

# ミグダル効果観測のための $\gamma$ 線 BG の解析

東北大学理学部物理学科

内山 偉貴

令和4年

## 概要

宇宙には、われわれが目にしてきた物質よりもはるかに多くの暗黒物質であふれており、われわれが観測できた物質は宇宙の組成のわずか5%といわれている。もし暗黒物質を観測できれば、それは新物理の開拓につながる。したがって、暗黒物質の観測はわれわれの重要な課題となっている。

暗黒物質の探索において、ミグダル効果の測定は重要な意味を持つ。ミグダル効果はわずかな確率でしか起こらないが、ミグダル効果が暗黒物質探索に運用できれば、従来のエネルギー閾値よりも小さいエネルギー領域の信号を観測できる。しかし、ミグダル効果を未だ実験で観測できていないのが現状である。まずは、ミグダル効果を観測することが求められている。

ミグダル効果を観測するにあたり、 $\gamma$ 線BGの排除が第一に重要となる。中性子が実験室の物と $(n, \gamma)$ 反応を起こすことで $\gamma$ 線が生じるが、その $\gamma$ 線は支配的なBGとなる。それ故、BGとなる $\gamma$ 線をなるべく生じないようにするため、ビーム管から検出器の間をシールドで覆うパーツを作製する取り組みを行った。また、その上で $\gamma$ 線BGがどれほど生じるのかについて解析を行った。

また、BGとの識別を可能にするためXe反跳原子のクエンチング値を測定する必要がある。現時点でLXeにおけるXe反跳原子のクエンチング値は分かっているが、GXeにおけるクエンチング値は知られていない。それ故、GXe検出器を用い、中性子ビームをGXeに照射することでXe反跳原子核のクエンチング値を測定する予定である。

# 目次

第1章	はじめに.....	1
第2章	ミグダル効果と $\gamma$ 線 BG .....	2
2.1	ミグダル効果.....	2
2.2	$\gamma$ 線 BG の生じる原理 .....	3
2.3	ミグダル効果と $\gamma$ 線 BG の信号の識別 .....	3
第3章	Xe ガス検出器.....	6
3.1	Xe ガス検出器の検出原理 .....	6
3.1.1	中性子ビームの生成原理.....	6
3.1.2	反跳原子核やミグダル電子、特性 X 線、 $\gamma$ 線が起こす反応.....	7
3.1.3	生じた電離電子がドリフトする原理.....	12
3.1.4	ELCC 内で起こる反応.....	13
3.1.5	PMT の読む信号 .....	14
第4章	PTFE の作製と Xe 検出器.....	15
4.1	PTFE のモデル作り .....	15
4.2	PTFE の 3D モデルの確認と作製図面.....	21
4.3	Xe 検出器への PTFE の取り付け.....	23
4.4	放電チェック .....	25
4.5	Xe 検出器のリークチェック .....	27
第5章	中性子シールドの作製.....	28
5.1	中性子シールド作製の目的.....	28
5.2	コリメータの作製.....	29
5.2.1	コーン部分の作製設計.....	29
5.2.2	チューブ継手の固定位置の決定 .....	31
5.2.3	コリメータの作製結果.....	37
5.3	後方シールド .....	39
5.4	中性子ビーム実験での中性子シールドの配置.....	40
第6章	BGO シンチレータと DRS4.....	42
6.1	無機シンチレータの原理.....	42
6.2	DRS4.....	43
6.2.1	DRS4 チップ.....	43
6.2.2	DRS4 評価ボード .....	44
6.3	BGO シンチレータの信号を DRS4 で読むための調整 .....	44
6.4	キャリブレーション .....	48
6.5	DRS4 の Trigger out の信号の確認.....	54
第7章	中性子ビーム実験の $\gamma$ 線解析.....	57

7.1	中性子ビーム実験の実験方法 .....	57
7.2	解析結果 .....	59
7.2.1	イベントレートの整合性の確認 .....	59
7.2.2	キャリブレーション .....	62
7.2.3	中性子シールドの有無によるイベントレートのエネルギー分布の比較 .....	64
7.2.4	Xe 検出器の有無によるイベントレートのエネルギー分布の比較 .....	68
第8章	今後の課題 .....	71
8.1	DRS4 の Trigger out の信号の究明 .....	71
8.2	500keV 付近のエネルギーの $\gamma$ 線の究明 .....	72
第9章	結論 .....	74
	謝辞 .....	75
	参考文献 .....	76

## 目次

2.1	ミグダル信号の2つのクラスター .....	3
2.2	中性子による Xe 原子の反跳 .....	5
3.1	Xe ガス検出器の概略図 .....	6
3.2	特性 X 線と Xe 原子の光電吸収 .....	7
3.3	特性 X 線と Xe 原子のコンプトン散乱 .....	8
3.4	BG $\gamma$ 線と Xe 原子核による電子対生成 .....	9
3.5	入射 Xe と原子核と反跳 Xe 原子の軌跡 .....	11
3.6	入射 Xe 原子核のみの軌跡 .....	11
3.7	EL 過程と MPPC による EL 光の検知 .....	13
4.1	PTFE とつながるフィールドケージの図面 .....	15
4.2	PTFE の外形のモデル .....	16
4.3	3D プリントした PTFE の外形 .....	16
4.4	ELCC 一体型の 3D モデル .....	17
4.5	ELCC をはめ込む凹み部分のモデル .....	17
4.6	図 4.5 の 3D プリント .....	17
4.7	ELCC のセル穴などの穴の位置 .....	18
4.8	PTFE の上面に貼る Cu 電極の穴 .....	18
4.9	GND 電極のジオメトリ .....	19
4.10	GND と PTFE の接続の様子 .....	20
4.11	スペーサーと PTFE の接続の様子 .....	20
4.12	PTFE の上面 .....	21
4.13	PTFE の裏面 .....	21
4.14	フィールドケージとの接続確認 .....	21
4.15	PTFE (3D モデル) との接続確認 .....	21
4.16	Cu 電極と PTFE .....	22
4.17	GND 電極と PTFE .....	22
4.18	作成した PTFE 図面 .....	22
4.19	PTFE への GND 電極の取り付け .....	23
4.20	ELCC についているごみの取り除き .....	23
4.21	PTFE についているごみの取り除き .....	24
4.22	フィールドケージをカプトンシートで覆った状態 .....	24
4.23	ガス Xe 検出器内へ装置を入れる様子 .....	25
4.24	放電チェックの回路図 .....	25
5.1	$\gamma$ 線 BG とミグダル効果による信号 .....	28

5.2	中性子シールドの概略図 .....	29
5.3	ビーム管の出口の大きさ .....	30
5.4	コーン部分の設計の概略図.....	30
5.5	チューブ継手の最初の固定位置 .....	30
5.6	風が Li に当てられる概略図.....	33
5.7	風の流量比の比較.....	34
5.8	チューブ継手の位置の変更.....	35
5.9	内径 1mm チューブを通す概略図.....	36
5.10	チューブを通すための穴の形状.....	36
5.11	凹み部分の面をチューブが通過する概略図.....	37
5.12	Xe 検出器用と Ar 検出器用の造形したコリメータ .....	38
5.13	LiF 50%入りポリエチレンを入れたコリメータ .....	39
5.14	後方シールドの概略図 .....	39
5.15	LiF 50%入りポリエチレンが入った後方シールド .....	40
5.16	中性子シールドの配置の様子.....	41
6.1	無機シンチレータの発光原理.....	42
6.2	DRS4 チップの概略図.....	43
6.3	DRS4 評価ボード .....	44
6.4	Tl-208 のシンチレータの信号.....	45
6.5	ツェナーダイオードを用いた保護回路 .....	46
6.6	ダイオードの電流-電圧特性 .....	46
6.7	ツェナーダイオード回路の入力電圧と出力電圧の関係.....	47
6.8	ツェナーダイオードを並列につないだ回路.....	47
6.9	BGO シンチレータの信号を DRS4 で読む概略図 .....	48
6.10	Cs-137 の $\gamma$ 線をシンチレータに当てた際の信号 .....	49
6.11	Cs-137 の $\gamma$ 線のヒストグラム .....	50
6.12	Cs-137 の $\gamma$ 線のヒストグラムのフィッティング結果.....	51
6.13	K-40、Tl-208 の $\gamma$ 線の信号波形 .....	51
6.14	K-40 の $\gamma$ 線のヒストグラムとフィット結果.....	52
6.15	Tl-208 の $\gamma$ 線のヒストグラムとフィット結果.....	52
6.16	ピーク値のフィッティング結果.....	54
6.17	ピーク幅のフィッティング結果.....	54
6.18	10 Hz のパルス波を入力したときの Trigger out の信号 .....	54
6.19	25 Hz のパルス波を入力したときの Trigger out の信号 .....	55
6.20	Realtime と Livetime .....	56

7.1	検出器の配置の概略図 .....	57
7.2	run011 のイベントレートの分布 .....	60
7.3	ハードウェアと scaler[4] のイベントレートの比較.....	60
7.4	scaler[4] のイベントレートをハードウェアから求めたイベントレートで割ったグラフ ...	61
7.5	Trigger out が勝手に解除された場合 .....	61
7.6	イベントの間隔が長くなった場合 .....	62
7.7	run003(Cs-137 線源あり)の Integral の分布 .....	62
7.8	run003 データのエネルギー分布 .....	63
7.9	修正した run003 データのエネルギー分布.....	64
7.10	run011(シールドなし)のイベント数のエネルギー分布.....	64
7.11	run011(シールドなし)のイベントレートのエネルギー分布.....	66
7.12	run022(シールドあり)のイベント数のエネルギー分布.....	66
7.13	run022(シールドあり)のイベントレートのエネルギー分布.....	67
7.14	シールドの有無でのイベントレートの比較.....	67
7.15	run020(Xe 検出器なし)のイベント数のエネルギー分布 .....	68
7.16	run020(Xe 検出器なし)のイベントレートのエネルギー分布 .....	68
7.17	run023(Xe 検出器あり)のイベント数のエネルギー分布 .....	69
7.18	run023(Xe 検出器あり)のイベントレートのエネルギー分布 .....	69
7.19	Xe 検出器の有無でのイベントレートの比較 .....	70
8.1	入力信号の周波数に対する割合 R の変化 .....	71
8.2	各測定データにおけるピークの中心値.....	72

## 表目次

2.1 Xe の各電子軌道の電子がミグダル効果によって励起・電離する確率 .....	2
3.1 反跳 Xe 原子のエネルギー損失の内訳のシミュレーション結果.....	11
4.1 放電チェックの結果 .....	26
6.1 DRS4 チップの特性 .....	41
7.1 全測定条件 .....	58
8.1 各 run におけるピークの中心値[keV] .....	73

# 第1章 はじめに

ミグダル効果とは、弱い相互作用を起こす粒子などが原子核に衝突して原子核が動き、原子核に束縛されていた電子が原子核の動きに追随できずに励起や電離を起こす現象のことである。この現象は、低エネルギーな粒子が原子核に衝突した場合でも起こりうる反応なので、暗黒物質探索に応用できればエネルギー閾値が下がることに相当する。したがって、低エネルギーな暗黒物質探索への有用に対して期待がなされている。しかし、ミグダル効果は未だ観測がなされていない。ミグダル効果は、原子核反跳に加え励起もしくは電離した原子が脱励起する際に放出するエネルギーを検出することで観測するが、外殻電子が励起や電離した後に脱励起した際に得られる信号は小さくノイズに紛れやすい。一方、内殻電子が励起や電離した際には観測できるほどの大きなエネルギーを放出するが、内殻電子が励起したり電離したりする確率は小さい。それ故、ミグダル効果の観測は難しいのである。

ミグダル効果の測定が困難な点はもう1つある。 $\gamma$ 線BGとミグダル効果の信号の識別が難しい点である。ミグダル効果測定ではXeガスに中性子ビームを当てる実験を行うが、中性子と実験室内の物質が $(n, \gamma)$ 反応を起こす。この $\gamma$ 線BGとの識別をする上で、ミグダル効果の信号のエネルギー分布が予想できている必要がある。そのためには、反跳原子核のクエンチング値が分かっているなければならない。それ故、反跳原子核のクエンチング値を求める実験を行う予定である。

ミグダル効果を観測するために、 $\gamma$ 線BGをできるだけ削減することは重要である。実験室の壁や床から生じる $\gamma$ 線をなるべく減らすため、検出器方向以外に放射する中性子をシールドする必要がある。本実験では、そのシールド作製にも取り組んだ。

また、中性子ビームを照射するにあたって、どれほどのエネルギーの $\gamma$ 線がどの程度生じるのかを知っておくことも、ミグダル信号を解析する際に重要になる。それ故、本実験では中性子ビームを照射させることで生じる $\gamma$ 線のエネルギーやイベントレートを調べた。

本論文では、第2章でミグダル効果や $\gamma$ 線BGの生じる原理を述べる。第3章で検出器の紹介や信号を測定する原理について述べ、第4章で検出器に用いたPTFEの作製について、第5章でシールドの作成について述べる。第6章でBGOシンチレータとDRS4について述べ、第7章で $\gamma$ 線BGについて実験内容とその解析結果を述べる。第8章で今後の課題を述べ、第9章で結論とする。

## 第2章 ミグダル効果と $\gamma$ 線 BG

### 2.1 ミグダル効果

上で述べたように、ミグダル効果とは弱い相互作用を起こす粒子などが原子核に衝突して原子核が動き、原子核の束縛電子が原子核の動きに追随できずに励起や電離を起こす現象である。本実験では Xe ガス検出器を用いたが、Xe でミグダル効果が起こる確率は以下のようなになる。[1]

表 2.1 : Xe の各電子軌道の電子がミグダル効果によって励起・電離する確率[1]

Xe ( $q_e = m_e \times 10^{-3}$ )						
$(n, \ell)$	$\mathcal{P}_{\rightarrow 4f}$	$\mathcal{P}_{\rightarrow 5d}$	$\mathcal{P}_{\rightarrow 6s}$	$\mathcal{P}_{\rightarrow 6p}$	$E_{n\ell}$ [eV]	$\frac{1}{2\pi} \int dE_e \frac{dp^2}{dE_e}$
1s	–	–	–	$7.3 \times 10^{-10}$	$3.5 \times 10^4$	$4.6 \times 10^{-6}$
2s	–	–	–	$1.8 \times 10^{-8}$	$5.4 \times 10^3$	$2.9 \times 10^{-5}$
2p	–	$3.0 \times 10^{-8}$	$6.5 \times 10^{-9}$	–	$4.9 \times 10^3$	$1.3 \times 10^{-4}$
3s	–	–	–	$2.7 \times 10^{-7}$	$1.1 \times 10^3$	$8.7 \times 10^{-5}$
3p	–	$3.4 \times 10^{-7}$	$4.0 \times 10^{-7}$	–	$9.3 \times 10^2$	$5.2 \times 10^{-4}$
3d	$2.3 \times 10^{-9}$	–	–	$4.3 \times 10^{-7}$	$6.6 \times 10^2$	$3.5 \times 10^{-3}$
4s	–	–	–	$3.1 \times 10^{-6}$	$2.0 \times 10^2$	$3.4 \times 10^{-4}$
4p	–	$4.1 \times 10^{-8}$	$3.0 \times 10^{-5}$	–	$1.4 \times 10^2$	$1.4 \times 10^{-3}$
4d	$7.0 \times 10^{-7}$	–	–	$1.5 \times 10^{-4}$	$6.1 \times 10$	$3.4 \times 10^{-2}$
5s	–	–	–	$1.2 \times 10^{-4}$	$2.1 \times 10$	$4.1 \times 10^{-4}$
5p	–	$3.6 \times 10^{-2}$	$2.1 \times 10^{-2}$	–	9.8	$1.0 \times 10^{-1}$

$(n, \ell)$	4f	5d	6s	6p
$E_{n\ell}$ [eV]	0.85	1.6	3.3	2.2

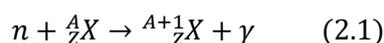
ミグダル効果によって様々な軌道の電子が電離を起こすが、内側の電子ほどその確率は小さくなり、外側の電子ほど確率は大きくなる。これは、各電子軌道の束縛エネルギーの違いが影響している。内側の電子ほど原子核による束縛エネルギーは大きく、外側の電子ほど束縛エネルギーは小さい。中性子などの粒子が原子核と衝突した際、原子核視点では束縛電子が運動エネルギーを持つ。この運動エネルギーが束縛エネルギーよりも大きければ、その電子は電離できる。クーロン則により、束縛エネルギーは原子核から近ければ近いほど大きくなる。したがって、内側の電子ほど運動エネルギーが束縛エネルギーよりも小さくなりやすく、電離しにくくなる。実際、表 2.1

を見ると、1s 軌道の電子の電離する確率は  $4.6 \times 10^{-6}$  だが、5p 軌道の電子の電離する確率は  $1.0 \times 10^{-1}$  と、最内殻電子と最外殻電子でおよそ  $10^5$  のオーダーで電離する確率が異なっている。

また表 2.1 を見ると、励起する確率は電離する確率に対して  $10^{-2} \sim 10^{-4}$  のオーダーで小さくなっている。次節で詳細を述べるが、これによりミグダル効果において電離の寄与が支配的になる。それ故、本実験では励起の寄与は無視して解析を行う予定である。

## 2.2 $\gamma$ 線 BG の生じる原理

ミグダル効果を観測する際には  $\gamma$  線による BG を考慮しなければならない。まず  $\gamma$  線がどのようにして生じるかを述べる。中性子ビームが実験室の物に当たると、その物質の構成要素である原子  ${}^A_ZX$  に対し、以下の中性子捕獲の反応が起こる。



(2.1) 式により生じた  $\gamma$  線が XeTPC の中に入ると Xe 原子と反応し、光電効果やコンプトン散乱によって Xe 原子を電離させる。このように中性子ビームと実験室の物との (n,  $\gamma$ ) 反応によって生じた  $\gamma$  線による信号が BG となる。

## 2.3 ミグダル効果と $\gamma$ 線 BG の信号の識別

ミグダル効果の信号と  $\gamma$  線 BG の信号の違いとして、ミグダル効果では原子核反跳を起こすが、 $\gamma$  線 BG は原子核反跳を伴わないという違いがある。それ故、ミグダル効果を検知するため以下の図のようにクラスター1 とクラスター2 の信号を測定する。

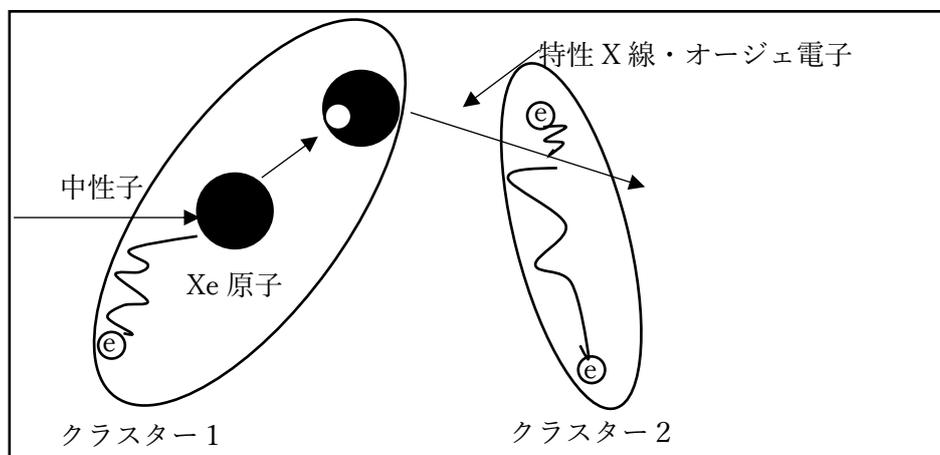


図 2.1 ミグダル信号の 2 つのクラスター

ただし、後に詳細を述べるが、ミグダル効果の測定において Xe 原子核反跳に伴う反跳 Xe 原子の励起を考慮せず、反跳 Xe 原子の電離のみを考慮する。

まずクラスター1 についてだが、ミグダル効果が起こった場合には中性子が Xe 原子核と衝突した後、Xe 原子核の反跳とそれに伴ったミグダル電子の電離という 2 つの現象が起こる。次にクラスター2 では、反跳した Xe イオンが電子と再結合するまでに生じる特性 X 線やオージェ電子の電気的な信号が見られる。

$\gamma$  線 BG についてだが、 $\gamma$  線が Xe 原子と相互作用した場合、Xe 原子を電離させ、その電離したイオンが電子と再結合する。したがって、クラスター1 では Xe 原子の電離の信号が見られ、クラスター2 では電離したイオンと電子と再結合するまでの過程で生じた特性 X 線やオージェ電子の信号が見られる。

これらを踏まえると、クラスター1 においてミグダル効果の信号と  $\gamma$  線 BG の信号とで原子核反跳の信号が生じるかどうかという違いが生じることが分かる。このとき電離電子の信号と反跳原子核の信号の識別が問題となるが、電離電子の信号のエネルギーの大きさは、電子がもともとどの電子軌道にあったのかに依存する。したがって、ミグダル信号の大きさは離散的である。ミグダル効果を観測するに当たって、1s 軌道よりも外側の電子がミグダル電子として電離し、後に再結合した際に得られる信号の大きさは小さく、その信号はノイズに紛れてしまうため、1s 軌道の電子がミグダル電子として電離した場合のみをミグダル効果の事象として考慮する。それ故、クラスター1 において、K 核の空軌道に L 核の電子が遷移した際に生じる  $K\alpha$  線のエネルギー 29.6keV の大きさの信号が観測された場合にミグダル効果の事象と判定される。一方、原子核反跳の信号については、非弾性散乱や散乱方向を考えると信号の大きさは連続的に取り得ると分かる。反跳原子核の最大エネルギーについては、弾性散乱を考えて以下のようにして得られる。ただし、中性子と Xe 原子核の質量をそれぞれ  $m, M$  とし、それぞれの衝突前の四元ベクトルを  $P_1 = (E_1, \vec{p}_1), P_2 = (M, \vec{0})$  とし、さらに衝突後の四元ベクトルを  $P_3 = (E_3, \vec{p}_3), P_4 = (E_4, \vec{p}_4)$  とした。また、衝突の様子は下図のように考えた。[2]

エネルギーと運動量の保存則より、

$$P_1 + P_2 = P_3 + P_4 \quad \therefore P_1 - P_4 = P_3 - P_2 \quad (2.2)$$

(2.2)式の両辺を 2 乗すれば、

$$m^2 + M^2 - 2(E_1 E_4 - \vec{p}_1 \cdot \vec{p}_4) = M^2 + m^2 - 2ME_3 \quad (2.3)$$

(2.3)式を整理し、Xe 原子核の反跳エネルギーを  $T_4$  とすると、

$$T_4(E_1 + M) = \vec{p}_1 \cdot \vec{p}_4 \quad (2.4)$$

(2.4)式を 2 乗し、 $c=1$  の単位系において  $|\vec{p}|^2 = 2mT + T^2$  が成り立つことを用いると、 $\beta_1$  を中性子の入射速度とすれば、

$$T_4^2(E_1 + M)^2 = |\vec{p}_1|^2 |\vec{p}_4|^2 \cos^2 \phi = \beta_1^2 E_1^2 (2M + T_4) T_4 \cos^2 \phi \quad (2.5)$$

(2.5)式を整理し、Xe 原子核の反跳エネルギーは(2.6)式のように表される。

$$T_4 = \frac{2\beta_1^2 E_1^2 M \cos^2 \phi}{(E_1 + M)^2 - \beta_1^2 E_1^2 \cos^2 \phi} \quad (2.6)$$

ゆえに、Xe 原子核の反跳エネルギーは(2.7)式の通りである。

$$T_{4\_max} = \frac{2\beta_1^2 E_1^2 M}{(E_1 + M)^2 - \beta_1^2 E_1^2} \quad (2.7)$$

非相対論近似( $E_1 \simeq m, \beta_1 \simeq 0$ )を用いると、

$$T_4 \simeq \frac{2Mm_1^2 v_1^2}{(m + M)^2} \cos^2 \phi, \quad T_{4\_max} \simeq \frac{2Mm_1^2 v_1^2}{(m + M)^2} \quad (2.8)$$

このようにして Xe 原子核の反跳エネルギーやその最大値が得られる。本実験では 565keV の中性子エネルギーを用いる予定であるため、Xe 原子核の最大の反跳エネルギーは 17.4keV である。ミグダル効果の信号を解析する上で、このように K 殻の電子がミグダル電子として電離した場合を考えて解析する。

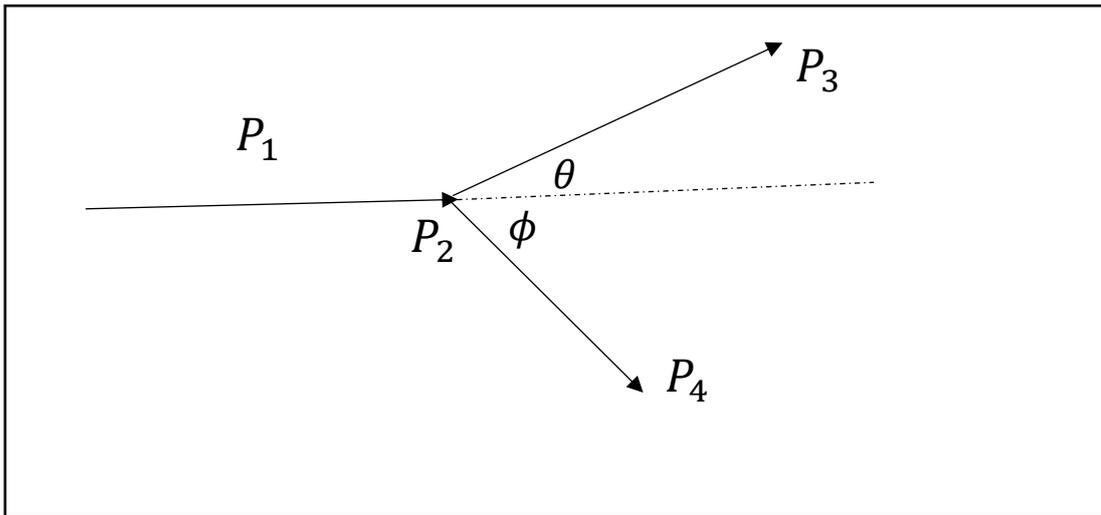


図 2.2 中性子による Xe 原子の反跳

## 第3章 Xe ガス検出器

### 3.1 Xe ガス検出器の検出原理

ここでは、本実験で用いた検出器について紹介する。本実験では、以下の図 3.1 のような検出器を用いる。

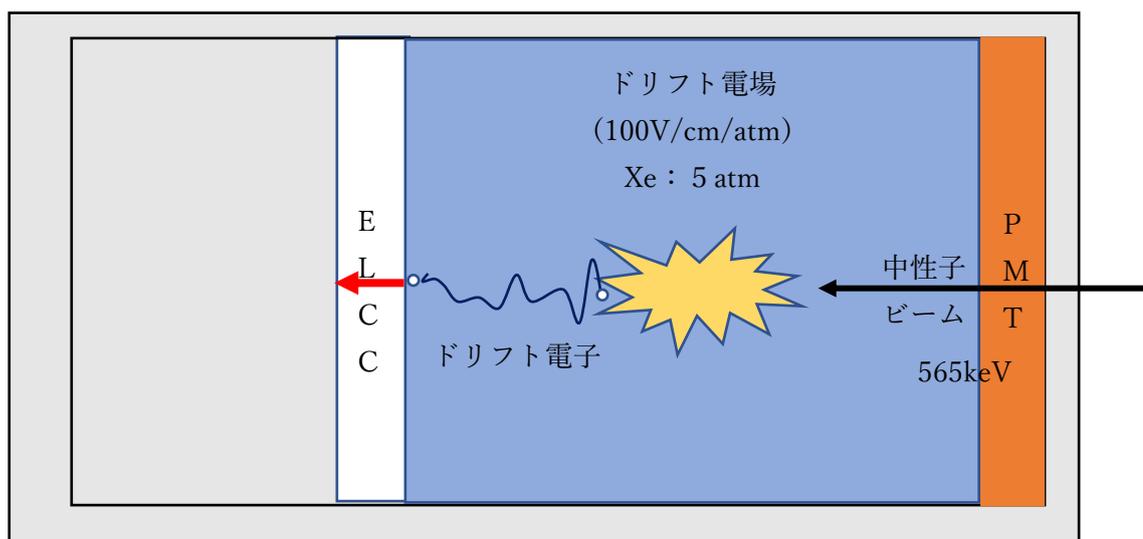


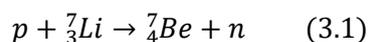
図 3.1 Xe ガス検出器の概略図

この Xe ガス検出器は、ELCC と PMT が取り付けられており、その間の空間には  $100V/cm/atm$  のドリフト電場がかかけられる。また、ガス検出器には 5 気圧の Xe ガスを入れられる。検出原理についてだが、以下の事象を順に述べて説明する。

- ・ 中性子ビームの生成原理
- ・ 中性子と Xe 原子が反応することで生じる反跳原子やミグダル電子、特性 X 線そして BG となる  $\gamma$  線が起こす反応
- ・ 生じた電離電子がドリフトする原理
- ・ ELCC 内で起こる反応
- ・ PMT の読む信号

#### 3.1.1 中性子ビームの生成原理

中性子ビームは、Li が陽子を捕獲することで生成される。すなわち、以下の (p,n) 反応が起こる。



このようにして中性子ビームが生じるが、この反応が起こる確率は小さく、大半の場合は陽子が Li に当たると止まってしまう。このとき、失われたエネルギーは熱エネルギーに変換され、この熱エネルギーが Li を熱くしてしまう。したがって、Li を冷却しながら陽子ビームを当てる必要がある。第 5 章で詳細を述べるが、Li ターゲットにチューブを通して風を送れるように中性子シールドの作製を行った。

