# 修士学位論文
# 液体キセノンを用いた暗黒物質探索実験に使われる光電子増倍管の放射性不純物の定量測定

宮城教育大学大学院　教育学研究科
教科教育専攻 理科教育専修　修士２年
佐藤　哲也

平成 18 年 3 月 11 日

## 概 要

東京大学宇宙線研究所を中心に，液体キセノンを用いた暗黒物質探索実験 (XMASS 実験) 用検出器の研究開発が行われている。暗黒物質探索は 100keV 以下の低エネルギー領域において観測を行うため，低バックグラウンド環境が求められる。現在までに，液体キセノン 100kg を用いた検出器で，事象の再構成，内部バックグラウンド，外部バックグラウンドの理解，液体キセノンの自己遮蔽能力の評価などが研究されてきた。その中の外部バックグラウンドに関しては，光電子増倍管からの寄与がもっとも多いということがわかっている。液体キセノン 100kg 検出器の有効体積 3kg において，$10^{-2}$ 事象/day/kg/keV を実現しているが，暗黒物質探索を目指す場合，要求されるバックグラウンドレベルは $10^{-4}$ 事象/day/kg/keV である。従って液体キセノンの体積を増やすことで自己遮蔽能力を生かし，光電子増倍管からのバックグラウンドを低減させるで，この目標の達成を目指す。

本論文では，超低バックグラウンド光電子増倍管を開発するために，現在使用している光電子増倍管の部品の放射性不純物の定量測定を行った。測定には，東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設が所有する高純度ゲルマニウム (HPGe) 検出器を用いた。測定は，光電子増倍管一本に使用される部品を種類別に用意し，各部品ごとに５から１０日間程度測定した。測定の結果，光電子増倍管の側管に使用されている金属，基板材料，ステム部品からの寄与が大きいことがわかった。また，基板材料とステム部品のウラン・トリウムの量を 1/10 にできたと仮定すると，将来計画されている液体キセノン 800kg 検出器でのバックグラウンドレベルは約 $3\times10^{-4}$ 事象/day/kg/keV になると見積もることができた。

# 目 次

**第 1 章　序論** **8**
1.1 暗黒物質について . . . . . 8
1.1.1 暗黒物質存在の予言 . . . . . 8
1.1.2 WMAP の観測結果 . . . . . 9
1.2 冷たい暗黒物質 . . . . . 10
1.2.1 冷たい暗黒物質の候補 . . . . . 10
1.2.2 SUSY におけるニュートラリーノ . . . . . 10
1.2.3 MSSM . . . . . 11
1.2.4 ニュートラリーノ . . . . . 12
1.2.5 ニュートラリーノ探索 . . . . . 13
1.2.6 直接検出実験 . . . . . 14
1.2.7 暗黒物質探索の現状 . . . . . 16

**第 2 章　XMASS 実験** **18**
2.1 XMASS 実験の物理的目標 . . . . . 18
2.2 液体キセノン . . . . . 18
2.2.1 液体キセノンの特徴 . . . . . 18
2.2.2 液体キセノンの諸特性 . . . . . 23
2.3 バックグラウンド . . . . . 23
2.3.1 神岡鉱山内環境下でのバックグラウンド . . . . . 23
2.4 キセノン内部バックグラウンド . . . . . 27
2.5 液体キセノン $100kg$ 検出器 . . . . . 31
2.5.1 100kg 液体キセノン検出器 . . . . . 31
2.5.2 運転方法と測定データの解析法 . . . . . 35
2.5.3 データ収集系 . . . . . 39
2.5.4 事象再構成 . . . . . 40
2.6 液体キセノン 100kg 検出器での測定と現状 . . . . . 42
2.6.1 液体キセノン 100kg 検出器のモンテカルロシミュレーション . . . . . 42
2.6.2 ガンマ線を用いた検出器の較正 . . . . . 43
2.7 バックグラウンドの理解の現状 . . . . . 48
2.7.1 外部バックグラウンド . . . . . 48
2.7.2 内部バックグラウンド . . . . . 48
2.7.3 バックグラウンドの測定 . . . . . 49
2.8 まとめ . . . . . 50

**第 3 章　光電子増倍管の放射線不純物の定量測定** **51**
3.1　測定の動機と目的 . . . . . 51
3.2　測定の目標 . . . . . 53
3.3　測定の方法 . . . . . 53
3.4　測定サンプル . . . . . 55
3.5　解析方法 . . . . . 56
3.5.1　放射能の見積もり . . . . . 56
3.6　検出効率のシミュレーション . . . . . 58
3.7　解析結果 . . . . . 59
3.7.1　ダイノード材料 . . . . . 59
3.7.2　電極材料 . . . . . 61
3.7.3　側管材料 . . . . . 63
3.7.4　ステム . . . . . 67
3.7.5　リード線 (内部継線) . . . . . 69
3.7.6　入射窓 . . . . . 71
3.7.7　シール材 . . . . . 73
3.7.8　基板材料 . . . . . 75
3.7.9　光電子増倍管に使用されるその他の部品 . . . . . 81
3.8　測定結果のまとめ . . . . . 83

**第 4 章　考察** **85**
4.1　有限値の得られたものの評価 . . . . . 85
4.2　上限値の見積もりと評価 . . . . . 86
4.3　液体キセノン 800kg のバックグラウンドの見積もり . . . . . 87

**第 5 章　結論** **90**

**付 録 A　半導体検出器** **91**
A.1　動作の原理 . . . . . 91
A.2　信号の大きさと広がり . . . . . 93
A.3　ゲルマニウム検出器 . . . . . 94
A.3.1　検出器の種類と構造 . . . . . 94
A.3.2　特性および性能 . . . . . 96
A.3.3　スペクトル測定装置 . . . . . 98

# 図 目 次


1.1 渦巻銀河 NGC6503 の回転曲線 . . . . . 8
1.2 quark とニュートラリーノの弾性散乱のファインマンダイアグラム (スピンに依存しない相互作用) . 13
1.3 quark とニュートラリーノの弾性散乱のファインマンダイアグラム (スピンに依存する相互作用) . . 14
1.4 スピンに依存しない相互作用に対する検出感度 . . . . . 17
1.5 スピンに依存する相互作用に対する検出感度 . . . . . 17

2.1 キセノン中での $\gamma$ 線の減衰係数 . . . . . 19
2.2 キセノン (Xe) の相図 . . . . . 20
2.3 液体キセノン (Xe) シンチレーション光の発光メカニズム . . . . . 21
2.4 液体キセノン (Xe) シンチレーション光の減衰曲線 . . . . . 22
2.5 神岡鉱山内のガンマ線フラックス . . . . . 24
2.6 キセノン中での高速中性子バックグラウンド . . . . . 26
2.7 キセノン中での熱中性子バックグラウンド . . . . . 26
2.8 U 系列 . . . . . 28
2.9 $^{214}$Bi の崩壊 . . . . . 28
2.10 Th 系列 . . . . . 29
2.11 $^{212}$Bi の崩壊 . . . . . 29
2.12 $^{85}$Kr の崩壊 . . . . . 30
2.13 100kg 液体キセノン検出器の写真 . . . . . 31
2.14 $MgF_2$ の透過率曲線 . . . . . 32
2.15 外来由来バックグラウンド遮蔽体概念図 . . . . . 33
2.16 R8778 型 PMT の写真 . . . . . 34
2.17 R8778 型 PMT の外略図 . . . . . 34
2.18 真空紫外光 ($\lambda$ = 160 nm - 260 nm) に対する R8778 型 PMT の量子効率 . . . . . 35
2.19 キセノンの導入、回収用のガスライン . . . . . 36
2.20 検出器周辺の温度計配置 . . . . . 37
2.21 検出器内液面計配置 . . . . . 38
2.22 液体キセノン 100kg 検出器データ収集系 . . . . . 39
2.23 検出器の捕らえた光のパターン . . . . . 40
2.24 GEANT3 を用いたプロトタイプ検出器の構造図 . . . . . 42
2.25 検出器の座標系とガンマ線の照射位置 . . . . . 43
2.26 事象再構成後のエネルギー分布 . . . . . 44
2.27 データとシミュレーションの事象再構成後の位置の比較 . . . . . 45
2.28 データとシミュレーションの事象再構成後の位置の比較 (2 次元) . . . . . 46
2.29 データとシミュレーションの自己遮蔽効果の比較 . . . . . 47
2.30 $^{210}$Pb の崩壊 . . . . . 48

2.31 バックグラウンド測定結果とシミュレーション . . . . . 49

3.1 次期液体キセノン (Xe)800kg 検出器の概念図 . . . . . 51
3.2 液体キセノン (Xe)800kg 検出器で予想されるシグナル . . . . . 52
3.3 HPGe 半導体検出器の概略図 . . . . . 53
3.4 HPGe 半導体検出器の概略図 . . . . . 54
3.5 3 時間ごとの Ra,Pb,Bi 原子核が放出するガンマ線のカウント数の推移 . . . . . 54
3.6 光電子増倍管 (R8778) 部品の対応図 . . . . . 55
3.7 サンプルがある場合と無い場合のスペクトル . . . . . 57
3.8 検出効率の例 . . . . . 58
3.9 ダイノード材料の測定結果 . . . . . 60
3.10 ダイノード材料の測定結果 (ウラン系列とトリウム系列) . . . . . 60
3.11 電極材料の測定結果 . . . . . 62
3.12 電極材料の測定結果 (ウラン系列とトリウム系列) . . . . . 62
3.13 側管上部の測定結果 . . . . . 64
3.14 側管上部の測定結果 (ウラン系列とトリウム系列) . . . . . 64
3.15 側管下部の測定結果 . . . . . 66
3.16 側管下部の測定結果 (ウラン系列とトリウム系列) . . . . . 66
3.17 ステムの測定結果 . . . . . 68
3.18 ステムの測定結果 (ウラン系列とトリウム系列) . . . . . 68
3.19 リード線 (内部継線) の測定結果 . . . . . 70
3.20 リード線 (内部継線) の測定結果 (ウラン系列とトリウム系列) . . . . . 70
3.21 入射窓の測定結果 . . . . . 72
3.22 入射窓の測定結果 (ウラン系列とトリウム系列) . . . . . 72
3.23 シール材の測定結果 . . . . . 74
3.24 シール材の測定結果 (ウラン系列とトリウム系列) . . . . . 74
3.25 基板材料 (厚さ:1.5mm) の測定結果 . . . . . 76
3.26 基板材料 (厚さ:1.5mm) の測定結果 (ウラン系列とトリウム系列) . . . . . 76
3.27 基板材料 (厚さ:1.0mm) の測定結果 . . . . . 78
3.28 基板材料 (厚さ:1.0mm) の測定結果 (ウラン系列とトリウム系列) . . . . . 78
3.29 基板材料 (その他) の測定結果 . . . . . 80
3.30 基板材料 (その他) の測定結果 (ウラン系列とトリウム系列) . . . . . 80
3.31 その他部品の測定結果 . . . . . 82
3.32 その他の部品の測定結果 (ウラン系列とトリウム系列) . . . . . 82
3.33 光電子増倍管一本あたりの測定サンプルの放射能 . . . . . 84

4.1 有限値が得られたサンプルの内訳 . . . . . 85
4.2 液体キセノン 100kg 検出器のバックグラウンドシミュレーション . . . . . 87
4.3 液体キセノン 100kg 検出器のバックグラウンドシミュレーション . . . . . 88
4.4 液体キセノン 800kg 検出器のバックグラウンド . . . . . 89
4.5 液体キセノン 800kg 検出器の暗黒物質に対する検出感度 . . . . . 89

A.1 半導体中における電子・正孔対の生成 . . . . . 92
A.2 p タイプと n タイプの同軸型高純度 Ge 検出器の電極構造，および電荷の移動 . . . . . 94

A.3 p タイプ HPGe 検出器のピーク効率 . . . . . 97
A.4 スペクトロメータの基本構成 . . . . . 98

# 表 目 次


1.1 MSSM における素粒子 . . . . . 12
1.2 現在行われている WIMP 直接検出実験 . . . . . 16

2.1 キセノン (Xe) の自然存在比 . . . . . 20
2.2 液体キセノン (Xe) の物理的諸特性 . . . . . 23
2.3 神岡地下実験施設における主なバックグラウンド . . . . . 24
2.4 遮蔽体の材質、厚さ、目的 . . . . . 33
2.5 R8778 型光電子増倍管と ZK0667 型光電子増倍管の放射性不純物含有量 . . . . . 35
2.6 事象再構成後の $^{137}$Cs のエネルギーと分解能 . . . . . 44
2.7 データとシミュレーションの事象再構成後の位置 x, y の比較 . . . . . 46

3.1 光電子増倍管一本の測定で求めた放射能 . . . . . 53
3.2 解析に用いたガンマ線とその分岐比 . . . . . 56
3.3 検出効率の計算に用いたパラメータ . . . . . 58
3.4 ダイノード材料の測定結果 . . . . . 59
3.5 ダイノード材料の重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) . . . . . 59
3.6 電極材料の測定結果 . . . . . 61
3.7 電極材料の重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) . . . . . 61
3.8 側管上部の測定結果 . . . . . 63
3.9 側管上部の重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) . . . . . 63
3.10 側管下部の測定結果 . . . . . 65
3.11 側管下部の重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) . . . . . 65
3.12 ステムの測定結果 . . . . . 67
3.13 ステムの重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) . . . . . 67
3.14 リード線 (内部継線) の測定結果 . . . . . 69
3.15 リード線 (内部継線) の重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) . . . . . 69
3.16 入射窓の測定結果 . . . . . 71
3.17 入射窓の重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) . . . . . 71
3.18 シール材の測定結果 . . . . . 73
3.19 シール材の重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) . . . . . 73
3.20 基板材料 (厚さ:1.5mm) の測定結果 . . . . . 75
3.21 基板材料 (厚さ:1.5mm) の重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) . . . . . 75
3.22 基板材料 (厚さ:1.0mm) の測定結果 . . . . . 77
3.23 基板材料 (厚さ:1.0mm) の重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) . . . . . 77
3.24 基板材料 (その他) の測定結果 . . . . . 79
3.25 基板材料 (その他) の重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) . . . . . 79

3.26 その他の部品の測定結果 . . . . . 81
3.27 その他の部品の重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) . . . . . 81
3.28 光電子増倍管一本あたりの測定サンプルの重量 . . . . . 83
3.29 光電子増倍管一本あたりの測定サンプルの放射能 . . . . . 84

4.1 有限値の合計 . . . . . 86
4.2 上限値の見積もり . . . . . 86
4.3 光電子増倍管 1 本あたりの放射性不純物量 . . . . . 86

A.1 検出器として使われる半導体の物理的特性 (*印は 77K，他は 300K における値) . . . . . 92

# 第1章　序論

## 1.1　暗黒物質について

### 1.1.1　暗黒物質存在の予言

暗黒物質の存在は，渦巻銀河の回転曲線の観測結果から予言された。ケプラーの法則から求められる渦巻銀河の回転速度分布は次の式で表される。

$$\frac{v(r)^2}{r} = G\frac{M(r)}{r^2} \tag{1.1}$$

ここで $G$ は重力定数，$r$ は銀河中心からの距離，$M(r)$ は半径 $r$ 内の質量である。星のスペクトラムや水素ガスの 21cm 線のドップラーシフトの測定から回転曲線を求められ，この測定結果と式 1.1 から，渦巻銀河の質量分布を見積もることができる。明るい物質は銀河の中心付近に集中して存在していることはよく知られている。もし，銀河の全質量がこの中心付近の明るい部分に集中しているなら，式 1.1 から $r$ が大きいところでは回転速度は $r^{-\frac{1}{2}}$ に比例して減少する。しかし，測定結果から，$r$ が大きなところで回転曲線が一定になることがわかった。図 1.1 は渦巻銀河 NGC6503 の回転曲線である [1]。図 1.1 で，点は銀河の中心からの距離の関数としての回転速度の測定結果

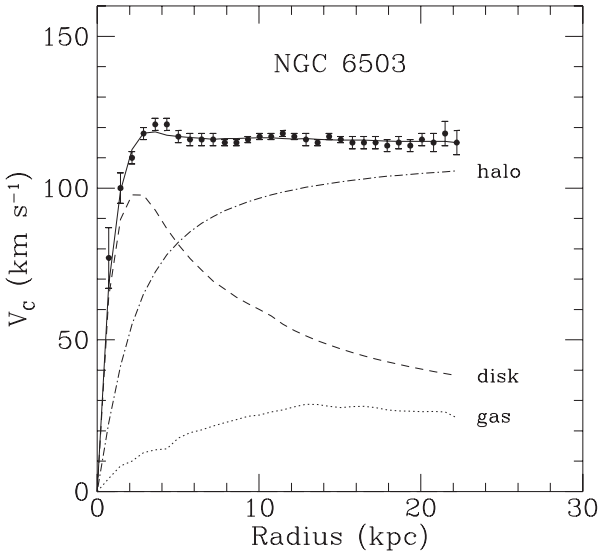


図 1.1: 渦巻銀河 NGC6503 の回転曲線

で，破線と点線はそれぞれ，回転速度に対する観測されている銀河円盤とガスからの寄与を表し，点破線は観測されていない暗黒ハローからの寄与を表す。この銀河では，明るい銀河円盤は中心から 5kpc 以内に存在する。よって $r$ が 5kpc 以上のところでは回転速度が減少するはずだが，測定

結果は $r$ が 20kpc あたりまで回転曲線は一定になっている。よって銀河には明るい銀河円盤とガスのほかに暗黒ハローと呼ばれる，光学的方法で観測することのできない物質が存在していることになる。銀河内の典型的な暗黒ハローのエネルギー密度は以下のように見積もられている。

$$\Omega_{halo} \geq 0.1 \tag{1.2}$$

それに対して，銀河内の典型的な明るい物質のエネルギー密度は以下のように見積もられている。

$$\Omega_{luminous} \leq 0.01 \tag{1.3}$$

このような $\Omega_{halo}$ と $\Omega_{luminous}$ の関係は他の多くの銀河でもみられ，暗黒物質が存在する証拠となっている。

### 1.1.2 WMAP の観測結果

WMAP は宇宙背景放射の測定から，標準宇宙模型で定義されるパラメータに対して答えを出した [2, 3]。そのパラメータの一つが，宇宙のエネルギー密度である。宇宙のエネルギー密度 $\Omega_i$ は，宇宙のある構成要素のエネルギー密度と臨界密度の比で，以下の式で表される。

$$\Omega_i = \frac{\rho_i}{\rho_c} \tag{1.4}$$

ここで $\rho_i$ は要素 $i$ のエネルギー密度を表し，$\rho_c = 3H_0^2/8\pi G$ は臨界密度を表す。$H_0$ はハッブル定数，$G$ は重力定数である。宇宙全体のエネルギー密度が臨界密度であるとき，宇宙は平坦な宇宙である。宇宙全体のエネルギー密度 $\Omega_{tot}$ は以下の式で表される。

$$\Omega_{tot} = \Sigma_i \Omega_i = \Omega_\Lambda + \Omega_M \tag{1.5}$$

ここで，$\Omega_\Lambda = \Lambda/(3H_0^2)$ は暗黒エネルギー密度，$\Omega_M$ は物質密度である。$\Lambda$ はアインシュタイン方程式に現れる宇宙定数である。これらのパラメータの WMAP の測定結果 [2, 3] は以下である。

$$\Omega_{tot} = 1.02 \pm 0.02 \tag{1.6}$$

$$\Omega_\Lambda = 0.73 \pm 0.04 \tag{1.7}$$

$$\Omega_M = 0.27 \pm 0.04 \tag{1.8}$$

この結果より，宇宙は平坦であり，宇宙のエネルギー密度は約 27% が物質密度である。物質密度はさらに細かい要素に分けると以下のようになる。

$$\Omega_M = \Omega_B + \Omega_{CDM} \tag{1.9}$$

ここで，$\Omega_B$ はバリオン物質密度，$\Omega_{CDM}$ は冷たい暗黒物質密度である。これらの WMAP の測定結果は以下である。

$$\Omega_B = 0.044 \pm 0.004 \tag{1.10}$$

$$\Omega_{CDM} = 0.226 \pm 0.004 \tag{1.11}$$

この結果から，宇宙の物質の大部分はバリオン物質ではなく，冷たい暗黒物質であることがわかった。

## 1.2 冷たい暗黒物質

宇宙初期に相対論的な運動エネルギーを持っていた熱い暗黒物質 (Hot Dark Matter) と，非相対論的な運動エネルギーを持っていた冷たい暗黒物質 (Cold Dark Matter) が暗黒物質の候補であったが，WMAP の測定の結果は冷たい暗黒物質を支持する。ここでは，冷たい暗黒物質について説明する。

### 1.2.1 冷たい暗黒物質の候補

冷たい暗黒物質の候補として，アクシオンと WIMP(Weakly Interacting Massive Particle) が考えられている。

**アクシオン**

アクシオンは，1977 年に Peccei と Quinn[8] により強い相互作用において CP 対称性の破れを標準理論の最小限の拡張で解決できるように導入された粒子である。アクシオンの質量には次の制限がかけられている。

$$10^{-6}eV < m_a < 10^{-2}eV \tag{1.12}$$

**ニュートラリーノ**

WIMP は冷たい暗黒物質の候補である。WIMP の中で，暗黒物質の候補としてもっとも有力視されているのがニュートラリーノである。ニュートラリーノは超対称性理論 [9] で存在が予言されている超対称性粒子の中でもっとも質量の軽い粒子 (LSP;Lightest supersymmetric particle) である。LSP は，R-parity 保存のため安定であるので，暗黒物質として残存することができる。

### 1.2.2 SUSY におけるニュートラリーノ

超対称性理論 (SUper SYmmetry theory;SUSY) が予言する超対称性粒子の一つであるニュートラリーノは暗黒物質の有力な候補である。

**SUSY**

電弱相互作用はアイソスピン量子数とハイパーチャージ量子数によって引き起こされ，$\mathrm{SU}(2)_L \times \mathrm{U}(1)_Y$ 対称性に従うゲージ理論で記述される。強い相互作用はクォークの持つカラー荷によって引き起こされ，$\mathrm{SU}(3)_C$ 対称性に従うゲージ理論で記述される。標準理論は，この電弱相互作用と強い相互作用をまとめた $\mathrm{SU}(3)_C \times \mathrm{SU}(2)_L \times \mathrm{U}(1)_Y$ 対称性に従う理論である。しかし，この標準理論にも次のような問題点がある。

- 少なくとも 18 のインプットパラメータが必要である。
- 重力相互作用を組み込む枠組みがない。
- 階層問題の存在

標準理論の中でも，ヒッグス粒子の自己エネルギーによる 2 次発散の問題からくる階層問題を避けるために考え出されたのが超対称性理論 (SUSY) である。

ヒッグス粒子の自己エネルギーによる 2 次発散の問題とは，ヒッグス粒子の質量が輻射補正のために発散してしまうという問題で，この発散を避けるために，あるカットオフエネルギー $\Lambda$ が導入される。このカットオフエネルギーを考慮すると，ヒッグス粒子の質量 $M_H$ は以下のように表される。

$$M_H^2 = M_0^2 + \delta M_H^2 \sim M_0^2 - g^2\Lambda^2 \tag{1.13}$$

ここで，$M_0$ はヒッグス粒子の質量，$g$ はヒッグス粒子の結合の強さを表す。

一方，標準理論において対称性の自発的破れがどのようなエネルギースケールで起こるかの考察から，$M_H$ ~O(300GeV) という制限が課せられる。カットオフエネルギー $\Lambda$ を，GUT スケール $\sim 10^{15}$GeV とすると，$M_H$ ~100GeV の値を持つためには，$M_0 \sim 10^{15}$GeV とする必要がある。このようにあまりにもかけ離れた 2 つのエネルギースケールが存在するといった階層問題を避けるために，新しいエネルギースケールとして

$$\Lambda < O(1TeV) \tag{1.14}$$

が必要になる。この新しいエネルギースケールを導入して輻射補正に対してヒッグス質量が安定であるようにするために考え出されたのが超対称性理論 (SUSY) である。

SUSY では，標準理論の全ての粒子に対してスピンが 1/2 だけ異なり他の内部量子数は等しいような super partner 粒子を導入する。この super partner 粒子どうしが輻射補正に対する寄与を打ち消す合うことで，2 次発散は現れないことになる。実際には，この超対称性は $\Lambda_{SUSY} < O(1\text{TeV})$ のエネルギースケールで破れており，輻射補正は完全には打ち消し合わずに，

$$\delta M_H^2 \sim g^2\Lambda_{SUSY}^2 \sim g^2 \mid M_B^2 - M_F^2 \mid \tag{1.15}$$

となる。ここで，$M_B$ はボソン質量で $M_F$ はフェルミオン質量を表す。また，この補正がヒッグス質量に対してあまり大きくないという必要性から super partner 粒子の質量 $M_{SUSY}$ は，

$$M_{SUSY} < O(1TeV) \tag{1.16}$$

となる。

### 1.2.3 MSSM

MSSM(The minimal supersymmetric extension of the standard model) は，標準模型の素粒子には表 1.1 に示すような，超対称性パートナーが存在すると考えられている。標準理論でスピン $j$ を持つ粒子の超対称性粒子は，スピン $\mid j - 1/2 \mid$ を持つ。その内部量子数は，一般粒子と超対称性粒子で同じである。

| Normal particles | | | SUSY partners | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Symbol | Name | Spin | Symbol | Name | Spin |
| $q = u, c, t$ | up quarks | 1/2 | $\tilde{q}_u^1, \ldots, \tilde{q}_u^6$ | up squarks | 0 |
| $q = d, s, b$ | down quarks | 1/2 | $\tilde{q}_d^1, \ldots, \tilde{q}_d^6$ | down squarks | 0 |
| $l = e, \mu, \tau$ | leptons | 1/2 | $\tilde{l}_1, \ldots, \tilde{l}_6$ | sleptons | 0 |
| $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ | neutrinos | 1/2 | $\tilde{\nu}_1, \tilde{\nu}_2, \tilde{\nu}_3$ | sneutrinos | 0 |
| $g$ | gluons | 1 | $\tilde{g}$ | gluinos | 1/2 |
| $W^\pm$ | W bosons | 1 | $\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_2^\pm$ | charginos | 1/2 |
| $H^\pm$ | charged Higgs | 0 | | | |
| $\gamma$ | photon | 1 | | | |
| $Z^0$ | Z boson | 1 | | | |
| $h^0\left(H_2^0\right)$ | light scalar Higgs | 0 | $\tilde{\chi}_1^0, \ldots \tilde{\chi}_4^0$ | neutralinos | 1/2 |
| $H^0\left(H_1^0\right)$ | heavy scalar Higgs | 0 | | | |
| $A^0\left(H_3^0, P_0\right)$ | pseudoscalar Higgs | 0 | | | |

表 1.1: MSSM における素粒子

### 1.2.4 ニュートラリーノ

MSSM では，次のように定義される $R$ パリティと呼ばれる量が保存する。

$$R = (-1)^{3B+L+2S} \tag{1.17}$$

ここで，$B$ はバリオン数、$L$ はレプトン数、$S$ はスピンを表す。この R パリティは，通常の物質に対しては 1，super partner 粒子に対しては-1 をあたえる。これにより，最も軽い超対称性粒子 (Lightest Supersymmetric Particle;LSP) は単独では崩壊できずに安定であることがわかる。この安定性のため，宇宙初期に作られた LSP は現在でも残っており，暗黒物質 (ダークマター) を形成している可能性がある。

