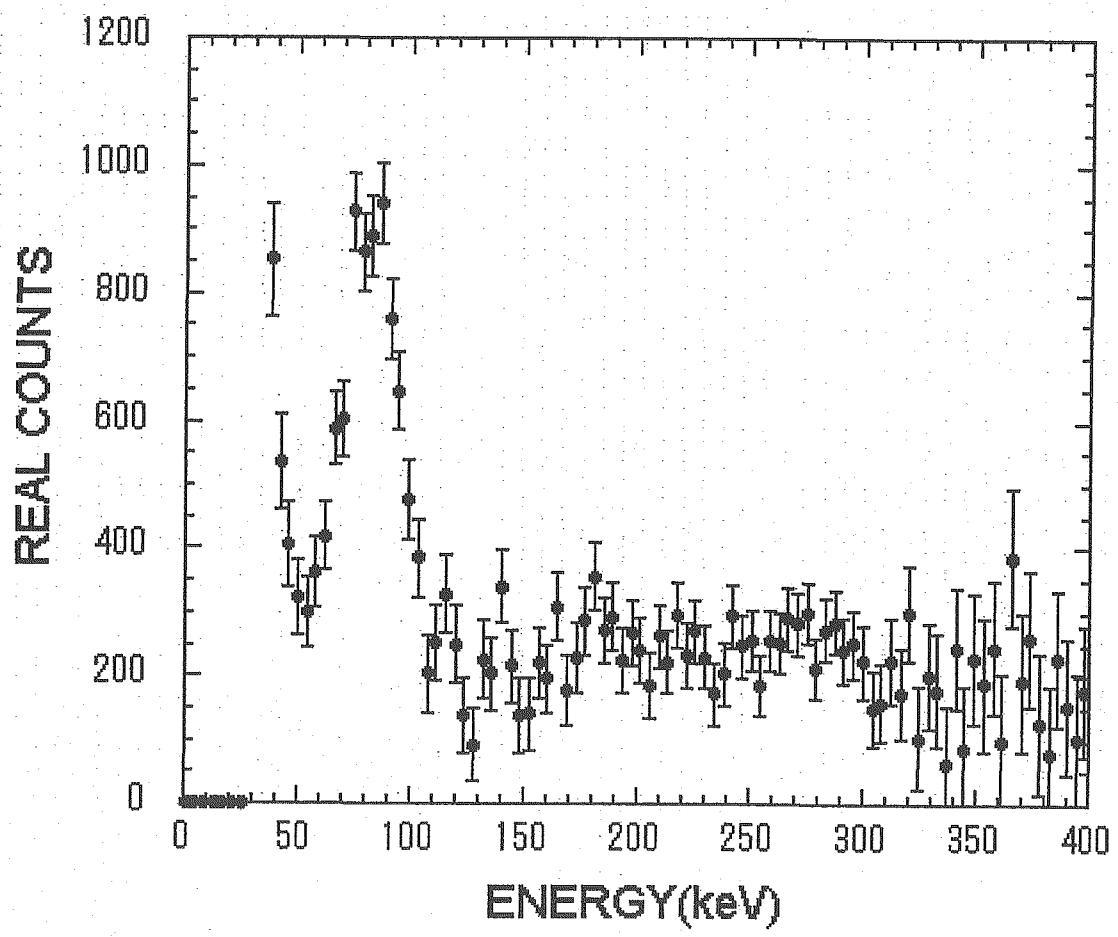


図 148: 热中性子の照射時のエネルギースペクトルから非照射時のエネルギースペクトルをひいたスペクトル。

15 非弾性散乱による高速中性子の測定

原子力施設に於けるトラブルに伴う中性子は、はじめに高速中性子として放出されるため、高速中性子を直接計数することができればよいモニタリングシステムとして応用することができる。現在では高速中性子は液体シンチレーターによる反跳陽子を測定する方法でおこなわれている。この方法は、計測されたエネルギースペクトルをアンフォールディングすることによって中性子のエネルギー分布が測定できる。また、液体シンチレーターには、中性子と γ 線の蛍光波形弁別法が確立しているため、 γ 線によるバックグラウンドに影響されない計測が可能である。

しかしながら、原子力施設における異常な中性子のモニタリングにとって、中性子のエネルギー分布は必要な情報ではない。高速中性子の流束が通常レベルに対してどの程度増加したかという情報を長期間にわたって安定にモニタリングしつづけることが重要である。そのような目的に対しては、有機液体シンチレーターは最適ではない。なぜならば、有機液体シンチレーターを安定した性能に保つためには、溶存酸素の除去等定期的なメンテナンスが必要とされるからである。

これに対して、無機シンチレータによる、原子核と高速中性子の非弾性散乱の測定では、中性子のエネルギー分布が観測できないものの、高い感度で鮮明なピークが観測されるため、異常な強度の高速中性子計数には最適である。安定同位元素のうち、高速中性子によって励起されやすい励起状態をもつ原子核は表 24 に示したように多数存在する。また、それぞれの同位体を含む放射線検出器も同時に紹介した。

^{19}F は励起エネルギーが高いことと、励起断面積が大きくないことから、 BaF_2 で行なった先行実験の結果のとおり、109keV 付近に明瞭なピークは見られなかった。そのため、 ^{19}F を用いた放射線検出器は高速中性子測定には適さない。Ge 半導体検出器は他の高エネルギー励起状態にも励起する反応が測定されている [19]。しかし、この反応断面積は小さいため、極めて大規模な中性子洩れが起こらない限り、充分な感度を得ることができない。 ^{133}Cs は、最近極めて高純度の $\text{CsI}(\text{Tl})$ 結晶が制作されはじめたこともあり注目されつつある放射線検出器である。励起状態のエネルギーは少々高いが有望な放射線検出器の一つとして考慮すべきであろう。Gd の各同位体は低エネルギーに励起状態を持つ有望な原子核にみえるが、これらの同位体は、Gd の熱中性子捕獲によって生成され、同じエネルギーの γ 線を放出する。つまり、GSO は高速中性子にも熱中性子にも感度をもつてしまい、その区別はつかない。この不定性を除くため、前章の GSO による測定では GSO をパラフィンで覆い、高速中性子による寄与を除去したのであった。このような背景があるため GSO 検出器を高速中性子検出器として使用することには問題がある。 HgI_2 は常温でも動作する半導体として、注目をあびていたが、電子とホールの移動度の違いが大きいため、反応が起こった位置による信号の依存性が大きいこと、数 cm 四方といった大型の結晶を作ることが困難であることなどの問題があり、最近では使用されていない。

^{127}I は、存在比 100%、低エネルギー励起状態に励起されやすい励起状態があるため、非弾性散乱による高速中性子の計数に有利である。そのうえ、 $\text{NaI}(\text{Tl})$ は安価で大型の結晶を製造することができるため、広範囲な中性子モニターとして応用することが可能である。検出器の安定性は、主として光電子増倍管のゲイン変動が挙げられる。これは、光電子増倍管の温度管理およびモニタリングによる補正を行なうことで変動の影響を除去することができる。一年以上の連続計測に対して極めて高い精度で安定したゲインを保って測定している例が多数ある [17, 20, 21]。

表 24: 低エネルギー励起状態を持つ、安定同位元素と、それを含む放射線検出器。 HgI_2 はシンチレーターではなく半導体検出器であるが、低エネルギーに励起状態を持つため紹介した。

同位体	存在比 (%)	励起エネルギー (keV)	放射線検出器
^{19}F	100	109.9	$BaF_2, CaF_2(Eu)$
^{73}Ge	7.8	13.2	GSO, Ge^*
^{73}Ge	7.8	66.7	GSO, Ge^*
^{127}I	100	57.6	$NaI(Tl)$
^{133}Cs	100	81	$CsI(Tl)$
^{154}Gd	2.1	123.1	$GSO(Ce)$
^{155}Gd	14.8	60.0	$GSO(Ce)$
^{156}Gd	20.6	89.0	$GSO(Ce)$
^{157}Gd	15.7	54.5	$GSO(Ce)$
^{158}Gd	24.8	79.5	$GSO(Ce)$
^{201}Hg	13.2	32.19, 1.58	HgI_2

15.1 低エネルギー励起状態への励起現象の観測

低エネルギー励起状態への、非弾性散乱による励起は、引き続き発生する γ 線を効率よく測定することによって、明確なピークを計測できるため、不定性が極めて小さい測定を行うことができる。表24に示した原子核のうち、 ^{127}I は、励起状態のエネルギーが低いうえ、NaI(Tl)検出器は ^{127}I を質量比で85%含有するために、中性子に対する非弾性散乱の確率が高い。また、NaI(Tl)検出器は高感度の γ 線検出器であり、 γ 線の発生源が検出器本体の内部であるため、発生した γ 線がおよそ100%という極めて高い効率で検出される。

^{127}I の低エネルギー励起状態の準位図を図149に示した。

角運動量 J の状態から、 $J' = J \pm 1$ の低エネルギー励起状態への非弾性散乱を起こす散乱断面積はスピン核行列要素

$$\langle A^* | s | A \rangle = \sqrt{\frac{2J'+1}{2J+1}} \frac{1}{g_M} \langle A | M1 | A^* \rangle \quad (30)$$

に比例する。ここで、

$$g_M = \frac{e\hbar}{2M} \sqrt{\frac{3}{4\pi}} \frac{g_s - g_e}{2}$$

は $M1\gamma$ 結合定数である。 $\langle A | M1 | A^* \rangle$ は $M1\gamma$ の遷移確率から実験的に求められ、0.10と比較的大きな値をもつため、非弾性散乱の確率が高いことが予想される[22]。

NaI(Tl)は57.6keVの励起状態の他に、202.92keVなどの励起状態があるが、エネルギーが高すぎるため励起反応の確率が小さくなることから、今回の研究では57.6keVの励起状態のみに注目した(図149参照)。

15.2 低バックグラウンド環境におけるバックグラウンド測定

はじめに、NaI(Tl)の高速中性子に対する感度を評価し、非弾性散乱の測定に対する有効性を確認するため、低バックグラウンド測定をおこなった。NaI(Tl)の周囲に厚さ10cmの鉛を積み、環境放射線に伴う γ 線の影響を遮蔽した。鉛は中性子や高エネルギー γ 線との反応によって70keV付近のX線を放射する。この放射線は ^{127}I の γ 線にとって妨害になりうるため、厚さ0.5cmの高純度無酸素銅を鉛遮蔽体とNaI(Tl)シンチレーターの間に挿入した。この銅板によるX線吸収率は、70keVの光子に対する銅の光子減弱定数が $\mu = 7.630 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{g}$ であるから、次式のように

$$\begin{aligned} \frac{I}{I_0} &= \exp(-x\mu\rho) \\ &= \exp(-0.5 \times 7.630 \times 10^{-1} \times 8.93) \\ &= 3.3 \times 10^{-2} \end{aligned} \quad (31)$$

まで減弱されるため、鉛のX線による影響は無視できる。図150にNaI(Tl)検出器を遮蔽した遮蔽体の構成図を示した。

低バックグラウンド測定は実計測時間で24時間行った。エネルギースペクトルを図151に示した。エネルギー較正は低エネルギー(300keV以下)で行ったため、511keVの電子対消滅 γ 線の位置がずれているが、今回の研究においては影響がない。

100keV以下の低エネルギー領域に注目すると、50keV付近の計数率が最も低い計数率になっている。このことから、この計測条件で高速中性子に対する感度は十分に高いと考えられる。高エネ

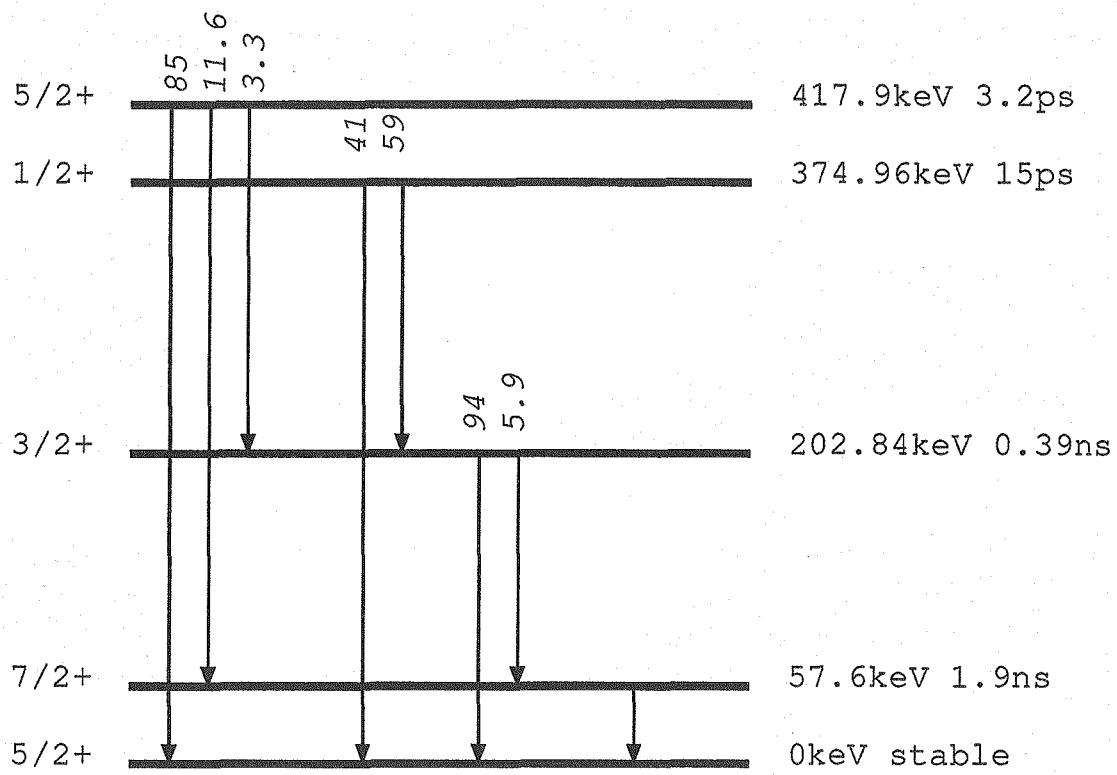


図 149: ^{127}I の低エネルギー励起状態の準位図。500keV 以上の高エネルギー準位は、高速中性子による励起がほとんど起こらないため、省略した。エネルギー準位の右側にはそれぞれのエネルギー準位の励起エネルギーとその準位の半減期、左側にはスピンとパリティを示した。各準位からの遷移は縦矢印で示し、それぞれの遷移強度比を斜体字で示した。

シンチレーター $\text{NaI}(\text{TI})$: $5.08\text{cm} \times 5.08\text{cm}\phi$

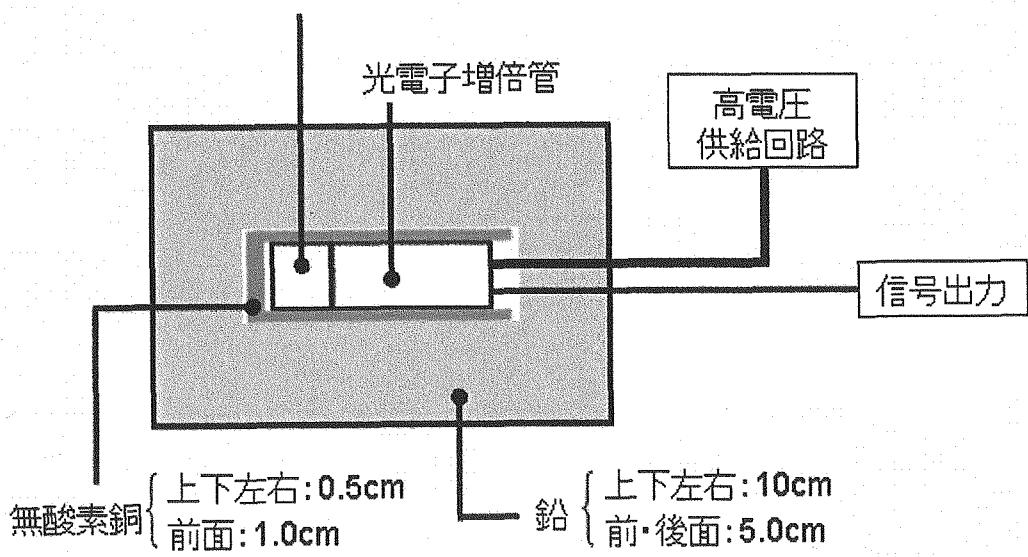


図 150: $\text{NaI}(\text{TI})$ を囲む遮蔽体の構成。無酸素銅と鉛で外部から飛来する環境放射線源起因の γ 線を遮蔽した。

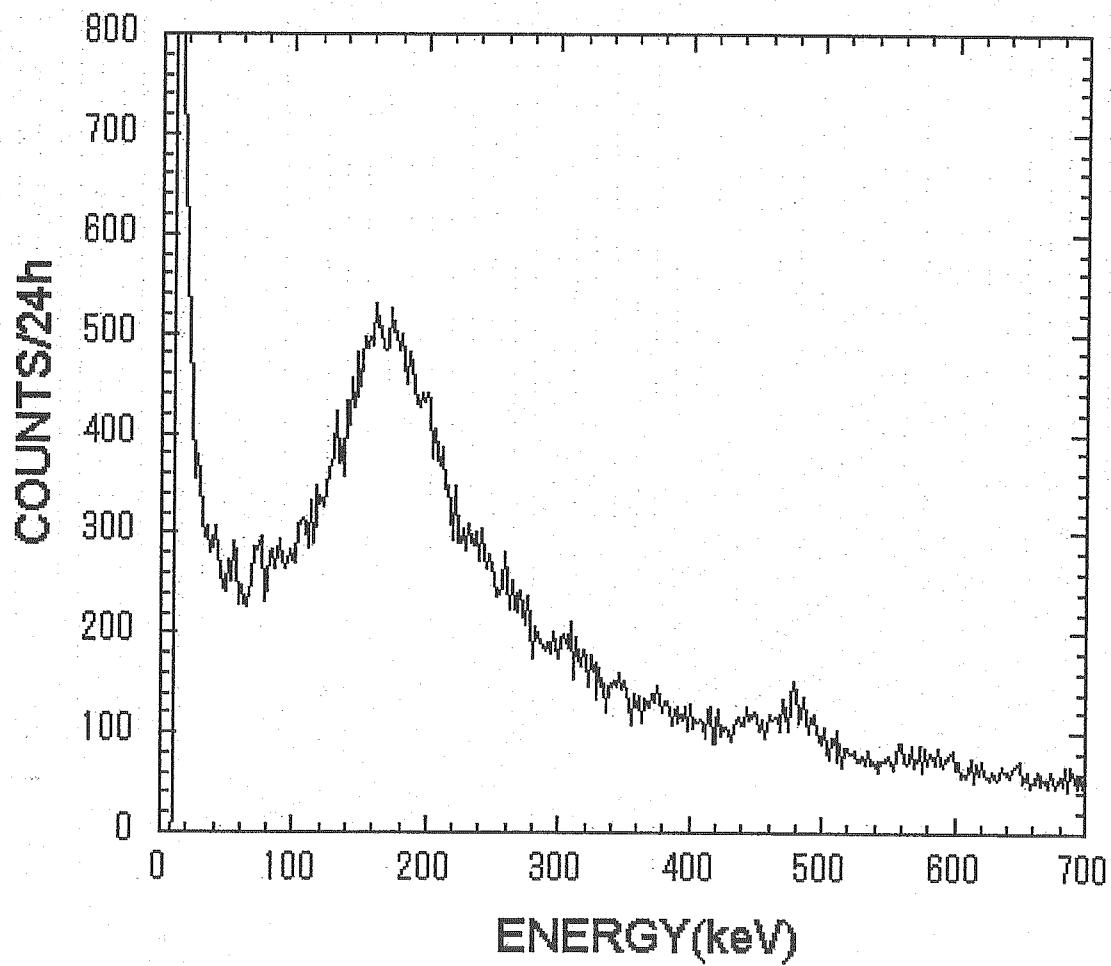


図 151: 低バックグラウンド測定による NaI(Tl) のエネルギースペクトル。

ルギー励起状態への励起を計測しようと考える場合は、エネルギー準位図(図149)に示すような200keVから420keVにわたるエネルギー領域で十分に低い計数率であることが要求される。ところが、遮蔽体を用いて γ 線を遮蔽したエネルギースペクトルでも200keV付近に大きなピークがみられている。これは検出器内部に含まれるカリウム40による β 線のエネルギースペクトルおよび高エネルギー γ 線のコンプトン散乱が重なったものであると考えられる。

15.3 低バックグラウンド環境における高速中性子測定

低バックグラウンド環境に設置した NaI(Tl) に高速中性子を照射してその応答を調べた。NaI(Tl) 検出器は、鉛と銅の遮蔽体で囲んで周囲の γ 線を除去している。配置図は、図 150 と同じである。写真を図 152 に示した。

高速中性子線源は、3.7MBq の ^{241}Am を有する Am-Be 線源を用いた。NaI(Tl) の前面と中性子線源との距離は 16cm に保った。NaI(Tl) 前面と線源の間には銅と鉛の遮蔽体があるため、少なくとも 11cm の間隔ができる。さらに、この後で説明する検証のための実験を行うため、遮蔽体と中性子線源との間に更に 10cm の間隔をあけた。

高速中性子線源を設置して中性子を照射した時のエネルギースペクトルを図 153 に示した。この測定は、高速中性子を実測定時間で 24 時間測定した結果である。57.6keV への非弾性散乱による γ 線ピークが極めて明瞭に観測されていることがわかる。高速中性子照射によるエネルギースペクトルの変化を調べるために、中性子を照射しない場合のバックグラウンドを引いたエネルギースペクトルを作り、最終的な感度を評価することにした。図 154 に中性子照射によって増加したエネルギースペクトルを示した。170keV 付近に現れる幅の広いピークの原因は不明である。おそらく、中性子と周囲の物質との反応に伴う高エネルギー γ 線による影響と考えられる。注目すべき点は 57.6keV のピークである。図に示すように、極めて明瞭なピークが観測されている。このエネルギー領域について詳細かつ正確に解析するために、エネルギー較正を入念に行った。

エネルギー較正は標準 γ 線源を使用した。表 25 に使用した γ 線源とそのエネルギーを示す。400keV

表 25: エネルギー較正に使用した標準 γ 線源。

γ 線源	γ 線又は X 線のエネルギー (keV)
^{133}Ba	31
	81
	356
^{241}Am	60
^{22}Na	511
^{137}Cs	662

以下の低エネルギーに注目してエネルギー較正を行った結果、極めてよい直線性が得られていた。

低エネルギー領域のエネルギースペクトルを拡大し、57.6keV の γ 線をガウス分布であると仮定してフィッティングを行い、57.6keV のピーク強度を求めた。その結果を図 155 に示した。

図 155において、40keV 以下にみられる連続的なスペクトルは、高速中性子と NaI(Tl) に含まれる Na 原子核との弾性散乱によるエネルギースペクトルである。Na 原子核の反跳に対する NaI(Tl) の蛍光応答は、同じ運動エネルギーを持つ電子の 40%[17] であるため、このような低エネルギー領域に集中して分布する。I 原子核も同様なエネルギースペクトルを作りうるが、I 原子核の反跳に対する蛍光応答はわずか 7% であるため、この測定ではエネルギーが低すぎて測定する事ができない。

57.6keV の γ 線に注目してみると、今回の実験で得られたエネルギー分解能は半値全幅で 10.8keV となっており、この大きさの NaI(Tl) 検出器として十分なエネルギー分解能を示している。Ge 半導体検出器などで高速中性子の応答を測定すると、励起状態から放出される γ 線ピークの高エネルギー側に、反跳 Ge によるテイルが観測されることがある。しかし、NaI(Tl) の場合は反跳されるヨウ素原子核に対する蛍光応答が極めて小さいため、10keV 程度の半値全幅ではそのテイルをみる

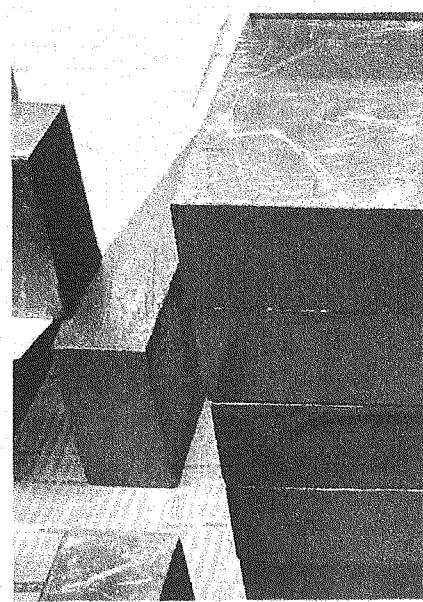


図 152: NaI(Tl) 検出器を遮蔽体に設置した様子。内部の NaI(Tl) 検出器が見えるように鉛ブロックを一部取り外したが、実際の実験中は全体を鉛ブロックで囲んだ。