### 3.1.2 反跳原子核やミグダル電子、特性 X 線、 $\gamma$ 線が起こす反応

中性子が Xe 原子と反応すると原子が反跳し、低確率でミグダル電子が電離する。こうした反跳原子やミグダル電子は大きなエネルギーを持っており、運動軌道付近の Xe 原子を電離させる。また、ミグダル効果が起こった場合、その Xe イオンが電子と再結合した際に特性 X 線が生じるが、その特性 X 線もまた Xe 原子を電離させる。BG となる  $\gamma$  線も同様に Xe 原子を電離させる。

ここで、それぞれがどれほどのエネルギーでどのくらい電離させるのかが問題となる。まず特性 X 線や  $\gamma$  線の場合を考える。特性 X 線についてだが、Xe 原子の 1s 軌道の束縛エネルギーは 35keV、2s 軌道では 5.4keV なので、2s 軌道の電子が 1s 軌道に落ちることで生じる特性 X 線のエネルギーは 29.6keV である。この特性 X 線は Xe 原子と光電吸収やコンプトン散乱といった反応を主に起こす。まず光電吸収の場合、以下の図のように Xe 原子に作用して光子が吸収され、Xe 原子を電離させる。[3]

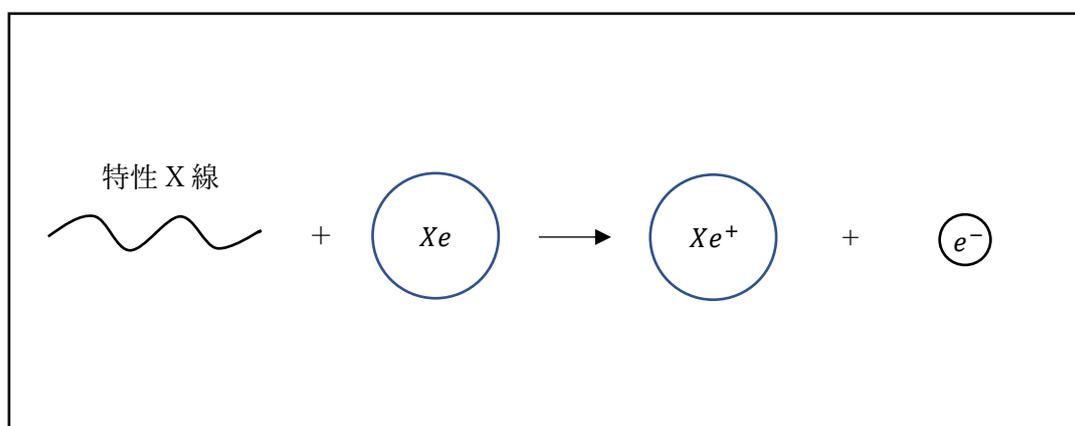


図 3.2 特性 X 線と Xe 原子の光電吸収

このとき、生じた電子の運動エネルギーは以下の式のように表される。ただし、電子の運動エネルギーを  $T$ 、特性 X 線のエネルギーを  $E_X$ 、電子の束縛エネルギーを  $BE$  とする。

$$T = E_X - BE \quad (3.2)$$

次に特性 X 線が Xe 原子とコンプトン散乱を起こす場合を考える。コンプトン散乱が起こる確率が高いのは、光子のエネルギーが数 keV のときであり、1s,2s,2p 軌道の電子を除いて考えれば、表 2.1 のように電子の束縛エネルギーは光子のエネルギーに対して小さく、電子が自由に運動できるとみなせる。電子が衝突前に静止している状況を考えて、以下のようにエネルギーと運動量保存則の式が成り立つ。ただし、散乱後の特性 X 線のエネルギーを  $E'_X$  とし、電子、特性 X 線の散乱角を図のように  $\phi, \theta$  とした。また、電子の質量を  $m$  とし、散乱後の電子の速度を  $v$  とした。[4]

$$T = E_X - E'_X \quad (3.3)$$

$$\frac{E_X}{c} = mv \cos \phi + \frac{E'_X}{c} \cos \theta \quad (3.4)$$

$$0 = mv \sin \phi - \frac{E'_X}{c} \sin \theta \quad (3.5)$$

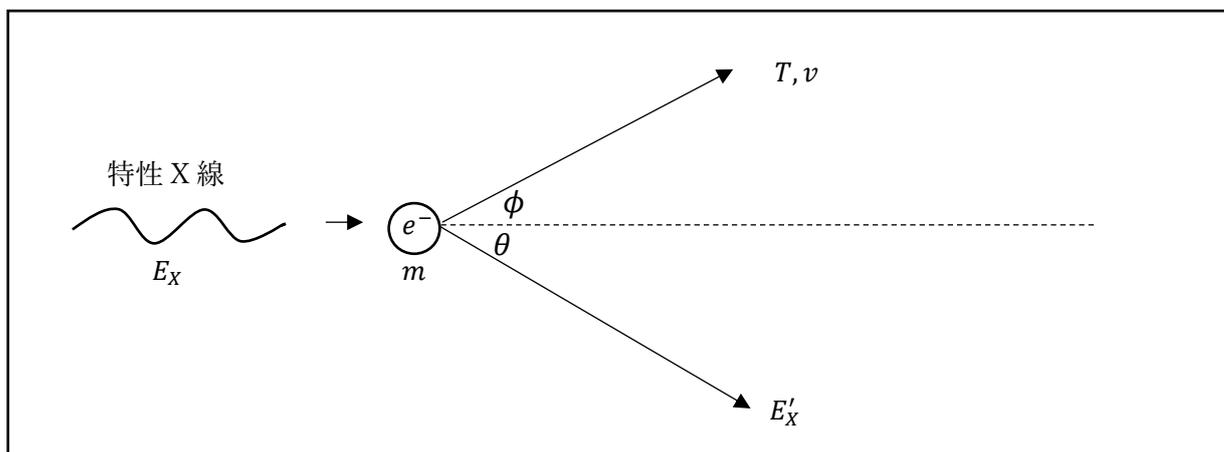


図 3.3 特性 X 線と Xe 原子のコンプトン散乱

上の 3 式を整理すると、散乱後の特性 X 線と電子のエネルギーは以下のように表される。

$$E'_X = \frac{E_X}{1 + (1 - \cos \theta) E_X / mc^2} \quad (3.6)$$

$$T = \frac{(1 - \cos \theta) E_X}{1 + (1 - \cos \theta) E_X / mc^2} E_X \quad (3.7)$$

(3.6),(3.7)式のように、1 回のコンプトン散乱では特性 X 線は光電吸収と異なり全てのエネルギーを落とすわけではなく、衝突後も光子は吸収されずエネルギーを有する。しかし、エネルギーが小さくなるほどコンプトン散乱が起こる確率は小さくなり、光電吸収が起こる確率は大きくなる。それ故、最初にコンプトン散乱をする程のエネルギーを持っていた特性 X 線も、コンプトン散乱を重ねてエネルギーを落とし、

最終的には光電吸収される。ただし、1回コンプトン散乱した後に検出器外に出た場合など、特性 X 線が全エネルギーを落とさない場合もある。

次に BG の  $\gamma$  線について考える。 $\gamma$  線も特性 X 線と同様に光電吸収やコンプトン散乱を起こすが、BG の  $\gamma$  線の中には数 MeV 領域のエネルギーを持つ  $\gamma$  線も想定される。こうした高エネルギー領域では電子対生成も起こす。[5]

電子対生成では下図のように、 $\gamma$  線が Xe 原子核と反応し、電子と陽電子を生成する。電子・陽電子の静止質量を生成するのに必要なエネルギーは 1.022MeV であることと、電子と陽電子にそれぞれ等しくエネルギーが分配されることから、反応によって生成した電子と陽電子の運動エネルギー  $T_{e^-}, T_{e^+}$  は、 $E_\gamma$  を  $\gamma$  線のエネルギーとして、

$$T_{e^-} = T_{e^+} = \frac{1}{2}(E_\gamma - 1.022) \text{ [MeV]} \quad (3.8)$$

と表される。このようにして電子と陽電子が生じるが、陽電子は Xe 原子の束縛電子と反応しながらエネルギーを落としていく。そして、陽電子のエネルギーが小さくなると、Xe 原子の束縛電子と対消滅をし、0.511MeV の光子を 2 つ生成する。この光子はコンプトン散乱を起こし、エネルギーが小さくなれば光電吸収される。

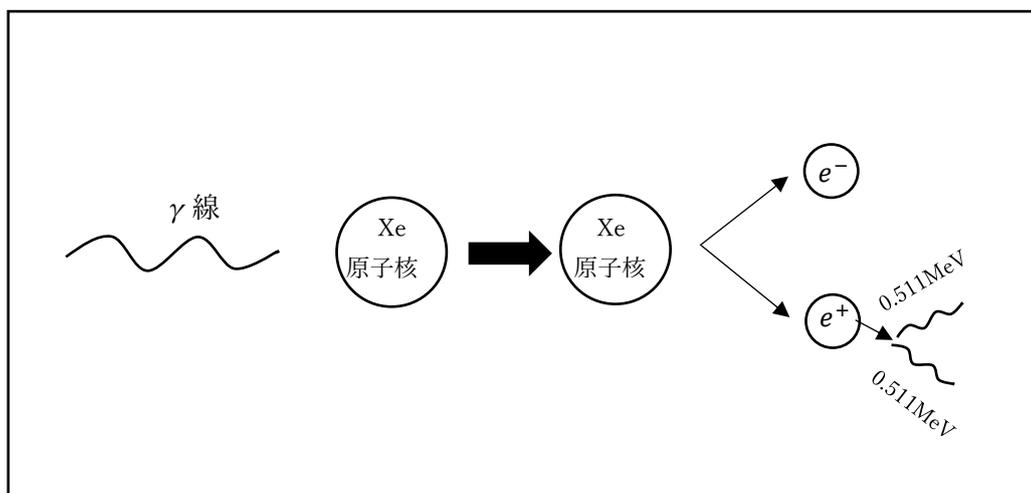


図 3.4 BG  $\gamma$  線と Xe 原子核による電子対生成

このようにして、特性 X 線や  $\gamma$  線のエネルギーは最終的に電子へとエネルギーが移る。エネルギーを受け取った電子は、他の Xe 原子を励起や電離させたり、Xe 原子の束縛電子に運動エネルギーを与えたりする。高エネルギーな電子が Xe 原子を電離させた場合、その電離電子は他の Xe 原子をさらに電離させる。

特性 X 線や  $\gamma$  線によって生じた電離電子や、中性子が Xe 原子と衝突して生じたミグダル電子は、上記のように Xe 原子と反応しながらエネルギーを落としていき、その間に数多くの電離電子を生成する。生成した電離電子の数は、1 つの電子-イオン対

を生成するのに必要なエネルギーである  $W$  値から求めることができる。 $W$  値は電離させるのに必要なエネルギー（電離ポテンシャル）と同一ではなく、これに加えて電離電子の運動エネルギーや励起、束縛電子の運動エネルギーへの寄与が含まれている。それ故、 $W$  値は以下のように定義される。[6]

$$W = \langle E_i \rangle + (N_{ex}/N_i) \langle E_{ex} \rangle + \langle E_{se} \rangle \quad (3.9)$$

ただし、 $\langle E_i \rangle$  は 1 回の電離を伴う衝突をした際に失う平均のエネルギーであり、 $\langle E_{ex} \rangle$  は平均の励起エネルギー、 $\langle E_{se} \rangle$  は束縛電子の運動エネルギーの平均である。また、 $N_i, N_{ex}$  はそれぞれ最終的に生じた電子-イオン対の個数と励起原子の個数である。GXe の場合、具体的な  $W$  値が知られており、 $W = 22.1[eV]$  である。[7] ゆえに、あるエネルギー  $E$  のミグダル電子、特性 X 線、 $\gamma$  線が Xe ガス検出器内に入射したときに生成される電離電子の個数は、 $E/W$  と見積もることができる。

次に、反跳 Xe 原子核が、あるエネルギーでどれほど電離させるかについて述べる。反跳 Xe 原子核については、クエンチングの効果を考慮しなければならない。Xe 原子核が他の Xe 原子と反応を起こす際、無視できないほど熱エネルギーへとエネルギーが変換される。ここで、クエンチング値  $q$  を、

$$q = \frac{W[eV]}{\left( \text{Xe 原子が 1 つの電子 - イオン対を生成するのに必要なエネルギー} \right) [eV]} \quad (3.10)$$

と定義する。すると、エネルギー  $E$  の反跳 Xe 原子がガス Xe 検出器内で生成する電子の個数は、 $qE/W$  と見積もることができる。

このクエンチング値を見積もるため、物質中を通過するイオンの飛程やエネルギー損失のシミュレーションが行えるソフト "SRIM(The Stopping and Range of Ions in Matter)" を用いた。[8] このソフトでは、反跳 Xe 原子の持つエネルギーがどの割合で電離・励起・熱に変換されるのかをシミュレーションすることができるため、そのシミュレーション結果からクエンチング値を見積もることにした。

シミュレーションを行うために、Xe 検出器の温度と密度を入力する必要があり、温度は  $15^\circ\text{C}$  とした。Xe 検出器の Xe の密度だが、本実験では Xe の圧力を 5 気圧とする予定であるため、これと温度が  $15^\circ\text{C}$  という条件を用いて密度を算出した。圧力を  $p[atm]$ 、体積を  $V[L]$ 、Xe 原子のモル数を  $n[mol]$ 、気体定数を  $R[atm \cdot L / (K \cdot mol)]$ 、温度を  $T[K]$  とすれば、Xe 原子を理想気体と仮定した上で以下の気体の状態方程式が成り立つ。

$$pV = nRT \quad (3.11)$$

Xe 原子は131.293g/molであるから、Xe 1 mol をしめる体積 V は、(3.10)式より、

$$V = \frac{1[\text{mol}] \times 0.082[\text{atm} \cdot \text{L}/(\text{K} \cdot \text{mol})] \times 288[\text{K}]}{5[\text{atm}]} = 4.72[\text{L}]$$

$$= 4.72 \times 10^3[\text{cm}^3]$$

ゆえに、Xe の密度 d は、

$$d = \frac{131.293[\text{g}]}{4.72 \times 10^3[\text{cm}^3]} = 2.78 \times 10^{-2}[\text{g}/\text{cm}^3]$$

と求まった。

このようにして決めた温度や密度を入力して、エネルギーが 17.4keV である Xe 原子核を Xe ガス中に 1 個ずつ、1000 個入射させるという設定でシミュレーションを行ったところ、図 3.5、図 3.6 のように入射 Xe 原子核や入射 Xe 原子核によって反跳した Xe 原子が運動したシミュレーション結果が得られた。図 3.5 は入射 Xe 原子核と反跳 Xe 原子の両方の軌跡を示しており、図 3.6 は入射 Xe 原子核のみの軌跡を表している。図 3.5、図 3.6 のように、ガス Xe 検出器の中に 17.4keV の Xe 原子核を入射させた場合には、10 μm の範囲内で反応が起こるというシミュレーション結果が得られた。

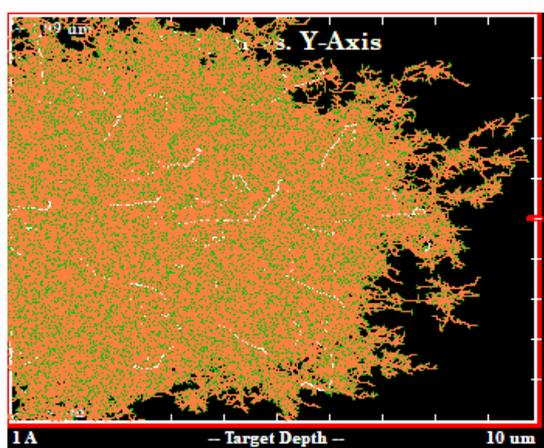


図 3.5 入射 Xe と原子核と反跳 Xe 原子の軌跡

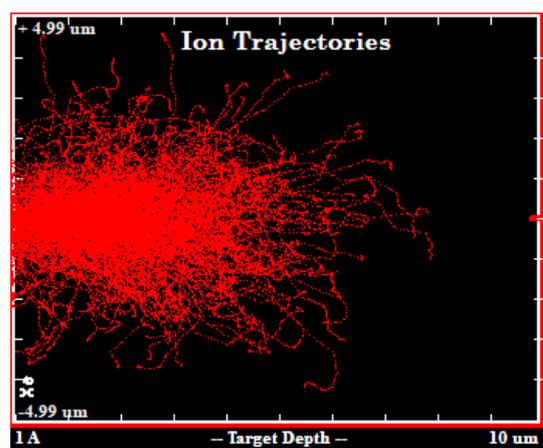


図 3.6 入射 Xe 原子核のみの軌跡

また、エネルギー損失の内訳は表 3.1 のように表示され、電離に使われた割合が 11.88%と求まった。

表 3.1 反跳 Xe 原子のエネルギー損失の内訳のシミュレーション結果

% ENERGY LOSS	Ions Recoils	
	Ionization	2.10
Vacancies	0.19	9.64
Phonons	0.21	78.08

この結果から、クエンチング値を求める。入射 Xe 原子核の持つエネルギーのうち、Xe 原子を電離するのに使われたエネルギーは、

$$17.6 \times 10^3 \times 0.1188 = 2.09 \times 10^3 (eV)$$

である。気体 Xe の電離ポテンシャルは 12.13eV であることから[9]、生成したイオン-電子対の個数は、

$$\frac{2.09 \times 10^3}{12.13} = 1.72 \times 10^2$$

と得られた。したがって、入射 Xe 原子核が 1 つのイオン-電子対を生成するのに必要としたエネルギーは、

$$\frac{17.6 \times 10^3}{1.72 \times 10^2} = 1.01 \times 10^2 (eV)$$

と求まる。したがって、(3.10)式から、中性子ビームを照射させた反跳 Xe 原子核のクエンチング値は、

$$q = \frac{22.1}{1.01 \times 10^2} = 0.218$$

とシミュレーションの結果を用いて算出できた。

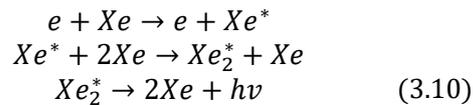
### 3.1.3 生じた電離電子がドリフトする原理

3.1.2 節で述べたように、反跳 Xe 原子やミグダル電子、特性 X 線、 $\gamma$  線によって数多くの電離電子が生じるが、こうして生じた電離電子はドリフト電場によってアノード側へドリフトする。本実験で用いるガス Xe 検出器では、ドリフト電場の大きさは  $100V/cm/atm$  と設定している。この電場下では、電子は Xe イオンと再結合をせず、

また二次電離を起こさない。したがって、電離電子の数が一定に保たれながら ELCC へとドリフトしていく。

### 3.1.4 ELCC 内で起こる反応

ELCC までドリフトしてきた電子は ELCC 内の強電場により ELCC に吸収される。ELCC では  $3kV/cm/atm$  の電場がかけられており、この電場下では以下のような EL 過程と呼ばれる反応が起こる。[10]



(3.10)式のように、電場によってエネルギーを得た電子は Xe 原子と反応し、1 回の反応で EL 光の 1 フォトンを生成する。このとき、この電子は吸収されるわけでもなく、Xe 原子を電離させるわけでもない。したがって、EL 過程の前後で電子数は変化しない。また、1 回の EL 過程の反応により電子はエネルギーを落とすが、電場により再び EL 過程を起こすのに十分なエネルギーを持ち、ELCC 内で電場に沿って EL 過程を繰り返す。それ故、EL 光の光量は EL 過程が起こる領域の長さや圧力に比例して大きくなると分かる。

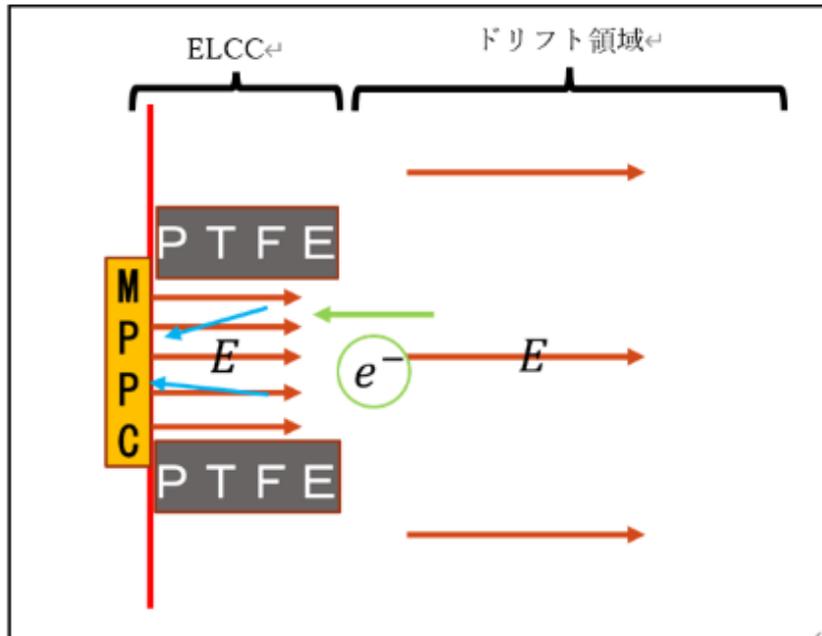


図 3.5 EL 過程と MPPC による EL 光の検知

このようにして ELCC の中で EL 光を生成するが、1 つの電子が ELCC 内でどれほどの数の EL 光のフォトンを生成するかを知っておく必要がある。1 つの電子が ELCC 内で生成する光子数を  $N_{ph}$ 、電場の強さを  $E[kVcm^{-1}]$ 、圧力を  $p[atm]$ 、ELCC の長さを

$x[cm]$ とすると、単位長さ当たり生成される光子数は以下のように表されることが知られている。[11]

$$\frac{dN_{ph}}{dx} = 70(E/p - 1.0)p \quad (3.11)$$

本実験では $E/p = 3[kVcm^{-1}atm^{-1}]$ 、 $p = 5[atm]$ であったことから、(3.11)式より

$$\frac{dN_{ph}}{dx} = 700[cm^{-1}]$$

と分かる。さらに、ELCCの長さは0.5cmであることより、1つの電子がELCC内で生成するEL光の光子数は350個と見積もることができる。したがって、図3.5のように、EL光はMPPCで検知するが、MPPCで測定した光量に対してこの値で割ることにより、最終的にどれほどの数の電子が電離したかが分かる。

### 3.1.5 PMTの読む信号

Xe原子が電離をすると、再結合によりシンチレーション光を放つ。このシンチレーション光をPMTは検出する。Xe原子が電離してから再結合してシンチレーション光を放出するまでにかかる時間は短いので、シンチレーション光が放出された瞬間を、Xe原子が電離した瞬間とみなすことができる。また、シンチレーション光が放出されると、ただちにPMTに検出される。したがって、PMTがシンチレーション光を検出した瞬間を、Xe原子が電離した瞬間とみなすことができる。

上述の通り、電離電子はドリフト電場によってELCC側へドリフトしていき、最終的にELCCによって吸収される。したがって、PMTがシンチレーション光を検出した瞬間とELCCがEL光の信号を検出した瞬間の間には、電離電子がドリフトしていた時間分の差ができる。ゆえに、PMTがシンチレーション光を検出した瞬間とELCCがEL光を検出した瞬間の時間差を測定することで、1つ1つのイベントについてどこで電離が生じたかを求めることができる。

## 第4章 PTFE の作製と Xe 検出器

PTFE とは、ELCC を構成するパーツであり、本実験で用いる小型の Xe ガス検出器に合った形で設計し直す必要があった。そこで、PTFE のモデルの設計をするべく、3D モデルを作り、それを 3D プリントして大きさや穴の位置を確かめた。

### 4.1 PTFE のモデル作り

PTFE のモデルを作成するにあたって、“Autodesk Inventor Professional 2022”(<https://www.autodesk.co.jp/products/inventor/new-features>)を用いた。まず、PTFE の外形の作成に取りかかった。PTFE は図 4.1 のフィールドケージとつながるため、図 4.1 の図面を参照して PTFE の外形のモデルを作成した。作成したモデルと、それを 3D プリントしたものはそれぞれ図 4.2、図 4.3 のようになった。

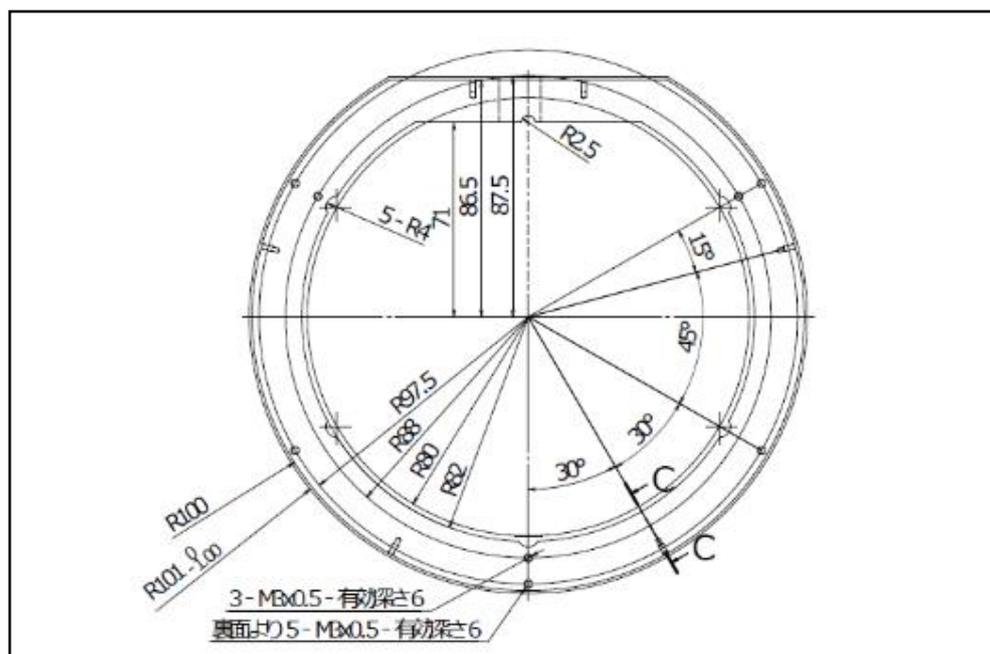


図 4.1 PTFE とつながるフィールドケージの図面

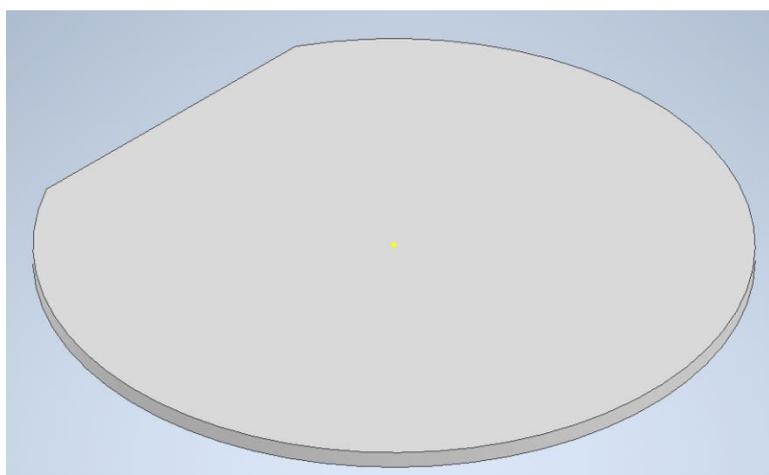


図 4.2 PTFE の外形のモデル

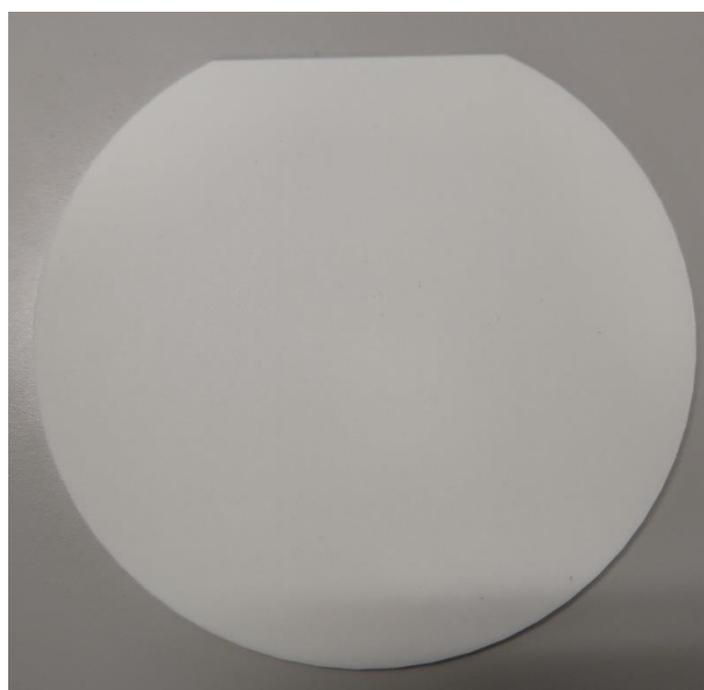


図 4.3 3D プリントした PTFE の外形

次に、作成した PTFE の外形のモデルに PTFE を 3 つはめ込むための凹み部分のモデルの作成に取りかかった。ELCC は図 4.4 のような平行四辺形の形をしており、この ELCC を 3 つ、PTFE の中心に対して点対称に取り付けることになる。したがって、PTFE の凹み部分は擬似正六角形のような形になり、このモデルと 3D プリントしたものはそれぞれ図 4.5、図 4.6 のようになった。