LSP として photino($\tilde{\gamma}$) と zino($\tilde{Z}$) および 2 つの higgsino($\tilde{H_1^0}, \tilde{H_2^0}$) の線形結合で表されるニュートラリーノ ($\chi$) がある。

$$\chi = a_1\tilde{\gamma} + a_2\tilde{Z} + a_3\tilde{H_1^0} + a_4\tilde{H_2^0} \tag{1.18}$$

photino と zino は，ワインバーグ角 $\theta_W$ と gaugino($\tilde{B}, \tilde{W^0}$) を用いて，

$$\tilde{\gamma} = cos\theta_W\tilde{B} + sin\theta_W\tilde{W^0} \tag{1.19}$$

$$\tilde{Z} = -sin\theta_W\tilde{B} + cos\theta_W\tilde{W^0} \tag{1.20}$$

と表され，ニュートラリーノの質量行列は次のようになる。

$$\begin{pmatrix} M_1 & 0 & -M_Z cos\beta sin\theta_W & M_Z cos\beta cos\theta_W \\ 0 & M_2 & M_Z sin\beta sin\theta_W & -M_Z sin\beta cos\theta_W \\ -M_Z cos\beta sin\theta_W & M_Z sin\beta sin\theta_W & 0 & -\mu \\ M_Z cos\beta cos\theta_W & -M_Z sin\beta cos\theta_W & -\mu & 0 \end{pmatrix} \tag{1.21}$$

ニュートラリーノの質量行列には，gaugino 質量 $M_1$,$M_2$ や higgsino 質量パラメータ $\mu$，tan$\beta$=$v_2/v_1$($v_1$ と $v_2$ はヒッグスの真空期待値) などの多くのパラメータが含まれている。

階層問題を解決するためには，$M_1$,$M_2$ と $\mu$ が，

$$M_1, M_2 < 1TeV \tag{1.22}$$

$$\mid \mu \mid < 1TeV \tag{1.23}$$

である必要がある。またヒッグスの真空期待値は $W$ ボソン質量から，

$$v_1^2 + v_2^2 = (246GeV)^2 \tag{1.24}$$

という制限を受ける。

さらに Grand Unified Theory(GUT) を仮定すると $M_1 = (5/3)M_2$ が得られるので，ニュートラリーノの質量行列は $\mu$，$M_2$，tan$\beta$ の 3 つのパラメータで表すことができる。

### 1.2.5 ニュートラリーノ探索

#### 直接検出

ニュートラリーノは原子核との弾性散乱を通して直接探索 [10] を行うことができる。ニュートラリーノと原子核の弾性散乱の反応断面積は，ニュートラリーノと quark の相互作用の強さによって決まる。また，ニュートラリーノと原子核の相互作用には，以下の 2 つの候補がある。

**●スカラー相互作用 (スピンに依存しない相互作用)**

**●軸ベクトル相互作用 (スピンに依存する相互作用)**

Feynman diagram を図 1.2、図 1.3 に示す。

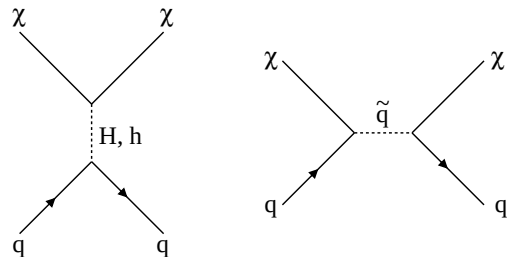


図 1.2: quark とニュートラリーノの弾性散乱のファインマンダイアグラム (スピンに依存しない相互作用)

図 1.2 は，スピンに依存しない相互作用をするときのクォークとニュートラリーノの弾性散乱のファインマン図である。スピンに依存しない相互作用をするとき，ニュートラリーノは原子核の質量数 A と結合して相互作用を行う。

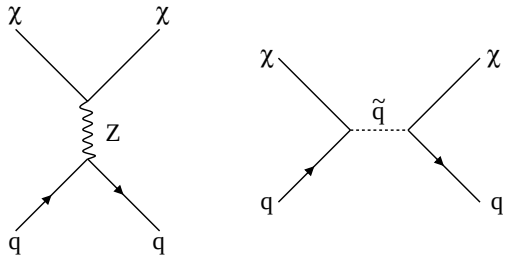


図 1.3: quark とニュートラリーノの弾性散乱のファインマンダイアグラム (スピンに依存する相互作用)

図 1.3 は，スピンに依存する相互作用をするときのクォークとニュートラリーノの弾性散乱のファインマン図である。スピンに依存する相互作用をするとき，ニュートラリーノは原子核のスピンと結合して相互作用を行う。

### 1.2.6 直接検出実験

#### イオン化検出器

ゲルマニウム (Ge) 検出器はイオン化検出器である。Ge 検出器がニュートラリーノの直接検出に適している点は以下である。

- 高純度の結晶が手に入りやすい
- エネルギー分解能がよい
- スピンに依存しない相互作用に主に感度をもち，スピンに依存する相互作用には感度が小さい

しかし，次のような欠点がある。

- 高価である
- 大型化すると小型のときに比べてエネルギー閾値があがる
- トリチウムのバックグラウンドの問題
- 原子核反跳と電子反跳の波形弁別ができない

#### シンチレーション検出器

シンチレーション検出器がニュートラリーノの直接検出に適している点は以下である。

- 大きな体積の検出器を作りやすい
- スピンが 0 でない同位体があるため，スピンに依存する相互作用にもスピンに依存しない相互作用にも感度がある
- 原子核反跳と電子反跳の場合のシンチレーション光は異なった時定数を持つので，波形弁別により弁別することができる可能性がある

一方で，次のような欠点がある。

- 原子核反跳の場合，光量がすくなくなる
- 有効で信頼性のある粒子弁別が確立していない

### ボロメータ検出器

ボロメータ検出器は，超低温に冷却したターゲットのフォノンを観測することにより入射粒子を測定する。ボロメータ検出器がニュートラリーノの直接検出に適している点は以下である。

- エネルギー分解能がよい
- エネルギー閾値が低い

一方で，次のような欠点がある。

- 質量を大きくしづらい
- そのままでは粒子弁別はできない

### 混成タイプ検出器

混成タイプ検出器は，原子核反跳と電子反跳のシグナルを区別する。原子核反跳と電子反跳のシグナルを２つのタイプのシグナルとして測定することにより区別することができる。

混成タイプ検出器として，ゲルマニウム標的のイオン化シグナルとフォノンの２つを測定する CDMS や 2 相型キセノン検出器などがある。2 相型キセノン検出器は，気体キセノンと液体キセノンの 2 相で構成されている。イベントのほとんどは液体キセノンの相で起こり，キセノンの励起とイオン化が起こる。このとき第一シンチレーション光が発生するので，それを光電子増倍管で測定する。同時にイオン化にともない作られる電子を電場で気体キセノンの相まで移動させ，気体キセノン相に張ってあるアノードワイヤーでこの電子を増幅させ，第二シンチレーション光を発生させ，光電子増倍管で測定する。この第二シンチレーション光が発生するまでの時間は第一シンチレーション光の発生から約 1$\mu$sec と長いので，2 つのシグナルは区別することができる。2 相型キセノン検出器は，第一シンチレーション光と第二シンチレーション光の大きさの比から原子核反跳と電子反跳を区別している。

イオン化検出器，シンチレーション検出器，ボロメータ検出器，混成タイプ検出器について代表的な実験を以下にまとめる。

| 測定手段 | 実験グループ | 実験場所 | 検出器 |
|---|---|---|---|
| イオン化 | IGEX [12] | Canfranc | 2.0 kg Ge($^{76}$Ge enriched) |
| | HDMS [13] | Gran Sasso | 0.20 kg Ge($^{73}$Ge enriched) |
| シンチレーション | DAMA[14, 15, 16, 17] | Gran Sasso | 9 ×9.70 kg NaI |
| | | | 6.50 kg liq.Xe |
| | | | 0.37 kg $CaF_2$ |
| | ELEGANT[18] | Oto Cosmo | 20× 36.5 kg NaI |
| | | | 25× 0.29 kg $CaF_2$ |
| | UKDMC [19] | Bulby | 6× 8 kg NaI |
| | ZEPLIN I [20] | Bulby | 4 kg liq.Xe |
| | XMASS | Kamioka | 100 kg liq.Xe |
| ボロメータ | CRESST [21] | Gran Sasso | 262 g $Al_2O_3$ |
| | Tokyo [22, 23] | Nokogiriyama | 8×21 g LiF |
| | | Kamioka | 8×21 g LiF |
| 混成タイプ | EDELWEISS[24] | Frejus | 3×320 g Ge |
| | CDMS[25] | Soudan | 20×250 g Ge |
| | ZEPLIN II[26] | Bulby | liquid-gas Xe 30 kg |
| | XMASS(waseda)[27] | Kamioka | liquid-gas Xe 1 kg |

表 1.2: 現在行われている WIMP 直接検出実験

### 1.2.7 暗黒物質探索の現状

図 1.4 は，暗黒物質がスピンに依存しない相互作用をするときの達成されている暗黒物質の検出感度である。赤塗りの領域は DAMA が，9×9.70kg の NaI の結晶を使用して，4 年間の観測データのスペクトルの季節変動の解析から，ニュートラリーノが存在すると発表した領域である [14, 15]。しかし，この領域は EDELWEISS(茶線)，ZEPLINE I(緑線)，CDMS(青線) など，他の暗黒物質直接探索実験によってほぼ排除されている。薄青塗り，薄緑塗り，薄赤塗りは SUSY で存在が予言されている領域である。

図 1.5 は，暗黒物質がスピンに依存しない相互作用をするときの達成されている暗黒物質の検出感度である。茶塗りは MSSM で存在が予言されている領域，実線は以下の実験が排除した領域の下限値である。EDELWEISS(茶線)，東京大学蓑輪研究室 (緑線)，CRESST(青線)，DAMA(赤線)，ELEGANT V(桃線)，UKDMC(黒線)。

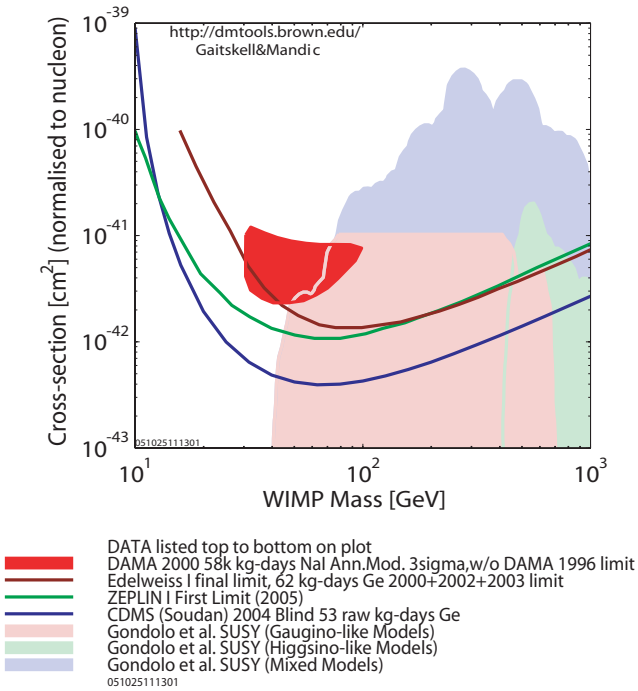


図 1.4: スピンに依存しない相互作用に対する検出感度

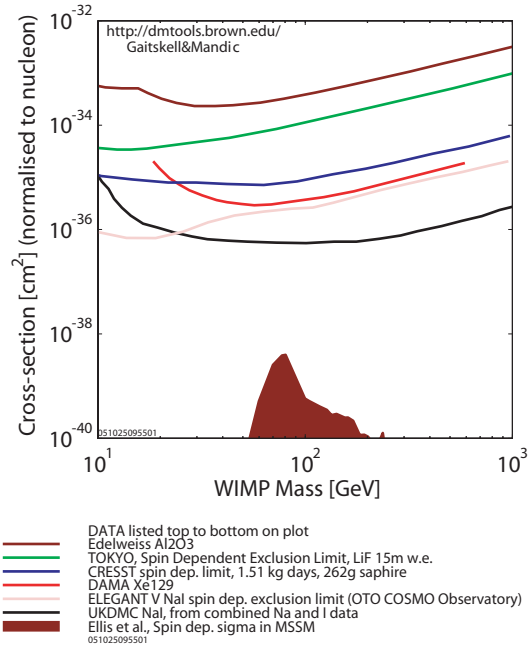


図 1.5: スピンに依存する相互作用に対する検出感度

# 第2章　XMASS実験

## 2.1　XMASS実験の物理的目標

XMASSとは，以下の3つの項目の略である。

- Xenon detector for weakly interacting MASSive particle
- Xenon MASsive detector for Solar neutrinos
- Xenon neutrino MASS detector

液体キセノン (Xe) シンチレータを用いて上記の物理的目標の達成を目指す実験である。

現在は液体キセノン $100kg$(有効体積 $3kg$) を用いた検出器で，事象の再構成，内部バックグラウンド，外部バックグラウンドの理解，液体キセノンの自己遮蔽能力の評価などを行っている。また計画されている液体キセノン $800kg$ 検出器では本格的な暗黒物質探索を行う予定である。

## 2.2　液体キセノン

XMASS実験は液体キセノンの持つ特徴を最大限に生かした検出器の開発を行っている。ここではその特徴と液体キセノンの諸特性についてまとめる。

### 2.2.1　液体キセノンの特徴

暗黒物質探索実験における液体キセノンの有効性を以下にあげる。

**高発光量シンチレータ**

WIMPの運動エネルギーは数 $keV$ から数十 $keV$ 程度であるためキセノン (Xe) 原子核との弾性散乱により損失するエネルギーは非常に小さい。したがって，この事象を測定するためには，発光量の多いシンチレータが必要になる。液体キセノン (Xe) の発光量は ~42,000$[photons/MeV]$ で，これは無機シンチレータ NaI(Tl) と同程度の発光量である。

**シンチレーション光が比較的長波長**

キセノンのシンチレーション光の波長は178nmで，他の希ガスシンチレータ (Ar $\sim 128nm$) と比べて長波長であり，波長変換剤を用いずとも，PMTで直接検出が可能である。

**沸点が比較的高い ( 165.1$K$ )**

液体キセノンは沸点が $165.1K$ と比較的高いため，液化が容易にできる。液体キセノン $100kg$ 検出器では，冷凍機を使い安定して測定を行うことができている。

**高密度（ $\rho = 2.95 g/cm^3$ ）**

液体キセノンは密度が約 $2.96 g/cm^3$(@$161.5K$) と高密度であるので，ニュートラリーノに対して高感度な検出器をコンパクトにできる。液体キセノン $800kg$ で直径 $80cm$，液体キセノン 10 トンで直径 $2m$ の球におさめることが可能である。

**大きい原子番号（ $Z = 54$ ）**

ニュートラリーノの直接探索を行うには，外部ガンマ線バックグラウンドを減らす必要がある。キセノンは原子番号が $Z$=54 と大きいので，ガンマ線は液体キセノン内部に入ると急速に減衰する (自己遮蔽能力)。大きな液体キセノン検出器を作り，この自己遮蔽能力を用いてガンマ線を有効領域の外側で吸収させてガンマ線バックグラウンドを減らすことが，XMASS 実験のもっとも重要なアイディアである。図 2.1 にキセノン中 $\gamma$ 線の減衰係数を示す。

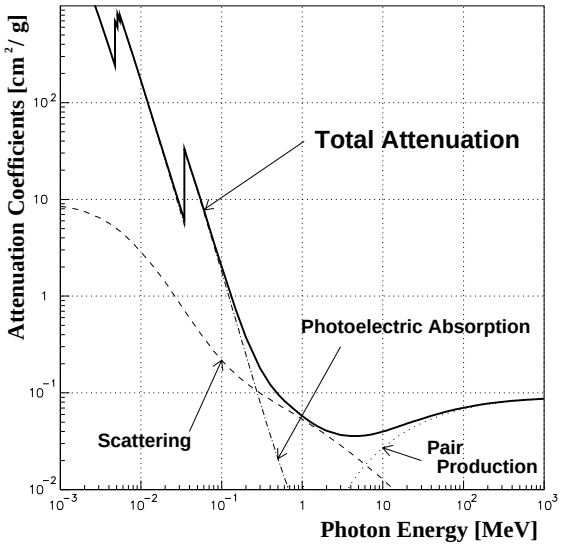


図 2.1: キセノン中での $\gamma$ 線の減衰係数

**相変化が容易である**

キセノンは，液体，気体相の状態で扱うことができるので，循環が可能である。検出器の系の中に純化装置のラインを組めば，キセノン中に含まれる放射性物質を除去することが可能であり，長期測定でもキセノンの純度を保ったまま実験できる。液体キセノン実験装置は冷凍機で冷却され，おおよそ 165-180$K$ で運転される。また，液体であることから一様で大質量の検出器を自由な形状で作れることも利点として挙げられる。NaI(Tl) などの結晶シンチレータでは，そのような検出器を作るのは難しい。キセノンの相図を図 2.2 に示す。図 2.2 より，$170K$ 以上では圧力をいくらかけてもキセノンは固体にはならないことがわかる。

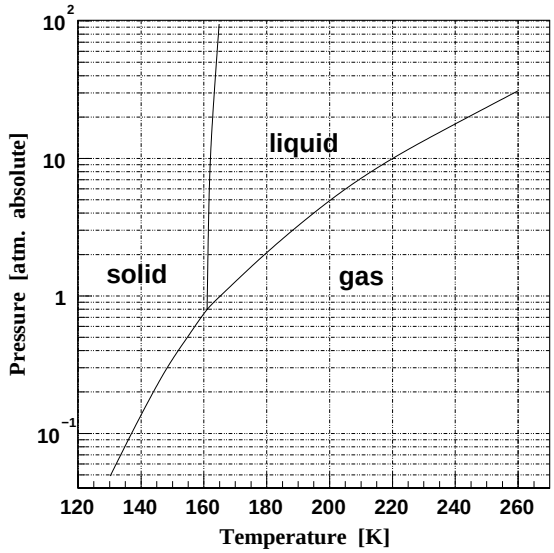


図 2.2: キセノン (Xe) の相図

**同位体分離が可能である**

キセノンには多くの同位体が存在する。それを分離することによって物理的目的の測定が可能となる。WIMP は，スピンによって相互作用に違いがあり，奇数質量数核と偶数質量数核の相互作用を比較することによって暗黒物質の同定に役立てることができる。

$0\nu\beta\beta$ 崩壊探索には $^{136}$Xe を用いる。また，太陽ニュートリノ観測の場合には，$^{136}$Xe の $2\nu\beta\beta$ がバックグラウンドになるため，逆に $^{136}$ Xe を取り除いた Xe を使用することで，太陽ニュートリノ観測におけるバックグラウンドを減少できる。Xe の自然存在比を表 2.1[29] に示す。

| 同位体 | $^{124}$Xe | $^{126}$Xe | $^{128}$Xe | $^{129}$Xe | $^{130}$Xe | $^{131}$Xe | $^{132}$Xe | $^{134}$Xe | $^{136}$Xe |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 存在比 [%] | 0.096 | 0.090 | 1.92 | 26.44 | 4.08 | 21.18 | 26.89 | 10.44 | 8.87 |

表 2.1: キセノン (Xe) の自然存在比

**発光波形弁別の可能性**

キセノンの発光は原子核弾性散乱によるものと電子弾性散乱によるもので異なる波形を持つと考えられている。この波形の選別によってキセノン中で反応した粒子の識別ができる可能性がある。つまり，WIMP のシグナルと，アルファ線，ベータ線，ガンマ線などのシグナルを区別し，バックグラウンドを除去できる。

キセノンの発光は励起光による早い発光成分と，再結合光による遅い発光成分に分けることができる。液体キセノンのシンチレーション光は，以下の 2 つの過程により生成される [29]。

励起発光の発光メカニズム

$$\begin{aligned} \mathrm{Xe} + \mathrm{Xe}^* &\rightarrow \mathrm{Xe}_2^* \\ \mathrm{Xe}_2^* &\rightarrow 2\mathrm{Xe} + \mathrm{h}\nu \end{aligned} \tag{2.1}$$

再結合発光のメカニズム

$$
\begin{aligned}
\mathrm{Xe}^{+} + \mathrm{Xe} &\rightarrow \mathrm{Xe}_2^{+}, \\
\mathrm{Xe}_2^{+} + \mathrm{e}^{-} &\rightarrow \mathrm{Xe}^{**} + \mathrm{Xe} \\
\mathrm{Xe}^{**} &\rightarrow \mathrm{Xe}^{*} + \mathrm{heat} \\
\mathrm{Xe}^{*} + \mathrm{Xe} &\rightarrow \mathrm{Xe}_2^{*} \\
\mathrm{Xe}_2^{*} &\rightarrow 2\mathrm{Xe} + \mathrm{h}\nu
\end{aligned}
\tag{2.2}
$$

発光のメカニズムについては図 2.3 に示す。

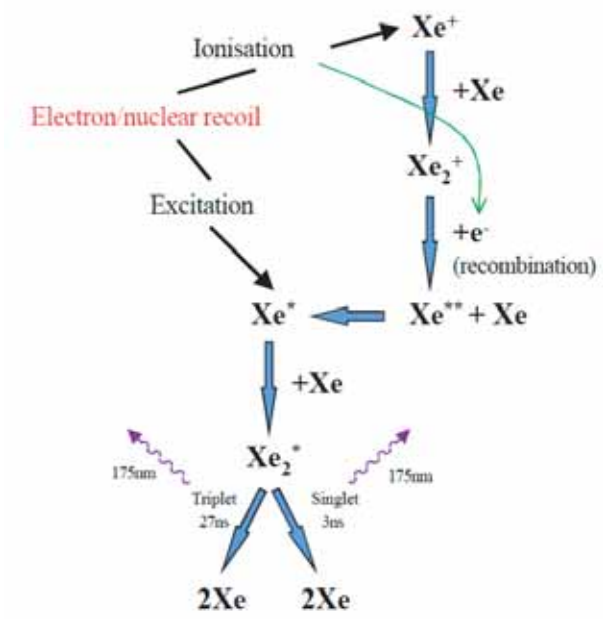


図 2.3: 液体キセノン (Xe) シンチレーション光の発光メカニズム

どちらの発光過程においても最終的には励起した二重体 $\mathrm{Xe}_2^{*}$ からの発光なので，同じ真空紫外光 (中心波長 175nm，半値幅 10nm) が発生する。電子による電離イオン対の密度は低いため，一部のイオン対はすぐに再結合することができず，発光までに時間がかかり，45 nsec の減衰時間をもつ。アルファ線や重イオンに対しては，電離イオン対密度が高いため，電子による発光に比べて再結合までの時間が短く，遅い成分と早い成分に分けることができる。また遅い成分は電子による発光に比べて 22nsec と小さい減衰時間を持つ。図 2.4 に電子，アルファ線，核分裂片と液体 Xe が反応した時のシンチレーション光の発光時間スペクトルを示す [30]。

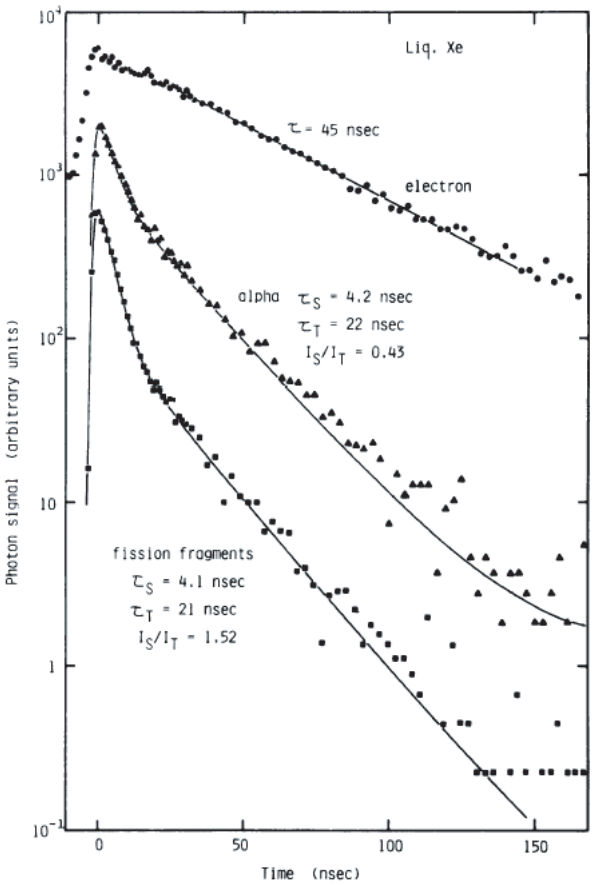


図 2.4: 液体キセノン (Xe) シンチレーション光の減衰曲線

つまり，原子核弾性散乱による WIMPs 信号と電子弾性散乱によるガンマ線バックグラウンドはパルス波形が異なることになる。

### 2.2.2 液体キセノンの諸特性

これまでに紹介した液体キセノンの特徴も含めた液体キセノンの諸特性を表 2.2 にまとめた。

| 特性 | 値 | 条件 | 文献 |
|---|---|---|---|
| 原子番号 | 54 | | |
| 質量数 | 131.29 | | [32] |
| 沸点 | $165.1K$ | | [32] |
| 融点 | $161.4K$ | | [32] |
| 密度 | $2.96g/cm^3$ | 161.5K | |
| 輻射長 | $27.7mm$ | | [33] |
| シンチレーション波長 | $178nm$ | | [35, 36] |
| 屈折率 | 1.61 | $177\pm5nm$ | [34] |
| Energy per scintillation photon | $21.6\pm2.8eV$ | | [37] |
| 減衰時間 (電子による遅い発光成分) | $45ns$ | | [38] |
| 減衰時間 ( α 粒子による早い発光成分) | $4.2ns$ | | [38] |
| 減衰時間 ( α 粒子による遅い発光成分) | $22ns$ | | [38] |
| シンチレーション光吸収長 | $\geq 100cm$ | | [39] |
| レイリー散乱長 | $\sim 60cm$ | $\mathrm{n_{Xe}} = 1.61$ | [29] |

表 2.2: 液体キセノン (Xe) の物理的諸特性

## 2.3 バックグラウンド

暗黒物質探索において，観測データに及ぼすバックグラウンドの影響の見積もりが大変重要になってくる。ここでは，XMASS 実験で想定される主なバックグラウンドを神岡鉱山内環境下によるものと，キセノン内部に存在するものに分けて説明する。

