

J-Parc 中性ビームラインのシールド材による 中性子遮蔽の測定

2006.2.21

山形大学 理学部物理学科

クォーク核物理学研究グループ

学籍番号 03312036

滝口 耕平

目次

目的

第 1 章 原理

- 1.1 実験の概要
- 1.2 中性子について

第 2 章 装置

- 2.1 準備したもの
- 2.2 装置の説明
 - 2.2.1 γ 線源
 - 2.2.1-(1) ^{22}Na
 - 2.2.1-(2) ^{60}Co
 - 2.2.1-(3) ^{137}Cs
 - 2.2.2 中性子線源
 - 2.2.2-(1) $^{241}\text{Am-Be}$
 - 2.2.2-(2) ^{252}Cf
 - 2.2.3 光電子増倍管
 - 2.2.4 シンチレータ
 - 2.2.5 プラスチックシンチレータ
 - 2.2.6 シールド材

第 3 章 測定の手順

- 3.1 実験装置のセットアップ
- 3.2 設定
- 3.3 手順
 - 3.3.1 中性子線、 γ 線と Energy
 - 3.3.2 ^{252}Cf の測定
 - 3.3.3 シールド材を用いた中性子遮蔽数の測定

第 4 章 測定結果と考察

- 4.1 中性子線、 γ 線と Energy
 - 4.1.1 考察
- 4.2 ^{252}Cf の測定
 - 4.2.1 考察
- 4.3 シールド材を用いた中性子遮蔽数の測定
 - 4.3.1 考察

第 5 章 まとめと今後の課題

謝辞

参考文献

目的

J-Parc のビームラインで使用するシールド材による中性子の遮蔽性能を評価する。

第 1 章 原理

1.1 実験の概要

各線源から照射された放射線で、粒子が入射した際に光を発生するシンチレータ物質を使い、その光を光電子増倍管 (PMT : photo-multipliertube) に通す。その光が PMT の光電面に入ってくると、光電効果と呼ばれる現象によって、金属内部の電子が飛び出し、飛び出した電子は、強い電場によって加速されて一段目のダイノードに衝突する。ダイノードに衝突した電子は、加速で得たエネルギーを使ってダイノード内の電子を次々と飛び出させる。この飛び出した電子を 2 次電子といい、ここで、電子の数を増幅していく。2 次電子はまた電場によって加速され、次の段のダイノードに衝突し、新たな 2 次電子群を発生させる。これをどんどんと繰り返し、始めは 1 個だった電子は最終段のダイノードに達するとき 1 億個程度にまで増え、ここまで到達した電子は、電流として外部に読み出されていく。その信号を DIVIDER を使って 2 つに分け、片方には DELAY をかけ、もう片方には DISCRIMINATOR と GATE GENERATOR を通し、パソコンでエネルギーごとに分けられたチャンネルでそれぞれの信号を計数する。そして最初に γ 線源を計り、その後中性子線源で実験し、中性子を計測できているかを確認してから、確認できた中性子線源を試料にして、いくつかのシールド材を使い、SCALER で計数したそれぞれのシールド材ごとの信号の数でどれだけ中性子が遮蔽されたかを見る。

1.2 中性子について

中性子は、電荷がゼロ (中性) の重原子粒子で、質量は 939.573MeV と陽子よりわずかに大きい。直径は 10^{-15}m 。原子核の外ではわずかな例外を除いて中性子は不安定であり、陽子と電子および反電子ニュートリノに崩壊する。平均寿命は 887 秒、半減期は 600 秒である。中性子の最大の特徴は、電荷が 0 であるということである。電磁気力の影響を受けないため、中性子線は透過性が高く原子核の核種変換に使う物質として重要である。通常の状態では荷電していない原子は中性子と同じようには利用できない。なぜならば、原子は中性子よりも約 1 万倍も大きく、正電荷を持つ原子核の周りに負電荷を持つ電子が広く分布しているという系になっているためである。荷電粒子は、電磁気力によって通過する物質の原子をイオン化するため物質中を通過する際にエネルギーを失いやすい。イオン化に費やされたエネルギーはすなわち、荷電粒子の失ったエネルギーであり、その結果、荷電粒子は減速し、最終的には停止する。しかし、中性子は、そのような過程でエネルギーを失わない。電氣的に中性であるため、観測だけでなく中性子を制御するのも難しい。荷電粒子に対しては電磁場によって加速、減速、軌道修正が可能であるが、中性子には使えない。さらに、自由な中性子は核分裂反応からのみ得られ自然界には存在しない。中性子は原子を直接には電離させないので、核反応を利用して荷電粒子または光子を作り、それを適切な検出器で計数する方法を用いて間接的に中性子を検出する。

第 2 章 装置

2.1 準備したもの

γ 線源 (^{22}Na 、 ^{60}Co 、 ^{137}Cs)、中性子線源($^{241}\text{Am-Be}$ 、 ^{252}Cf)、光電子増倍管 (photo-multiplier tube)
HIGHVOLTAGE POWER SUPPLY、DIVIDER、CLOCK GENERATOR、GATE DELAY GENERATOR
DELAY、DISCRIMINATOR、ATTENUATOR、SCALER $\times 4$ 、qVt MULTICHANNEL ANALYZER
オシロスコープ、コンピュータ、プラスチックシンチレータ、テフロン (反射テープ)
Vinyl Plastic Electrical Tape (遮光テープ)
シールド材

- ・ アルミニウム
- ・ アルミニウム+B₄C (炭化ホウ素) 溶射片面 (厚さ 1mm)
- ・ アルミニウム+B₄C 溶射両面 (厚さ 1mm)
- ・ B₄C20%入りシリコンゴム (4 枚)
- ・ B₄C50%入りシリコンゴム (5 枚)
- ・ Gd₂O₃ (酸化ガドリニウム) 40%入りシリコンゴム (5 枚)

2.2 装置の説明

2.2.1 γ 線源

2.2.1-(1) ^{22}Na



写真 2.2.1-(1) : ^{22}Na

半減期は 2.602 年で、 β^+ 崩壊をし、 γ 線のエネルギーは 1.274MeV と β^+ 崩壊でできる陽電子の対消滅による 511keV である。左の写真 2.2.1-(1)は ^{22}Na の密封線源である。

2.2.1-(2) ^{60}Co



写真 2.2.1-(2) : ^{60}Co

半減期は 5.2714 年で、 β^- 崩壊をし、 γ 線のエネルギーは 1.173MeV、1.332MeV である。左の写真 2.2.1-(2)は ^{60}Co の密封線源である。

2.2.1-(3) ^{137}Cs



写真 2.2.1-(3) : ^{137}Cs

半減期は 1.176 年で、 β^- 崩壊をし、 γ 線のエネルギーは 0.662MeV である。左の写真 2.2.1-(3)は ^{137}Cs の密封線源である。

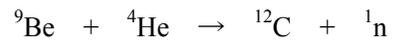
2.2.2 中性子線源

2.2.2-(1) $^{241}\text{Am-Be}$



写真 2.2.2-(1) : $^{241}\text{Am-Be}$

半減期は 432 年で、 α 崩壊をする。



上記のような(α 、n)の中性子生成反応で中性子が放出され、中性子平均エネルギーは約 5MeV、密封線源からの γ 線照射のエネルギーは 0.06MeV である。左の写真 2.2.2-(1)は $^{241}\text{Am-Be}$ の密封線源である。

2.2.2-(2) ^{252}Cf



写真 2.2.2-(2) : ^{252}Cf

半減期は 2.65 年で、 α 崩壊をする。自発核分裂して中性子を放出し、中性子の平均エネルギーは 2.1MeV、密封線源からの γ 線照射のエネルギーは 0.5~1MeV である。左の写真 2.2.2-(2)は ^{252}Cf の密封線源である。

2.2.3 光電子増倍管

光センサの中でも極めて高感度、高速応答な光検出器であり、光を電子に変換する陰極（光電面）、集束電極、電子増倍部、電子を集める陽極を真空の容器に収めたもの。光が光電面に入射すると、光電効果と呼ばれる現象によって、金属内部の電子が飛び出し、飛び出した電子は、強い電場によって加速されて一段目のダイノードに衝突する。ダイノードに衝突した電子は、加速で得たエネルギーを使ってダイノード内の電子を次々と飛び出させる。この飛び出した電子を2次電子といい、ここで、電子の数を増幅していく。2次電子はまた電場によって加速され、次のダイノードに衝突し、新たな2次電子群を発生させる。これを繰り返し、始めは1個だった電子は最終段のダイノードに達するとき 10^8 個程度にまで増加する。結果、光電面から真空中に放出された光電子が、出力信号として陽極に収集されていく。二次電子放出効果による増倍のため、受光素子の中では際立った感度と低ノイズ性を有し、高速時間応答特性、受光面の大きなものが出るなどの特徴がある。今回の実験で使用したのは、光電子増倍管のアセンブリは H1161 型（下の写真 2.2.3）で、ヘッドオン型の光電子増倍管は R329-02 型であり、管径は 51mm、印加電圧-2700V、ブリーダ電流 1.23mA。カーブナンバーは 400K（下のグラフ 2.2.3 参照）、波長範囲は 300~650nm、最高感度波長は 420nm である。

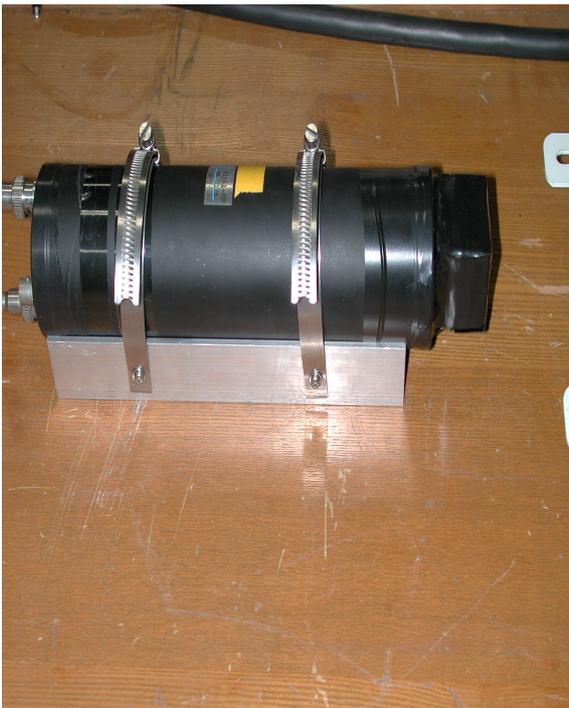
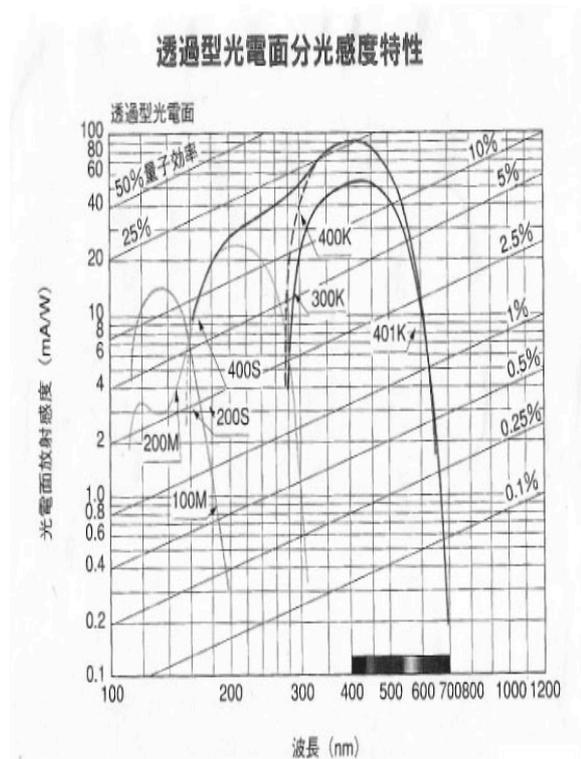