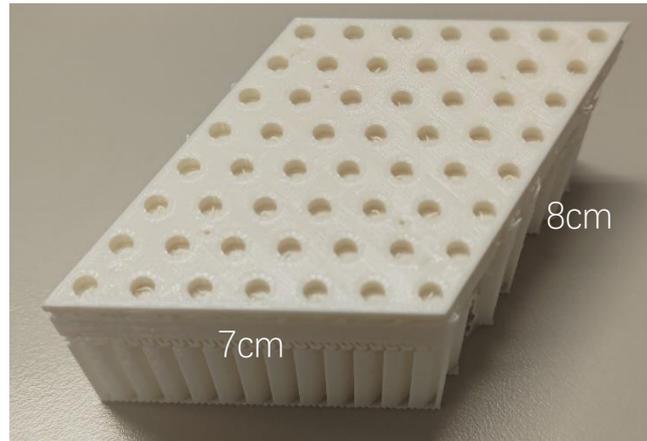


図 4.4 ELCC 一体型の 3D モデル

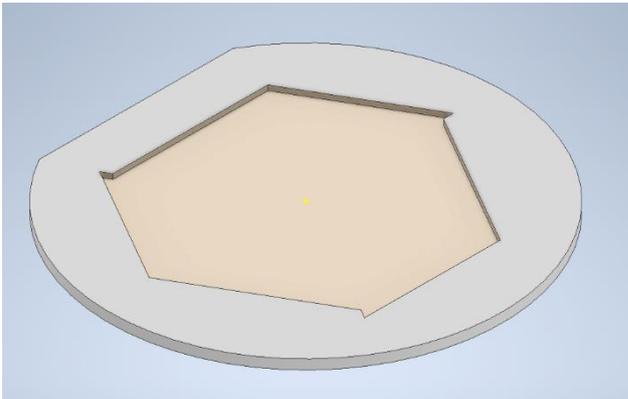


図 4.5 ELCC をはめ込む凹み部分のモデル

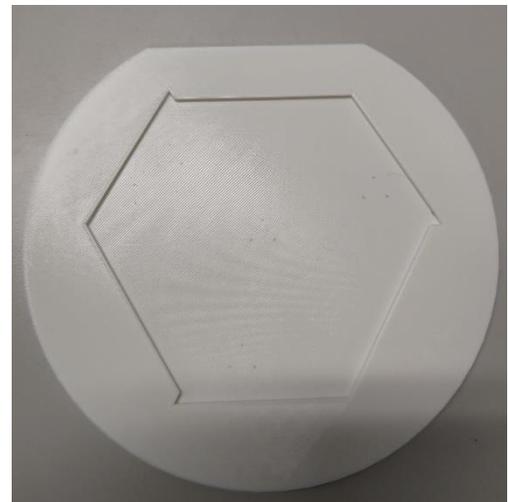


図 4.6 図 4.5 の 3D プリント

ただし、図 4.5 や図 4.6 の凹みの擬似正六角形の向きは反対向きになってしまっており、この後に穴の位置や大きさを決めて PTFE のモデルを作成したが、その際に向きを修正した。

続いて、上記の通り穴の位置や大きさを決めて PTFE のモデルを作成した。まず ELCC をはめこむ凹み部分に空ける穴についてだが、ELCC 1 つに空けられているセルの穴の数は 56 個であるため、PTFE の凹み部分に空けるセル用の穴は 168 個である。PTFE の穴径が 4.5mm であることと、穴の間隔が 1cm であること、そして 168 個のセル用の穴が PTFE に対して点対称に空けられるように考慮し、セル用の穴の位置を定めた。また、ELCC には PTFEbody と PTFEcover というものがあり、これら 2 つを接続するための穴(穴径：1.3mm)を合計 12 個空ける必要がある。図 4.7 のように、その穴の位置は正三角形に並べられたセル穴の重心の位置になっているため、PTFE への穴の位置を定める際はそうしたジオメトリを考慮した。

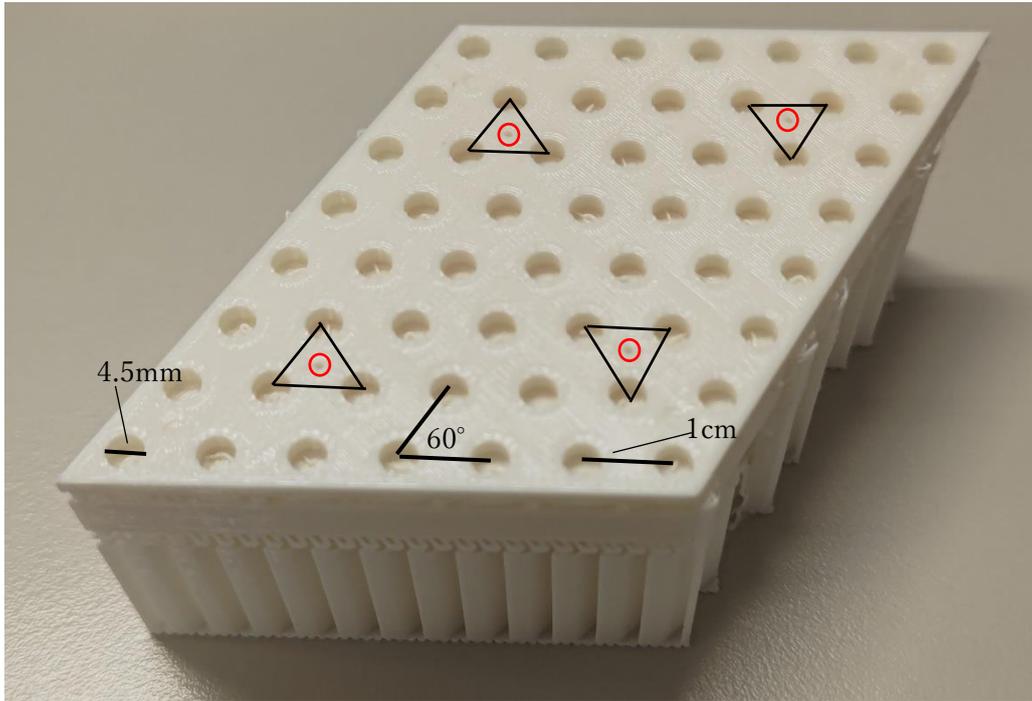


図 4.7 ELCC のセル穴などの穴の位置

次に、PTFE の上に貼る Cu 電極を取り付けるための穴を作製した。貼り付ける電極には、下図のように直径 165mm の円周上に  $\Phi 1.6\text{mm}$  の穴が 60 度間隔で 6 個空いており、その穴を通じて PTFE にネジで貼り付ける。したがって、このジオメトリを考慮して PTFE の上側にこの電極用の穴を開けた。

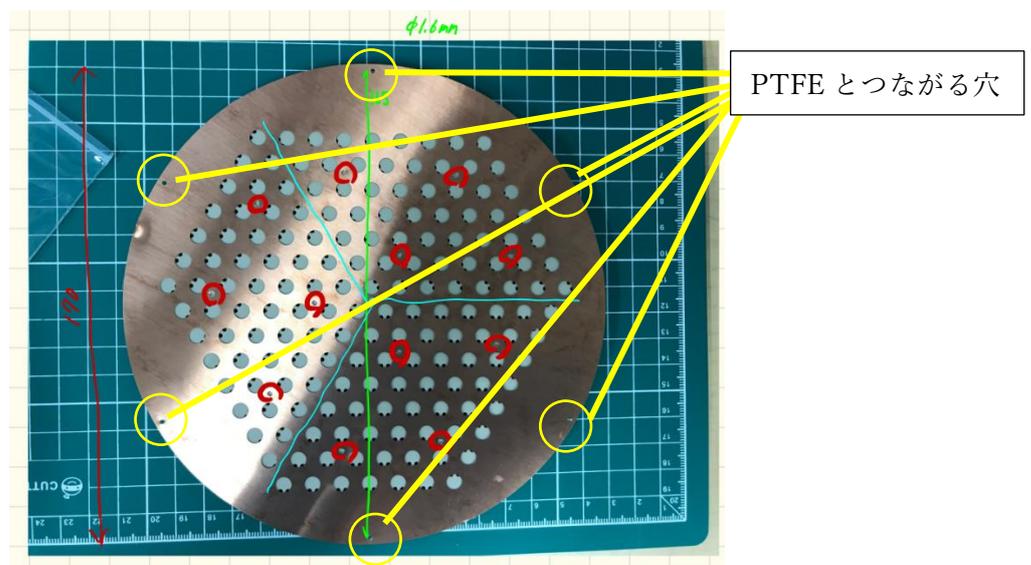


図 4.8 PTFE の上面に貼る Cu 電極の穴

続いて、GND 電極を PTFE に貼り付けるための穴を作製した。GND 電極のジオメトリは図 4.9 のようになっており、内側に 24 個、外側に 12 個の計 36 個の穴が PTFE との接続用に空けられている。内側、外側の穴の位置については、図 4.10 のように、

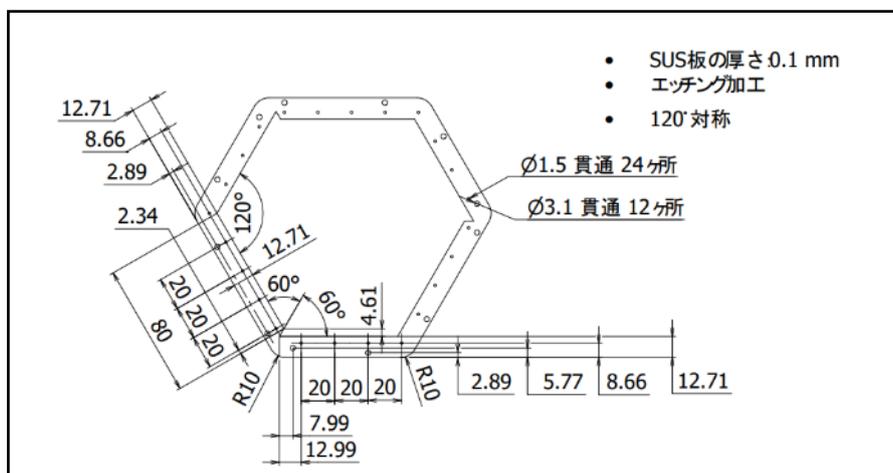


図 4.9 GND 電極のジオメトリ

ELCC のセル用に空けられた穴とのジオメトリを考慮して定めた。まず、内側の穴についてだが、ELCC のセル用に空けられた穴との延長線上に位置し、そして ELCC のセルの間隔と等しい長さだけ延長した位置に空けられることを考慮した。次に、外側の穴についてだが、図 4.10 の青線のように GND 電極用の穴からさらにセルの間隔分だけ延長させ、セル間隔分の辺の長さの正三角形を作り、その重心が GND 電極用の外側の穴になることを考慮して穴の位置を定めた。

最後に、フィールドケージ用の穴の作製を行った。フィールドケージのジオメトリは図 4.1 の通りなので、PTFE には直径 195mm の円周上に 60 度ずつ等間隔にフィールドケージ用に穴を開けた。さらに、図 4.11 のようにスペーサーを付けるためにフィールドケージ用の穴との間にスペーサー用の穴を 60 度間隔で穴を開けた。

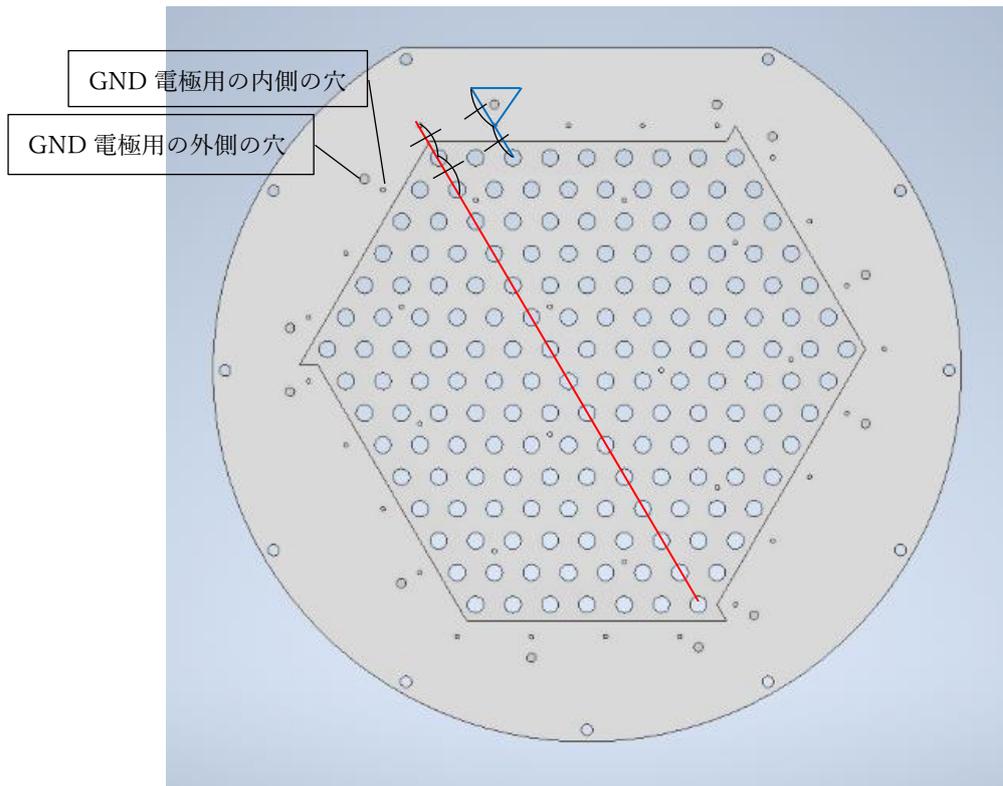


図 4.10 GND 電極用の穴の位置の決定

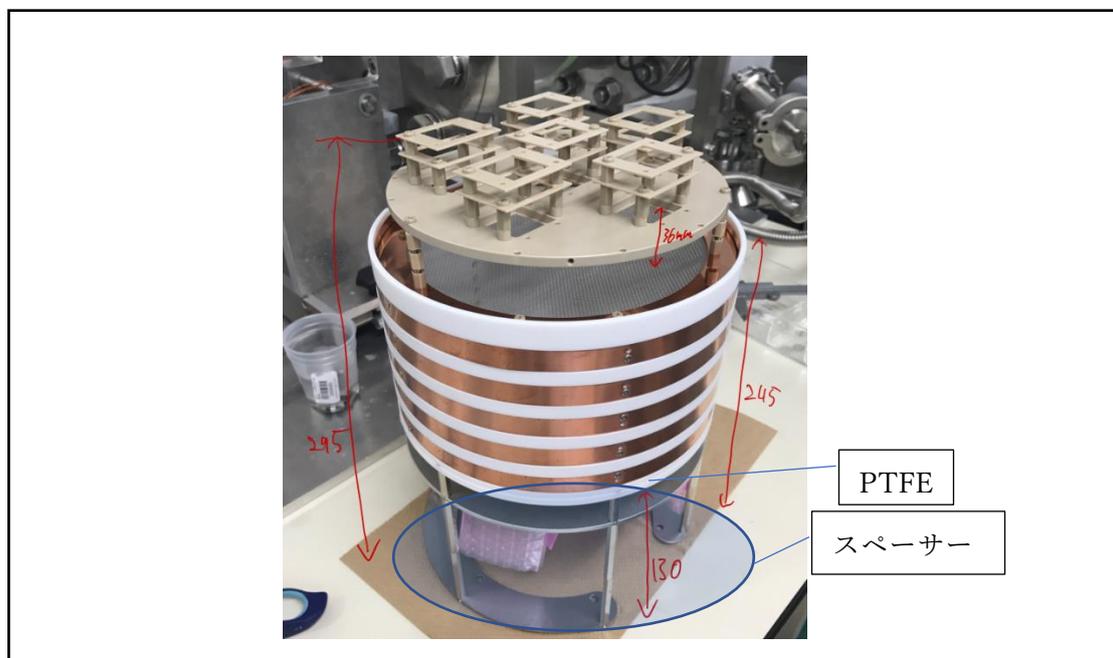


図 4.11 スペーサーと PTFE の接続の様子

## 4.2 PTFE の 3D モデルの確認と作製図面

4.1 で述べた通りに PTFE のモデルづくりを行い、それを 3D プリントしたところ図 4.12、図 4.13 のようになった。

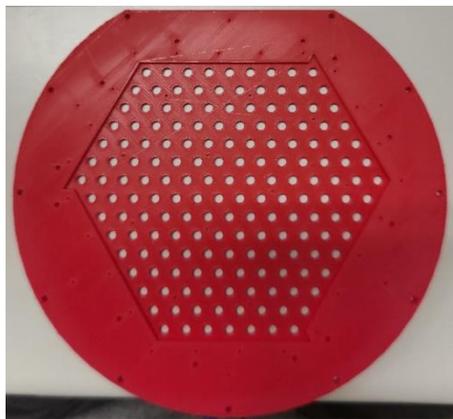


図 4.12 PTFE の上面



図 4.13 PTFE の裏面

次に、作製した PTFE の 3D モデルのチェックのため、下図のようにフィールドケー  
ージと接続して ELCC の 3D モデルを PTFE にはめ、Cu 電極や GND 電極を PTFE  
に乗せ、穴の位置や大きさを確認した。

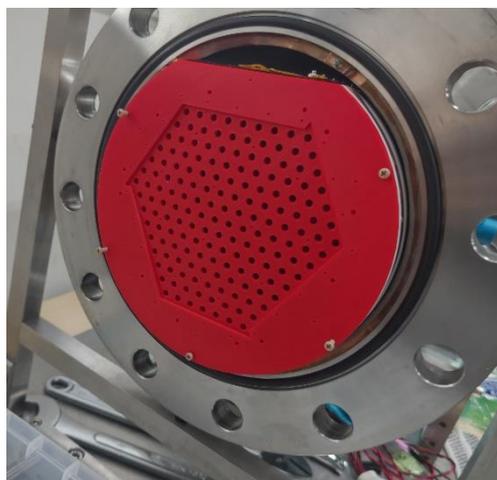


図 4.14 フィールドケー  
ージとの接続確認

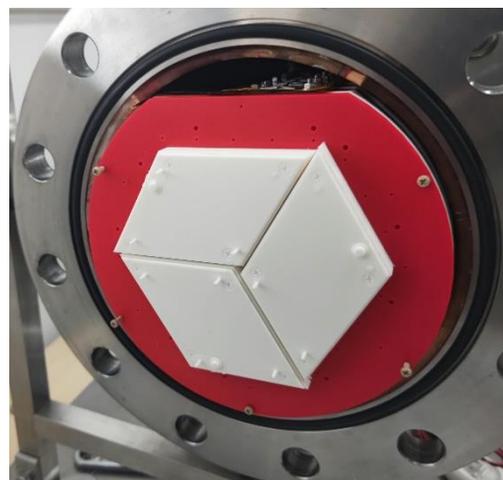


図 4.15 PTFE(3D モデル)との接続確認



図 4.16 Cu 電極と PTFE

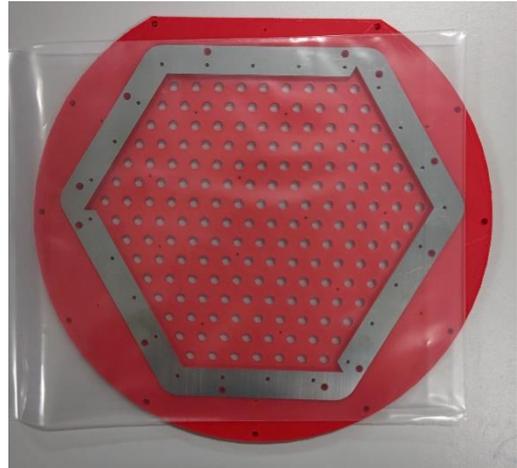


図 4.17 GND 電極と PTFE

このようにして、PTFEの外形や穴の位置などの確認ができたため、PTFEのモデルを決定し、下図のようにPTFEの図面を作成した。

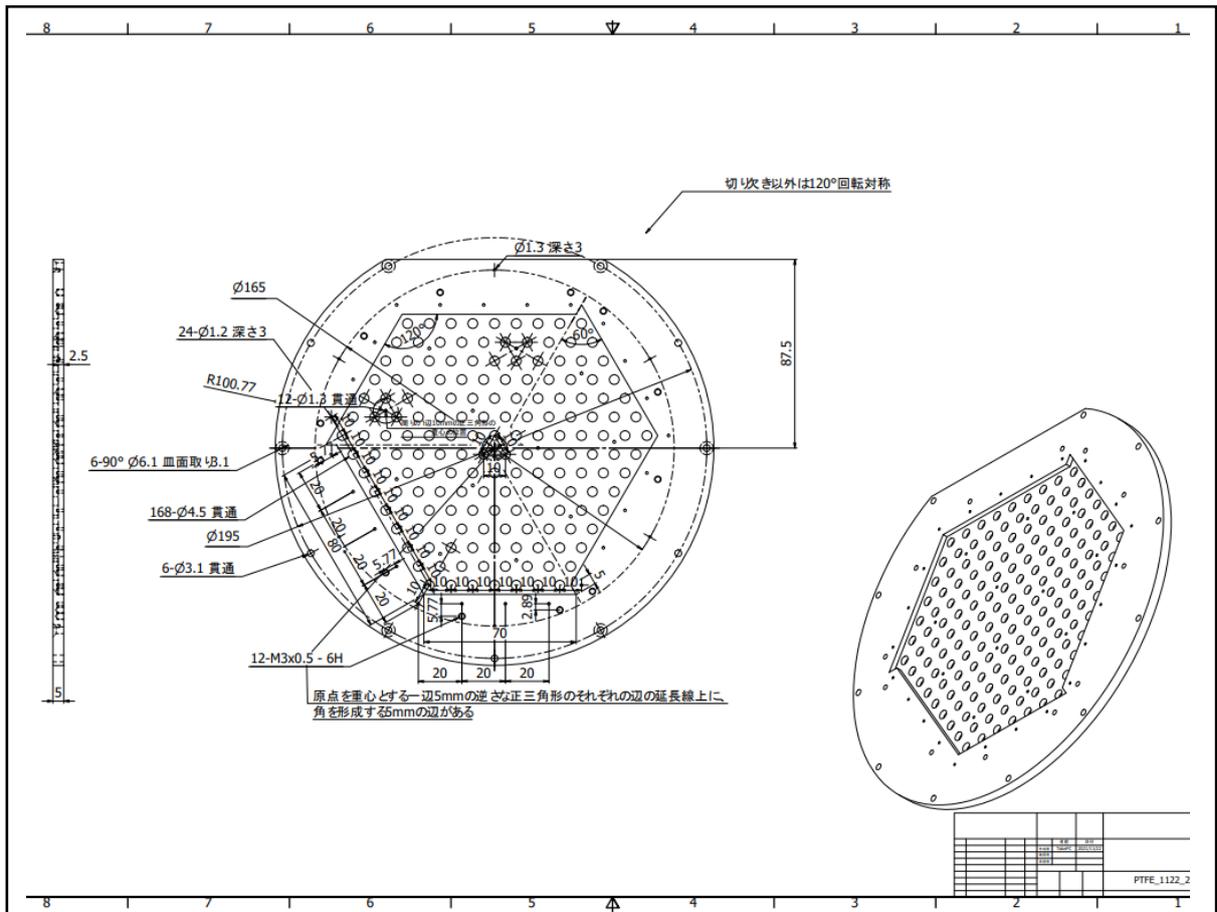


図 4.18 作成した PTFE 図面

### 4.3 Xe 検出器への PTFE の取り付け

作製した PTFE の図面を元に業者の方に PTFE を作ってもらい、図 4.19 のように GND 電極を PTFE に取り付けた。GND 電極を PTFE に止める穴のうち、使わなかった穴はカプトンテープで穴を覆った。

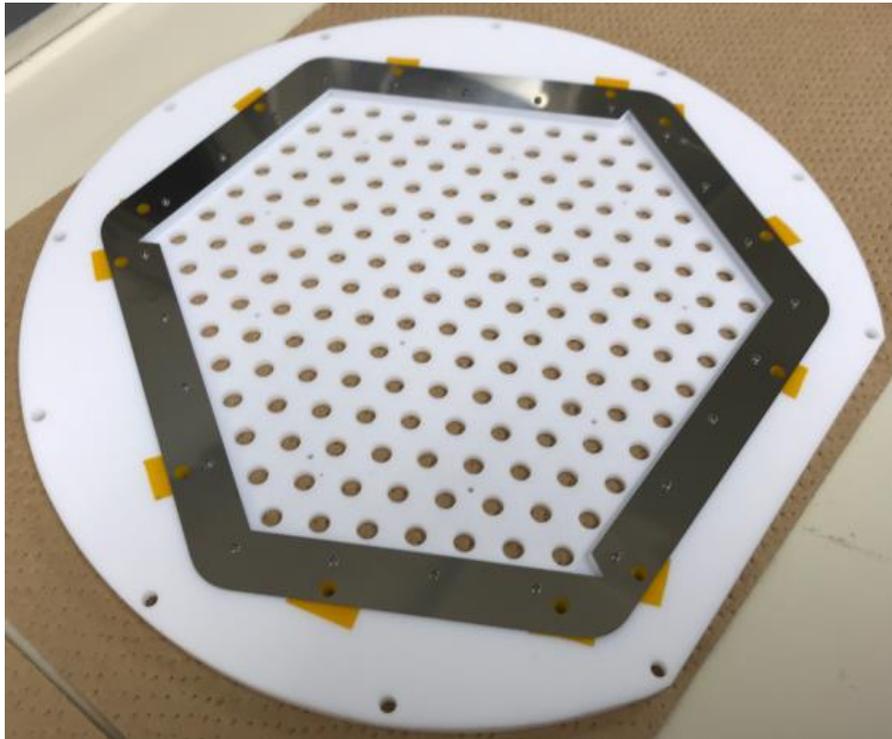


図 4.19 PTFE への GND 電極の取り付け

次に、スペーサーに ELCC を乗せ、図 4.20 のように ELCC の表面やセル内のごみをペタ綿棒で取り除いた。ELCC 内では  $3\text{kV}/\text{cm}/\text{atm}$  の電場がかかり、ELCC の厚さは  $0.5\text{cm}$  であるから、 $5\text{atm}$  の Xe を封入した際には  $7.5\text{kV}$  の電位差が生じることになるため、ELCC にごみが付いていた場合、それは放電の原因となる。それ故、ELCC の表面やセル内のごみの除去は入念に行った。



図 4.20 ELCC についているごみの取り除き

続いて、図 4.21 のように PTFE についているごみをペタ綿棒で入念に取り除き、ELCC と接続した。



図 4.21 PTFE についているごみの取り除き

次に、図 4.22 のようにフィールドケージをカプトンシートで覆った。フィールドケージ内では  $100\text{V}/\text{cm}/\text{atm}$  の電場がかかっており、厚さは  $10\text{cm}$  であるから、 $5\text{atm}$  の Xe を封入した場合フィールドケージの両端で  $5\text{kV}$  の電位差が生じる。PTFE とフィールドケージのアノードでは電位が  $-7.5\text{kV}$  になっているため、フィールドケージのカソードでは電位は  $-12.5\text{kV}$  となり、放電しやすい状態になる。それ故、フィールドケージに対して放電が起こるのを防ぐため、カプトンシートでフィールドケージ全体を覆うように心がけた。

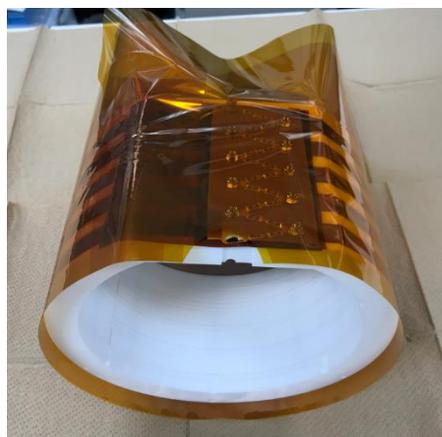


図 4.22 フィールドケージをカプトンシートで覆った状態

そして最後に、PTFE とフィールドケージを接続して、図 4.23 のようにガス Xe 検出器内に入れた。

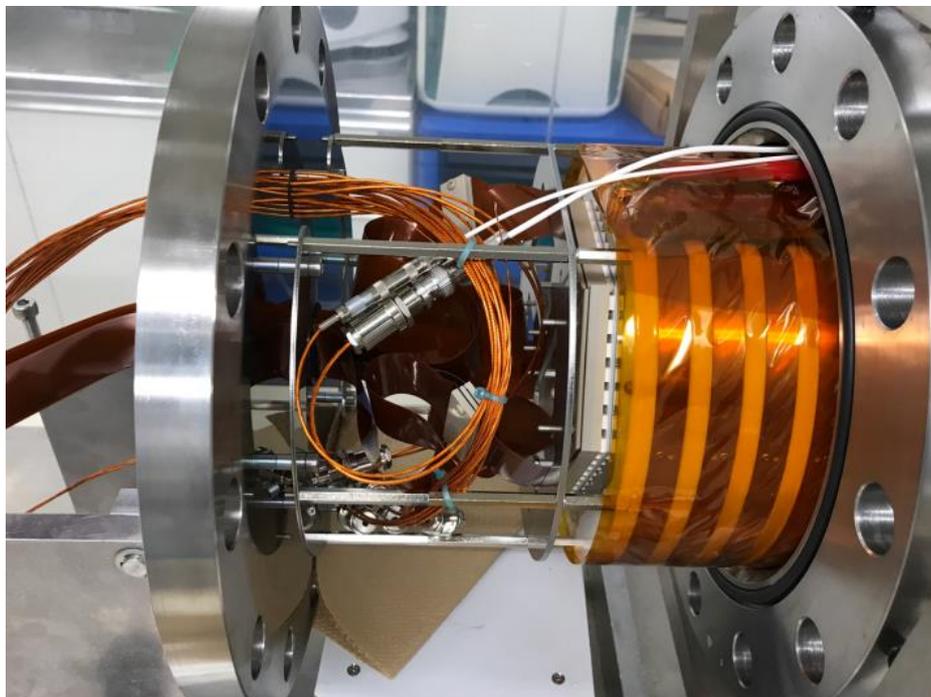


図 4.23 ガス Xe 検出器内へ装置を入れる様子

#### 4.4 放電チェック

HV 電源を用いて、実際に電圧をかけて放電しないかを確認した。図 4.24 のように、電圧測定用のテスターと電流測定用のテスターを用いて測定を行った。電圧は 20kV まで上げて放電チェックをした。