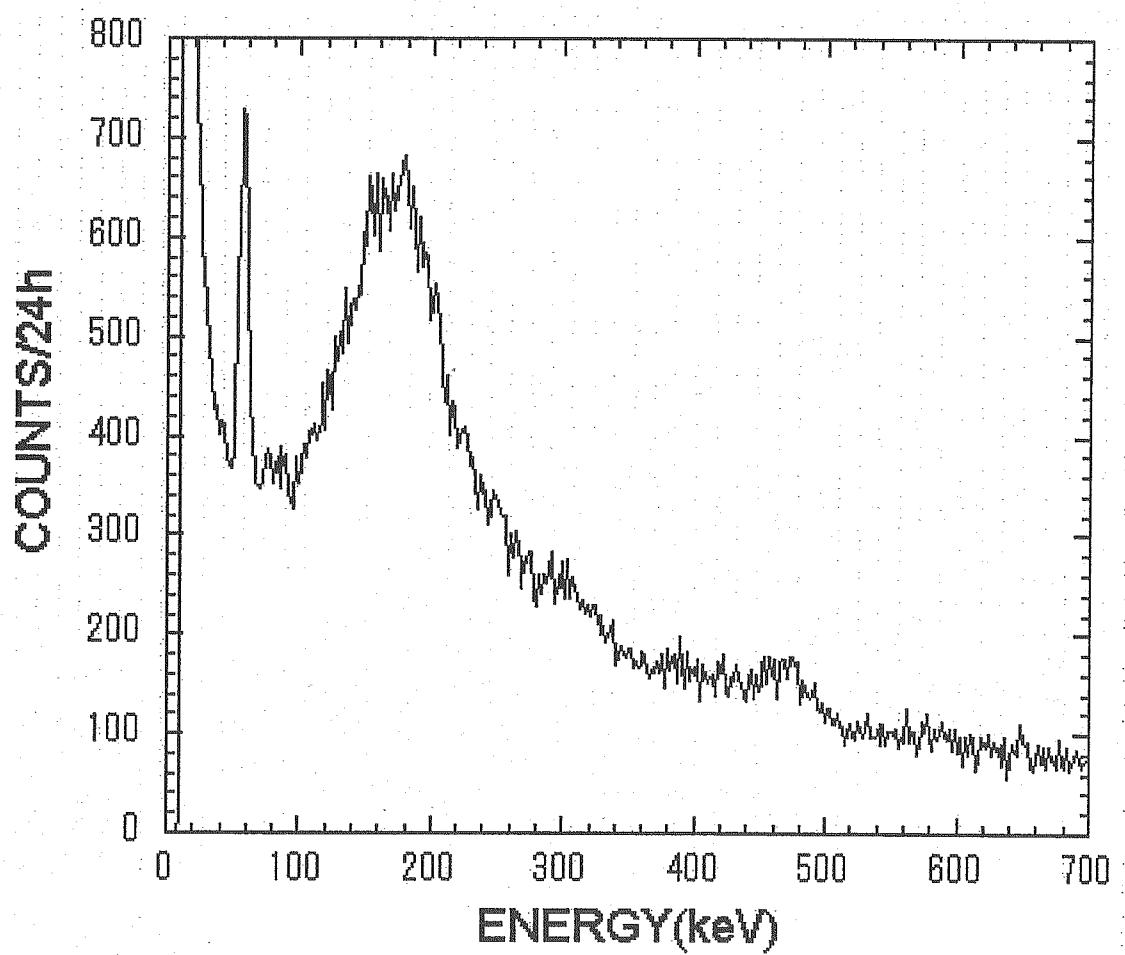


図 153: NaI(Tl) に高速中性子を照射した場合の応答。

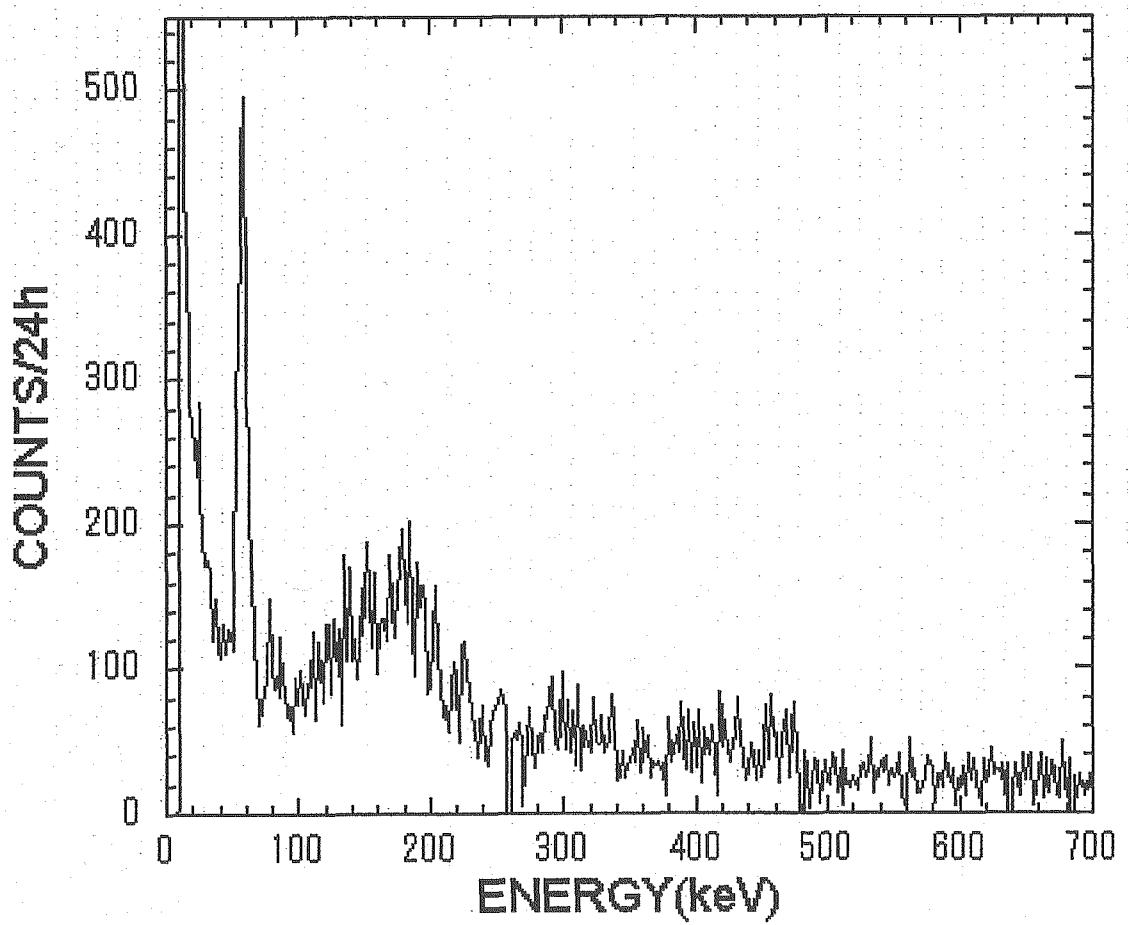


図 154: 中性子照射中のエネルギースペクトルと非照射時のエネルギースペクトルの差。

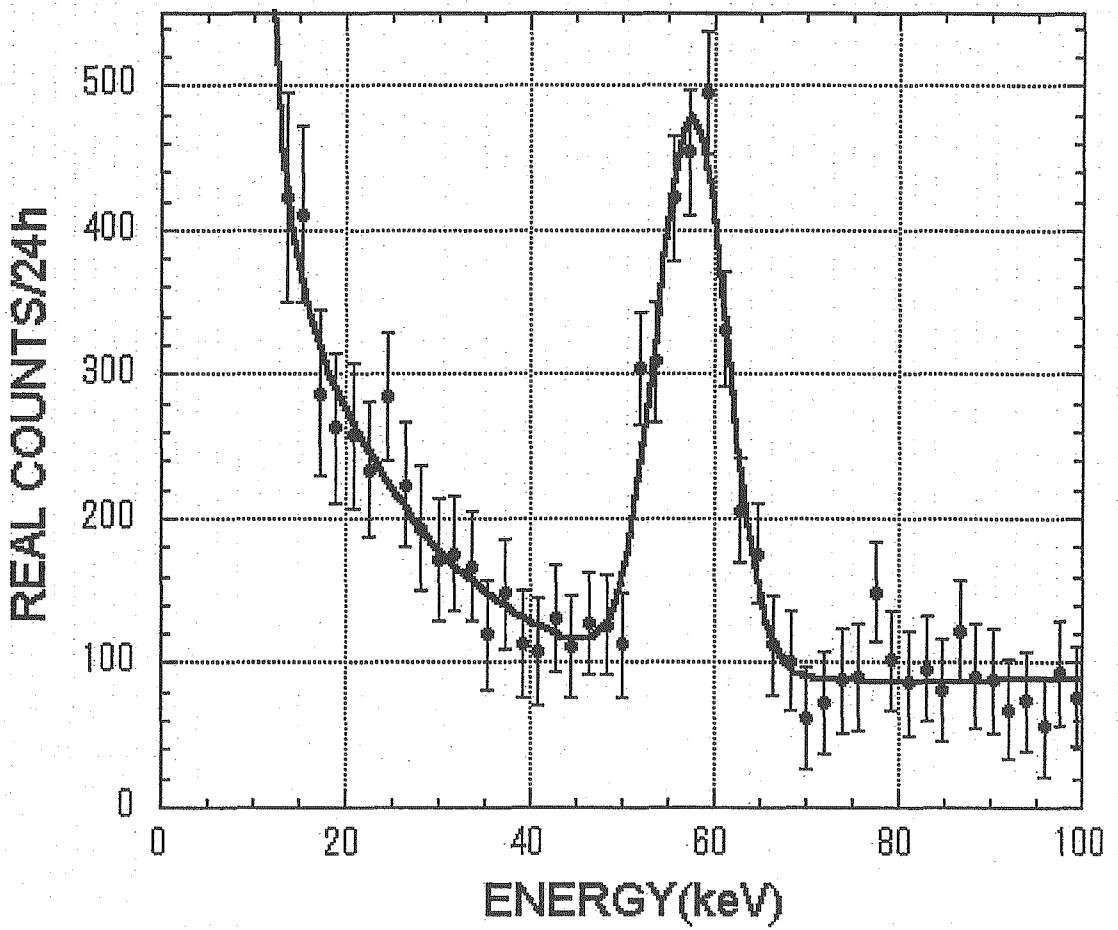


図 155: 低エネルギー領域の拡大図。実線はガウス分布と連続エネルギースペクトルで実験データをフィットした結果。

ことができない。

このエネルギースペクトルから、高速中性子に対する計数効率を調べる前に、このピークが本当に高速中性子に起因するものであるかどうかを検証する測定を行った。前述の 57.6keV のピークが本当に高速中性子に起因するものであるならば、高速中性子を減速材で減速してしまえばピーク強度が減衰するはずである。このような測定を行った理由は、我々が用いた中性子線源は Am-Be であるため、²⁴¹Am の α 崩壊に伴う 59.5keV の γ 線が多量に放出されるからである。59.5keV の γ 線が遮蔽体の隙間などから侵入している可能性を確認し、観測されたピークが真に高速中性子によるものであることを確認した。

実験では、中性子線源と遮蔽体の間に、新たにパラフィンブロックを置き、このパラフィンブロックによって高速中性子の減速を行った。パラフィンブロックは、5cm×10cm×20cm のブロックを組み合わせて、線源と NaI(Tl) の間に 5cm、10cm のパラフィンを置いてそれぞれ測定を行った。図 156 にその概念図を示した。

図中の赤い点の部分に Am-Be 高速中性子線源を置いた。すべての測定に対し、線源と NaI(Tl) 検出器の距離は同じになるよう注意した。パラフィンのうち 3 と称されているものは、実験室後方の壁などに反射して迷い込んでしまう高速中性子をなくすため、後方に飛んでいく高速中性子を減速するために、実験の全条件に対して共通に設置した。パラフィンの 1 はパラフィン 5cm の厚さの時に、厚さ 10cm の時にはパラフィンの 1 と 2 を同時に置いて測定を行った。それぞれの測定は実時間で 24 時間行った。

図 158 から 160 に、それぞれのエネルギースペクトルを示した。

図 158 では、明瞭な γ 線ピークが 57.6keV に観測されている。このデータによる、57.6keV にみられるピークの強度を基準として、パラフィンの設置による強度の変化を調べた。はじめにフィットすべき関数を検討した。

フィットする関数は、57.6keV のガウス分布と連続エネルギースペクトルと低エネルギーにみられる X 線である。はじめに、57.6keV の γ 線は、57.6keV にピークを持ち、半値全幅 10.8keV の分解能を持つガウス分布とし、ピークの高さだけを変数にしてフィッティングを実行した。また、連続エネルギースペクトルは、定数と指数関数の足しあわせとした。定数は、高エネルギー γ 線のコンプトン散乱によるエネルギースペクトルを、指数関数は Na 原子核の弾性散乱によるエネルギースペクトルを再現する。中性子が減速されると、熱中性子捕獲反応が起こり、¹²⁸I が生成される。¹²⁸I は半減期 24.99 分で ¹²⁸Xe(分岐比 94%) または ¹²⁸Te(分岐比 6%) に崩壊する。この崩壊に伴って、Xe または Te の X 線が観測される。このピークはおよそ 28keV にピークを作る。Te と Xe の X 線のエネルギー差はわずか 2keV であるため、両者の区別は不可能である。以上の 3 成分の関数を用いて、エネルギースペクトルをフィットした。図では、57.6keV のガウス分布をのぞいた、バックグラウンド成分のフィット結果を破線で示していた。

パラフィンを 5cm 置いた時のエネルギースペクトルが図 159 に示されている。この図では、57.6keV のピークが低くなり、代わりに 25keV 付近に X 線のピークが現れていることがわかる。X 線のピークは 57.6keV のピーク強度を求める際に妨害ピークとして影響を及ぼすことはないと判定できた。

パラフィンの厚さを 10cm にしたときには、高速中性子によると思われる 57.6keV の γ 線強度は更に減少した。一方 25keV 付近にみられる X 線の強度は大きくなっていない。これは、熱中性子捕獲によって生成される ¹²⁸I の半減期が 24.99 分と短いため、急速に ¹²⁸I の生成と崩壊の平衡に達してしまうためと考えられる。そのため、今回のような 24 時間という長時間の積算によるエネルギースペクトルではその強度には変化がみられなかった。

図 161 にみられるように 57.6keV のピーク強度の変化が、パラフィンの減速によるものかどうか

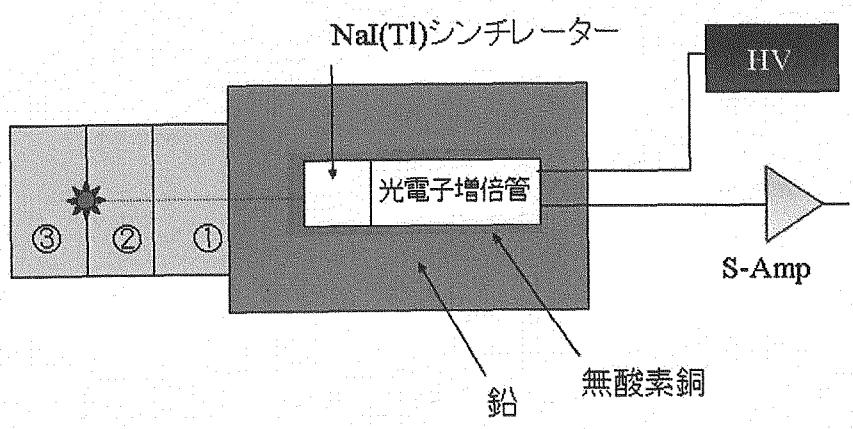


図 156: 中性子を減速させる実験の概念図。

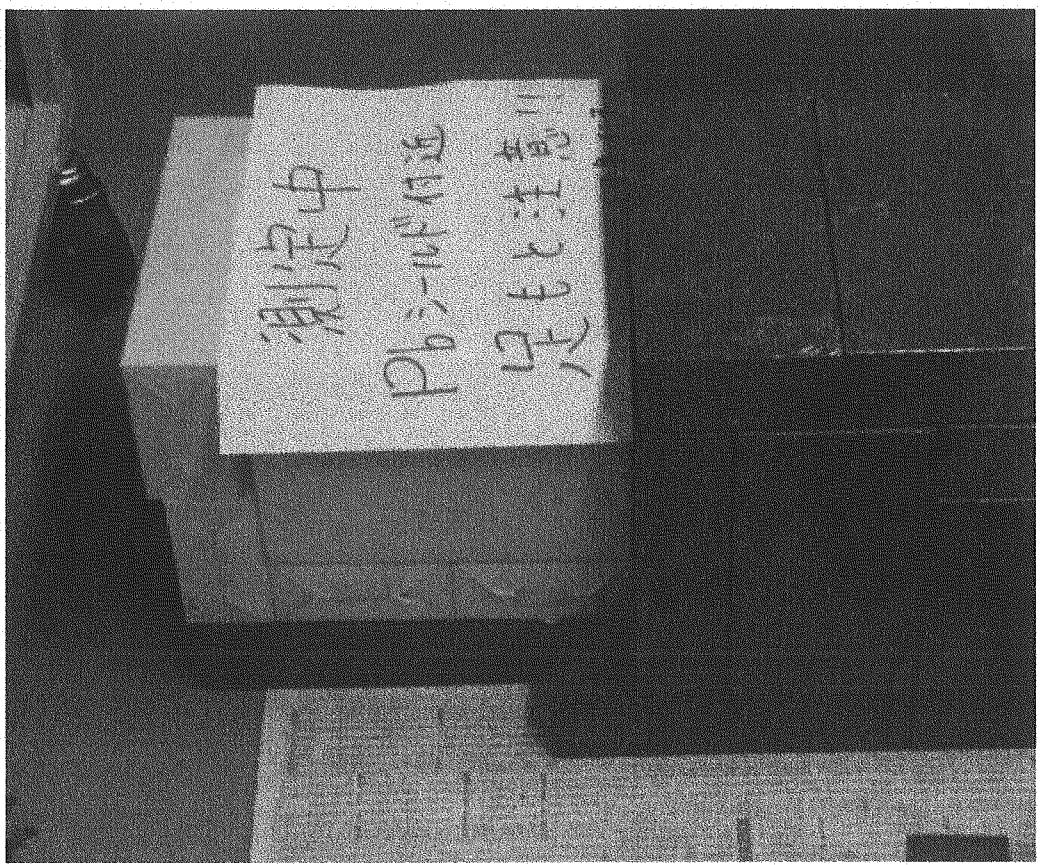


図 157: 中性子を減速させる実験の装置写真。黄色いブロックはパラフィンブロックである。

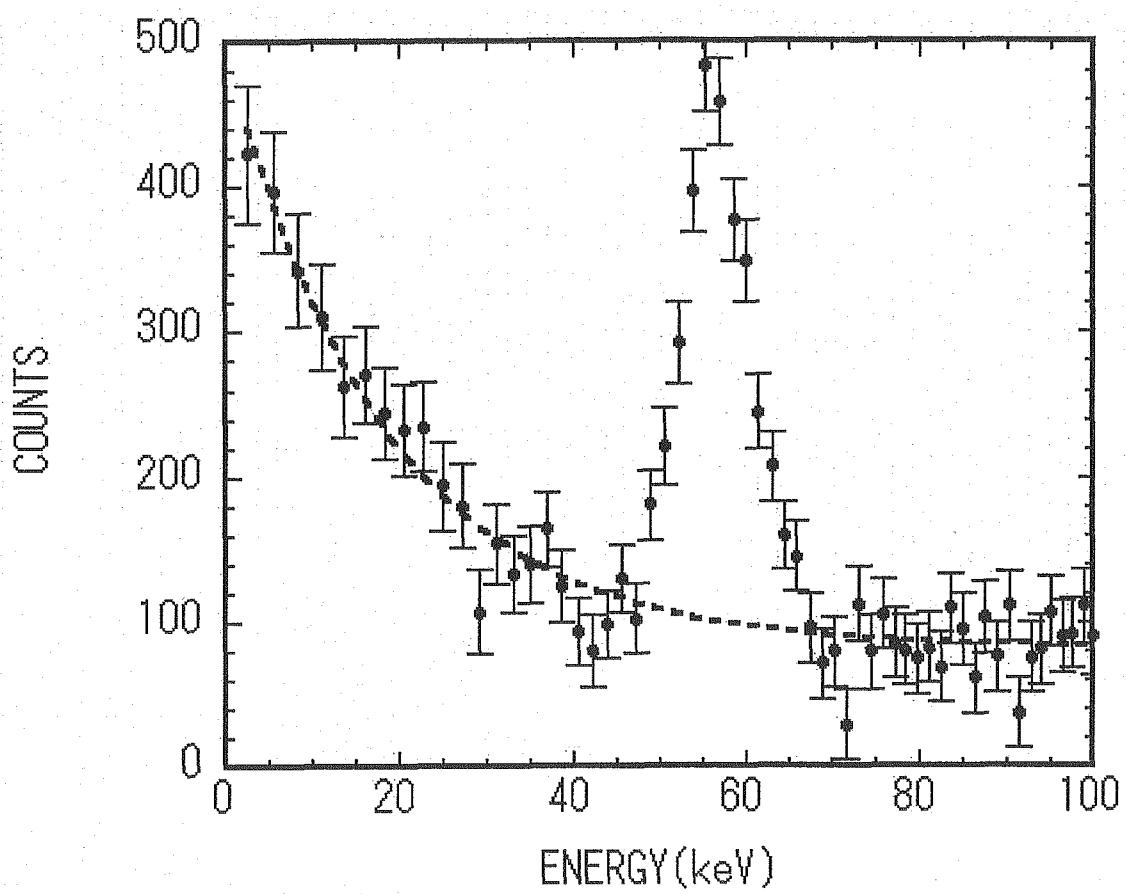


図 158: パラフィンを置かない場合のエネルギースペクトル。

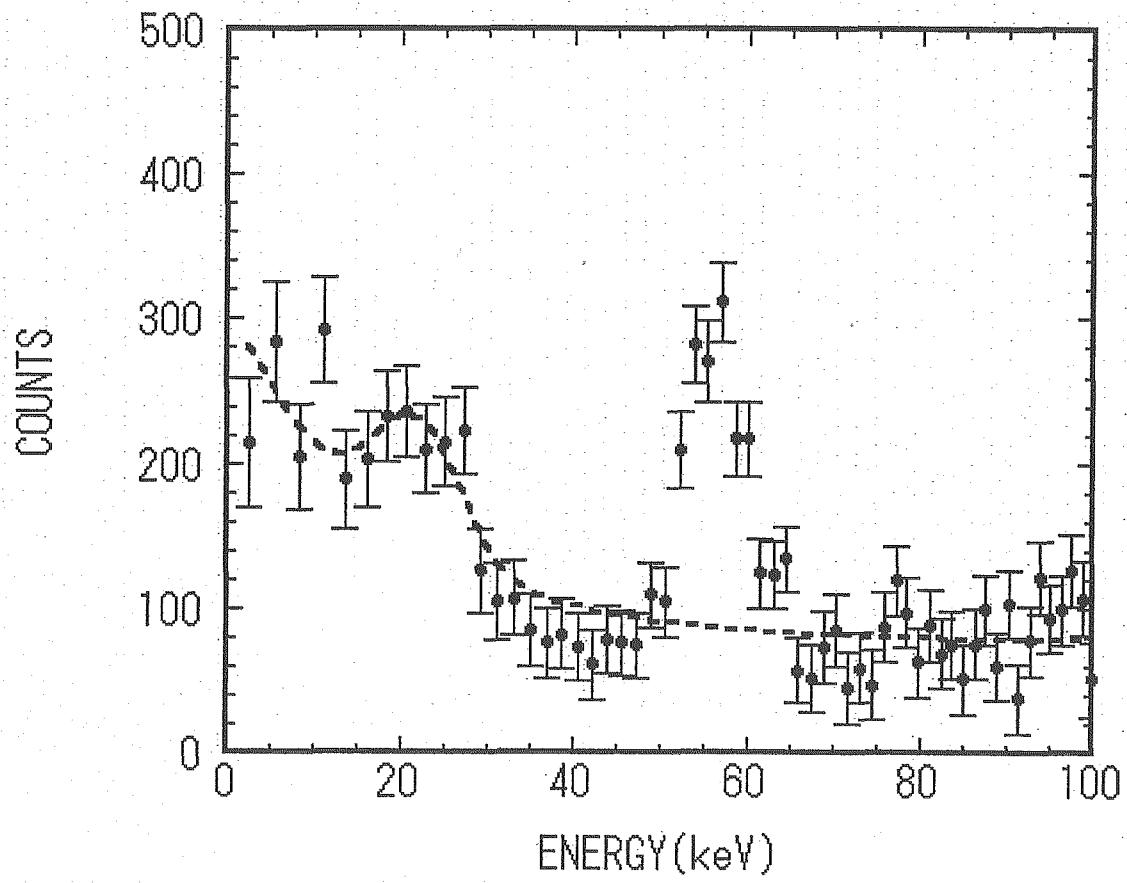


図 159: パラフィンの厚さ 5cm で中性子を減速した時のエネルギースペクトル。

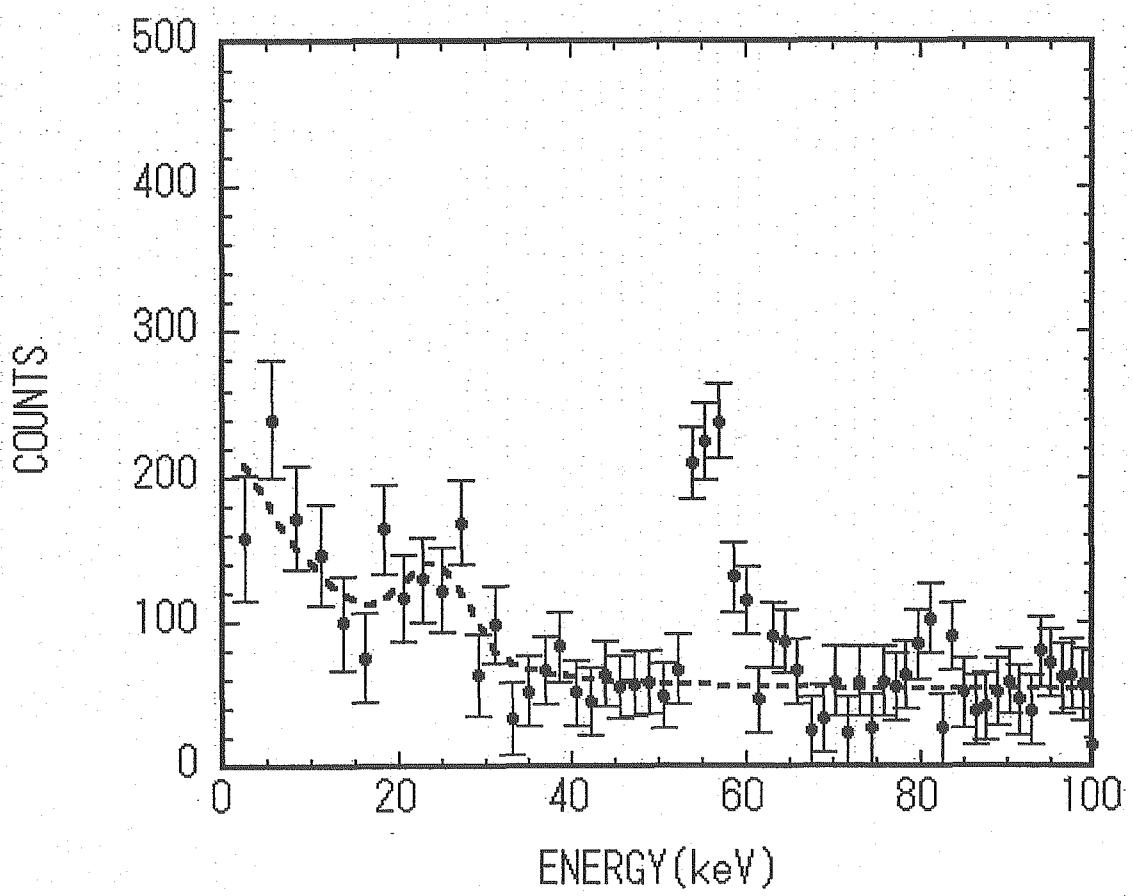


図 160: パラフィンの厚さ 10cm で中性子を減速した時のエネルギースペクトル。

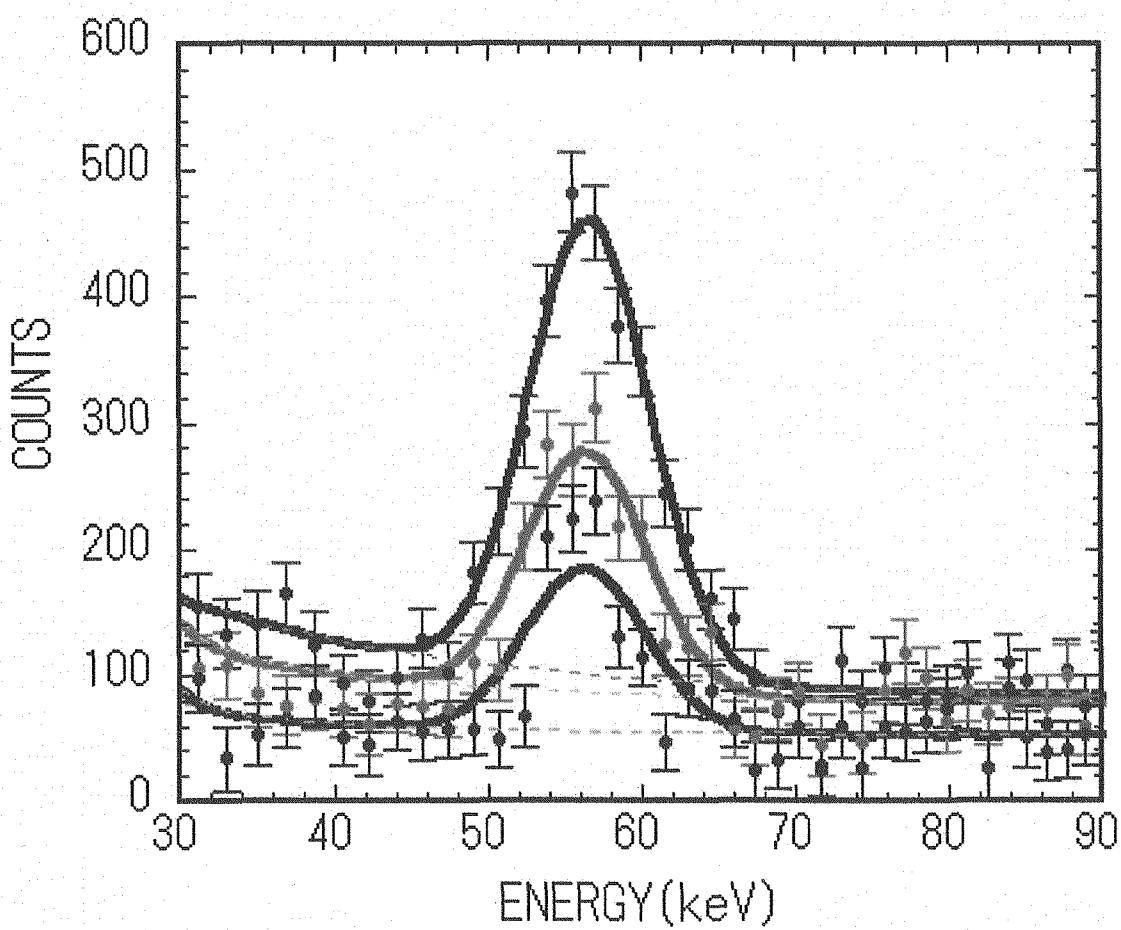


図 161: パラフィンの厚さを 0cm、5cm、10cm と変化させたときのエネルギースペクトルの変化の様子。

をしらべた。パラフィンを置かない場合のピーク強度を1として、パラフィン5cmと10cmの場合のピーク強度をそれぞれ求めると、0.6、0.4となつた。この変化は、高速中性子のパラフィンによる減弱率と一致している。

以上のことから、NaI(Tl)シンチレーターに含まれる¹²⁷Iの57.6keV励起状態への非弾性散乱による高速中性子計測は可能であることが明らかになった。

15.4 検出効率

図 155 の結果により、57.6keV のピーク強度は $Y = 5180 \pm 250/24\text{hours}$ であった。中性子線源と NaI(Tl) 結晶までの距離は $d = 16\text{cm}$ であったことから、検出効率は式 (29) によって計算される。それぞれの測定値は表 26 に示した。