写真 2.2.3 : 固定した PMT H1161 型



グラフ 2.2.3 : 透過型光電面光感度特性

2.2.4 シンチレータ

ある種の物質に放射線があたり、可視、近紫外、近赤外の弱い閃光を出すことをシンチレーションといい、入射粒子あるいは相互作用する粒子1つごとに1回の閃光が發せられる。また、放射線のエネルギーを光のエネルギーに変換する物質をシンチレーション物質と呼ぶ。發光の原理について説明すると、電子は原子核の周りを回っていて、電子は不連続なエネルギー準位を持っている。物質の基底状態中の一番上の許容帯は電子で完全に満たされており、荷電子帯と呼ばれる。その上の許容帯には電子が全く入っておらず、伝導帯と呼ばれる。入射放射線から十分なエネルギーをもらえば、電子は伝導帯に移動することが出来、格子のどこへでも動くことが出来る。荷電子帯から伝導帯に上がった電子は荷電子帯に正孔を残し、この正孔も移動可能となる。十分なエネルギーが与えられない場合は、電子は荷電子帯中の正孔に静電的に縛られる。このように形成された電子正孔対は励起子と呼び、エネルギー状態で言うと、励起子は荷電子帯より高い状態であるが伝導帯よりは低い準位に電子を励起することに対応している。荷電子帯と伝導帯間のギャップは8eV程度であるが、励起子の幅は1eV程度である。活性化物質の原子は基底状態或いはその励起状態の1つになりうるので、光子を吸収した結果、或いは励起子の捕獲、または電子と正孔の連続捕獲の結果、この活性化物質原子はその励起状態の一つに上がる。励起状態の活性化物質原子が再び元の基底状態に戻る際、 10^{-8} s 程度の時間内に光子を放出する。この光子が可視部に波長を持つ場合にはシンチレーションに寄与する。入射放射線のエネルギーの大半は結晶格子に付与され結局熱になるので、活性化原子が發光するということは、結晶から活性化原子にエネルギーが移転されることを意味しているのである。シンチレータの最も重要な性質は發光の光量と波長であり、光量は光電子増倍管の光電陰極で作られる光電子の数に影響し、その結果出力パルス波高に影響を与え、波長に関する情報はシンチレータを適切な光電子増倍管と整合させるのに必要である。

2.2.5 プラスチックシンチレータ



写真 2.2.5 : プラスチックシンチレータ

このプラスチックシンチレータを光電子増倍管に繋げるとき、光電面側を除いて反射テープであるテフロンを使用し、その上に遮光テープを巻き光が入らないようにしておく。また、今回使用したシンチレーターの大きさは、直径が 4.5cm の光電子増倍管の光電面を最も覆い、かつ加工し

今回の実験はプラスチックシンチレータを使用する。プラスチックシンチレータは有機シンチレータの固溶体と考えられ、液体シンチレータと同様の性質を示すが、液体に比べて容器を必要としないという利点がある。プラスチックシンチレータは細い線から薄い板まで任意の形状と寸法に加工できる。水、空気、多種類の化学薬品と反応しないので、放射性試料と直接接触させて使用できる。プラスチックシンチレータの發光量はアントラセンよりも低く、減衰時間は短く、發光スペクトルのピークは 350~450nm である。中性子は核との衝突によってエネルギーを失い、軽い核の方が衝突あたりで失うエネルギーが大きいのでプラスチックシンチレータが良く用いられる。左の写真 2.2.5 は今回の実験で使用したものと同質のプラスチックシンチレータである。

やすい直方体にし、光電面に接する面の面積は $3.5\text{cm} \times 3.5\text{cm} = 12.25\text{cm}^2$ で、高さは 3cm のものを使用した。以下の図 2.2.5 にその大きさを示す。

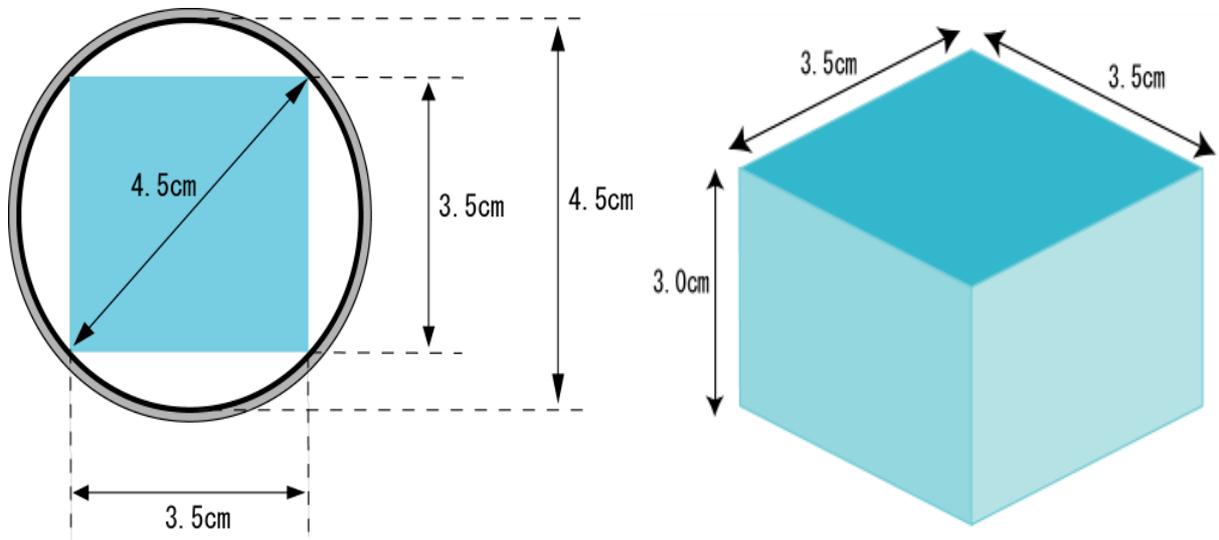


図 2.2.5 : プラスチックシンチレータの大きさ

3.2.6 シールド材

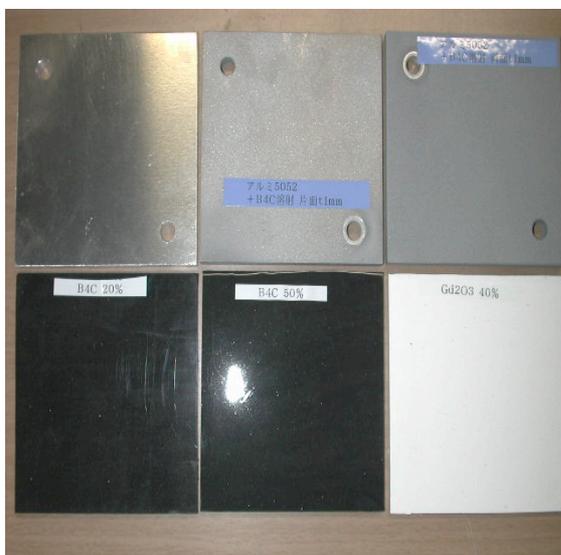


写真 2.2.6 : シールド材

それぞれのシールド材の大きさについてだが、縦横共に 10cm 、アルミニウム以外のシールド材の厚さは 0.5cm 、アルミニウムのみは 0.8cm で、アルミニウム+ B_4C 溶射片面は 0.9cm 、アルミニウム+ B_4C 溶射両面は 1.0cm である。

シールド材は、核分裂反応から生じる中性子、 γ 線などの放射線を遮断し、減衰させるために必要な材料である。したがってこの材料には、中性子遮蔽特性がよいこと、中性子反射・減速性能がよいこと、 γ 線減衰特性がすぐれていることなどが要求される。今回の実験では中性子吸収断面積の大きな B_4C 、 Gd_2O_3 が含まれたアルミニウム、シリコンゴムを使用する。左の写真 2.2.6 は、左上からシールド材のアルミニウム、アルミニウム+ B_4C 溶射片面（厚さ 1mm ）、アルミニウム+ B_4C 溶射両面（厚さ 1mm ）、 $\text{B}_4\text{C}20\%$ 入りシリコンゴム、 $\text{B}_4\text{C}50\%$ 入りシリコンゴム、 $\text{Gd}_2\text{O}_340\%$ 入りシリコンゴムである。

第3章 測定の手順

3.1 実験装置のセットアップ

今回の実験では、2.1 で示したものを使って、以下の図 3.1 のようなセットアップを行う

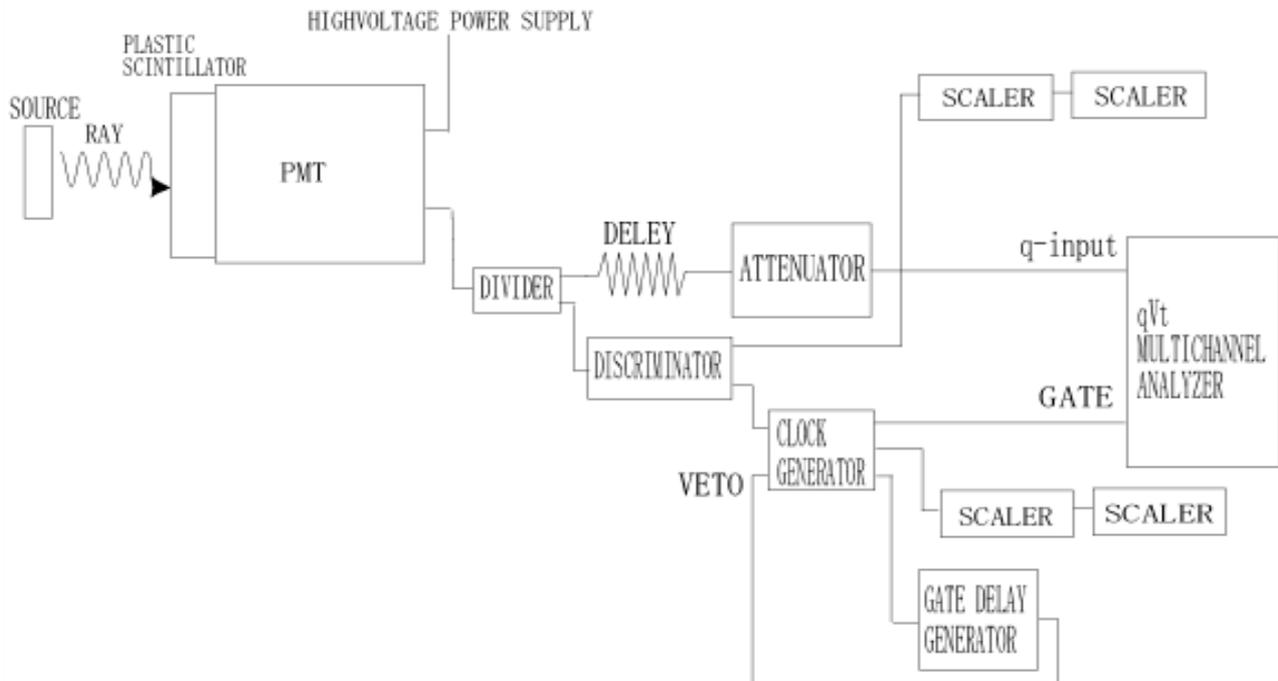


図 3.1 : 回路図

実際に設置した装置を以下の写真 3.1-①に示す。

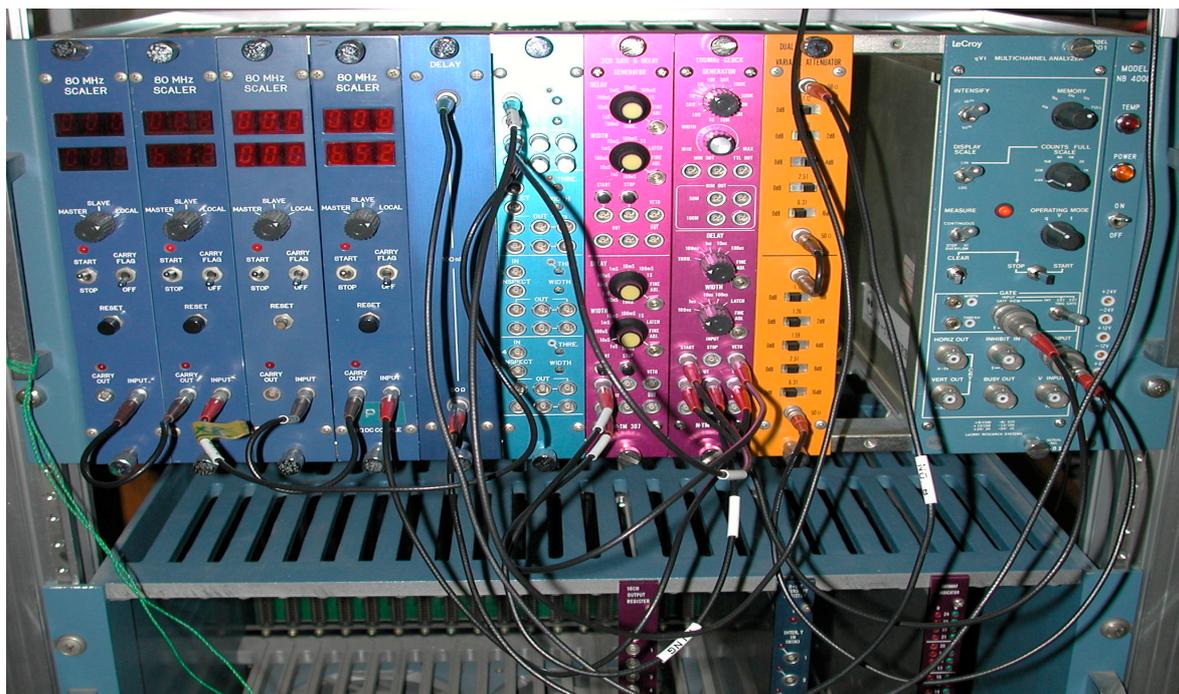


写真 3.1-① : 測定中の装置

上の写真の装置は左から SCALER×4、DELAY、DISCRIMINATOR、GATE DELAY GENERATOR、CLOCK GENERATOR、ATTENUATOR、qVt MULTICHANNEL ANALYZER の順に並んでいる。