### 2.3.1 神岡鉱山内環境下でのバックグラウンド

XMASS 実験は，岐阜県にある神岡地下実験施設で測定を行っている。XMASS 実験はそこにあるクリーンルーム内で測定が行われている。神岡地下実験施設における主なバックグラウンドを表 2.3 にまとめる。

| | 地上 | 神岡地下実験施設 |
|---|---|---|
| 宇宙線ミューオン $[cm^{-2}s^{-1}]$[40] | $1.1 \times 10^{-2}$ | $\sim 10^{-7}$ |
| 熱中性子 $[cm^{-2}s^{-1}]$ | $1.4 \times 10^{-3}$[41] | $8.26 \times 10^{-6}$ |
| 熱以外の中性子 $[cm^{-2}s^{-1}]$ | $1.2 \times 10^{-2}$[41] | $1.15 \times 10^{-5}$ |
| Rn$[Bq/m^3]$(夏)[42] | 40 | 1200 |
| Rn$[Bq/m^3]$(冬)[42] | 40 | 40 |
| 外部ガンマ線 $(> 500keV)$[44] | - | $0.71/cm^2/s$ |

表 2.3: 神岡地下実験施設における主なバックグラウンド

**宇宙線バックグラウンド**

ミューオンなどの宇宙線は暗黒物質探索の大きなバックグラウンドになる。XMASS 実験は，神岡鉱山内地下 $1000m$(2700m.w.e.;meter water equivalence) で測定が行われているため，表 2.3 からわかるように，宇宙線バックグラウンドの影響を約 $\sim 10^{-5}$ 倍にすることができる。

**外部由来環境ガンマ線バックグラウンド**

地下実験施設内の岩盤や，検出器を構成している各種素材に含まれている放射性物質も暗黒物質探索にはバックグラウンドになる。検出器の周囲で発生する外部由来環境ガンマ線は，放射線遮蔽体を検出器の周りに設置すること，および液体 Xe の自己遮蔽能力で遮蔽できる。図 2.5 は、神岡鉱山内のガンマ線フラックスである。ガンマ線フラックスは、ゲルマニウム (Ge) 検出器を用いた測定結果と GEANT3 によるシミュレーションから計算された [44]。

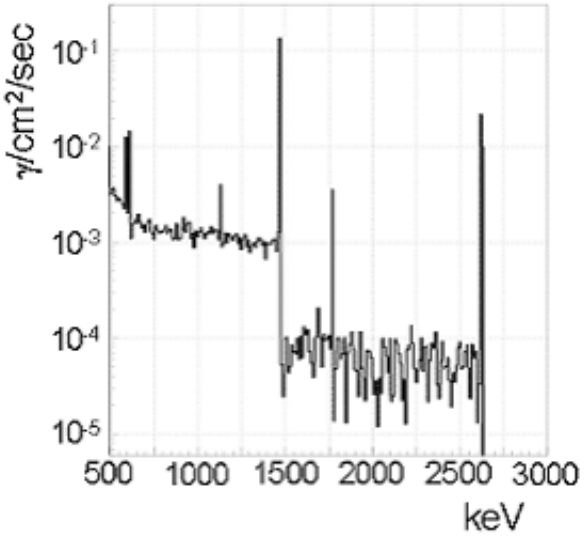


図 2.5: 神岡鉱山内のガンマ線フラックス

**中性子バックグラウンド**

中性子は液体キセノンによる自己遮蔽ができないために，暗黒物質探索の最終バックグラウ

ンドとなる。中性子は運動エネルギーの大きさにより，熱中性子と熱以外の中性子に大きく分けられる。

**熱中性子**

$E < 0.5eV$ の運動エネルギーを持つ中性子を高速中性子と呼ぶ。熱中性子は，物質中の粒子の運動と熱平衡に達しており，そのエネルギー分布はマクスウェル分布に従う。熱以外の中性子は媒質中の原子核による散乱のために減速され，熱中性子となる。$H_2O$，$D_2O$，グラファイトなどが，熱中性子化のための減速材としてよく利用されている。

**熱以外の中性子**

$E > 0.5eV$ の運動エネルギーを持つ中性子を熱以外の中性子と呼ぶ。この熱以外の中性子の中で，$E > 500keV$ の運動エネルギーを持つ粒子を高速中性子と呼ぶ。核分裂，核反応などにより放出される中性子はすべて高速中性子であり，通常数 $MeV$ の運動エネルギーを持つ。

また，中性子の発生場所から，環境中性子と環境以外の中性子に分類することができる。

**環境中性子**

環境中性子は，検出器以外から発生する。環境中性子の発生源としては以下の 3 つが考えられる。

- 岩盤に含まれる $^{232}$Th 系列と $^{238}$U 系列の放射性物質が核分裂をするときに放出される高速中性子
- 岩盤に含まれる $^{232}$Th 系列と $^{238}$U 系列の放射性物質が崩壊するときに放出されるアルファ粒子を，岩盤物質が ($\alpha$，n) 反応で吸収することによって放出される高速中性子
- 高エネルギー宇宙線ミューオンによる岩盤物質の原子核破砕によって放出される高速中性子

これらの中性子バックグラウンドも遮蔽体で減少させることができる。

**環境以外の中性子**

環境以外の中性子は検出器内部から発生する。検出器内部からの中性子の発生源は以下の 3 つが考えられる。

- 検出器材料に含まれる $^{232}$Th 系列と $^{238}$U 系列の放射性物質が核分裂するときに放出される高速中性子
- 検出器材料に含まれる $^{232}$Th 系列と $^{238}$U 系列の放射性物質が崩壊するときに放出されるアルファ粒子が ($\alpha$，n) 反応で吸収することによって放出される高速中性子
- 高エネルギー宇宙線ミューオンによる検出器材料の原子核破砕によって放出される高速中性子

高速中性子および熱中性子バックグラウンドを図 2.6、図 2.7[47] に示す。800kg 検出器での $\gamma$ 線バックグラウンドと同等のバックグラウンドを実現するためには、高速中性子は 4 桁、熱中性子は 2 桁抑えなくてはならない。

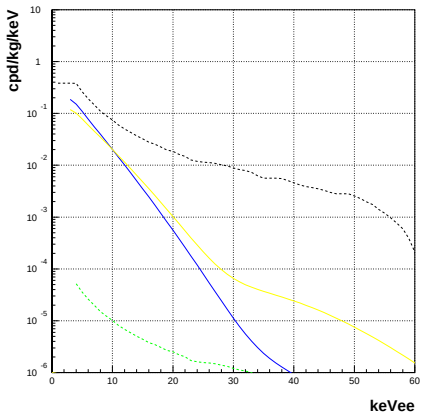


図 2.6: キセノン中での高速中性子バックグラウンド

黒点線：神岡鉱山内、緑点線：液体キセノン 800$kg$ 検出器の目標バックグラウンド、青：ニュートラリーノシグナル ($M_\chi$=50$GeV$、$\sigma = 10^{-6}$pb)、黄：ニュートラリーノシグナル ($M_\chi$=100$GeV$、$\sigma = 10^{-6}$pb))

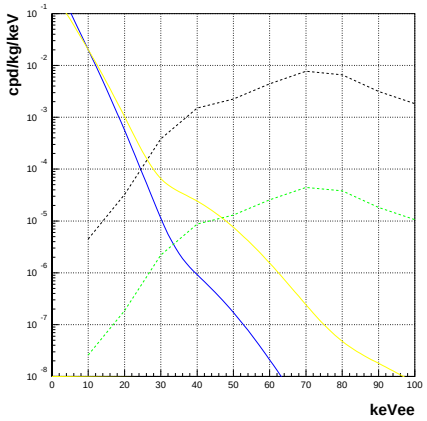


図 2.7: キセノン中での熱中性子バックグラウンド

黒点線：神岡鉱山内、緑点線：液体キセノン 800$kg$ 検出器の目標バックグラウンド、青：ニュートラリーノシグナル ($M_\chi$=50$GeV$、$\sigma = 10^{-6}$pb)、黄：ニュートラリーノシグナル ($M_\chi$=100$GeV$、$\sigma = 10^{-6}$pb))

**空気中のラドン (Rn)**

神岡鉱山内はラドン濃度が高い。表 2.3 より，鉱山内のラドン濃度は季節変動があるが，地表に比べると最大で 30 倍の違いがある。そこで，検出器周りの雰囲気を地上のラドンを活性炭で取り除いた Super Rn Free Air(ラドン濃度：$\sim$ 数 $mBq/m^3$) で遮蔽体内部を満たすことで地上よりもラドン濃度の少ない環境で測定を行う。

## 2.4 キセノン内部バックグラウンド

キセノン中に含まれている放射性物資によるバックグラウンドは，遮蔽体や自己遮蔽能力では防ぐことはできない。よって，この内部バックグラウンドは暗黒物質探索を行う上で大きな問題になる。キセノン内の主なバックグラウンド源は以下の 3 つである。

- U 系列
- Th 系列
- $^{85}$Kr

**U 系列**

$^{238}$U は $4.468\times10^9$ year の長い半減期を持ち、安定な核種になるまで図 2.8 のように連鎖的に崩壊する。この崩壊系列を U 系列と呼ぶ。$^{238}$U の含有量の見積もりは、U 系列は放射平衡であると仮定し、$^{214}$Bi→$^{214}$Po→$^{210}$Pb と連続して崩壊するときの Delayed Coincidence シグナルを測定し $^{214}$Bi の含有量を調べることにより行う。ただし、ラジウム Ra) より前の半減期はそれ以下と比べて長く、ラジウム (Ra) 前後で平衡が崩れている可能性がある。

**Th 系列**

$^{232}$Th は $1.405\times10^{10}$ year の長い半減期を持ち、安定な核種になるまで図 2.10 のように連鎖的に崩壊する。この崩壊系列を Th 系列と呼ぶ。$^{232}$Th の含有量の見積もりは、Th 系列は放射平衡であると仮定し、$^{212}$Bi→$^{212}$Po→$^{208}$Pb と連続して崩壊するときの Delayed Coincidence シグナルを測定し $^{212}$Bi の含有量を調べることにより行う。$^{212}$Bi の崩壊は、図 2.11 で表される。

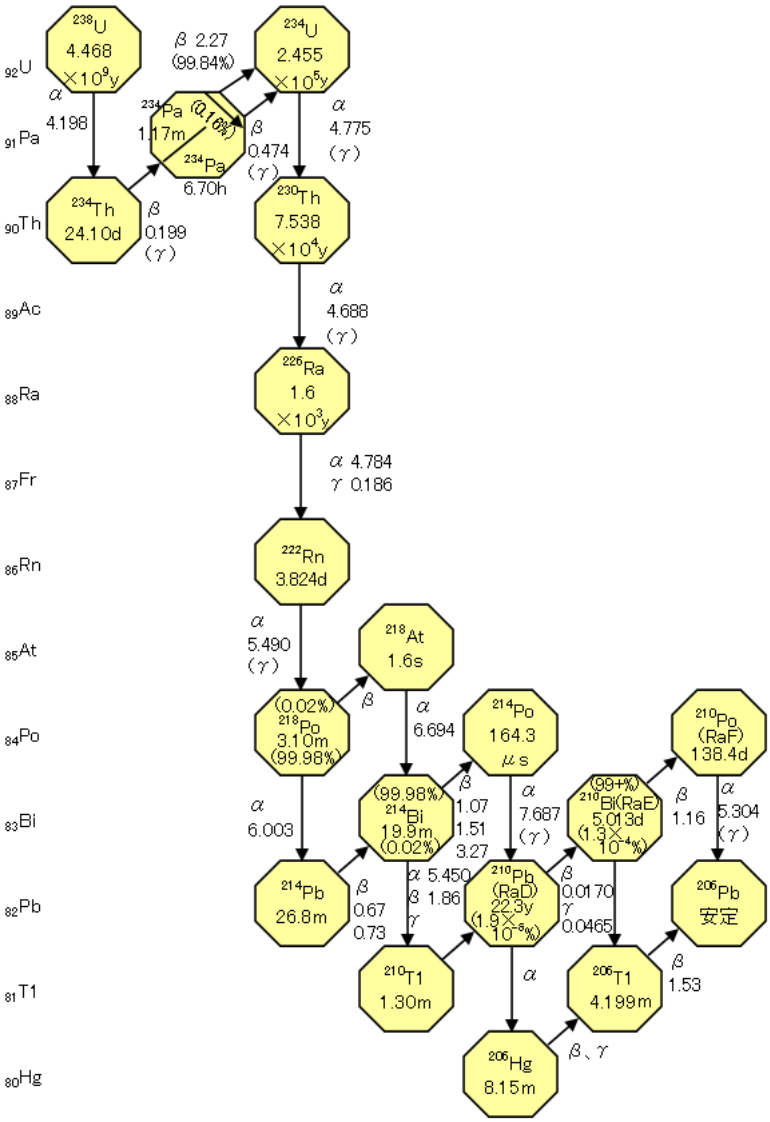


図 2.8: U 系列

$$^{214}\mathrm{Bi} \xrightarrow[\beta\,(99.98\%)\quad Q_\beta = 3.27\mathrm{MeV}]{} \overset{\tau_{1/2}=164.3\mu s}{^{214}\mathrm{Po}} \xrightarrow[\alpha\,(100\%)\quad 7.687\ \mathrm{MeV}]{} {}^{210}\mathrm{Pb}$$

図 2.9: $^{214}$Bi の崩壊

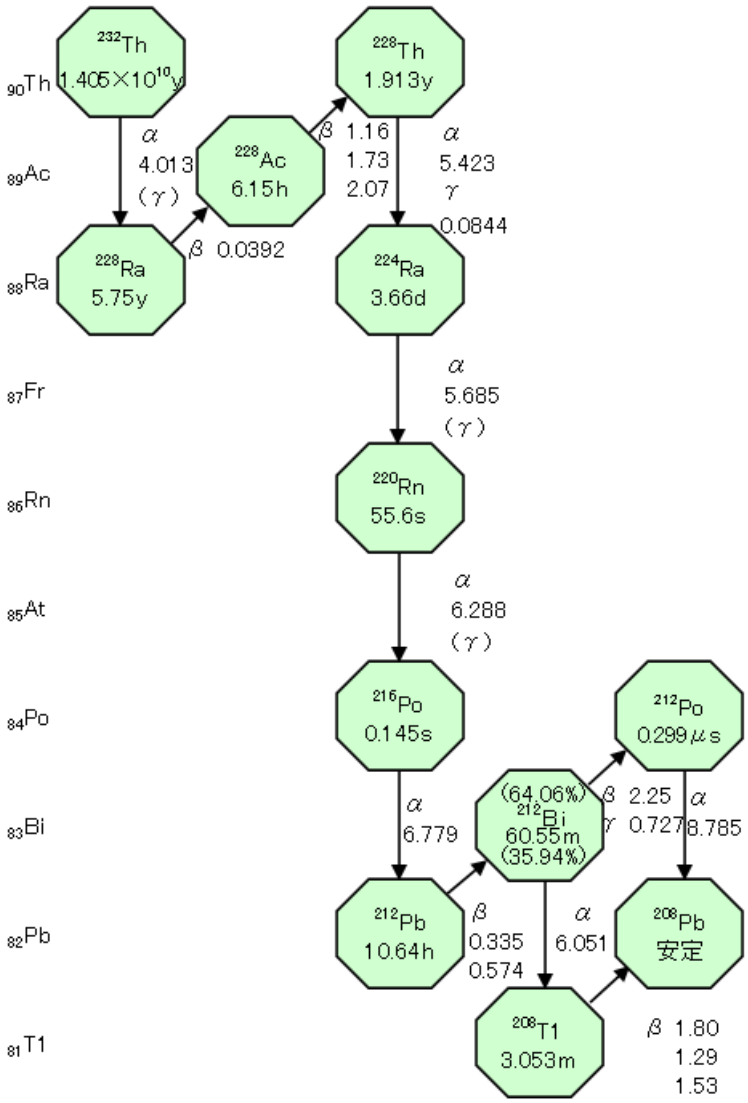


図 2.10: Th 系列

$$^{212}\mathrm{Bi} \xrightarrow[\beta\,(64.0\%)\quad Q_\beta = 2.25\mathrm{MeV}]{\tau_{1/2} = 299\,\mathrm{ns}} {}^{212}\mathrm{Po} \xrightarrow[\alpha\,(100\%)\quad 8.785\,\mathrm{MeV}]{} {}^{208}\mathrm{Pb}$$

図 2.11: $^{212}$Bi の崩壊

**$^{85}$Kr**

$^{85}$Kr は $\tau_{\frac{1}{2}} = 10.756$ year の比較的長い半減期を持ち、図 2.12 のように崩壊する。この同位体はもともとは自然界には存在しないものであるが、近年の軽水炉でのウラン燃料の燃焼に際して生成されるようになった。現在の $^{85}$Kr の存在比は、ゲルマニウム (Ge) 検出器によって測定した結果

$$^{85}\mathrm{Kr}/\mathrm{Kr} = 1.15 \times 10^{-11} \tag{2.3}$$

である。$^{85}$Kr の 99.563% は $Q_\beta = 687.0\ keV$ で $^{85}$Rb の基底状態に $\beta$ 崩壊する。このスペクトルは WIMP のシグナル領域に重なっており、これまで WIMP 探索実験にキセノンを使用することが敬遠されてきたのは、この Kr を含むためである。残りの 0.434% は $^{85}$Rb の励起状態に $\beta$ 崩壊し、半減期 $\tau_{\frac{1}{2}} = 1.015\ \mu$s で基底状態に落ち $514keV$ の $\gamma$ 線を放出する。$^{85}$Kr 含有量を見積には、エネルギースペクトルから $Q_\beta = 687.0keV$ の $\beta$ スペクトルの高さを見積もり、対応する含有量を算出する方法と Delayed Coincidence の測定を用いる 2 通りの方法がある。

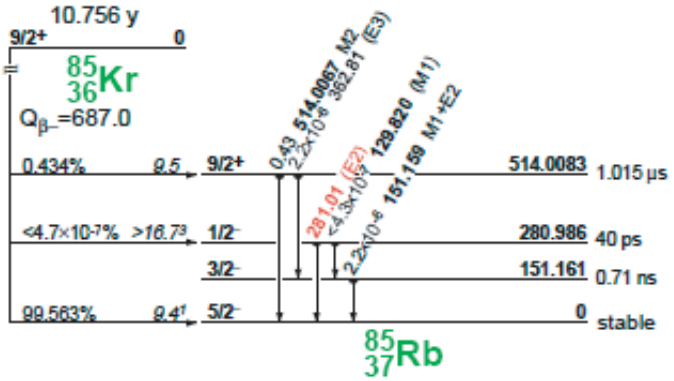


図 2.12: $^{85}$Kr の崩壊

これらの内部バックグラウンドの中で，特に Kr を除去するためにキセノン純化装置を用いている。

## 2.5 液体キセノン 100$kg$ 検出器

現在，XMASS 実験は液体キセノン 100$kg$ を用いた検出器を用いて，地下 1000m の神岡鉱山内に設けられたクリーンルーム内で行っている。これまでに以下に挙げることが検証されてきた。

- 低バックグラウンド環境の構築
- 位置とエネルギーの事象再構成の手法の確立
- キセノンの $\gamma$ 線自己遮蔽能力の評価
- キセノン純化装置の性能評価 ($^{85}$Kr 含有量の測定)

### 2.5.1 100kg 液体キセノン検出器

液体キセノン 100kg を用いた検出器は，内側が一辺 31cm の立方体の容器である。容器の厚さは 2cm で，材質は容器自身からのバックグラウンドを減少させるために無酸素銅を使用している。液体キセノンのシンチレーション光を観測するために，立方体の容器の各面 9 カ所に厚さ 5mm の $MgF_2$ の窓がとりつけられ，その外側に全 54 本の低バックグラウンド光電子増倍管が取り付けられている。検出器の写真を図 2.13 に示す。

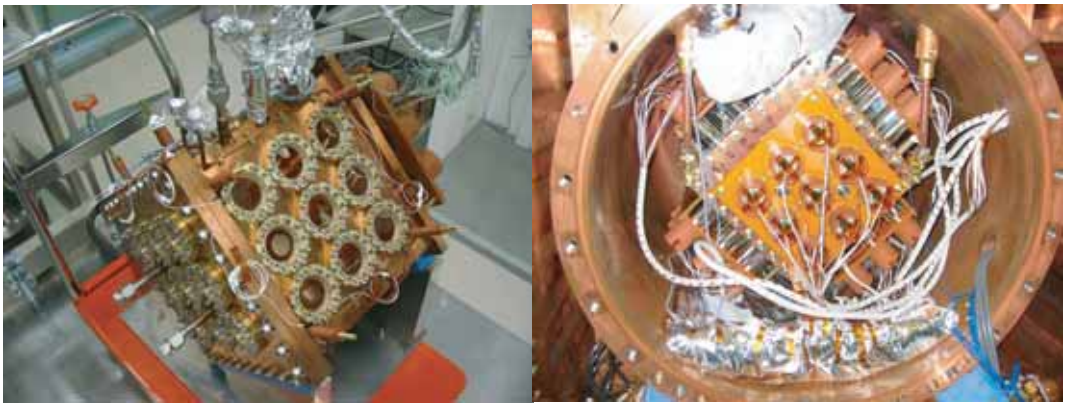

図 2.13: 100kg 液体キセノン検出器の写真

写真左:100kg 液体キセノン検出器、写真右:100kg 液体キセノン検出器と外真空容器

$MgF_2$ は、Xe シンチレーション光波長に対して約 90% の透過率を持っている。図 2.14 に $MgF_2$ の透過率曲線を示す。横軸は波長 (nm)，縦軸は透過率 (%) を表す。$MgF_2$ と PMT の間には緩衝材として 1mm のテフロンが挿入してある。

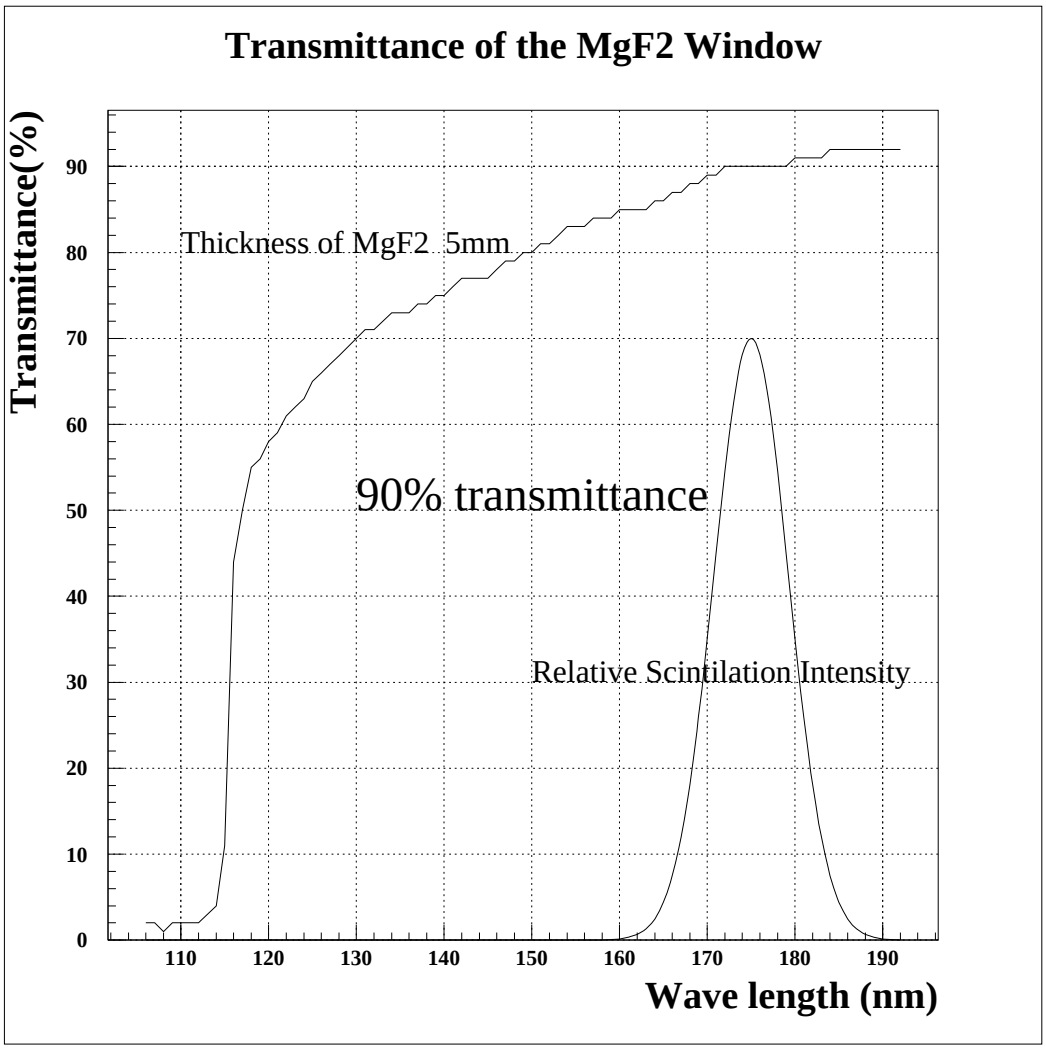


図 2.14: $MgF_2$ の透過率曲線

### 放射線遮蔽体

100kg 液体キセノン検出器では 2.3.1 節で述べた、神岡鉱山内におけるバックグラウンドを押さえるために検出器の周囲を遮蔽体で囲っている。内側から、無酸素銅、EVOH シート、鉛、ホウ酸、ポリエチレンとなっている。表 2.4 にそれぞれの厚さと役割を示す。

| 材質 | 厚さ | 目的 |
|---|---|---|
| ポリエチレン | 15cm | 高速中性子減速 |
| ホウ酸 | 5cm | 熱中性子捕捉 |
| 鉛 | 15cm | 環境 $\gamma$ 線,$\beta$ 線遮蔽 |
| EVOH シート | - | 極低濃度 Rn 空気 (Super Radon Free Air) 置換 |
| 無酸素銅 | 5cm | 鉛からの $\gamma$ 線,$\beta$ 線遮蔽 |

表 2.4: 遮蔽体の材質、厚さ、目的

遮蔽体構造の概念図を図 2.15 に示す。

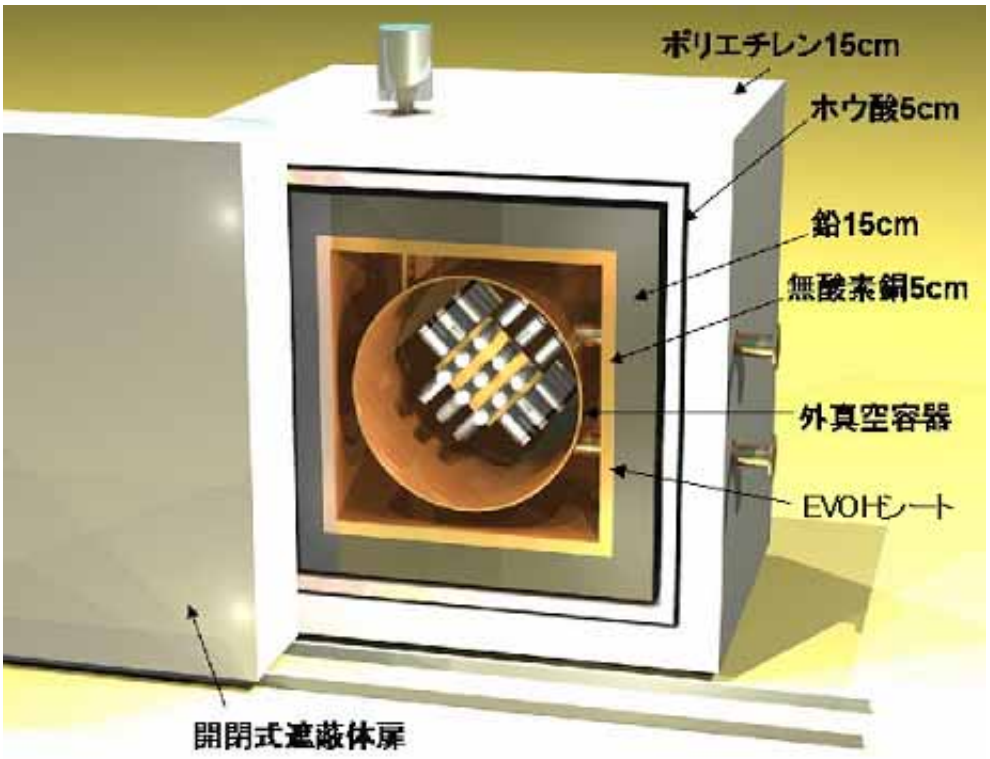


図 2.15: 外来由来バックグラウンド遮蔽体概念図

外側から、ポリエチレン、ホウ酸、鉛、EVOH シート、無酸素銅、銅製の外真空容器

### 低バックグラウンド光電子増倍管

液体キセノンのシンチレーション光を検出するために光電子増倍管を使用するのだが，液体キセノンの特性に適合した性能，低バックグラウンドの要請を満たした光電子増倍管が必要である。光電子増倍管に求めるものを以下に挙げる。