表 26: NaI(Tl) シンチレーターによる高速中性子測定の各測定値。

測定データ	測定値
NaI(Tl) 表面と線源の距離 d	16.0 cm
NaI(Tl) の表面積 S	20.26cm ²
ピークの計数値 $Y/24\text{hours}$	5180 ± 250

これらの値を用いて計数効率を求めるとき、 $\epsilon = 3.7 \pm 0.2\%$ となった。この値については後の章にて議論する。

15.5 通常環境における測定

NaI(Tl) 検出器の高速中性子に対する感度の評価を前節で行ったが、この測定では NaI(Tl) を鉛の遮蔽体で覆っていた。このような大きな遮蔽体は、中性子モニターを様々な場所に設置して高速中性子束の異常を察知するにあたって大きな障害となる。NaI(Tl) 検出器はそれ自身は高感度の γ 線検出器であるために環境放射線の γ 線起因のバックグラウンドによって大幅な感度の劣化を引き起こすことが予想される。そこで、NaI(Tl) 検出器を遮蔽体なしの条件下で運転し、高速中性子に対する感度が十分に得られるかどうかについて検討した。

測定条件は、NaI(Tl) 検出器を遮蔽体で覆わずに机の上に設置し、環境バックグラウンドの測定を行うようにした。図 162 に実験装置の様子を示した。

実験データは実測定時間で 24 時間取得した。エネルギースペクトルを図 163 に示した。100keV から 300keV にかけて計数率が高くなっているが、この原因は不明である。おそらく環境放射線による影響であると考えられる。100keV 以下のエネルギー領域で、今度は急激に計数率の低下がみられるので、この条件下では 57.6keV の γ 線に対する感度の著しい劣化はみられない。

低エネルギー領域のエネルギースペクトルを、連続的な関数と 57.6keV の γ 線を表すガウス分布でフィットする事によって、57.6keV の計数値に対する上限値を求めることができる。その上限値から、NaI(Tl) の高速中性子に対する感度評価を実施した。図 164 に図 163 の低エネルギー領域を拡大し、上述の関数でフィットした結果を示した。フィットの結果、57.6keV には有意なピークがみられなかったので、このピークの上限値を計算した。上限値の計算は、Particle Data Group が提案している方法に基づいている [23]。その結果、中性子束に対する計測限界値は $1.5 \times 10^{-2} / \text{sec/cm}^2$ を得た。

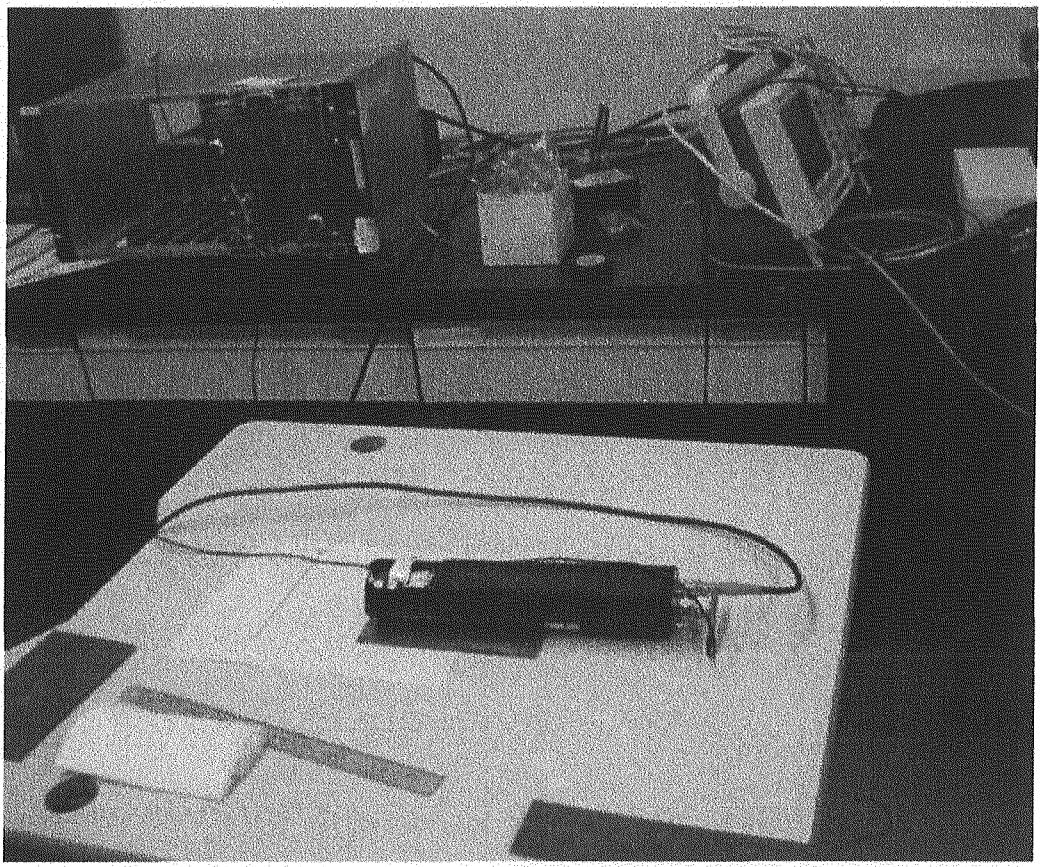


図 162: 遮蔽体なしの実験風景。

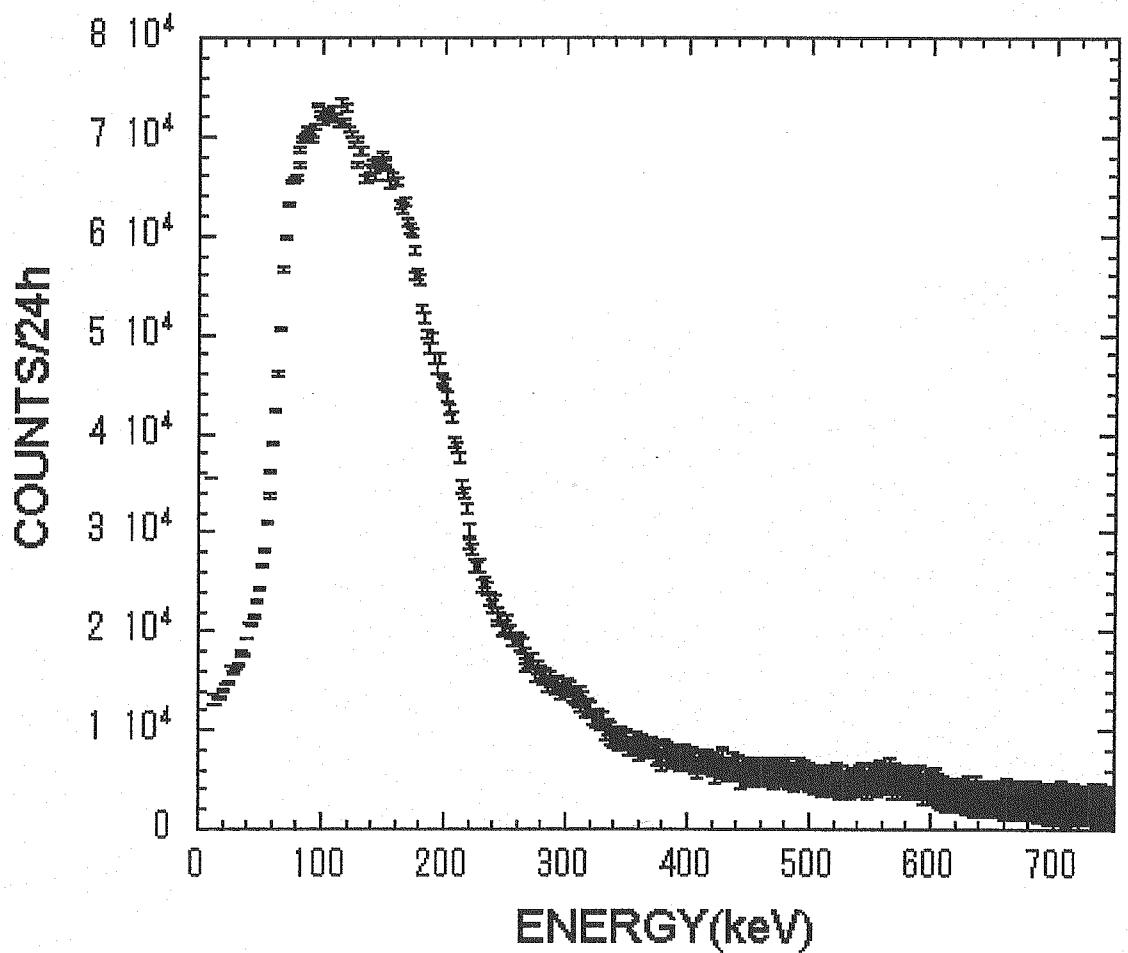


図 163: NaI(Tl) に遮蔽体を施さない場合のバックグラウンドエネルギースペクトル。

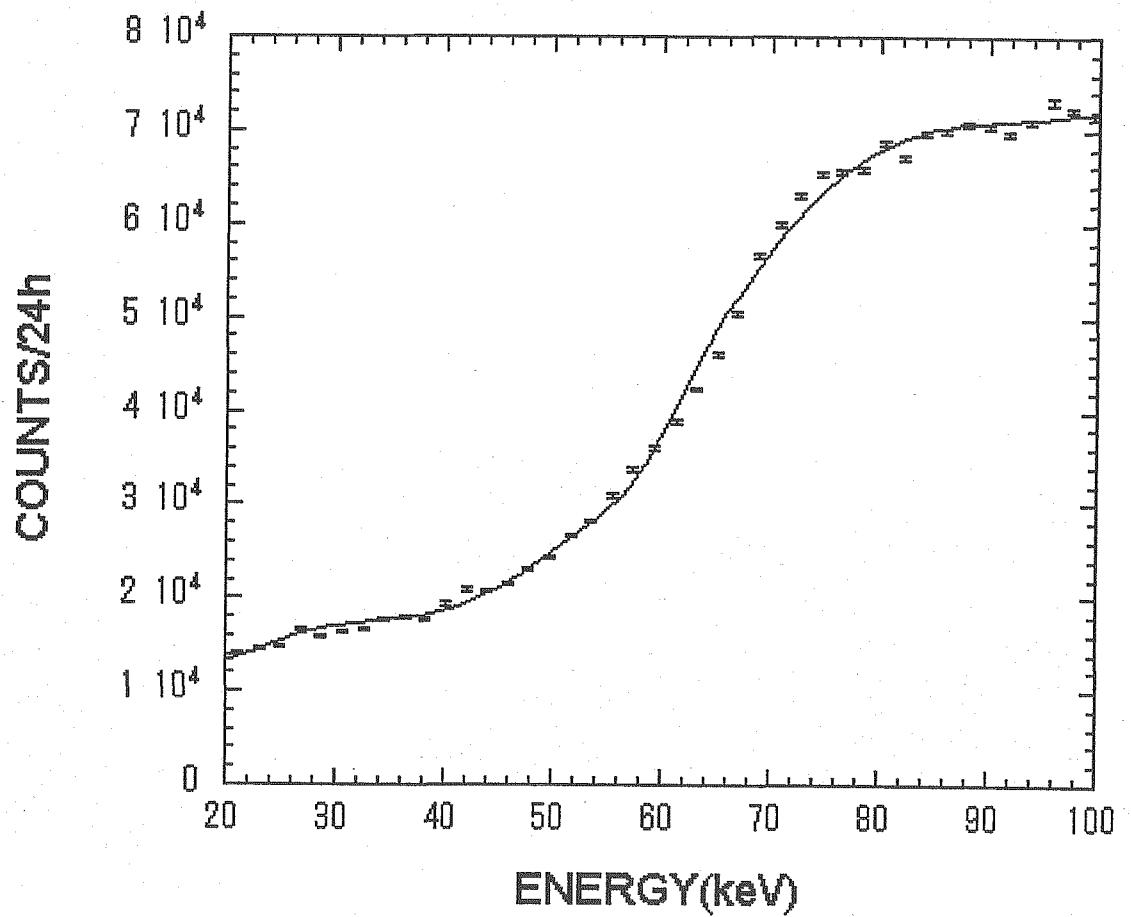


図 164: NaI(Tl) に遮蔽体を施さない場合のバックグラウンドエネルギースペクトル。

16 感度評価

これまでに検討した無機シンチレーターの中性子に対する感度を、既存の中性子検出器と比較してみる。既存の中性子検出器のうち高速中性子に対して高い感度と精度で高速中性子束を測定することができるものとして、有機液体シンチレーターが広く応用されている。今回の研究で調査したシンチレーターと、有機シンチレーターの検出効率の比較を実施した。

比較のために使用した有機液体シンチレーターは、BICRON 製の BC501A シンチレーターである。比較実験には、大きさ $20\text{cm}\phi \times 2\text{cm}$ の BC501A を用いた。図 4 に示すように信号波形弁別を行って γ 線と高速中性子を弁別し、中性子による事象の計数率を求めた。その結果より液体シンチレーターの高速中性子に対する検出効率は 7.0% であった。

以上の結果をまとめると、表 27 のようになった。

表 27: 本研究で検討したシンチレーターと、その高速中性子に対する検出効率。液体シンチレーターの感度を比較のために紹介した。

シンチレーター	検出効率	検出原理
GSO(Ce)	$7.2 \pm 0.2\%$	熱中性子に変換後中性子捕獲
NaI(Tl)	$3.7 \pm 0.2\%$	高速中性子による非弾性散乱
BC501A	7.0%	高速中性子による弾性散乱

GSO(Ce) は、液体シンチレーターよりも高い効率を有する中性子検出器として応用の可能性がある。しかしながら、GSO(Ce) は熱中性子との反応断面積が大きいために、高速中性子を計測したいときにもまず中性子を減速しなければならない。そのために、検出器周囲に大きな減速材を設置しなければならないため、小型かつ軽量なモニタリングシステムには適さない。原子力施設から離れた場所では、途中の壁や空気、水などで高速中性子が熱中性子になってしまことがある。そのような場所では高速中性子の計測ばかりではなく、GSO(Ce) シンチレーターによる熱中性子計測を実施する意義は大きいと考えられる。

一方、NaI(Tl) は、液体シンチレーターの半分程度の検出効率になっている。これは非弾性散乱による散乱断面積の低下を考慮すればやむを得ないと考えられる。

17 シミュレーション計算による無機シンチレータの中性子計測への応用の検討

昨年度の研究内容において、環境中性子モニタとしての無機シンチレータの応用可能性を調査し、その中で BGO シンチレータ、及び GSO シンチレータにおいては中性子に対する感度が有限であることが判明した。本年度は、BGO 及び GSO シンチレータについて、中性子測定感度をモンテカルロ計算により調査するものとした。

以下、シミュレーションコードには、MCNPX-2.4.0 を使用した。そして、断面積データとしては、JENDL3.3 を使用した。検出器の配置は、液体シンチレータの項目と同様、半径 60cm の球を想定し、その内表面から内側へランダムな方向に、25meV、1keV, 1MeV のそれぞれ単色中性子線を 10^7 回発生させ、球の中心にある検出器においてその反応を測定するものとした。反応の中から、特に γ 線の反応現象について E6 tally を取得してそれぞれの場合においてエネルギー・デポジットのスペクトルを得て、これを図 165-170 に示した。

17.1 BGO 検出器に関するシミュレーション計算

BGO 検出器のシミュレーション計算に際し、使用した入力ファイルを含む出力ファイルをプログラムリスト 9, 10, 11 に示した。また、その際に得られる γ 線のエネルギー・デポジットのスペクトルを、図 165-167 に示した。

これらのエネルギー・スペクトルから考察し、観測される γ 線の特徴は表 28 のようにまとめられる。

表 28: 中性子入射時に BGO で検出される特徴的な γ 線

入射中性子のエネルギー (MeV)	特徴的な γ 線のエネルギー (MeV)	発生頻度 (/ 1 発生中性子)
2.5×10^{-8}	4.2	1.6×10^{-8}
1.0×10^{-3}	4.2	3.0×10^{-8}
1.0	0.8	4.8×10^{-9}
	4.2	2.0×10^{-9}

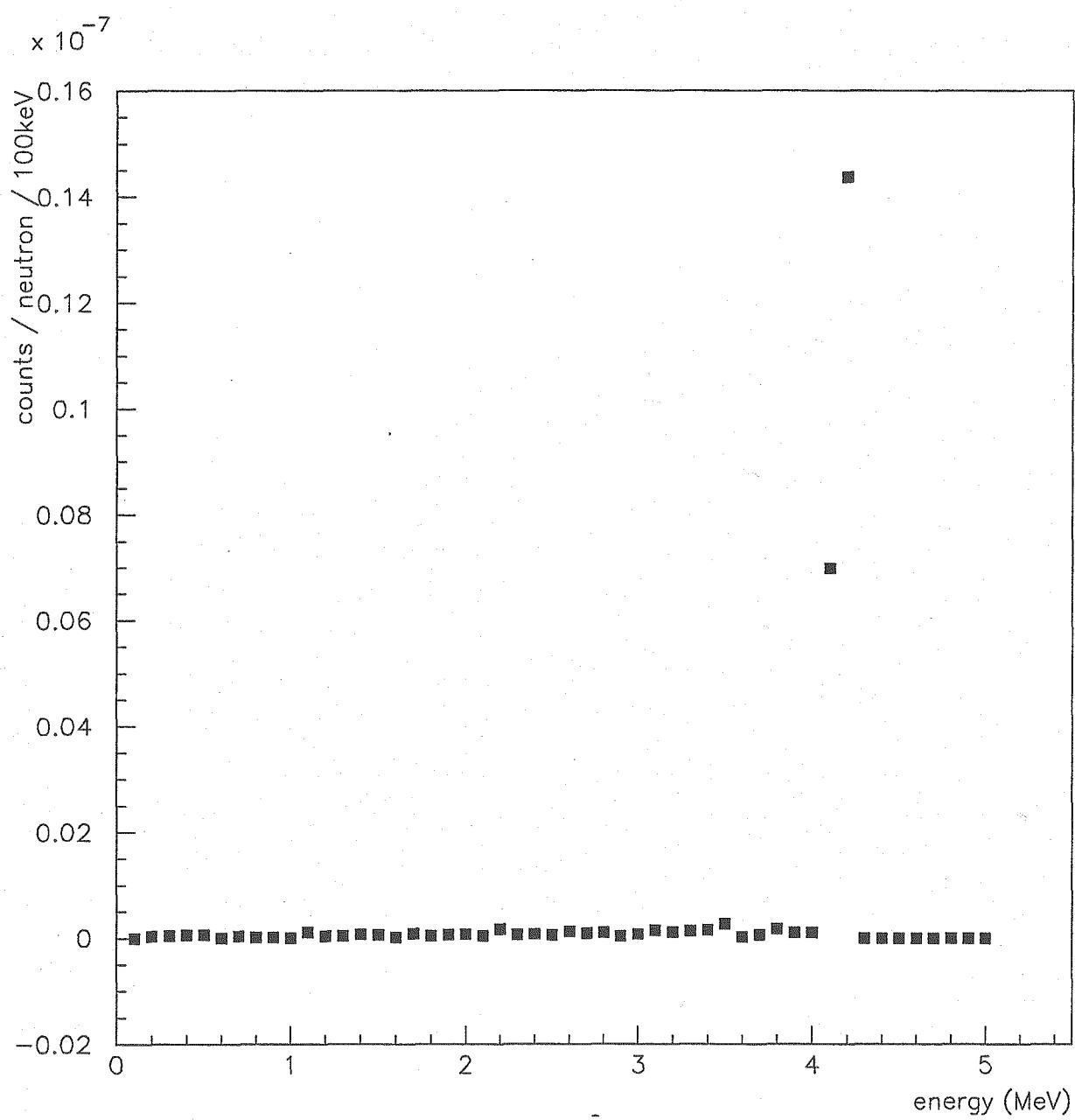


図 165: 25meV 単色中性子発生時の、BGO 検出器における γ 線のエネルギー デポジット

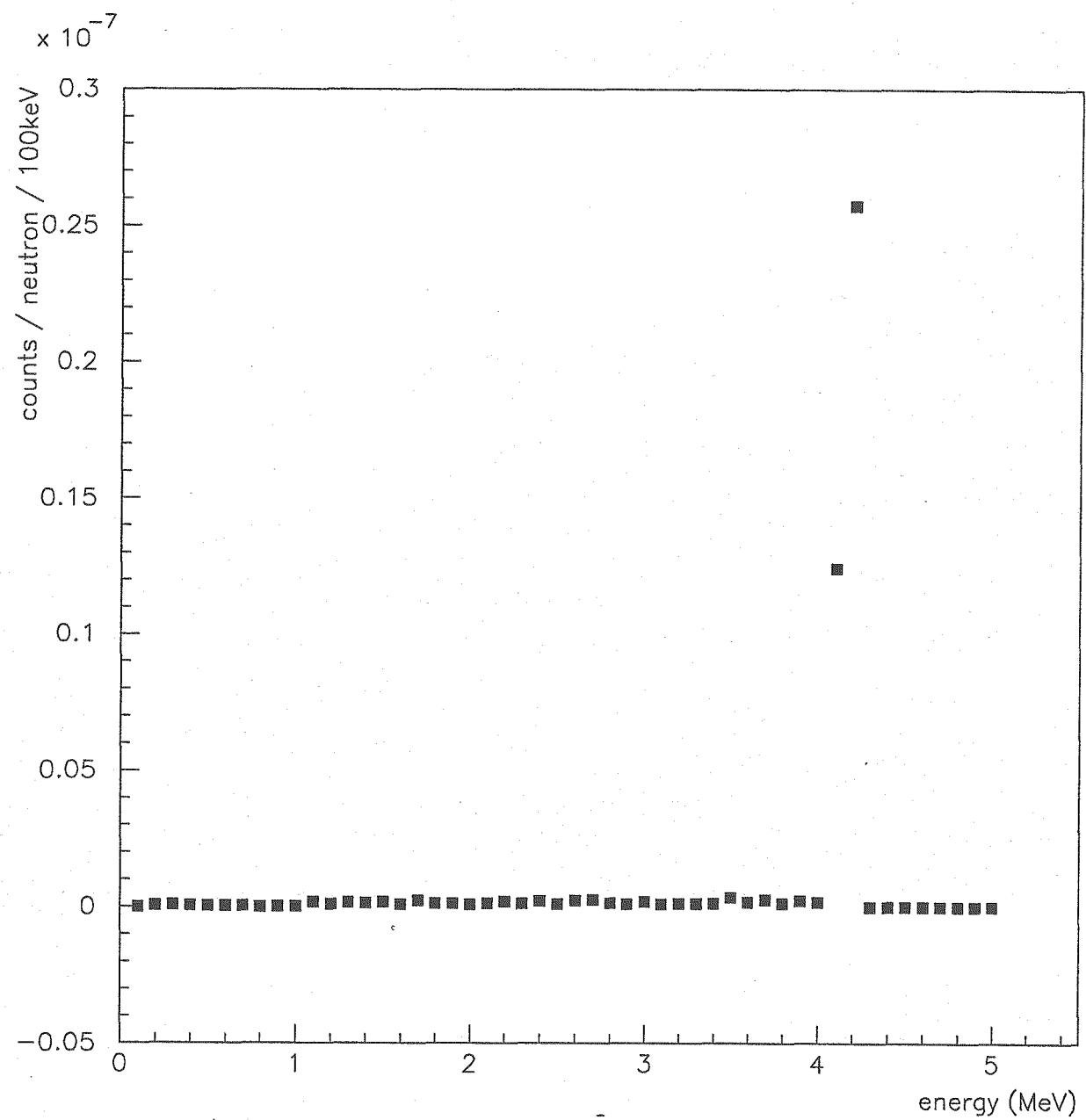


図 166: 1keV 単色中性子発生時の、BGO 検出器における γ 線のエネルギー・デポジット

プログラムリスト9 BGOに対する単色1MeV中性子発生時のMCNP出力ファイル

```

1-      MCNPX test problem 1:
2-      c -----
3-      c 1 MeV neutrons on a cylindrical Cu target of 4 cm radius and
4-      c 6 cm thickness. Source uniformly distributed over circle of
5-      c 0.5 cm radius. Tallies of proton, photon and neutron current.
6-      c -----
7-      c Cells
8-      c -----
9-      11 12 -6.71 -10 14 -15
10-     c 12 13 -2.23 10 -11 16 -17
11-     29 0        -40 (#11)
12-     31 0        40
13-
14-     c -----
15-     c Surfaces
16-     c -----
17-     10 cz 6.35
18-     c 11 cz 7.35
19-     14 pz -3.75
20-     15 pz 3.75
21-     c 16 pz -4.75
22-     c 17 pz 4.75
23-     40 so 40.0
24-
25-     c -----
26-     c Materials
27-     c -----
28-     m12 83209 4 32072 3 8016 12 $ BGO
29-     c m13 14028 1 8016 2 $ S102
30-
31-     c Source
32-     c -----
33-     sdef sur = 40 erg = 1e-0 par = 1 nrm = -1
34-     c -----
35-     c Options
36-     c -----
37-     c spabia all 5. 2
38-     c impin,h,p,e,a 1 1 0
39-     imp:n,p,e 1 1 0
40-     physin 260 5j 1
41-     c phys:a 260 5j 1
42-     phys:p
43-     phys:e
44-     c phys:a
45-     c mode n h p e a
46-     mode n p e
warning. photonuclear physics may be needed (phys:p).
47-     lca 2 1
48-     lea 2j 0
49-     c cut:h j 0
50-     c cut:a j 0
51-
52-     c Tallies
53-     c -----
54-     F6:n 11
55-     c F16:h 11
56-     F26:p 11
57-     c F46:a 11
58-     E6 2.5e-8 1e-7 1e-6 1e-5 1e-4 1e-3 1e-2 1e-1 1. 3I 5. T
59-     c E16 0.01 98I 1. 39I 5. T
60-     E26 0.01 98I 1. 99I 10. T
61-     c E46 1. 2. 3. 4. 5. T
62-     F4:n 11
63-     FM4 -1 12 2
64-     F14:n 11
65-     FM14 1.38e-2 901 (16)(17)(51)(101)
66-     M901 83209 1.
warning. material 901 is used only for a perturbation or tally.
67-     F44:n 11
68-     FM44 1.03e-2 902 (16)(17)(51)(101)
69-     M902 32072 1.
warning. material 902 is used only for a perturbation or tally.
70-     F74:n 11
71-     FM74 4.13e-2 903 (16)(17)(51)(101)
72-     M903 8016 1.
warning. material 903 is used only for a perturbation or tally.
73-     EO 2.5e-8 1e-7 1e-6 1e-5 1e-4 1e-3 1e-2 1e-1 1. 3I 5. T
74-     c -----
75-     print
76-     nps 10000000
77-     prdmp 2j -1
78-     ssw 40 sym=2
79-     c histp
*** omitted ***
itally 4      nps = 10000000
tally type 4    track length estimate of particle flux.