また、測定の前に、オシロスコープを使用して、信号が正しく計数されているか確認するために、q-input の信号を CHANNEL1、GATE に入る信号を CHANNEL2 に入れてタイミングを確認した。その写真を下の写真 3.1-②に示す。

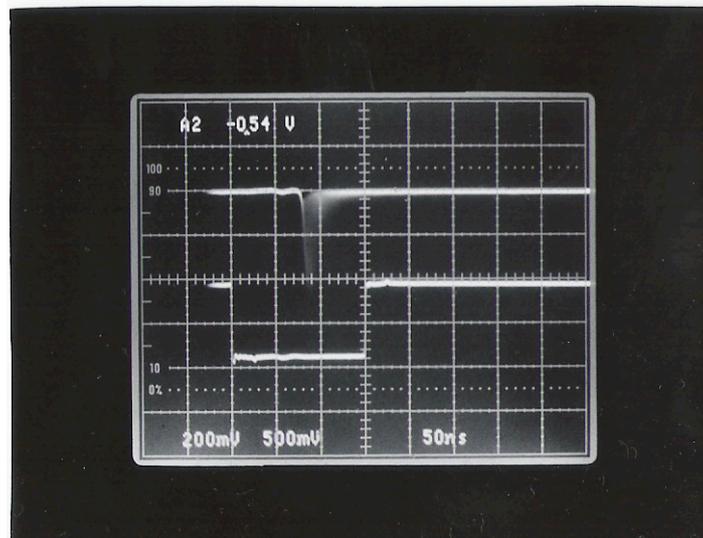


写真 3.1-②

上の写真の横軸は 50ns/div、CHANNEL1 の縦軸は 200mV/div、CHANNEL2 の縦軸は 500mV/div である。

3.2 設定

- 1) HIGHVOLTAGE POWER SUPPLY を -1600V
- 2) CLOCK GENERATOR の DELAY を 100nS
- 3) CLOCK GENERATOR の Threshold を 200mV
- 4) ATTENUATOR を 12dB
- 5) WIDTH を 150nS
- 6) 線源を置く土台と、線源側のシールド材の位置、PMT の位置を固定する。今回の実験では下の写真 3.2-①のように、線源から PMT までの距離を 14cm 、その中間の 7cm のところにシールド材を入れる。

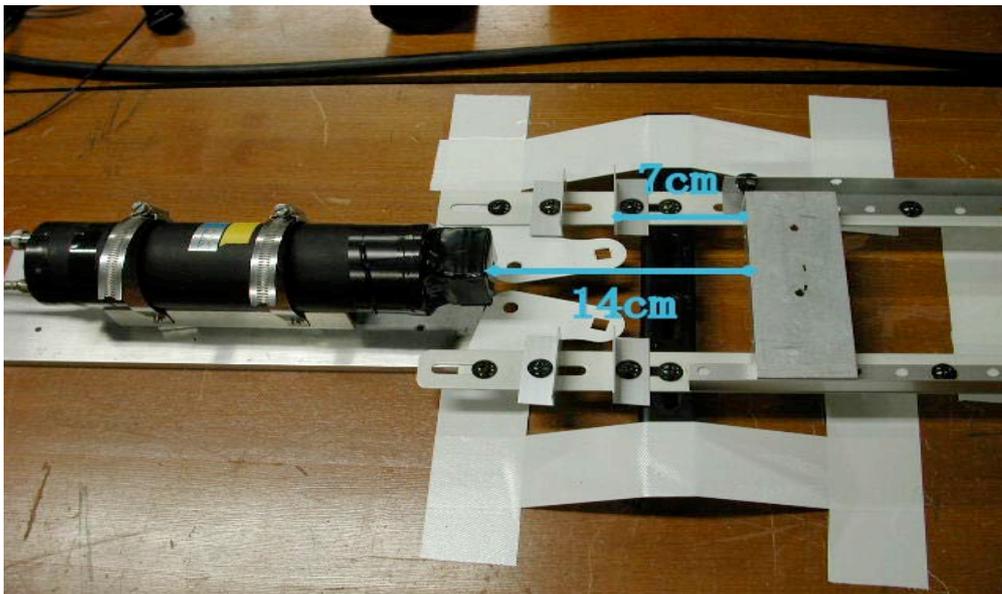


写真 3.2-① : 線源、シールド材、PMT の位置

実際にシールド材を入れた状態の装置を以下の写真 3.2-②に示す。

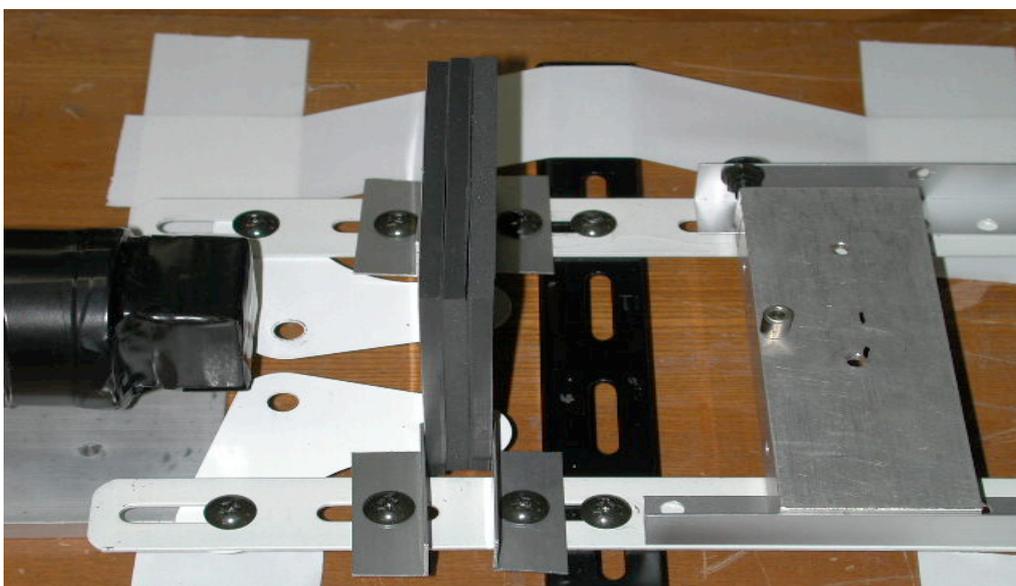


写真 3.2-② : 測定中の様子

前にも説明したが、線源の位置、PMTの位置、遮蔽材の右側の留め金を固定し、線源と遮蔽材との距離が変わらないようにしておく。土台の固定にはガムテープを使用した。

3.3 手順

3.3.1 中性子線、 γ 線と Energy

- 1) HIGHVOLTAGE POWER SUPPLY を -1600V に設定。
- 2) q-input と Gate の信号をずらして、 0MeV を示す Pedestal を計る。
- 3) 上図の土台の上に各 γ 線源、中性子線源を置き、Threshold を 80mV 、ATTENUATOR を 10dB に設定し、45分ずつ計測する。
- 4) それぞれの線源の Compton Edge をグラフから求め、Energy と Channel の関係から、中性子線の線源からの γ 線を検出していないかどうか確かめる。

3.3.2 ^{252}Cf の測定

- 1) HIGHVOLTAGE POWER SUPPLY を -1500V 、Threshold を 80mV 、ATTENUATOR を 10dB に設定。
- 2) ^{252}Cf を線源とし、BackGround と線源とを同条件で1時間ずつ測定する。
- 3) 線源のグラフから BackGround の値を引き、中性子を計測出来ているか確認する。

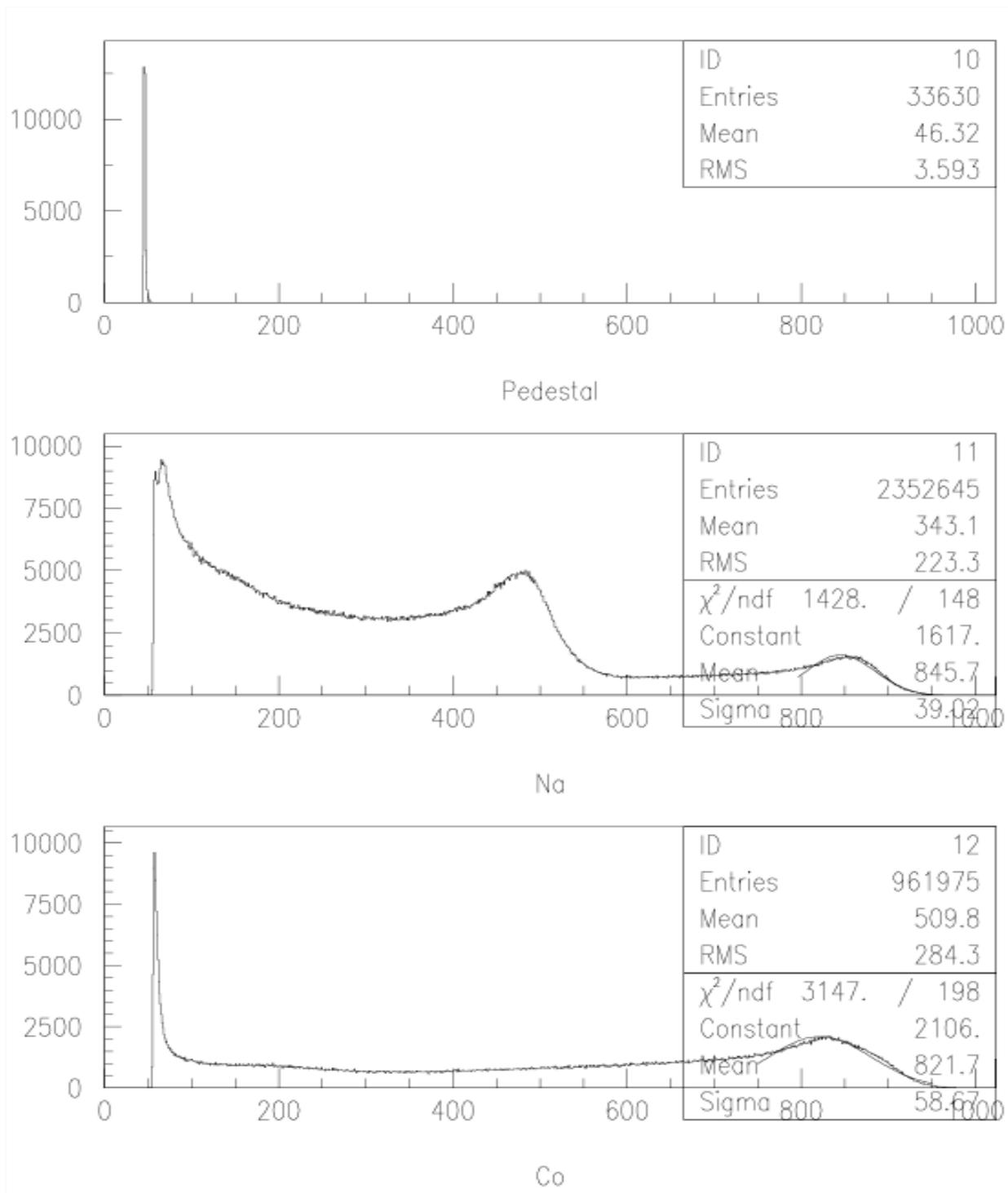
3.3.3 シールド材を用いた中性子の測定

- 1) HIGHVOLTAGE POWER SUPPLY を -1600V 、Threshold を 200mV 、ATTENUATOR を 12dB に設定し、中性子線源から 7cm のところにシールド材を入れていき、それぞれ30分ずつ測定する。
- 2) ^{252}Cf を線源とし、それぞれの SCALER の値を見ながら、信号がどれだけ減っていくかを見る。