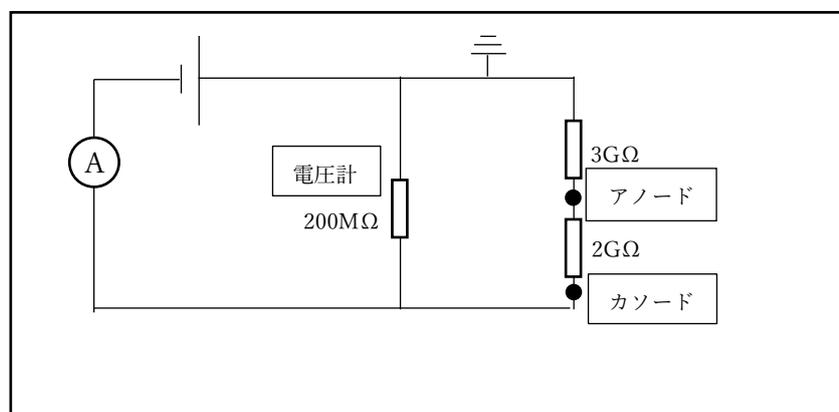


図 4.24 放電チェックの回路図

放電チェックでは、放電が起こったかどうかに加え、抵抗値が変化したかどうかについても注意した。放電が起こり、ELCC やフィールドケージのごみが燃やされて炭化した場合、その部分が導通してしまう恐れがある。その導通部分が生じることで、本来 ELCC 間の電場は 3kV/cm/atm、フィールドケージ内の電場は 100V/cm/atm であるが、その電場の強さが変化してしまう。導通部分が生じれば、抵抗値は小さくなるはずである。したがって、抵抗値についても注意して放電チェックを行った。

放電チェックの結果は表 4.1 の通りである。

表 4.1 放電チェックの結果

電圧[kV]	電流[mA]	抵抗[MΩ]	備考
0	0		
4	0.021	190	
8	0.043	186	
10	0.053	189	
12	0.064	188	
14	0.075	187	
15	0.080	188	
16	0.085	188	
17	0.091	187	
17.4			1 発放電
17.9			無音で放電
18	0.096	188	
18.3			大きい音が伴った放電 1 発
18.5	0.099	187	
18.7			大きい音が伴った放電 1 発
18	0.096	188	
18.5	0.099	187	
19	0.101	188	
19.5	0.104	188	
19.92	0.106	188	
			1 発放電
19.92	0.106	188	

かける電圧を徐々に増加させながら放電チェックを行ったが、17.4kV 以上の電圧をかけた際に放電が起こった。大きい放電が起こった際は、かけている電圧を小さくし

てから、再び電圧を増加させた。19.92kV まで電圧を上げた後、10 分間ほどその状態で放電が起こらないか確認し、その間に 1 発だけ放電を確認した。

一方、抵抗値は放電チェックの間 186~188MΩ の間で一定であった。図 4.24 から、理論的な抵抗値を  $r$  として、

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{200} + \frac{1}{5000} \quad \therefore r = 192.3[\text{M}\Omega]$$

であるから、抵抗の実測値と理論値は近く、放電チェックの間、導通などは起こらなかったと考えられる。

#### 4.5 Xe 検出器のリークチェック

来年度の 4 月上旬に、検出器に Xe を 5 気圧封入して中性子ビーム実験を行う予定だが、その際に検出器の気密性が弱く、それ故に空気が流入した場合、それは Xe 検出器の不純物になる。そうしたリークが起こっているのかどうかを確かめるのは重要である。また、検出器内部の物質からはアウトガスが放出されるが、そのアウトガスも不純物となる。それ故、アウトガスの除去のために真空引きは重要である。

こうしたことから、ガス検出器に対し真空引きを常に行っており、定期的に真空引きを一時的に停止させ、1 時間ほどかけて圧力がどれほど増加するかを測定している。2022 年 3 月 18 日時点では、ガスのリークレートは約  $1.0 \times 10^{-6} [\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}]$  であった。配管含めた Xe 検出器の体積は約  $0.01 \text{m}^3$  であるから、仮に 1 日放置したとすると、1 日で増加する圧力は、

$$1.0 \times 10^{-6} \div 0.01 \times 60^2 \times 24 = 8.6[\text{Pa}/\text{day}]$$

となる。この場合、1 日で Xe ガス 5 気圧に対して 1.7ppm だけ不純物である空気が入り込む計算となる。リークレート削減のため、引き続き真空引きを続ける必要がある。

## 第5章 中性子シールドの作製

### 5.1 中性子シールド作製の目的

GXe 検出器でミグダル効果の信号を検出するにあたって、2.2章で述べたような実験室の壁や床などの中性子捕獲反応によって生じる $\gamma$ 線BGの削減は重要である。中性子シールドといった遮蔽を特に行わないモデルに関しては既にシミュレートされており、その結果は下図のようになる。ただし、下図のシミュレーション結果はXe検出器内の圧力を5atmではなく8atmとしてシミュレートしたものである。[12]

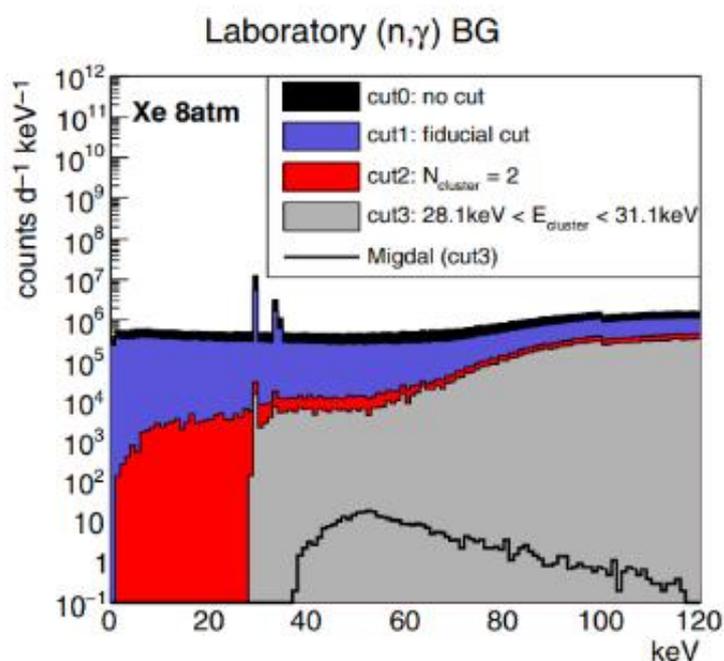


図 5.1  $\gamma$ 線BGとミグダル効果による信号[12]

図 5.1 の灰色で示された領域は生データに対して fiducial cut に加え、クラスターが2つできていることと、どちらかのクラスターの信号のエネルギーが $29.6(\pm 1.5)keV$ であるという3つの条件でカットしたイベントレートを表している。一方、黒線で示されたものはミグダル効果による信号のエネルギースペクトルを表している。解析しようとしているミグダル信号のエネルギーは $29.6keV$ であるから、実験室からの $\gamma$ 線BGのイベントレートはミグダル効果による信号と比較して $10^3 \sim 10^6$ 倍となっており、 $\gamma$ 線BGが支配的になっていることが分かる。

こうした $\gamma$ 線BGを抑えるため、MIRACLUEでは中性子ビームが検出器に到達する前に、検出器方向以外の方向に放射する中性子を遮蔽することを考えた。そこで、

下図のように検出器方向以外に放射する中性子をシールドする計画が立てられた。ビーム口の位置に Li があり、その Li に陽子ビームを照射させることで(p,n)反応が起き中性子を生成するが、その陽子ビームのビーム管をコリメータや後方シールドで覆い、そのコリメータなどに、中性子シールドとしてよく用いられるポリエチレンに熱中性子捕獲断面積の高い LiF を 50%混ぜたものを敷き詰める。さらに、それらを 30cm 角の LiF50%入りポリエチレンのブロックで覆う。このようにして、検出器方向以外に放射する中性子をシールドする計画が立てられた。本実験では、そのコリメータ作りに取り組んだ。コリメータ作製において、モデルを作る際は PTFE のモデルを作製したときと同様に”Autodesk Inventor Professional 2022”を用いた。

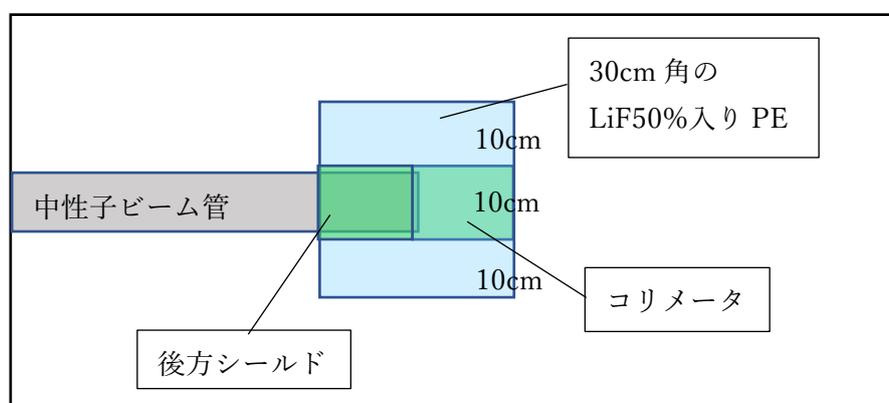


図 5.2 中性子シールドの概略図

## 5.2 コリメータの作製

MIRACLUE は東北大学と神戸大学のミグダル効果の観測を目指すチームであるが、神戸大では Xe 検出器ではなく Ar 検出器を用いている。Xe 検出器と Ar 検出器では大きさや形状が異なるため、中性子ビームをコリメートする部分（以下、コーン部分と呼ぶ）についてはそれぞれで設計が異なる。それ故、Xe 検出器用のコリメータと Ar 検出器用のコリメータの両方を作製した。

### 5.2.1 コーン部分の作製設計

まずコリメータの箱の大きさだが、縦 15cm、横 10cm、高さ 10cm にした。厚さについてだが、コリメータを造形する際に用いる材料はポリ乳酸(PLA)であり、その構造式は  $(C_3H_4O_2)_n$  となっており、水素が含まれている。この水素は中性子捕獲反応により、2.2MeV の  $\gamma$  線を放出する。したがって、なるべく薄く造形する必要がある、厚さを 1mm にして作製した。次に、陽子ビーム管の出口をはめ込む部分についてだが、ビーム管の出口は図 5.3 のようになっており、ビーム管の出口の直径は 55mm である。ビーム管にコリメータが接触しないようにすることを考慮し、ビーム管の出口

をはめ込む部分については大きさに余裕を持たせ、厚さ 15mm で直径 70mm の円柱状に凹みを入れた。

続いて、コーン部分の作製について述べる。ビーム口は直径 1 インチ(2.54cm)であり、検出器はビーム口から 1m のところに設置される。Xe 検出器は直径が約 20cm の

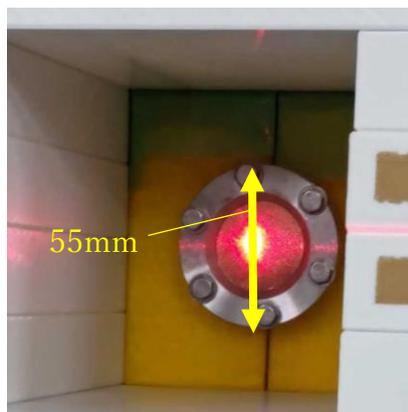


図 5.3 ビーム管の出口の大きさ

円柱状の形をおり、Ar 検出器は縦 10cm,横 15cm,高さ 10cm の直方体の形状をしている。こうした条件から、図 5.4 のように、ビーム口からの距離に比例してコーン部分の断面の円の直径、もしくは長方形の 1 辺が大きくなるようにコーン部分の作製設計を考えた。

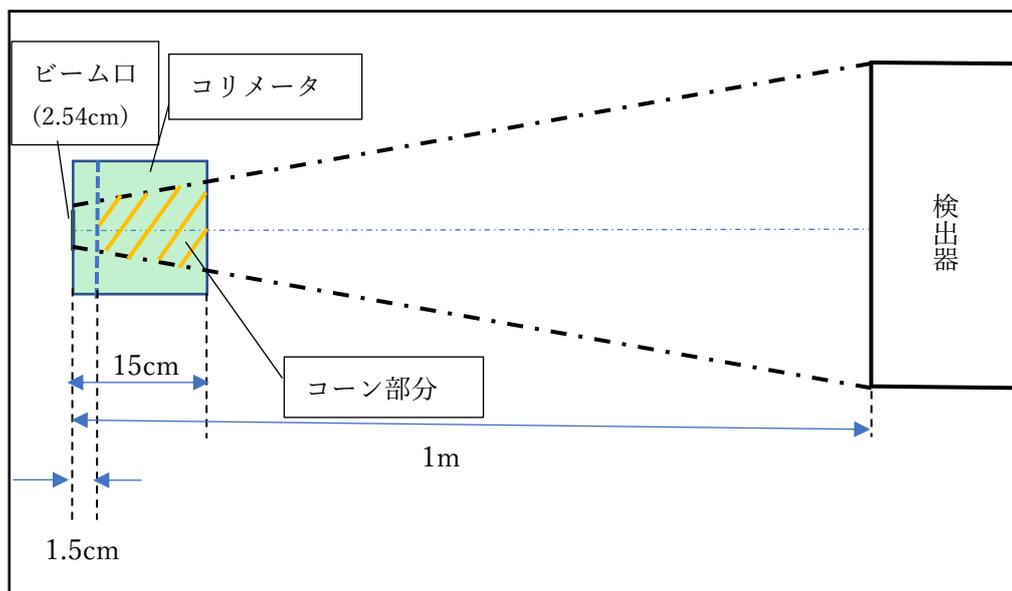


図 5.4 コーン部分の設計の概略図

具体的なコーン部分の設計について述べる。まず Xe 検出器用のコーン部分の設計についてだが、ビーム口から検出器までの間に増加した円の直径は、 $20 - 2.54 = 17.46(\text{cm})$ である。ビーム口から Xe 検出器までの距離は 1m なので、ビーム口から 1.5cm 地点と 15cm 地点それぞれにおけるコーン部分の断面の円の直径は、

$$\begin{aligned} 1.5\text{cm地点} &: 2.54 + 17.46 \times \frac{1.5}{100} = 2.80(\text{cm}) \\ 15\text{cm地点} &: 2.54 + 17.46 \times \frac{15}{100} = 5.16(\text{cm}) \end{aligned}$$

と求められた。

次に、Ar 検出器用のコーン部分の設計について具体的に述べる。Ar 検出器の場合、ビーム口は円形だが、ビームの方向から Ar 検出器を見ると、縦と横の比が 2 : 3 の長方形になっている。したがって、このままコーン部分を設計するのは困難であると考えた。そこで、ビーム口の位置に縦 2.54cm、横 3.81cm (=  $2.54 \times 3/2$ ) の長方形を仮定し、その長方形から距離に比例してコーン部分の断面の長方形の 1 辺が長くなるようにコーン部分を設計した。したがって、ビーム口からの位置 1.5cm、15cm の地点それぞれにおけるコーン部分の断面の長方形の辺の長さは、

$$\begin{aligned} 1.5\text{cm地点} &: (\text{縦の長さ}) = 2.54 + \frac{(10-2.54) \times 1.5}{100} = 2.65(\text{cm}) \\ &: (\text{横の長さ}) = 2.65 \times \frac{3}{2} = 3.98(\text{cm}) \\ 15\text{cm地点} &: (\text{縦の長さ}) = 2.54 + \frac{(10-2.54) \times 15}{100} = 3.66(\text{cm}) \\ &: (\text{横の長さ}) = 3.66 \times \frac{3}{2} = 5.49(\text{cm}) \end{aligned}$$

と求まった。

このようにして、Xe 検出器用と Ar 検出器用それぞれのコーン部分の内側の設計ができた。コーン部分の厚さについてだが、なるべく薄く造形するため 1mm で造形した。

## 5.2.2 チューブ継手の固定位置の決定

前述の通り、ビーム口の位置にある Li に陽子ビームを照射させることで(p,n)反応を起こすが、反応断面積が小さく、大半の陽子のエネルギーが熱に変換されてしまう。生じた熱は Li を熱することになり、Li が溶けてしまうおそれがある。そこで、ターゲットの Li に風を当て続けることで Li を冷やすことを考えた。Li に風を当てる際、外部から風が送られてくる内径 4mm のチューブをチューブ継手にさし、口の小

さい内径 1mm のチューブに変換して Li に風を送る。そのチューブ継手を取り付けるための設計について述べる。チューブ継手を取り付ける位置は Ar 検出器用、Xe 検出器用のコリメータにかかわらず同じ場所にした。

まず、図 5.5 のように、ビーム口からビーム方向に 15cm の位置にチューブ継手を取り付けるように設計し、ビーム管をはめる部分にチューブが通るように穴を 20 カ所程度空け、チューブを通してみた。

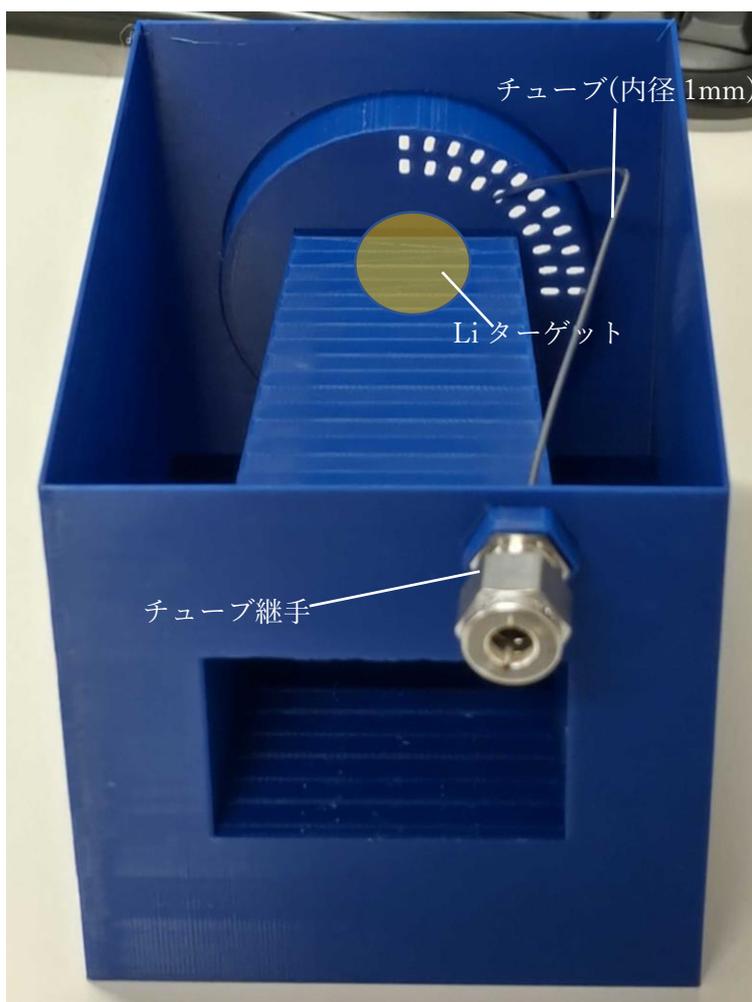


図 5.5 チューブ継手の最初の固定位置

次に、コンプレッサで風を送り、チューブ出口の風の強さを確かめた。すると、チューブ出口の風の強さが弱く、Li を冷やすための風の強さとしては不十分である可能性が生じた。そこで、以下のように考え、チューブの長さを短くすることを検討した。

図 5.6 のように、風の送り元である A があり、そこから長さ L、内径 4mm の太いチューブ B を通り、チューブ継手でチューブが変換されて長さ l、内径 1mm の細いチ

ューブ C を通って風がターゲット Li に当たるとする。圧力に関しては、A では圧力 P とし、チューブ継手位置では圧力 p とし、チューブ出口では大気圧 1atm になっているとする。

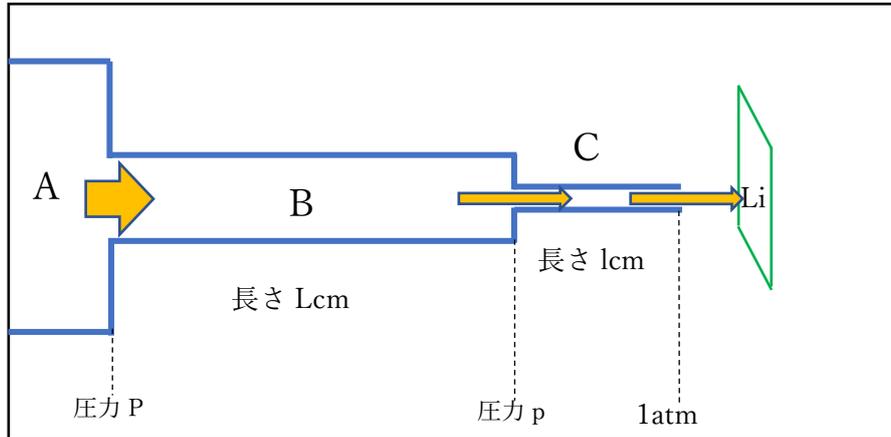


図 5.6 風が Li に当てられる概略図

まず、チューブ B, C 内の風の流量を考える。風の流量  $Q$  は、チューブ内側の円の半径を  $r$ 、チューブ内の圧力の平均を  $\bar{P}$ 、チューブ両端の圧力差を  $\Delta p$ 、チューブの長さを  $l_0$  としたとき、以下の関係式が成り立つ。[\[13\]](#)ただし、 $k$  は定数である。

$$Q = \frac{kr^4\bar{p}}{l_0}\Delta p \quad (5.1)$$

したがって、チューブ B とチューブ C の流量をそれぞれ  $Q_B, Q_C$  とすると、それぞれ以下のように表される。

$$Q_B = k \times 0.2^4 \times \frac{P+p}{2} \times \frac{P-p}{L} = k \times 0.2^4 \times \frac{P^2-p^2}{2L} \quad (5.2)$$

$$Q_C = k \times 0.05^4 \times \frac{p+1}{2} \times \frac{p-1}{l} = k \times 0.2^4 \times \frac{p^2-1}{2l} \quad (5.3)$$

ここで、チューブ B とチューブ C の流量は等しいので、 $Q_B = Q_C$  が成り立つ。ゆえに、(5.2)式と(5.3)式を辺々で割って整理すると、

$$1 = 256 \times \frac{P^2-p^2}{p^2-1} \frac{l}{L} \quad (5.4)$$

となる。(5.4)式より、チューブ継手位置での圧力  $p$  は、

$$p = \sqrt{\frac{L + 256l \cdot P^2}{L + 256l}} \quad (5.5)$$

と得られる。ゆえに、チューブ B、C の風の流量  $Q$  は、

$$Q = k \times 0.05^4 \times \frac{\frac{L + 256l \cdot P^2}{L + 256l} - 1}{2l} = k \times 0.05^4 \times \frac{128(P^2 - 1)}{L + 256l} \quad (5.6)$$

と求まった。

次に、チューブ C の長さ  $l$  が  $l_1, l_2 (l_1 < l_2)$  の 2 つの場合で、風の流量  $Q$  がどのくらい異なるかを確認する。チューブ C の長さが  $l_1$  のときの風の流量を  $Q_1$ 、長さが  $l_2$  のときの風の流量を  $Q_2$  とし、流量の比  $R (= Q_2/Q_1)$  を求める。  $Q_1, Q_2$  は、(5.6) 式から求まるので、流量の比  $R$  は、

$$R = \frac{128(P^2 - 1)}{L + 256l_2} \div \frac{128(P^2 - 1)}{L + 256l_1} = \frac{L + 256l_1}{L + 256l_2} \quad (5.7)$$

と求まった。(5.7) 式のように、風の流量の比  $R$  は風の送り元である A の圧力  $P$  に依らないことが分かった。

また、 $l_1 = 1\text{cm}, l_2 = 15\text{cm}$  の場合と  $l_1 = 2\text{cm}, l_2 = 15\text{cm}$  の場合、 $l_1 = 1\text{cm}, l_2 = 5\text{cm}$  の場合の 3 つの場合の流量比  $R$  を考え、横軸を  $L(\text{cm})$ 、縦軸を  $R(\text{flow ratio})$  にしたグラフを描画すると、図 5.7 のようなグラフが得られた。

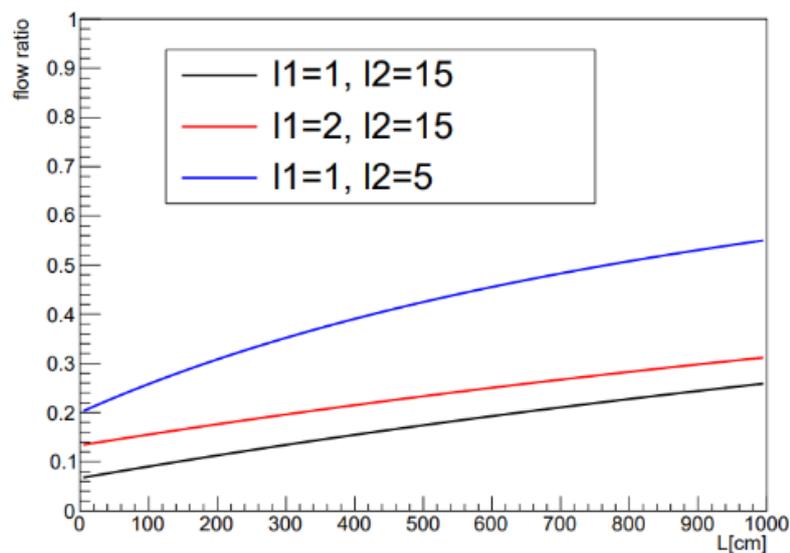


図 5.7 風の流量比の比較

図 5.7 から、風の流量はチューブ C が短ければ短いほど大きくなるといえる。 $l_1 = 1\text{cm}, l_2 = 15\text{cm}$ の場合に対し、 $l_1 = 2\text{cm}, l_2 = 15\text{cm}$ の場合のほうが流量比が大きくなっているのは、チューブ C の長さ $l_1$ が 1cm から 2cm に変化させることで風の流量が落ちることによるものと考えられる。 $l_1 = 1\text{cm}, l_2 = 15\text{cm}$ の場合に対し、 $l_1 = 1\text{cm}, l_2 = 5\text{cm}$ の場合のほうが流量比が大きくなっているのは、チューブ C の長さ $l_2$ が 15cm から 5cm に変化させることで風の流量が増加することによるものと考えられる。また、仮にチューブ B の長さ L が 500cm であったとすると、 $l_1 = 1\text{cm}, l_2 = 15\text{cm}$ の場合と  $l_1 = 1\text{cm}, l_2 = 5\text{cm}$ の場合を比較すれば、チューブ C の長さが 5cm のときの流量は長さ 15cm のときの流量の約 3 倍になることがわかる。

こうしたことから、コリメータに取り付ける内径 1mm のチューブの長さを短くすることを決めた。そこで、図 5.8 のように、チューブ継手を取り付ける位置をコリメータの中心から高さ 3cm、ビーム管をはめる凹み部分から距離 3cm の所で、左右対称な位置にコーン上に取り付けるように設計した。そして、内径 1mm のチューブを通すために、ビーム管をはめる凹み部分に穴を空ける必要があるが、その穴が小さすぎるとチューブは通らないこと、また穴が大きすぎるとチューブが固定されず、チューブから出てくる風の向きがばらばらになってしまうことを考慮し、チューブを通すための穴について、以下のように考えて形状や位置を決め設計を行った。