```

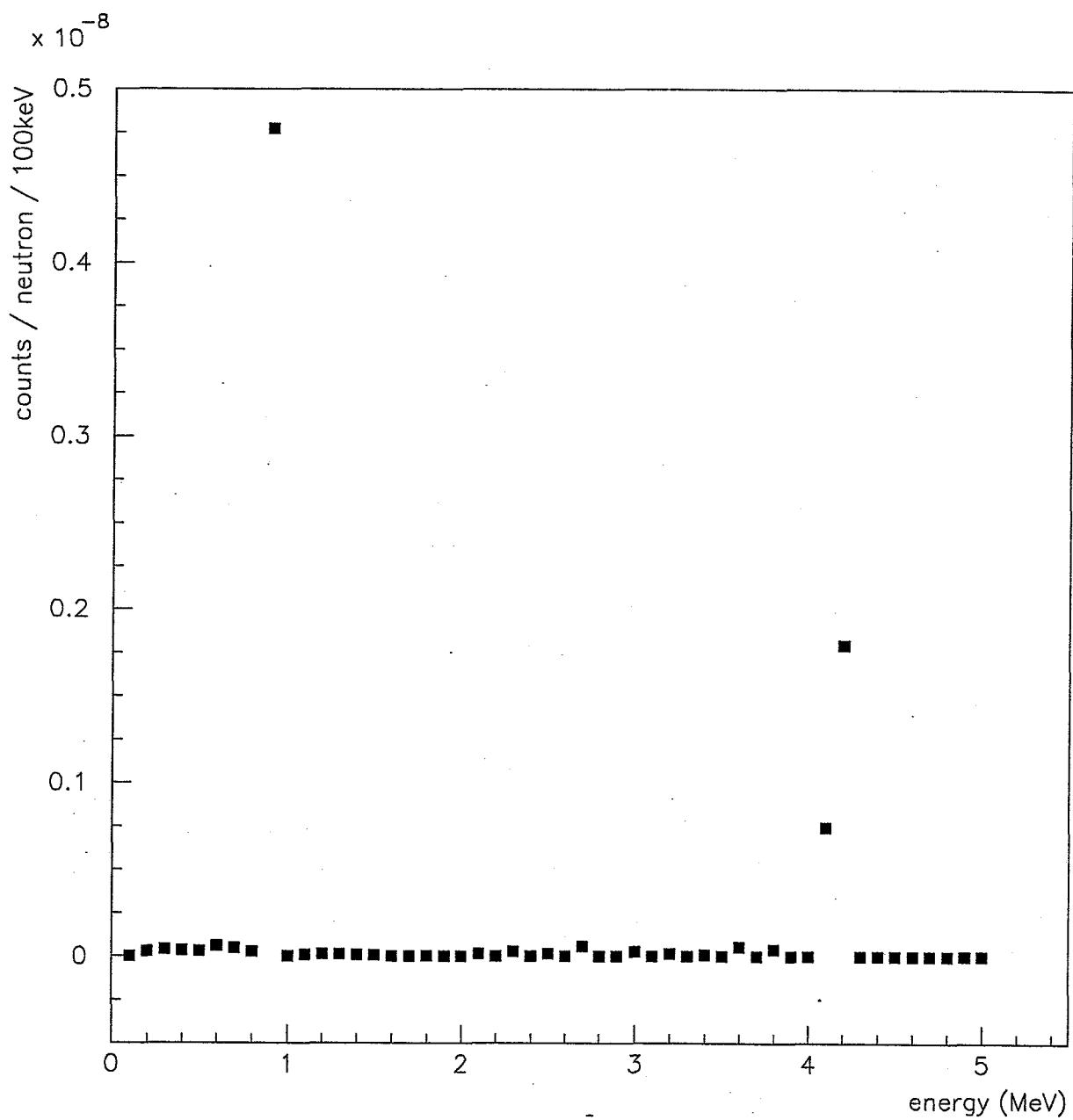


図 167: 1MeV 単色中性子発生時の、BGO 検出器における γ 線のエネルギー・デポジット

```

particle(s): neutron

volumes
cell:    11
         9.50077E+02

cell 11
multiplier bin: -1.00000E+00 12      2
energy
2.5000E-08  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02  3.06891E-10 1.0000
1.0000E-01  3.80238E-07 0.0340
1.0000E+00  5.74506E-05 0.0024
2.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
total      5.78311E-05 0.0025

*** omitted ***

itally 6      nps = 10000000
tally type 6  track length estimate of heating.      units  mev/gram
particle(s): neutron

masses
cell:    11
         6.37501E+03

cell 11
energy
2.5000E-08  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02  2.80493E-14 1.0000
1.0000E-01  8.03414E-10 0.0339
1.0000E+00  7.24587E-07 0.0024
2.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
total      7.25391E-07 0.0024

*** omitted ***

itally 14      nps = 10000000
tally type 4  track length estimate of particle flux.
particle(s): neutron

volumes
cell:    11
         9.50077E+02

cell 11
multiplier bin: 1.38000E-02 901      16
energy
2.5000E-08  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01  0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
total      0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 1.38000E-02 901      17
energy
2.5000E-08  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01  0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00  0.00000E+00 0.0000

```

```

2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 1.38000E-02 901      51
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 9.82687E-08 0.0025
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 9.82687E-08 0.0025

cell 11
multiplier bin: 1.38000E-02 901      101
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 0.00000E+00 0.0000

there are no nonzero tallies in the tally fluctuation chart bin for tally 14
itally 44 nps = 1000000
tally type 4 track length estimate of particle flux.
particle(s): neutron

volumes
cell: 11
9.50077E+02

cell 11
multiplier bin: 1.03000E-02 902      16
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 1.03000E-02 902      17
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 1.03000E-02 902      51
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000

```

```

1.0000E-07  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-06  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-05  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-04  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-03  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-02  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-01  0.00000E+00  0.0000
1.0000E+00  2.48713E-07  0.0024
2.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
3.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
4.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
5.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
total      2.48713E-07  0.0024

cell 11
multiplier bin: 1.03000E-02  902      101
energy
2.5000E-08  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-07  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-06  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-05  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-04  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-03  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-02  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-01  0.00000E+00  0.0000
1.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
2.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
3.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
4.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
5.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
total      0.00000E+00  0.0000

there are no nonzero tallies in the tally fluctuation chart bin for tally 44
itally 74      nps = 10000000
tally type 4    track length estimate of particle flux.
particle(s): neutron

volumes
cell: 11
9.50077E+02

cell 11
multiplier bin: 4.13000E-02  903      16
energy
2.5000E-08  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-07  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-06  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-05  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-04  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-03  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-02  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-01  0.00000E+00  0.0000
1.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
2.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
3.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
4.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
5.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
total      0.00000E+00  0.0000

cell 11
multiplier bin: 4.13000E-02  903      17
energy
2.5000E-08  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-07  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-06  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-05  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-04  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-03  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-02  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-01  0.00000E+00  0.0000
1.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
2.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
3.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
4.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
5.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
total      0.00000E+00  0.0000

cell 11
multiplier bin: 4.13000E-02  903      51
energy
2.5000E-08  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-07  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-06  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-05  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-04  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-03  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-02  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-01  0.00000E+00  0.0000
1.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
2.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
3.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
4.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
5.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
total      0.00000E+00  0.0000

```

```

4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 4.13000E-02 903      101
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 0.00000E+00 0.0000

there are no nonzero tallies in the tally fluctuation chart bin for tally 74
itally 26      nps = 10000000
tally type 6 track length estimate of heating.      units mev/gram
particle(s): photon

masses
cell: 11
6.37501E+03

cell 11
energy
1.0000E-02 7.17771E-12 0.2146
2.0000E-02 5.02991E-11 0.0885
3.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
4.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
5.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
6.0000E-02 3.84727E-12 0.5426
7.0000E-02 1.42253E-11 0.3572
8.0000E-02 3.42655E-10 0.0793
9.0000E-02 9.45432E-11 0.1396
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.1000E-01 2.45607E-12 0.7976
1.2000E-01 4.70671E-12 0.6181
1.3000E-01 4.11906E-12 0.6982
1.4000E-01 3.39905E-12 0.6727
1.5000E-01 5.87233E-12 0.6024
1.6000E-01 6.35598E-12 0.5462
1.7000E-01 2.26594E-11 0.3620
1.8000E-01 3.53113E-11 0.3503
1.9000E-01 2.44001E-11 0.3650
2.0000E-01 2.75172E-11 0.2790
2.1000E-01 5.44959E-11 0.2473
2.2000E-01 4.09595E-11 0.3260
2.3000E-01 5.62034E-11 0.3066
2.4000E-01 5.20642E-11 0.2611
2.5000E-01 6.71655E-11 0.2609
2.6000E-01 3.29860E-11 0.3729
2.7000E-01 6.33101E-11 0.4551
2.8000E-01 5.11862E-11 0.3032
2.9000E-01 4.89770E-11 0.3401
3.0000E-01 3.91830E-11 0.3773
3.1000E-01 3.59690E-11 0.3574
3.2000E-01 3.80765E-11 0.4234
3.3000E-01 5.00694E-11 0.4370
3.4000E-01 5.37524E-11 0.4289
3.5000E-01 6.32961E-11 0.3219
3.6000E-01 3.23227E-11 0.3387
3.7000E-01 2.62017E-11 0.3964
3.8000E-01 3.01579E-11 0.3248
3.9000E-01 6.41719E-11 0.3132
4.0000E-01 3.48819E-11 0.3527
4.1000E-01 3.59490E-11 0.3864
4.2000E-01 3.36804E-11 0.3448
4.3000E-01 4.85055E-11 0.3680
4.4000E-01 3.75899E-11 0.4309
4.5000E-01 5.74339E-11 0.3246
4.6000E-01 3.20631E-11 0.4066
4.7000E-01 1.98148E-11 0.4653
4.8000E-01 4.05089E-11 0.4032
4.9000E-01 4.05432E-11 0.4099
5.0000E-01 2.98413E-11 0.3718
5.1000E-01 4.32576E-11 0.4463
5.2000E-01 2.19907E-10 0.2112
5.3000E-01 5.29765E-11 0.4126
5.4000E-01 1.61098E-11 0.5406
5.5000E-01 6.26182E-11 0.4352
5.6000E-01 6.07582E-11 0.3362
5.7000E-01 1.95574E-11 0.5806
5.8000E-01 5.41364E-11 0.3806

```

5.9000E-01	4.98223E-11	0.3697
6.0000E-01	6.22012E-11	0.3428
6.1000E-01	2.25543E-11	0.4979
6.2000E-01	3.45565E-11	0.3606
6.3000E-01	3.41221E-11	0.4974
6.4000E-01	5.21707E-11	0.5159
6.5000E-01	4.02814E-11	0.5013
6.6000E-01	6.06952E-11	0.5651
6.7000E-01	1.54852E-11	0.4867
6.8000E-01	5.95895E-11	0.5206
6.9000E-01	1.15205E-11	0.6328
7.0000E-01	5.06887E-11	0.4622
7.1000E-01	4.34685E-11	0.3743
7.2000E-01	4.92847E-11	0.3750
7.3000E-01	4.48233E-11	0.4003
7.4000E-01	2.05681E-11	0.3950
7.5000E-01	4.79871E-11	0.4566
7.6000E-01	4.56010E-11	0.5162
7.7000E-01	4.00598E-11	0.4895
7.8000E-01	1.94713E-11	0.4788
7.9000E-01	7.78869E-11	0.3915
8.0000E-01	2.67251E-11	0.5392
8.1000E-01	4.74039E-12	1.0000
8.2000E-01	1.35454E-11	0.5771
8.3000E-01	3.81385E-11	0.4851
8.4000E-01	2.05119E-11	0.5595
8.5000E-01	2.64289E-11	0.4738
8.6000E-01	3.04021E-11	0.4617
8.7000E-01	1.99734E-11	0.7407
8.8000E-01	5.67754E-11	0.4181
8.9000E-01	3.87859E-11	0.4431
9.0000E-01	4.77249E-09	0.0479
9.1000E-01	0.00000E+00	0.0000
9.2000E-01	0.00000E+00	0.0000
9.3000E-01	0.00000E+00	0.0000
9.4000E-01	0.00000E+00	0.0000
9.5000E-01	0.00000E+00	0.0000
9.6000E-01	0.00000E+00	0.0000
9.7000E-01	6.38892E-12	1.0000
9.8000E-01	0.00000E+00	0.0000
9.9000E-01	0.00000E+00	0.0000
1.0000E+00	0.00000E+00	0.0000
1.1000E+00	9.36200E-12	1.0000
1.2000E+00	1.31061E-11	0.7289
1.3000E+00	1.39718E-11	0.8107
1.4000E+00	8.48096E-12	0.7659
1.5000E+00	6.81515E-12	1.0000
1.6000E+00	0.00000E+00	0.0000
1.7000E+00	0.00000E+00	0.0000
1.8000E+00	5.24041E-12	1.0000
1.9000E+00	0.00000E+00	0.0000
2.0000E+00	0.00000E+00	0.0000
2.1000E+00	1.48821E-11	1.0000
2.2000E+00	0.00000E+00	0.0000
2.3000E+00	2.83659E-11	0.8953
2.4000E+00	0.00000E+00	0.0000
2.5000E+00	1.71563E-11	0.9831
2.6000E+00	0.00000E+00	0.0000
2.7000E+00	5.93365E-11	0.6039
2.8000E+00	0.00000E+00	0.0000
2.9000E+00	0.00000E+00	0.0000
3.0000E+00	2.90286E-11	1.0000
3.1000E+00	1.15288E-12	1.0000
3.2000E+00	1.46112E-11	1.0000
3.3000E+00	0.00000E+00	0.0000
3.4000E+00	1.01760E-11	0.7178
3.5000E+00	0.00000E+00	0.0000
3.6000E+00	5.58711E-11	1.0000
3.7000E+00	1.59425E-12	1.0000
3.8000E+00	4.03545E-11	1.0000
3.9000E+00	0.00000E+00	0.0000
4.0000E+00	0.00000E+00	0.0000
4.1000E+00	7.43818E-10	0.2371
4.2000E+00	1.79548E-09	0.1647
4.3000E+00	0.00000E+00	0.0000
4.4000E+00	0.00000E+00	0.0000
4.5000E+00	0.00000E+00	0.0000
4.6000E+00	0.00000E+00	0.0000
4.7000E+00	0.00000E+00	0.0000
4.8000E+00	0.00000E+00	0.0000
4.9000E+00	0.00000E+00	0.0000
5.0000E+00	0.00000E+00	0.0000
5.1000E+00	0.00000E+00	0.0000
5.2000E+00	0.00000E+00	0.0000
5.3000E+00	0.00000E+00	0.0000
5.4000E+00	0.00000E+00	0.0000
5.5000E+00	0.00000E+00	0.0000
5.6000E+00	0.00000E+00	0.0000
5.7000E+00	0.00000E+00	0.0000
5.8000E+00	0.00000E+00	0.0000
5.9000E+00	0.00000E+00	0.0000

6.0000E+00	0.00000E+00	0.0000
6.1000E+00	0.00000E+00	0.0000
6.2000E+00	0.00000E+00	0.0000
6.3000E+00	0.00000E+00	0.0000
6.4000E+00	0.00000E+00	0.0000
6.5000E+00	0.00000E+00	0.0000
6.6000E+00	0.00000E+00	0.0000
6.7000E+00	0.00000E+00	0.0000
6.8000E+00	0.00000E+00	0.0000
6.9000E+00	0.00000E+00	0.0000
7.0000E+00	0.00000E+00	0.0000
7.1000E+00	0.00000E+00	0.0000
7.2000E+00	0.00000E+00	0.0000
7.3000E+00	0.00000E+00	0.0000
7.4000E+00	0.00000E+00	0.0000
7.5000E+00	0.00000E+00	0.0000
7.6000E+00	0.00000E+00	0.0000
7.7000E+00	0.00000E+00	0.0000
7.8000E+00	0.00000E+00	0.0000
7.9000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.0000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.1000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.2000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.3000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.4000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.5000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.6000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.7000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.8000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.9000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.0000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.1000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.2000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.3000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.4000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.5000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.6000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.7000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.8000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.9000E+00	0.00000E+00	0.0000
1.0000E+01	0.00000E+00	0.0000
total	1.12967E-08	0.0484

*** omitted ***

プログラムリスト 10

BGO に対する単色熱外中性子発生時の MCNP 出力ファイル

```
*****
* Copyright Notice for MCNPX
*
* This program was prepared by the Regents of the
* University of California at Los Alamos National
* Laboratory (the University) under contract number
* W-7405-ENG-36 with the U.S. Department of Energy
* (DOE). The University has certain rights in the
* program pursuant to the contract and the program
* should not be copied or distributed outside your
* organization. All rights in the program are
* reserved by the DOE and the University. Neither
* the U.S. Government nor the University makes any
* warranty, express or implied, or assumes any
* liability or responsibility for the use of this
* software.
*
*****
```

1- MCNPX test problem 1:
2- c -----
3- c 1 MeV neutrons on a cylindrical Cu target of 4 cm radius and
4- c 6 cm thickness. Source uniformly distributed over circle of
5- c 0.5 cm radius. Tallies of proton, photon and neutron current.
6- c -----
7- c Cells
8- c -----
9- 11 12 -6.71 -10 14 -15
10- c 12 13 -2.23 10 -11 16 -17
11- 29 0 -40 (#11)
12- 31 0 40
13-
14- c -----
15- c Surfaces
16- c -----
17- 10 cz 6.35
18- c 11 cz 7.35
19- 14 pz -3.75
20- 15 pz 3.75
21- c 16 pz -4.75
22- c 17 pz 4.75
23- 40 so 40.0
24-
25- c -----
26- c Materials
27- c -----
28- m12 83209 4 32072 3 8016 12 \$ BGO
29- c m13 14028 1 8016 2 \$ SiO2
30- c -----
31- c Source
32- c -----
33- sdef sur = 40 erg = 1e-3 par = 1 nrm = -1
34- c -----
35- c Options
36- c -----
37- c spabi:a all 5. 2
38- c imp:n,h,p,e,a 1 1 0
39- imp:n,p,e 1 1 0
40- phys:n 260 5j 1
41- c phys:h 260 5j 1
42- phys:p
43- phys:e
44- phys:a
45- mode n h p e a
46- mode n p e

warning. photonuclear physics may be needed (phys:p).

47- lca 2 1
48- lea 2j 0
49- c cut:h j 0
50- c cut:a j 0
51- c -----
52- c Tallies
53- c -----
54- F6:n 11
55- c F16:h 11
56- F26:p 11
57- c F46:a 11
58- E6 2.5e-8 1e-7 1e-6 1e-5 1e-4 1e-3 1e-2 1e-1 1. 3I 5. T
59- c E16 0.01 98I 1. 39I 5. T
60- E26 0.01 98I 1. 89I 10. T
61- c E46 1. 2. 3. 4. 5. T
62- F4:n 11
63- FM4 -1 12 2
64- F14:n 11
65- FM14 1.38e-2 901 (16)(17)(51)(101)
66- M901 83209 1.

warning. material 901 is used only for a perturbation or tally.

67- F44:n 11

```

68-      FM44 1.03e-2 902 (16)(17)(51)(101)
69-      M902 32072 1.
warning. material 902 is used only for a perturbation or tally.
70-      F74:n 11
71-      FM74 4.13e-2 903 (16)(17)(51)(101)
72-      M903 8016 1.
warning. material 903 is used only for a perturbation or tally.
73-      EO 2.5e-8 1e-7 1e-6 1e-5 1e-4 1e-3 1e-2 1e-1 1. 3I 5. T
74-      c -----
75-      print
76-      nps 1000000
77-      prdmp 2j -1
78-      ssw 40 sym=2
79-      c histp

*** omitted ***

itally 4      nps = 10000000
              tally type 4    track length estimate of particle flux.
              particle(s): neutron

volumes
cell:      11
           9.50077E+02

cell 11
multiplier bin: -1.00000E+00 12      2
energy
2.5000E-08  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04  2.46866E-05 0.5303
1.0000E-03  8.37477E-05 0.0026
1.0000E-02  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01  0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
total      8.37502E-05 0.0026

ianalysis of the results in the tally fluctuation chart bin (tfc) for tally 4 with nps = 10000000      print table 160

normed average tally per history = 8.37502E-05      unnormed average tally per history = 7.95691E-02
estimated tally relative error = 0.0026      estimated variance of the variance = 0.0000
relative error from zero tallies = 0.0019      relative error from nonzero scores = 0.0019

number of nonzero history tallies =      274547      efficiency for the nonzero tallies = 0.0275
history number of largest tally =      4925861      largest unnormalized history tally = 2.88390E+01
(largest tally)/(average tally) = 3.62440E+02      (largest tally)/(avg nonzero tally)= 9.95069E+00

(confidence interval shift)/mean = 0.0000      shifted confidence interval center = 8.37506E-05

*** omitted ***

itally 6      nps = 10000000
              tally type 6    track length estimate of heating.      units      mev/gram
              particle(s): neutron

masses
cell:      11
           6.37501E+03

cell 11
energy
2.5000E-08  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04  7.86625E-13 0.5484
1.0000E-03  2.63637E-08 0.0249
1.0000E-02  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01  0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
total      2.63644E-08 0.0249

ianalysis of the results in the tally fluctuation chart bin (tfc) for tally 6 with nps = 10000000      print table 160

normed average tally per history = 2.63644E-08      unnormed average tally per history = 1.68074E-04
estimated tally relative error = 0.0249      estimated variance of the variance = 0.0025
relative error from zero tallies = 0.0019      relative error from nonzero scores = 0.0248

number of nonzero history tallies =      274547      efficiency for the nonzero tallies = 0.0275
history number of largest tally =      4959920      largest unnormalized history tally = 4.84228E+00
(largest tally)/(average tally) = 2.88105E+04      (largest tally)/(avg nonzero tally)= 7.90982E+02

```

```

(confidence interval shift)/mean = 0.0005      shifted confidence interval center = 2.63787E-08

*** omitted ***

itally 14      nps = 10000000
          tally type 4   track length estimate of particle flux.
          particle(s): neutron

volumes
  cell:    11
           9.50077E+02

cell 11
multiplier bin: 1.38000E-02 901      16
energy
 2.5000E-08  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-07  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-06  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-05  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-04  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-03  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-02  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-01  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
 2.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
 3.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
 4.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
 5.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  total     0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 1.38000E-02 901      17
energy
 2.5000E-08  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-07  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-06  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-05  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-04  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-03  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-02  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-01  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
 2.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
 3.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
 4.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
 5.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  total     0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 1.38000E-02 901      51
energy
 2.5000E-08  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-07  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-06  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-05  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-04  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-03  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-02  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-01  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
 2.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
 3.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
 4.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
 5.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  total     0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 1.38000E-02 901      101
energy
 2.5000E-08  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-07  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-06  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-05  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-04  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-03  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-02  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-01  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
 2.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
 3.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
 4.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
 5.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  total     0.00000E+00 0.0000

there are no nonzero tallies in the tally fluctuation chart bin for tally 14
itally 44      nps = 10000000
          tally type 4   track length estimate of particle flux.
          particle(s): neutron

volumes

```

```

cell 11
multiplier bin: 1.03000E-02 902      16
energy
2.5000E-08  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01  0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
total     0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 1.03000E-02 902      17
energy
2.5000E-08  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01  0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
total     0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 1.03000E-02 902      51
energy
2.5000E-08  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01  0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
total     0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 1.03000E-02 902      101
energy
2.5000E-08  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01  0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
total     0.00000E+00 0.0000

there are no nonzero tallies in the tally fluctuation chart bin for tally 44
tally 74      nps = 10000000
tally type 4      track length estimate of particle flux.
particle(s): neutron

volumes
cell: 11
9.50077E+02

cell 11
multiplier bin: 4.13000E-02 903      16
energy
2.5000E-08  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05  0.00000E+00 0.0000

```

```

1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 4.13000E-02 903      17
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 4.13000E-02 903      51
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 4.13000E-02 903      101
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 0.00000E+00 0.0000

there are no nonzero tallies in the tally fluctuation chart bin for tally 74
itally 26 nps = 10000000
tally type 6 track length estimate of heating.          units mev/gram
particle(s): photon

masses
cell: 11
6.37501E+03

cell 11
energy
1.0000E-02 1.30153E-11 0.1423
2.0000E-02 8.69177E-11 0.0785
3.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
4.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
5.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
6.0000E-02 6.34705E-12 0.8475
7.0000E-02 1.51804E-11 0.3889
8.0000E-02 5.45924E-10 0.0677
9.0000E-02 1.63015E-10 0.1285
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.1000E-01 2.33600E-12 0.6412
1.2000E-01 1.15503E-12 0.8218
1.3000E-01 3.63685E-12 0.5508
1.4000E-01 5.71315E-12 0.6519
1.5000E-01 1.01561E-11 0.5307

```

1.6000E-01	1.15087E-11	0.3800
1.7000E-01	2.47438E-11	0.2886
1.8000E-01	5.16529E-11	0.2460
1.9000E-01	5.66106E-11	0.2442
2.0000E-01	5.79982E-11	0.2654
2.1000E-01	4.58289E-11	0.2448
2.2000E-01	2.58237E-11	0.3129
2.3000E-01	3.87084E-11	0.3940
2.4000E-01	7.57046E-11	0.2856
2.5000E-01	8.23476E-11	0.2195
2.6000E-01	6.26922E-11	0.3231
2.7000E-01	7.01480E-11	0.2614
2.8000E-01	9.15491E-11	0.2392
2.9000E-01	6.55780E-11	0.2781
3.0000E-01	7.48327E-11	0.2645
3.1000E-01	9.90277E-11	0.3057
3.2000E-01	6.31093E-11	0.2717
3.3000E-01	6.08399E-11	0.3218
3.4000E-01	7.01960E-11	0.2505
3.5000E-01	4.80735E-11	0.3173
3.6000E-01	5.80464E-11	0.3534
3.7000E-01	4.84033E-11	0.2796
3.8000E-01	1.20774E-10	0.2482
3.9000E-01	6.15464E-11	0.2763
4.0000E-01	6.81436E-11	0.3506
4.1000E-01	7.21766E-11	0.2971
4.2000E-01	7.43686E-11	0.3590
4.3000E-01	1.05023E-10	0.3212
4.4000E-01	1.05503E-10	0.2569
4.5000E-01	5.95075E-11	0.3305
4.6000E-01	1.02534E-10	0.3036
4.7000E-01	4.69092E-11	0.4039
4.8000E-01	2.77119E-11	0.3899
4.9000E-01	3.83830E-11	0.2934
5.0000E-01	4.03892E-11	0.5668
5.1000E-01	4.64992E-11	0.4373
5.2000E-01	2.72356E-09	0.0671
5.3000E-01	1.87615E-11	0.4416
5.4000E-01	3.56380E-11	0.4157
5.5000E-01	2.50364E-11	0.8546
5.6000E-01	1.51713E-11	0.5655
5.7000E-01	3.89815E-11	0.5072
5.8000E-01	3.55249E-11	0.5039
5.9000E-01	3.32661E-11	0.4515
6.0000E-01	3.95691E-11	0.4944
6.1000E-01	3.77854E-12	0.8595
6.2000E-01	4.02957E-12	0.6683
6.3000E-01	1.18135E-11	0.6030
6.4000E-01	2.25347E-11	0.4319
6.5000E-01	4.77902E-11	0.5126
6.6000E-01	2.72901E-11	0.5633
6.7000E-01	4.65487E-11	0.7241
6.8000E-01	1.75042E-11	0.4822
6.9000E-01	1.07846E-11	0.6145
7.0000E-01	3.70837E-11	0.5952
7.1000E-01	7.80356E-12	0.9226
7.2000E-01	3.98035E-12	0.6187
7.3000E-01	1.11182E-11	0.8245
7.4000E-01	2.40073E-11	0.6386
7.5000E-01	1.34183E-11	0.4792
7.6000E-01	1.87796E-11	0.5389
7.7000E-01	1.39433E-11	0.4822
7.8000E-01	4.07509E-11	0.6985
7.9000E-01	2.97402E-11	0.5244
8.0000E-01	3.23934E-13	1.0000
8.1000E-01	5.28157E-12	0.7559
8.2000E-01	1.82584E-11	0.6113
8.3000E-01	3.99700E-12	1.0000
8.4000E-01	9.97836E-12	0.7867
8.5000E-01	2.32261E-11	0.5131
8.6000E-01	2.09022E-11	0.7107
8.7000E-01	2.89277E-11	0.6680
8.8000E-01	3.23945E-11	0.7977
8.9000E-01	1.20876E-11	0.8387
9.0000E-01	1.45123E-11	0.5723
9.1000E-01	8.03832E-13	0.6940
9.2000E-01	2.05228E-13	1.0000
9.3000E-01	5.64712E-12	1.0000
9.4000E-01	1.72406E-12	1.0000
9.5000E-01	6.91247E-12	1.0000
9.6000E-01	2.16759E-11	0.7193
9.7000E-01	3.06785E-12	1.0000
9.8000E-01	1.15221E-11	0.9432
9.9000E-01	8.79364E-12	0.6570
1.0000E+00	1.53413E-11	1.0000
1.1000E+00	1.81842E-10	0.2229
1.2000E+00	8.80469E-11	0.3101
1.3000E+00	1.57834E-10	0.2795
1.4000E+00	1.37845E-10	0.2794
1.5000E+00	1.80350E-10	0.2837
1.6000E+00	7.24419E-11	0.3482