- 液体キセノンのシンチレーション光の波長 (178 nm) に対して高量子効率をもつこと
- 低バックグラウンドであること
- キセノンの沸点 (165 K) でも動作可能であること

我々は浜松ホトニクス (株) と共同で上記の条件を満たす，R8778 型光電子増倍管 (PMT) を開発した。R8778 型 PMT の写真を図 2.16，外略図を図 2.17 に示す。

図 2.16: R8778 型 PMT の写真

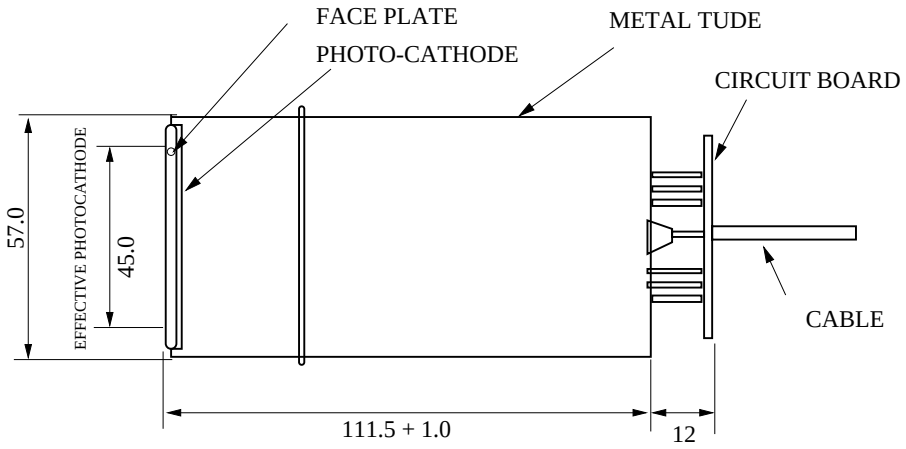


図 2.17: R8778 型 PMT の外略図

汎用の光電子増倍管は，可視〜紫外領域にしか感度がないため，真空紫外光である液体キセノンのシンチレーション光の検出には使用できない。R8778 型 PMT は，適切な光電面材料を選ぶことにより，液体キセノンのシンチレーション光の波長 (175nm) に対して約 25% と高い量子効率を持っている。入射光の波長に対する R8778 型 PMT の量子効率の浜松ホトニクスによる測定データを、図 2.18 に示す。

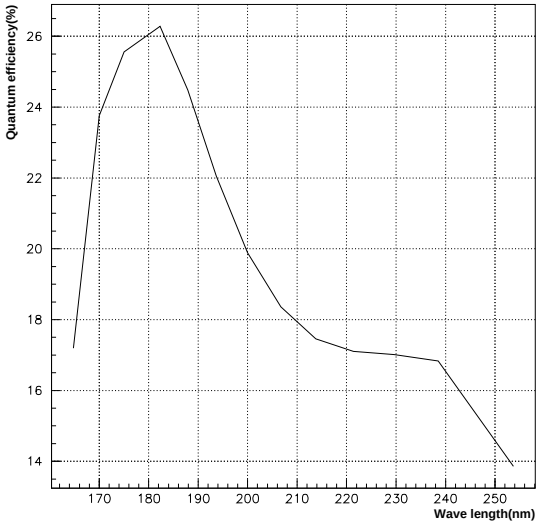


図 2.18: 真空紫外光 ($\lambda$ = 160 nm - 260 nm) に対する R8778 型 PMT の量子効率

R8778 型 PMT は，ブリーダー部を一般的なガラスエポキシ基板から PTFE 基板へ変更したこと，および側管の素材を一般的なガラス素材からメタル素材へ変更したことなどの改良により低バックグラウンドを実現している。表 2.5 は，XMASS グループがゲルマニウム検出器を使って測定した R8778 型と ZK0667 型の放射性不純物量の測定結果である。

| | U(Bq/PMT) | Th(Bq/PMT) | K(Bq/PMT) |
|---|---|---|---|
| R8778 型 | $1.8 \times 10^{-2}$ | $7.0 \times 10^{-3}$ | $1.4 \times 10^{-1}$ |
| ZK0667 型 | $5.0 \times 10^{-1}$ | $1.2 \times 10^{-2}$ | $6.1 \times 10^{-1}$ |

表 2.5: R8778 型光電子増倍管と ZK0667 型光電子増倍管の放射性不純物含有量

光電子増倍管で光子を検出する際に関わる値として，光電面の量子効率 (QE) と光電子の利得 (gain) があるが，これらの値は個々の光電子増倍管によって差がある。我々は，R8778 型光電子増倍管 54 本についての QE×gain をある光電子増倍管 (BA0178) を基準として常温で 2% の精度で合わせた。[46]

### 2.5.2 運転方法と測定データの解析法

XMASS 実験は液体キセノンを使用する極低温実験である。データの測定のためには，安定した運転方法の確立，安全対策が重要である。ここでは，運転方法と測定データの解析法について述べる。

### 運転手順

液体キセノン 100kg 検出器全体のガスラインを図 2.19 に示す。

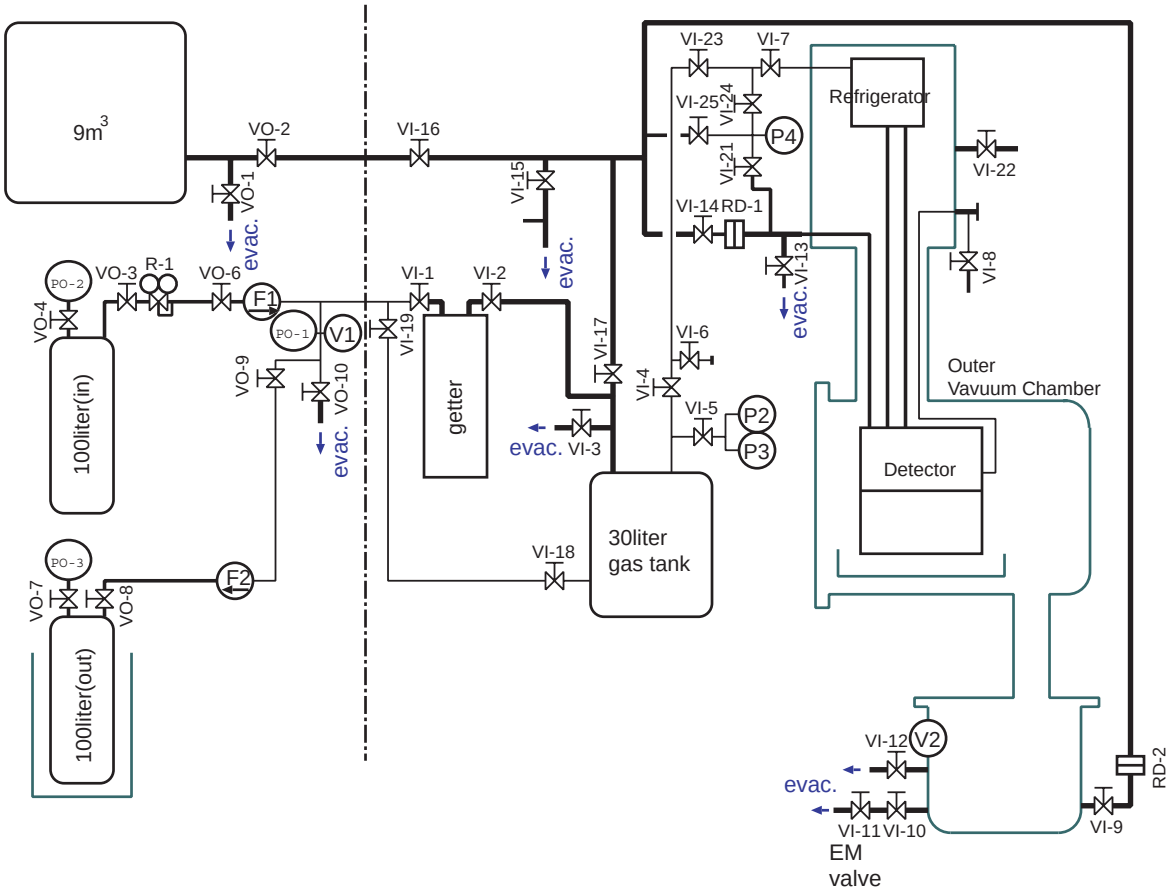


図 2.19: キセノンの導入、回収用のガスライン

ガスラインには、内側が電解研磨されたステンレス製パイプが使われている。図中の VO、VI はバルブ、R1 はレギュレータである。P1、P2、P3、P4 は圧力計、F1、F2 は流量計である。

また検出器の周囲には、状態を把握するためにいくつもの温度計が取り付けらている。図 2.20 にその位置を示す。

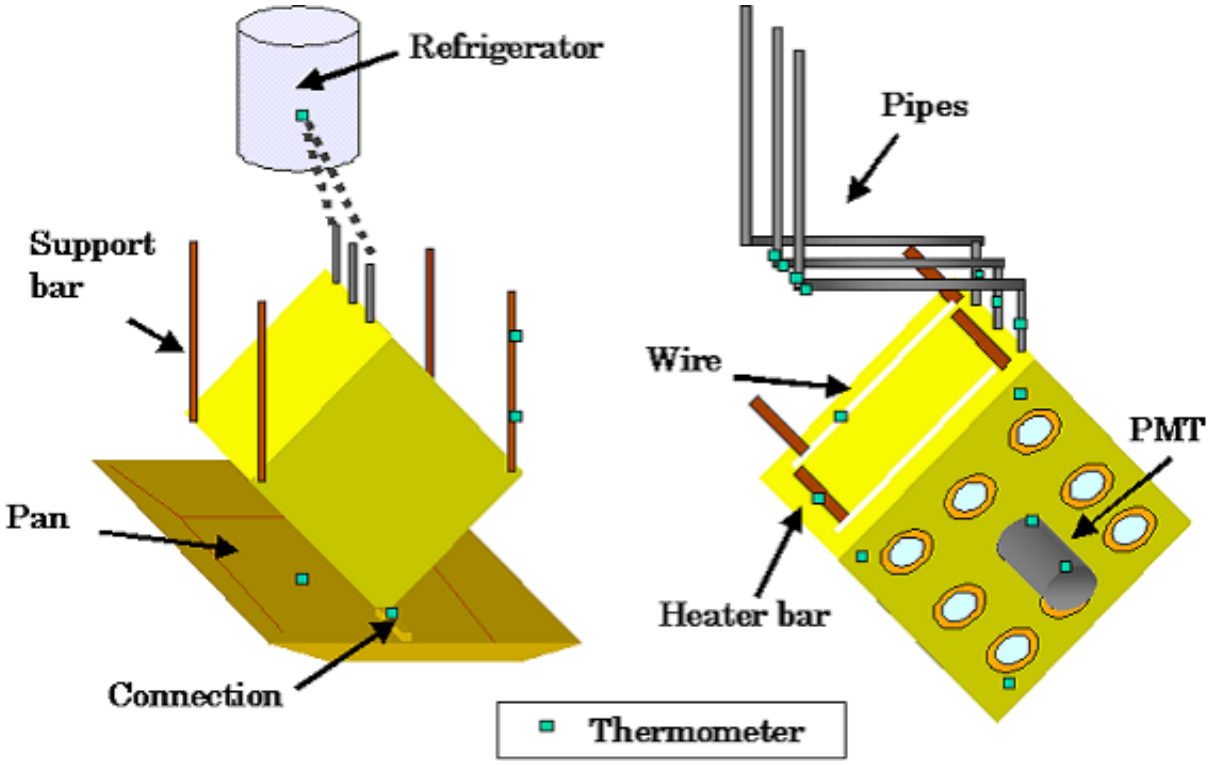


図 2.20: 検出器周辺の温度計配置

P3、P4、F1、F2 および温度計の値は、デジタルメータで表示させると同時にコンピュータで読み込んでおり、リアルタイムで状態を確認できる。Xe はボンベ (in) に常温で保管されている。実際に Xe を導入する際には、まずボンベの液体キセノンを気体の状態で、ゲッター装置を通して純化する。ゲッターは希ガスに含まれる活性な不純物を，精製装置内の合金と化学結合させることにより取り除く。キセノン中に含まれる希ガス元素以外の $O_2$、$H_2O$、CO、$CO_2$、$H_2$、$CH_4$、$N_2$ 不純物は、ゲッター純化装置で、おおよそ 1ppb 以下に抑えることができる。しかし、希ガス元素の放射性物質を取り除くことはできない。純化装置を通した後、30liter gas tank を通過する。これはステンレス製の容器で、配管内の急激な圧力変化を防ぐために用意された、ガスキセノン用の空間である。この後、ガスキセノンは 100kg キセノン容器直前でギフォード・マクマフォン (GM) 冷凍機を用いて液化され導入される。

検出器内にどれだけ液体キセノンが導入されているかをモニターするために内部に 7 個の液面計が設置されている。液面計は白金抵抗温度計で、ガス中では自己発熱によって温度が上昇している抵抗が、液体 Xe につかると温度が下がることを利用して液面の位置をモニターする。液面計の配置を図 2.21 に示す。

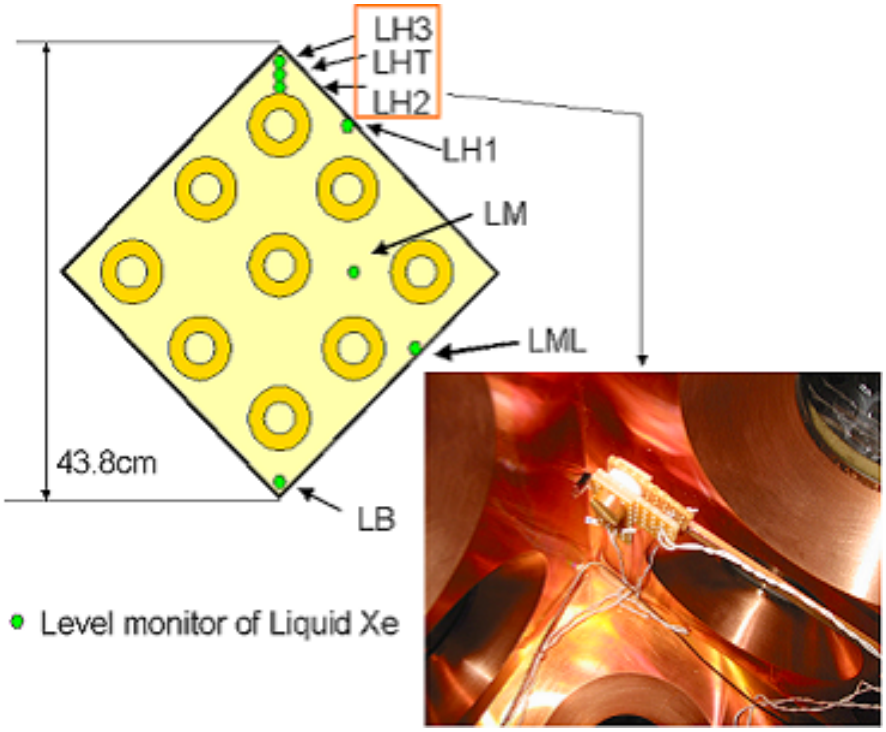


図 2.21: 検出器内液面計配置

実際の運転では、キセノンの液面は容器の最上部までは達しないようにする。これは、万が一停電で冷凍機が動かなくなった場合を考慮した安全のための対処である。液面図 2.21 の LH2 以下に保てば、残っている空間は、全体の 1.3% であり、5K 程度の温度上昇 (プロトタイプ検出器で 3 時間) には耐えられる。液面計が上部に集中して設置されているのはこういった理由である。LH2 の液面では、一番上の列の $MgF_2$ 窓の半分程度が液体キセノンに浸かる。

測定が終了したら、キセノンはボンベ (out) に回収される。予め真空に引いておいた回収用ボンベを液体窒素を用いて冷却することで、ボンベ内で Xe は固体となる。固体になると蒸気圧が急激に減少することを利用してプロトタイプ検出器から回収ボンベに回収する。

プロトタイプ検出器は、$MgF_2$ の制限から耐圧は絶対圧で 3 気圧になっている。検出器内の液体 Xe が急激に気体に変わると、圧力が急激にあがり $MgF_2$ 窓および検出器自体の破裂につながるため、緊急用の破裂板がついている。内部の圧力が絶対圧で 3 気圧以上になると破裂板が破裂し、緊急用 $9m^3$ タンクに回避されるようになっている。

また、万が一窓が割れ、液体キセノンが漏れ出したとしても、キセノンの気化による急激な圧力上昇を防ぐため、検出器の下に受け皿が用意されている。皿とプロトタイプ検出器とを銅棒で繋げ、熱接触を持たせてやることで、運転中は受け皿は液体キセノン温度まで冷やされている。

### 2.5.3 データ収集系

データ収集系を図 2.22 に示す。赤ケーブルは PMT からのアナログ信号、緑ケーブルはトリガーを作るデジタル信号、紫ケーブルはデータ読み出しに関係するデジタル信号、青ケーブルは VME の I/O Register からの制御デジタル信号を表す。

PMT からの信号は ADC と FADC で測定される。ADC は PMT54 本のシグナルが独立で測定できるようになっている。FADC は PMT54 本のシグナルを合計したものを測定する。FADC は、電荷と時間の両方を同時に測定できることから、キセノンに含まれる内部バックグラウンドの量を見積もることができる。内部バックグラウンドとして、U 系列、Th 系列、$^{85}$Kr がある。特に、U 系列、Th 系列の見積もりには図 2.9、2.11 中の高エネルギーの $\alpha$ 線を観測する必要がある。このとき、ADC の飽和を避けるため、PMT gain=$1.36\times10^6$ になるように PMT に供給する HV を調節する。その他の測定の時は、基本的に PMT gain=$8.25\times10^6$ を用いる。

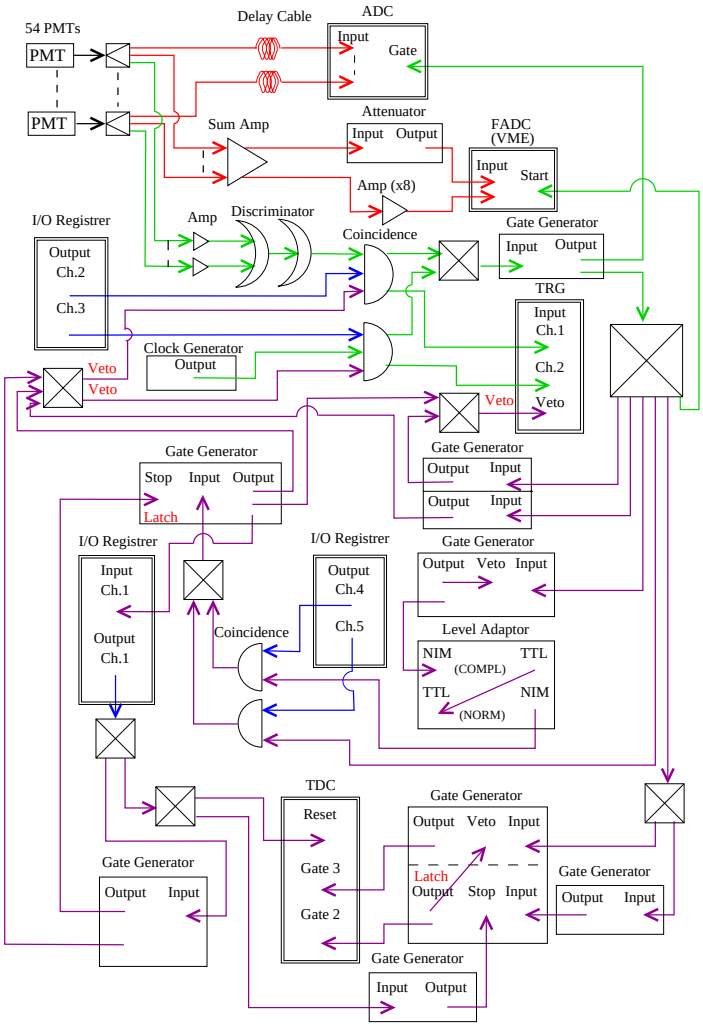


図 2.22: 液体キセノン 100kg 検出器データ収集系

### 2.5.4 事象再構成

XMASS 実験は液体キセノンの自己遮蔽効果を使用し、検出器中心部での極低バックグラウンド環境を実現させることが最大のポイントである。そのためには捕らえた事象の検出器内部での場所、エネルギーなどの情報を知る必要がある。その方法は、キセノンのシンチレーション光を PMT で光パターンとして捕らえたあと、その光パターンを用いて、検出器内で粒子が落としたエネルギーとその位置を再構成する。図 2.23 に検出器がとらえた典型的な光パターンを示す。

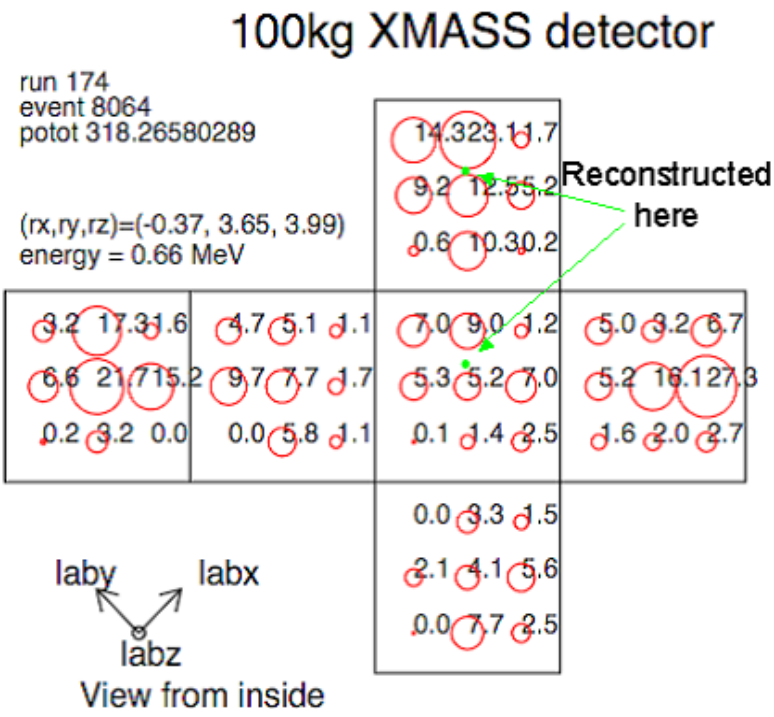


図 2.23: 検出器の捕らえた光のパターン

検出器を内側から展開した図。赤い丸が光の量を表し、大きいほど多くの p.e. を捕らえたことになる。緑の点は再構成された位置を面に射影したものである。

キセノンのシンチレーション光が PMT の光電面に達すると光電効果により、光電子が出て PMT の anode に到達する。この光電子の数が事象再構成時の入力パラメーターとなる。以下、の光電子 (数) のことを p.e.(Photo Electron) と記す。

事象生成シミュレーションを用いて、プロトタイプ検出器キセノン部分の 2.5cm 間隔の格子点上から光子を発生させ、各格子点での 54 本の PMT の p.e. 収集効率を求める。格子点間の座標については、線形で内挿する。これらをマップと呼び、

$$F = F(x, y, z, i) \tag{2.4}$$

で定義する。i は 54 本の PMT に対応する。

位置の再構成は、得られた 54 本の p.e. 分布とマップを比較することで決定する。比較には、

$$\log(L) = \sum_{i=1}^{54} \log(\frac{e^{-\mu}\mu^n}{n!}) \tag{2.5}$$

で表される Poisson 分布の Liklihood を使用する。n は得られた p.e. 数で、$\mu$ は

$$\mu = F(x, y, z, i) \times (\text{予想される光子の総発生数}) \tag{2.6}$$

である。予想されるシンチレーション光子の総発生数は、54 本の PMT の p.e. 数の総和を収集効率の総和で割ったものとする。

$$(\text{予想される光子の総発生数}) = \frac{\sum_{i=1}^{54} n}{\sum_{i=1}^{54} F} \tag{2.7}$$

この Likelihood が最大になる座標を求めて、事象生成の位置として再構成する。再構成の位置の座標は、実際の検出器の方向に則した座標系で表す。エネルギー再構成は、予想される光子の総発生数から求める。

$$E[MeV] = \frac{(\text{予想される光子の総発生数})}{N_{photon}[/\text{MeV}]} \tag{2.8}$$

$N_{photon}$ は Xe の 1MeV 当たりの光子発生数で、4,2000[photon/MeV] とした。

エネルギー再構成は、エネルギー分解能で評価する。エネルギー分解能 $R_E$ は、

$$R_E[\%] = \frac{RMS}{MEAN} \times 100 \tag{2.9}$$

で定義する。MEAN は分布の平均値で、RMS は標準偏差である。また、位置の再構成は位置分解能で評価する。真の事象の発生位置と再構成の結果求まった位置との距離 ΔL を、

$$\Delta L = [(\Delta X)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta Z)^2]^{\frac{1}{2}} \tag{2.10}$$

で定義し、その分布の 68% の位置と 90% の位置を位置分解能とする。

## 2.6 液体キセノン 100kg 検出器での測定と現状

### 2.6.1 液体キセノン 100kg 検出器のモンテカルロシミュレーション

シミュレーションには CERN で開発された GEANT3 を用いた。GEANT3 は 10keV〜10TeV までのエネルギー領域で電磁相互作用をシミュレートできる。

図 2.24 に GEANT3 の描画ソフトで描いたシミュレーションでの検出器を示す。検出器の周りに遮蔽体を置き、遮蔽体ガスラインの配管用、信号読み出しのためのケーブル用の穴を開けた。また、検出器較正のに用いる $\gamma$ 線照射用の穴も開けた。このように、実際の検出器をよく再現するようにシミュレーション構造を構築した。