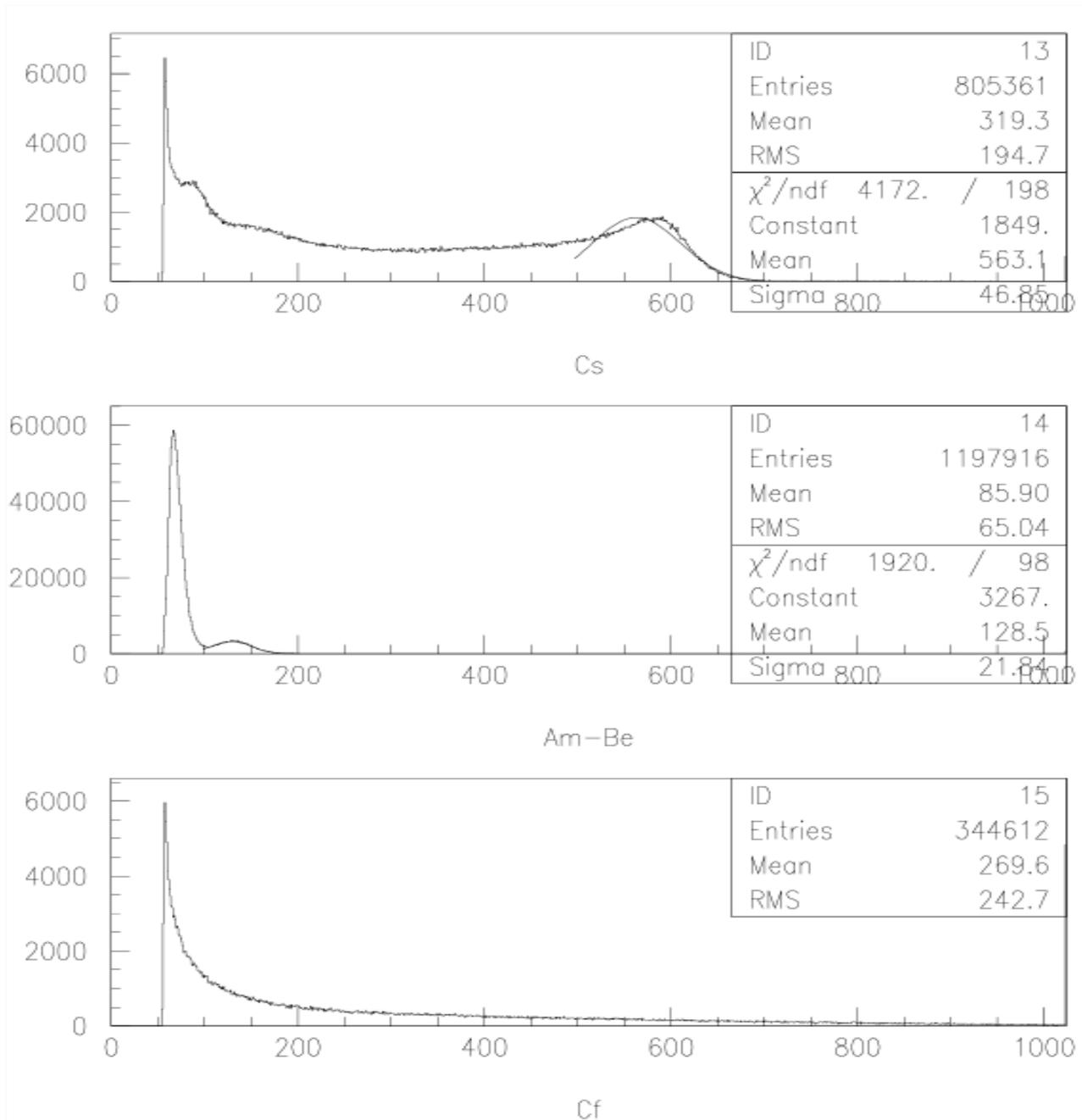
第4章 測定結果と考察

4.1 中性子線、 γ 線と Energy

それぞれの線源について、同条件で測定し、得たグラフの Compton Edge があると思われる範囲にガウスフィットをかけたものを以下のグラフ 4.1-①、グラフ 4.1-②に示す。



グラフ 4.1-① : Pedestal と、 ^{22}Na 、 ^{60}Co にガウスフィットをかけたグラフ



グラフ 4.1-② : ^{252}Cf と、 ^{137}Cs 、 $^{241}\text{Am-Be}$ にガウスフィットをかけたグラフ

また、SCALER に表示された、入力された信号の数(input)、実際に測定された信号の数(output)を使って、入ってきた信号の RATE (入力された信号数÷45 分) を、以下の表 4.1 に示す。RATE が低いほど、input と output の信号の数の差は小さくなる。ただし、Pedestal については、0MeV の CHANNEL を知るために計測するだけなので省いてある。

線源	^{22}Na	^{60}Co	^{137}Cs	$^{241}\text{Am-Be}$	^{252}Cf
input(counts)	2610191	1111959	871334	1246563	372464
output(counts)	2454519	999786	831203	1232766	354193
output / input	0.94	0.90	0.95	0.99	0.95
RATE(counts/min)	58004	24710	19363	27701	8277

表 4.1 : 各線源の信号の count とレート

4.1.1 考察

4.1 の結果から、中性子線源である $^{241}\text{Am-Be}$ 、 ^{252}Cf を測定するにあたり、中性子線だけでなく γ 線まで計数してしまっていないかどうかを判断していく。

以下の表 4.1.1-①に、それぞれの線源の Compton Edge のエネルギーと、グラフにガウスフィットをかけることによって求めた Compton Edge のチャンネルを示す。ただし ^{252}Cf については、グラフにおいて Compton Edge が現れなかったため、ここでは考えない。また、それぞれの Compton Edge のエネルギーは、 E を各線源のエネルギー(MeV)、 $E(c)$ を Compton Edge のエネルギー(MeV)、 mc^2 を定数とした時の以下の式 4.1.1 から求めた。

$$E(c) = E - \frac{E}{1 + \frac{2E}{mc^2}}$$

$$mc^2 = 0.5110034$$

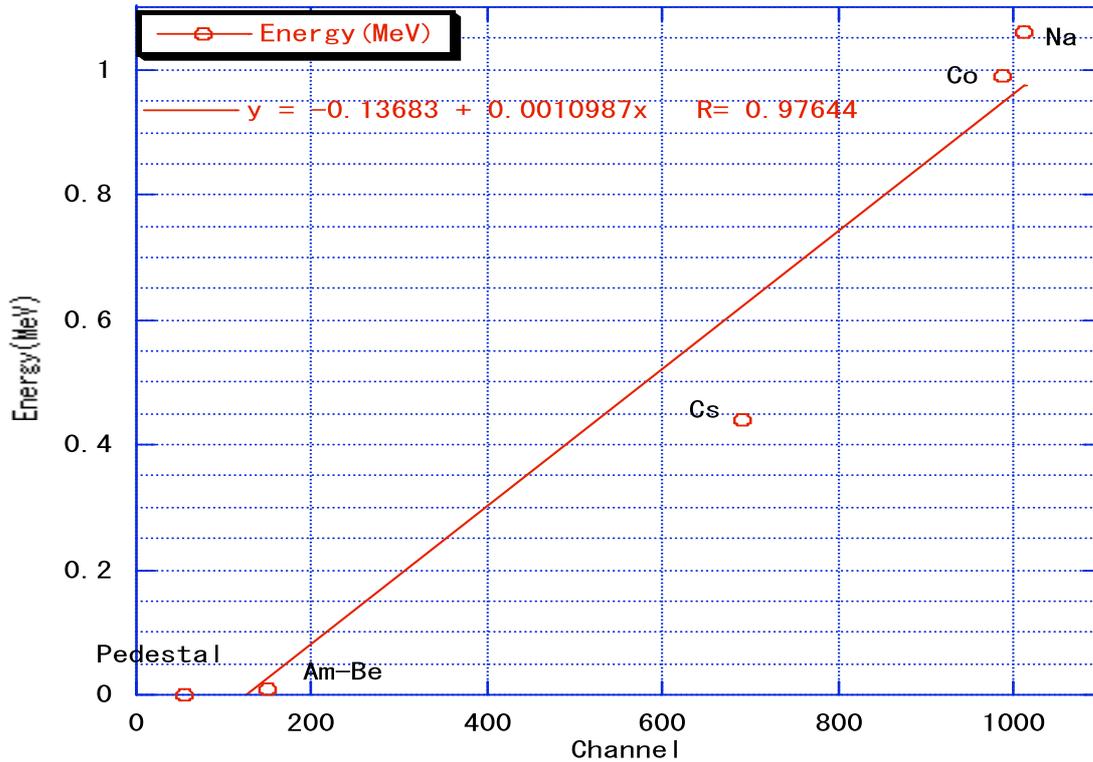
式 4.1.1 : Compton Edge を求めるための式

線源	Pedestal	^{22}Na	^{60}Co	^{137}Cs	$^{241}\text{Am-Be}$	^{252}Cf
各線源の Energy(MeV)	0	1.27	1.25	0.662	0.06	
Compton Edge の Energy(MeV)		1.06	0.99	0.44	0.01	
CHANNEL	54	1013	988	692	151	

表 4.1.1-① : 各線源と Energy、CHANNEL

次に表 4.1.1-①の Energy と CHANNEL の値をプロットし、その線の漸近線を引いたものを以下のグラフ 4.1.1-①に示す。

Energy と Channel の関係



グラフ 4.1.1-① : Energy と CHANNEL の関係

上のグラフの漸近線は

$$Energy = -0.13683 + 0.0010987 \times CHANNEL$$

で表されているので、この式の Energy の部分に、分かっている各線源の Energy を入れて実験で得た値と比べてどの位ずれているか調べてみる。

- 1) Pedestal
Channel = 124.5380905
- 2) ²²Na
Channel = 1089.314645
- 3) ⁶⁰Co
Channel = 1025.602985
- 4) ¹³⁷Cs
Channel = 525.0113771
- 5) ²⁴¹Am-Be
Channel = 133.6397561

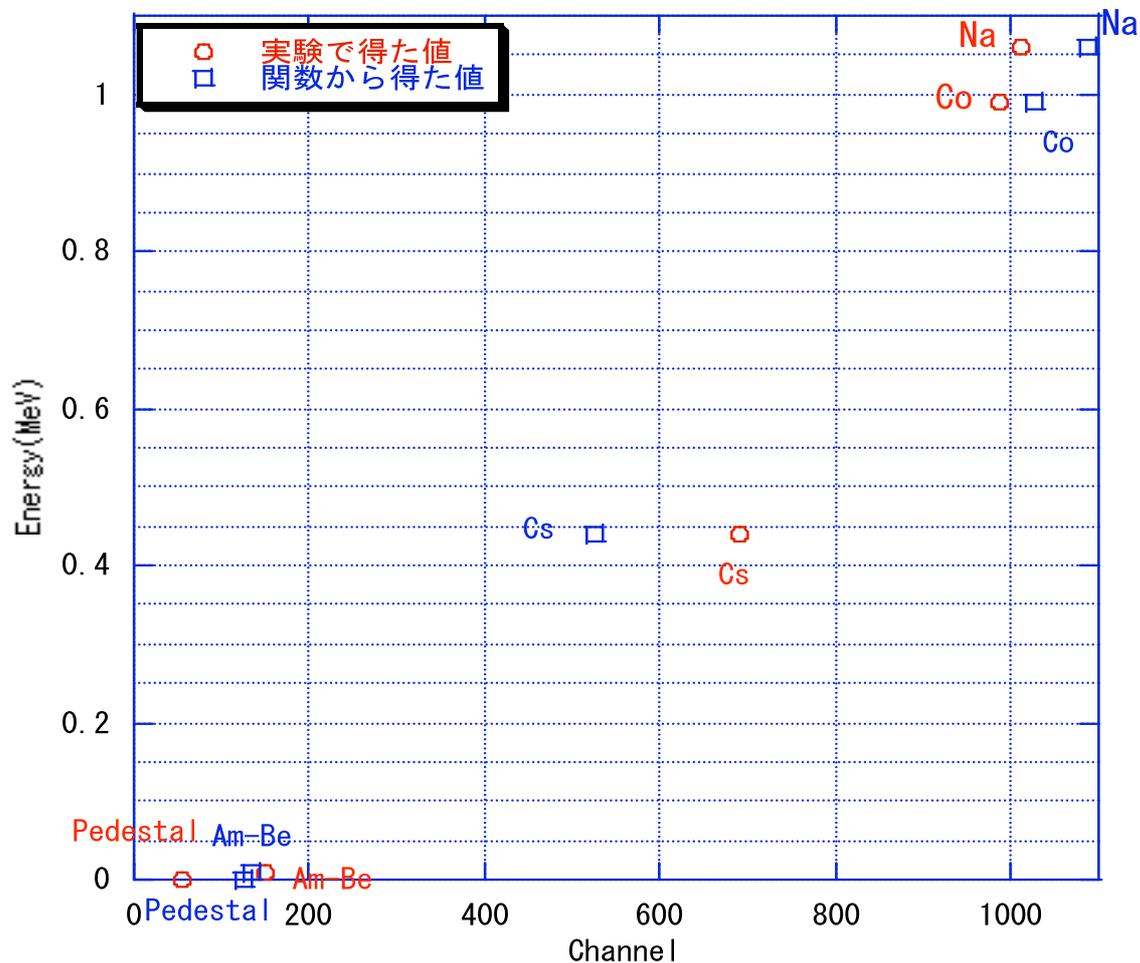
以下の表 4.1.1-②にこれらの結果をまとめた。

線源	Pedestal	²² Na	⁶⁰ Co	¹³⁷ Cs	²⁴¹ Am-Be	²⁵² Cf
Energy(MeV)	0	1.27	1.25	0.662	0.06	
Channel	124.5380905	1089.314645	1025.602985	525.0113771	133.6397561	