1.7000E+00	2.33967E-10	0.2514
1.8000E+00	1.15025E-10	0.4198
1.9000E+00	1.08961E-10	0.3657
2.0000E+00	8.20790E-11	0.4929
2.1000E+00	1.14311E-10	0.4351
2.2000E+00	1.91267E-10	0.3264
2.3000E+00	1.16737E-10	0.4633
2.4000E+00	2.06516E-10	0.4048
2.5000E+00	9.57347E-11	0.4675
2.6000E+00	2.24054E-10	0.3903
2.7000E+00	2.60335E-10	0.2887
2.8000E+00	1.30811E-10	0.4938
2.9000E+00	9.97781E-11	0.5649
3.0000E+00	1.99685E-10	0.3689
3.1000E+00	9.86159E-11	0.4215
3.2000E+00	1.18547E-10	0.4558
3.3000E+00	1.10797E-10	0.4582
3.4000E+00	1.22573E-10	0.4491
3.5000E+00	3.42105E-10	0.2767
3.6000E+00	1.82303E-10	0.5234
3.7000E+00	2.75207E-10	0.3554
3.8000E+00	1.28162E-10	0.4961
3.9000E+00	2.38775E-10	0.3853
4.0000E+00	1.79112E-10	0.3582
4.1000E+00	1.24248E-08	0.0598
4.2000E+00	2.57239E-08	0.0415
4.3000E+00	0.00000E+00	0.0000
4.4000E+00	0.00000E+00	0.0000
4.5000E+00	0.00000E+00	0.0000
4.6000E+00	0.00000E+00	0.0000
4.7000E+00	0.00000E+00	0.0000
4.8000E+00	0.00000E+00	0.0000
4.9000E+00	0.00000E+00	0.0000
5.0000E+00	0.00000E+00	0.0000
5.1000E+00	0.00000E+00	0.0000
5.2000E+00	0.00000E+00	0.0000
5.3000E+00	0.00000E+00	0.0000
5.4000E+00	0.00000E+00	0.0000
5.5000E+00	0.00000E+00	0.0000
5.6000E+00	0.00000E+00	0.0000
5.7000E+00	0.00000E+00	0.0000
5.8000E+00	0.00000E+00	0.0000
5.9000E+00	0.00000E+00	0.0000
6.0000E+00	0.00000E+00	0.0000
6.1000E+00	0.00000E+00	0.0000
6.2000E+00	0.00000E+00	0.0000
6.3000E+00	0.00000E+00	0.0000
6.4000E+00	0.00000E+00	0.0000
6.5000E+00	0.00000E+00	0.0000
6.6000E+00	0.00000E+00	0.0000
6.7000E+00	0.00000E+00	0.0000
6.8000E+00	0.00000E+00	0.0000
6.9000E+00	0.00000E+00	0.0000
7.0000E+00	0.00000E+00	0.0000
7.1000E+00	0.00000E+00	0.0000
7.2000E+00	0.00000E+00	0.0000
7.3000E+00	0.00000E+00	0.0000
7.4000E+00	0.00000E+00	0.0000
7.5000E+00	0.00000E+00	0.0000
7.6000E+00	0.00000E+00	0.0000
7.7000E+00	0.00000E+00	0.0000
7.8000E+00	0.00000E+00	0.0000
7.9000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.0000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.1000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.2000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.3000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.4000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.5000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.6000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.7000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.8000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.9000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.0000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.1000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.2000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.3000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.4000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.5000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.6000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.7000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.8000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.9000E+00	0.00000E+00	0.0000
1.0000E+01	0.00000E+00	0.0000
total	4.96465E-08	0.0318

analysis of the results in the tally fluctuation chart bin (tfc) for tally 26 with nps = 10000000 print table 160

normed average tally per history = 4.96465E-08
 estimated tally relative error = 0.0318
 relative error from zero tallies = 0.0259

unnormed average tally per history = 3.16497E-04
 estimated variance of the variance = 0.0020
 relative error from nonzero scores = 0.0184

number of nonzero history tallies =	1491	efficiency for the nonzero tallies = 0.0001
history number of largest tally =	3192561	largest unnormalized history tally = 9.06005E+00
(largest tally)/(average tally) =	2.86260E+04	(largest tally)/(avg nonzero tally)= 4.26814E+00
(confidence interval shift)/mean =	0.0006	shifted confidence interval center = 4.96787E-08

if the largest history score sampled so far were to occur on the next history, the tfc bin quantities would change as follows:

estimated quantities	value at nps	value at nps+1	value(nps+1)/value(nps)-1.
mean	4.96465E-08	4.97886E-08	0.002863
relative error	3.17932E-02	3.18307E-02	0.001179
variance of the variance	1.97168E-03	2.00475E-03	0.016775
shifted center	4.96787E-08	4.96790E-08	0.000006
figure of merit	0.00000E+00	0.00000E+00	0.000000

*** omitted ***

プログラムリスト 11 BGO に対する単色熱中性子発生時の MCNP 出力ファイル

```
*****
* Copyright Notice for MCNPX *
*
* This program was prepared by the Regents of the *
* University of California at Los Alamos National *
* Laboratory (the University) under contract number *
* W-7405-ENG-36 with the U.S. Department of Energy *
* (DOE). The University has certain rights in the *
* program pursuant to the contract and the program *
* should not be copied or distributed outside your *
* organization. All rights in the program are *
* reserved by the DOE and the University. Neither *
* the U.S. Government nor the University makes any *
* warranty, express or implied, or assumes any *
* liability or responsibility for the use of this *
* software. *
*
*****
```

1- MCNPX test problem 1:
2- c
3- c 1 MeV neutrons on a cylindrical Cu target of 4 cm radius and
4- c 6 cm thickness. Source uniformly distributed over circle of
5- c 0.5 cm radius. Tallies of proton, photon and neutron current.
6- c
7- c Cells
8- c
9- 11 12 -6.71 -10 14 -15
10- c 12 13 -2.23 10 -11 16 -17
11- 29 0 -40 (#11)
12- 31 0 40
13-
14- c
15- c Surfaces
16- c
17- 10 cz 6.35
18- c 11 cz 7.35
19- 14 pz -3.75
20- 15 pz 3.75
21- c 16 pz -4.75
22- c 17 pz 4.75
23- 40 so 40.0
24-
25- c
26- c Materials
27- c
28- m12 83209 4 32072 3 8016 12 \$ BGO
29- c m13 14028 1 8016 2 \$ Si02
30- c
31- c Source
32- c
33- sdef sur = 40 erg = 2.5e-8 par = 1 nrm = -1
34- c
35- c Options
36- c
37- c spabi:a all 5. 2
38- c impin,h,p,e,a 1 1 0
39- impin,p,e 1 1 0
40- physin 260 5j 1
41- c phys:h 260 5j 1
42- phys:p
43- phys:e
44- c phys:a
45- c mode n h p e a
46- mode n p e

warning. photonuclear physics may be needed (phys:p).

47- lca 2 1
48- lea 2j 0
49- c cut:h j 0
50- c cut:a j 0
51- c
52- c Tallies
53- c
54- F6:n 11
55- c F16:h 11
56- F26:p 11
57- c F46:a 11
58- E6 2.5e-8 1e-7 1e-6 1e-5 1e-4 1e-3 1e-2 1e-1 1. 3I 6. T
59- c E16 0.01 98I 1. 39I 5. T
60- E26 0.01 98I 1. 98I 10. T
61- c E46 1. 2. 3. 4. 5. T
62- F4:n 11
63- FM4 -1 12 2
64- FI4:n 11
65- FM14 1.38e-2 901 (16)(17)(51)(101)
66- M901 83209 1.
warning. material 901 is used only for a perturbation or tally.

67- F44:n 11

```

68-      FM44 1.03e-2 902 (16)(17)(51)(101)
69-      M902 32072 1.
warning. material 902 is used only for a perturbation or tally.
70-      F74;n 11
71-      FM74 4.13e-2 903 (16)(17)(51)(101)
72-      M903 8016 1.
warning. material 903 is used only for a perturbation or tally.
73-      E0 2.5e-8 1e-7 1e-6 1e-5 1e-4 1e-3 1e-2 1e-1 1. 3I 5. T
74-      c -----
75-      print
76-      nps 10000000
77-      prdmp 2j -1
78-      ssw 40 sym=2
79-      c histp
1source                                         print table 10
*** omitted ***
itally 4      nps = 10000000
tally type 4      track length estimate of particle flux.
particle(s): neutron

volumes
    cell:      11
              9.50077E+02

cell 11
multiplier bin: -1.00000E+00 12          2
    energy
2.5000E-08  4.35689E-05  0.0027
1.0000E-07  2.54606E-05  0.0037
1.0000E-06  1.82403E-07  0.0402
1.0000E-05  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-04  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-03  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-02  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-01  0.00000E+00  0.0000
1.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
2.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
3.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
4.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
5.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
    total   6.92119E-05  0.0025
ianalysis of the results in the tally fluctuation chart bin (tfc) for tally 4 with nps = 10000000 print table 160

normed average tally per history = 6.92119E-05
estimated tally relative error = 0.0025
relative error from zero tallies = 0.0019
unnormed average tally per history = 6.57566E-02
estimated variance of the variance = 0.0000
relative error from nonzero scores = 0.0017

number of nonzero history tallies = 274547
history number of largest tally = 4806657
(largest tally)/(average tally) = 4.39952E+02
efficiency for the nonzero tallies = 0.0275
largest unnormalized history tally = 2.89298E+01
(largest tally)/(avg nonzero tally)= 1.20788E+01

(confidence interval shift)/mean = 0.0000
shifted confidence interval center = 6.92122E-05

*** omitted ***

itally 6      nps = 10000000
tally type 6      track length estimate of heating.           units  mev/gram
particle(s): neutron

masses
    cell:      11
              6.37501E+03

cell 11
    energy
2.5000E-08  1.05718E-06  0.0029
1.0000E-07  4.73576E-07  0.0036
1.0000E-06  1.87299E-09  0.0398
1.0000E-05  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-04  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-03  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-02  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-01  0.00000E+00  0.0000
1.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
2.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
3.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
4.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
5.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
    total   1.53263E-06  0.0026
ianalysis of the results in the tally fluctuation chart bin (tfc) for tally 6 with nps = 10000000 print table 160

normed average tally per history = 1.53263E-06
estimated tally relative error = 0.0026
relative error from zero tallies = 0.0019
unnormed average tally per history = 9.77052E-03
estimated variance of the variance = 0.0000
relative error from nonzero scores = 0.0018

number of nonzero history tallies = 274547
history number of largest tally = 6399132
efficiency for the nonzero tallies = 0.0275
largest unnormalized history tally = 4.61339E+00

```

```

(largest tally)/(average tally) = 4.72174E+02      (largest tally)/(avg nonzero tally)= 1.29634E+01
(confidence interval shift)/mean = 0.0000          shifted confidence interval center = 1.63264E-06

*** omitted ***

itally 14      nps = 10000000
           tally type 4   track length estimate of particle flux.
           particle(s): neutron

volumes
  cell:    11
           9.50077E+02

cell 11
multiplier bin: 1.38000E-02 901      16
energy
  2.5000E-08  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-07  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-06  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-05  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-04  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-03  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-02  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-01  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  2.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  3.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  4.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  5.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  total       0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 1.38000E-02 901      17
energy
  2.5000E-08  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-07  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-06  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-05  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-04  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-03  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-02  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-01  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  2.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  3.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  4.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  5.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  total       0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 1.38000E-02 901      51
energy
  2.5000E-08  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-07  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-06  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-05  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-04  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-03  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-02  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-01  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  2.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  3.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  4.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  5.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  total       0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 1.38000E-02 901      101
energy
  2.5000E-08  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-07  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-06  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-05  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-04  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-03  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-02  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-01  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  2.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  3.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  4.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  5.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  total       0.00000E+00 0.0000

there are no nonzero tallies in the tally fluctuation chart bin for tally 14
itally 44      nps = 10000000
           tally type 4   track length estimate of particle flux.
           particle(s): neutron

```

```

volumes
cell:    11
         9.50077E+02

cell 11
multiplier bin: 1.03000E-02 902      16
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total     0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 1.03000E-02 902      17
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total     0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 1.03000E-02 902      51
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total     0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 1.03000E-02 902      101
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total     0.00000E+00 0.0000
```

there are no nonzero tallies in the tally fluctuation chart bin for tally 44
 tally 74 nps = 10000000
 tally type 4 track length estimate of particle flux.
 particle(s): neutron

```

volumes
cell:    11
         9.50077E+02
```

```

cell 11
multiplier bin: 4.13000E-02 903      16
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
```

```

1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 4.13000E-02 903      17
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 4.13000E-02 903      51
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 4.13000E-02 903      101
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 0.00000E+00 0.0000

there are no nonzero tallies in the tally fluctuation chart bin for tally 74
itally 26      nps = 10000000
tally type 6      track length estimate of heating.          units mev/gram
particle(s): photon

masses
cell: 11
6.37501E+03

cell 11
energy
1.0000E-02 7.10119E-12 0.2018
2.0000E-02 3.96509E-11 0.1067
3.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
4.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
5.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
6.0000E-02 6.71299E-12 0.6736
7.0000E-02 9.51750E-12 0.5074
8.0000E-02 3.39222E-10 0.0918
9.0000E-02 8.16581E-11 0.1737
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.1000E-01 1.25984E-12 1.0000
1.2000E-01 1.87954E-12 0.6325
1.3000E-01 1.84185E-13 1.0000
1.4000E-01 2.75217E-12 0.5702

```

1.5000E-01	8.05584E-12	0.5147
1.6000E-01	2.55176E-12	0.5338
1.7000E-01	3.53284E-12	0.5150
1.8000E-01	6.02924E-11	0.3007
1.9000E-01	1.20836E-11	0.5286
2.0000E-01	3.57966E-11	0.2668
2.1000E-01	4.02913E-11	0.3357
2.2000E-01	3.29835E-11	0.4141
2.3000E-01	2.40265E-11	0.3708
2.4000E-01	2.76038E-11	0.4757
2.5000E-01	4.28886E-11	0.2668
2.6000E-01	3.87652E-11	0.3035
2.7000E-01	2.41075E-11	0.3701
2.8000E-01	3.55231E-11	0.3282
2.9000E-01	5.63313E-11	0.2951
3.0000E-01	4.13860E-11	0.3968
3.1000E-01	2.97287E-11	0.3142
3.2000E-01	1.91709E-11	0.4065
3.3000E-01	6.52724E-11	0.3776
3.4000E-01	4.25941E-11	0.3444
3.5000E-01	5.84331E-11	0.3751
3.6000E-01	4.32015E-11	0.3578
3.7000E-01	3.87109E-11	0.3444
3.8000E-01	7.03981E-11	0.3582
3.9000E-01	3.76725E-11	0.4344
4.0000E-01	5.14254E-11	0.4348
4.1000E-01	3.07295E-11	0.4138
4.2000E-01	4.24053E-11	0.4498
4.3000E-01	7.06187E-11	0.2972
4.4000E-01	1.06144E-11	0.4752
4.5000E-01	3.56127E-11	0.3849
4.6000E-01	5.53631E-11	0.3510
4.7000E-01	6.24107E-11	0.3714
4.8000E-01	2.37665E-11	0.4384
4.9000E-01	4.63435E-11	0.5335
5.0000E-01	6.10982E-11	0.3842
5.1000E-01	1.43832E-11	0.5150
5.2000E-01	1.44134E-09	0.0891
5.3000E-01	2.52012E-11	0.6488
5.4000E-01	5.68023E-13	0.7076
5.5000E-01	3.96108E-12	0.9760
5.6000E-01	8.89768E-12	1.0000
5.7000E-01	9.09339E-13	1.0000
5.8000E-01	0.00000E+00	0.0000
5.9000E-01	7.12248E-12	0.6929
6.0000E-01	8.86909E-12	0.6038
6.1000E-01	8.50327E-13	1.0000
6.2000E-01	3.59881E-12	0.7211
6.3000E-01	3.11312E-12	1.0000
6.4000E-01	7.01603E-12	0.6171
6.5000E-01	0.00000E+00	0.0000
6.6000E-01	1.23084E-11	0.7322
6.7000E-01	8.82590E-13	1.0000
6.8000E-01	1.72982E-11	0.4747
6.9000E-01	1.25795E-11	0.7224
7.0000E-01	3.16825E-11	0.9390
7.1000E-01	6.04010E-12	0.7484
7.2000E-01	2.01470E-11	0.6896
7.3000E-01	9.95001E-12	0.6298
7.4000E-01	7.72924E-12	0.7976
7.5000E-01	6.22701E-12	0.6661
7.6000E-01	0.00000E+00	0.0000
7.7000E-01	0.00000E+00	0.0000
7.8000E-01	2.03971E-12	1.0000
7.9000E-01	6.68830E-12	1.0000
8.0000E-01	1.17864E-11	0.7987
8.1000E-01	2.54291E-11	0.4621
8.2000E-01	2.25164E-11	0.9120
8.3000E-01	4.18559E-12	0.8497
8.4000E-01	1.48694E-11	0.9697
8.5000E-01	9.48519E-12	0.7164
8.6000E-01	2.05845E-11	0.7100
8.7000E-01	2.20443E-11	0.8373
8.8000E-01	3.17041E-11	0.4839
8.9000E-01	5.758347E-12	1.0000
9.0000E-01	1.95268E-11	0.6776
9.1000E-01	4.39270E-11	0.6060
9.2000E-01	1.662289E-11	0.5851
9.3000E-01	7.19733E-12	1.0000
9.4000E-01	1.57659E-11	1.0000
9.5000E-01	3.41052E-12	0.7720
9.6000E-01	4.21416E-12	1.0000
9.7000E-01	3.13207E-11	0.6861
9.8000E-01	7.68745E-13	1.0000
9.9000E-01	1.18120E-11	1.0000
1.0000E+00	1.06049E-11	0.9077
1.1000E+00	1.12328E-10	0.2867
1.2000E+00	3.49915E-11	0.4694
1.3000E+00	4.83514E-11	0.3899
1.4000E+00	7.48382E-11	0.4561
1.5000E+00	6.88581E-11	0.4692

1.6000E+00	1.73085E-11	0.9165
1.7000E+00	8.49949E-11	0.3915
1.8000E+00	4.25979E-11	0.5826
1.9000E+00	6.23643E-11	0.6476
2.0000E+00	7.25598E-11	0.5238
2.1000E+00	4.87793E-11	0.4679
2.2000E+00	1.64960E-10	0.4001
2.3000E+00	6.85726E-11	0.4082
2.4000E+00	7.23583E-11	0.4802
2.5000E+00	5.70015E-11	0.4101
2.6000E+00	1.21800E-10	0.5857
2.7000E+00	9.19165E-11	0.5429
2.8000E+00	1.04653E-10	0.5808
2.9000E+00	3.84364E-11	0.5879
3.0000E+00	7.55821E-11	0.4677
3.1000E+00	1.455647E-10	0.4699
3.2000E+00	1.14081E-10	0.5886
3.3000E+00	1.30933E-10	0.4190
3.4000E+00	1.53473E-10	0.5799
3.5000E+00	2.77885E-10	0.3784
3.6000E+00	2.42733E-11	0.7535
3.7000E+00	6.10016E-11	0.6165
3.8000E+00	1.70710E-10	0.4911
3.9000E+00	1.05623E-10	0.5675
4.0000E+00	1.07833E-10	0.5622
4.1000E+00	6.98210E-09	0.0787
4.2000E+00	1.43747E-08	0.0579
4.3000E+00	0.00000E+00	0.0000
4.4000E+00	0.00000E+00	0.0000
4.5000E+00	0.00000E+00	0.0000
4.6000E+00	0.00000E+00	0.0000
4.7000E+00	0.00000E+00	0.0000
4.8000E+00	0.00000E+00	0.0000
4.9000E+00	0.00000E+00	0.0000
5.0000E+00	0.00000E+00	0.0000
5.1000E+00	0.00000E+00	0.0000
5.2000E+00	0.00000E+00	0.0000
5.3000E+00	0.00000E+00	0.0000
5.4000E+00	0.00000E+00	0.0000
5.5000E+00	0.00000E+00	0.0000
5.6000E+00	0.00000E+00	0.0000
5.7000E+00	0.00000E+00	0.0000
5.8000E+00	0.00000E+00	0.0000
5.9000E+00	0.00000E+00	0.0000
6.0000E+00	0.00000E+00	0.0000
6.1000E+00	0.00000E+00	0.0000
6.2000E+00	0.00000E+00	0.0000
6.3000E+00	0.00000E+00	0.0000
6.4000E+00	0.00000E+00	0.0000
6.5000E+00	0.00000E+00	0.0000
6.6000E+00	0.00000E+00	0.0000
6.7000E+00	0.00000E+00	0.0000
6.8000E+00	0.00000E+00	0.0000
6.9000E+00	0.00000E+00	0.0000
7.0000E+00	0.00000E+00	0.0000
7.1000E+00	0.00000E+00	0.0000
7.2000E+00	0.00000E+00	0.0000
7.3000E+00	0.00000E+00	0.0000
7.4000E+00	0.00000E+00	0.0000
7.5000E+00	0.00000E+00	0.0000
7.6000E+00	0.00000E+00	0.0000
7.7000E+00	0.00000E+00	0.0000
7.8000E+00	0.00000E+00	0.0000
7.9000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.0000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.1000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.2000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.3000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.4000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.5000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.6000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.7000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.8000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.9000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.0000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.1000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.2000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.3000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.4000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.5000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.6000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.7000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.8000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.9000E+00	0.00000E+00	0.0000
1.0000E+01	0.00000E+00	0.0000
total	2.79743E-08	0.0430

*** omitted ***

17.2 GSO 検出器に関するシミュレーション計算

GSO 検出器のシミュレーション計算に際し、使用した入力ファイルを含む出力ファイルをプログラムリスト 12,13,14 に示した。また、その際に得られる γ 線のエネルギー・デポジットのスペクトルを、図 168-170 に示した。

これらのエネルギー・スペクトルから考察し、観測される γ 線の特徴は表 29 のようにまとめられる。

表 29: 中性子入射時に GSO で検出される特徴的な γ 線

入射中性子の エネルギー (MeV)	特徴的な γ 線の エネルギー (MeV)	発生頻度 (/ 1 発生中性子)
2.5×10^{-8}	1.2	2.0×10^{-7}
	2.5	2.9×10^{-7}
	5.5	6.0×10^{-8}
	6.5	8.0×10^{-8}
1.0×10^{-3}	1.2	1.8×10^{-7}
	2.5	2.5×10^{-7}
	5.5	7.0×10^{-8}
	6.5	7.0×10^{-8}
1.0	0.1	7.6×10^{-9}
	1.2	4.5×10^{-9}
	2.5	7.0×10^{-9}
	5.5	2.0×10^{-9}
	6.5	3.0×10^{-9}

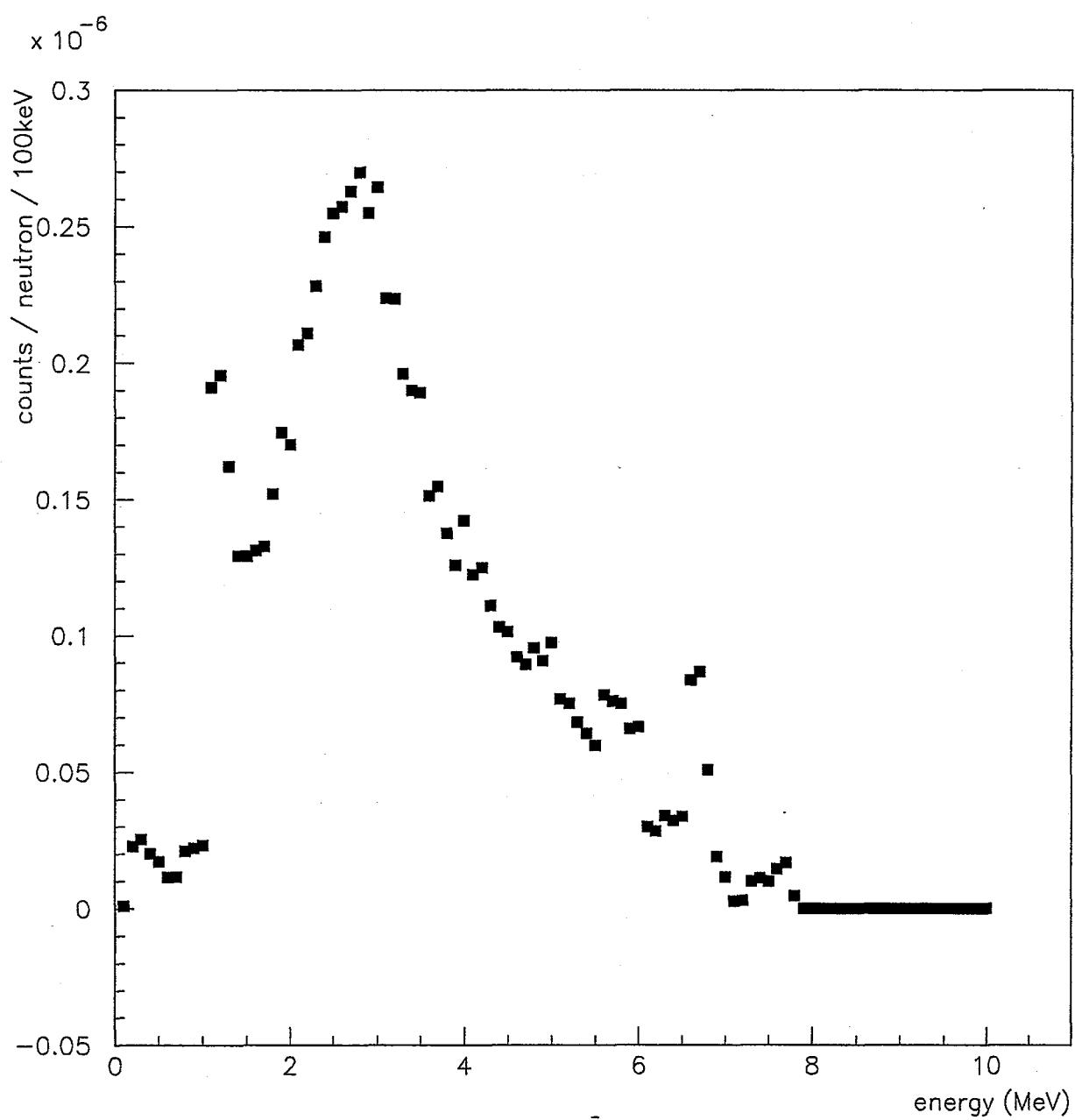


図 168: 25meV 単色中性子発生時の、GSO 検出器における γ 線のエネルギー デポジット

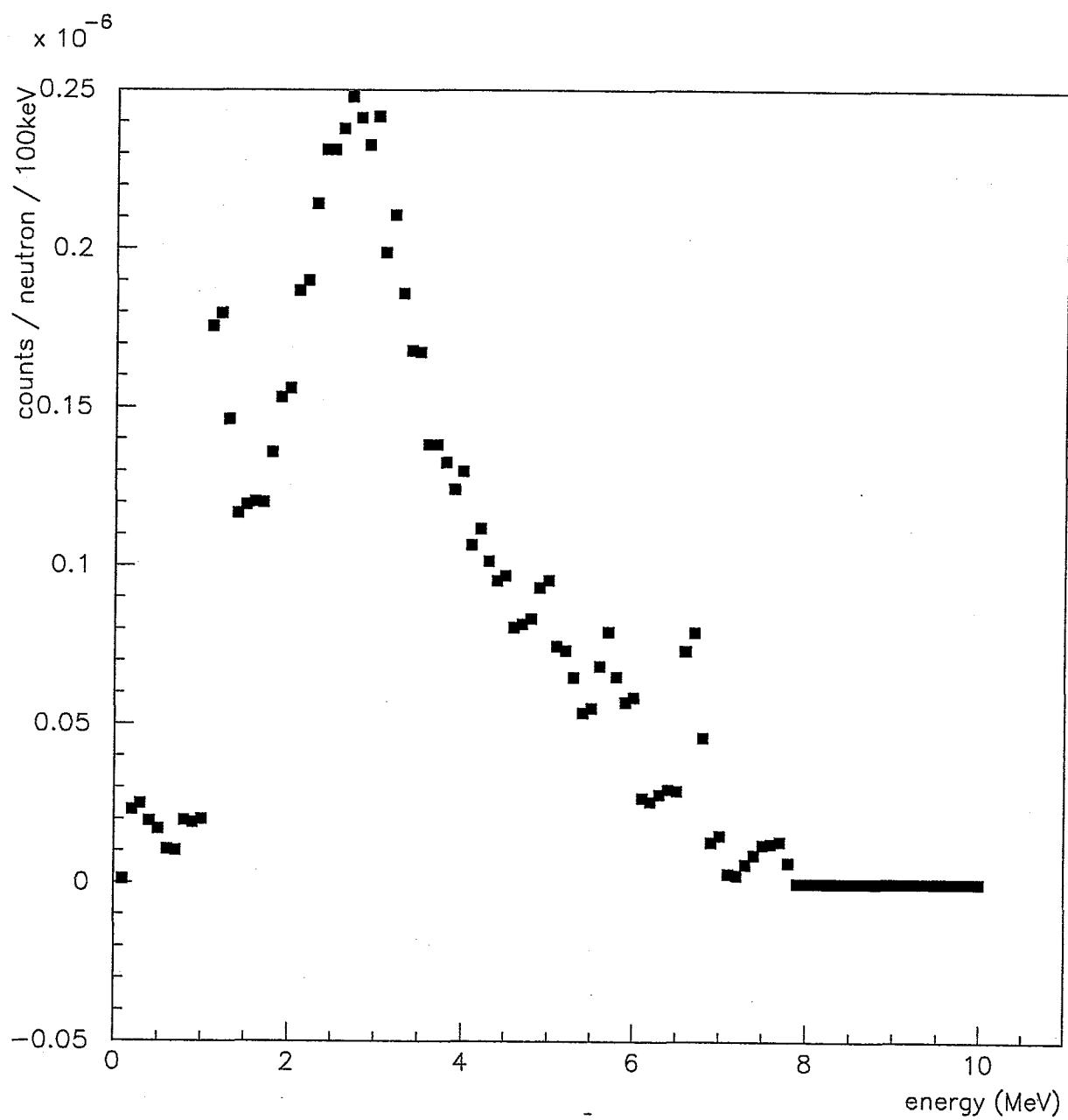


図 169: 1keV 単色中性子発生時の、GSO 検出器における γ 線のエネルギー・デポジット

プログラムリスト 12 GSO に対する単色 1MeV 中性子発生時の MCNP 出力ファイル

```
*****
* Copyright Notice for MCNPX *
*
* This program was prepared by the Regents of the *
* University of California at Los Alamos National *
* Laboratory (the University) under contract number *
* W-7405-ENG-36 with the U.S. Department of Energy *
* (DOE). The University has certain rights in the *
* program pursuant to the contract and the program *
* should not be copied or distributed outside your *
* organization. All rights in the program are *
* reserved by the DOE and the University. Neither *
* the U.S. Government nor the University makes any *
* warranty, express or implied, or assumes any *
* liability or responsibility for the use of this *
* software. *
*
*****
```