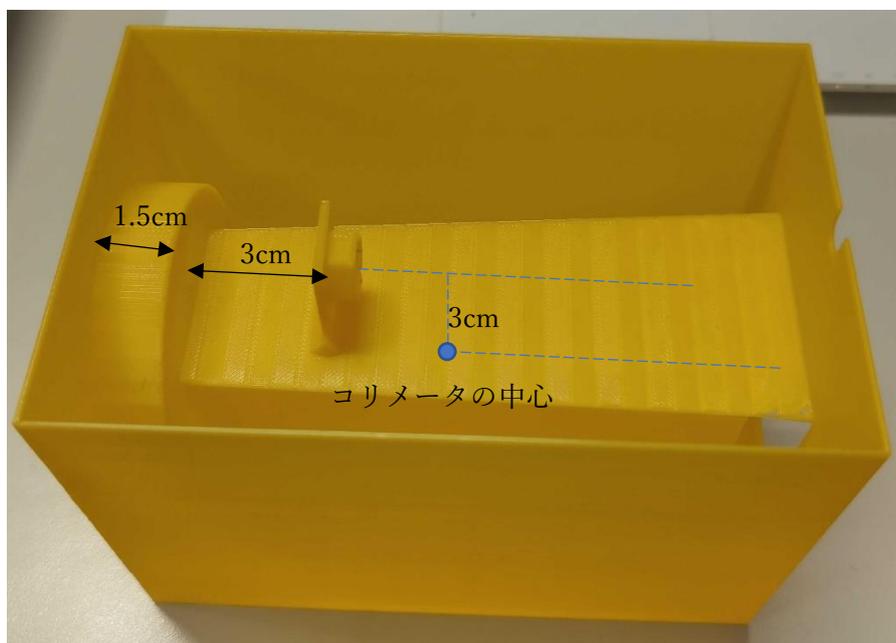


図 5.8 チューブ継手の位置の変更

まず、図 5.9 のように、チューブはビーム管をめぐる凹み部分から 1cm のところまで水平に伸ばし、そこから折り曲げて凹み部分の穴に通すように考えた。

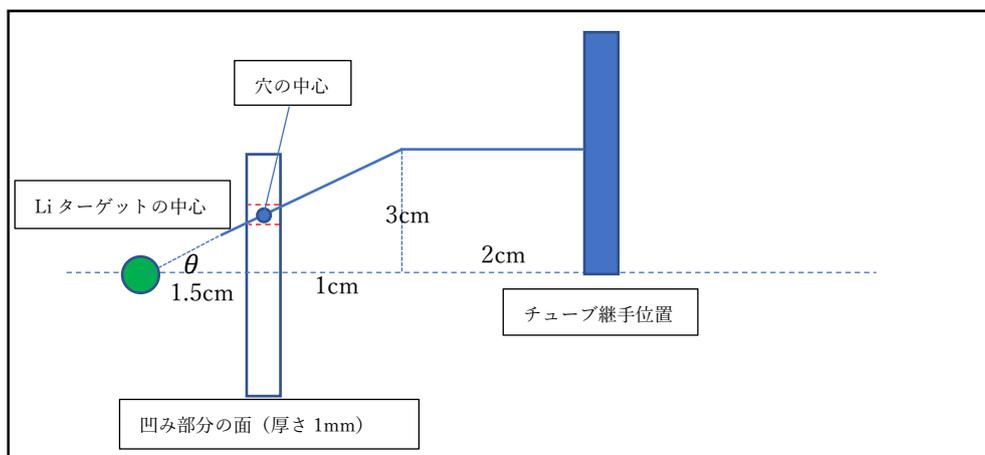


図 5.9 内径 1mm チューブを通す概略図

まず、チューブを通す穴の高さについてだが、Li ターゲットから 2.5cm の位置でチューブの高さは 3cm であり、そこから Li ターゲットに向かってチューブから風が送られてくるというジオメトリである。ビーム管をはめるための凹み部分の面の厚さが 1mm であることに注意して、Li ターゲットからの距離が 1.5cm, 1.6cm の位置でチューブの中心が通過する高さを以下のように算出した。

$$1.5\text{cm 地点のチューブ中心の高さ} : 1.5 \times 3 \div 2.6 = 1.7(\text{cm})$$

$$1.6\text{cm 地点のチューブ中心の高さ} : 1.6 \times 3 \div 2.6 = 1.9(\text{cm})$$

ゆえに、穴の中心の高さは、1.8cm に設定した。

次に、チューブを通す穴の形状についてだが、中性子ビームの方向から見て図 5.10 のように半円と長方形を組み合わせた、縦に長い楕円のような形で穴を空けようと考えた。この穴の長方形の横の長さは、チューブの外径が 1.2mm であることから、穴がチューブを通るように 0.3mm だけ余裕を持たせ 1.5mm とした。この穴の縦の長さ x について、以下のように考えて長さを決めた。

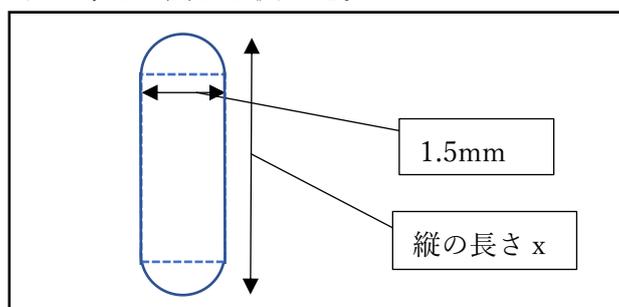


図 5.10 チューブを通すための穴の形状

凹み部分の厚さ 1mm の面を外径 1.2mm のチューブが通過する様子は図 5.11 のようになる。ただし、角度 $\theta$ は図 5.9 のように定めた、Li ターゲット方向にチューブが向かう、水平方向に対するなす角である。

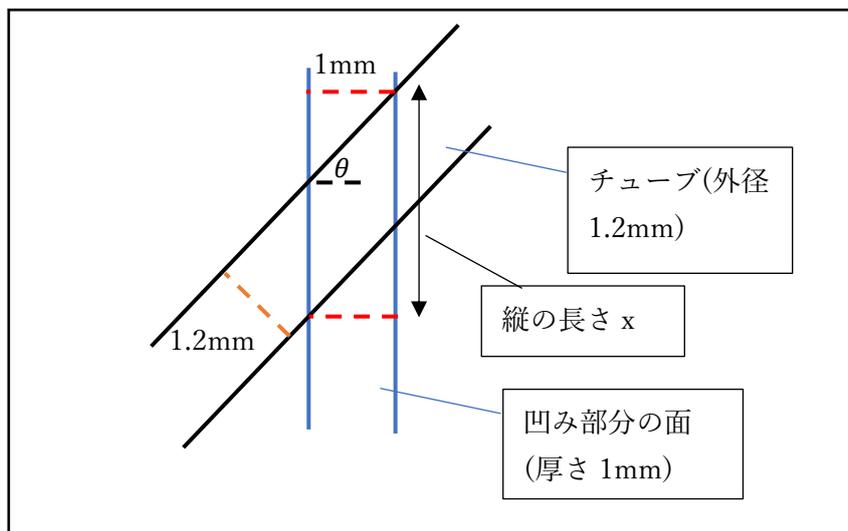


図 5.11 凹み部分の面をチューブが通過する概略図

図 5.11 から、穴の縦の長さ  $x$  は、

$$x = \tan\theta + \frac{1.2}{\cos\theta} [\text{mm}] \quad (5.8)$$

と分かる。図 5.9 から  $\tan\theta = 1.2$  と分かるので、 $\cos\theta = 0.640$  であるから、穴の縦の長さは(5.8)式から、3.07mm と求めた。それ故、穴の縦の長さを 3.1mm とした。このようにして、内径 1mm のチューブを通すための穴の位置や形状を定めることができた。

### 5.2.3 コリメータの作製結果

以上のようにしてコリメータを設計し、3D プリンターで図 5.12 のように造形できた。ただし、Ar 検出器用のコリメータは中性子ビームの実験においてコーン部分を修正し、Xe 検出器用のコリメータとの区別を分かりやすくするため、黄色ではなく青色の PLA で造形し直した。また、図 5.12 のように Ar 検出器用のコリメータにチューブ継手を取り付け、内径 1mm のチューブを通し、コンプレッサでチューブ継手から風を送ってチューブ出口から出てくる風の風量を確認したところ、コリメータの端に取り付けたときと比べて風量が強くなったことを確認した。図 5.9 のモデルで考えれ

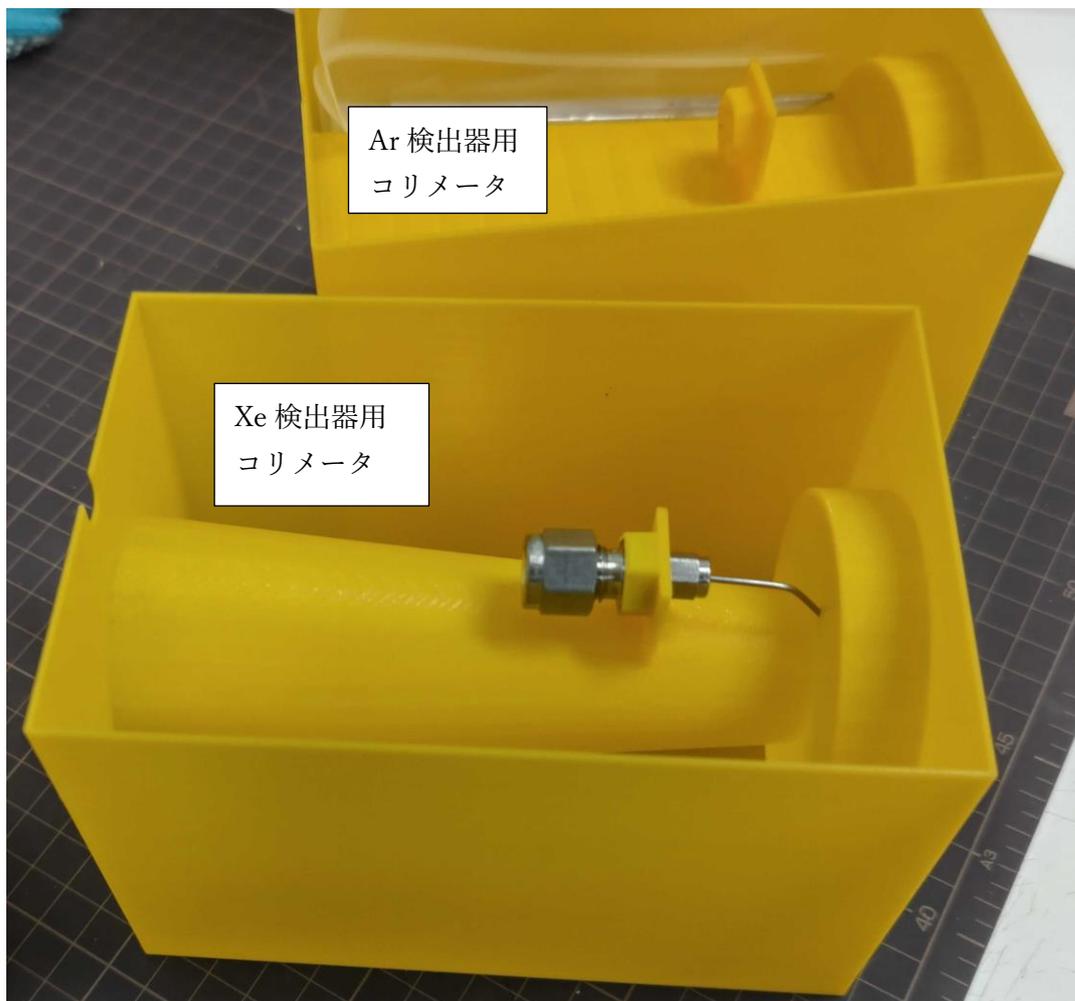


図 5.12 Xe 検出器用と Ar 検出器用の造形したコリメータ

ば、通したチューブの長さは、凹み部分の面から出したチューブの長さが 5mm 程度であったことから、

$$2 + \sqrt{1.1^2 + (3 - 1.7)^2} + 0.5 = 4.2(\text{cm})$$

ほどの長さであることが分かり、図 5.7 からのグラフから、仮に内径 4mm のチューブの長さが 5m とした場合、風の風量は 3 倍以上改善したと考えられる。

続いて、図 5.13 のように作製した Xe 検出器用、Ar 検出器用のコリメータに LiF50%入りポリエチレンを入れた。図 5.13 の Xe 検出器用コリメータには、LiF50%入りポリエチレンがこぼれないようにするための蓋が乗せてある。中性子ビームを照射させる実験の際は、Ar 検出器用コリメータにも同じ蓋を乗せた。



図 5.13 LiF50%入りポリエチレンを入れたコリメータ  
(左：Ar 検出器用、右：Xe 検出器用)

### 5.3 後方シールド

中性子ビームの前方方向についての中性子はコリメータで遮蔽するが、ここでは中性子ビームの後方についてのシールドの設計について述べる。

まず、図 5.14 のような縦 13cm、横 5cm、高さ 10cm の後方シールドを 2 つ用意し、ビーム管に接触しないようにビーム管の横から 2 つを合わせるように設計することを考えた。ビーム管の外径は 34mm であり、ビーム管をはめる部分の半円の直径は 10mm だけ余裕を持たせて直径 44mm として作製した。

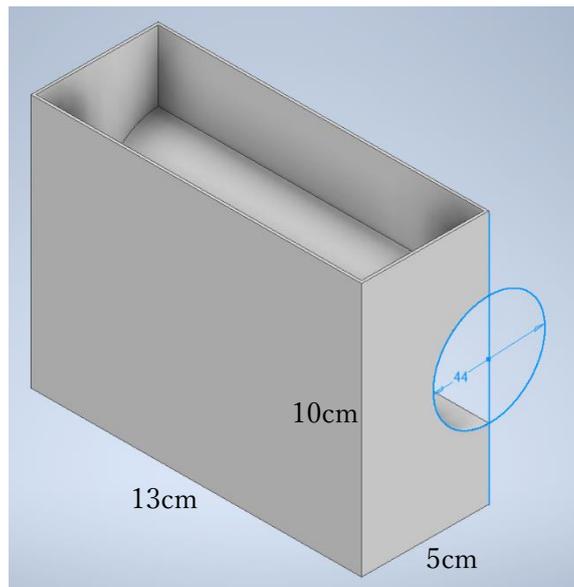


図 5.14 後方シールドの概略図

次に、後方シールドを造形し、図 5.15 のように中に LiF50%入りポリエチレンを敷き詰めた。最後に、後方シールド用に作製した蓋を乗せた。



図 5.15 LiF50%入りポリエチレンが入った後方シールド

#### 5.4 中性子ビーム実験での中性子シールドの配置

中性子ビーム実験では、図 5.2 のように中性子シールドを配置したが、実際の中性子シールドの配置の様子は図 5.16 のようになった。ビーム管の高さに合わせるための土台を用意し、その上に LiF50%入りポリエチレンのブロックを乗せ、30cm 角のポリエチレンブロックの中心にビーム管のビーム口が来るように位置を定め、ビーム管に接触しないように後方シールドをはめ、コリメータをビーム管にはめた。そしてポリエチレンブロックを乗せて積み上げ、図 5.16 のような中性子シールドの配置を行った。

第 7 章で詳細を述べるが、このようにして中性子シールドを配置し、中止しビームの前方方向に BGO シンチレータや Xe ガス検出器を置いて実験を行った。

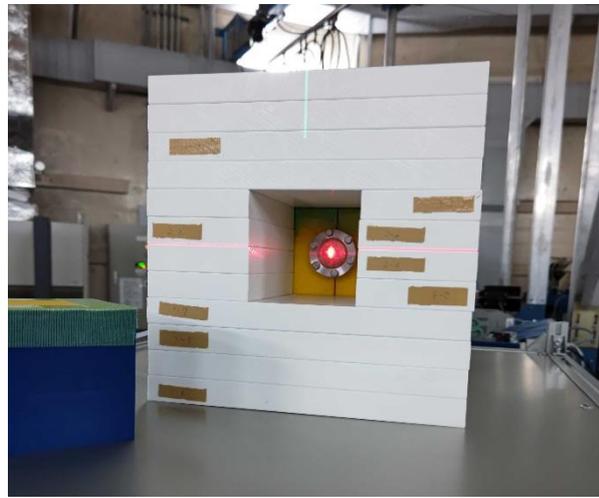


図 5.16 中性子シールドの配置の様子

## 第6章 BGO シンチレータと DRS4

$\gamma$ 線 BG を解析するために、無機シンチレータの一種である BGO シンチレータに PMT がついたものを用い、その信号を DRS4 評価ボードで読んだ。以下に、無機シンチレータの原理や DRS4 評価ボードについて述べる。

### 6.1 無機シンチレータの原理

まず、無機シンチレータの基本的な発光原理を述べる。結晶中では、図 6.1 のようにエネルギーの小さい方から順に価電子帯、禁止帯、伝導帯と分けられている。[14] 価電子帯は電子が構成原子によって束縛され、通常は電子で満たされている。伝導帯は構成原子の束縛エネルギーの影響を受けずに自由に動き回ることができ、通常は空となっている。

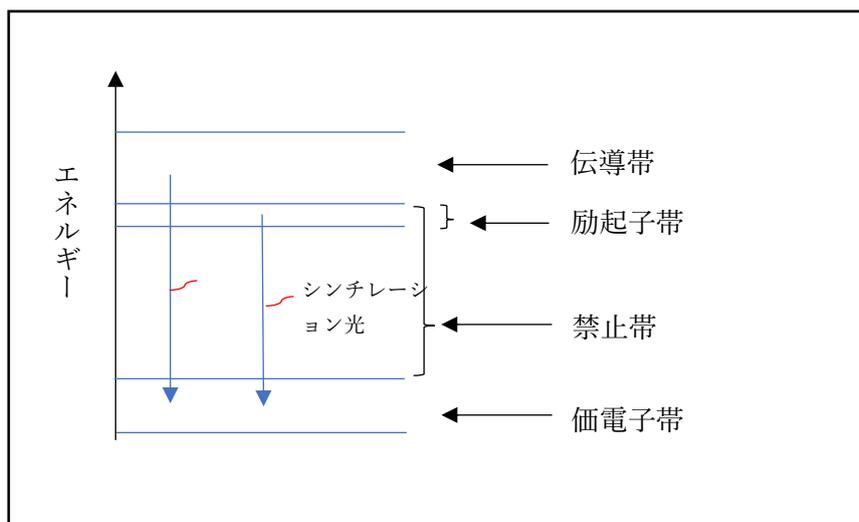


図 6.1 無機シンチレータの発光原理

$\gamma$ 線がこの結晶に入射すると、光電吸収やコンプトン散乱を受け、それに伴い価電子帯の電子はエネルギーを獲得する。大きなエネルギーを価電子帯の電子が獲得した場合、その電子は伝導帯に移り、自由に動き回りながら他の原子を励起させる。また、伝導帯に移ることができるほどのエネルギーを $\gamma$ 線から獲得しなかった場合は、電子は価電子帯の正孔と静電的に束縛された状態になる。この電子正孔対は励起子とよばれるが、励起子はエネルギー準位的に伝導帯の直下の禁止帯の励起子帯に属する。このような電子がやがて価電子帯に落ちるときに、そのエネルギー差分のエネルギーのシンチレーション光が生成される。

BGO( $Bi_4Ge_3O_{12}$ )は例外だが、一般的な無機シンチレータでは価電子帯と伝導帯のエネルギー差が大きいため、少量の不純物を加えて禁止帯にエネルギー準位帯を形成し、その不純物のエネルギー遷移によってシンチレーション光を発光させている。

## 6.2 DRS4

### 6.2.1 DRS4 チップ

DRS4 チップは、差動入力 9 チャンネルを 700MSPS~5GSPS (6GSPS)のサンプリング速度でサンプリングできる Switched capacitor array(SCA) である。アナログ波形は 1 チャンネルあたり 1024 個のサンプリングセルに格納され、サンプリング後に 33MHz クロックのシフトレジスタを介して読み出され、外部でデジタル化することができる。

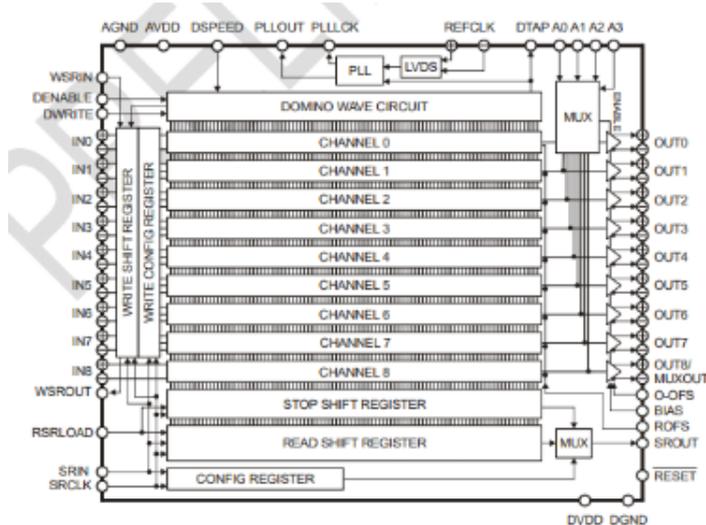


図 6.2 DRS4 チップの概略図[15]

DRS4 チップの特性については、以下の表 6.1 に記す。[16]

表 6.1 DRS4 チップの特性

サンプリング速度	0.7~5 GSPS
チャンネル数	9
帯域幅	950MHz
S/N 比	69dB
ノイズ	0.35mV

## 6.2.2 DRS4 評価ボード

本実験で使用した DRS4 評価ボードは図 6.3 のようなものであり、入力電圧の最大は $\pm 2.5V$ である。後に述べるが、本実験では 10MeV までのエネルギーの  $\gamma$  線を測定するため、PMT 付き BGO シンチレータからの信号を減衰させ、入力電圧 $\pm 2.5V$ を超えないようにした。



図 6.3 DRS4 評価ボード

また、中性子ビーム実験の準備段階で DRS4 評価ボードを Windows 用に使うことのできるソフトウェアを DRS チップホームページ[17]からインストールして BGO シンチレータの信号を測定していたが、イベントレートの表示はされなかった。そこで、イベントレートの表示もしてくれるツールを使うため、中性子ビーム実験の際は DRS4 評価ボードを Mac OS 用に使うことのできるツール類をインストールして解析した。[18]

## 6.3 BGO シンチレータの信号を DRS4 で読むための調整

BGO シンチレータの信号を、DRS4 評価ボードを通して読む際、シンチレータに HV-2200V をかけ、その信号を DRS4 評価ボードに通し、それをパソコンのソフトウェアで見た。上で述べたとおり、DRS4 評価ボードの許容電圧は 2.5V である。したがって、シンチレータの信号が 2.5V を超えないようにする必要がある。

まず、Tl-208 の  $\gamma$  線源を BGO シンチレータの近くに置き、HV-2200V をシンチレータにかけ、その信号をオシロスコープで見たところ、図 6.4 のように 400mV 以上の信号が現れ、中には 1V を超える信号も多く観測した。

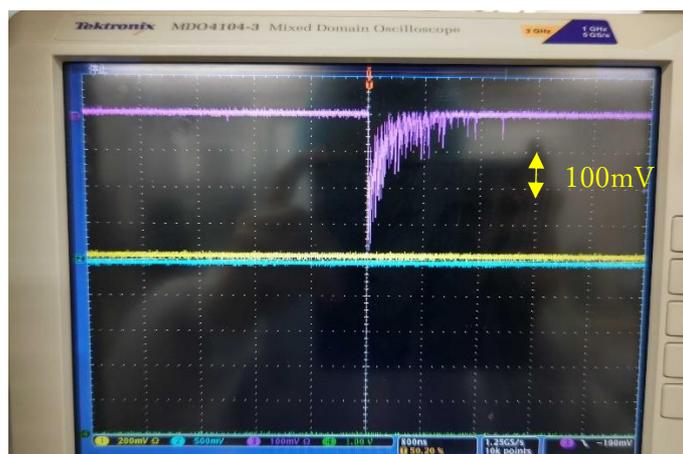


図 6.4(a) : Tl-208 のシンチレータの信号(400mV 程度)

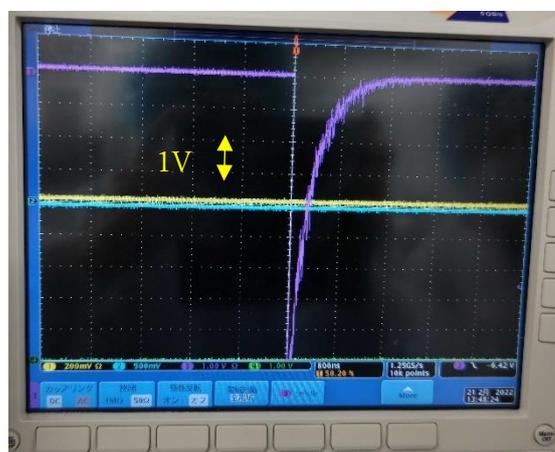
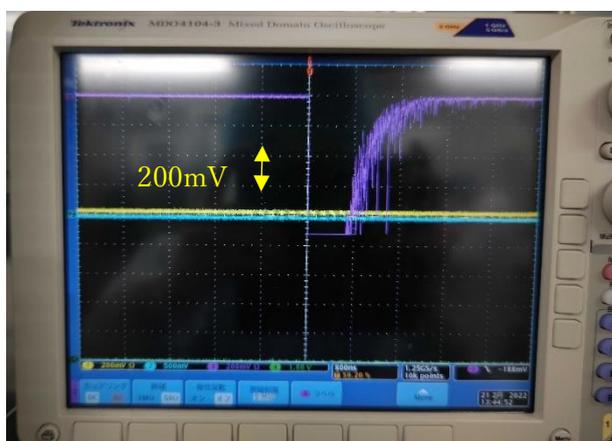


図 6.4(b) TI-208 のシンチレータの信号(1V 以上)

TI-208 から放出される  $\gamma$  線のエネルギーは 2614keV[19]であるから、入射する  $\gamma$  線のエネルギーとシンチレータの信号の大きさとの間に線形性が成り立つと仮定すると、10MeV までの信号を測定しようとした場合、TI-208 のシンチレータの平均的な信号の大きさを 1V と仮定すれば、10MeV の信号の大きさは、

$$1 \times \frac{10}{2.614} = 3.83(V) > 2.5(V)$$

となり、DRS4 の許容電圧を超えてしまう。さらに、DRS4 評価ボードの仕様上、ソフトウェアで測定できる信号の電圧は 1.0V であり、 $-0.5V \sim 0.5V$  の間の電圧しか測定できない。こうしたことから、シンチレータの信号を DRS4 評価ボードに入れる前に減衰させる必要がある。そこで、まず 10MeV までの信号が入れるときに電圧が 0.5V 以内になるように、アッテネータを用いて 20dB(0.1 倍)だけ信号を減衰させるこ

とにした。また、万が一大きな信号が入って DRS4 の許容電圧を超えてしまわないように、図 6.5 のようにツェナーダイオードを双方向につないだ保護回路を用いた。

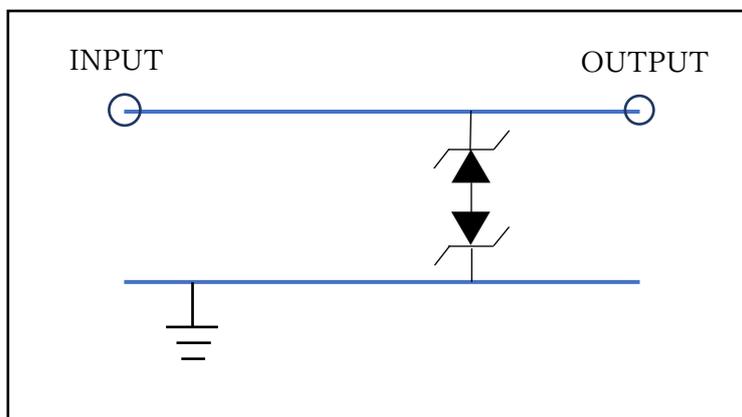


図 6.5 ツェナーダイオードを用いた保護回路

ツェナーダイオードの特性を述べる。まずダイオードの特性として、図 6.6 のように、逆方向の電圧の大きさを増加させると、降伏電圧で逆方向に電流が流れるようになる。[\[20\]](#)

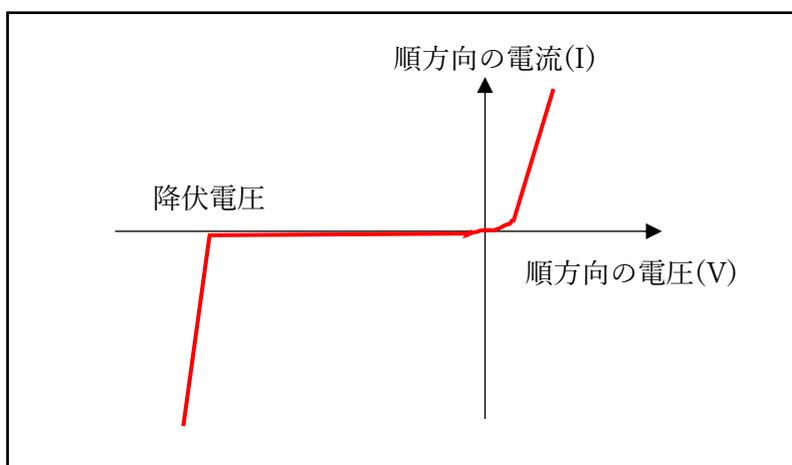


図 6.6 ダイオードの電流-電圧特性[20]

次にツェナーダイオードの特性だが、通常のダイオードと比べて降伏電圧が小さく設定されている。それ故、ツェナーダイオードは定電圧回路などに利用されている。

このようなツェナーダイオードの性質から、図 6.6 のように降伏電圧が 2V のツェナーダイオードを双方向に向けてつないだ回路を用いることで、DRS4 に入る信号の大きさが 2.5V を超えないようにした。

作製した回路を用いて、2.5V以上の電圧の信号をいれても出力信号の電圧が2.5Vを超えていないことを確かめるため、ファンクションジェネレータからパルス波をこの回路に入れ、その出力信号をオシロスコープで確かめた。その結果が図6.7である。入力電圧を2Vから10Vまで変化させて出力電圧を見たが、入力電圧の増加に応じて出力電圧は減衰しているが、出力電圧が2Vを超えてしまった。ツェナーダイオードがうまく機能していない結果が得られた。