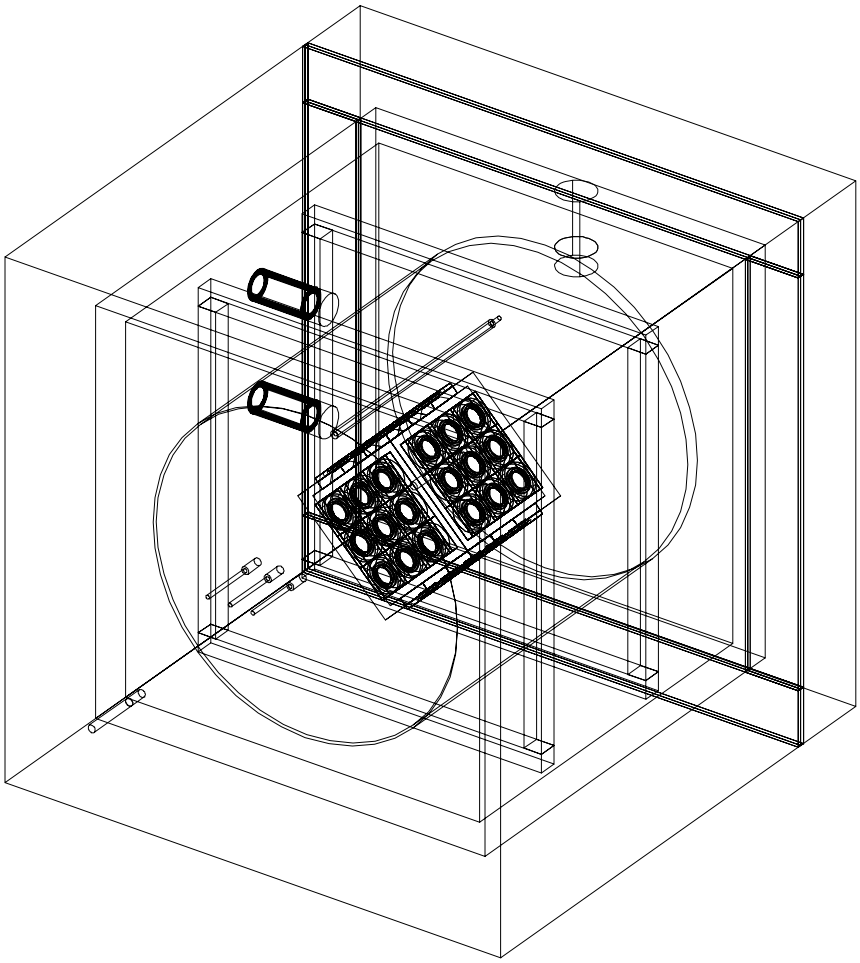

図 2.24: GEANT3 を用いたプロトタイプ検出器の構造図

事象再構成のプログラムは、このシミュレーションで発生させた基準となる光のパターンとデータを照らし合わせることで行う。

### 2.6.2 ガンマ線を用いた検出器の較正

液体キセノン 100kg 検出器にガンマ線を照射し，事象再構成の精度，キセノンの自己遮蔽能力を見積もった。

#### 事象再構成後のエネルギー

事象の位置再構成の評価のために検出器の座標を設定する。検出器の中心を系の原点 (0,0,0) とし，図 2.25 のように x,y,z とする。また，ガンマ線の照射位置は図 2.25 中の A,B,C である。

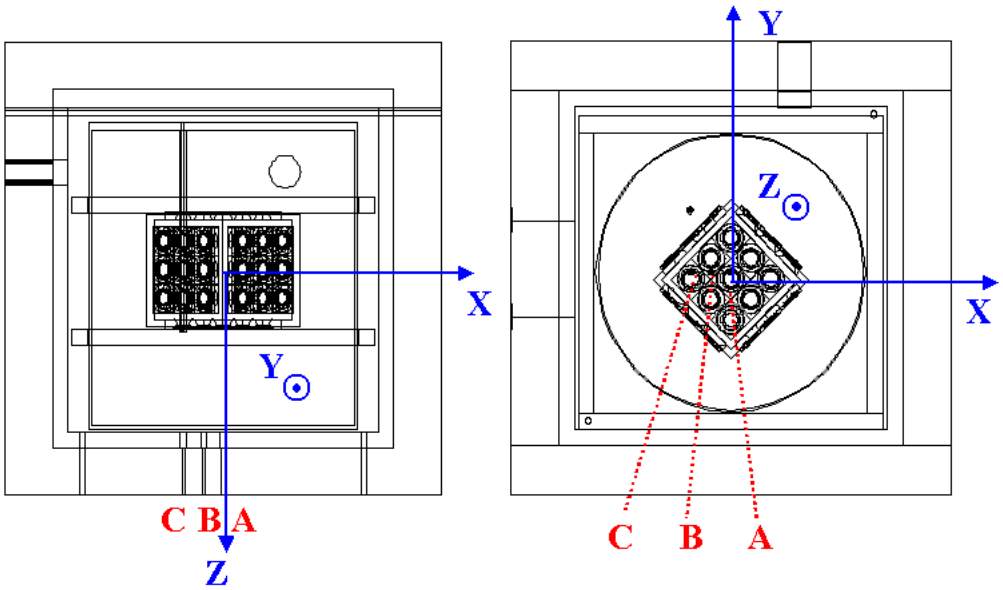


図 2.25: 検出器の座標系とガンマ線の照射位置

評価には，図 2.25 中の A からガンマ線を照射したデータを用いた。照射した線源は $^{137}$Cs である。データは，各 PMT の p.e. 数が 250 未満 (ADC 飽和事象の除去) の条件を満たす事象を選んだ。図 2.26 にデータとシミュレーションのエネルギー分布を示す。横軸は事象再構成後のエネルギー、縦軸は各 bin を全事象数で規格化したもの。左図がデータ、右図がシミュレーション。黒線は All Volume、黄緑線は 20cm FV、赤線は 10cm FV で，桃線がガウシアンフィットを表す。

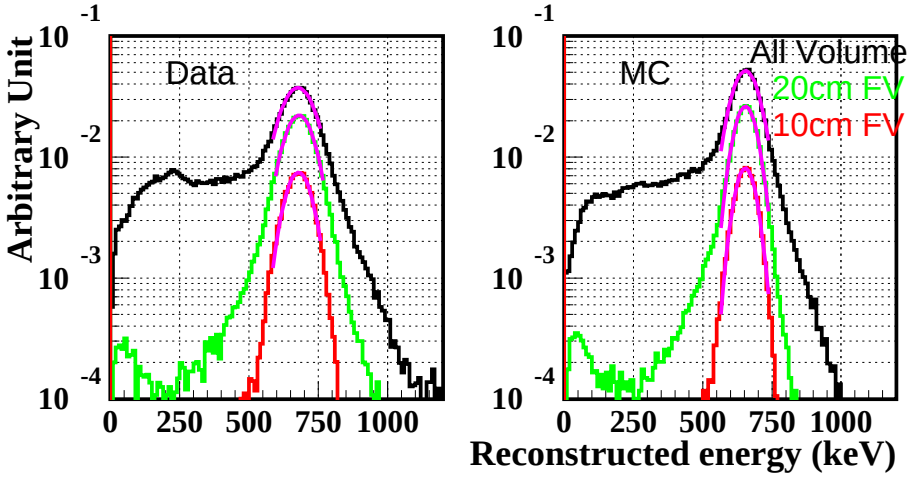


図 2.26: 事象再構成後のエネルギー分布

エネルギー分布のピーク (MEAN) の周り ±80keV をガウシアンでフィットし，RMS を求めた。表 2.6 にフィットによるエネルギーの MEAN と RMS を示す。また、この値を用いて、式 2.9 より求めたエネルギー分解能も示す。

| | | All Volume | 20cm FV | 10cm FV |
|---|---|---|---|---|
| Data | MEAN [keV] | 676.7 | 680.5 | 678.9 |
| | RMS [keV] | 64.7 | 55.4 | 48.8 |
| | Resolution [% ] | 9.6 | 8.1 | 7.2 |
| MC | MEAN [keV] | 654.5 | 654.6 | 654.7 |
| | RMS [keV] | 50.6 | 41.4 | 37.7 |
| | Resolution [% ] | 7.8 | 6.3 | 5.8 |

表 2.6: 事象再構成後の $^{137}$Cs のエネルギーと分解能

結果は，データ，シミュレーション共に $^{137}$Cs が放出するガンマ線エネルギーの 662keV を RMS の範囲でよく再現した。有効体積カットをすると，エネルギー分解能は検出器中心にいくほどよくなり，All Volume と 10cm FV では 2% の差がある。また，データのエネルギー分解能はシミュレーションと比べて，平均して 1.5% 落ちる。

以上より，事象再構成後のエネルギーはよく再現されていることが確認できた。

### 事象再構成後の位置

評価には，図 2.25 中の A，B，C からガンマ線を照射したデータを用いた。照射した線源は $^{137}$Cs である。データは次の条件を満たす事象を選んだ。

1. 事象再構成後の位置 z が ±10cm 以内
2. PMT54 本で捕らえた p.e. 数がピークの前後 50p.e. 以内の事象
3. 各 PMT の捕らえた p.e. 数が 250 未満（ADC 飽和事象の除去）

これらの条件を満たす事象再構成後の位置 x、y をそのピークの周り ±4cm を非対称ガウシアンでフィットした。図 2.27 にデータとシミュレーションの事象再構成後の位置 x、y の図を示す。左列が事象再構成後の位置 x、右列が事象再構成後の位置 y である。上段からガンマ線の照射位置 A，B，C の順である。青線がデータ、赤線がシミュレーション、桃線が非対称ガウシアンフィットを表す。データとシミュレーションは事象数で規格化した。

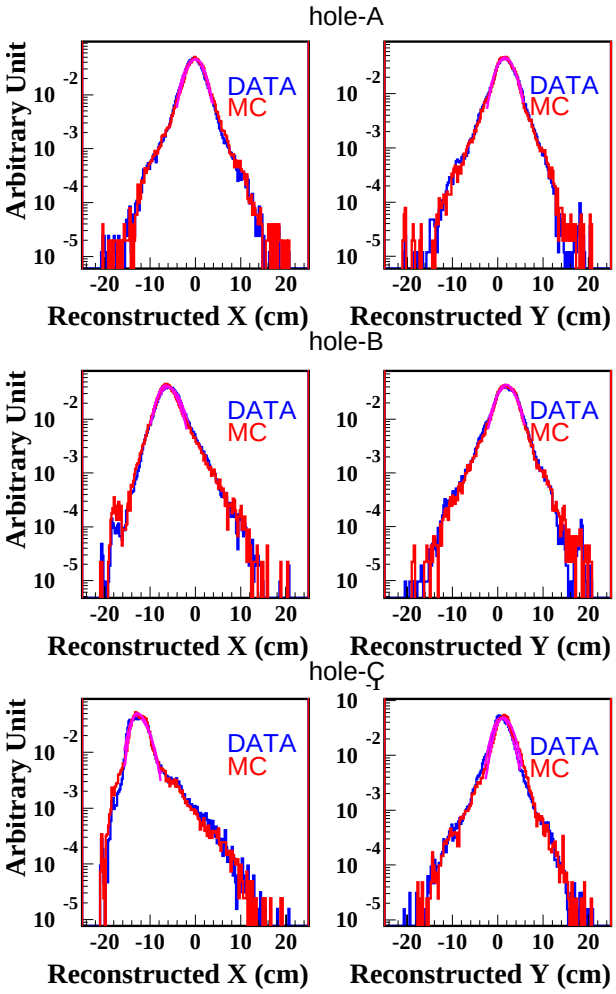


図 2.27: データとシミュレーションの事象再構成後の位置の比較

表 2.7 にフィット結果を示す。値はフィットした中心値 (MEAN) と幅 (RMS) を，それぞれの照射位置ごとにデータとシミュレーションで求めたものである。

| Reconstructed X | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | hole-A | hole-B | hole-C |
| Data | MEAN [cm] | -0.3 | -6.0 | -13.2 |
| | RMS [cm] | 4.1 | 4.6 | 3.9 |
| MC | MEAN [cm] | 0.1 | -6.6 | -12.9 |
| | RMS [cm] | 4.0 | 4.2 | 3.5 |

| Reconstructed Y | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | hole-A | hole-B | hole-C |
| Data | MEAN [cm] | 1.5 | 1.9 | 0.7 |
| | RMS [cm] | 4.2 | 4.7 | 3.7 |
| MC | MEAN [cm] | 1.5 | 1.8 | 1.2 |
| | RMS [cm] | 4.0 | 4.2 | 3.7 |

表 2.7: データとシミュレーションの事象再構成後の位置 x，y の比較

また，事象再構成後の位置 x，y を 2 次元で表した図を図 2.28 に示す。図 2.28 は，ガンマ線の入射方向に対して垂直な成分の各照射位置ごとの事象再構成後の位置を表す。横軸が事象再構成後の位置 x，縦軸が事象再構成後の位置 y である。図 2.28 の上段がデータ，下段がシミュレーションで，黒四角は検出器の形状を表している。事象再構成後の位置は，よく再現されていることが確認できた。

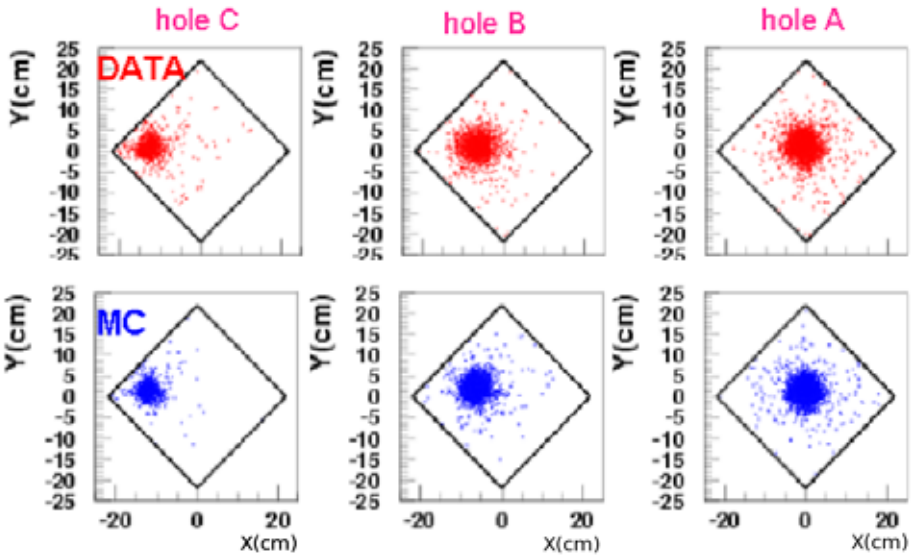


図 2.28: データとシミュレーションの事象再構成後の位置の比較 (2 次元)

### 自己遮蔽効果の検証

液体キセノン 100kg 検出器にガンマ線を照射したデータを用いて，液体キセノンの自己遮蔽効果の検証を行った。前述の事象再構成後の位置は，信頼性のおけるものなので，ガンマ線を照射したデータにおける，事象再構成後のガンマ線の入射方向に対する位置の分布をみれば，自己遮蔽能力の評価ができる。評価には，図 2.25 中の A からガンマ線を照射したデータを用いた。照射した線源は，$^{137}$Cs，$^{60}$Co である。データは次の条件を満たす事象を選んだ。

1. 事象再構成後の位置 x、y が ±10cm 以内
2. 各 PMT の捕らえた p.e. 数が 250 未満（ADC 飽和事象の除去）

ガンマ線を照射した測定中においても，環境ガンマ線は検出器に降り注いでいるので，シミュレーションと比較する場合は，バックグラウンドを差し引いたデータスペクトルで評価を行う。ガンマ線を照射した測定データからバックグラウンド測定データを差し引いたスペクトルと，シミュレーションによるスペクトルを図 2.29 に示す。横軸は $\gamma$ 線の入射方向に対する事象再構成後の位置で，縦軸は各 bin を全事象数で規格化したものである。左図が $^{137}$Cs、右図が $^{60}$Co の比較で、青線がデータ、赤がシミュレーションによるものである。影がかかっている部分は、p.e. 飽和事象を表す。

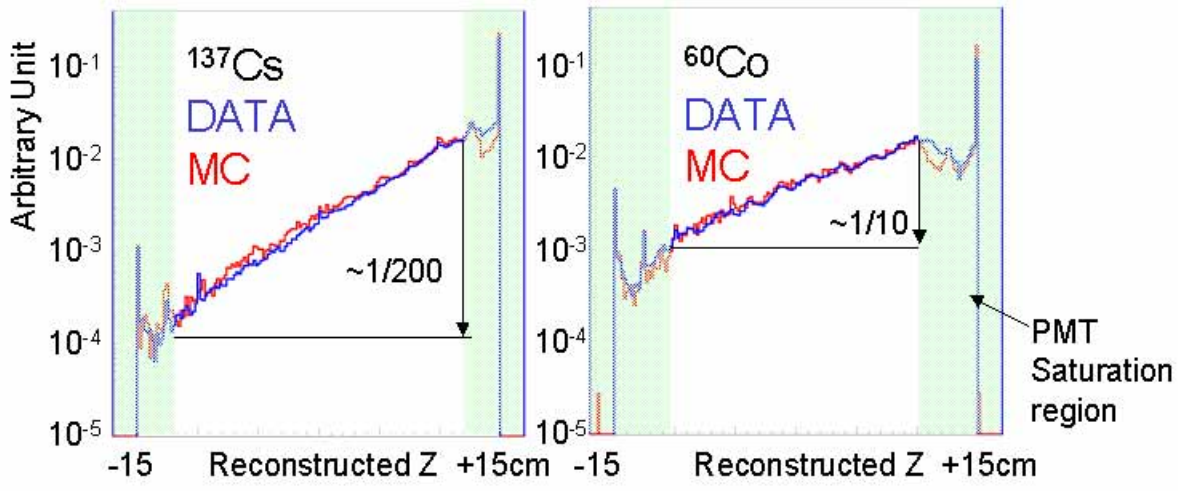


図 2.29: データとシミュレーションの自己遮蔽効果の比較

図 2.29 から，データとシミュレーションのガンマ線入射方向 (z 方向) の傾きがよく一致した。自己遮蔽能力は，$^{137}$Cs のエネルギーのガンマ線が液体キセノン内を 20cm 進むと約 1/200 に，$^{60}$Co は約 1/10 になることが確認できた。

## 2.7 バックグラウンドの理解の現状

### 2.7.1 外部バックグラウンド

外部起源バックグラウンドの中で，神岡鉱山環境内でのバックグラウンドは 2.3.1 節で述べた。他に考えられるバックグラウンド源として，検出器の構造物があげられる。

#### 鉛シールド起源のバックグラウンド

液体キセノン 100kg 検出器では，環境ガンマ線を遮蔽するために鉛シールドを設置した。この鉛に含まれる $^{210}$Pb は図 2.30 のように崩壊して 1.162keV のベータ線を放出する。このベータ線が鉛と相互作用して制動放射ガンマ線を放出する。このガンマ線がバックグラウンドになる。

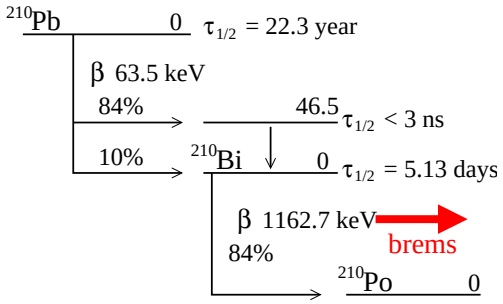


図 2.30: $^{210}$Pb の崩壊

$^{210}$Pb の放射能はゲルマニウム検出器で測定されており，250[Bq/kg] である。シミュレーションでは Decay4 を用い，厚さ 15cm の鉛シールドのうち，検出器側 1cm の厚みの中から 1.162keV のベータ線を $4\pi$ 方向に発生させて，制動放射によるガンマ線を発生させている。

#### 光電子増倍管起源のバックグラウンド

光電子増倍管からのバックグラウンドは，表 2.5 のように測定されている。シミュレーションでは，これらの値をもとに，光電子増倍管内から一様にガンマ線を発生させている。

### 2.7.2 内部バックグラウンド

内部起源バックグラウンドとして考えられるものは 2.4 節で述べたように、ウラン系列，トリウム系列，$^{85}$Kr の 3 つである。ウラン・トリウム系列は液体キセノン 100kg 検出器でのバックグラウンド測定，$^{85}$Kr は独立に測定が行われ，以下のように見積もられている。

- ウラン系列：$^{238}$U/Xe = (30±5)×$10^{-14}$ [g/g]
- トリウム系列： $^{232}$Th/Xe <23×$10^{-14}$ [g/g]
- $^{85}$Kr：$^{85}$Kr/Xe = 3.3±1.1 ppt [mol/mol] [48]

### 2.7.3 バックグラウンドの測定

これまでに，液体キセノン 100kg 検出器でのバックグラウンド測定が 2 回行われている [48]。2 回のバックグラウンド測定データとシミュレーションによるエネルギー分布を図 2.31 に示す。

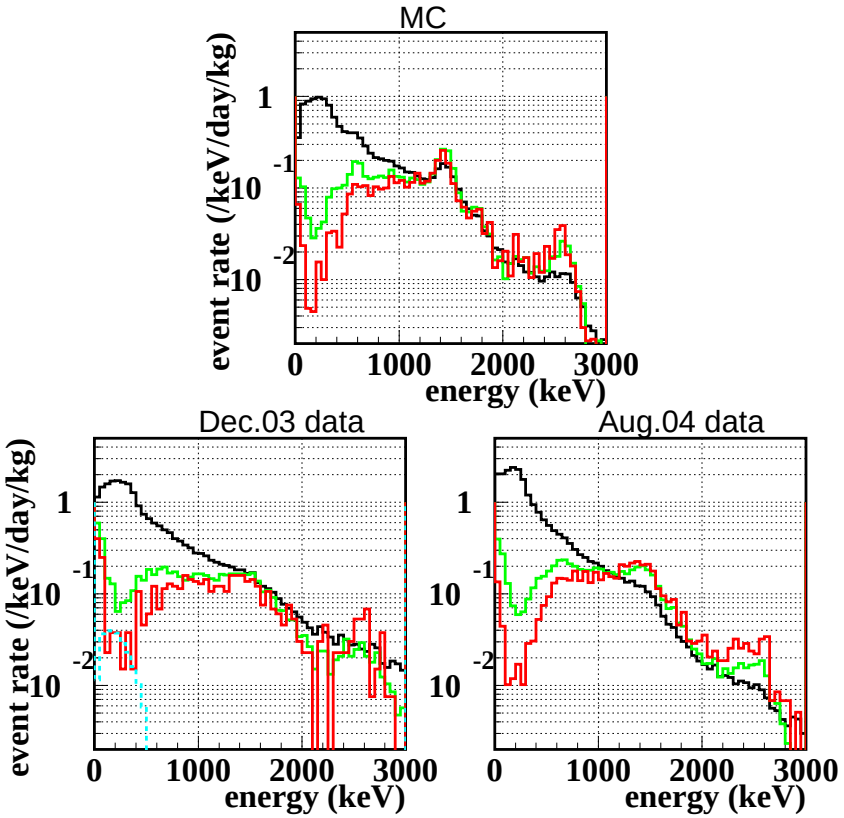


図 2.31: バックグラウンド測定結果とシミュレーション

上図がシミュレーション，左下が 2003 年 12 月，右下が 2004 年 8 月のデータである。黒線は All Volume，黄緑線が 20cm FV，赤線が 10cm FV でのエネルギー分布を表す。左下図の水色点線はシミュレーションによる Kr/Xe=3ppb[mol/mol] 相当のベータ線のスペクトルである。図 2.31 より，2004 年 8 月の測定では，Kr からのベータ線が及ぼすエネルギー範囲 (100∼400keV あたり) のバックグラウンドの減少が確認できた。つまり，Kr の除去効果が液体キセノン 100kg 検出器で観測された。よってキセノン純化装置で Kr を除去したこ効果を液体キセノン 100kg 検出器の測定から示すことができている [48]。

## 2.8 まとめ

液体キセノン 100kg 検出器で，事象再構成後の位置，エネルギーともにシミュレーションとよく一致しており，事象再構成の手法が確立されている。また，液体キセノンの自己遮蔽効果についても確認ができている。

バックグラウンド測定では，外部由来バックグラウンドでデータとシミュレーションがファクター 2 以内で一致している。

また，内部バックグラウンドの含有量の見積もりも行われており，ウラン系列，トリウム系列，Kr がそれぞれ，$^{238}$U/Xe=(33±5)×$10^{-14}$[g/g]，$^{232}$Th/Xe<23×$10^{-14}$ [g/g](90% C.L.)，Kr/Xe=3.3ppt[mol/mol] である。

# 第3章　光電子増倍管の放射線不純物の定量測定

次期計画の液体キセノン 800kg 検出器で暗黒物質探索を行う場合，現在液体キセノン 100kg 検出器で使用している光電子増倍管の放射性不純物量を低減しなければならない。そこでこの論文では現在使用している光電子増倍管の部品を神岡地下実験施設内にある高純度ゲルマニウム (HPGe) 検出器で測定を行った結果について述べる。

## 3.1　測定の動機と目的

XMASS 実験で本格的に暗黒物質探索を行うのは，液体キセノン 800kg を用いた検出器である。液体キセノンを直径 80cm の球形の容器に満たし，光電子増倍管でそのまわりを取り囲む。液体キセノン 800kg 検出器の計画図を図 3.1 に示す。

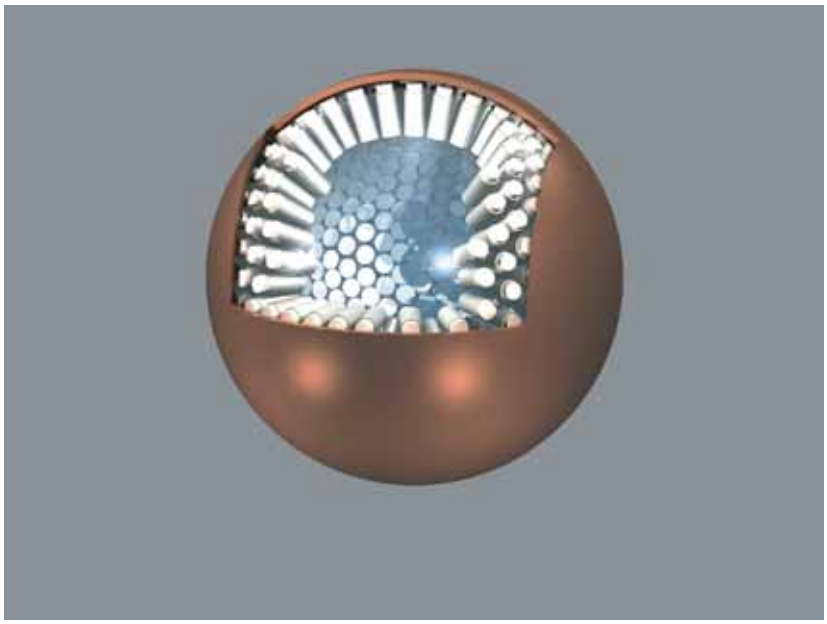

図 3.1: 次期液体キセノン (Xe)800kg 検出器の概念図

球形にすることで，光電子増倍管からの死角を無くし，約 70% の光電面被覆率を持つように設計することで，低エネルギー閾値，高い事象再構成能力の実現を図り，装置を大型化することでキセノンの自己遮蔽能力を十分に発揮し，検出器中心部の体積中で極低バックグラウンド化を図る。