表 4.1.1-② : 各線源と Energy、CHANNEL

上の表から、各線源の値は、グラフ 4.1.1-①ではどこにあるかをプロットすると、以下のグラフ 4.1.1-②のようになる。

Energy、Channelについての実験値と関数値の比較

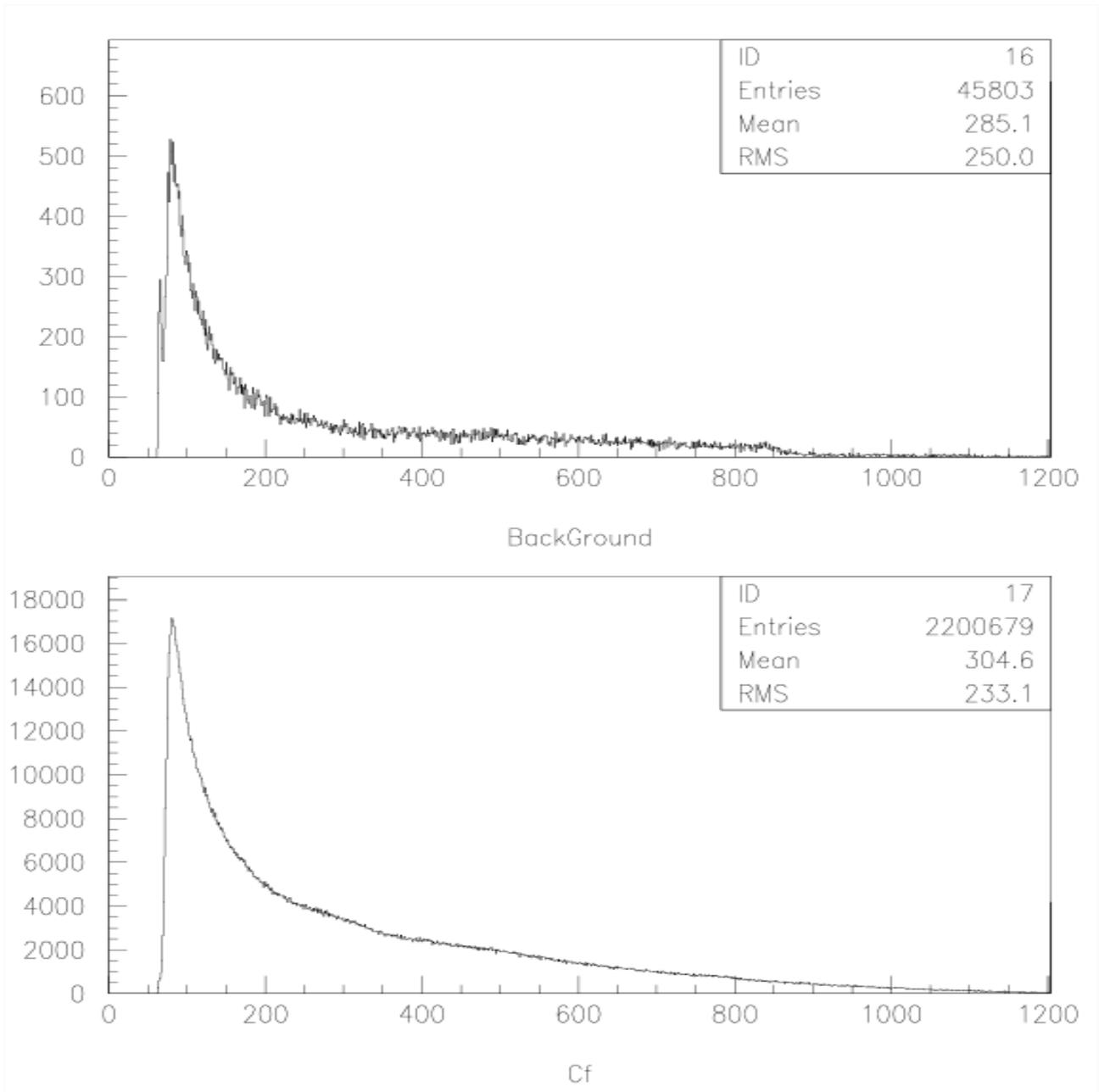


グラフ 4.1.1-②：実験値と関数値の比較

結果からも明かであるが、 ^{252}Cf は γ 線を検出していないことが分かる。しかし、 $^{241}\text{Am-Be}$ については、上の表 4.1.1-②を見ると、 ^{137}Cs は少しずれてしまったが、各値から求めた直線の上にあるので、これは γ 線を検出していると思われる。これでは次の中性子吸収の実験において、中性子だけでなく、 γ 線の吸収も検出してしまう可能性が出てくるので、精度の高い実験を行っているとは言えなくなってしまう。よって、次の実験では、中性子のみを検出できると思われる線源 ^{252}Cf について、グラフ 4.1-②に示したグラフが γ 線、又は Back Ground 以外の放射線、つまり中性子を検出できるかどうかを確かめる。

4.2 ^{252}Cf の測定

以下のグラフ 4.2 に示した BackGround、 ^{252}Cf のグラフから、表 4.2 に、SCALER に表示された入力された信号の数(input)、実際に出力された信号の数(output)を使って、入ってきた信号の RATE (入力された信号数÷60 分) を示す。



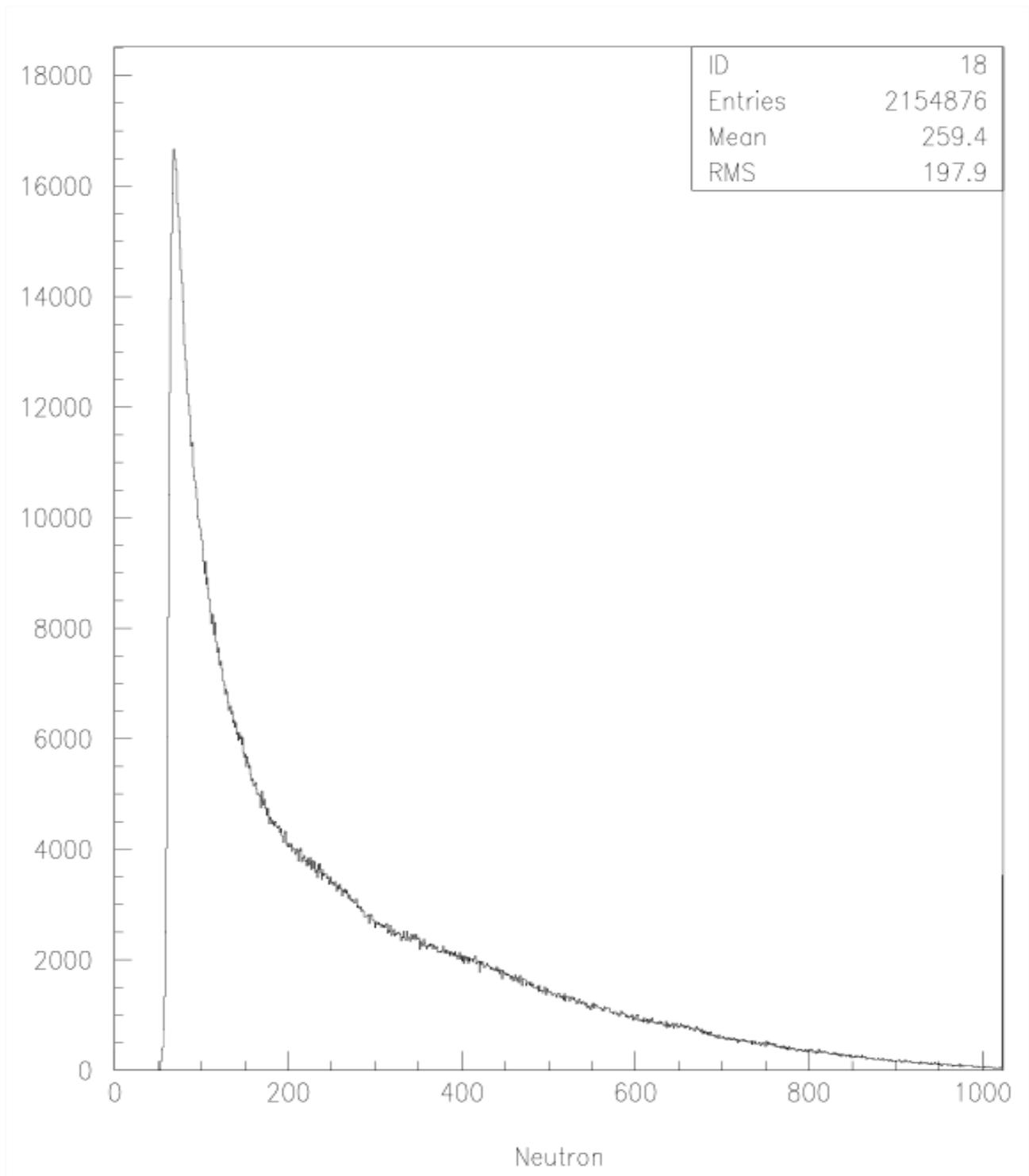
グラフ 4.2 : Back Ground、 ^{252}Cf

線源	線源なし	^{252}Cf
input(counts)	47296	2278653
output(counts)	47031	2244111
output /input	0.99	0.98
RATE(counts/min)	788	37978

表 4.2 : ^{252}Cf と BackGround の信号の count とレート

4.2.1 考察

グラフ 4.2 で示した、 ^{252}Cf と BackGround のグラフを利用して、以下のグラフ 4.2.1 に、 ^{252}Cf から BackGround の値を引いたものを示す。