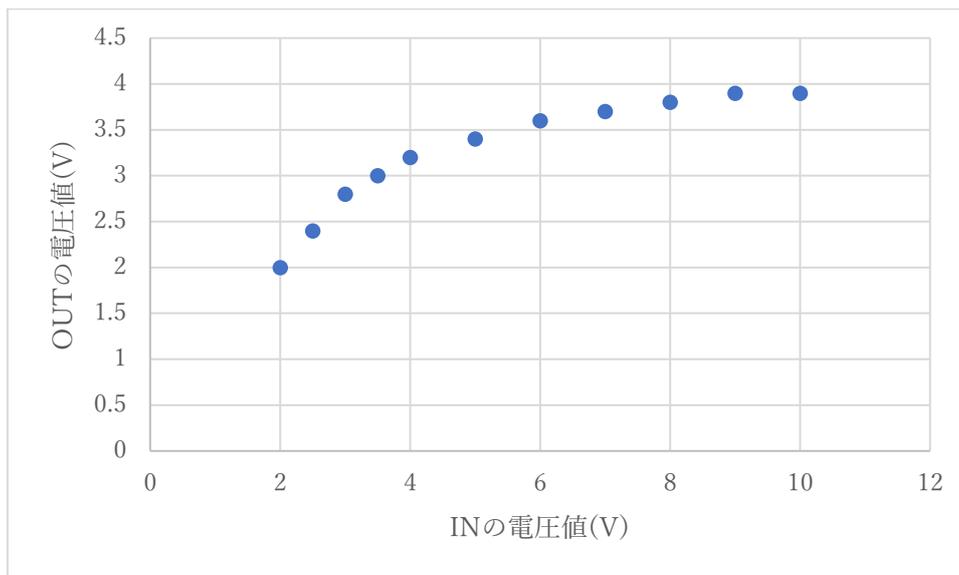


図 6.7 ツェナーダイオード回路の入力電圧と出力電圧の関係

ツェナーダイオードを図6.8のように並列につなぎ、同様に測定して出力電圧を確かめたが、同じように減衰はされるが2.5Vを超える結果が得られた。

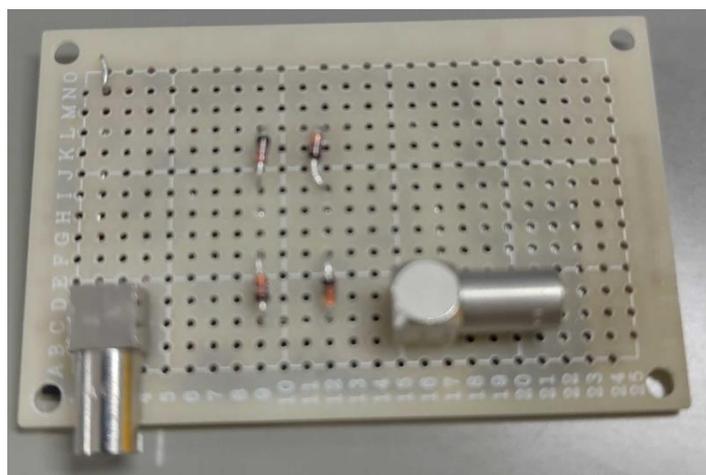


図 6.8 ツェナーダイオードを並列につないだ回路

このように作製したツェナーダイオードの回路がうまく動作しなかったが、2V以上の電圧の信号を入れた場合に減衰させる効果は確かめられたので、このツェナーダイオードの回路も採用した。

最終的に、図 6.9 のように、BGO シンチレータからの信号は、アッテネータによって 20dB 減衰させ、さらにツェナーダイオードの保護回路を通し、その信号を DRS4 に通して信号を見るようにした。

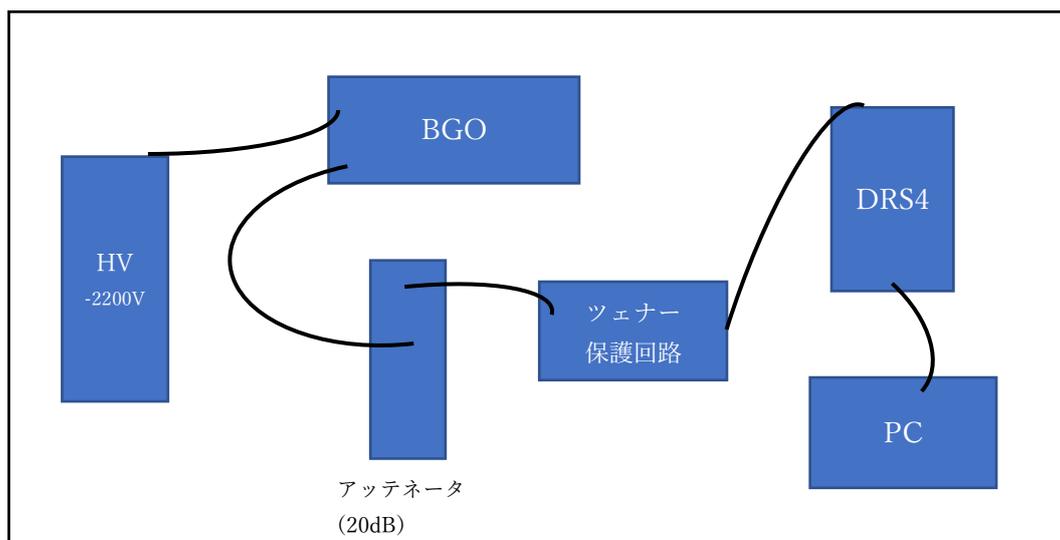


図 6.9 BGO シンチレータの信号を DRS4 で読む概略図

#### 6.4 キャリブレーション

中性子ビームの実験の際、どのエネルギーの $\gamma$ 線がどの程度入ってくるのかを確かめるためにキャリブレーションは不可欠である。そこで、DRS4の信号を読んでキャリブレーションが行えるかを中性子ビーム実験の準備として確かめた。ただし、その際に使用したHV電源は、中性子ビーム実験の際に用いたHV電源とは異なるため、中性子ビーム実験の際に得られたデータに関しては改めてキャリブレーションし直した。

キャリブレーションの際に用いた $\gamma$ 線源はCs-137、K-40、Tl-208である。まずCs-137の $\gamma$ 線をBGOシンチレータに当てて測定したところ、DRS4の典型的な信号として、図 6.10 のような波形が観測できた。ただし、縦軸は電圧(mV)であり、横軸は時間(ns)である。また、この信号波形は0.7GSPSでサンプリングしたものであり、トリガーとして-30mVと設定し、-30mV以上の信号を測定した。測定したイベント数は10000である。

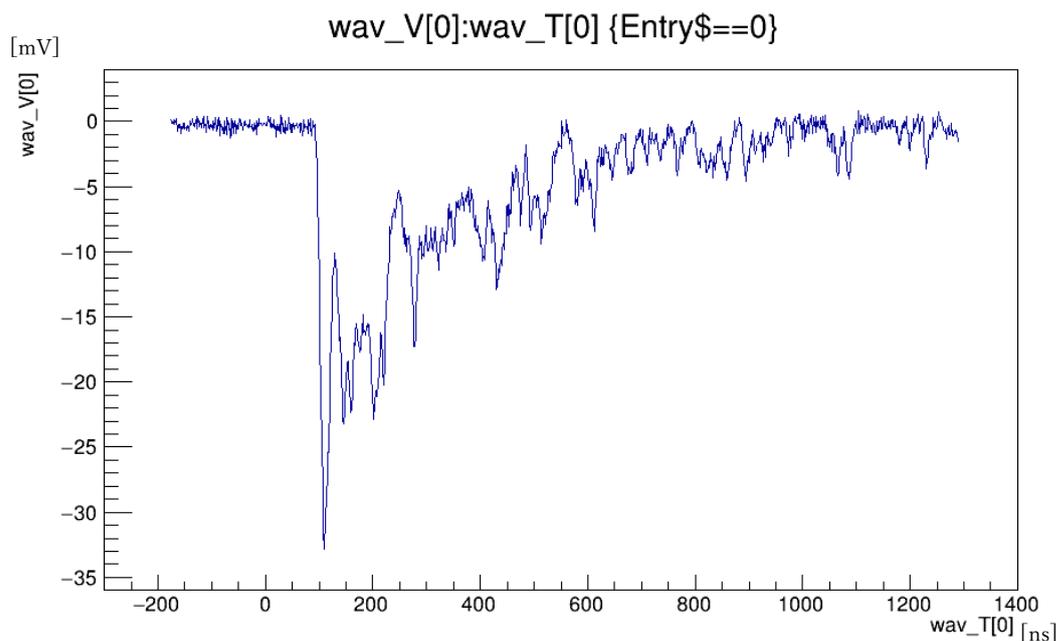


図 6.10 Cs-137 の  $\gamma$  線をシンチレータに当てた際の信号

この信号波形から、 $\gamma$  線が 1 回のイベントでどのくらいのエネルギーを落としたかがわかる。図 6.10 では約-200ns~100nsの間はベースラインを中心にノイズがゆれている部分が見られるが、そのノイズの揺れ方がベースラインに対して対称的とみなし、その間の電圧値の平均を取ることによってそれをベースラインとみなせる。実際には、信号のスタート位置(約-200ns)から 100clock、すなわち、

$$100 \times \frac{1}{0.7 \times 10^9 [1/s]} \approx 140 [ns]$$

の間の電圧値を平均してそれをベースラインとした。このベースラインと信号波形の各点の電圧値との差を出し、それを時間で積分すると  $\gamma$  線が 1 回のイベントで落としたエネルギーに相当する量が出てくる。以下にその理由を述べる。

図 6.10 のような信号は、 $\gamma$  線が BGO シンチレータ内で光電吸収やコンプトン散乱を起こし、その際に  $\gamma$  線が落とした分のエネルギー分の電子が PMT で増倍されて検出した信号である。図 6.10 の縦軸は電圧値が表示されているが、DRS4 では  $50\Omega$  終端で読んでいるため、縦軸の電圧値は電流値と等価である。ゆえに、ベースラインからの各点の電圧値の差を時間で積分すると、1 回のイベントで測定された、PMT で増倍された電荷量が得られる。この電荷量は、 $\gamma$  線が BGO と反応して生じた電子の 1 イベント合計の電荷量の定数倍の値であり、ゆえに  $\gamma$  線が 1 回のイベントで落としたエネルギーに相当する量である。

ベースラインからの各点の電圧値の差を時間で積分した量を”Integral”とすると、落としたエネルギーE との対応関係として、定数を C とすれば、

$$E = (\text{Integral}) \times C \quad (6.1)$$

が成り立つが、実際にキャリブレーションを行った際は、ベースラインからの各点の電圧値の差を足し合わせただけで、時間幅をかけなかった。すなわち、ベースラインからの各点の電圧値の差を足し合わせただけの量を”integral”とすると、サンプリング周波数は 0.7GHz と設定したので、新たな定数を D として、

$$E = (\text{Integral}) \times C = (\text{integral}) \times \frac{1}{0.7 \times 10^9} \times C = (\text{integral}) \times D \quad (6.2)$$

がいえる。この比例定数 D が各  $\gamma$  線を当てて一貫しているかを確認した。

図 6.11 が integral のヒストグラムの様子である。

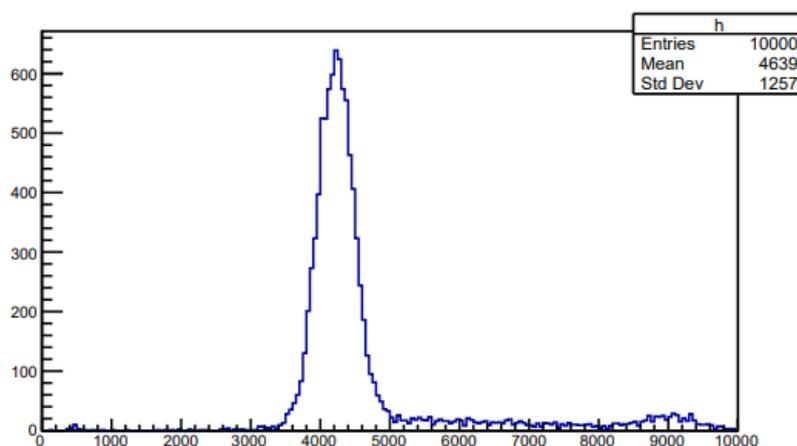


図 6.11 Cs-137 の  $\gamma$  線のヒストグラム

横軸が 4000 あたりのところにピークが見られているが、これは Cs-137 の  $\gamma$  線が光電吸収されたイベントと考えられる。横軸の左側にコンプトン散乱のイベントが見られるはずだが、これはトリガーの電圧値を高く設定しすぎて見えていないのだと考えた。そこで、ピーク部分に関して横軸を x、縦軸を y とし、

$$y = a \times \exp \left[ - \left( \frac{x - b}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (6.3)$$

として  $a, b, \sigma$  を動かしてフィッティングを行ったところ、図 6.12 のようにフィッティングでき、

$$\begin{aligned}
 a &= 6.16439 \times 10^2 (\pm 8.78584) \\
 b &= 4.22827 \times 10^3 (\pm 2.96747) \\
 \sigma &= 3.77219 \times 10^2 (\pm 3.38321)
 \end{aligned}$$

と得られた。Cs-137 から出てくる  $\gamma$  線のエネルギーは 662keV であるため、得られた  $b$  の値は光电吸収で落としたエネルギー 662keV に対応する。[19]

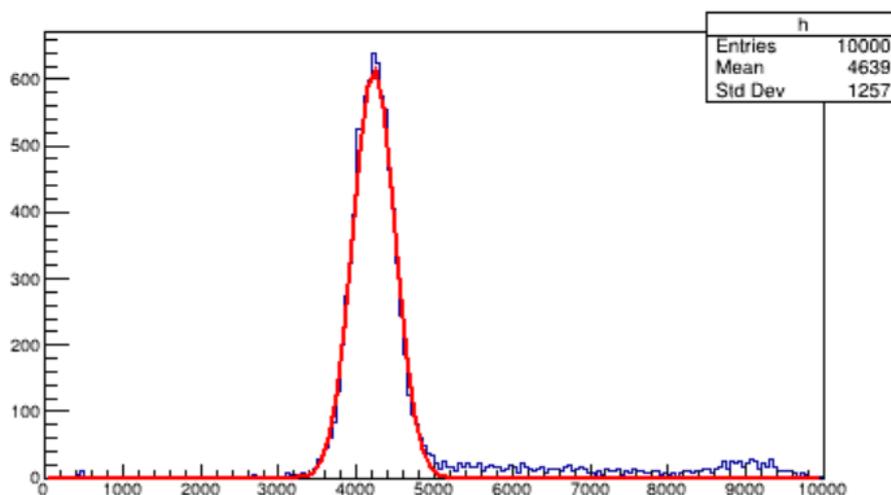


図 6.12 Cs-137 の  $\gamma$  線のヒストグラムのフィッティング結果

次に、K-40、Tl-208 の  $\gamma$  線を BGO シンチレータに当てた。K-40 は環境  $\gamma$  線であり、1460keV のエネルギーの  $\gamma$  線を放出する。[19] Tl-208 は前述の通り、2614keV の  $\gamma$  線を放出する。図 6.13(a),(b) がそれぞれ DRS4 で測定した K-40, Tl-208 の  $\gamma$  線の典型的な波形である。ただし、Cs-137 の  $\gamma$  線を測定した際にコンプトン散乱のイベントが見えなかったため、トリガーレベルを下げ、-17mV とした。また、測定したイベント数はどちらも 10000 イベントである。

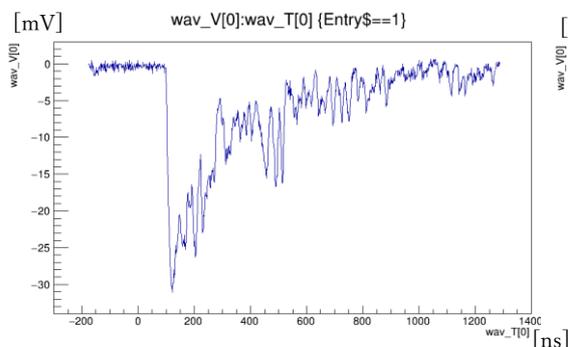


図 6.13(a) K-40 の  $\gamma$  線の信号波形

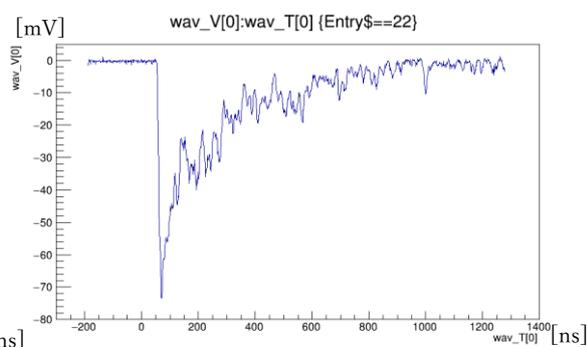


図 6.13(b) Tl-208 の  $\gamma$  線の信号波形

続いて、K-40、Tl-208 の  $\gamma$  線の信号を Cs-137 の  $\gamma$  線の信号の解析と同様にして解析を行ったところ、それぞれ図 6.14、図 6.15 のようになった。

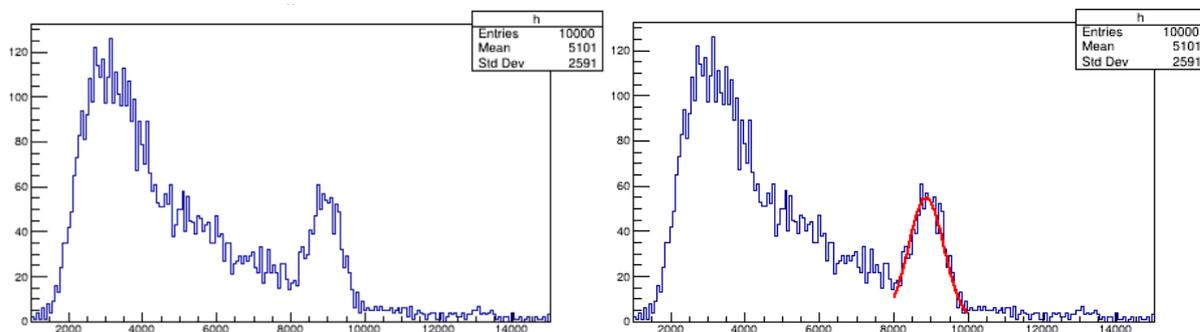


図 6.14 K-40 の  $\gamma$  線のヒストグラムとフィット結果

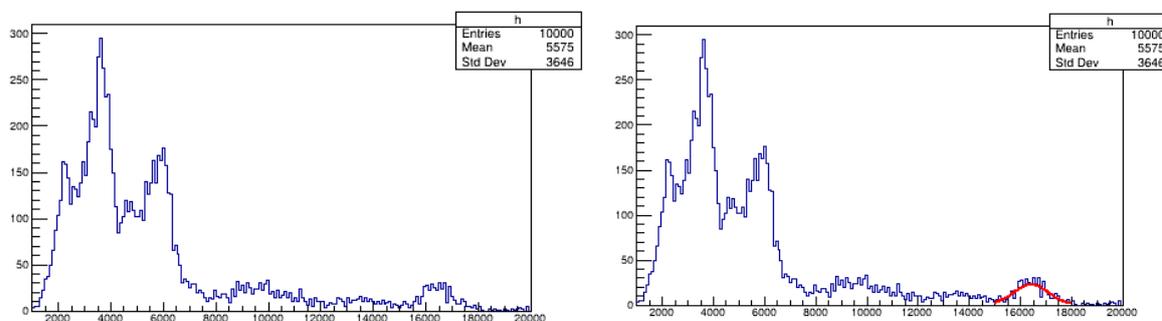


図 6.15 Tl-208 の  $\gamma$  線のヒストグラムとフィット結果

K-40 の  $\gamma$  線のヒストグラムについてだが、図 6.14 のように横軸 integral が 3000～8000 の間の範囲にコンプトン散乱のイベントが見えている。Integral が 3000 以下でイベント数が少なくなっているのは、トリガーを -17mV としたことで、それより小さい信号は除かれたからだと考えられる。また、integral が 8000～10000 の間で光電吸収のイベントと見られるピークが見える。このピークについて、(6.3)式でフィッティングを行ったところ、

$$\begin{aligned}
 a &= 1.85342 \times 10^1 (\pm 0.873712) \\
 b &= 8.87071 \times 10^3 (\pm 19.7770) \\
 \sigma &= 7.00772 \times 10^2 (\pm 28.7884)
 \end{aligned}$$

と得られた。

Tl-208 の  $\gamma$  線のヒストグラムについてだが、integral が 15000～18000 の範囲で Tl-208 の  $\gamma$  線の光電吸収のイベントに相当するピークが現れている。そのピーク付近の

イベント数が少ないのは、設定したトリガーレベルが-17mVと小さく、そのために他の比較的小さなエネルギーのBGな $\gamma$ 線が多く入ってしまったためと考えられる。このピークについて、(6.3)式でフィッティングを行ったところ、

$$\begin{aligned} a &= 6.16948(\pm 0.524140) \\ b &= 1.63600 \times 10^4(\pm 43.6775) \\ \sigma &= 9.91669 \times 10^2(\pm 84.7852) \end{aligned}$$

と得られた。

Tl-208の $\gamma$ 線のヒストグラムについてだが、図6.15のようにintegralが3500付近のところと6000付近のところに2つピークが見られる。まずintegralが3500付近のピークについてだが、仮に $\gamma$ 線が0keVだけエネルギーを落とした場合にintegralは0という線形関係を仮定すると、このピークのエネルギーはおよそ、

$$\frac{3500}{16360} \times 2614 = 559 \approx 511(\text{keV})$$

となり、陽電子が電子と対生成した際に生成される光子のエネルギーに近い。このことから、Tl-208の $\gamma$ 線が他の $\gamma$ 線源の $\gamma$ 線に比べてエネルギーが高く、そのために電子対生成が起きる確率が比較的高く、その電子対生成の信号を観測した可能性があると考えた。Integralが6000付近のピークについては、原因が分からなかった。

Cs-137, K-40, Tl-208の $\gamma$ 線のデータのフィット結果から、それぞれの $\gamma$ 線のエネルギーについてキャリブレーションを行ったところ、エネルギーのピークの中心値とピーク幅について、それぞれ図6.16、図6.17のように得られた。ただし、ピークの中心値についてのフィット関数は、(6.2)式のようにエネルギーとintegralで線形関係を仮定し、ピーク幅 $\Delta integral$ については、エネルギー $E$ と分解能によるエネルギー幅 $\Delta E$ の関係として、

$$\frac{\Delta E}{E} \propto \frac{1}{\sqrt{E}} \quad (6.4)$$

がいえるので、[21]新たな定数をFとして、

$$\Delta integral = D \times \Delta E = F \times \sqrt{E} \quad (6.5)$$

が成り立つ。ゆえに、ピーク幅に関しては(6.5)式を仮定してフィッティングを行った。

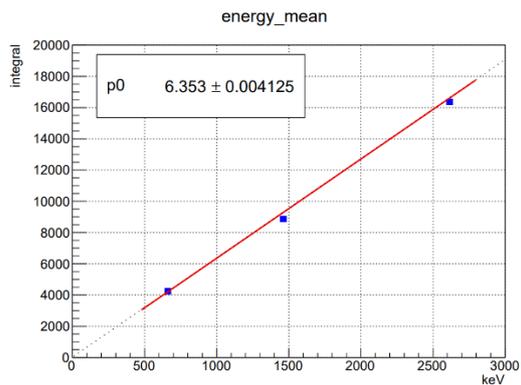


図 6.16 ピーク値のフィッティング結果

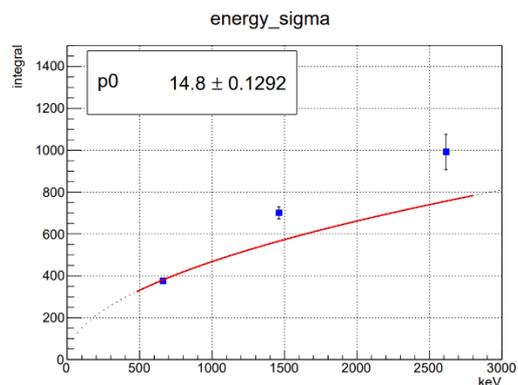


図 6.17 ピーク幅のフィッティング結果

図 6.16 のように、integral のピーク値とエネルギーについて線形関係が確認できたが、図 6.17 のように、integral のピーク幅とエネルギーに関しては(6.5)式でフィッティングしたグラフとプロット点があまり一致しない結果となった。Cs-137 の  $\gamma$  線を当てたデータによる  $\Delta integral$  が比較的小さいので、Cs-137 について測定し直してみる必要があると考えられる。

## 6.5 DRS4 の Trigger out の信号の確認

DRS4 評価ボードにという Trigger out 出力チャンネルがあり、この出力信号を確かめたところ、busy 信号のような信号を出していることが以下の通りに分かった。

まずファンクションジェネレータからの信号を分け、オシロスコープと DRS4 に入力した。次に、DRS4 の Trigger out の信号をオシロスコープの別なチャンネルにつないだ。そして、ファンクションジェネレータの信号の周波数を 10Hz にして Trigger out の信号を見たところ、図 6.18 のようになった。

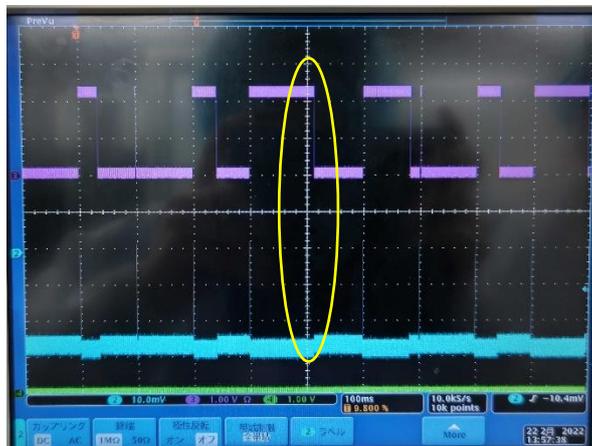


図 6.18 10Hz のパルス波(青)を入力したときの Trigger out の信号(赤)

図 6.18 のように、Trigger out の信号は基本的にパルス波が入力されると信号が立ち上がり、一定時間経つと Trigger out が解除されている。しかし、図 6.18 の黄色で囲んだ部分では、パルス波の入力の前後で、Trigger out が立ち上がりっぱなしであった。パルス波の入力に対し、Trigger out の立ち上がった回数を数えたところ、パルス波を 90 本入力して Trigger out は 81 回立ち上がった。

次に、10Hz のパルス波を DRS4 に入力して、DRS4 のソフトウェアで、100 秒で何イベントが記録されるかを確認した。DRS4 のソフトウェアではデータ保存する際に何イベントが保存されたかをライブタイムで見ることができるが、100 秒の経過時点で 926 イベントが記録されていた。1000 イベント入力したうち 926 イベントが検知されたことになるが、この割合はオシロスコープで確認した、パルス波の入力本数に対する Trigger out の立ち上がり回数の割合とほぼ等しいことが分かる。

続いて、入力するパルス波の周波数を 25Hz にして同様にオシロスコープで Trigger out の信号を確認したところ、図 6.19 のようになった。

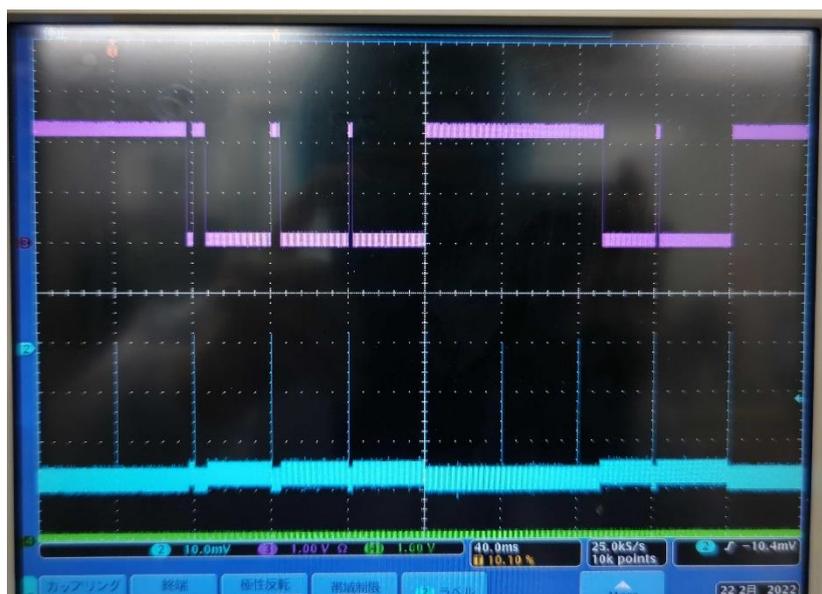


図 6.19 25Hz のパルス波(青)を入力したときの Trigger out の信号(赤)

10Hz のパルス波を入力したときと比べて、25Hz のパルス波を入力したときの方が Trigger out の立ち上がった回数が少なくなっていることが分かる。オシロスコープでパルス波の入力本数に対する Trigger out の立ち上がり回数を数えたところ、90 本のパルス波を入力して Trigger out は 54 回だけ立ち上がった。また、25Hz のパルス波を DRS4 に入力して、DRS4 のソフトウェアで、40 秒で何イベントが記録されるかを確認したところ、516 イベントが記録された。1000 イベント入力して 516 イベントが

検知されたことになり、この割合とオシロスコープで測定したときの Trigger out の立ち上がった回数を入力パルス数に対する割合に近い結果が得られた。

こうしたことから、DRS4 の Trigger out からは busy 信号が出ている可能性があると考えた。そこで、中性子ビーム実験で livetime を見積もるため、図 6.20 のように、測定時間(realtime)に対し、Trigger out の信号を veto に通し、その信号と clock generator の clock とアンドを取って、その信号の clock 数を livetime の clock 数とみなして中性子ビーム実験で livetime を見積もることにした。