図 3.2 にシミュレーションによる 800kg 検出器で予想される暗黒物質、低エネルギー太陽ニュートリノ、$0\nu\beta\beta$ 崩壊によるシグナルと、ガンマ線バックグラウンドを示す。

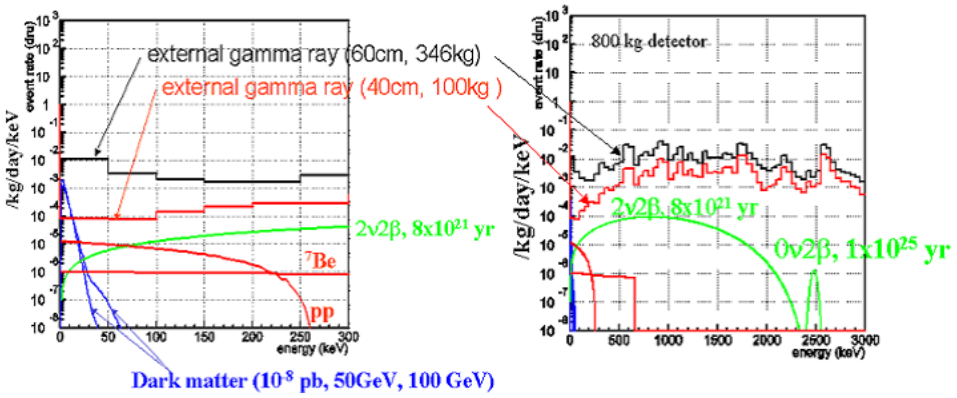


図 3.2: 液体キセノン (Xe)800kg 検出器で予想されるシグナル

横軸はエネルギー，縦軸はイベントレートである。左図の青線左側はニュートラリーノシグナル ($M_\chi$=50GeV,$\sigma = 10^{-8}$pb)，青線右側はニュートラリーノシグナル ($M_\chi$=100GeV,$\sigma = 10^{-8}$pb)，両図とも下赤線が太陽ニュートリノ ($^7$Be/pp) シグナルである，薄緑線は $2\nu\beta\beta$ 崩壊のシグナル，黒線は有効体積を 60cm の球 (340kg) としたときのガンマ線バックグラウンドスペクトル (10cm のキセノンによる自己遮蔽効果あり) で，赤線は有効体積を 40cm の球 (100kg) としたときのガンマ線バックグラウンドスペクトル (20cm のキセノンによる自己遮蔽効果あり) である。液体キセノンの周りに光電子増倍管を取り付けた場合，主たるバックグラウンド源は光電子増倍管に含まれるウラン系列やトリウム系列の放射性不純物から放出されるガンマ線となる。

図 3.2 に示した外部由来バックグラウンドのシミュレーションは，球体を作り，その中にキセノンを入れて，球の表面には，円形の領域を多数作り光電子増倍管と模擬し，光子がその円形の領域に達すれば検出したとするものを使用したものである。このように検出器を定義し，そのまわりから光電子増倍管からのガンマ線放出確率を，現在液体キセノン 100kg 検出器で使用しているものの 1/10 と仮定してウラン系列，トリウム系列のガンマ線を放出させ，評価したものである。液体キセノン 100kg 検出器では 10cm であった外縁部を液体キセノン 800kg 検出器では 20cm にすることにより，外部からくるガンマ線をより強力に低減する (自己遮蔽効果)。その結果，検出器中心部 (40cm の球，外縁部の厚さ 20cm) では，約 $1\times10^{-4}$ 事象/day/kg/keV を達成できると見積もられている。

現在液体キセノン 100kg 検出器で使用している光電子増倍管はすでに放射性不純物量の低減が行われているが，更に光電子増倍管の放射性不純物量を低減しなければならない。よって光電子増倍管の部品ごとの放射性不純物量を測定することで，どの部品が光電子増倍管の主に放射性不純物を多く含んでいるのかがわかり，光電子増倍管の放射性不純物量を減らす開発を進めることができる。

## 3.2 測定の目標

現在液体キセノン 100kg 検出器で使用している光電子増倍管 1 本を測定したときの放射性不純物量 (XMASS グループの測定) は以下である。

| | |
|---|---|
| ウラン系列 | $(1.8 \pm 0.2)\times10^{-2}$ Bq/PMT |
| トリウム系列 | $(6.9 \pm 1.3)\times10^{-3}$ Bq/PMT |
| $^{40}$K | $(1.4 \pm 0.2)\times10^{-1}$ Bq/PMT |
| $^{60}$Co | $(5.5 \pm 0.9)\times10^{-3}$ Bq/PMT |

表 3.1: 光電子増倍管一本の測定で求めた放射能

## 3.3 測定の方法

放射性不純物量の少ないものの測定を行うため，測定には高純度ゲルマニウム (HPGe) 検出器を用いた。この検出器は神岡鉱山内の地下 1000m の場所に設置されている。検出器は，鉛 15cm，銅 7.5cm の遮蔽体で囲まれており，遮蔽体内部の空間には数 mBq の Super Radon Free Air を流しこんでいる。測定サンプルからの微弱なガンマ線を測定するために，このようにして外部からの環境放射線の影響を抑えている。

HPGe 検出器のゲルマニウム結晶は，鉛，銅の遮蔽体で囲まれており，アルミニウム (Al) のキャップで真空断熱されている。ゲルマニウム結晶は直径 78.5mm，高さ 78mm の大きさで，中心には電極用に直径 8mm，高さ 63.5mm の穴が空いている。図 3.3 に HPGe 半導体検出器の写真，ゲルマニウム結晶の概略図を図 3.4 に示す。

図 3.3: HPGe 半導体検出器の概略図

写真左は手前が遮蔽体を閉じた状態の検出器で，奥に見えるのが　Ge 結晶を冷やすための液体窒素タンクである。写真右は遮蔽体を開いた状態の検出器。

測定は，測定サンプルを EVOH でできた袋に詰め込み，Super Rn free air で袋の中の空気を置換し，検出器のエンドキャップ直上中心に置き，遮蔽体を閉じた状態で行う。Super Rn　free air

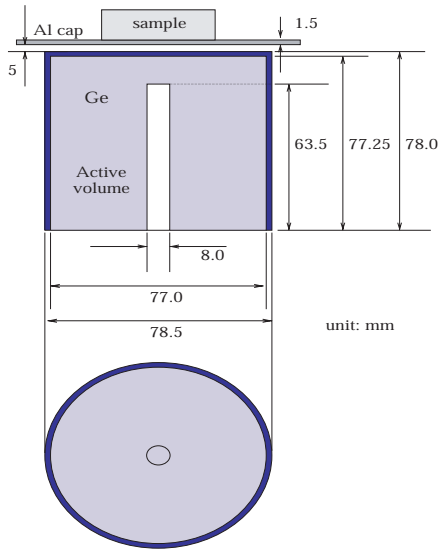


図 3.4: HPGe 半導体検出器の概略図

結晶は直径 78.5mm，高さ 78mm の大きさで，中心には電極用に直径 8mm，高さ 63.5mm の穴が空いている。

で置換を行ったのは，測定場所が空気中のラドン (Rn) が多いので，空気中のラドンの娘核である Pb,Bi の混入を最小限にするために行う。図 3.5 にウラン系列における 3 時間ごとの Ra とその娘核 Pb,Bi 原子核が放出するガンマ線のカウント数の推移を示す。ピンク星が $^{226}$Ra(186keV)，赤星が $^{214}$Pb(295keV)，緑星が $^{214}$Pb(356keV)，青星が $^{214}$Bi(609keV) を示す。これを見ると，娘核の Pb，Bi はゲルマニウム結晶の周りを Super Rn free air で置換しているために Pb,Bi の原子核が放出するガンマ線のカウント数が減少していることがわかる。解析ではサンプルの測定を開始してから 3 時間のデータはシールドのフタの開閉による大気中のラドンの流入の影響があるので捨てるようにした。

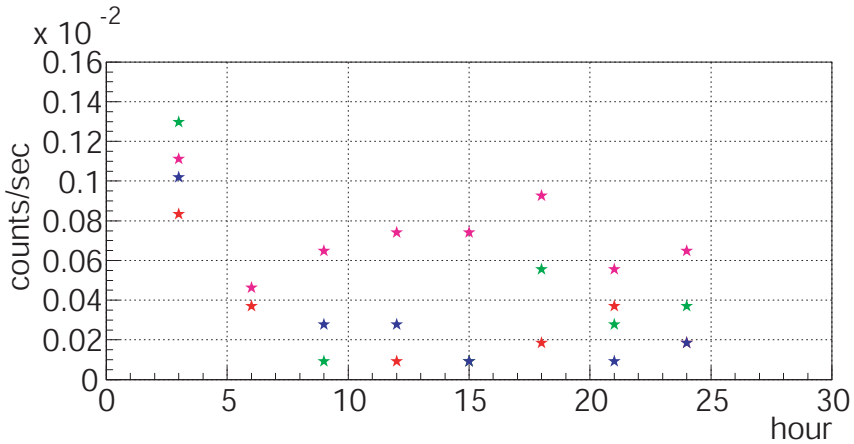


図 3.5: 3 時間ごとの Ra,Pb,Bi 原子核が放出するガンマ線のカウント数の推移

## 3.4 測定サンプル

測定したサンプルは，ダイノード材料，電極材料，側管材料，ステム，リード線，入射窓，シール材，基板材料である。図 3.6 にそれぞれのサンプルの部位を示す。

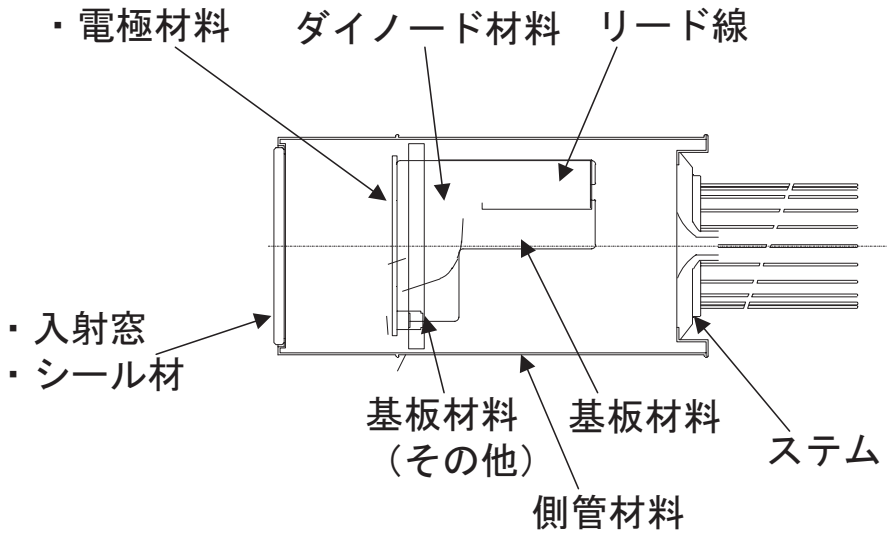


図 3.6: 光電子増倍管 (R8778) 部品の対応図

## 3.5 解析方法

放射能解析に用いたガンマ線とその分岐比を以下に示す。

| 系列 | 核種 | energy(keV) | branch(%) |
|---|---|---|---|
| U-chain | $^{234}$Th | 63 | 4.85 |
| | | 92 | 2.8 |
| | $^{226}$Ra | 186 | 3.596 |
| | $^{214}$Pb | 295 | 19.32 |
| | | 352 | 37.64 |
| | $^{214}$Bi | 609 | 46.15 |
| | | 1120 | 15.12 |
| | | 1764 | 15.42 |
| Th-chain | $^{228}$Ac | 338 | 11.27 |
| | | 911 | 25.84 |
| | | 969 | 15.83 |
| | $^{212}$Pb | 239 | 43.34 |
| | | 300 | 3.283 |
| | $^{212}$Bi | 727 | 6.585 |
| | $^{208}$Tl | 583 | 84.57 |
| | | 861 | 12.42 |
| | | 2614 | 99 |
| | $^{40}$K | 1461 | 11 |
| | $^{60}$Co | 1173 | 99.974 |
| | | 1333 | 99.986 |

表 3.2: 解析に用いたガンマ線とその分岐比

表 3.2 に示したガンマ線について放射能を求める。ウラン (U) 系列，トリウム (Th) 系列の見積もりには，放射平衡を仮定し，分岐比の高いガンマ線を採用し加重平均をとる。コバルト ($^{60}$Co) は加重平均をとって見積もった。

- ウラン系列：295keV，352keV，609keV，1120keV の重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) の加重平均
- トリウム系列：239keV，583keV，911keV，2914keV の重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) の加重平均
- コバルト：1173keV，1333keV の重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) の加重平均

### 3.5.1 放射能の見積もり

ピーク領域は，解析に用いるガンマ線のエネルギーを中心値として ±6.4keV とした。ピーク面積は，このピーク領域に入った bin の観測数の合計とし，各ビンの統計誤差の 2 乗和の平方根をピーク面積の誤差としている。

測定したサンプルの放射能を解析は以下の手順で行う。

1. サンプルがある場合の各エネルギーのガンマ線に対するピーク面積を求める。同様にサンプルが無い場合の各エネルギーのガンマ線に対するピーク面積を求める。(図 3.33) 縦軸は

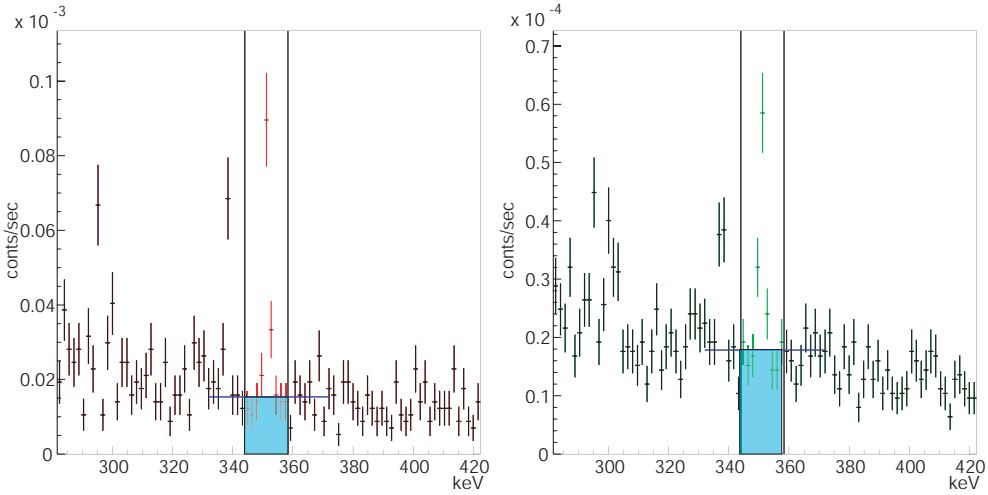


図 3.7: サンプルがある場合と無い場合のスペクトル

counts/sec，横軸は keV である。左図の赤はサンプルがある場合のピーク領域における 1 秒あたりのカウント数で，右図の緑はサンプルが無い場合のピーク領域における 1 秒あたりのカウント数である。

2. 単純にサンプルがある場合のピーク面積から，サンプルが無い場合のピーク面積を引いただけでは不十分である。理由は，高いエネルギーのガンマ線はコンプトン散乱，光電効果，対生成などの相互作用によって検出器中でエネルギーを損失するので，このガンマ線が連続成分となってピーク部分の観測数の押し上げをしてるためである。よって，この効果について考慮する必要がある。図 3.33 において，水色で囲まれている部分は，ピーク領域の両端 ±20keV について，ピーク領域内は無視をし，連続成分は平坦であると仮定し，直線でフィッティングをした結果 (青直線) より求めた面積を表している。先に示したピーク面積より，この水色で示した面積の差を計算することで真のピーク面積を求めた。

3. 真のピーク面積に各ガンマ線の分岐比，各ガンマ線の検出効率を考慮することにより放射能を求めた。

このようにして，測定サンプルの重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) を計算する。この値を光電子増倍管 1 本あたりの測定サンプルの重量 (g) 倍することで，光電子増倍管 1 本あたりのサンプルの崩壊数 (Bq) を求める。測定値と誤差が同程度，または測定値が負の値の場合，上限値を求めた。

## 3.6 検出効率のシミュレーション

放射能を算出するのに用いる検出効率は全て GEANT4 でシミュレーションを行い算出したものを使用している。シミュレーションにおける検出器の配置は図 3.4 に示した通りである。

測定サンプルの形状 (直方体，円柱，円筒など)，材質を考慮し，各ガンマ線エネルギーごとに 50000 事象発生させ，ゲルマニウム結晶内で全エネルギーを損失した場合についてカウントする。全入射数 (50000 事象) に対して，全エネルギーを損失した場合の事象数の割合を検出効率とする。図 3.8 に検出効率の例を示す。黒点は点状でエンドキャップ直上中心からガンマ線を発生させたもの，青点は (50x50x6)mm$^3$ の直方体で空気を定義し，一様にガンマ線を発生させたもの，赤点は (50x50x6)mm$^3$ の直方体で金属を定義し，一様にガンマ線を発生させたものである。100keV 以下で減衰しているのは，エンドキャップや不感層の部分においてガンマ線が吸収されてしまい，感層部分に届かないためである。測定サンプルは，表 3.3 に示したように定義して計算した。

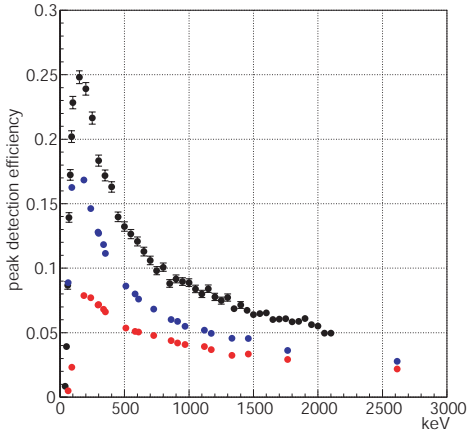


図 3.8: 検出効率の例

| サンプル | 大きさ | 密度 (g/cm$^3$) | 材質 |
|---|---|---|---|
| ダイノード材料 | 外径 50mm, 内径 25mm, 高さ 2mm | 7.47 | Fe(70%),Cr(20%),Ni(10%) |
| 電極材料 | 外径 45mm, 内径 20mm, 高さ 10mm | 6.569 | Fe(70%),Cr(20%),Ni(10%) |
| 側管材料 (上部) | 縦 90mm, 横 90mm, 高さ 10mm | 1.77 | Fe(54%),Ni(29%),Co(17%) |
| 側管材料 (下部) | 縦 85mm, 横 80mm, 高さ 10mm | 2.76 | Fe(54%),Ni(29%),Co(17%) |
| ステム | 直径 80mm, 高さ 60mm | 0.51 | $SiO_2$ |
| リード線 (内部継線) | 直径 60mm, 高さ 40mm | 1.15 | Ni |
| 入射窓 | 直径 50mm, 高さ 4mm | 4.2 | $SiO_2$ |
| シール材 | 外径 50mm, 内径 48mm, 高さ 4mm | 3.25 | Al |
| 基板材料 (厚さ:1.5mm) | 縦 90mm, 横 60mm, 高さ 10mm | 2.57 | $Al_2O_3$ |
| 基板材料 (厚さ:1.0mm) | 縦 50mm, 横 65mm, 高さ 10mm | 4.05 | $Al_2O_3$ |
| 基板材料 (その他) | 縦 25mm, 横 40mm, 高さ 5mm | 1.97 | $Al_2O_3$ |
| その他 | 縦 10mm, 横 50mm, 高さ 2mm | 1.0 | Zr |

表 3.3: 検出効率の計算に用いたパラメータ

## 3.7 解析結果

### 3.7.1 ダイノード材料

測定時間は 841111.6sec∼9.7days で，測定重量は 22g である。各ガンマ線のグラム (g) あたりの崩壊数 (Bq) と誤差を表 3.4 に，これらの値を示したものが図 3.9 で，横軸がエネルギー (keV)，縦軸が重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) を表す。また，ウラン系列，トリウム系列の放射能の見積もりに使用する値を示したものが図 3.10 で，横軸はエネルギー (keV)，縦軸は重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) を表す。上図がウラン系列，下図がトリウム系列である。

| 系列 | 核種 | energy(keV) | branch(%) | activity(Bq/g) | error(Bq/g) |
|---|---|---|---|---|---|
| U-chain | $^{234}$Th | 63 | 4.85 | $2.815\times10^{-4}$ | $6.799\times10^{-4}$ |
| | | 92 | 2.8 | $1.474\times10^{-3}$ | $6.751\times10^{-4}$ |
| | $^{226}$Ra | 186 | 3.596 | $5.095\times10^{-4}$ | $3.414\times10^{-4}$ |
| | $^{214}$Pb | 295 | 19.32 | $-3.601\times10^{-6}$ | $5.213\times10^{-5}$ |
| | | 352 | 37.64 | $3.338\times10^{-5}$ | $2.838\times10^{-5}$ |
| | $^{214}$Bi | 609 | 46.15 | $-2.465\times10^{-5}$ | $2.425\times10^{-5}$ |
| | | 1120 | 15.12 | $6.857\times10^{-6}$ | $6.973\times10^{-5}$ |
| | | 1764 | 15.42 | $7.168\times10^{-5}$ | $7.838\times10^{-5}$ |
| Th-chain | $^{228}$Ac | 338 | 11.27 | $4.911\times10^{-5}$ | $9.226\times10^{-5}$ |
| | | 911 | 25.84 | $9.880\times10^{-5}$ | $4.920\times10^{-5}$ |
| | | 969 | 15.83 | $-2.500\times10^{-5}$ | $7.292\times10^{-5}$ |
| | $^{212}$Pb | 239 | 43.34 | $1.851\times10^{-6}$ | $2.850\times10^{-5}$ |
| | | 300 | 3.283 | $2.755\times10^{-4}$ | $3.145\times10^{-4}$ |
| | $^{212}$Bi | 727 | 6.585 | $-9.156\times10^{-5}$ | $1.577\times10^{-4}$ |
| | $^{208}$Tl | 583 | 84.57 | $-2.979\times10^{-5}$ | $3.433\times10^{-5}$ |
| | | 861 | 12.42 | $-1.003\times10^{-4}$ | $2.154\times10^{-4}$ |
| | | 2614 | 99 | $-5.906\times10^{-6}$ | $5.228\times10^{-5}$ |
| | $^{40}$K | 1461 | 11 | $-2.815\times10^{-4}$ | $1.869\times10^{-4}$ |
| | $^{60}$Co | 1173 | 99.974 | $-1.063\times10^{-5}$ | $1.189\times10^{-5}$ |
| | | 1333 | 99.986 | $1.180\times10^{-7}$ | $1.159\times10^{-5}$ |

表 3.4: ダイノード材料の測定結果

表 3.4 より，ダイノード材料の重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) は以下のようになる。

| | |
|---|---|
| U-chain | $-(0.01 \pm 1.68)\times10^{-5}$ Bq/g |
| Th-chain | $(0.55 \pm 1.87)\times10^{-5}$ Bq/g |
| $^{40}$K | $-(2.82 \pm 1.87)\times10^{-4}$ Bq/g |
| $^{60}$Co | $-(5.12 \pm 8.30)\times10^{-6}$ Bq/g |

表 3.5: ダイノード材料の重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq)

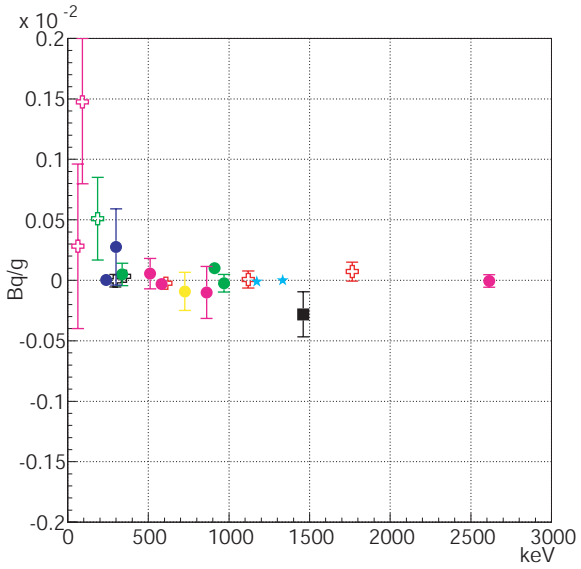


図 3.9: ダイノード材料の測定結果

桃十字は $^{234}$Th，緑十字は $^{226}$Ra，黒十字は $^{214}$Pb，赤十字は $^{214}$Bi のウラン系列を表し，青丸は $^{212}$Pb，緑丸は $^{228}$Ac，黄丸は $^{212}$Bi，桃丸は $^{08}$Tl のトリウム系列を表し，黒四角は $^{40}$K を，水色星は $^{60}$Co をそれぞれ表す

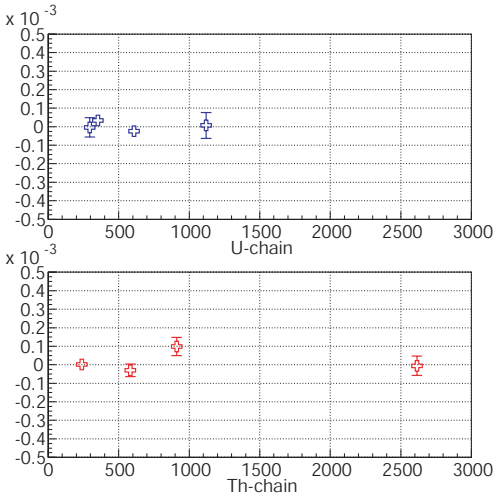


図 3.10: ダイノード材料の測定結果 (ウラン系列とトリウム系列)