1- MCNPX test problem 1:
2- c -----
3- c 1 MeV neutrons on a cylindrical Cu target of 4 cm radius and
4- c 6 cm thickness. Source uniformly distributed over circle of
5- c 0.5 cm radius. Tallies of proton, photon and neutron current.
6- c -----
7- c Cells
8- c -----
9- 11 12 -6.71 -10 14 -16
10- c 12 13 -2.23 10 -11 16 -17
11- 29 0 -40 (#ii)
12- 31 0 40
13-
14- c -----
15- c Surfaces
16- c -----
17- 10 cz 6.35
18- c 11 cz 7.35
19- 14 pz -3.75
20- 15 pz 3.75
21- c 16 pz -4.75
22- c 17 pz 4.75
23- 40 so 40.0
24-
25- c -----
26- c Materials
27- c -----
28- m12 64000 2 14000 1 8016 5 \$ GSO
29- c m13 14028 1 8016 2 \$ SiO2
30- c -----
31- c Source
32- c -----
33- sdef sur = 40 erg = 1e-0 par = 1 nrm = -1
34- c -----
35- c Options
36- c -----
37- c spabia all 5. 2
38- c imp:n,h,p,e,a 1 1 0
39- c imp:n,p,e 1 1 0
40- c phys:n 260 5j 1
41- c phys:h 260 5j 1
42- c phys:p
43- c phys:e
44- c phys:a
45- c mode n h p e a
46- c mode n p e
warning. photonuclear physics may be needed (phys:p).
47- lca 2 1
48- lea 2j 0
49- c cut:h j 0
50- c cut:a j 0
51- c -----
52- c Tallies
53- c -----
54- F6:11
55- c F16:h 11
56- F26:p 11
57- c F46:a 11
58- E6 2.5e-8 1e-7 1e-6 1e-5 1e-4 1e-3 1e-2 1e-1 1. 3I 5. T
59- c E16 0.01 98I 1. 39I 5. T
60- E26 0.01 98I 1. 89I 10. T
61- c E46 1. 2. 3. 4. 5. T
62- F4:n 11
63- FM4 -1 12 2
64- F14:n 11
65- FM14 6.89e-3 901 (1)(2)(51)(52)(102)(103)(104)(105)(106)(107)
66- M901 64000 1.
warning. material 901 is used only for a perturbation or tally.
67- F44:n 11

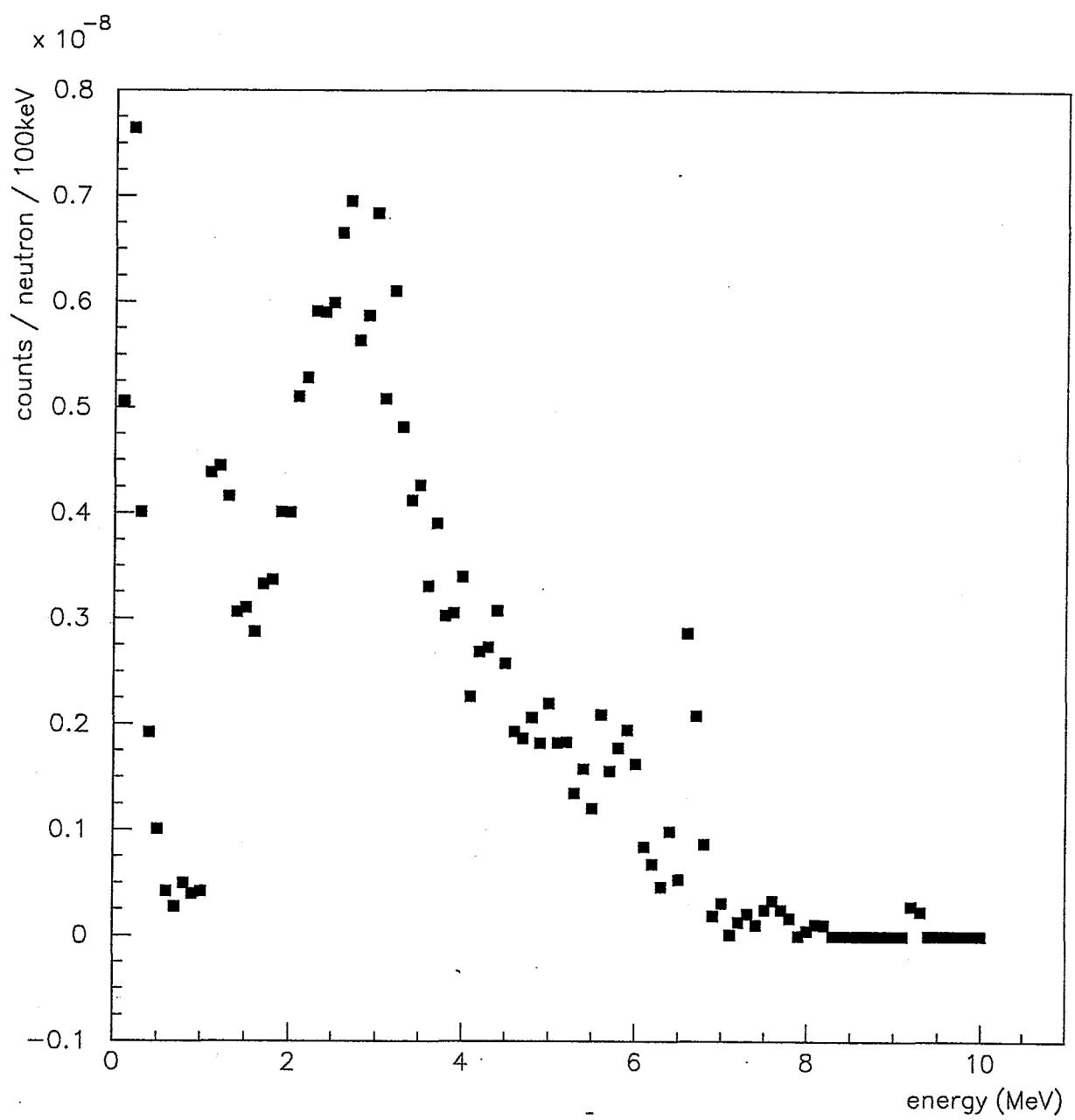


図 170: 1MeV 単色中性子発生時の、GSO 検出器における γ 線のエネルギー・ポジット

```

68-      FM44 3.45e-3 902 (1)(2)(51)(52)(102)(103)(104)(105)(106)(107)
69-      M902 14000 1.
warning. material 902 is used only for a perturbation or tally.
70-      F74:n 11
71-      FM74 1.72e-2 903 (1)(2)(51)(52)(102)(103)(104)(105)(106)(107)
72-      M903 8016 1.
warning. material 903 is used only for a perturbation or tally.
73-      E0 2.5e-8 1e-7 1e-5 1e-4 1e-3 1e-2 1e-1 1. 3I 5. T
74-      -----
75-      print
76-      nps 1000000
77-      prdmp 2j -1
78-      ssw 40 sym=2
79-      c histp

*** omitted ***

itally 4      nps = 1000000
          tally type 4   track length estimate of particle flux.
          particle(s): neutron

volumes
cell:    11
         9.50077E+02

cell 11
multiplier bin: -1.00000E+00 12      2
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 1.07924E-08 0.1601
1.0000E-01 6.80159E-07 0.0235
1.0000E+00 6.94538E-05 0.0025
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total    7.01448E-05 0.0025
ianalysis of the results in the tally fluctuation chart bin (tfc) for tally 4 with nps = 10000000 print table 160

normed average tally per history = 7.01448E-05      unnormed average tally per history = 6.66429E-02
estimated tally relative error = 0.0025      estimated variance of the variance = 0.0000
relative error from zero tallies = 0.0019      relative error from nonzero scores = 0.0017

number of nonzero history tallies = 274547      efficiency for the nonzero tallies = 0.0275
history number of largest tally = 483304      largest unnormalized history tally = 2.33529E+01
(largest tally)/(average tally) = 3.50419E+02      (largest tally)/(avg nonzero tally)= 9.62063E+00

(confidence interval shift)/mean = 0.0000      shifted confidence interval center = 7.01451E-05

*** omitted ***

itally 6      nps = 10000000
          tally type 6   track length estimate of heating.      units  mev/gram
          particle(s): neutron

masses
cell:    11
         6.37501E+03

cell 11
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 6.52904E-13 0.1578
1.0000E-01 3.78095E-10 0.0239
1.0000E+00 6.77459E-07 0.0024
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total    6.77838E-07 0.0024
ianalysis of the results in the tally fluctuation chart bin (tfc) for tally 6 with nps = 10000000 print table 160

normed average tally per history = 6.77838E-07      unnormed average tally per history = 4.32123E-03
estimated tally relative error = 0.0024      estimated variance of the variance = 0.0000
relative error from zero tallies = 0.0019      relative error from nonzero scores = 0.0015

number of nonzero history tallies = 274547      efficiency for the nonzero tallies = 0.0275
history number of largest tally = 6838288      largest unnormalized history tally = 9.49908E-01
(largest tally)/(average tally) = 2.19824E+02      (largest tally)/(avg nonzero tally)= 6.03819E+00

```

```

(confidence interval shift)/mean = 0.0000      shifted confidence interval center = 6.77840E-07

*** omitted ***

itally 14      nps = 10000000
          tally type 4   track length estimate of particle flux.
          particle(s): neutron

volumes
cell:      11
           9.50077E+02

cell 11
multiplier bin: 6.89000E-03 901      1
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 2.53591E-09 0.1605
1.0000E-01 1.22959E-07 0.0238
1.0000E+00 8.53546E-08 0.0026
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total     8.66095E-06 0.0026

cell 11
multiplier bin: 6.89000E-03 901      2
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 2.11581E-09 0.1602
1.0000E-01 1.11945E-07 0.0237
1.0000E+00 6.99746E-08 0.0027
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total     7.11152E-06 0.0027

cell 11
multiplier bin: 6.89000E-03 901      51
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total     0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 6.89000E-03 901      52
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total     0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 6.89000E-03 901      102
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000

```

```

1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 4.20105E-10 0.1622
1.0000E-01 1.05019E-08 0.0260
1.0000E+00 1.21734E-07 0.0031
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 1.32656E-07 0.0037

cell 11
multiplier bin: 6.89000E-03 901 103
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 6.89000E-03 901 104
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 6.89000E-03 901 105
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 6.89000E-03 901 106
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 6.89000E-03 901 107
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000

```

```

1.0000E-04  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01  0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
total      0.00000E+00 0.0000
analysis of the results in the tally fluctuation chart bin (tfc) for tally 14 with nps = 10000000 print table 160

normed average tally per history = 8.66095E-06      unnormed average tally per history = 8.22857E-03
estimated tally relative error   = 0.0026      estimated variance of the variance = 0.0000
relative error from zero tallies = 0.0019      relative error from nonzero scores = 0.0018

number of nonzero history tallies = 274547      efficiency for the nonzero tallies = 0.0275
history number of largest tally = 483304      largest unnormalized history tally = 3.32045E+00
(largest tally)/(average tally) = 4.03527E+02      (largest tally)/(avg nonzero tally)= 1.10787E+01

(confidence interval shift)/mean = 0.0000      shifted confidence interval center = 8.66100E-06

*** omitted ***

itally 44      nps = 10000000
               tally type 4 track length estimate of particle flux.
               particle(s): neutron

volumes
cell:    11
         9.50077E+02

cell 11
multiplier bin: 3.45000E-03 902      1
energy
2.5000E-08  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02  1.69100E-10 0.1601
1.0000E-01  1.28609E-08 0.0276
1.0000E+00  2.52281E-06 0.0026
2.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
total      2.53584E-06 0.0026

cell 11
multiplier bin: 3.45000E-03 902      2
energy
2.5000E-08  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02  1.68915E-10 0.1601
1.0000E-01  1.28358E-08 0.0276
1.0000E+00  2.52195E-06 0.0026
2.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
total      2.53496E-06 0.0026

cell 11
multiplier bin: 3.45000E-03 902      51
energy
2.5000E-08  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01  0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
total      0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 3.45000E-03 902      52
energy
2.5000E-08  0.00000E+00 0.0000

```

```

1.0000E-07  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-06  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-05  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-04  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-03  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-02  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-01  0.00000E+00  0.0000
1.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
2.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
3.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
4.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
5.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
total      0.00000E+00  0.0000

cell 11
multiplier bin: 3.45000E-03 902      102
energy
2.5000E-08  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-07  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-06  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-05  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-04  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-03  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-02  1.85309E-13  0.1644
1.0000E-01  2.51455E-11  0.1036
1.0000E+00  8.60763E-10  0.0030
2.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
3.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
4.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
5.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
total      8.86094E-10  0.0042

cell 11
multiplier bin: 3.45000E-03 902      103
energy
2.5000E-08  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-07  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-06  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-05  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-04  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-03  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-02  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-01  0.00000E+00  0.0000
1.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
2.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
3.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
4.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
5.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
total      0.00000E+00  0.0000

cell 11
multiplier bin: 3.45000E-03 902      104
energy
2.5000E-08  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-07  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-06  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-05  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-04  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-03  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-02  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-01  0.00000E+00  0.0000
1.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
2.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
3.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
4.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
5.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
total      0.00000E+00  0.0000

cell 11
multiplier bin: 3.45000E-03 902      105
energy
2.5000E-08  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-07  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-06  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-05  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-04  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-03  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-02  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-01  0.00000E+00  0.0000
1.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
2.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
3.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
4.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
5.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
total      0.00000E+00  0.0000

cell 11
multiplier bin: 3.45000E-03 902      106
energy
2.5000E-08  0.00000E+00  0.0000
1.0000E-07  0.00000E+00  0.0000

```

```

1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 3.45000E-03 902      107
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 0.00000E+00 0.0000

analysis of the results in the tally fluctuation chart bin (tfc) for tally 44 with nps = 10000000 print table 160

normed average tally per history = 2.53584E-06      unnormed average tally per history = 2.40925E-03
estimated tally relative error = 0.0026      estimated variance of the variance = 0.0000
relative error from zero tallies = 0.0019      relative error from nonzero scores = 0.0018

number of nonzero history tallies = 274547      efficiency for the nonzero tallies = 0.9275
history number of largest tally = 6072677      largest unnormalized history tally = 1.15118E+00
(largest tally)/(average tally) = 4.77816E-02      (largest tally)/(avg nonzero tally)= 1.31183E+01

(confidence interval shift)/mean = 0.0000      shifted confidence interval center = 2.53586E-06

*** omitted ***

tally 74      nps = 10000000
tally type 4      track length estimate of particle flux.
particle(s): neutron

volumes
cell: 11
9.50077E+02

cell 11
multiplier bin: 1.72000E-02 903      1
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 1.60125E-09 0.1599
1.0000E-01 1.20097E-07 0.0233
1.0000E+00 1.54832E-05 0.0025
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 1.56048E-05 0.0025

cell 11
multiplier bin: 1.72000E-02 903      2
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 1.60125E-09 0.1599
1.0000E-01 1.20097E-07 0.0233
1.0000E+00 1.54832E-05 0.0025
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 1.56048E-05 0.0025

cell 11
multiplier bin: 1.72000E-02 903      51

```

```

energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 1.72000E-02 903      52
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 1.72000E-02 903      102
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 1.38917E-16 0.1617
1.0000E-01 4.28438E-15 0.0248
1.0000E+00 1.04483E-13 0.0028
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 1.08607E-13 0.0030

cell 11
multiplier bin: 1.72000E-02 903      103
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 1.72000E-02 903      104
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 1.72000E-02 903      105
energy

```

```

2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 1.72000E-02 903      106
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 1.72000E-02 903      107
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 0.00000E+00 0.0000

analysis of the results in the tally fluctuation chart bin (tfc) for tally 74 with nps = 10000000 print table 160

normed average tally per history = 1.56048E-05      unnormed average tally per history = 1.48258E-02
estimated tally relative error = 0.0025      estimated variance of the variance = 0.0000
relative error from zero tallies = 0.0019      relative error from nonzero scores = 0.0016

number of nonzero history tallies = 274547      efficiency for the nonzero tallies = 0.0275
history number of largest tally = 7626345      largest unnormalized history tally = 4.77871E+00
(largest tally)/(average tally) = 3.22324E+02      (largest tally)/(avg nonzero tally)= 8.84930E+00

(confidence interval shift)/mean = 0.0000      shifted confidence interval center = 1.56049E-05

*** omitted ***

tally 26      nps = 10000000
tally type 6 track length estimate of heating.      units mev/gram
particle(s): photon

masses
cell: 11
6.37501E+03

cell 11
energy
1.0000E-02 2.39604E-09 0.0099
2.0000E-02 5.36432E-10 0.0300
3.0000E-02 1.38840E-09 0.0240
4.0000E-02 2.87550E-09 0.0196
5.0000E-02 4.48745E-09 0.0059
6.0000E-02 1.74455E-09 0.0203
7.0000E-02 2.51323E-09 0.0198
8.0000E-02 3.51674E-09 0.0193
9.0000E-02 4.16835E-09 0.0192
1.0000E-01 5.08526E-09 0.0192
1.1000E-01 6.01885E-09 0.0184
1.2000E-01 6.59672E-09 0.0190
1.3000E-01 7.29728E-09 0.0188
1.4000E-01 7.88036E-09 0.0191
1.5000E-01 8.00095E-09 0.0197
1.6000E-01 8.26395E-09 0.0201

```

1.7000E-01	8.14138E-09	0.0206
1.8000E-01	7.71467E-09	0.0219
1.9000E-01	7.77265E-09	0.0224
2.0000E-01	7.64034E-09	0.0232
2.1000E-01	7.22555E-09	0.0237
2.2000E-01	6.85447E-09	0.0248
2.3000E-01	6.45416E-09	0.0255
2.4000E-01	5.90425E-09	0.0271
2.5000E-01	5.79360E-09	0.0282
2.6000E-01	5.49862E-09	0.0292
2.7000E-01	5.25523E-09	0.0309
2.8000E-01	4.76725E-09	0.0314
2.9000E-01	4.29879E-09	0.0335
3.0000E-01	4.01153E-09	0.0353
3.1000E-01	4.06361E-09	0.0360
3.2000E-01	3.55424E-09	0.0386
3.3000E-01	3.13421E-09	0.0410
3.4000E-01	2.91902E-09	0.0412
3.5000E-01	2.77077E-09	0.0440
3.6000E-01	2.44277E-09	0.0475
3.7000E-01	2.10820E-09	0.0497
3.8000E-01	2.01400E-09	0.0529
3.9000E-01	1.92869E-09	0.0533
4.0000E-01	1.92476E-09	0.0546
4.1000E-01	1.82059E-09	0.0561
4.2000E-01	1.61114E-09	0.0608
4.3000E-01	1.52013E-09	0.0681
4.4000E-01	1.33865E-09	0.0676
4.5000E-01	1.41315E-09	0.0654
4.6000E-01	1.16771E-09	0.0703
4.7000E-01	1.19124E-09	0.0689
4.8000E-01	1.01299E-09	0.0778
4.9000E-01	1.02037E-09	0.0781
5.0000E-01	1.01068E-09	0.0826
5.1000E-01	9.16502E-10	0.0829
5.2000E-01	6.74320E-09	0.0385
5.3000E-01	5.85425E-10	0.1034
5.4000E-01	5.24205E-10	0.1033
5.5000E-01	5.54859E-10	0.1074
5.6000E-01	5.44869E-10	0.0994
5.7000E-01	4.57208E-10	0.1151
5.8000E-01	3.64409E-10	0.1099
5.9000E-01	4.27638E-10	0.1212
6.0000E-01	4.21546E-10	0.1364
6.1000E-01	4.12130E-10	0.1378
6.2000E-01	4.37669E-10	0.1253
6.3000E-01	3.43632E-10	0.1183
6.4000E-01	3.56748E-10	0.1363
6.5000E-01	3.98777E-10	0.1256
6.6000E-01	3.41266E-10	0.1398
6.7000E-01	3.28834E-10	0.1314
6.8000E-01	2.79954E-10	0.1552
6.9000E-01	3.10836E-10	0.1571
7.0000E-01	2.68472E-10	0.1534
7.1000E-01	3.31903E-10	0.1633
7.2000E-01	2.65871E-10	0.1671
7.3000E-01	3.16977E-10	0.1455
7.4000E-01	2.47372E-10	0.1618
7.5000E-01	2.22705E-10	0.1737
7.6000E-01	5.04123E-10	0.1223
7.7000E-01	5.03825E-10	0.1265
7.8000E-01	4.68033E-10	0.1351
7.9000E-01	5.76998E-10	0.1196
8.0000E-01	4.95136E-10	0.1318
8.1000E-01	5.94271E-10	0.1187
8.2000E-01	4.17756E-10	0.1299
8.3000E-01	4.34595E-10	0.1354
8.4000E-01	5.00581E-10	0.1387
8.5000E-01	4.81157E-10	0.1241
8.6000E-01	5.13556E-10	0.1333
8.7000E-01	4.85915E-10	0.1390
8.8000E-01	5.58783E-10	0.1263
8.9000E-01	4.17198E-10	0.1484
9.0000E-01	3.94048E-10	0.1515
9.1000E-01	5.26292E-10	0.1334
9.2000E-01	5.25064E-10	0.1335
9.3000E-01	5.22399E-10	0.1477
9.4000E-01	6.94613E-10	0.1203
9.5000E-01	5.69544E-10	0.1341
9.6000E-01	3.95400E-10	0.1376
9.7000E-01	4.78220E-10	0.1366
9.8000E-01	4.33176E-10	0.1404
9.9000E-01	4.38852E-10	0.1585
1.0000E+00	4.13871E-10	0.1489
1.1000E+00	4.38136E-09	0.0498
1.2000E+00	4.44702E-09	0.0498
1.3000E+00	4.16071E-09	0.0546
1.4000E+00	3.06537E-09	0.0648
1.5000E+00	3.10079E-09	0.0658
1.6000E+00	2.87647E-09	0.0719
1.7000E+00	3.32702E-09	0.0703

1.8000E+00	3.36693E-09	0.0696
1.9000E+00	4.00975E-09	0.0667
2.0000E+00	4.00812E-09	0.0687
2.1000E+00	5.10265E-09	0.0626
2.2000E+00	5.27929E-09	0.0637
2.3000E+00	5.91067E-09	0.0632
2.4000E+00	5.90287E-09	0.0626
2.5000E+00	5.99160E-09	0.0619
2.6000E+00	6.64923E-09	0.0619
2.7000E+00	6.95448E-09	0.0630
2.8000E+00	5.63055E-09	0.0645
2.9000E+00	5.86938E-09	0.0683
3.0000E+00	6.83971E-09	0.0661
3.1000E+00	5.08353E-09	0.0728
3.2000E+00	6.10334E-09	0.0750
3.3000E+00	4.81682E-09	0.0822
3.4000E+00	4.12112E-09	0.0870
3.5000E+00	4.26174E-09	0.0902
3.6000E+00	3.30634E-09	0.0960
3.7000E+00	3.90034E-09	0.1019
3.8000E+00	3.02687E-09	0.1147
3.9000E+00	3.05444E-09	0.1153
4.0000E+00	3.39486E-09	0.1070
4.1000E+00	2.26143E-09	0.1306
4.2000E+00	2.68637E-09	0.1175
4.3000E+00	2.72679E-09	0.1240
4.4000E+00	3.07551E-09	0.1220
4.5000E+00	2.57618E-09	0.1296
4.6000E+00	1.92754E-09	0.1497
4.7000E+00	1.86358E-09	0.1541
4.8000E+00	2.06323E-09	0.1486
4.9000E+00	1.81806E-09	0.1628
5.0000E+00	2.19712E-09	0.1526
5.1000E+00	1.82535E-09	0.1570
5.2000E+00	1.82973E-09	0.1861
5.3000E+00	1.34804E-09	0.1953
5.4000E+00	1.57366E-09	0.2068
5.5000E+00	1.20144E-09	0.2406
5.6000E+00	2.08940E-09	0.1824
5.7000E+00	1.65519E-09	0.1946
5.8000E+00	1.77503E-09	0.1775
5.9000E+00	1.94716E-09	0.1774
6.0000E+00	1.62419E-09	0.2146
6.1000E+00	8.40648E-10	0.3144
6.2000E+00	6.76597E-10	0.3265
6.3000E+00	4.58913E-10	0.3905
6.4000E+00	9.87475E-10	0.2711
6.5000E+00	5.27829E-10	0.3284
6.6000E+00	2.86102E-09	0.1835
6.7000E+00	2.08297E-09	0.1869
6.8000E+00	8.66782E-10	0.3119
6.9000E+00	1.87945E-10	0.4766
7.0000E+00	3.07315E-10	0.5132
7.1000E+00	7.49364E-12	1.0000
7.2000E+00	1.25204E-10	0.7704
7.3000E+00	2.04446E-10	0.6629
7.4000E+00	1.03895E-10	0.6550
7.5000E+00	2.46929E-10	0.6852
7.6000E+00	3.27999E-10	0.5011
7.7000E+00	2.45137E-10	0.7202
7.8000E+00	1.64931E-10	0.8022
7.9000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.0000E+00	4.73138E-11	0.7915
8.1000E+00	1.07392E-10	0.7415
8.2000E+00	1.01072E-10	0.6780
8.3000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.4000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.5000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.6000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.7000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.8000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.9000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.0000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.1000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.2000E+00	2.82440E-10	1.0000
9.3000E+00	2.27855E-10	0.6254
9.4000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.5000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.6000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.7000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.8000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.9000E+00	0.00000E+00	0.0000
1.0000E+01	0.00000E+00	0.0000
total	4.59067E-07	0.0075

analysis of the results in the tally fluctuation chart bin (tfc) for tally 26 with nps = 10000000 print table 160

normed average tally per history = 4.59067E-07
 estimated tally relative error = 0.0075
 relative error from zero tallies = 0.0033

unnormed average tally per history = 2.92656E-03
 estimated variance of the variance = 0.0005
 relative error from nonzero scores = 0.0067

number of nonzero history tallies = 88667
history number of largest tally = 8651132
(largest tally)/(average tally) = 6.25677E+03
(confidence interval shift)/mean = 0.0001
efficiency for the nonzero tallies = 0.0089
largest unnormalized history tally = 1.83108E+01
(largest tally)/(avg nonzero tally)= 5.54769E+01
shifted confidence interval center = 4.59098E-07
*** omitted ***

プログラムリスト 13

GSO に対する単色熱外中性子発生時の MCNP 出力ファイル

```
*****
* Copyright Notice for MCNPX *
*
* This program was prepared by the Regents of the *
* University of California at Los Alamos National *
* Laboratory (the University) under contract number *
* W-7405-ENG-36 with the U.S. Department of Energy *
* (DOE). The University has certain rights in the *
* program pursuant to the contract and the program *
* should not be copied or distributed outside your *
* organization. All rights in the program are *
* reserved by the DOE and the University. Neither *
* the U.S. Government nor the University makes any *
* warranty, express or implied, or assumes any *
* liability or responsibility for the use of this *
* software. *
*
*****
```

1- MCNPX test problem 1:
2- c -----
3- c 1 MeV neutrons on a cylindrical Cu target of 4 cm radius and
4- 6 cm thickness. Source uniformly distributed over circle of
5- 0.5 cm radius. Tallies of proton, photon and neutron current.
6- c -----
7- c Cells
8- c -----
9- 11 12 -6.71 -10 14 -15
10- c 12 13 -2.23 10 -11 16 -17
11- 29 0 -40 (#11)
12- 31 0 40
13-
14- c -----
15- c Surfaces
16- c -----
17- 10 cz 6.35
18- c 11 cz 7.35
19- 14 pz -3.75
20- 15 pz 3.75
21- c 16 pz -4.75
22- c 17 pz 4.75
23- 40 so 40.0
24-
25- c -----
26- c Materials
27- c -----
28- m12 64000 2 14000 1 8016 5 \$ GSO
29- c m13 14028 1 8016 2 \$ SiO2
30- c -----
31- c Source
32- c -----
33- sdef sur = 40 erg = 1e-3 par = 1 nrm = -1
34- c -----
35- c Options
36- c -----
37- c spabi:a all 5. 2
38- c imp:n,h,p,e,a 1 1 0
39- impin,P,e 1 1 0
40- phys:n 260 5j 1
41- c phys:h 260 5j 1
42- phys:p
43- phys:e
44- c phys:a
45- c mode n h p e a
46- mode n p e

warning. photonuclear physics may be needed (phys:p).