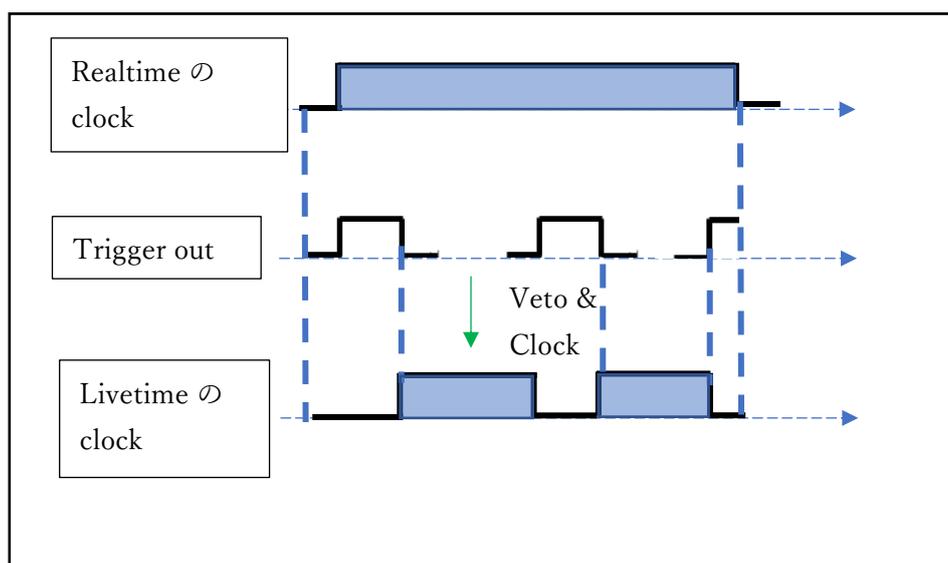


図 6.20 Realtime と Livetime

具体的な配線の繋ぎ方を述べる。まず、clock generator からカウンターのチャンネルと Coincidence ロジックユニットに入力する。次に、Trigger out の信号を TTL から NIM に変換し、その信号を Coincidence ユニットの veto につなぐ。この clock と Trigger out の veto とアンドを取った Coincidence からの出力を、カウンターの別なチャンネルにつなぐ。このようにして Realtime のクロック数と Livetime のクロック数を測定した。Clock generator の周波数は 10kHz と設定した。

## 第7章 中性子ビーム実験の $\gamma$ 線解析

本実験では、Xe 検出器に Xe ガスを封入せず、中性子シールドがある場合とそうでない場合、また Xe 検出器を置いた場合とそうでない場合とで BG $\gamma$  線のイベントレートがどのように変化するかを測定した。

### 7.1 中性子ビーム実験の実験方法

まず本実験では、中性子フラックス測定用に、He-3 をポリエチレンで包んだ比例計数管、電流モニタ(AIST)、ボナー球(AIST)が用いられ、中性子ビームのエネルギー幅測定用に He-3(AIST)が用いられた。そして、 $\gamma$  線測定検出器として、低エネルギー $\gamma$  線測定用に GAGG、高エネルギー $\gamma$  線測定用に BGO が用いられた。

次に、検出器などの配置について述べる。図 7.1 のように「原点」、「モニタ 1」、「モニタ 2」、「後方」、「裏」と置く場所を定め、「後方」には He-3(AIST)を実験の間置いていた。また、Xe 検出器を配置しない場合には「裏」の位置に置いていた。また、中性子ビームの方向に対し、「モニタ 1」、「モニタ 2」は  $60^\circ$  の方向に置き、ビーム口からの距離が 1m となるように置いた。「原点」の位置はビーム口からの距離を 1m に保ったまま、測定によってビーム方向に対する角度を  $10^\circ$  刻みで変化させた。本実験で行った全測定条件は表 7.1 の通りである。

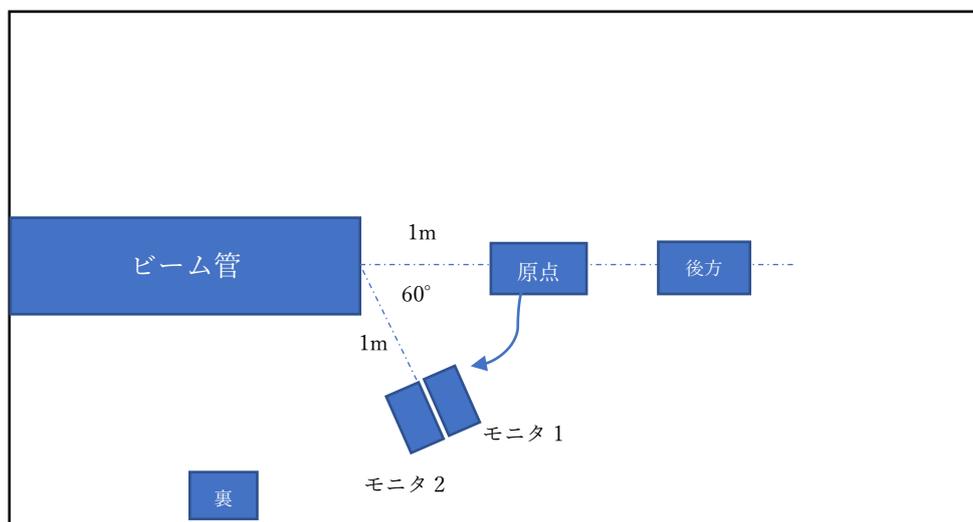


図 7.1 検出器の配置の概略図

表 7.1 全測定条件

測定番号	中性子シールド	原点	モニタ 1	モニタ 2	後方	備考
run001	なし	ボナー球 (シャドーコーンあり)	He-3(PE)	GAGG BGO	He-3 (AIST)	Cs-137 線源あり
run002	なし	ボナー球 (シャドーコーンなし)	He-3(PE)	GAGG BGO	He-3 (AIST)	Cs-137 線源あり
run003	なし	He-3(PE) 0度		GAGG BGO	He-3 (AIST)	Cs-137 線源あり
run004	なし	He-3(PE) 10度		GAGG BGO	He-3 (AIST)	Cs-137 線源あり
run005	なし	He-3(PE) 20度		GAGG BGO	He-3 (AIST)	
run006	なし	He-3(PE) 30度		GAGG BGO	He-3 (AIST)	
run007	なし	He-3(PE) 40度		GAGG BGO	He-3 (AIST)	
run008	なし	He-3(PE) 50度		GAGG BGO	He-3 (AIST)	
run009	なし	He-3(PE) 0度		GAGG BGO	He-3 (AIST)	
run010	なし	He-3(PE) 10度		GAGG BGO	He-3 (AIST)	
run011	なし	GAGG BGO	He-3(PE)		He-3 (AIST)	
run012	あり	ボナー球 (シャドーコーンあり)	He-3(PE)	GAGG BGO	He-3 (AIST)	
run013	あり	ボナー球 (シャドーコーンなし)	He-3(PE)	GAGG BGO	He-3 (AIST)	
run014	あり	He-3(PE) 0度		GAGG BGO	He-3 (AIST)	
run015	あり	He-3(PE) 10度		GAGG BGO	He-3 (AIST)	

run016	あり	He-3(PE) 10度		GAGG BGO	He-3 (AIST)	
run017	あり	He-3(PE) 20度		GAGG BGO	He-3 (AIST)	
run018	あり	He-3(PE) 30度		GAGG BGO	He-3 (AIST)	
run019	あり	He-3(PE) 40度		GAGG BGO	He-3 (AIST)	
run020	あり	He-3(PE) 50度		GAGG BGO	He-3 (AIST)	
run021	あり	GAGG BGO	He-3(PE)		He-3 (AIST)	
run022	あり		He-3(PE)		He-3 (AIST)	
run023	あり	XeTPC	He-3(PE)	GAGG BGO	He-3 (AIST)	

本実験では、これらの測定データを用いて、第 6.5 章で述べたような DRS4 の Trigger out の信号を用いて測定したイベントレートと Mac OS 用に使用できる DRS4 コードによって測定したイベントレートの比較を行った。また、 $\gamma$  線のエネルギーのキャリブレーションのため、データ数が比較的多く取れた測定番号 run003 の Cs-137 の  $\gamma$  線のデータを用いてキャリブレーションを行った。さらに、キャリブレーション結果を用いて、中性子シールドを置いた場合(run022)とそうでない場合(run011)のイベントレートのエネルギー分布を作成し、比較を行った。また、XeTPC を置いた場合(run023)とそうでない場合とでイベントレートのエネルギー分布を作成し、比較を行った。XeTPC を置かなかつた場合についてだが、XeTPC を置いたときとの対照実験となるデータは取らなかつたため、代わりに He-3(PE)をビーム方向から 50 度の位置に置いた実験(run020)のデータを用いた。

## 7.2 解析結果

### 7.2.1 イベントレートの整合性の確認

まず、第 6.5 章で述べたような DRS4 の Trigger out の信号を用いて測定したイベントレートと DRS4 コードによって測定されたイベントレートの比較を行った。DRS4 の Trigger out の信号を用いて算出したイベントレートについては、データの全イベン

ト数を、測定から得られた livetime で割ることによって求めた。DRS4 コードによって測定されたイベントレート (scaler[4]) についてだが、その算出方法は、あるイベントの直前の 100ms からイベントレート [Hz] を算出している。図 7.2 は測定番号 run011 のイベントレートの分布だが、その分布の平均値を  $\gamma$  線のイベントレートとして採用した。

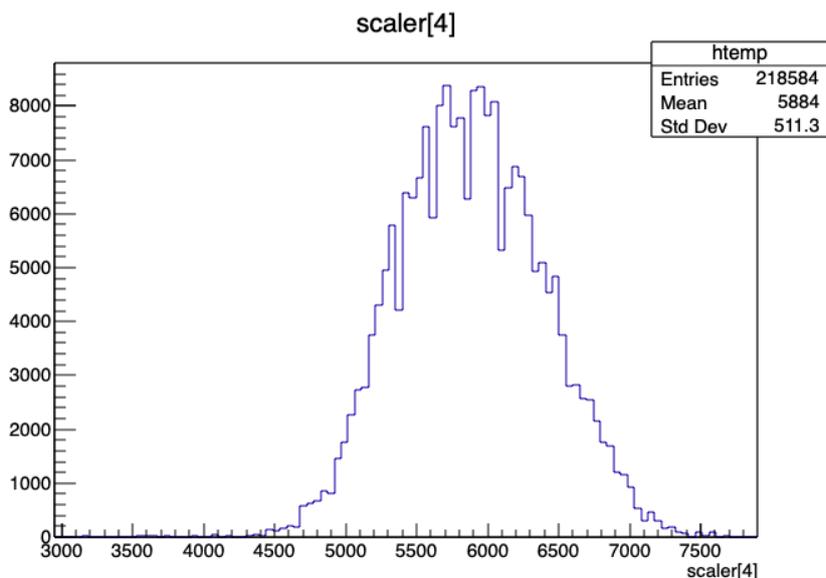


図 7.2 run011 のイベントレートの分布

結果は図 7.3、図 7.4 のようになった。ただし、ハードウェアを用いて測定したイベントレートについては、正しく測定できなかったり、記録のし忘れなどによって算出できなかったものがある。

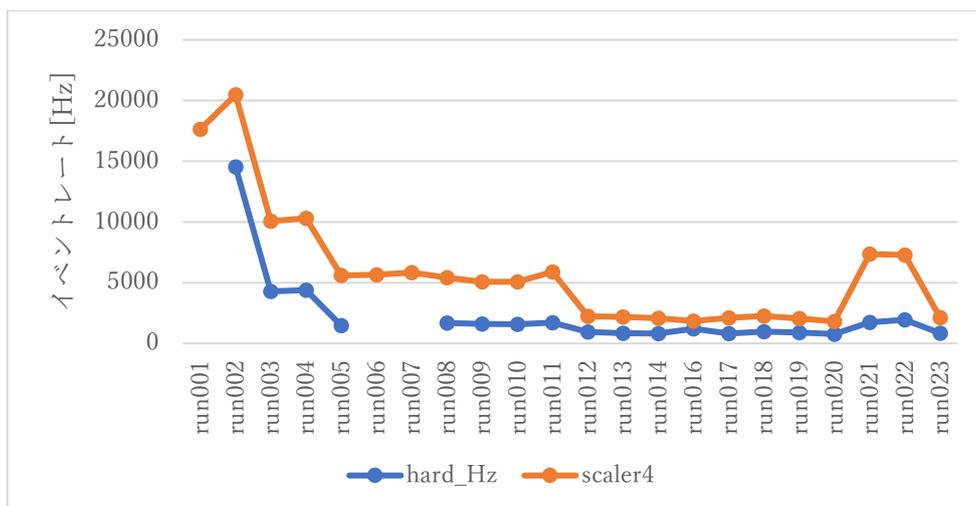


図 7.3 ハードウェアと scaler[4] のイベントレートの比較

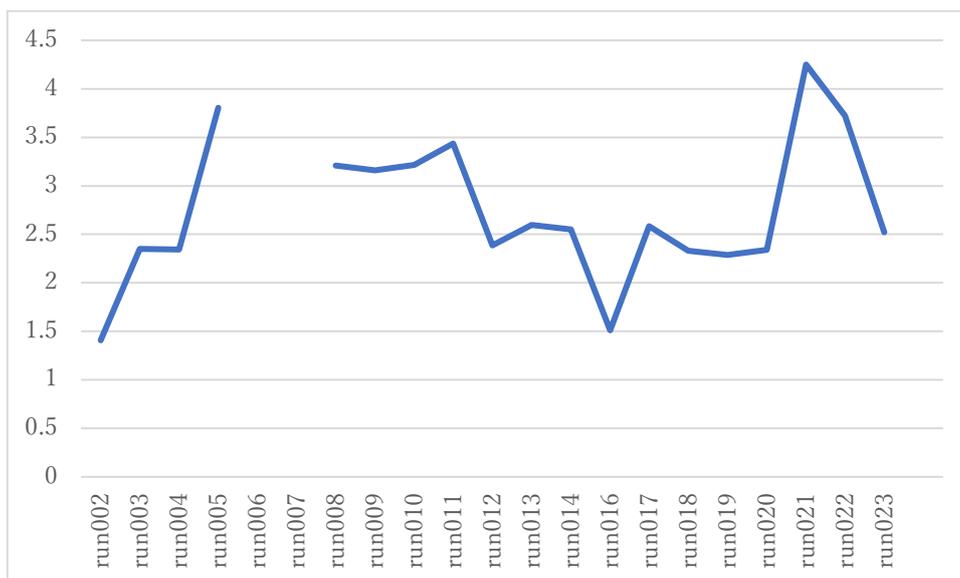


図 7.4 scaler[4]のイベントレートをハードウェアから求めたイベントレートで割ったグラフ

図 7.3 のように、互いの算出したイベントレートに相関はあるが、図 7.4 のように DRS4 コードで記録されたイベントレートは、ハードウェアの測定から算出したイベントレートの 1.5~4 倍となっており、イベントレートが一致しなかった。

この結果を受けて、どちらの測定が正しくイベントレートを測定できているのか考える必要が出てきた。そこで、まずハードウェアの測定から算出したイベントレートが間違っていると仮定する。すると、本来よりもイベントレートが低く算出していることになるが、これは livetime の長さを長く見積もっていることになる。その場合、図 7.5 のように、Trigger out が本来 busy であるにも関わらず勝手に解除され、それにより livetime が長く見積もられている可能性があると考えた。

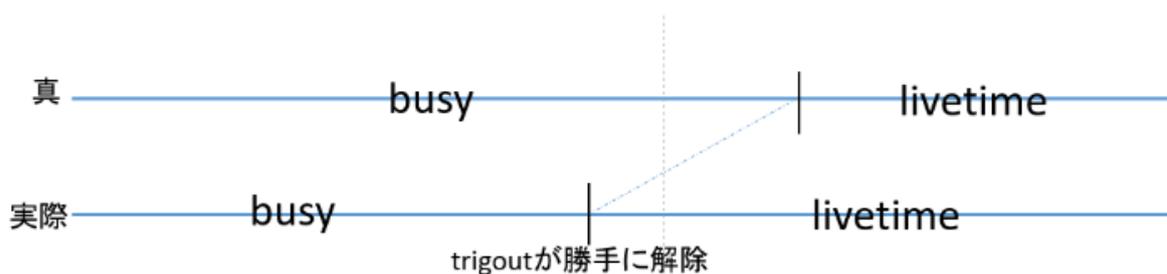


図 7.5 Trigger out が勝手に解除された場合

次に、DRS4 コードで記録されたイベントレートが間違っていると仮定する。この場合、イベントレートが本来よりも高く見積もられていることになる。DRS4 コードではイベントレートが直近 100ms の間でイベント数を数えて算出していることを考慮すると、イベントレートが本来よりも高く見積もられてしまう可能性として、図 7.6 の

ように、イベントの間隔に 100ms よりも十分に長い時間の空きが生じた場合を考え  
た。図 7.6 の A から B の間に空いた時間を  $T$  とすると、B 時点でのイベントレートの  
正しい値は、 $1/T[\text{Hz}]$  であるが、実際は  $1/(100\text{ms})$ 、すなわち 10Hz と算出されてし  
まう。 $T > 100\text{ms}$  という仮定から、この場合はイベントレートが真の値よりも高く見積  
もっていることになる。

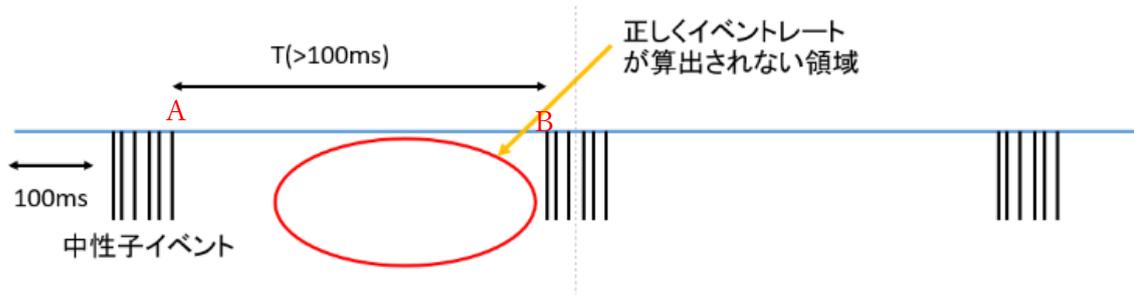


図 7.6 イベントの間隔が長くなった場合

このようにハードウェアの測定によるイベントレート、DRS4 コードによるイベン  
トレートのそれぞれについて誤りである場合を考えましたが、結局どちらが正しいかを判  
断できなかった。今回は、DRS4 コードによるイベントレートを信頼して解析を続け  
ることにした。

## 7.2.2 キャリブレーション

前述の通り、今回は Cs-137 線源を用いた run003 のデータをキャリブレーション用  
に用いた。まず、第 6.4 章のように、得られた信号波形データから積分値を算出し、  
それをヒストグラムにしたところ、図 7.7 のようになった。ただし、今回は第 6.4 章  
のキャリブレーションとは異なり、時間で積分した Integral の値を横軸に用いてい  
る。縦軸はイベント数である。

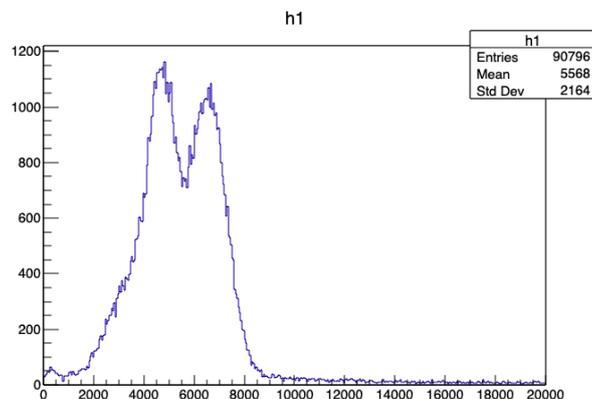


図 7.7 run003(Cs-137 線源あり)の Integral の分布

図 7.7 のように、Integral の値が 5000,7000 のそれぞれにピークが見られ、Cs-137 線源による  $\gamma$  線の他に、別な  $\gamma$  線が観測できた。Cs-137 線源の  $\gamma$  線のピークを判定するため、東北大の実験室であらかじめキャリブレーションのために測定して求めておいた(6.1)式のエネルギー  $E$  と Integral を結びつける式、 $E = (\text{Integral}) \times C$  の定数  $C$  を代入し、横軸をエネルギーに直したところ、図 7.8 のようになった。

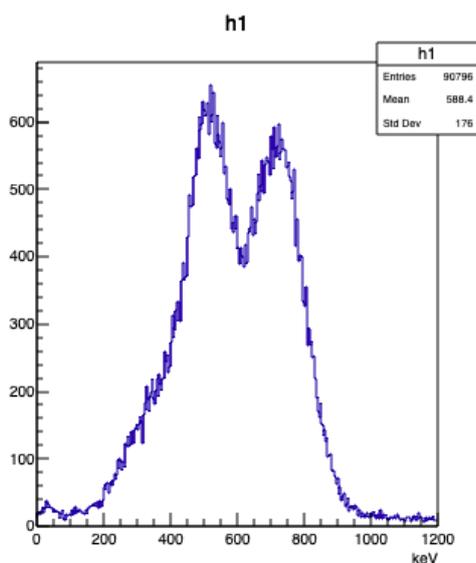


図 7.8 run003 データのエネルギー分布

東北大の実験室で用いた HV 電源と中性子ビーム実験の際に用いた HV 電源は異なるため、HV を -2200V と設定しても実際は互いに異なっていた可能性があり、その場合は PMT による電荷増幅度が異なるため、東北大の実験室であらかじめ求めていたキャリブレーションファクターである定数  $C$  は必ずしも中性子ビーム実験のものとは一致しない。実際に、図 7.8 のように、Cs-137 線源の  $\gamma$  線のエネルギーは 662keV であるが、その位置にはピークが見られない。しかし、HV を -2200V と共通の設定をしていることから、実際にかかる電圧は互いにあまり異ならず、それ故 PMT による増幅度もあまり変化しないと考え、662keV に近い、700keV あたりに見られるピークを Cs-137 の  $\gamma$  線のピークであると判断した。そこで、このピークに対してフィッティングを行ってピークを中心値を求め、その中心値が 662keV になるようにキャリブレーションファクターである定数  $C$  を修正し、ヒストグラムを図 7.9 のように修正した。この修正した定数  $C$  を用いて解析を続けた。

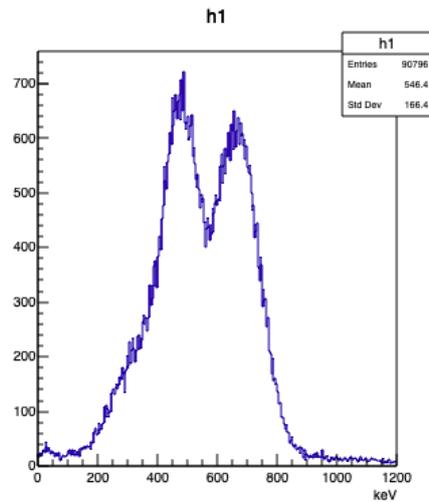


図 7.9 修正した run003 データのエネルギー分布

### 7.2.3 中性子シールドの有無によるイベントレートのエネルギー分布の比較

中性子シールドを置いた場合とそうでない場合で、イベントレートがエネルギーによってどのように変化するかを解析した。用いた測定データは、コリメータを用いず BGO をビーム口から 1m の距離でビーム方向に対して角度が 0 度のところに置いたデータ run011 と、BGO の位置は同じだがコリメータを用いたデータ run022 である。

まず run011 のデータから、縦軸イベント数、横軸エネルギー(keV)のヒストグラムを作成したところ、図 7.10 のようになった。ただし、h1 は 0~1200keV のイベント数のエネルギー分布を表しており、h2 は 0~3500keV、h3 は 0~10000keV のイベント数のエネルギー分布を表している。

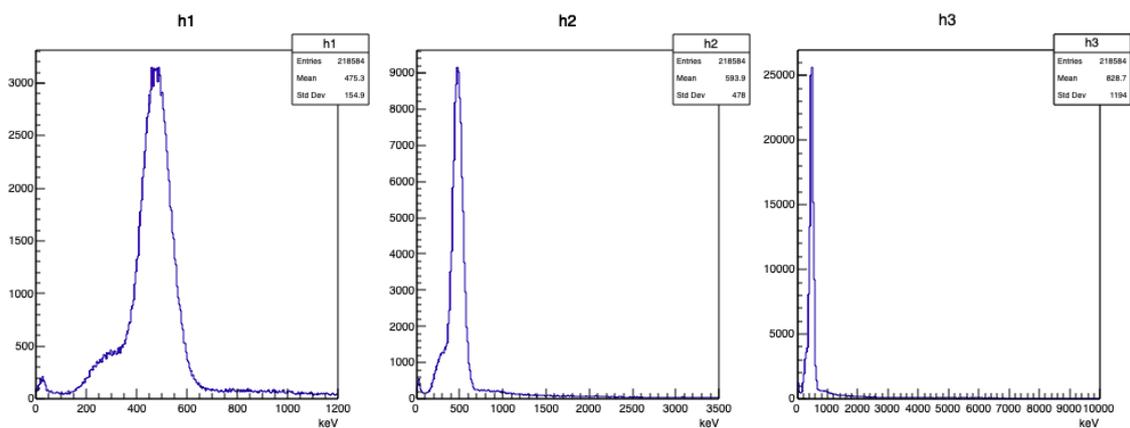


図 7.10 run011(シールドなし)のイベント数のエネルギー分布

この結果から、500keV 付近にみられるエネルギーの  $\gamma$  線のイベント数が支配的になっていたことが分かる。次に、これらのヒストグラムを、縦軸をイベントレート

[count/s/keV]、横軸エネルギーのヒストグラムに規格化する。この規格化は、次のようにして行うことができる。

まず、縦軸を livetime で割ったイベントレート [count/s] にすることを考える。 $n_{live}, \Delta n, t_{live}, \delta n(E)$  をそれぞれ以下のように定後する。

$n_{live}$  : livetime 中に来たイベントの総数 [count]

$\Delta n$  : 単位時間のイベント数 [count/s]

$t_{live}$  : livetime の合計時間 [s]

$\delta n(E)$  : あるエネルギー  $E \sim E + \delta E$  [keV] の間の信号が livetime 中にきたイベント数 [count]

このように定義したとき、 $t_{live}$  は  $n_{live}, \Delta n$  を用いて以下のように表せる。

$$t_{live} = \frac{n_{live}}{\Delta n} [s] \quad (7.1)$$

したがって、図 7.10 の縦軸を livetime で割ったイベントレートにした場合、縦軸の値は、

$$\text{縦軸} : \frac{\delta n(E)}{t_{live}} = \delta n(E) \frac{\Delta n}{n_{live}} [count/s] \quad (7.2)$$

と表せる。ゆえに、さらに縦軸をヒストグラムのエネルギー bin 幅  $\delta E$  で割ったイベントレート [count/s/keV] は、

$$\text{縦軸} : \delta n(E) \times \frac{\Delta n}{n_{live}} \frac{1}{\delta E} [counts/s/keV] \quad (7.3)$$

という量になる。 $\delta n(E)$  は図 7.10 の縦軸の量であり、 $n_{live}$  は測定データから得られる。 $\Delta n$  については、図 7.2 のように、DRS4 コードで読み取ったイベントレートの平均値を用い、そのイベントレートで一定にイベントが来ると仮定した。このようにして、図 7.10 のヒストグラムについて、縦軸をイベントレート [count/s/keV] にすると、図 7.11 のようになった。ただし、エネルギーが 0~3500keV、0~8000keV のイベントレートについては縦軸を log スケールにしている。500keV 付近のエネルギーは 1 秒間に 30 イベントほど現れていることがわかる。また、3000~8000keV のエネルギーの  $\gamma$  線は 1 秒間に 0.1 回のオーダーで生じていたことも読み取れる。

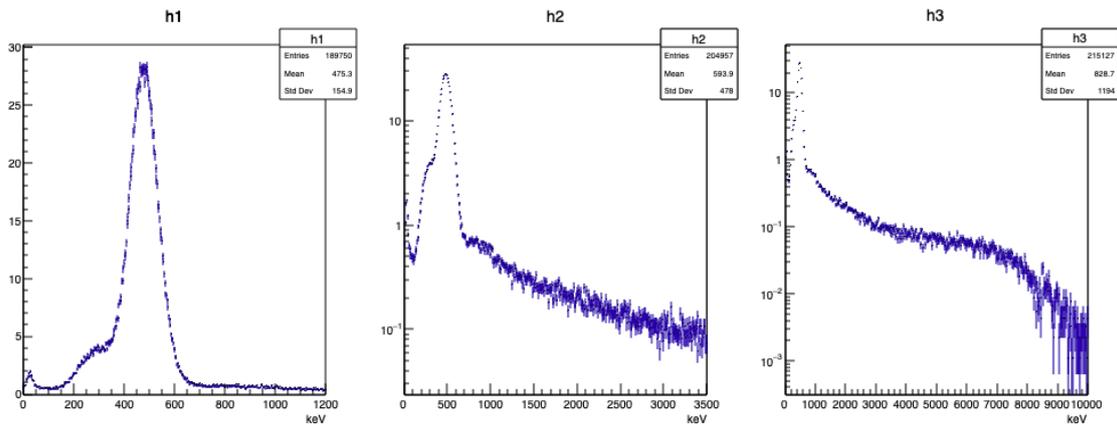


図 7.11 run011(シールドなし)のイベントレートのエネルギー分布

次に、run022(中性子シールドあり)の測定データについて解析した。まず、縦軸イベント数、横軸エネルギーのヒストグラムを作成したところ、図 7.12 のようになった。図 7.12 のように、コリメータを置かなかった場合と同様に 500keV あたりにピークが現れ、そのエネルギーの  $\gamma$  線が支配的になっていた。