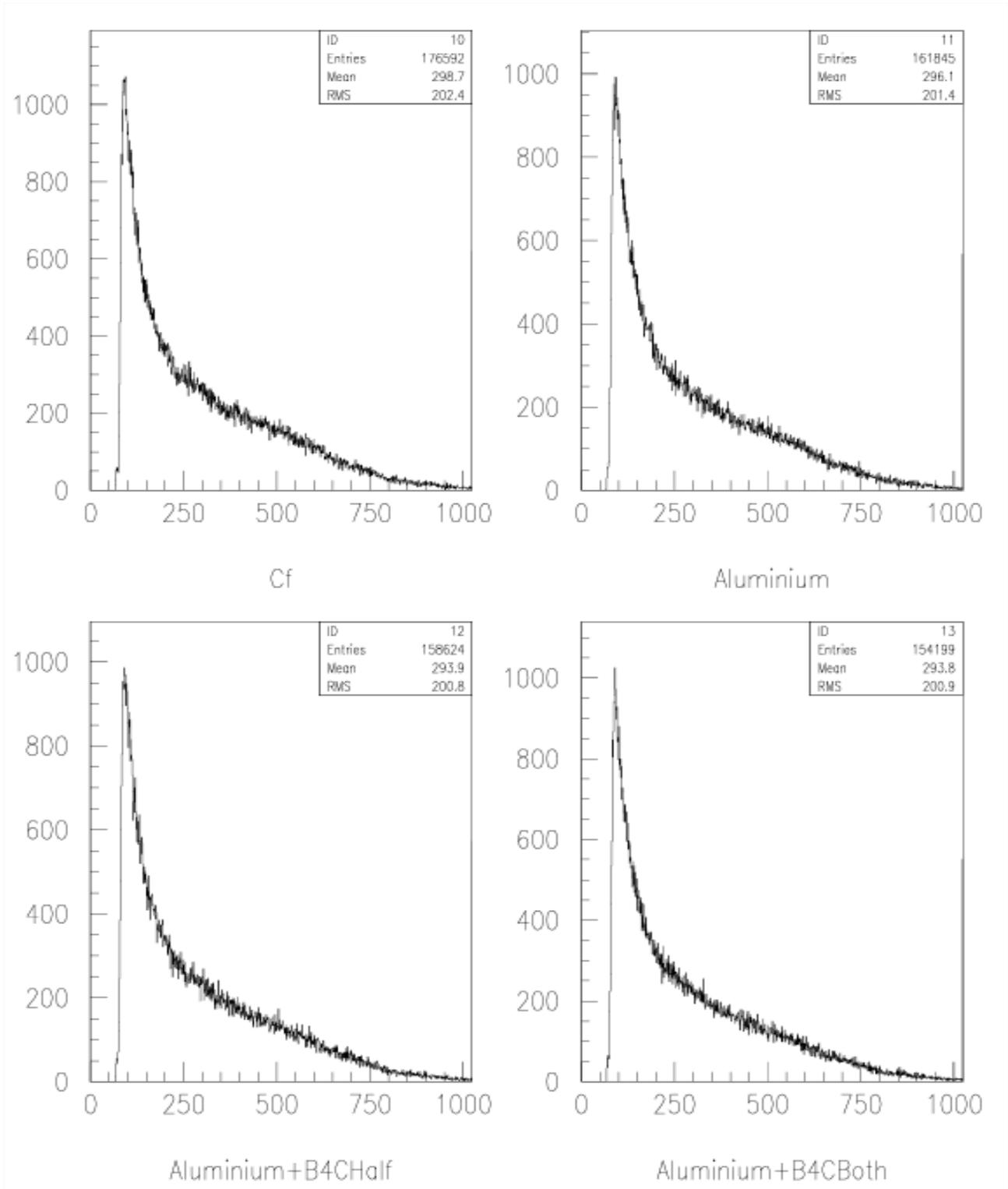


グラフ 4.2.1 : ^{252}Cf から BackGround を引いたグラフ

上のグラフより、中性子を検出していることが確認できたので、次のシールド材による中性子遮蔽数の実験では、線源を ^{252}Cf のみとして計測していく。

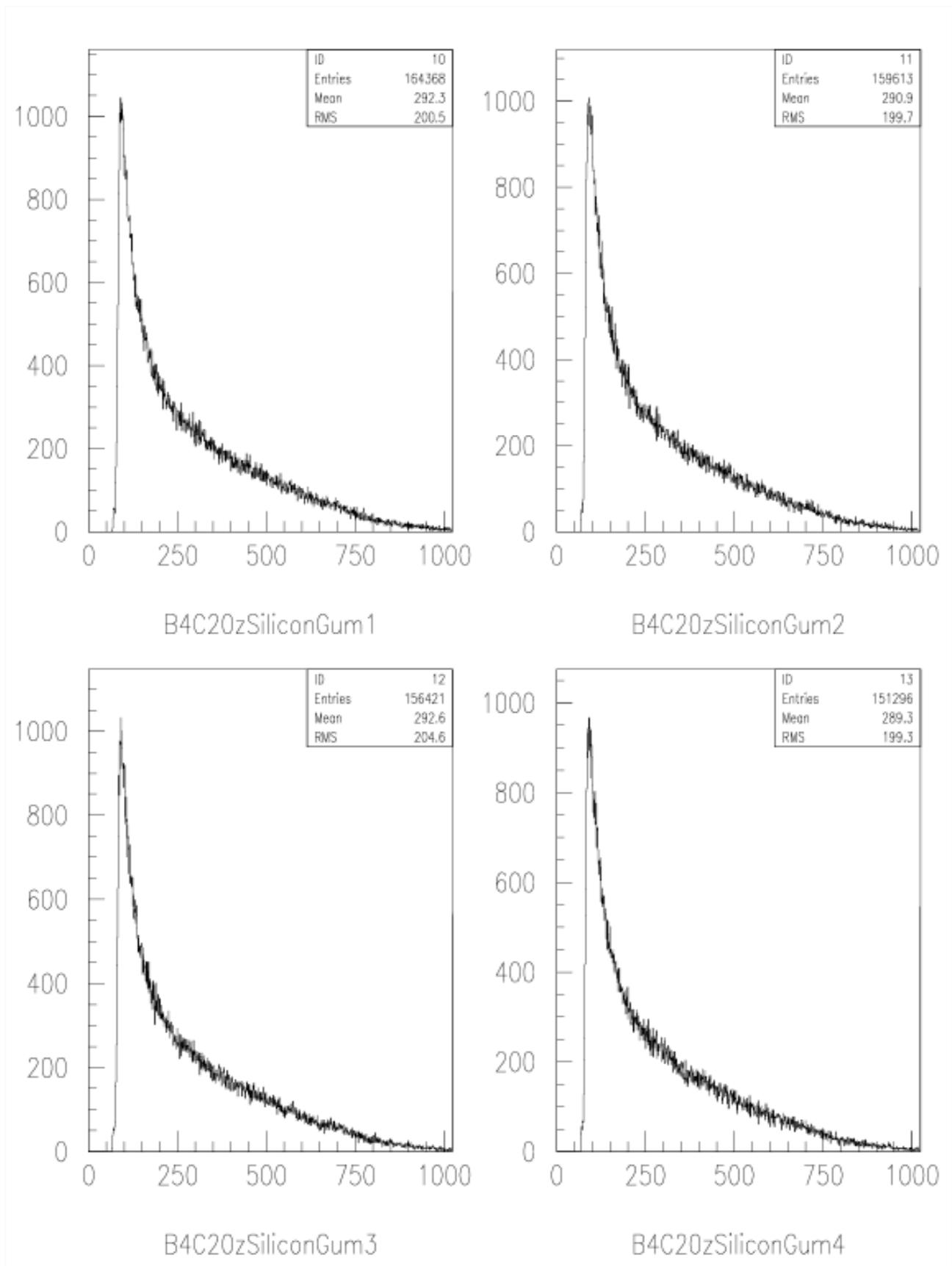
4.3 シールド材を用いた中性子遮蔽数の測定

それぞれのシールド材について同条件で測定し、各枚数ごとに得たグラフを以下のグラフ 4.3-①、グラフ 4.3-②、グラフ 4.3-③、グラフ 4.3-④に示す。



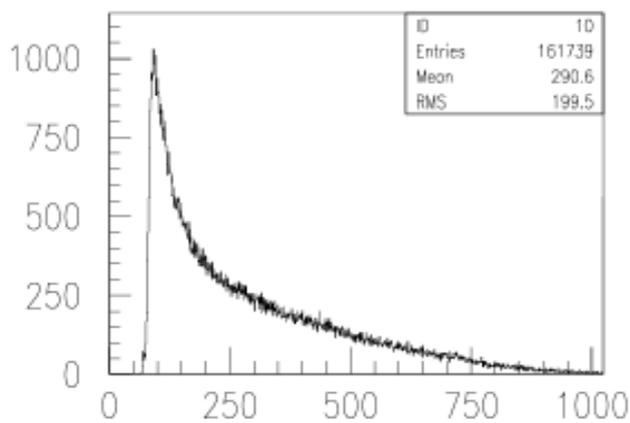
グラフ 4.3-① : ^{252}Cf と、シールド材にアルミニウム素材を使った、各枚数ごとのグラフ

実験に使ったシールド材は左上から、 ^{252}Cf のみ、アルミニウム、アルミニウム+B₄C 溶射片面 (厚さ 1mm)、アルミニウム+B₄C 溶射両面 (厚さ 1mm) である。

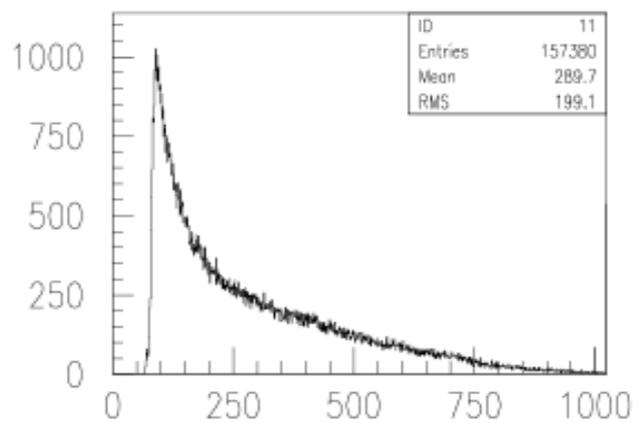


グラフ 4.3-② : シールド材に B₄C20%入りシリコンゴムを使った、各枚数ごとのグラフ

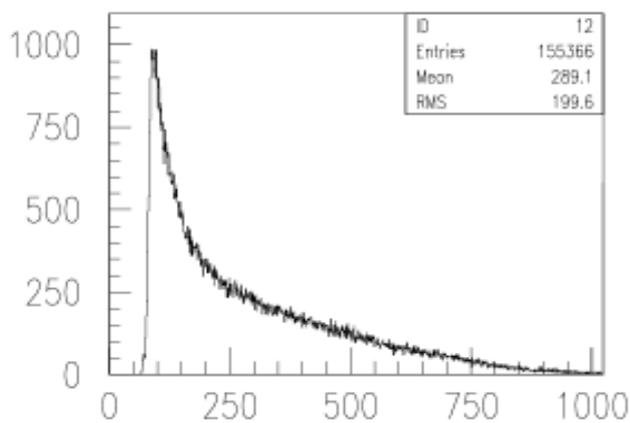
実験に使ったシールド材は左上から、B₄C20%入りシリコンゴム 1 枚、B₄C20%入りシリコンゴム 2 枚、B₄C20%入りシリコンゴム 3 枚、B₄C20%入りシリコンゴム 4 枚である。



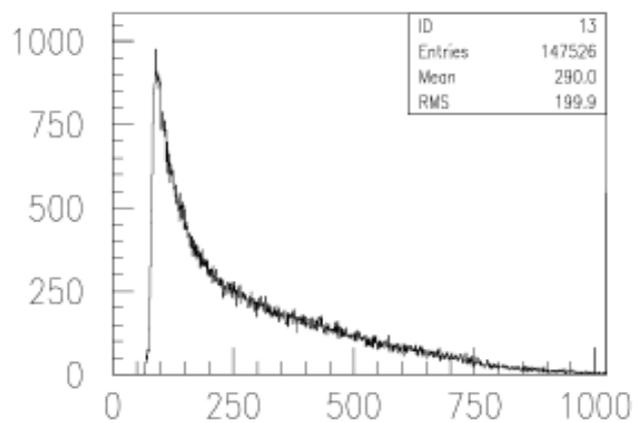
B4C50zSiliconGum1



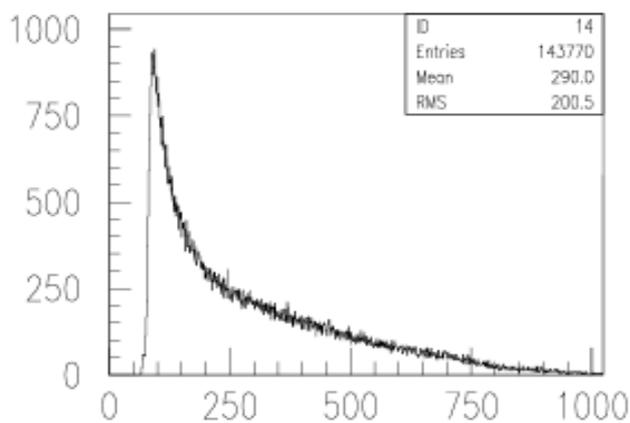
B4C50zSiliconGum2



B4C50zSiliconGum3



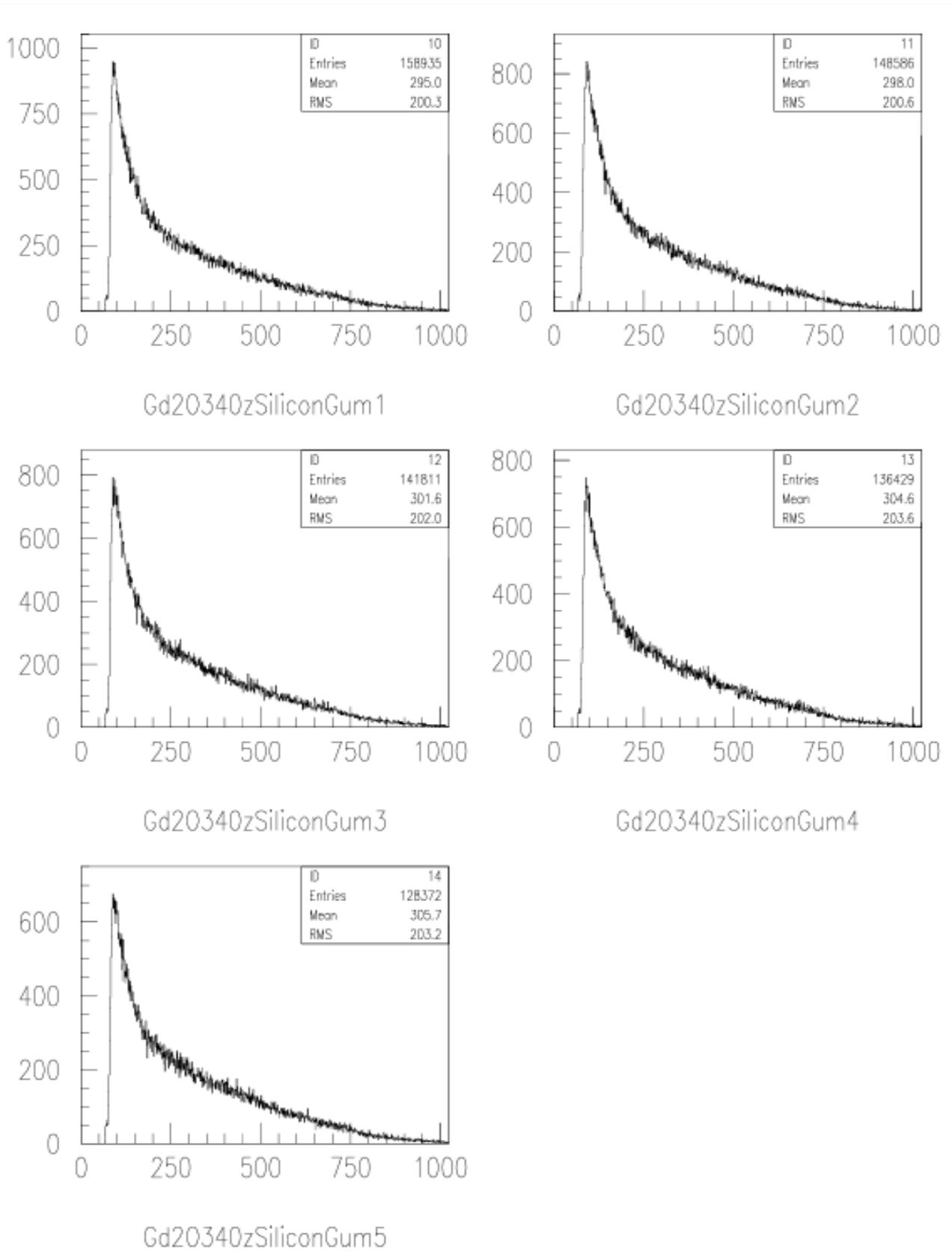
B4C50zSiliconGum4



B4C50zSiliconGum5

グラフ 4.3-③ : シールド材に B₄C50%入りシリコーンゴムを使った、各枚数ごとのグラフ

実験に使ったシールド材は左上から、B₄C50%入りシリコーンゴム 1 枚、B₄C50%入りシリコーンゴム 2 枚、B₄C50%入りシリコーンゴム 3 枚、B₄C50%入りシリコーンゴム 4 枚 B₄C50%入りシリコーンゴム 5 枚である。