47- lca 2 1
48- lea 2j 0
49- c cut:h j 0
50- c cut:a j 0
51- c -----
52- c Tallies
53- c -----
54- F6:n 11
55- c F16:h 11
56- F26:p 11
57- c F46:a 11
58- E6 2.5e-8 1e-7 1e-6 1e-5 1e-4 1e-3 1e-2 1e-1 1. 3I 5. T
59- c E16 0.01 98I 1. 39I 5. T
60- E26 0.01 98I 1. 89I 10. T
61- c E46 1. 2. 3. 4. 5. T
62- F4:n 11
63- FM4 -1 12 2
64- F14:n 11
65- FM14 6.89e-3 901 (1)(2)(51)(52)(102)(103)(104)(105)(106)(107)
66- M901 64000 1.

warning. material 901 is used only for a perturbation or tally.

67- F44:n 11

```

68-      FM44 3.45e-3 902 (1)(2)(51)(52)(102)(103)(104)(105)(106)(107)
69-      M902 14000 1.
warning. material 902 is used only for a perturbation or tally.
70-      F74:n 11
71-      FM74 1.72e-2 903 (1)(2)(51)(52)(102)(103)(104)(105)(106)(107)
72-      M903 8016 1.
warning. material 903 is used only for a perturbation or tally.
73-      E0 2.5e-8 1e-7 1e-6 1e-5 1e-4 1e-3 1e-2 1e-1 1. SI 5. T
74-      c -----
75-      print
76-      nps 1000000
77-      prdmp 2j -1
78-      ssw 40 sym=2
79-      c histp

*** omitted ***

italy 4      nps = 1000000
          tally type 4    track length estimate of particle flux.
          particle(s): neutron

volumes
  cell:     11
            9.50077E+02

cell 11
multiplier bin: -1.00000E+00 12      2
  energy
  2.5000E-08  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-07  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-06  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-05  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-04  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-03  3.79565E-05 0.0024
  1.0000E-02  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-01  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  2.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  3.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  4.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  5.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  total       3.79565E-05 0.0024
ianalysis of the results in the tally fluctuation chart bin (tfc) for tally 4 with nps = 10000000 print table 160

normed average tally per history = 3.79565E-05      unnormed average tally per history = 3.50615E-02
estimated tally relative error   = 0.0024      estimated variance of the variance = 0.0000
relative error from zero tallies = 0.0019      relative error from nonzero scores = 0.0015

number of nonzero history tallies =      274547      efficiency for the nonzero tallies = 0.0275
history number of largest tally =      4243803      largest unnormalized history tally = 1.00996E+01
(largest tally)/(average tally) = 2.80066E+02      (largest tally)/(avg nonzero tally)= 7.68912E+00

(confidence interval shift)/mean = 0.0000      shifted confidence interval center = 3.79566E-05

*** omitted ***

italy 6      nps = 1000000
          tally type 6    track length estimate of heating.           units  mev/gram
          particle(s): neutron

masses
  cell:     11
            6.37501E+03

cell 11
  energy
  2.5000E-08  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-07  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-06  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-05  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-04  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-03  2.50386E-10 0.0024
  1.0000E-02  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-01  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  2.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  3.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  4.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  5.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  total       2.50386E-10 0.0024
ianalysis of the results in the tally fluctuation chart bin (tfc) for tally 6 with nps = 10000000 print table 160

normed average tally per history = 2.50386E-10      unnormed average tally per history = 1.59622E-06
estimated tally relative error   = 0.0024      estimated variance of the variance = 0.0000
relative error from zero tallies = 0.0019      relative error from nonzero scores = 0.0015

number of nonzero history tallies =      274547      efficiency for the nonzero tallies = 0.0275
history number of largest tally =      8126500      largest unnormalized history tally = 3.90893E-04
(largest tally)/(average tally) = 2.44887E+02      (largest tally)/(avg nonzero tally)= 6.72331E+00

```

```

(confidence interval shift)/mean = 0.0000      shifted confidence interval center = 2.50387E-10
*** omitted ***

itally 14      nps = 1000000
          tally type 4    track length estimate of particle flux.
          particle(s): neutron

volumes
cell:      11
           9.50077E+02

cell 11
multiplier bin: 6.89000E-03 901      1
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 1.37832E-05 0.0024
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total     1.37832E-05 0.0024

cell 11
multiplier bin: 6.89000E-03 901      2
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 7.70310E-06 0.0024
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total     7.70310E-06 0.0024

cell 11
multiplier bin: 6.89000E-03 901      51
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total     0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 6.89000E-03 901      52
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total     0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 6.89000E-03 901      102
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000

```



```

1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 0.00000E+00 0.0000
1analysis of the results in the tally fluctuation chart bin (tfc) for tally 14 with nps = 10000000 print table 160

normed average tally per history = 1.37832E-05      unnormed average tally per history = 1.30951E-02
estimated tally relative error = 0.0024      estimated variance of the variance = 0.0000
relative error from zero tallies = 0.0019      relative error from nonzero scores = 0.0015

number of nonzero history tallies = 274547      efficiency for the nonzero tallies = 0.0275
history number of largest tally = 4243803      largest unnormalized history tally = 4.05854E+00
(largest tally)/(average tally) = 3.09929E+02      (largest tally)/(avg nonzero tally)= 8.50900E+00

(confidence interval shift)/mean = 0.0000      shifted confidence interval center = 1.37833E-05

*** omitted ***

itally 44 nps = 10000000
       tally type 4 track length estimate of particle flux.
       particle(s): neutron

volumes
cell: 11
      9.50077E+02

cell 11
multiplier bin: 3.45000E-03 902      1
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 5.80044E-07 0.0024
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 5.80044E-07 0.0024

cell 11
multiplier bin: 3.45000E-03 902      2
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 5.79811E-07 0.0024
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 5.79811E-07 0.0024

cell 11
multiplier bin: 3.45000E-03 902      51
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 3.45000E-03 902      52
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000

```

```

1.000E-07  0.00000E+00  0.0000
1.000E-06  0.00000E+00  0.0000
1.000E-05  0.00000E+00  0.0000
1.000E-04  0.00000E+00  0.0000
1.000E-03  0.00000E+00  0.0000
1.000E-02  0.00000E+00  0.0000
1.000E-01  0.00000E+00  0.0000
1.000E+00  0.00000E+00  0.0000
2.000E+00  0.00000E+00  0.0000
3.000E+00  0.00000E+00  0.0000
4.000E+00  0.00000E+00  0.0000
5.000E+00  0.00000E+00  0.0000
total      0.00000E+00  0.0000

```

```

cell 11
multiplier bin: 3.45000E-03 902 102
    energy
 2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-03 2.33194E-10 0.0024
 1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
 1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
 2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
 3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
 4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
 5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
    total 2.33194E-10 0.0024

```

```

cell 11
multiplier bin: 3.45000E-03 902 103
      energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
      total 0.00000E+00 0.0000

```

```

cell 11
multiplier bin: 3.45000E-03 902 104
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 0.00000E+00 0.0000

```

```

cell 11
multiplier bin: 3.45000E-03 902 105
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 0.00000E+00 0.0000

```

```

cell 11
multiplier bin: 3.45000E-03 902      106
energy
 2.5000E-08  0.00000E+00  0.0000
 1.0000E-07  0.00000E+00  0.0000

```

```

1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 3.45000E-03 902      107
    energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 0.00000E+00 0.0000

analysis of the results in the tally fluctuation chart bin (tfc) for tally 44 with nps = 10000000 print table 160

normed average tally per history = 5.80044E-07      unnormed average tally per history = 5.51087E-04
estimated tally relative error = 0.0024      estimated variance of the variance = 0.0000
relative error from zero tallies = 0.0019      relative error from nonzero scores = 0.0015

number of nonzero history tallies = 274547      efficiency for the nonzero tallies = 0.0275
history number of largest tally = 4243803      largest unnormalized history tally = 1.54303E-01
(largest tally)/(average tally) = 2.79997E+02      (largest tally)/(avg nonzero tally)= 7.68723E+00

(confidence interval shift)/mean = 0.0000      shifted confidence interval center = 5.80047E-07

*** omitted ***

tally 74      nps = 10000000
tally type 4 track length estimate of particle flux.
particle(s): neutron

volumes
    cell: 11
    9.50077E+02

cell 11
multiplier bin: 1.72000E-02 903      1
    energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 5.38429E-06 0.0024
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 5.38429E-06 0.0024

cell 11
multiplier bin: 1.72000E-02 903      2
    energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 5.38429E-06 0.0024
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 5.38429E-06 0.0024

cell 11
multiplier bin: 1.72000E-02 903      51

```



```

2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 1.72000E-02 903      106
    energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 1.72000E-02 903      107
    energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 0.00000E+00 0.0000

```

ianalysis of the results in the tally fluctuation chart bin (tfc) for tally 74 with nps = 10000000 print table 160

normed average tally per history = 5.38429E-06	unnormed average tally per history = 5.11548E-03
estimated tally relative error = 0.0024	estimated variance of the variance = 0.0000
relative error from zero tallies = 0.0019	relative error from nonzero scores = 0.0015
number of nonzero history tallies = 274547	efficiency for the nonzero tallies = 0.0275
history number of largest tally = 4243803	largest unnormalized history tally = 1.43022E+00
(largest tally)/(average tally) = 2.79586E+02	(largest tally)/(avg nonzero tally)= 7.67594E+00
(confidence interval shift)/mean = 0.0000	shifted confidence interval center = 5.38431E-06

*** omitted ***

```

tally 26      nps = 10000000
          tally type 6 track length estimate of heating.      units   mev/gram
          particle(s): photon

masses
          cell:      11
          6.37501E+03

```

```

cell 11
    energy
1.0000E-02 5.77393E-09 0.0073
2.0000E-02 1.31299E-10 0.0617
3.0000E-02 2.32235E-10 0.0673
4.0000E-02 1.76196E-09 0.0292
5.0000E-02 1.06673E-07 0.0045
6.0000E-02 2.42617E-10 0.0614
7.0000E-02 3.10018E-10 0.0608
8.0000E-02 4.70361E-10 0.0614
9.0000E-02 6.57655E-10 0.0511
1.0000E-01 1.14826E-09 0.0476
1.1000E-01 2.00884E-09 0.0361
1.2000E-01 3.44938E-09 0.0292
1.3000E-01 5.45007E-09 0.0246
1.4000E-01 7.98586E-09 0.0221
1.5000E-01 1.02127E-08 0.0201

```

1.6000E-01	1.26590E-08	0.0186
1.7000E-01	1.47853E-08	0.0177
1.8000E-01	2.04089E-08	0.0154
1.9000E-01	2.17468E-08	0.0152
2.0000E-01	2.29705E-08	0.0152
2.1000E-01	2.56922E-08	0.0146
2.2000E-01	2.59807E-08	0.0145
2.3000E-01	2.72289E-08	0.0142
2.4000E-01	3.00983E-08	0.0140
2.5000E-01	3.06610E-08	0.0138
2.6000E-01	2.86798E-08	0.0145
2.7000E-01	2.83778E-08	0.0148
2.8000E-01	2.73613E-08	0.0150
2.9000E-01	2.60547E-08	0.0157
3.0000E-01	2.49094E-08	0.0162
3.1000E-01	2.38531E-08	0.0166
3.2000E-01	2.41118E-08	0.0169
3.3000E-01	2.28678E-08	0.0173
3.4000E-01	2.26875E-08	0.0172
3.5000E-01	2.17422E-08	0.0177
3.6000E-01	2.13305E-08	0.0180
3.7000E-01	2.13824E-08	0.0184
3.8000E-01	2.04946E-08	0.0184
3.9000E-01	2.02934E-08	0.0188
4.0000E-01	1.94665E-08	0.0188
4.1000E-01	1.93104E-08	0.0191
4.2000E-01	1.88043E-08	0.0195
4.3000E-01	1.90032E-08	0.0197
4.4000E-01	1.83816E-08	0.0198
4.5000E-01	1.86868E-08	0.0202
4.6000E-01	1.77231E-08	0.0205
4.7000E-01	1.77396E-08	0.0205
4.8000E-01	1.81798E-08	0.0209
4.9000E-01	1.79352E-08	0.0207
5.0000E-01	1.70059E-08	0.0217
5.1000E-01	1.68734E-08	0.0218
5.2000E-01	2.62455E-07	0.0070
5.3000E-01	1.17788E-08	0.0265
5.4000E-01	1.13873E-08	0.0269
5.5000E-01	1.11810E-08	0.0268
5.6000E-01	1.09287E-08	0.0273
5.7000E-01	1.10776E-08	0.0274
5.8000E-01	1.04462E-08	0.0281
5.9000E-01	1.08389E-08	0.0279
6.0000E-01	1.06257E-08	0.0283
6.1000E-01	1.03044E-08	0.0289
6.2000E-01	1.04135E-08	0.0286
6.3000E-01	1.06896E-08	0.0289
6.4000E-01	1.04807E-08	0.0294
6.5000E-01	1.01563E-08	0.0297
6.6000E-01	1.01144E-08	0.0297
6.7000E-01	1.01659E-08	0.0303
6.8000E-01	1.03196E-08	0.0301
6.9000E-01	1.00791E-08	0.0303
7.0000E-01	1.01454E-08	0.0299
7.1000E-01	9.74611E-09	0.0308
7.2000E-01	9.86105E-09	0.0307
7.3000E-01	1.01094E-08	0.0312
7.4000E-01	9.94820E-09	0.0306
7.5000E-01	9.82270E-09	0.0317
7.6000E-01	9.91289E-08	0.0225
7.7000E-01	9.58767E-08	0.0230
7.8000E-01	2.02511E-08	0.0225
7.9000E-01	1.88732E-08	0.0230
8.0000E-01	1.96650E-08	0.0228
8.1000E-01	1.95408E-08	0.0235
8.2000E-01	2.05748E-08	0.0231
8.3000E-01	1.93349E-08	0.0233
8.4000E-01	2.00920E-08	0.0230
8.5000E-01	1.98494E-08	0.0238
8.6000E-01	2.00679E-08	0.0235
8.7000E-01	1.92742E-08	0.0242
8.8000E-01	2.00347E-08	0.0238
8.9000E-01	1.99009E-08	0.0238
9.0000E-01	1.90594E-08	0.0243
9.1000E-01	2.03735E-08	0.0238
9.2000E-01	1.94461E-08	0.0245
9.3000E-01	1.91308E-08	0.0244
9.4000E-01	1.96451E-08	0.0245
9.5000E-01	1.98451E-08	0.0249
9.6000E-01	2.00309E-08	0.0248
9.7000E-01	2.00469E-08	0.0246
9.8000E-01	2.01447E-08	0.0248
9.9000E-01	1.92595E-08	0.0253
1.0000E+00	1.99457E-08	0.0256
1.1000E+00	1.75529E-07	0.0089
1.2000E+00	1.79467E-07	0.0091
1.3000E+00	1.46137E-07	0.0104
1.4000E+00	1.16510E-07	0.0121
1.5000E+00	1.19381E-07	0.0123
1.6000E+00	1.20150E-07	0.0125

1.7000E+00	1.20059E-07	0.0129
1.8000E+00	1.35679E-07	0.0125
1.9000E+00	1.53140E-07	0.0122
2.0000E+00	1.55910E-07	0.0123
2.1000E+00	1.86785E-07	0.0116
2.2000E+00	1.89960E-07	0.0117
2.3000E+00	2.14043E-07	0.0115
2.4000E+00	2.31152E-07	0.0113
2.5000E+00	2.31117E-07	0.0115
2.6000E+00	2.37776E-07	0.0116
2.7000E+00	2.47849E-07	0.0117
2.8000E+00	2.41164E-07	0.0120
2.9000E+00	2.32688E-07	0.0125
3.0000E+00	2.41661E-07	0.0123
3.1000E+00	1.98891E-07	0.0139
3.2000E+00	2.10579E-07	0.0138
3.3000E+00	1.85875E-07	0.0149
3.4000E+00	1.67784E-07	0.0161
3.5000E+00	1.67284E-07	0.0163
3.6000E+00	1.38211E-07	0.0182
3.7000E+00	1.38173E-07	0.0184
3.8000E+00	1.32520E-07	0.0192
3.9000E+00	1.24091E-07	0.0203
4.0000E+00	1.29711E-07	0.0201
4.1000E+00	1.06653E-07	0.0226
4.2000E+00	1.11771E-07	0.0224
4.3000E+00	1.01472E-07	0.0235
4.4000E+00	9.52155E-08	0.0242
4.5000E+00	9.68934E-08	0.0245
4.6000E+00	8.04242E-08	0.0277
4.7000E+00	8.14102E-08	0.0284
4.8000E+00	8.32182E-08	0.0279
4.9000E+00	9.30518E-08	0.0270
5.0000E+00	9.54377E-08	0.0278
5.1000E+00	7.44732E-08	0.0312
5.2000E+00	7.32719E-08	0.0321
5.3000E+00	6.47262E-08	0.0344
5.4000E+00	5.36101E-08	0.0361
5.5000E+00	5.49648E-08	0.0382
5.6000E+00	6.81947E-08	0.0336
5.7000E+00	7.91114E-08	0.0321
5.8000E+00	6.49106E-08	0.0355
5.9000E+00	5.89316E-08	0.0389
6.0000E+00	5.84690E-08	0.0385
6.1000E+00	2.67332E-08	0.0585
6.2000E+00	2.55314E-08	0.0599
6.3000E+00	2.78473E-08	0.0596
6.4000E+00	2.94765E-08	0.0560
6.5000E+00	2.90435E-08	0.0585
6.6000E+00	7.32590E-08	0.0357
6.7000E+00	7.89535E-08	0.0352
6.8000E+00	4.57498E-08	0.0471
6.9000E+00	1.28492E-08	0.0824
7.0000E+00	1.48506E-08	0.0783
7.1000E+00	2.94484E-09	0.1936
7.2000E+00	2.52294E-09	0.2006
7.3000E+00	5.85653E-09	0.1239
7.4000E+00	8.85480E-09	0.1094
7.5000E+00	1.20179E-08	0.0970
7.6000E+00	1.23110E-08	0.0920
7.7000E+00	1.30447E-08	0.0919
7.8000E+00	6.46941E-09	0.1388
7.9000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.0000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.1000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.2000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.3000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.4000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.5000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.6000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.7000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.8000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.9000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.0000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.1000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.2000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.3000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.4000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.5000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.6000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.7000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.8000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.9000E+00	0.00000E+00	0.0000
1.0000E+01	0.00000E+00	0.0000
total	9.21952E-06	0.0029

1analysis of the results in the tally fluctuation chart bin (tfc) for tally 26 with nps = 10000000 print table 160

normed average tally per history = 9.21952E-06
 estimated tally relative error = 0.0029
 relative error from zero tallies = 0.0021

unnormed average tally per history = 5.87746E-02
 estimated variance of the variance = 0.0000
 relative error from nonzero scores = 0.0020

number of nonzero history tallies = 222380
history number of largest tally = 4125790
(largest tally)/(average tally) = 4.95574E+02
(confidence interval shift)/mean = 0.0000
efficiency for the nonzero tallies = 0.0222
largest unnormalized history tally = 2.91272E+01
(largest tally)/(avg nonzero tally)= 1.10206E+01
shifted confidence interval center = 9.21958E-06

*** omitted ***

プログラムリスト 14

GSO に対する単色熱中性子発生時の MCNP 出力ファイル

```
*****
* Copyright Notice for MCNPX *
*
* This program was prepared by the Regents of the *
* University of California at Los Alamos National *
* Laboratory (the University) under contract number *
* W-7405-ENG-36 with the U.S. Department of Energy *
* (DOE). The University has certain rights in the *
* program pursuant to the contract and the program *
* should not be copied or distributed outside your *
* organization. All rights in the program are *
* reserved by the DOE and the University. Neither *
* the U.S. Government nor the University makes any *
* warranty, express or implied, or assumes any *
* liability or responsibility for the use of this *
* software. *
*
*****
```

1- MCNPX test problem 1:
2- c
3- c 1 MeV neutrons on a cylindrical Cu target of 4 cm radius and
4- c 6 cm thickness. Source uniformly distributed over circle of
5- c 0.5 cm radius. Tallies of proton, photon and neutron current.
6- c
7- c Cells
8- c -----
9- 11 12 -6.71 -10 14 -18
10- c 12 13 -2.23 10 -11 16 -17
11- 29 0 -40 (#11)
12- 31 0 40
13-
14- c -----
15- c Surfaces
16- c -----
17- 10 cz 6.35
18- c 11 cz 7.35
19- 14 pz -3.75
20- 15 pz 3.75
21- c 16 pz -4.75
22- c 17 pz 4.75
23- 40 so 40.0
24-
25- c -----
26- c Materials
27- c -----
28- m12 64000 2 14000 1 8016 5 \$ GSO
29- c m13 14028 1 8016 2 \$ SiO2
30- c -----
31- c Source
32- c -----
33- sdef sur = 40 erg = 2.5e-8 par = 1 nrm = -1
34- c -----
35- c Options
36- c -----
37- c spab:a all 5. 2
38- c imp:n,h,p,e,a 1 1 0
39- imp:n,p,e 1 1 0
40- phys: 260 5j i
41- c phys:b 260 5j i
42- phys:p
43- phys:e
44- c phys:a
45- c mode n h p e a
46- mode n p e

warning. photonuclear physics may be needed (phys:p).
47- lca 2 1
48- lea 2j 0
49- c cut:h j 0
50- c cut:a j 0
51- c -----
52- c Tallies
53- c -----
54- F6:n 11
55- c F16:h 11
56- F26:p 11
57- c F46:a 11
58- E6 2.5e-8 1e-7 1e-6 1e-5 1e-4 1e-3 1e-2 1e-1 1. 3I 5. T
59- c E16 0.01 98I 1. 39I 5. T
60- E26 0.01 98I 1. 89I 10. T
61- c E46 1. 2. 3. 4. 5. T
62- F4:n 11
63- FM4 -1 12 2
64- F14:n 11
65- FM14 6.89e-3 901 (1)(2)(51)(52)(102)(103)(104)(105)(106)(107)
66- M901 64000 1.

warning. material 901 is used only for a perturbation or tally.
67- F44:n 11

```

68-      FM44 3.45e-3 902 (1)(2)(51)(52)(102)(103)(104)(105)(106)(107)
69-      M902 14000 1.
warning. material 902 is used only for a perturbation or tally.
70-      FT4:n 11
71-      FM74 1.72e-2 903 (1)(2)(51)(52)(102)(103)(104)(105)(106)(107)
72-      M903 8016 1.
warning. material 903 is used only for a perturbation or tally.
73-      EO 2.5e-8 1e-7 1e-6 1e-5 1e-4 1e-3 1e-2 1e-1 1. 3I 5. T
74-      c -----
75-      print
76-      nps 10000000
77-      prdmp 2j -i
78-      ssw 40 sym=2
79-      c histp

*** omitted ***

itally 4      nps = 10000000
            tally type 4      track length estimate of particle flux.
            particle(s): neutron

volumes
    cell:      11
              9.50077E+02

cell 11
multiplier bin: -1.00000E+00 12          2
    energy
 2.5000E-08  1.45304E-08  0.0027
 1.0000E-07  3.53723E-12  0.1411
 1.0000E-06  0.00000E+00  0.0000
 1.0000E-05  0.00000E+00  0.0000
 1.0000E-04  0.00000E+00  0.0000
 1.0000E-03  0.00000E+00  0.0000
 1.0000E-02  0.00000E+00  0.0000
 1.0000E-01  0.00000E+00  0.0000
 1.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
 2.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
 3.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
 4.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
 5.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
  total      1.45339E-08  0.0027
ianalysis of the results in the tally fluctuation chart bin (tfc) for tally 4 with nps = 10000000 print table 160

normed average tally per history = 1.45339E-08      unnormed average tally per history = 1.38083E-05
estimated tally relative error   = 0.0027      estimated variance of the variance = 0.0000
relative error from zero tallies = 0.0019      relative error from nonzero scores = 0.0019

number of nonzero history tallies =      274547      efficiency for the nonzero tallies = 0.0275
history number of largest tally =      2298291      largest unnormalized history tally = 6.79228E-03
(Clargest tally)/(average tally) = 4.91898E+02      (largest tally)/(avg nonzero tally)= 1.35049E+01

(confidence interval shift)/mean = 0.0000      shifted confidence interval center = 1.45340E-08

*** omitted ***

itally 6      nps = 10000000
            tally type 6      track length estimate of heating.           units     mev/gram
            particle(s): neutron

masses
    cell:      11
              6.37501E+03

cell 11
    energy
 2.5000E-08  5.71056E-15  0.0027
 1.0000E-07  1.24970E-18  0.1359
 1.0000E-06  0.00000E+00  0.0000
 1.0000E-05  0.00000E+00  0.0000
 1.0000E-04  0.00000E+00  0.0000
 1.0000E-03  0.00000E+00  0.0000
 1.0000E-02  0.00000E+00  0.0000
 1.0000E-01  0.00000E+00  0.0000
 1.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
 2.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
 3.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
 4.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
 5.0000E+00  0.00000E+00  0.0000
  total      5.71181E-15  0.0027
ianalysis of the results in the tally fluctuation chart bin (tfc) for tally 6 with nps = 10000000 print table 160

normed average tally per history = 5.71181E-15      unnormed average tally per history = 3.64128E-11
estimated tally relative error   = 0.0027      estimated variance of the variance = 0.0000
relative error from zero tallies = 0.0019      relative error from nonzero scores = 0.0019

number of nonzero history tallies =      274547      efficiency for the nonzero tallies = 0.0275
history number of largest tally =      2298291      largest unnormalized history tally = 1.79115E-08

```

```

(largest tally)/(average tally) = 4.91901E+02      (largest tally)/(avg nonzero tally)= 1.35050E+01
(confidence interval shift)/mean = 0.0000          shifted confidence interval center = 5.71184E-15

*** omitted ***

itally 14      nps = 10000000
          tally type 4   track length estimate of particle flux.
          particle(s): neutron

          volumes
          cell:    11
          9.50077E+02

cell 11
multiplier bin: 6.89000E-03 901      1
energy
2.5000E-08  1.03998E-05 0.0027
1.0000E-07  2.24494E-09 0.1347
1.0000E-06  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01  0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
total      1.04020E-05 0.0027

cell 11
multiplier bin: 6.89000E-03 901      2
energy
2.5000E-08  2.72693E-09 0.0027
1.0000E-07  6.65415E-13 0.1412
1.0000E-06  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01  0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
total      2.72760E-09 0.0027

cell 11
multiplier bin: 6.89000E-03 901      51
energy
2.5000E-08  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01  0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
total      0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 6.89000E-03 901      52
energy
2.5000E-08  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01  0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
total      0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 6.89000E-03 901      102
energy
2.5000E-08  1.03970E-05 0.0027
1.0000E-07  2.24428E-09 0.1347

```



```

1.0000E-05  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02  0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01  0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
total      0.00000E+00 0.0000
analysis of the results in the tally fluctuation chart bin (tfc) for tally 14 with nps = 10000000 print table 160

normed average tally per history = 1.04020E-05          unnormed average tally per history = 9.89269E-03
estimated tally relative error = 0.0027                estimated variance of the variance = 0.0000
relative error from zero tallies = 0.0019              relative error from nonzero scores = 0.0019

number of nonzero history tallies = 274547            efficiency for the nonzero tallies = 0.0275
history number of largest tally = 2298291           largest unnormalized history tally = 4.86129E+00
(largest tally)/(average tally) = 4.91899E+02        (largest tally)/(avg nonzero tally)= 1.35050E+01

(confidence interval shift)/mean = 0.0000             shifted confidence interval center = 1.04021E-05

*** omitted ***

tally 44      nps = 10000000
               tally type 4   track length estimate of particle flux.
               particle(s): neutron

volumes
       cell:    11
         9.50077E+02

cell 11
multiplier bin: 3.45000E-03 902      1
energy
 2.5000E-08  2.54242E-10 0.0027
 1.0000E-07  6.14114E-14 0.1406
 1.0000E-06  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-05  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-04  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-03  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-02  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-01  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
 2.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
 3.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
 4.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
 5.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
total      2.54303E-10 0.0027

cell 11
multiplier bin: 3.45000E-03 902      2
energy
 2.5000E-08  2.35907E-10 0.0027
 1.0000E-07  5.73999E-14 0.1411
 1.0000E-06  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-05  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-04  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-03  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-02  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-01  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
 2.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
 3.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
 4.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
 5.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
total      2.35955E-10 0.0027

cell 11
multiplier bin: 3.45000E-03 902      51
energy
 2.5000E-08  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-07  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-06  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-05  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-04  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-03  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-02  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E-01  0.00000E+00 0.0000
 1.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
 2.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
 3.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
 4.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
 5.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
total      0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 3.45000E-03 902      52
energy