### 3.7.2 電極材料

測定時間は 577159.65sec∼6.7days で，測定重量は 83.8g である。各ガンマ線のグラム (g) あたりの崩壊数 (Bq) と誤差を表 3.6 に，これらの値を示したものが図 3.11 で，横軸がエネルギー (keV)，縦軸が重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) を表す。また，ウラン系列，トリウム系列の放射能の見積もりに使用する値を示したものが図 3.12 で，横軸はエネルギー (keV)，縦軸は重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) を表す。上図がウラン系列，下図がトリウム系列である。

| 系列 | 核種 | energy(keV) | branch(%) | activity(Bq/g) | error(Bq/g) |
|---|---|---|---|---|---|
| U-chain | $^{234}$Th | 63 | 4.85 | -2.966×$10^{-4}$ | 1.940×$10^{-4}$ |
| | | 92 | 2.8 | -6.165×$10^{-5}$ | 1.825×$10^{-4}$ |
| | $^{226}$Ra | 186 | 3.596 | 1.654×$10^{-4}$ | 9.970×$10^{-5}$ |
| | $^{214}$Pb | 295 | 19.32 | 9.178×$10^{-6}$ | 1.579×$10^{-5}$ |
| | | 352 | 37.64 | 1.179×$10^{-5}$ | 8.002×$10^{-6}$ |
| | $^{214}$Bi | 609 | 46.15 | -2.157×$10^{-6}$ | 6.952×$10^{-6}$ |
| | | 1120 | 15.12 | 1.797×$10^{-5}$ | 2.199×$10^{-5}$ |
| | | 1764 | 15.42 | -6.485×$10^{-6}$ | 2.260×$10^{-5}$ |
| Th-chain | $^{228}$Ac | 338 | 11.27 | 1.289×$10^{-5}$ | 2.475×$10^{-5}$ |
| | | 911 | 25.84 | 2.108×$10^{-5}$ | 1.448×$10^{-5}$ |
| | | 969 | 15.83 | 2.427×$10^{-6}$ | 2.236×$10^{-5}$ |
| | $^{212}$Pb | 239 | 43.34 | 1.443×$10^{-5}$ | 8.594×$10^{-6}$ |
| | | 300 | 3.283 | -1.303×$10^{-4}$ | 9.195×$10^{-5}$ |
| | $^{212}$Bi | 727 | 6.585 | -1.085×$10^{-5}$ | 4.400×$10^{-5}$ |
| | $^{208}$Tl | 583 | 84.57 | 1.316×$10^{-5}$ | 1.096×$10^{-5}$ |
| | | 861 | 12.42 | 1.193×$10^{-4}$ | 6.654×$10^{-5}$ |
| | | 2614 | 99 | -8.188×$10^{-6}$ | 1.540×$10^{-5}$ |
| | $^{40}$K | 1461 | 11 | -4.280×$10^{-5}$ | 5.726×$10^{-5}$ |
| | $^{60}$Co | 1173 | 99.974 | 9.386×$10^{-6}$ | 3.952×$10^{-6}$ |
| | | 1333 | 99.986 | 5.734×$10^{-6}$ | 4.015×$10^{-6}$ |

表 3.6: 電極材料の測定結果

表 3.6 より，電極材料の重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) は以下のようになる。

| | |
|---|---|
| U-chain | (5.04 ± 4.86)×$10^{-6}$ Bq/g |
| Th-chain | (1.20 ± 0.57)×$10^{-5}$ Bq/g |
| $^{40}$K | -(4.28 ± 5.73)×$10^{-5}$ Bq/g |
| $^{60}$Co | (7.59 ± 2.82)×$10^{-5}$ Bq/g |

表 3.7: 電極材料の重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq)

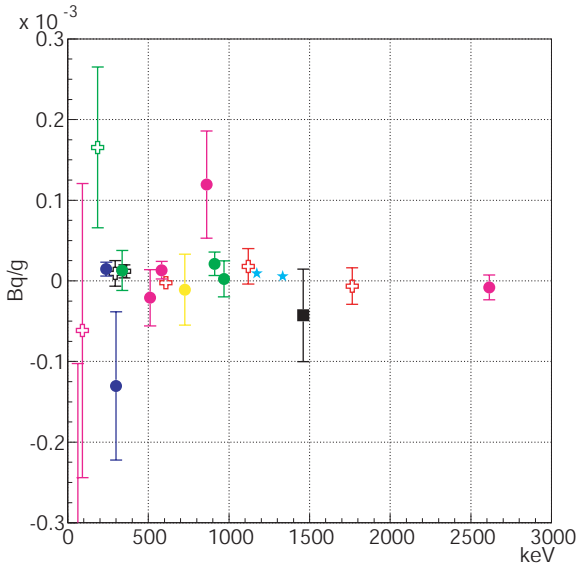


図 3.11: 電極材料の測定結果

桃十字は $^{234}$Th，緑十字は $^{226}$Ra，黒十字は $^{214}$Pb，赤十字は $^{214}$Bi のウラン系列を表し，青丸は $^{212}$Pb，緑丸は $^{228}$Ac，黄丸は $^{212}$Bi，桃丸は $^{08}$Tl のトリウム系列を表し，黒四角は $^{40}$K を，水色星は $^{60}$Co をそれぞれ表す

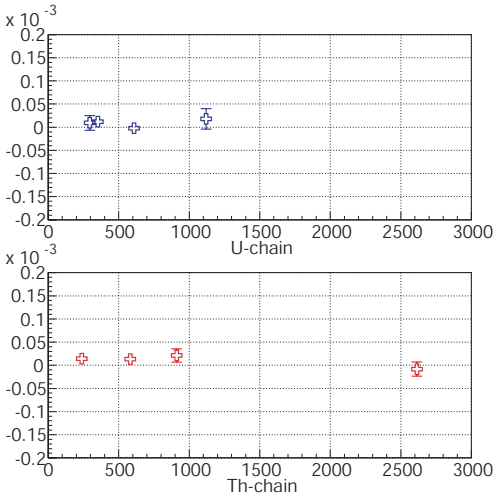


図 3.12: 電極材料の測定結果 (ウラン系列とトリウム系列)

### 3.7.3 側管材料

#### 側管上部 (入射窓側)

測定時間は 477321sec∼5.5days で，測定重量は 143.5g である。各ガンマ線のグラム (g) あたりの崩壊数 (Bq) と誤差を表 3.8 に，これらの値を示したものが図 3.13 で，横軸がエネルギー (keV)，縦軸が重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) を表す。また，ウラン系列，トリウム系列の放射能の見積もりに使用する値を示したものが図 3.14 で，横軸はエネルギー (keV)，縦軸は重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) を表す。上図がウラン系列，下図がトリウム系列である。

| 系列 | 核種 | energy(keV) | branch(%) | activity(Bq/g) | error(Bq/g) |
|---|---|---|---|---|---|
| U-chain | $^{234}$Th | 63 | 4.85 | -5.595×$10^{-4}$ | 3.575×$10^{-4}$ |
| | | 92 | 2.8 | -2.845×$10^{-6}$ | 1.801×$10^{-4}$ |
| | $^{226}$Ra | 186 | 3.596 | 3.042×$10^{-5}$ | 7.475×$10^{-5}$ |
| | $^{214}$Pb | 295 | 19.32 | -1.861×$10^{-6}$ | 1.096×$10^{-5}$ |
| | | 352 | 37.64 | 7.969×$10^{-6}$ | 5.408×$10^{-6}$ |
| | $^{214}$Bi | 609 | 46.15 | -5.345×$10^{-6}$ | 4.762×$10^{-6}$ |
| | | 1120 | 15.12 | 1.359×$10^{-6}$ | 1.358×$10^{-5}$ |
| | | 1764 | 15.42 | -2.494×$10^{-5}$ | 1.447×$10^{-5}$ |
| Th-chain | $^{228}$Ac | 338 | 11.27 | -7.003×$10^{-6}$ | 1.780×$10^{-5}$ |
| | | 911 | 25.84 | 7.503×$10^{-6}$ | 9.376×$10^{-6}$ |
| | | 969 | 15.83 | 1.450×$10^{-5}$ | 1.546×$10^{-5}$ |
| | $^{212}$Pb | 239 | 43.34 | 2.128×$10^{-6}$ | 6.033×$10^{-6}$ |
| | | 300 | 3.283 | 1.231×$10^{-4}$ | 6.677×$10^{-5}$ |
| | $^{212}$Bi | 727 | 6.585 | 2.309×$10^{-5}$ | 3.222×$10^{-5}$ |
| | $^{208}$Tl | 583 | 84.57 | 9.961×$10^{-6}$ | 7.296×$10^{-6}$ |
| | | 861 | 12.42 | 5.794×$10^{-5}$ | 4.644×$10^{-5}$ |
| | | 2614 | 99 | -3.767×$10^{-6}$ | 1.599×$10^{-5}$ |
| | $^{40}$K | 1461 | 11 | -4.174×$10^{-5}$ | 3.753×$10^{-5}$ |
| | $^{60}$Co | 1173 | 99.974 | 3.090×$10^{-5}$ | 3.990×$10^{-6}$ |
| | | 1333 | 99.986 | 2.794×$10^{-5}$ | 3.902×$10^{-6}$ |

表 3.8: 側管上部の測定結果

表 3.8 より，側管上部の重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) は以下のようになる。

| | |
|---|---|
| U-chain | (0.31 ± 3.30)×$10^{-6}$ Bq/g |
| Th-chain | (5.14 ± 4.03)×$10^{-6}$ Bq/g |
| $^{40}$K | -(4.17 ± 3.75)×$10^{-5}$ Bq/g |
| $^{60}$Co | (2.94 ± 0.28)×$10^{-5}$ Bq/g |

表 3.9: 側管上部の重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq)

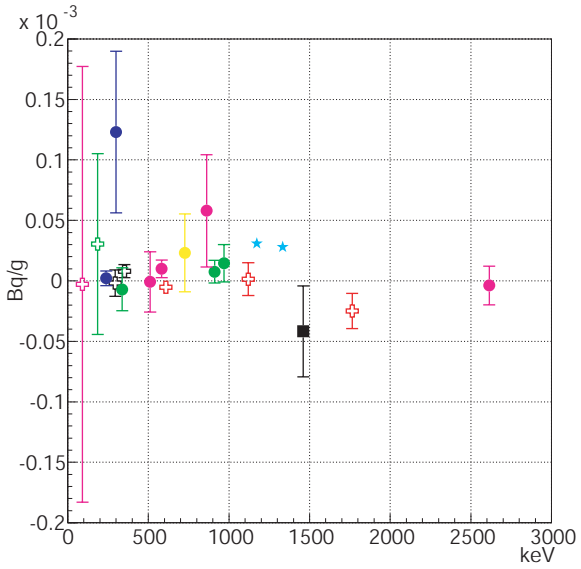


図 3.13: 側管上部の測定結果

桃十字は $^{234}$Th，緑十字は $^{226}$Ra，黒十字は $^{214}$Pb，赤十字は $^{214}$Bi のウラン系列を表し，青丸は $^{212}$Pb，緑丸は $^{228}$Ac，黄丸は $^{212}$Bi，桃丸は $^{08}$Tl のトリウム系列を表し，黒四角は $^{40}$K を，水色星は $^{60}$Co をそれぞれ表す

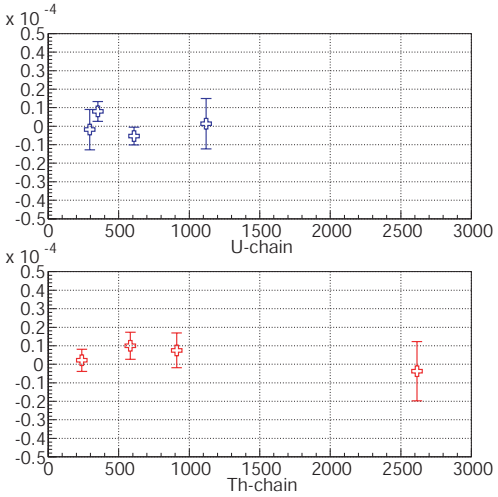


図 3.14: 側管上部の測定結果 (ウラン系列とトリウム系列)

### 側管下部 (ステム側)

測定時間は 867761.08sec∼10days で，測定重量は 187.7g である。各ガンマ線のグラム (g) あたりの崩壊数 (Bq) と誤差を表 3.10 に，これらの値を示したものが図 3.15 で，横軸がエネルギー (keV)，縦軸が重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) を表す。また，ウラン系列，トリウム系列の放射能の見積もりに使用する値を示したものが図 3.16 で，横軸はエネルギー (keV)，縦軸は重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) を表す。上図がウラン系列，下図がトリウム系列である。

| 系列 | 核種 | energy(keV) | branch(%) | activity(Bq/g) | error(Bq/g) |
|---|---|---|---|---|---|
| U-chain | $^{234}$Th | 63 | 4.85 | -9.664×$10^{-4}$ | 3.247×$10^{-4}$ |
| | | 92 | 2.8 | 7.752×$10^{-6}$ | 1.552×$10^{-4}$ |
| | $^{226}$Ra | 186 | 3.596 | 2.236×$10^{-5}$ | 5.192×$10^{-5}$ |
| | $^{214}$Pb | 295 | 19.32 | -3.869×$10^{-7}$ | 7.648×$10^{-6}$ |
| | | 352 | 37.64 | 4.049×$10^{-6}$ | 3.959×$10^{-6}$ |
| | $^{214}$Bi | 609 | 46.15 | -2.295×$10^{-6}$ | 3.135×$10^{-6}$ |
| | | 1120 | 15.12 | 1.032×$10^{-5}$ | 9.325×$10^{-6}$ |
| | | 1764 | 15.42 | -2.253×$10^{-6}$ | 8.929×$10^{-6}$ |
| Th-chain | $^{228}$Ac | 338 | 11.27 | 8.151×$10^{-6}$ | 1.253×$10^{-5}$ |
| | | 911 | 25.84 | 1.314×$10^{-5}$ | 6.494×$10^{-6}$ |
| | | 969 | 15.83 | -1.207×$10^{-5}$ | 9.524×$10^{-6}$ |
| | $^{212}$Pb | 239 | 43.34 | -8.355×$10^{-7}$ | 4.083×$10^{-6}$ |
| | | 300 | 3.283 | 3.134×$10^{-6}$ | 4.277×$10^{-5}$ |
| | $^{212}$Bi | 727 | 6.585 | 7.305×$10^{-6}$ | 2.142×$10^{-5}$ |
| | $^{208}$Tl | 583 | 84.57 | 4.142×$10^{-6}$ | 4.769×$10^{-6}$ |
| | | 861 | 12.42 | 4.696×$10^{-5}$ | 3.293×$10^{-5}$ |
| | | 2614 | 99 | 2.807×$10^{-6}$ | 7.151×$10^{-6}$ |
| | $^{40}$K | 1461 | 11 | -3.938×$10^{-5}$ | 2.429×$10^{-5}$ |
| | $^{60}$Co | 1173 | 99.974 | 2.197×$10^{-5}$ | 2.357×$10^{-6}$ |
| | | 1333 | 99.986 | 2.400×$10^{-5}$ | 2.466×$10^{-6}$ |

表 3.10: 側管下部の測定結果

表 3.10 より，側管下部の重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) は以下のようになる。

| | |
|---|---|
| U-chain | (0.70 ± 2.27)×$10^{-6}$ Bq/g |
| Th-chain | (3.39 ± 2.61)×$10^{-6}$ Bq/g |
| $^{40}$K | -(3.94 ± 2.43)×$10^{-5}$ Bq/g |
| $^{60}$Co | (2.29 ± 0.17)×$10^{-5}$ Bq/g |

表 3.11: 側管下部の重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq)

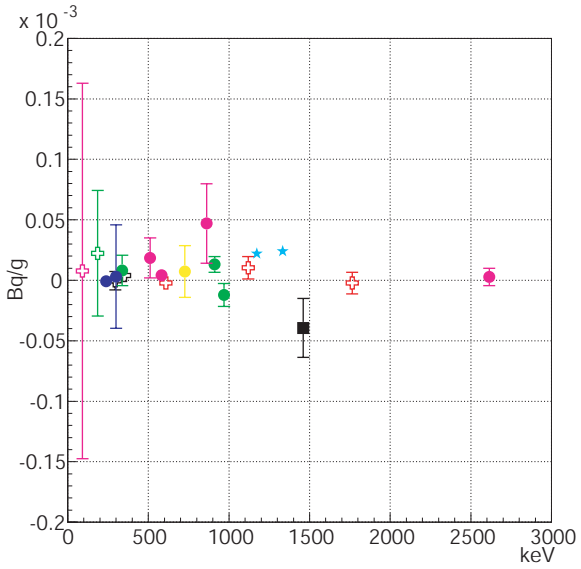


図 3.15: 側管下部の測定結果

桃十字は $^{234}$Th，緑十字は $^{226}$Ra，黒十字は $^{214}$Pb，赤十字は $^{214}$Bi のウラン系列を表し，青丸は $^{212}$Pb，緑丸は $^{228}$Ac，黄丸は $^{212}$Bi，桃丸は $^{08}$Tl のトリウム系列を表し，黒四角は $^{40}$K を，水色星は $^{60}$Co をそれぞれ表す

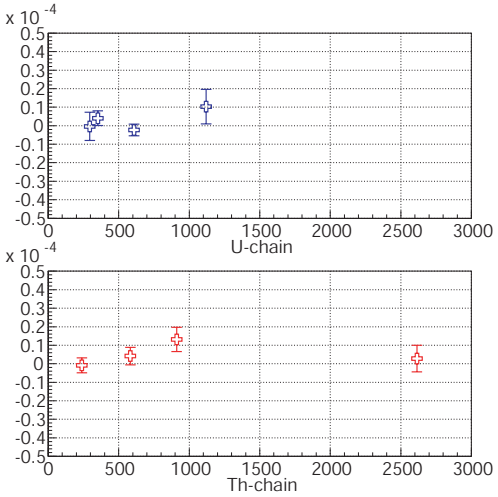


図 3.16: 側管下部の測定結果 (ウラン系列とトリウム系列)

### 3.7.4 ステム

測定時間は 442800sec∼5.1days で，測定重量は 152.2g である。各ガンマ線のグラム (g) あたりの崩壊数 (Bq) と誤差を表 3.12 に，これらの値を示したものが図 3.17 で，横軸がエネルギー (keV)，縦軸が重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) を表す。また，ウラン系列，トリウム系列の放射能の見積もりに使用する値を示したものが図 3.18 で，横軸はエネルギー (keV)，縦軸は重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) を表す。上図がウラン系列，下図がトリウム系列である。

| 系列 | 核種 | energy(keV) | branch(%) | activity(Bq/g) | error(Bq/g) |
|---|---|---|---|---|---|
| U-chain | $^{234}$Th | 63 | 4.85 | -7.500×$10^{-5}$ | 1.281×$10^{-4}$ |
| | | 92 | 2.8 | 5.520×$10^{-4}$ | 1.387×$10^{-4}$ |
| | $^{226}$Ra | 186 | 3.596 | 4.593×$10^{-4}$ | 9.151×$10^{-5}$ |
| | $^{214}$Pb | 295 | 19.32 | 1.250×$10^{-4}$ | 1.631×$10^{-5}$ |
| | | 352 | 37.64 | 1.145×$10^{-4}$ | 9.326×$10^{-6}$ |
| | $^{214}$Bi | 609 | 46.15 | 9.620×$10^{-5}$ | 8.465×$10^{-6}$ |
| | | 1120 | 15.12 | 1.246×$10^{-4}$ | 2.233×$10^{-5}$ |
| | | 1764 | 15.42 | 1.317×$10^{-4}$ | 2.540×$10^{-5}$ |
| Th-chain | $^{228}$Ac | 338 | 11.27 | 8.443×$10^{-5}$ | 2.509×$10^{-5}$ |
| | | 911 | 25.84 | 1.157×$10^{-4}$ | 1.501×$10^{-5}$ |
| | | 969 | 15.83 | 1.259×$10^{-4}$ | 2.284×$10^{-5}$ |
| | $^{212}$Pb | 239 | 43.34 | 1.238×$10^{-4}$ | 8.887×$10^{-6}$ |
| | | 300 | 3.283 | 8.828×$10^{-4}$ | 9.622×$10^{-5}$ |
| | $^{212}$Bi | 727 | 6.585 | 1.462×$10^{-4}$ | 4.366×$10^{-5}$ |
| | $^{208}$Tl | 583 | 84.57 | 9.988×$10^{-5}$ | 1.108×$10^{-5}$ |
| | | 861 | 12.42 | 2.609×$10^{-5}$ | 5.637×$10^{-5}$ |
| | | 2614 | 99 | 6.857×$10^{-5}$ | 1.452×$10^{-5}$ |
| | $^{40}$K | 1461 | 11 | 7.473×$10^{-4}$ | 6.496×$10^{-5}$ |
| | $^{60}$Co | 1173 | 99.974 | 1.658×$10^{-6}$ | 3.134×$10^{-6}$ |
| | | 1333 | 99.986 | 6.720×$10^{-6}$ | 2.959×$10^{-6}$ |

表 3.12: ステムの測定結果

表 3.12 より，ステムの重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) は以下のようになる。

| | |
|---|---|
| U-chain | (1.08 ± 0.06)×$10^{-4}$ Bq/g |
| Th-chain | (1.07 ± 0.06)×$10^{-4}$ Bq/g |
| $^{40}$K | (7.47 ± 0.65)×$10^{-4}$ Bq/g |
| $^{60}$Co | (4.33 ± 2.15)×$10^{-6}$ Bq/g |

表 3.13: ステムの重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq)

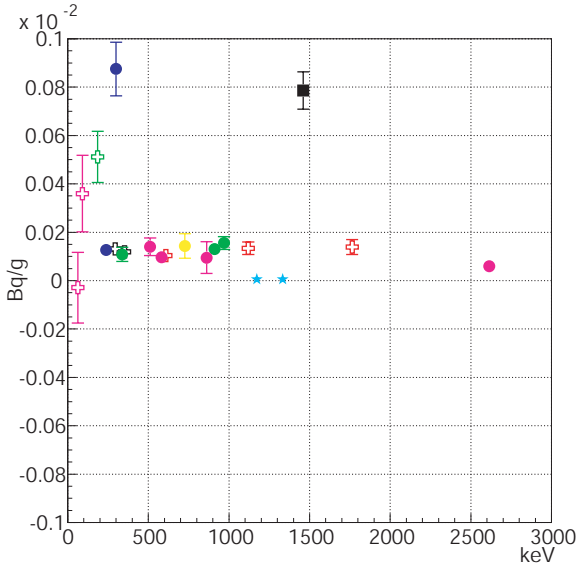


図 3.17: ステムの測定結果

桃十字は $^{234}$Th，緑十字は $^{226}$Ra，黒十字は $^{214}$Pb，赤十字は $^{214}$Bi のウラン系列を表し，青丸は $^{212}$Pb，緑丸は $^{228}$Ac，黄丸は $^{212}$Bi，桃丸は $^{08}$Tl のトリウム系列を表し，黒四角は $^{40}$K を，水色星は $^{60}$Co をそれぞれ表す

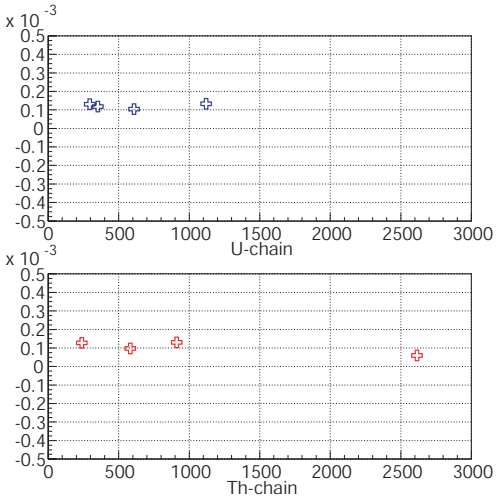


図 3.18: ステムの測定結果 (ウラン系列とトリウム系列)

### 3.7.5 リード線 (内部継線)

測定時間は 388983.94sec～4.5days で，測定重量は 130.3g である。各ガンマ線のグラム (g) あたりの崩壊数 (Bq) と誤差を表 3.14 に，これらの値を示したものが図 3.19 で，横軸がエネルギー (keV)，縦軸が重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) を表す。また，ウラン系列，トリウム系列の放射能の見積もりに使用する値を示したものが図 3.20 で，横軸はエネルギー (keV)，縦軸は重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) を表す。上図がウラン系列，下図がトリウム系列である。

| 系列 | 核種 | energy(keV) | branch(%) | activity(Bq/g) | error(Bq/g) |
|---|---|---|---|---|---|
| U-chain | $^{234}$Th | 63 | 4.85 | $1.414\times10^{-4}$ | $3.131\times10^{-4}$ |
| | | 92 | 2.8 | $-3.488\times10^{-4}$ | $1.986\times10^{-4}$ |
| | $^{226}$Ra | 186 | 3.596 | $1.569\times10^{-5}$ | $8.695\times10^{-5}$ |
| | $^{214}$Pb | 295 | 19.32 | $2.959\times10^{-6}$ | $1.259\times10^{-5}$ |
| | | 352 | 37.64 | $9.392\times10^{-6}$ | $6.584\times10^{-6}$ |
| | $^{214}$Bi | 609 | 46.15 | $2.327\times10^{-6}$ | $5.918\times10^{-6}$ |
| | | 1120 | 15.12 | $-1.351\times10^{-5}$ | $1.610\times10^{-5}$ |
| | | 1764 | 15.42 | $-3.007\times10^{-5}$ | $2.714\times10^{-5}$ |
| Th-chain | $^{228}$Ac | 338 | 11.27 | $-1.282\times10^{-5}$ | $2.049\times10^{-5}$ |
| | | 911 | 25.84 | $2.128\times10^{-5}$ | $1.213\times10^{-5}$ |
| | | 969 | 15.83 | $3.342\times10^{-7}$ | $1.791\times10^{-5}$ |
| | $^{212}$Pb | 239 | 43.34 | $-9.643\times10^{-6}$ | $6.647\times10^{-6}$ |
| | | 300 | 3.283 | $5.697\times10^{-6}$ | $7.429\times10^{-5}$ |
| | $^{212}$Bi | 727 | 6.585 | $-5.175\times10^{-5}$ | $3.215\times10^{-5}$ |
| | $^{208}$Tl | 583 | 84.57 | $-4.426\times10^{-6}$ | $8.208\times10^{-6}$ |
| | | 861 | 12.42 | $-1.558\times10^{-5}$ | $4.626\times10^{-5}$ |
| | | 2614 | 99 | $-7.548\times10^{-7}$ | $1.775\times10^{-5}$ |
| | $^{40}$K | 1461 | 11 | $-9.897\times10^{-5}$ | $4.571\times10^{-5}$ |
| | $^{60}$Co | 1173 | 99.974 | $-7.940\times10^{-6}$ | $2.684\times10^{-6}$ |
| | | 1333 | 99.986 | $-3.102\times10^{-6}$ | $2.676\times10^{-6}$ |

表 3.14: リード線 (内部継線) の測定結果

表 3.14 より，リード線 (内部継線) の重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) は以下のようになる。

| | |
|---|---|
| U-chain | $(4.04 \pm 4.02)\times10^{-6}$ Bq/g |
| Th-chain | $-(3.44 \pm 4.59)\times10^{-6}$ Bq/g |
| $^{40}$K | $-(9.90 \pm 4.57)\times10^{-5}$ Bq/g |
| $^{60}$Co | $-(5.51 \pm 1.90)\times10^{-6}$ Bq/g |

表 3.15: リード線 (内部継線) の重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq)

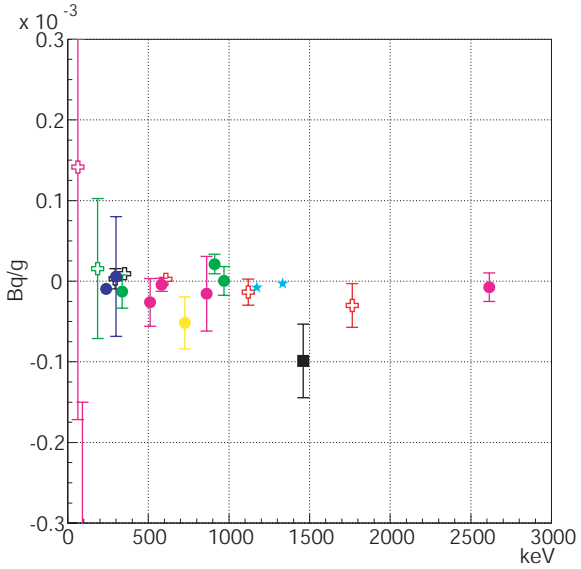


図 3.19: リード線 (内部継線) の測定結果

桃十字は $^{234}$Th，緑十字は $^{226}$Ra，黒十字は $^{214}$Pb，赤十字は $^{214}$Bi のウラン系列を表し，青丸は $^{212}$Pb，緑丸は $^{228}$Ac，黄丸は $^{212}$Bi，桃丸は $^{08}$Tl のトリウム系列を表し，黒四角は $^{40}$K を，水色星は $^{60}$Co をそれぞれ表す