グラフ 4.3-④ : シールド材に Gd₂O₃40%入りシリコンゴムを使った、各枚数ごとのグラフ

実験に使ったシールド材は左上から、Gd₂O₃40%入りシリコンゴム 1 枚、Gd₂O₃40%入りシリコンゴム 2 枚、Gd₂O₃40%入りシリコンゴム 3 枚、Gd₂O₃40%入りシリコンゴム 4 枚、Gd₂O₃40%入りシリコンゴム 5 枚である。

また、SCALER に表示された、入力された信号の数(input)、実際に出力された信号の数(output)を使って、入ってきた信号の RATE (入力された信号数÷30 分) を、以下の表 4.3 に示す。

シールド材 アルミニウム	なし	1 枚	B ₄ C 溶射片面 (厚さ 1mm)	B ₄ C 溶射両面 (厚さ 1mm)
input(counts)	181551	166555	163113	158531
output(counts)	181405	166421	162981	158403
output /input	0.99	0.99	0.99	0.99
RATE(counts/min)	6052	5551	5437	5284

シールド材 B ₄ C20%入りシリ コーンゴム	1 枚	2 枚	3 枚	4 枚
input(counts)	169149	164136	160058	155567
output(counts)	168980	163997	159868	155400
output /input	0.99	0.99	0.99	0.99
RATE(counts/min)	5638	5471	5335	5186

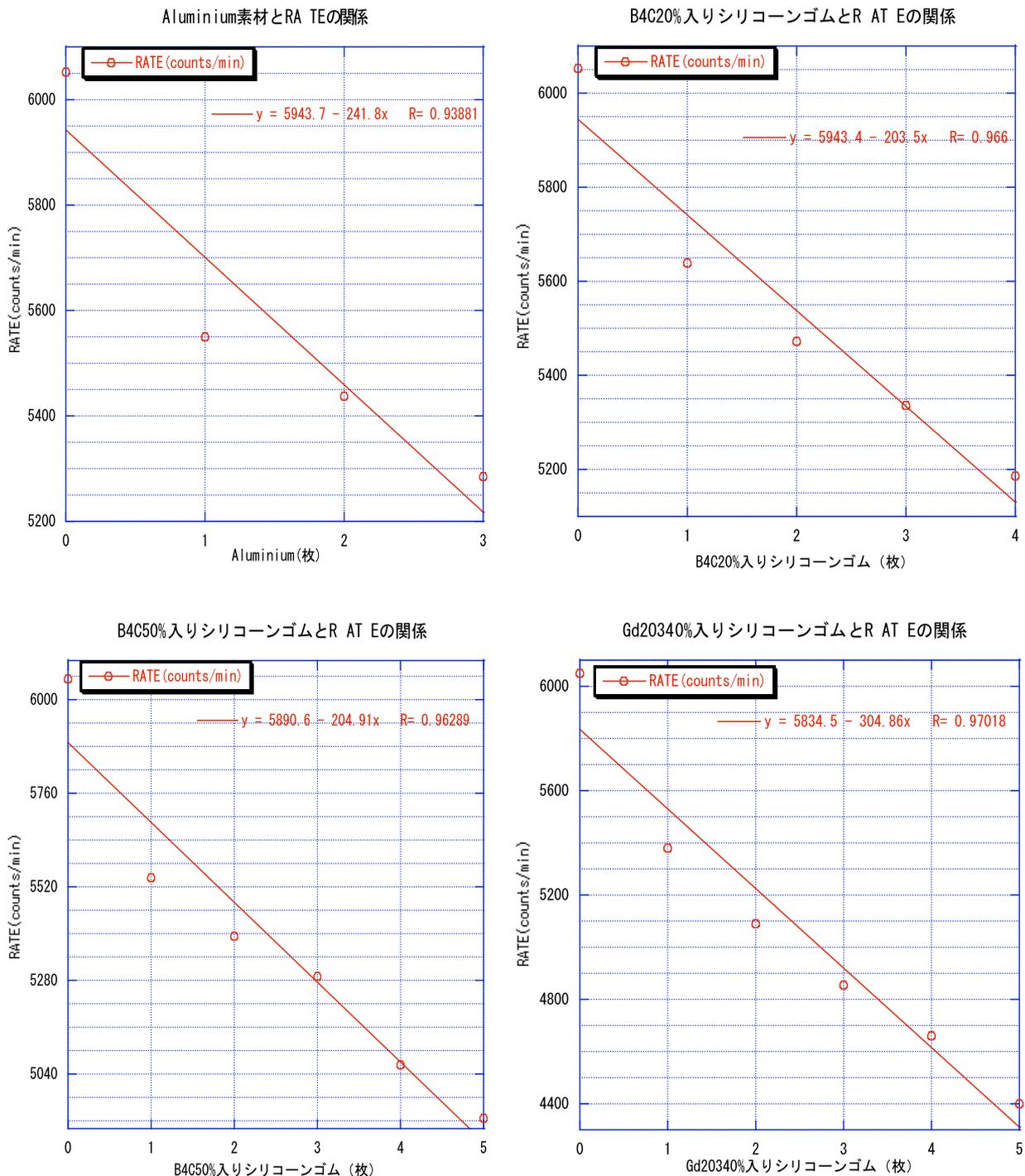
シールド材 B ₄ C50%入りシリ コーンゴム	1 枚	2 枚	3 枚	4 枚	5 枚
input(counts)	166355	161771	158724	151904	147822
output(counts)	166187	161592	158593	151742	147705
output /input	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
RATE(counts/min)	5545	5392	5291	5063	4927

シールド材 Gd ₂ O ₃ 40%入りシリ コーンゴム	1 枚	2 枚	3 枚	4 枚	5 枚
input(counts)	161413	152713	145693	139725	131945
output(counts)	161259	152540	145523	139605	131821
output /input	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
RATE(counts/min)	5380	5090	4856	4658	4398

表 4.3 : シールド材ごとの信号の count とレート

4.3.1 考察

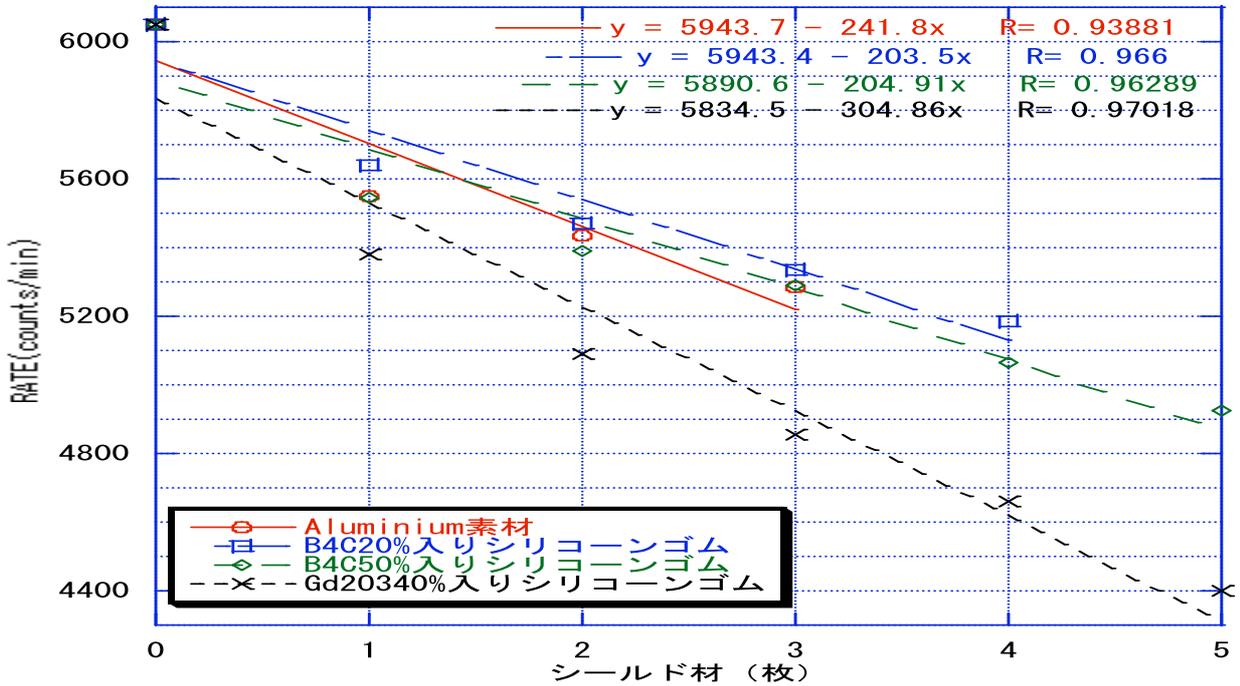
4.3の結果から、計測される中性子の数がどのように減っていくかを考えていく。まずは表4.3の各シールド材についてのRATEとの関係を、以下のグラフ4.3.1-①に示した。縦軸はRATE(counts/min)で横軸は各シールド材についての枚数を示している。ただし、アルミニウムのグラフについては他のグラフのx軸が枚数を表しているものと違い、横軸は左から²⁵²Cfのみ、アルミニウム、アルミニウム+B₄C溶射片面(厚さ1mm)、アルミニウム+B₄C溶射両面(厚さ1mm)である。また、グラフは左上から順にアルミニウム、B₄C20%入りシリコンゴム、B₄C50%入りシリコンゴム、Gd₂O₃40%入りシリコンゴムのデータである。



グラフ 4.3.1-① : 各シールド材と RATE との関係

ここで、グラフ 4.3.1-①の 4 つのグラフを以下のグラフ 4.3.1-②にまとめてみた。

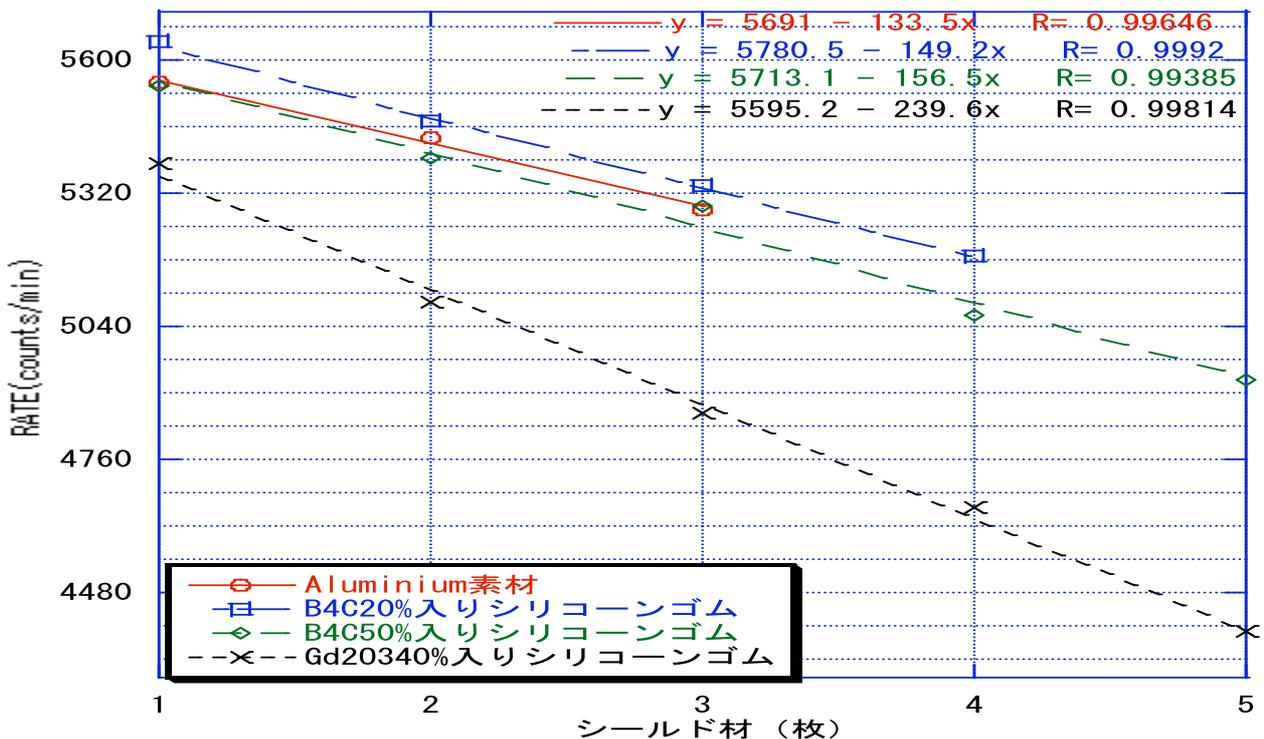
シールド材とRATEの関係



グラフ 4.3.1-② : 各シールド材と RATE の関係の比較

グラフ 4.3.1-②を見ると、グラフでの x 軸の値を 0 としたときの y 軸の値、つまり ^{252}Cf のみの値だけずれてしまっているのので、この値を除いた結果を、下のグラフグラフ 4.3.1-③に示した。