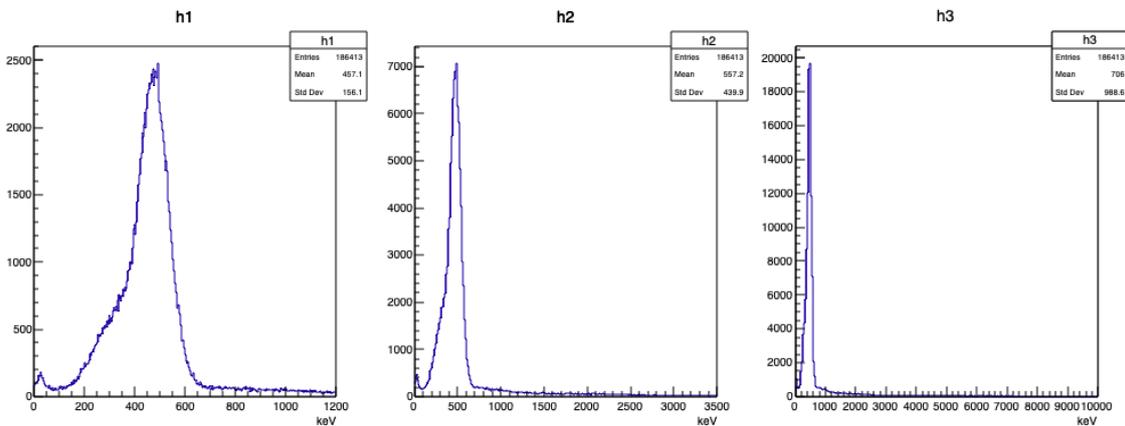


図 7.12 run022(シールドあり)のイベント数のエネルギー分布

続いて、図 7.12 の縦軸を、run011 のときと同様にしてイベントレート [count/s/keV] に直したところ、図 7.13 のようになった。図 7.13 のように、500keV 付近の  $\gamma$  線のイベントレートがおよそ 30 [count/s/keV] であることや、3000~8000keV の  $\gamma$  線のイベントレートが 0.1 [count/s/keV] であることはシールドなしの場合と同じであるが、2200keV 以降のエネルギーでイベントレートが急激に変化していた。

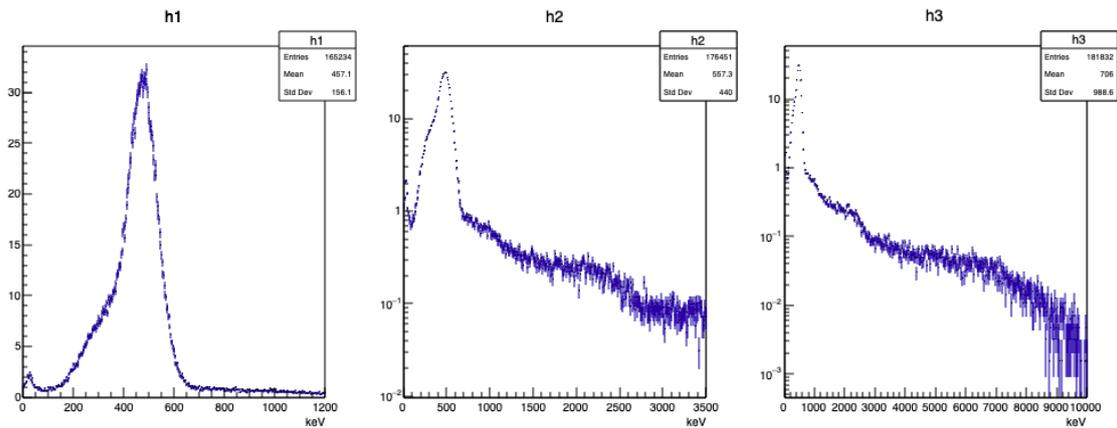


図 7.13 run022(シールドあり)のイベントレートのエネルギー分布

シールドを置いた場合と置かなかった場合で、イベントレートがエネルギーによってどのように変化したのかを確かめるため、それぞれのイベントレートのヒストグラムを重ねて図 7.14 のように表示した。青のイベントレートはシールドなしのイベントレートを表しており、赤のイベントレートはシールドありのイベントレートを表している。2200keV 付近では、シールドなしの場合と比較してシールドありの場合のほうが  $\gamma$  線のイベントレートが大きくなっていた。これは、中性子シールドに含まれる水素が起因していると考えられる。水素は中性子捕獲により 2.2MeV の  $\gamma$  線を放出するため、中性子シールドに使われたポリエチレンやコリメータの材料である PLA の水素から  $\gamma$  線が放出され、2.2MeV 付近のエネルギーの  $\gamma$  線のイベントレートが高くなっているのだと考えた。一方、2.2MeV 以上のエネルギー領域では、シールドを置いた

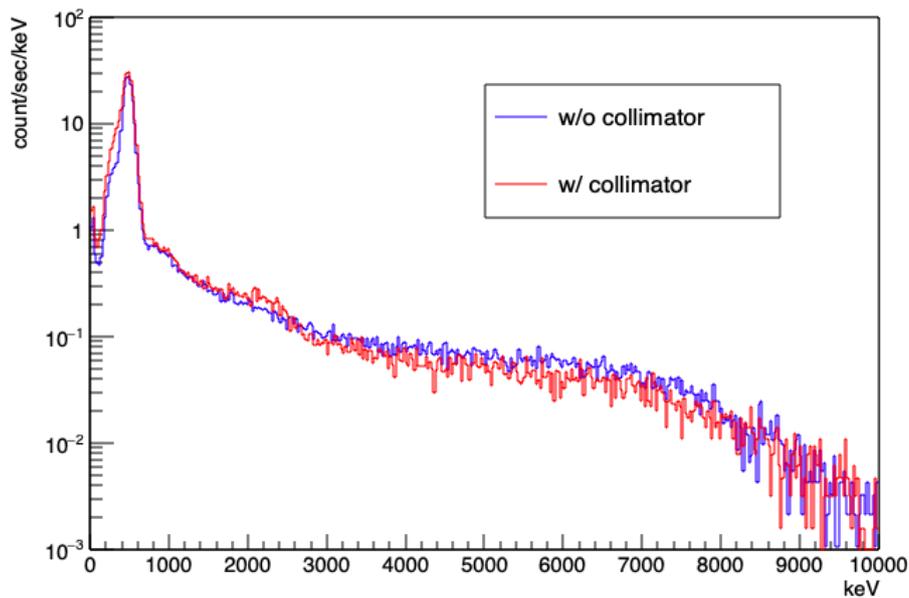


図 7.14 シールドの有無でのイベントレートの比較

場合のほうがイベントレートは小さくなっていた。このことから、高エネルギー領域の $\gamma$ 線の削減の効果があったといえる。

#### 7.2.4 Xe 検出器の有無によるイベントレートのエネルギー分布の比較

ここでは、Xe 検出器をビーム口から 1m、角度 0 度の位置に置いた場合(run023)と Xe 検出器を置かなかった場合(run020)でイベントレートの比較を行う。

まず、run020 の測定データから、縦軸をイベント数、横軸エネルギーのヒストグラムを作成し、その後縦軸をイベントレート [count/s/keV] に直したところ、それぞれ図 7.15、図 7.16 のようになった。中性子シールドあり(run022)・なし(run011)のデータと同様な傾向として、少しピークの位置が異なっているが 450keV 付近にピークが見られ、このエネルギーの $\gamma$ 線が支配的になっていることがわかる。また、イベントレートのエネルギー分布に着目すると、中性子シールドあり(run022)と同様に、2.2MeV 以降のエネルギー領域で急激に変化している。

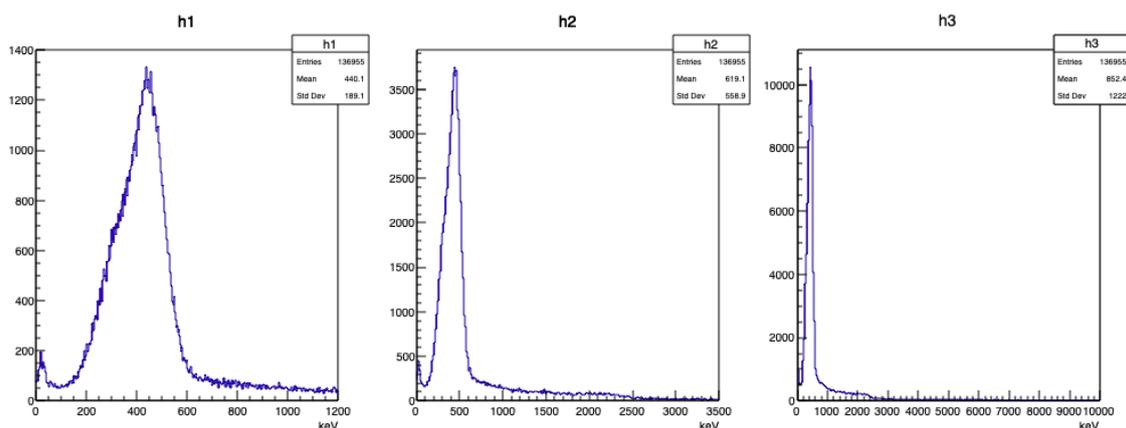


図 7.15 run020(Xe 検出器なし)のイベント数のエネルギー分布

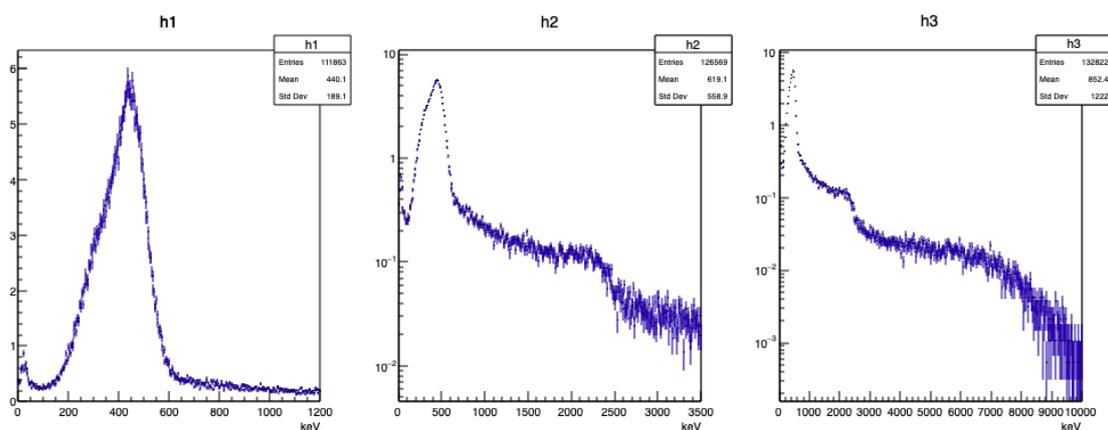


図 7.16 run020(Xe 検出器なし)のイベントレートのエネルギー分布

続いて、run023 の測定データから、縦軸をイベント数、横軸エネルギーのヒストグラムを作成し、その後縦軸をイベントレート [count/s/keV] に直したところ、それぞれ図 7.17、図 7.18 のようになった。Xe 検出器を置かなかったときと同様に、エネルギーが 450keV 付近のところにピークが見られ、2.2MeV 以降のエネルギー領域でイベントレートが大きく減少していた。Xe 検出器を置かなかった場合の相違点として、2.2MeV 付近でイベントレートのピークが小さく現れていることが挙げられる。

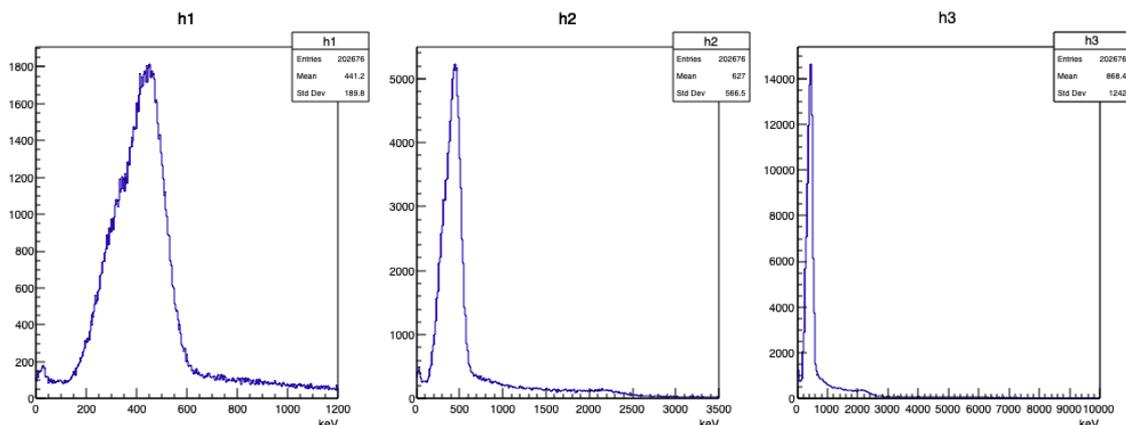


図 7.17 run023(Xe 検出器あり)のイベント数のエネルギー分布

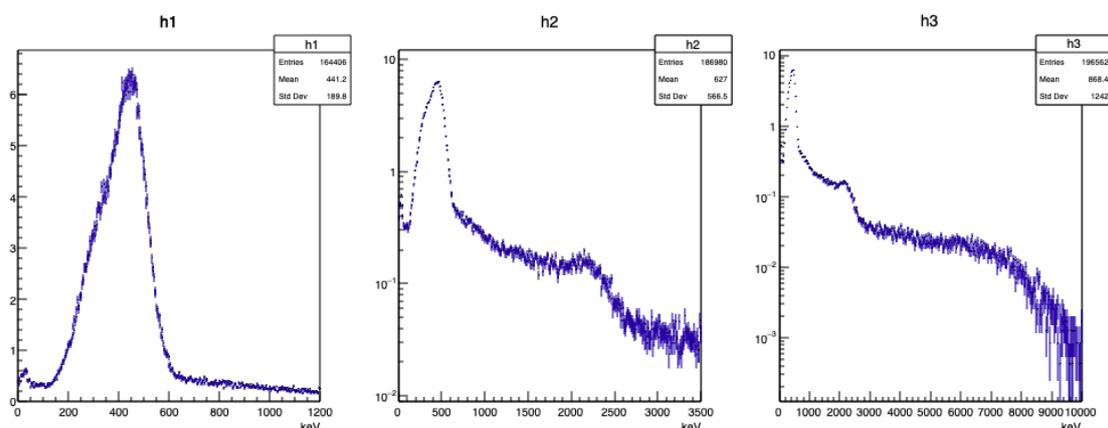


図 7.18 run023(Xe 検出器あり)のイベントレートのエネルギー分布

これらの結果から、Xe 検出器を置いた場合と置かなかった場合とでイベントレートを重ねて表示すると、図 7.19 のようになった。青色のイベントレートは Xe 検出器を置かなかった場合のイベントレートを表しており、赤色のイベントレートは Xe 検出器を置いた場合のイベントレートを表している。Xe 検出器を置いた場合のほうが置かなかった場合と比較して全体的にイベントレートが大きくなっていることがわかる。また、2.2MeV 付近のエネルギーにおいて、Xe 検出器を置いた場合のイベントレートに小さなピークが見られる。run020、run023 のどちらとも中性子シールドを用いてい

るが、run023 ではそれに加えて Xe 検出器に含まれている水素から  $\gamma$  線が放出されたことで、2.2MeV 付近のイベントレートが高くなったのだと考えた。

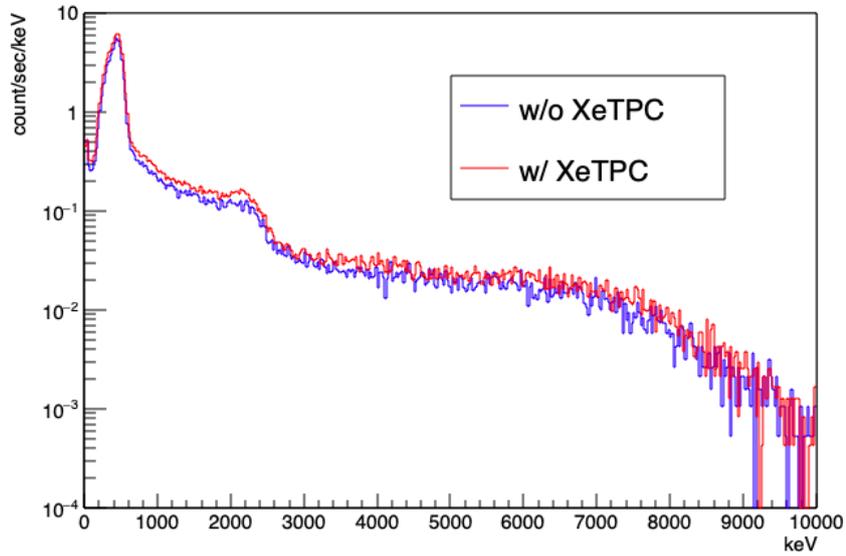


図 7.19 Xe 検出器の有無でのイベントレートの比較

## 第 8 章 今後の課題

本章では、ここまでの実験を通して分かった今後の課題を述べる。

### 8.1 DRS4 の Trigger out の信号の究明

6.5 章で述べたように、DRS4 の Trigger out の信号は busy 信号のようなものだということが分かったが、本当に busy 信号なのかどうかはわからなかった。実際に、7.2.1 節の通り、DRS4 の Trigger out の信号を使って算出したイベントレートは、DRS4 コードから得られるイベントレートと異なっていた。本実験では DRS4 コードのイベントレート値を信用して解析を行ったが、DRS4 コードのイベントレートが正しいことを確信するためにも、DRS4 の Trigger out の信号の正体を究明することは重要である。

DRS4 の Trigger out の信号を調べるため、ファンクションジェネレータからの信号パルス波を、周波数を小刻みに変えながら DRS4 に入力し、中性子ビーム実験のときと同じ配線で clock generator のクロック数に対する、Trigger out の信号が出ていない間にカウントされた clock generator のクロック数の割合  $R$  を算出したところ、図 8.1 のように周波数に応じて変化した。

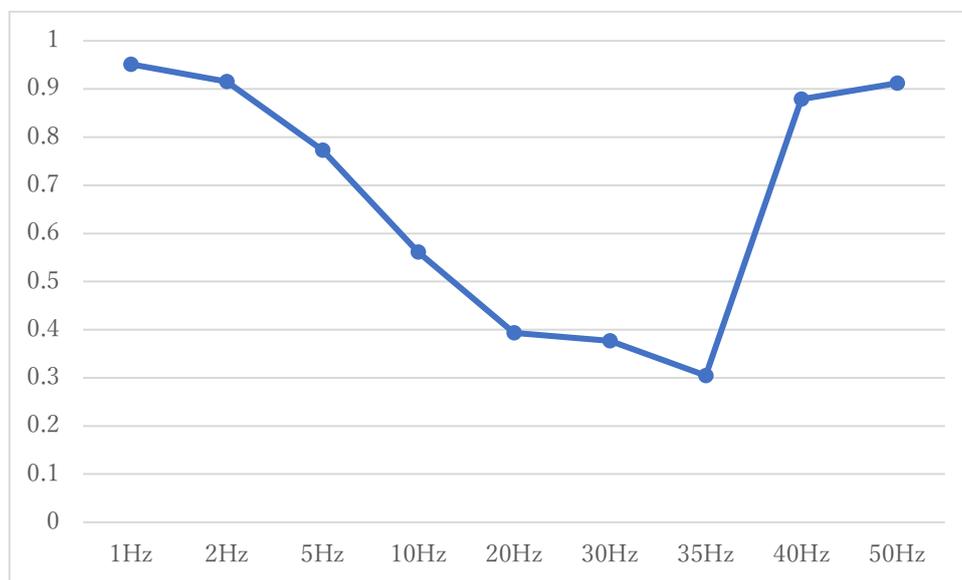


図 8.1 入力信号の周波数に対する割合  $R$  の変化

図 8.1 のように、1~35Hz の間は、周波数を増加させるとそれに伴って割合  $R$  が減少している様子が確認でき、Trigger out の信号が busy 信号であることを支持できるような振る舞いをしていった。しかし、35Hz から 40Hz に入力する信号の周波数を変化

させた際、割合 R は増加した。さらに 40Hz から 50Hz に入力信号の周波数を変化させた際も、割合 R は減少せず比較的大きい値をとった。これは、Trigger out の信号が busy 信号であることを説明できない。したがって、今後 Trigger out の信号について調査を進める必要がある。

## 8.2 500keV 付近のエネルギーの $\gamma$ 線の究明

7.2 章の通り、中性子ビーム実験の測定データには 500keV 付近にピークが見られ、その  $\gamma$  線のイベントレートは支配的であった。今後ミグダル効果を観測する上で、こうした  $\gamma$  線 BG を削減することは重要である。そのために、500keV 付近に見られるピークの  $\gamma$  線は何によって生じているのかを突き止める必要がある。また、解析した測定データ run011,run020,run022,run023 について図 8.2 のようにピークについてフィッティングを行って中心値を出したところ、表 8.1 のように得られた。

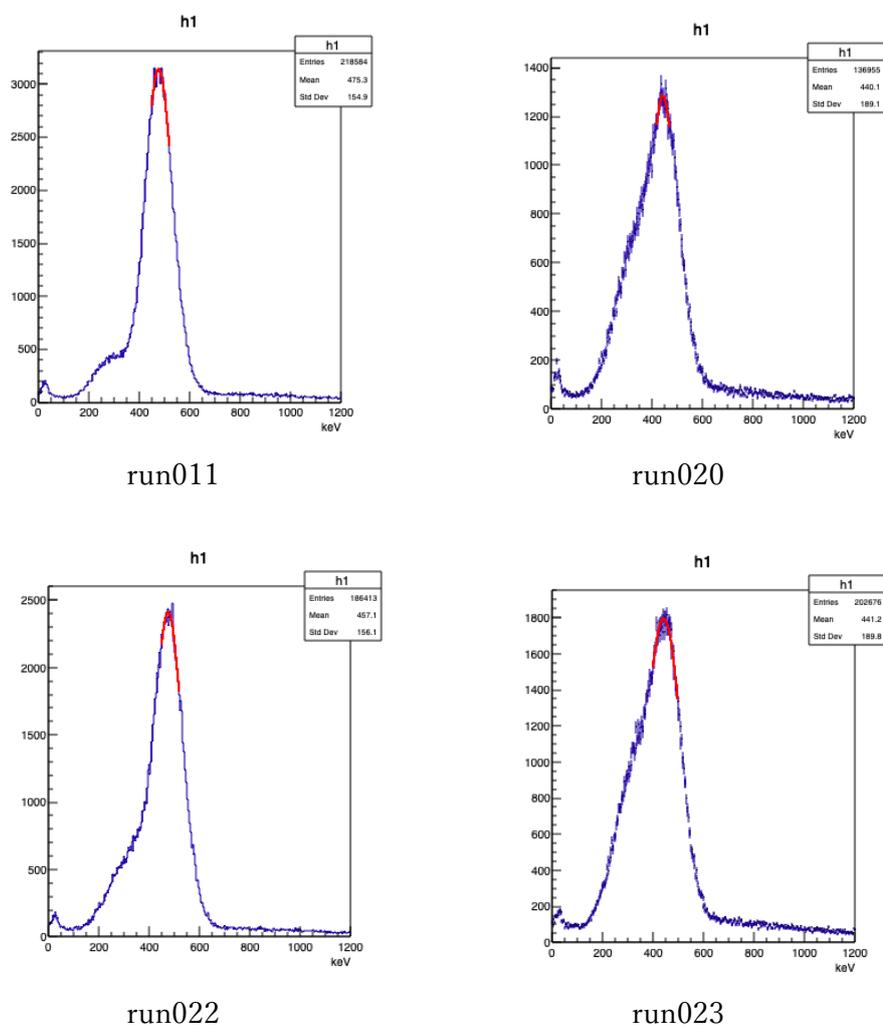


図 8.2 各測定データにおけるピークを中心値

表 8.1 各 run におけるピークの中心値[keV]

run011	478.129( $\pm 0.790307$ )
run020	444.383( $\pm 1.44222$ )
run022	476.894( $\pm 0.950728$ )
run023	443.188( $\pm 0.912155$ )

表 8.1 のように、ピークの中心値は測定ごとに異なっていた。もしこれらのピークが同一の  $\gamma$  線のものであるとすれば、測定ごとに HV が変化していて PMT の信号の増幅度が変化していたなどの理由によってキャリブレーションファクターである定数 C が変化していたことになる。その場合は各測定データでキャリブレーションを行う必要があり、そのためにも 500keV 付近に現れていたピークの  $\gamma$  線の正体を知っておかなければならない。

このように、500keV 付近の  $\gamma$  線の究明は重要であり、今後調査を進めていく必要がある。

## 第9章 結論

ミグダル効果は、中性子ビームを原子核に衝突させ、反跳した原子核に追従できずに束縛電子が励起・電離を起こす現象であった。ミグダル効果の観測ができるようになれば、暗黒物質探索に有用できる。

ミグダル効果を観測するため、将来は8気圧のXeガスを封入した、方向感度のあるガスXe検出器を用いる予定だが、本実験ではその前段階として、5気圧のXeガスを封入したガスXe検出器を用いる準備を進めている。

まずXe検出器のパーツの一部であるPTFEのモデルを作製した。その上でPTFEの図面を作成し、それを元に業者の方にPTFEを作ってもらい、そのPTFEをELCCやフィールドケージなどと接続できたことを確認した。

ミグダル効果を観測するためには $\gamma$ 線BGを削減することは重要だが、そのBGとなる $\gamma$ 線は中性子ビームが実験室の壁や床に当たることで主に生じている。そこで、検出器方向以外に放射される中性子をシールドする必要がある。その取り組みとして、コリメータの作製を行った。このコリメータが入った中性子シールドを用いた場合に3MeV~8MeVといった高エネルギーな $\gamma$ 線のイベントレートが削減できたことを確認した。

Xe検出器を置いた場合に $\gamma$ 線のイベントレートが増加することを確認した。 $\gamma$ 線BGを削減するための取り組みはこれからも行っていく必要がある。また、本実験で用いたDRS4のTrigger outの信号の究明、中性子ビーム実験で観測された500keV付近の $\gamma$ 線の正体の調査も今後の課題である。

## 謝辞

本研究を進めて行くに当たって、東北大学素粒子実験研究室の方々、また MIRACLUE グループの方々など、多くの方にご指導やご協力をいただきました。ありがとうございました。

市川さんにはコリメータに通すチューブの切断がうまくいかずに困っていたところに手を差し伸べてくださいました。チューブの切断ができるようになったおかげでコリメータ作製に関する作業が進められたので、感謝しています。

佐貫さんにはゼミでお世話になりました。ゼミでは、放射線に関する知識や検出器に関する理解など、実験を行う上で必要なことを学ばせていただきました。この機会を設けてくださったことに感謝します。

中村さんには様々な場面でお世話になりました。ミグダル効果に関する物理を初めとした様々な物理現象についてご指導いただきました。また、実験装置から工具の使い方まで、実験を行う上で基本的なことを丁寧に教えていただきました。また、研究を進める上でたくさんの助言をいただきました。

神戸大学の身内さんには、ミーティングなどで様々な助言をいただきました。また、中性子ビーム実験の際に気さくに話しかけてくださったことも印象に残っています。

他にも、研究室のメンバーの皆さん、MIRACLUE のメンバーの皆さんにはお世話になりました。たくさんの方に支えられ、卒業研究を全うすることができました。本当にありがとうございました。

## 参考文献

- [1] Masahiro Ibe, Wakutaka Nakano, Yutaro Shoji and Kazumine Suzuki *J. High Energy Phys.* 1803, 194 (2018).  
(<https://arxiv.org/abs/1707.07258#:~:text=We%20show%20that%20the%20final,the%20same%20effects%20are%20expected.>)
- [2]第 2 章 2 体衝突問題の相対論的取扱  
(<http://www.nucleng.kyoto-u.ac.jp/People/Itoh/2.pdf>)
- [3]放射線計測の理論と演習 上巻・基礎編 (著：ニコラス ツルファニデイス 訳：阪井英次) p.154
- [4]放射線計測の理論と演習 上巻・基礎編 (著：ニコラス ツルファニデイス 訳：阪井英次) p.155
- [5]放射線計測の理論と演習 上巻・基礎編 (著：ニコラス ツルファニデイス 訳：阪井英次) p.158
- [6]Noble Gas Detectors(著：E. Aprile, A.E. Bolotnikov, A.I. Bolozdynya, T. Doke ) p.15
- [7] Noble Gas Detectors(著：E. Aprile, A.E. Bolotnikov, A.I. Bolozdynya, T. Doke ) p.16
- [8] J. F. Ziegler, J. P. Biersack, and M.D. Ziegler, *The Stopping and Range of Ions in Matter* (<http://www.srim.org/>)
- [9] Noble Gas Detectors(著：E. Aprile, A.E. Bolotnikov, A.I. Bolozdynya, T. Doke ) p.16
- [10] Noble Gas Detectors(著：E. Aprile, A.E. Bolotnikov, A.I. Bolozdynya, T. Doke ) p.57

[11] Noble Gas Detectors(著 : E. Aprile, A.E. Bolotnikov, A.I. Bolozdynya, T. Doke )  
p.58

[12] Kiseki D Nakamura, Kentaro Miuchi, Shingo Kazama, Yutaro Shoji, Masahiro Ibe,  
Wakutaka Nakano, PTEP(2021),013C01  
([Detection capability of the Migdal effect for argon and xenon nuclei with position-sensitive gaseous detectors | Progress of Theoretical and Experimental Physics | Oxford Academic \(oup.com\)](https://academic.oup.com/ptep/article/2021/1/013C01))

[13]円形直管のコンダクタンス  
(<http://www.nucleng.kyoto-u.ac.jp/people/ikuji/edu/vac/app-A/conduct.html>)

[14]放射線計測の理論と演習 上巻・基礎編 (著：ニコラス ツルファニディス  
訳：阪井英次) p.209

[15] DRS4 Chip Home Page  
(<https://www.psi.ch/en/drs>)

[16] DRS4 Chip Home Page  
(<https://www.psi.ch/en/drs>)

[17]DRS4 Chip Home Page  
(<https://www.psi.ch/en/drs>)

[18]”DRS4 evaluation board を使うためのツール類”  
([https://github.com/mzks/drs4\\_tools/](https://github.com/mzks/drs4_tools/))

[19]”Gamma Energy(keV)”  
(<https://www.cpp.edu/~pbsiegel/bio431/gennergies.html>)

[20]”ツェナーダイオード(定電圧ダイオード)”  
([https://www.rohm.co.jp/electronics-basics/diodes/di\\_what6](https://www.rohm.co.jp/electronics-basics/diodes/di_what6))

[21]”Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments”(著 : William.R.Leo)  
p.117-p.118