```



```

1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total . 0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 3.45000E-03 902      107
energy
2.5000E-08 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-07 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 0.00000E+00 0.0000

ianalysis of the results in the tally fluctuation chart bin (tfc) for tally 44 with nps = 10000000 print table 160

normed average tally per history = 2.54303E-10
estimated tally relative error = 0.0027
relative error from zero tallies = 0.0019

number of nonzero history tallies = 274547
history number of largest tally = 2298291
(largest tally)/(average tally) = 4.91898E+02

(confidence interval shift)/mean = 0.0000
shifted confidence interval center = 2.54305E-10

*** omitted ***

itally 74      nps = 10000000
          tally type 4   track length estimate of particle flux.
          particle(s): neutron

          volumes
          cell: 11
          9.50077E+02

cell 11
multiplier bin: 1.72000E-02 903      1
energy
2.5000E-08 2.26902E-09 0.0027
1.0000E-07 5.50813E-13 0.1409
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 2.26957E-09 0.0027

cell 11
multiplier bin: 1.72000E-02 903      2
energy
2.5000E-08 2.26891E-09 0.0027
1.0000E-07 5.50799E-13 0.1409
1.0000E-06 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-05 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-04 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-03 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-02 0.00000E+00 0.0000
1.0000E-01 0.00000E+00 0.0000
1.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
2.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
3.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
4.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
5.0000E+00 0.00000E+00 0.0000
total 2.26946E-09 0.0027

```



```

multiplier bin: 1.72000E-02 903      105
  energy
  2.5000E-08  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-07  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-06  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-05  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-04  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-03  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-02  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-01  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  2.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  3.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  4.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  5.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  total       0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 1.72000E-02 903      106
  energy
  2.5000E-08  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-07  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-06  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-05  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-04  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-03  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-02  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-01  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  2.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  3.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  4.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  5.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  total       0.00000E+00 0.0000

cell 11
multiplier bin: 1.72000E-02 903      107
  energy
  2.5000E-08  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-07  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-06  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-05  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-04  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-03  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-02  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E-01  0.00000E+00 0.0000
  1.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  2.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  3.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  4.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  5.0000E+00  0.00000E+00 0.0000
  total       0.00000E+00 0.0000

analysis of the results in the tally fluctuation chart bin (tfc) for tally 74 with nps = 10000000 print table 160

normed average tally per history = 2.26957E-09      unnormed average tally per history = 2.15626E-06
estimated tally relative error = 0.0027      estimated variance of the variance = 0.0000
relative error from zero tallies = 0.0019      relative error from nonzero scores = 0.0019

number of nonzero history tallies = 274547      efficiency for the nonzero tallies = 0.0275
history number of largest tally = 2298291      largest unnormalized history tally = 1.06066E-03
(largest tally)/(average tally) = 4.91898E+02      (largest tally)/(avg nonzero tally)= 1.35049E+01

(confidence interval shift)/mean = 0.0000      shifted confidence interval center = 2.26958E-09

*** omitted ***

itally 26      nps = 10000000
  tally type 6 track length estimate of heating.      units    mev/gram
  particle(s): photon

  masses
    cell:      11
    6.37501E+03

cell 11
  energy
  1.0000E-02  5.70462E-09 0.0116
  2.0000E-02  1.67474E-10 0.0768
  3.0000E-02  2.32678E-10 0.1022
  4.0000E-02  1.62279E-09 0.0470
  5.0000E-02  1.04233E-07 0.0067
  6.0000E-02  1.90241E-10 0.1031
  7.0000E-02  3.38911E-10 0.0925
  8.0000E-02  3.60575E-10 0.0970
  9.0000E-02  6.57181E-10 0.0866
  1.0000E-01  1.06009E-09 0.0729
  1.1000E-01  1.94461E-09 0.0681
  1.2000E-01  3.10401E-09 0.0496

```

1.3000E-01	5.57629E-09	0.0393
1.4000E-01	7.38275E-09	0.0363
1.5000E-01	1.02732E-08	0.0320
1.6000E-01	1.18895E-08	0.0306
1.7000E-01	1.42090E-08	0.0287
1.8000E-01	2.07718E-08	0.0244
1.9000E-01	2.07436E-08	0.0252
2.0000E-01	2.30139E-08	0.0244
2.1000E-01	2.40537E-08	0.0234
2.2000E-01	2.58790E-08	0.0230
2.3000E-01	2.69360E-08	0.0231
2.4000E-01	3.04505E-08	0.0220
2.5000E-01	3.02988E-08	0.0221
2.6000E-01	2.86697E-08	0.0229
2.7000E-01	2.91034E-08	0.0237
2.8000E-01	2.62270E-08	0.0242
2.9000E-01	2.55289E-08	0.0248
3.0000E-01	2.53878E-08	0.0253
3.1000E-01	2.40177E-08	0.0264
3.2000E-01	2.30335E-08	0.0272
3.3000E-01	2.21187E-08	0.0273
3.4000E-01	2.35842E-08	0.0272
3.5000E-01	2.09737E-08	0.0282
3.6000E-01	2.10919E-08	0.0287
3.7000E-01	2.15644E-08	0.0303
3.8000E-01	2.10482E-08	0.0296
3.9000E-01	1.97470E-08	0.0303
4.0000E-01	2.02994E-08	0.0302
4.1000E-01	1.88632E-08	0.0304
4.2000E-01	1.96151E-08	0.0320
4.3000E-01	1.82304E-08	0.0319
4.4000E-01	1.82183E-08	0.0328
4.5000E-01	1.80610E-08	0.0324
4.6000E-01	1.83357E-08	0.0324
4.7000E-01	1.89814E-08	0.0329
4.8000E-01	1.87365E-08	0.0331
4.9000E-01	1.83351E-08	0.0335
5.0000E-01	1.74514E-08	0.0340
5.1000E-01	1.62309E-08	0.0357
5.2000E-01	2.55550E-07	0.0108
5.3000E-01	1.23871E-08	0.0411
5.4000E-01	1.17889E-08	0.0424
5.5000E-01	1.15923E-08	0.0441
5.6000E-01	1.17958E-08	0.0432
5.7000E-01	1.22129E-08	0.0412
5.8000E-01	1.28589E-08	0.0437
5.9000E-01	1.17656E-08	0.0459
6.0000E-01	1.16513E-08	0.0448
6.1000E-01	1.16838E-08	0.0455
6.2000E-01	1.24287E-08	0.0449
6.3000E-01	1.11364E-08	0.0464
6.4000E-01	1.18924E-08	0.0458
6.5000E-01	1.15120E-08	0.0463
6.6000E-01	1.14632E-08	0.0468
6.7000E-01	1.01936E-08	0.0497
6.8000E-01	1.15186E-08	0.0465
6.9000E-01	1.13377E-08	0.0476
7.0000E-01	1.16731E-08	0.0476
7.1000E-01	1.09666E-08	0.0477
7.2000E-01	1.16442E-08	0.0486
7.3000E-01	1.08722E-08	0.0492
7.4000E-01	1.03701E-08	0.0491
7.5000E-01	1.13573E-08	0.0488
7.6000E-01	2.18195E-08	0.0352
7.7000E-01	2.20761E-08	0.0380
7.8000E-01	2.24739E-08	0.0378
7.9000E-01	2.20061E-08	0.0379
8.0000E-01	2.11876E-08	0.0373
8.1000E-01	2.19134E-08	0.0370
8.2000E-01	2.02762E-08	0.0388
8.3000E-01	2.10245E-08	0.0377
8.4000E-01	2.07983E-08	0.0381
8.5000E-01	2.13835E-08	0.0396
8.6000E-01	2.10865E-08	0.0382
8.7000E-01	2.10460E-08	0.0387
8.8000E-01	2.11164E-08	0.0405
8.9000E-01	2.32248E-08	0.0386
9.0000E-01	2.21172E-08	0.0391
9.1000E-01	2.20611E-08	0.0397
9.2000E-01	2.06531E-08	0.0411
9.3000E-01	2.11605E-08	0.0415
9.4000E-01	2.21152E-08	0.0403
9.5000E-01	1.93902E-08	0.0418
9.6000E-01	2.23710E-08	0.0408
9.7000E-01	2.05770E-08	0.0418
9.8000E-01	2.13033E-08	0.0419
9.9000E-01	2.25356E-08	0.0411
1.0000E+00	2.33039E-08	0.0408
1.1000E+00	1.91172E-07	0.0145
1.2000E+00	1.95637E-07	0.0150
1.3000E+00	1.62137E-07	0.0170

1.4000E+00	1.29370E-07	0.0198
1.5000E+00	1.29210E-07	0.0203
1.6000E+00	1.31274E-07	0.0208
1.7000E+00	1.32835E-07	0.0209
1.8000E+00	1.51937E-07	0.0205
1.9000E+00	1.74631E-07	0.0196
2.0000E+00	1.70113E-07	0.0203
2.1000E+00	2.06779E-07	0.0190
2.2000E+00	2.11069E-07	0.0192
2.3000E+00	2.28465E-07	0.0191
2.4000E+00	2.46411E-07	0.0189
2.5000E+00	2.55013E-07	0.0189
2.6000E+00	2.57246E-07	0.0191
2.7000E+00	2.62987E-07	0.0194
2.8000E+00	2.69494E-07	0.0199
2.9000E+00	2.64960E-07	0.0205
3.0000E+00	2.64425E-07	0.0206
3.1000E+00	2.23743E-07	0.0228
3.2000E+00	2.23657E-07	0.0231
3.3000E+00	1.96128E-07	0.0251
3.4000E+00	1.90069E-07	0.0267
3.5000E+00	1.89241E-07	0.0272
3.6000E+00	1.51344E-07	0.0306
3.7000E+00	1.54852E-07	0.0312
3.8000E+00	1.37653E-07	0.0326
3.9000E+00	1.26029E-07	0.0349
4.0000E+00	1.42331E-07	0.0337
4.1000E+00	1.22576E-07	0.0371
4.2000E+00	1.25047E-07	0.0365
4.3000E+00	1.11107E-07	0.0401
4.4000E+00	1.03182E-07	0.0420
4.5000E+00	1.01471E-07	0.0419
4.6000E+00	9.22857E-08	0.0460
4.7000E+00	8.95435E-08	0.0469
4.8000E+00	9.55655E-08	0.0465
4.9000E+00	9.08675E-08	0.0480
5.0000E+00	9.73529E-08	0.0465
5.1000E+00	7.67007E-08	0.0544
5.2000E+00	7.52215E-08	0.0552
5.3000E+00	6.83124E-08	0.0587
5.4000E+00	6.42088E-08	0.0609
5.5000E+00	5.97402E-08	0.0641
5.6000E+00	7.83649E-08	0.0550
5.7000E+00	7.60936E-08	0.0561
5.8000E+00	7.50198E-08	0.0592
5.9000E+00	6.60626E-08	0.0625
6.0000E+00	6.65260E-08	0.0652
6.1000E+00	2.99247E-08	0.0956
6.2000E+00	2.83105E-08	0.1007
6.3000E+00	3.39782E-08	0.0892
6.4000E+00	3.23090E-08	0.0930
6.5000E+00	3.37699E-08	0.0922
6.6000E+00	8.37988E-08	0.0610
6.7000E+00	8.67809E-08	0.0602
6.8000E+00	5.08845E-08	0.0765
6.9000E+00	1.91800E-08	0.1431
7.0000E+00	1.14912E-08	0.1653
7.1000E+00	2.72007E-09	0.3667
7.2000E+00	2.87308E-09	0.3254
7.3000E+00	1.00729E-08	0.1881
7.4000E+00	1.11797E-08	0.1852
7.5000E+00	9.99494E-09	0.1928
7.6000E+00	1.43940E-08	0.1633
7.7000E+00	1.67401E-08	0.1687
7.8000E+00	4.72232E-09	0.2318
7.9000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.0000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.1000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.2000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.3000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.4000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.5000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.6000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.7000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.8000E+00	0.00000E+00	0.0000
8.9000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.0000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.1000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.2000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.3000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.4000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.5000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.6000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.7000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.8000E+00	0.00000E+00	0.0000
9.9000E+00	0.00000E+00	0.0000
1.0000E+01	0.00000E+00	0.0000
total	9.96424E-06	0.0038

analysis of the results in the tally fluctuation chart bin (tfc) for tally 26 with nps = 10000000 print table 160

```
normed average tally per history = 9.96424E-06  
estimated tally relative error = 0.0038  
relative error from zero tallies = 0.0019  
  
number of nonzero history tallies = 274517  
history number of largest tally = 8089068  
(largest tally)/(average tally) = 1.00633E+03  
  
(confidence interval shift)/mean = 0.0000  
  
unnormed average tally per history = 6.35221E-02  
estimated variance of the variance = 0.0001  
relative error from nonzero scores = 0.0034  
  
efficiency for the nonzero tallies = 0.0275  
largest unnormalized history tally = 6.39245E+01  
(largest tally)/(avg nonzero tally)= 2.76256E+01  
  
shifted confidence interval center = 9.96435E-06
```

*** omitted ***

17.3 中性子計測における無機シンチレータの有用性の評価

表 28、29 に示したとおり、BGO 検出器、GSO 検出器は中性子入射に対する感度は有しており、BGO については熱～熱外中性子に対して $E_\gamma=4.2\text{MeV}$ において 1 発生中性子あたり 10^{-8} 程度の検出感度となる。GSO については熱～熱外中性子に対して $E_\gamma=1.2, 2.5\text{MeV}$ において、1 発生中性子あたり 10^{-7} 程度の検出感度となる。

よって、環境放射能中の γ 線レベルが十分に低い環境中では、中性子測定に対して、BGO 検出器の測定感度は低く、GSO 検出器がある程度の感度を持つという平成 14 年度の研究報告の内容は検証できた。ただし、 $E_\gamma=1.2\text{MeV}$ 近傍は、環境放射線のレベルは、たとえ低レベル実験室であっても、十分に大きなバックグラウンド源を有するエネルギー領域であり、GSO を中性子検出器として使用する際には、十分な注意を払う必要があることも示唆する結果である。

18 応用の可能性について

無機シンチレーターを高速中性子検出に応用するにあたって直面する問題点について検討する。

18.1 GSO(Ce) シンチレーターについて

GSO シンチレーターは熱中性子に対する感度が極めて高いが、高速中性子を検出するためには GSO 検出器の周囲を減速材で覆わなければならない。数 MeV のエネルギーを持つ高速中性子を効率的に減速するためには通常厚さ 10cm 以上のパラフィンなどが必要である。そのため、直径 5cm 程度の検出器を囲むために、全体の大きさは 30cm 立方程度のシステムを構築しなければならない。

今回の研究では遮蔽体の大きさに制限があったため、パラフィンの減速材の厚さは 5cm であった。それでも液体シンチレーター程度の検出効率が得られたものの、この測定では、パラフィンの更に外側に鉛の遮蔽体を設置することが必要であった。GSO(Ce) シンチレーターは原子番号、密度ともに大きい放射線検出器であるために γ 線に対する感度が非常に高いことが、このような大規模な検出器システムを構築せざるを得なくなった原因である。

GSO の特徴は

1. 原子番号と密度が高いため、 γ 線に対する感度が高い。
2. ^{157}Gd と ^{155}Gd の熱中性子捕獲断面積が大きいため熱中性子にたいする感度が非常に高い。
3. 化学的、物理的に安定なので長期間の実験に耐える。
4. 高い線量の放射線被曝に対しても安定で放射線検出器としての性能を維持する。

という利点がたくさんある。この利点を応用した、原子力施設における高感度モニタリングシステムの中性子漏れを検出するシステムは、GSO による熱中性子の直接測定が最も有利である。

原子炉施設の中性子漏れは、はじめに高速中性子が多量に飛び出しが、外部に広がるにつれて高速中性子が周囲の原子核との散乱によってエネルギーを失う。このようにしてエネルギーを失った熱中性子をモニターする装置として GSO の応用範囲は極めて広いと考えられる。GSO 検出器を減速材なしで運転し、80keV 近辺に計測される計数率の変動をモニターしておくことで、周辺の熱中性子の線束の変動が明確にわかる。このような運用方法であれば、GSO 検出器システムは十分な小型化が可能であるため、原子炉施設周辺に多数のモニタリングシステムを構築して周辺環境への重大な影響を早急に察知することが可能であろう。

18.2 NaI(Tl) シンチレーターについて

NaI(Tl) シンチレーターと高速中性子の非弾性散乱による 57.6keV γ 線の計測は、NaI(Tl) のエネルギー分解能が高いために極めて明瞭なピークとして計測することが可能であることが、本研究によって明らかになった。しかし、高速中性子に対する検出効率はおよそ 3% と、高いとは言えない値であった。また、NaI(Tl) も GSO(Ge) と同じく γ 線に対して極めて感度が高いため、環境放射線の γ 線によるバックグラウンドの影響を深刻に受けてしまう。

NaI(Tl) を有機液体シンチレーターのような高感度の高速中性子モニターとして応用するためには、NaI(Tl) 検出器の周囲を鉛などの遮蔽体で覆って γ 線のバックグラウンドを減らすか、大型の

NaI(Tl) 検出器を使って絶対効率を増やすかの方法を探る必要がある。ただ、有機液体シンチレーターによるモニタリングでは必然的に高価な波形弁別回路が必要になるのに対し、NaI(Tl) シンチレーターの場合は図 171 に示すような極めて簡便で安価な計数システムで済んでしまう利点は大きい。図 171 の PMT は光電子増倍管である。通常の NaI(Tl) 検出器には光電子増倍管を使用することが多いが、最近感度が高くなり、価格が下がり始めている Avalanche photo diode を用いると、検出器システムの大幅な小型化が可能になる。電圧信号出力を、single channel analyser によって、57.6keV に対応する特定の波高値の信号だけを選別し、カウンターで計数すれば、中性子のモニタリングが容易にできる。

NaI(Tl) をモニタリングシステムに応用するに際して考えられる問題点は、 γ 線に対する高い感度であろう。環境 γ 線の強度は、測定する場所によって大きく異なるため、はじめに入念なバックグラウンドの計測を行うことが望ましい。エネルギー較正の変動は、先行研究によって極めて詳細に行われており [21, 20]、特に気温の変動による光電子増倍管の增幅率変動の影響が大きい。そのため、NaI(Tl) を用いたモニタリングシステムの運用に当たっては温度モニターの併用が望ましい。

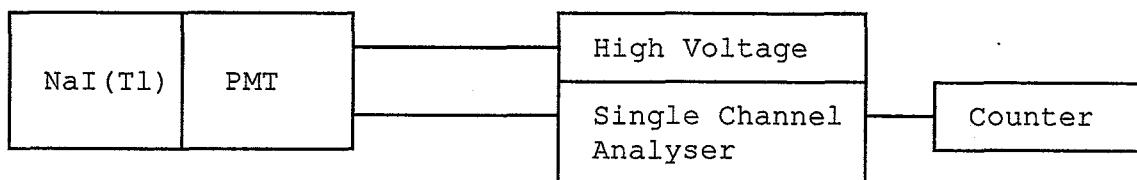


図 171: NaI(Tl) シンチレーターによる中性子計測システムの概念図。

19 まとめ

本研究では、無機シンチレーターによる中性子のモニタリングの可能性について検討した。候補となるシンチレーターに BGO, GSO, NaI(Tl) を検討した。いずれも最近注目を浴びている高性能なシンチレーターである。

GSO(Ce) に含まれるガドリニウムの同位元素には熱中性子に対する中性子捕獲断面積が極めて大きいものがあるため、熱中性子捕獲に伴う γ 線の計測を試みた。GSO(Ce) は、原子番号も密度も大きいため、 γ 線検出器としても高い性能をもち、そのために高い効率で中性子捕獲に伴う γ 線を検出することができる。

GSO 検出器を高感度の中性子モニターとして機能させるためには、GSO の周囲をパラフィンなどの減速材で囲む必要がある。本研究では、GSO の周囲を厚さ 5cm のパラフィンで囲むことによっておよそ 8% の高い検出効率を得ることができた。この結果により、GSO を高速中性子のモニター用として使用するためには、周囲を囲むパラフィンを準備しなければならないため、設置場所に制限が与えられてしまうことがわかる。

高速中性子が様々な物質（建物の壁や水槽など）で減速された後の熱中性子になった後、中性子捕獲反応で多くの放射性同位元素を生成してしまう影響を評価するには、GSO(Ce) のような熱中性子に高い感度を持つ検出器が不可欠であると考える。熱中性子の検出器として GSO(Ce) を活用するならば、パラフィンを設置する必要がないため γ 線の遮蔽体のみで十分である。今回の研究では、非常に弱い中性子線源によるテストを行ったため厚さ 10cm に及ぶ大規模な γ 線の遮蔽を行ったが、実用では厚さ 3cm から 5cm 程度の遮蔽で十分である。

NaI(Tl) 検出器はエネルギー分解能が他のシンチレーターに比べて飛び抜けてよいため、非弾性散乱に伴う γ 線の計測は極めて有利である。今回の研究では NaI(Tl) に高速中性子を照射し、57.6keV の γ 線強度を調べた。確認のために高速中性子をパラフィンで減速し、高速中性子を減らした場合に 57.6keV の γ 線強度の変化をしらべた。その結果、 γ 線の強度は予想通りの現象傾向を見せ、57.6keV の γ 線が高速中性子に起因する現象であることが確認された。

高速中性子にたいする NaI(Tl) の感度はおよそ 3% で、GSO(Ce) の熱中性子に対する効率や、有機液体シンチレーターの高速中性子に対する計数効率に比べて小さな値であった。しかし、NaI(Tl) は比較的安価で大型の結晶を製作することが可能であること、長期間の安定した運転の実績が各所で報告されていることから、NaI(Tl) を高速中性子モニターとして運用する可能性はあると思われる。遮蔽体なしの条件で中性子束に対する計測上限値は $1.5 \times 10^{-2} / \text{sec/cm}^2$ であった。この値は、地上における環境中性子束 $1.7 \times 10^{-3} / \text{sec/cm}^2$ [24] の 10 倍である。この感度は、環境中性子の測定のためには低いように見えるが、原子炉施設などの高バックグラウンド環境においては十分な感度で計測できる。ましてや、事故発生時には、明瞭なピークとして敏感に異常を検知することができるであろう。

BGO 検出器については、中性子に対する感度が高くないことがシミュレーション計算によっても明らかになった。

第V部

結語

本研究においては、環境中性子計測技術の開発を実施した。以下に本報告書の内容についてまとめる。

第I部においては、中性子測定技術について概説した。この中では、熱・速中性子に対し、それぞれに感度の高い測定法について述べたとともに、相互の測定法を複合的に組み合わせることによる環境中性子測定法の実現方法についても述べた。

第II部においては有機液体シンチレータを利用した熱中性子・速中性子同時測定システムの開発状況について述べた。昨年度に速中性子測定も可能である事が示された同システムについて、その速中性子に対する感度の評価を、線源を用いた実験、シミュレーション計算により実施した。その結果、今回開発したシステムが、速中性子に対して有意に測定できることを検証した。なお、シミュレーション計算については、今後の計算精度の検証の余地がある。また、核破碎反応を用いて、加速器からの陽子ビームを速中性子束に変換し、検出器の速中性子に対する感度調査実験を実施した。レムカウンタによる計測データをもとに、実験場の速中性子束を同定し、実験場における液体シンチレータ検出器の検出効率を定量化した。今後も、継続した開発により、より定量性のある評価の実施が可能である。

第III部においては、¹⁰Bを混入したプラスチックシンチレータの環境中性子計測への応用を試みた。熱中性子束に対しては、 α 崩壊現象が明らかに計測された。また、速中性子束に対しては、陽子反跳事象が実験、予備的なシミュレーション計算により測定できる可能性も示された。今後、より定量的な測定を継続することにより、中性子束測定器としての有用性を確立できるものと考えられる。

第IV部においては、長期保守の比較的容易な無機シンチレータを用いた環境中性子モニタシステムの開発研究について述べた。今年度は、GSO、NaIについて中性子束に対する応答を測定した。GSO、NaIとともに、中性子束を有意に検出したが、いずれもバックグラウンド現象をあらかじめ定量化する必要があることも見出された。また、BGO、GSOについてはシミュレーション計算により、熱・速中性子に対する感度の評価を実施した。無機シンチレータを中性子検出器として応用するためには、減速材の問題をクリアする必要、またバックグラウンド現象に対する認識の必要はあるが、保守の容易さ、安定性、回路の簡便さにより、適応範囲が広いものと考えられる。

参考文献

- [1] Arita
- [2] T.Nitta,Master Thesis,Osaka Univ.(1996)
- [3] Y.Tanaka,Master Thesis,Osaka Univ.(1999)
- [4] 久米恭,環境放射線の測定手法に関する研究、核燃料サイクル開発機構契約業務報告書(2002).
- [5] T.Aoyama Nucl.Inst.Method(1993)
- [6] V.Chazal,*et.al.* Astrop.Phys.(1998)
- [7] M.Lindozzi and S.Miozzi A.rindi, F.Celani. Nucl.Inst.Method(1988)
- [8] T.Kishimoto, T.Shibata, M.Iwamura, S.Shibata and U.Uwamino Nucl.Part.Phys.(1992)
- [9] T.Shibata, K.Okada, T.Shimada, H.Iwata and T.Mizuta Technical report(1982)
- [10] H.R.Hashemi-Nezhad and L.S.Peak. Nucl.Inst.Method(1995)
- [11] <http://www.bicron.com/>
- [12] <http://psux1.kek.jp/omata/>
- [13] GEANT4 Collaboration, Nucl. Instr. Meth. A 506 (2003) 250.
- [14] 久米恭,環境放射線の測定手法に関する研究、核燃料サイクル開発機構契約業務報告書(2003).
- [15] Ed. Lederer et al., "Table of Isotopes 8th Ed.", Wiley-Interscience.
- [16] K. Ichihara, K. Fushimi, N. Koori, S. Nakayama, K. Takahisa, S. Umehara and S. Yoshida, Nuclear Instrument and Methods in Physics ResearchA515 (2003) 651.
- [17] K. Fushimi, H. Ejiri, H. Kinoshita, N. Kudomi, K. Kume, K. Nagata, H. Ohsumi, K. Okada, H. Sano, and J. Tanaka Physical Review C47(1993) R425.
- [18] G. F. Knoll, Radiation Detection and Measurement 3rd Edition, (2001) John Wiley & Sons Inc.
- [19] H. Ejiri, K. Matsuoka and E. Choi, Nuclear Instrument and Methods in Physics ResearchA302 (1991) 482.
- [20] S. Yoshida, H. Ejiri, K. Fushimi, K. Hayashi, M. Komori, N. Kudomi, K. Kume, H. Kuramoto, K. Matsuoka, H. Ohsumi, K. Takahisa, Y. Tsujimoto and S. Umehara, Nuclear Physics B(Proceedings Supplement)87 (2000) 58.
- [21] R. Bernabei, P. Belli, R. Cerulli, F. Montecchia, M. Amato, G. Ignesti, A. Incicchitti, D. Prosperi, C. J. Dai, H. L. He, H. H. Kuang and J. M. Ma, Physics Letters B480 (2000) 23; R. Bernabei, P. Belli, F. Montecchia, W. Di Nicolantonio, G. Ignesti, A. Incicchitti, D. Prosperi, C. J. Dai, L. K. Ding, H. H. Kuang and J. M. Ma, Physics Letters 450 (1999) 448.

- [22] John Ellis, R. A. Flores and J. D. Lewin, Physics Letters **B212** (1988) 375.
- [23] <http://ccwww.kek.jp/pdg/>
- [24] N. Kudomi, H. Ejiri, K. Fushimi, K. Hayashi, R. Hazama, T. Kishimoto, M. Komori, K. Kume, G. Kunitomi, T. Matsuoka, H. Miyawaki, K. Nagata, H. Ohsumi, K. Okada, T. Shima, S. Shiomi, K. Takahisa, J. Tanaka, K. Tasaka and T. Watanabe, Nuclear Physics **A629** (1998) 527c.
- [25] 小川岩雄 放射線（改訂版）（コロナ社）
- [26] ニコラス 阪井英次訳 放射線計測の理論と演習 上・下巻（現代工学社）
- [27] 石川友清：放射線概論（通称産業研究社）
- [28] 日本アイソトープ協会 新版アイソトープ便覧（丸善株式会社）
- [29] 飯田博美 放射線取扱技術（日本原子力産業会議）
- [30] Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **A484**(2002) 342-350
- [31] Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **A422** (1999) 89-94
- [32] BICRON カタログ
- [33] CERN Application Software Group, http://wwwinfo.cern.ch/asdoc/geant_html3/geantall.html