シールド材とRATEの関係



グラフ 4.3.1-③ : ^{252}Cf のみを除いた各シールド材と RATE の関係の比較

グラフ 4.3.1-③を見ると、全てのシールド材について、それぞれの値が直線に乗っているので、枚数を増やすとほぼ一定の割合で検出される中性子の数が減少していることが分かる。また、最も中性子を吸収していると思われるシールド材は Gd₂O₃40%入りシリコーンゴムであった。

ここで、各シールド材の枚数ごとに、²⁵²Cfのみの時の信号の数を基準とし、各シールド材ごとに、全体の何%の中性子を遮蔽したかを下の表 4.3.1-①に示す。

シールド材 アルミニウム	1 枚	B ₄ C 溶射片面 (厚さ 1mm)	B ₄ C 溶射両面 (厚さ 1mm)
input(counts)	166555	163113	158531
中性子遮蔽率(%)	8	11	13

シールド材 B ₄ C20%入りシリ コーンゴム	1 枚	2 枚	3 枚	4 枚
input(counts)	169149	164136	160058	155567
中性子遮蔽率(%)	7	10	12	14

シールド材 B ₄ C50%入りシリ コーンゴム	1 枚	2 枚	3 枚	4 枚	5 枚
input(counts)	166355	161771	158724	151904	147822
中性子遮蔽率(%)	8	11	13	16	19

シールド材 Gd ₂ O ₃ 40%入りシリ コーンゴム	1 枚	2 枚	3 枚	4 枚	5 枚
input(counts)	161413	152713	145693	139725	131945
中性子遮蔽率(%)	11	16	20	23	27

表 4.3.1-①：各シールド材ごとの中性子遮蔽率

上の表を見ても、中性子遮蔽数は Gd₂O₃40%入りシリコーンゴムが最も高いことが分かる。アルミニウムだけ他のシールド材よりも厚みがあるが、それ以外の 3 種類は 1 枚あたりの厚さは同じであり、他の素材が 1 枚増やすごとに 2~3%程度しか中性子遮蔽率が上がらないのに対し、Gd₂O₃40%入りシリコーンゴムは最大で 5%も上がる。

今までは RATE を中心に話を進めてきたが、今度は count を中心にしていきたいと思う。

3.2.6 のシールド材の箇所で説明してあったが、それぞれの面積は同じだが、アルミニウム素材とそれ以外で厚みが違うので、厚みが全て 1mm であった時、特にアルミニウム素材では、シールド材が溶射された B₄C のみだった時について考えていく。

表 4.3 に示された各 input の count について、左から右の count を引いたものを Δ input とすれば、以下の表 4.3.1-② のようになる。

シールド材 アルミニウム	なし-1 枚	1 枚-B ₄ C 溶射片面	B ₄ C 溶射片面-B ₄ C 溶射両面
Δ input(counts)	14996	18438	23020

シールド材 B ₄ C20%入りシリコーンゴム	1 枚-2 枚	2 枚-3 枚	3 枚-4 枚
Δ input(counts)	5013	4078	4491

シールド材 B ₄ C50%入りシリコーンゴム	1 枚-2 枚	2 枚-3 枚	3 枚-4 枚	4 枚-5 枚
Δ input(counts)	4584	3047	6820	4037

シールド材 Gd ₂ O ₃ 40%入りシリコーンゴム	1 枚	2 枚	3 枚	4 枚
Δ input(counts)	8700	7020	5968	7780

表 4.3.1-② : 表 4.3 の input の count について、左から右の値を引いた値

まずはアルミニウム素材について考えていく。

アルミニウム 1 枚の厚さは 0.7cm、測定時間は 30 分なので <なし-1 枚> の値をこの数字で割ると、アルミニウムの厚さ 1 (mm) あたりの単位時間 (min) での中性子遮蔽数が分かる。

$$\frac{14996(\text{counts})}{7(\text{mm}) \times 30(\text{min})} \cong 71.4(\text{counts}/\text{mm} \times \text{min})$$

次に <B₄C 溶射片面-B₄C 溶射両面> + <1 枚-B₄C 溶射片面> を 30 分で割ると、B₄C 溶射 1mm による中性子遮蔽数が分かる。

$$\frac{\{(23020 - 18438) + (18438 - 14996)\}(\text{counts} / \text{mm})}{2 \times 30(\text{min})} \cong 133.7(\text{counts}/\text{mm} \times \text{min})$$

B₄C20%入りシリコーンゴムからは表の Δ input を加算し、足した数で割ると B₄C20%入りシリコーンゴム 1 枚あたりの平均中性子遮蔽数が分かり、これを 1 枚あたりの厚さ(5mm)と測定時間 30 分で割ると B₄C20%入りシリコーンゴムの厚さ 1 (mm) あたりの単位時間 (min) での中性子遮蔽数が分かる。また Δ input について、それぞれのシールド材での最も大きな値と低い値を引いたものを max Δ とし、以下の表 4.3.1-③ にそれぞれの結果を示す。

シールド材	アルミニウム	B ₄ C 溶射	B ₄ C20%入りシリコーンゴム	B ₄ C50%入りシリコーンゴム	Gd ₂ O ₃ 40%入りシリコーンゴム
単位時間における厚さ1mmでの中性子遮蔽数 (counts/mm×min)	71.4	133.7	30.2	30.8	49.1
max Δ (counts)		1140	935	3773	2732

表 4.3.1-③：厚さ 1mm、単位時間での中性子遮蔽数と max Δ

表 4.3.1-③を見ると、全てのシールド材の面積が等しいので、同条件で最も中性子の遮蔽数が高いのは、アルミニウムを使用せず、B₄C 溶射のみで作ったシールド材であると考えられる。Gd₂O₃40%入りシリコーンゴムは、シールド材中の Gd₂O₃ が 40%での値なので、アルミニウムや B₄C 溶射のように 100%の値を考えてみる。結果を以下の表 4.3.1-④に示した。

アルミニウム	B ₄ C	Gd ₂ O ₃
71.4	133.7	122.8

4.3.1-④：アルミニウム、B₄C、Gd₂O₃の厚さ 1mm、単位時間での中性子遮蔽数

結果を見ると、B₄C が最も中性子遮蔽数が高いことが分かる。

最後にそれぞれのシールド材の密度を使って考えていく。

表 4.3.1-③より、各シールド材の単位時間における厚さ 1mm での中性子遮蔽数が示されているので以下の表 4.3.1-⑤にそれぞれのデータをまとめておく。

シールド材	アルミニウム	B ₄ C 溶射	B ₄ C20%入りシリコーンゴム	B ₄ C50%入りシリコーンゴム	Gd ₂ O ₃ 40%入りシリコーンゴム
重さ					
1 枚目(g)	216.96	21.3	61.17	82	84.95
2 枚目(g)		23.09	58.42	82.83	84.07
3 枚目(g)			62.8	73.74	84.87
4 枚目(g)			61.45	80.93	84.39
5 枚目(g)				77.87	85.77
平均の重さ(g)	216.96	22.17	60.96	79.47	84.81
面積(cm ²)	96.92	96.92	100	100	100
体積(cm ³)	77.54	9.69	50	50	50
密度(g/cm ³)	2.8	2.29	1.22	1.59	1.7

表 4.3.1-⑤：各シールド材のデータ

表 4.3.1-③、表 4.3.1-⑤より、まず単位時間における厚さ 1mm での中性子遮蔽数(counts/mm×min)の値を cm に直し各シールド材の面積(cm²)で割ってみると、単位時間、単位体積あたりの中性子遮蔽数が求められ、単位時間における厚さ 1cm での中性子遮蔽数をそれぞれの密度で割ることにより、単位時間、面積、重さあたりの中性子遮蔽数が求められる。結果は以下の表 4.3.1-⑥のようになる。

シールド材	アルミニウム	B ₄ C 溶射	B ₄ C20%入りシリコーンゴム	B ₄ C50%入りシリコーンゴム	Gd ₂ O ₃ 40%入りシリコーンゴム
単位時間における厚さ1cmでの中性子遮蔽数 (counts/cm×min)	714	1337	302	308	491
単位時間、体積あたりの中性子遮蔽数 (counts/cm ³ ×min)	7.37	13.79	3.02	3.08	4.91
単位時間、面積、重さあたりの中性子遮蔽数 [counts/(g/cm ²)×min]	225	584	248	194	289

表 4.3.1-⑥：単位時間、単位体積あたりの中性子遮蔽数と、単位時間、単位密度あたりの中性子遮蔽数

この結果より、最も中性子遮蔽数が多いシールド材は B₄C 溶射で、次が Gd₂O₃40%入りシリコーンゴムであることが分かった。

第5章 まとめと今後の課題

4.3.1の結果と考察より、最も中性子遮蔽率が高いのは B_4C が含まれている素材であることが予想される。しかし、今回の実験で使用した4種類のシールド材では Gd_2O_3 40%入りシリコーンゴムが最も高い中性子遮蔽数を示した。アルミニウムやシリコーンゴムを使わず、 B_4C 、 Gd_2O_3 のみで遮蔽テストを行った訳ではないので、最も中性子遮蔽率が高いのは B_4C であるということは、予想でしかない。

今後の課題としては、当初は行う予定であったが、今回使用出来なかった1~14MeVの中性子エネルギー測定に用いられる LiI シンチレータをプラスチックシンチレータの代わりに使用し、同様の実験を行う。そしてそのデータをもとに、GEANT4によるSimulation Programを使い計算と実際の測定との比較してみるということである。また今回の実験において、結果のグラフを見る限り、ほとんどの線源とシールド材についての測定は正確に出来たと言えるが、 ^{137}Cs や ^{252}Cf のみの値が、予想される結果の漸近線から少し離れてしまったので、もっとデータを取り、その原因を考えていきたい。そして、 B_4C と Gd_2O_3 のどちらが中性子遮蔽数が大きく、どちらが含まれているシールド材の方がより多くの中性子を遮蔽できるか確かめていきたい。また単位時間、面積、重さあたりの中性子遮蔽数において、 B_4C 20%入りシリコーンゴムと B_4C 50%入りシリコーンゴムの結果が予想の反し B_4C 20%入りシリコーンゴムの方が大きくなってしまったので、同様の実験を繰り返し、この結果が本当に正しかったのか確かめていきたい。

謝辞

今回の実験を行い、この論文を作成するにあたり、多くの方々にご協力いただき、この場を借りて厚く御礼申し上げます。

まず田島靖久助手には、PMTの使い方から実験に使用する装置の原理や測定の仕方、助言など、1から丁寧に教えていただき大変感謝しております。あわせて、岩田高広助教授と吉田浩司助教授、そして加藤静吾教授からは、ゼミを始め、日頃研究室においての丁寧なご指導、真にありがとうございました。

そしてM1、M2の先輩方、同研究室4年の植松秀章君、大泉智君、上林智亮君、佐藤邦彦君、塩津雄人君には色々なところで支えていただき、助言や手助けをして頂いたこと、本当に感謝しています。

最後に、日頃私を支えてくれた皆様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- ・ 放射線計測の理論と演習上巻 現代工学社 ニコラスツルファニデイス著 阪井英次訳
- ・ 放射線計測の理論と演習下巻 現代工学社 ニコラスツルファニデイス著 阪井英次訳
- ・ 放射線計測ハンドブック 日刊工業新聞社 木村逸郎、阪井英次訳
- ・ ロングマン物理学事典 朝倉書店 清水忠雄、清水文子監訳