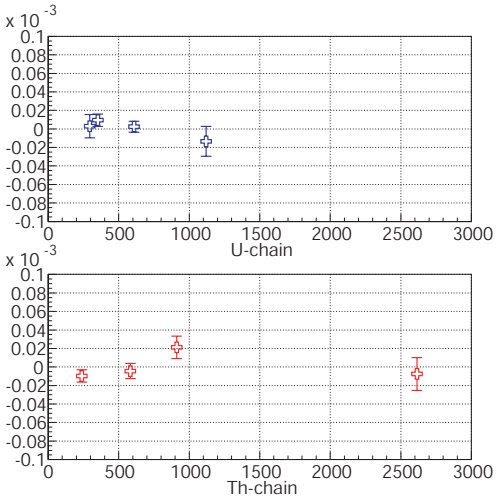


図 3.20: リード線 (内部継線) の測定結果 (ウラン系列とトリウム系列)

### 3.7.6 入射窓

測定時間は 416086.78sec∼4.8days で，測定重量は 33g である。各ガンマ線のグラム (g) あたりの崩壊数 (Bq) と誤差を表 3.16 に，これらの値を示したものが図 3.21 で，横軸がエネルギー (keV)，縦軸が重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) を表す。また，ウラン系列，トリウム系列の放射能の見積もりに使用する値を示したものが図 3.22 で，横軸はエネルギー (keV)，縦軸は重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) を表す。上図がウラン系列，下図がトリウム系列である。

| 系列 | 核種 | energy(keV) | branch(%) | activity(Bq/g) | error(Bq/g) |
|---|---|---|---|---|---|
| U-chain | $^{234}$Th | 63 | 4.85 | -3.406×$10^{-4}$ | 5.430×$10^{-4}$ |
| | | 92 | 2.8 | -5.858×$10^{-4}$ | 5.764×$10^{-4}$ |
| | $^{226}$Ra | 186 | 3.596 | 3.958×$10^{-4}$ | 3.433×$10^{-4}$ |
| | $^{214}$Pb | 295 | 19.32 | -4.674×$10^{-5}$ | 5.035×$10^{-5}$ |
| | | 352 | 37.64 | 7.938×$10^{-5}$ | 2.789×$10^{-5}$ |
| | $^{214}$Bi | 609 | 46.15 | 1.940×$10^{-6}$ | 2.379×$10^{-5}$ |
| | | 1120 | 15.12 | 7.874×$10^{-5}$ | 6.984×$10^{-5}$ |
| | | 1764 | 15.42 | -3.947×$10^{-5}$ | 8.203×$10^{-5}$ |
| Th-chain | $^{228}$Ac | 338 | 11.27 | -6.003×$10^{-5}$ | 8.453×$10^{-5}$ |
| | | 911 | 25.84 | -2.278×$10^{-5}$ | 4.035×$10^{-5}$ |
| | | 969 | 15.83 | -4.962×$10^{-5}$ | 6.351×$10^{-5}$ |
| | $^{212}$Pb | 239 | 43.34 | -5.027×$10^{-6}$ | 2.689×$10^{-5}$ |
| | | 300 | 3.283 | -1.890×$10^{-4}$ | 3.023×$10^{-4}$ |
| | $^{212}$Bi | 727 | 6.585 | -2.009×$10^{-4}$ | 1.205×$10^{-4}$ |
| | $^{208}$Tl | 583 | 84.57 | 1.604×$10^{-5}$ | 3.202×$10^{-5}$ |
| | | 861 | 12.42 | -1.414×$10^{-4}$ | 1.788×$10^{-4}$ |
| | | 2614 | 99 | -5.125×$10^{-5}$ | 8.234×$10^{-5}$ |
| | $^{40}$K | 1461 | 11 | -3.015×$10^{-5}$ | 1.909×$10^{-4}$ |
| | $^{60}$Co | 1173 | 99.974 | 8.059×$10^{-7}$ | 1.074×$10^{-5}$ |
| | | 1333 | 99.986 | -2.992×$10^{-6}$ | 1.048×$10^{-5}$ |

表 3.16: 入射窓の測定結果

表 3.16 より，入射窓の重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) は以下のようになる。

| | |
|---|---|
| U-chain | (2.83 ± 1.65)×$10^{-5}$ Bq/g |
| Th-chain | -(0.41 ± 1.79)×$10^{-5}$ Bq/g |
| $^{40}$K | -(0.30 ± 1.91)×$10^{-4}$ Bq/g |
| $^{60}$Co | -(1.14 ± 7.50)×$10^{-6}$ Bq/g |

表 3.17: 入射窓の重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq)

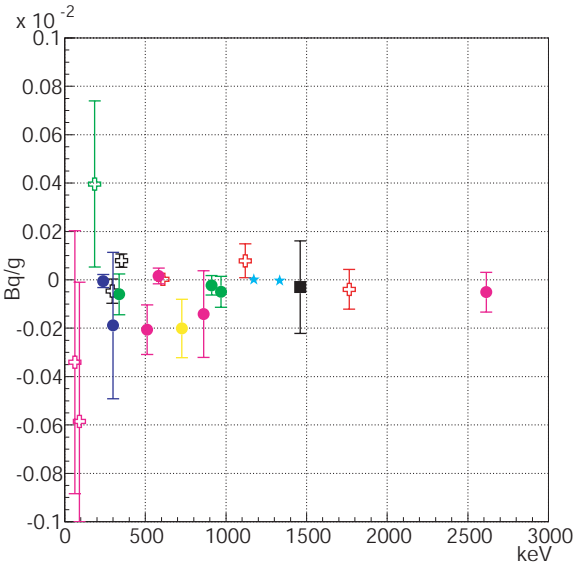


図 3.21: 入射窓の測定結果

桃十字は $^{234}$Th，緑十字は $^{226}$Ra，黒十字は $^{214}$Pb，赤十字は $^{214}$Bi のウラン系列を表し，青丸は $^{212}$Pb，緑丸は $^{228}$Ac，黄丸は $^{212}$Bi，桃丸は $^{08}$Tl のトリウム系列を表し，黒四角は $^{40}$K を，水色星は $^{60}$Co をそれぞれ表す

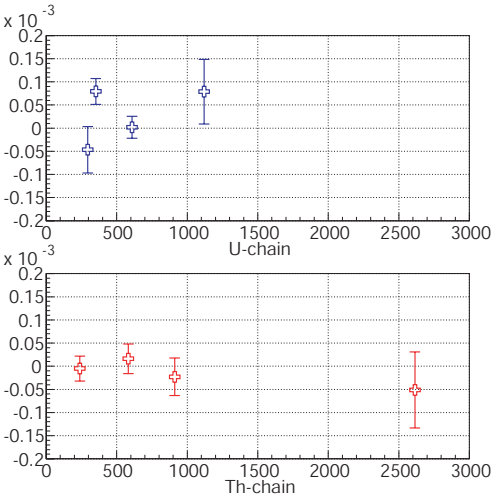


図 3.22: 入射窓の測定結果 (ウラン系列とトリウム系列)

### 3.7.7 シール材

測定時間は 333653.33sec∼3.9days で，測定重量は 3.3g である。各ガンマ線のグラム (g) あたりの崩壊数 (Bq) と誤差を表 3.18 に，これらの値を示したものが図 3.23 で，横軸がエネルギー (keV)，縦軸が重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) を表す。また，ウラン系列，トリウム系列の放射能の見積もりに使用する値を示したものが図 3.24 で，横軸はエネルギー (keV)，縦軸は重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) を表す。上図がウラン系列，下図がトリウム系列である。

| 系列 | 核種 | energy(keV) | branch(%) | activity(Bq/g) | error(Bq/g) |
|---|---|---|---|---|---|
| U-chain | $^{234}$Th | 63 | 4.85 | -7.531×$10^{-3}$ | 4.126×$10^{-3}$ |
| | | 92 | 2.8 | 1.791×$10^{-2}$ | 4.891×$10^{-3}$ |
| | $^{226}$Ra | 186 | 3.596 | 8.146×$10^{-3}$ | 2.964×$10^{-3}$ |
| | $^{214}$Pb | 295 | 19.32 | 3.920×$10^{-4}$ | 4.520×$10^{-4}$ |
| | | 352 | 37.64 | 1.873×$10^{-4}$ | 2.312×$10^{-4}$ |
| | $^{214}$Bi | 609 | 46.15 | -3.858×$10^{-4}$ | 1.950×$10^{-4}$ |
| | | 1120 | 15.12 | -4.291×$10^{-4}$ | 6.121×$10^{-4}$ |
| | | 1764 | 15.42 | -1.174×$10^{-3}$ | 8.702×$10^{-4}$ |
| Th-chain | $^{228}$Ac | 338 | 11.27 | 1.662×$10^{-3}$ | 7.583×$10^{-4}$ |
| | | 911 | 25.84 | 6.031×$10^{-4}$ | 4.501×$10^{-4}$ |
| | | 969 | 15.83 | -4.971×$10^{-4}$ | 6.583×$10^{-4}$ |
| | $^{212}$Pb | 239 | 43.34 | -3.825×$10^{-5}$ | 2.427×$10^{-4}$ |
| | | 300 | 3.283 | 1.888×$10^{-3}$ | 2.749×$10^{-3}$ |
| | $^{212}$Bi | 727 | 6.585 | 2.858×$10^{-4}$ | 1.389×$10^{-3}$ |
| | $^{208}$Tl | 583 | 84.57 | 1.292×$10^{-4}$ | 3.329×$10^{-4}$ |
| | | 861 | 12.42 | -1.531×$10^{-3}$ | 1.895×$10^{-3}$ |
| | | 2614 | 99 | -2.472×$10^{-4}$ | 7.736×$10^{-4}$ |
| | $^{40}$K | 1461 | 11 | -3.006×$10^{-3}$ | 1.737×$10^{-3}$ |
| | $^{60}$Co | 1173 | 99.974 | -2.408×$10^{-4}$ | 9.734×$10^{-5}$ |
| | | 1333 | 99.986 | -5.779×$10^{-5}$ | 1.264×$10^{-4}$ |

表 3.18: シール材の測定結果

表 3.18 より，シール材の重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) は以下のようになる。

| | |
|---|---|
| U-chain | -(1.12 ± 1.38)×$10^{-4}$ Bq/g |
| Th-chain | (0.94 ± 1.75)×$10^{-4}$ Bq/g |
| $^{40}$K | -(3.01 ± 1.74)×$10^{-3}$ Bq/g |
| $^{60}$Co | -(1.73 ± 0.77)×$10^{-4}$ Bq/g |

表 3.19: シール材の重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq)

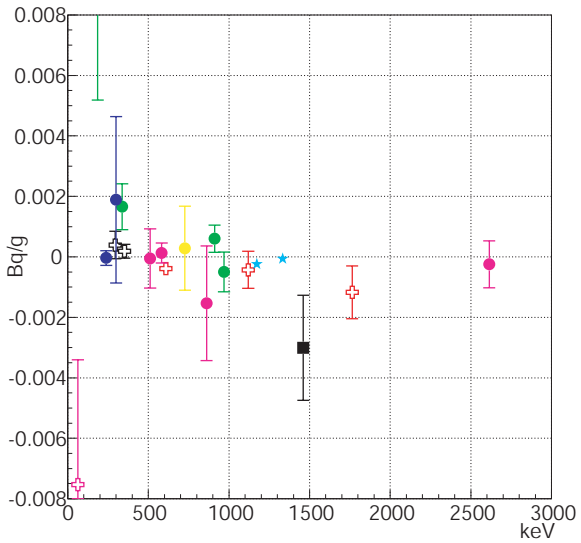


図 3.23: シール材の測定結果

桃十字は $^{234}$Th，緑十字は $^{226}$Ra，黒十字は $^{214}$Pb，赤十字は $^{214}$Bi のウラン系列を表し，青丸は $^{212}$Pb，緑丸は $^{228}$Ac，黄丸は $^{212}$Bi，桃丸は $^{08}$Tl のトリウム系列を表し，黒四角は $^{40}$K を，水色星は $^{60}$Co をそれぞれ表す

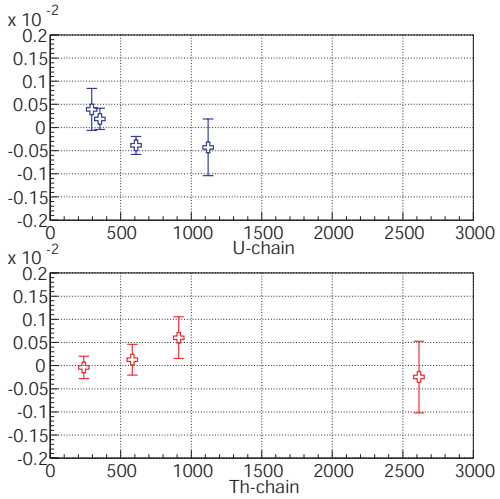


図 3.24: シール材の測定結果 (ウラン系列とトリウム系列)

### 3.7.8 基板材料

**基板材料 (厚さ:1.5mm)**

測定時間は 345600sec∼4.0days で，測定重量は 138.6g である。各ガンマ線のグラム (g) あたりの崩壊数 (Bq) と誤差を表 3.20 に，これらの値を示したものが図 3.25 で，横軸がエネルギー (keV)，縦軸が重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) を表す。また，ウラン系列，トリウム系列の放射能の見積もりに使用する値を示したものが図 3.26 で，横軸はエネルギー (keV)，縦軸は重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) を表す。上図がウラン系列，下図がトリウム系列である。

| 系列 | 核種 | energy(keV) | branch(%) | activity(Bq/g) | error(Bq/g) |
|---|---|---|---|---|---|
| U-chain | $^{234}$Th | 63 | 4.85 | $2.864\times10^{-3}$ | $5.383\times10^{-4}$ |
| | | 92 | 2.8 | $1.359\times10^{-2}$ | $5.652\times10^{-4}$ |
| | $^{226}$Ra | 186 | 3.596 | $5.569\times10^{-3}$ | $2.778\times10^{-4}$ |
| | $^{214}$Pb | 295 | 19.32 | $6.725\times10^{-4}$ | $4.324\times10^{-5}$ |
| | | 352 | 37.64 | $6.341\times10^{-4}$ | $2.720\times10^{-5}$ |
| | $^{214}$Bi | 609 | 46.15 | $4.936\times10^{-4}$ | $2.394\times10^{-5}$ |
| | | 1120 | 15.12 | $4.487\times10^{-4}$ | $5.026\times10^{-5}$ |
| | | 1764 | 15.42 | $5.568\times10^{-4}$ | $5.666\times10^{-5}$ |
| Th-chain | $^{228}$Ac | 338 | 11.27 | $1.922\times10^{-4}$ | $5.577\times10^{-5}$ |
| | | 911 | 25.84 | $1.732\times10^{-4}$ | $2.572\times10^{-5}$ |
| | | 969 | 15.83 | $2.774\times10^{-4}$ | $4.174\times10^{-5}$ |
| | $^{212}$Pb | 239 | 43.34 | $3.720\times10^{-4}$ | $2.126\times10^{-5}$ |
| | | 300 | 3.283 | $3.927\times10^{-3}$ | $2.515\times10^{-4}$ |
| | $^{212}$Bi | 727 | 6.585 | $2.745\times10^{-4}$ | $8.683\times10^{-5}$ |
| | $^{208}$Tl | 583 | 84.57 | $1.846\times10^{-4}$ | $2.226\times10^{-5}$ |
| | | 861 | 12.42 | $4.875\times10^{-4}$ | $1.146\times10^{-4}$ |
| | | 2614 | 99 | $1.103\times10^{-4}$ | $2.273\times10^{-5}$ |
| | $^{40}$K | 1461 | 11 | $8.658\times10^{-4}$ | $9.052\times10^{-5}$ |
| | $^{60}$Co | 1173 | 99.974 | $-6.428\times10^{-6}$ | $4.600\times10^{-6}$ |
| | | 1333 | 99.986 | $5.316\times10^{-6}$ | $4.716\times10^{-6}$ |

表 3.20: 基板材料 (厚さ:1.5mm) の測定結果

表 3.20 より，基板材料 (厚さ:1.5mm) の重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) は以下のようになる。

| | |
|---|---|
| U-chain | $(5.60 \pm 0.16)\times10^{-4}$ Bq/g |
| Th-chain | $(2.18 \pm 0.11)\times10^{-4}$ Bq/g |
| $^{40}$K | $(8.66 \pm 0.91)\times10^{-4}$ Bq/g |
| $^{60}$Co | $-(0.70 \pm 3.29)\times10^{-6}$ Bq/g |

表 3.21: 基板材料 (厚さ:1.5mm) の重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq)

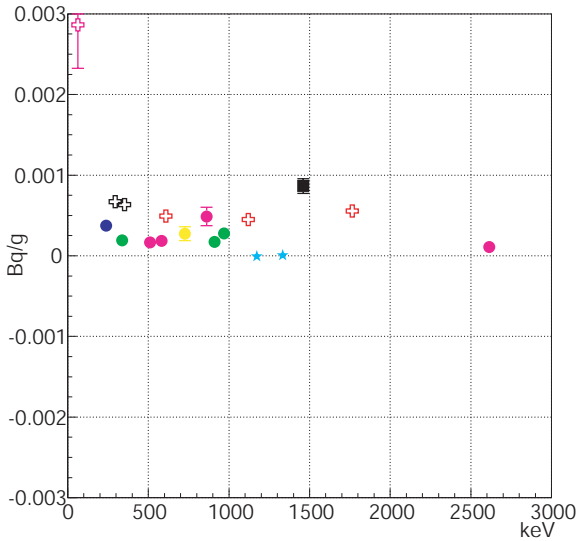


図 3.25: 基板材料 (厚さ:1.5mm) の測定結果

桃十字は $^{234}$Th，緑十字は $^{226}$Ra，黒十字は $^{214}$Pb，赤十字は $^{214}$Bi のウラン系列を表し，青丸は $^{212}$Pb，緑丸は $^{228}$Ac，黄丸は $^{212}$Bi，桃丸は $^{08}$Tl のトリウム系列を表し，黒四角は $^{40}$K を，水色星は $^{60}$Co をそれぞれ表す

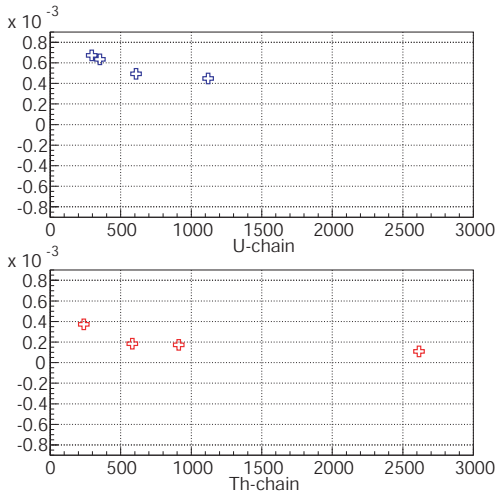


図 3.26: 基板材料 (厚さ:1.5mm) の測定結果 (ウラン系列とトリウム系列)

**基板材料 (厚さ:1.0mm)**

測定時間は 439636.03sec∼5.1days で，測定重量は 47g である。各ガンマ線のグラム (g) あたりの崩壊数 (Bq) と誤差を表 3.22 に，これらの値を示したものが図 3.27 で，横軸がエネルギー (keV)，縦軸が重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) を表す。また，ウラン系列，トリウム系列の放射能の見積もりに使用する値を示したものが図 3.28 で，横軸はエネルギー (keV)，縦軸は重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) を表す。上図がウラン系列，下図がトリウム系列である。

| 系列 | 核種 | energy(keV) | branch(%) | activity(Bq/g) | error(Bq/g) |
|---|---|---|---|---|---|
| U-chain | $^{234}$Th | 63 | 4.85 | $5.840\times10^{-3}$ | $8.819\times10^{-4}$ |
| | | 92 | 2.8 | $2.136\times10^{-2}$ | $1.047\times10^{-3}$ |
| | $^{226}$Ra | 186 | 3.596 | $6.988\times10^{-3}$ | $4.641\times10^{-4}$ |
| | $^{214}$Pb | 295 | 19.32 | $2.740\times10^{-4}$ | $5.896\times10^{-5}$ |
| | | 352 | 37.64 | $2.532\times10^{-4}$ | $3.239\times10^{-5}$ |
| | $^{214}$Bi | 609 | 46.15 | $1.553\times10^{-4}$ | $2.740\times10^{-5}$ |
| | | 1120 | 15.12 | $2.700\times10^{-4}$ | $7.083\times10^{-5}$ |
| | | 1764 | 15.42 | $1.374\times10^{-4}$ | $6.744\times10^{-5}$ |
| Th-chain | $^{228}$Ac | 338 | 11.27 | $8.935\times10^{-5}$ | $9.002\times10^{-5}$ |
| | | 911 | 25.84 | $2.376\times10^{-4}$ | $4.806\times10^{-5}$ |
| | | 969 | 15.83 | $3.690\times10^{-4}$ | $7.607\times10^{-5}$ |
| | $^{212}$Pb | 239 | 43.34 | $3.062\times10^{-4}$ | $3.323\times10^{-5}$ |
| | | 300 | 3.283 | $2.080\times10^{-3}$ | $3.529\times10^{-4}$ |
| | $^{212}$Bi | 727 | 6.585 | $3.631\times10^{-4}$ | $1.488\times10^{-4}$ |
| | $^{208}$Tl | 583 | 84.57 | $1.570\times10^{-4}$ | $3.786\times10^{-5}$ |
| | | 861 | 12.42 | $3.394\times10^{-5}$ | $1.858\times10^{-4}$ |
| | | 2614 | 99 | $8.231\times10^{-5}$ | $4.806\times10^{-5}$ |
| | $^{40}$K | 1461 | 11 | $1.373\times10^{-3}$ | $1.949\times10^{-4}$ |
| | $^{60}$Co | 1173 | 99.974 | $2.814\times10^{-6}$ | $8.894\times10^{-6}$ |
| | | 1333 | 99.986 | $-5.626\times10^{-6}$ | $8.865\times10^{-6}$ |

表 3.22: 基板材料 (厚さ:1.0mm) の測定結果

表 3.22 より，基板材料 (厚さ:1.0mm) の重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) は以下のようになる。

| | |
|---|---|
| U-chain | $(2.10 \pm 0.19)\times10^{-4}$ Bq/g |
| Th-chain | $(2.13 \pm 0.20)\times10^{-4}$ Bq/g |
| $^{40}$K | $(1.37 \pm 0.19)\times10^{-4}$ Bq/g |
| $^{60}$Co | $-(1.42 \pm 6.28)\times10^{-6}$ Bq/g |

表 3.23: 基板材料 (厚さ:1.0mm) の重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq)

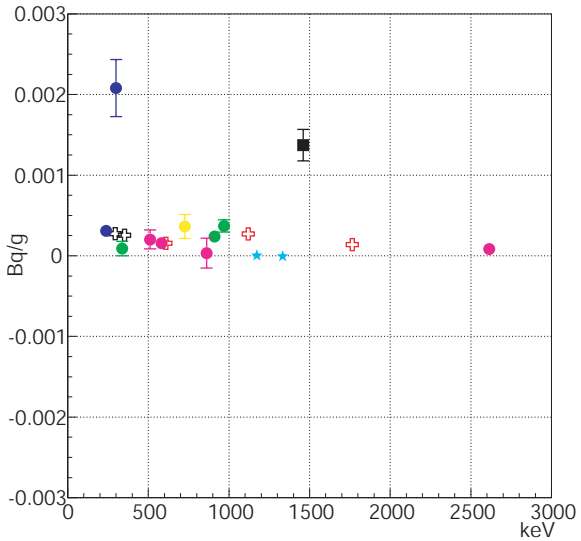


図 3.27: 基板材料 (厚さ:1.0mm) の測定結果

桃十字は $^{234}$Th，緑十字は $^{226}$Ra，黒十字は $^{214}$Pb，赤十字は $^{214}$Bi のウラン系列を表し，青丸は $^{212}$Pb，緑丸は $^{228}$Ac，黄丸は $^{212}$Bi，桃丸は $^{08}$Tl のトリウム系列を表し，黒四角は $^{40}$K を，水色星は $^{60}$Co をそれぞれ表す

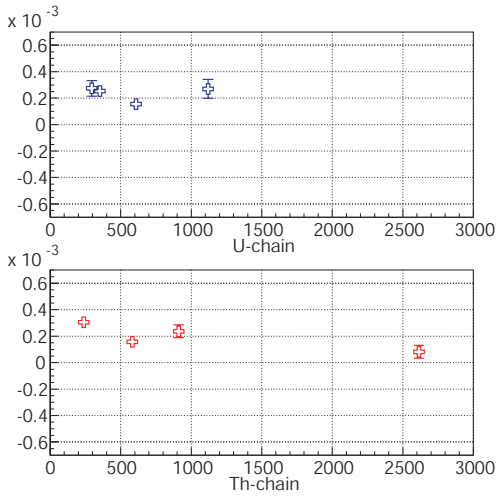


図 3.28: 基板材料 (厚さ:1.0mm) の測定結果 (ウラン系列とトリウム系列)

### 基板材料 (その他)

測定時間は 437801.88sec∼5.1days で，測定重量は 7.4g である。各ガンマ線のグラム (g) あたりの崩壊数 (Bq) と誤差を表 3.24 に，これらの値を示したものが図 3.29 で，横軸がエネルギー (keV)，縦軸が重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) を表す。また，ウラン系列，トリウム系列の放射能の見積もりに使用する値を示したものが図 3.30 で，横軸はエネルギー (keV)，縦軸は重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) を表す。上図がウラン系列，下図がトリウム系列である。

| 系列 | 核種 | energy(keV) | branch(%) | activity(Bq/g) | error(Bq/g) |
|---|---|---|---|---|---|
| U-chain | $^{234}$Th | 63 | 4.85 | $4.904\times10^{-4}$ | $1.966\times10^{-3}$ |
| | | 92 | 2.8 | $9.237\times10^{-3}$ | $2.390\times10^{-3}$ |
| | $^{226}$Ra | 186 | 3.596 | $4.010\times10^{-3}$ | $1.368\times10^{-3}$ |
| | $^{214}$Pb | 295 | 19.32 | $2.689\times10^{-4}$ | $2.132\times10^{-4}$ |
| | | 352 | 37.64 | $7.182\times10^{-4}$ | $1.267\times10^{-4}$ |
| | $^{214}$Bi | 609 | 46.15 | $2.268\times10^{-4}$ | $1.026\times10^{-4}$ |
| | | 1120 | 15.12 | $1.322\times10^{-4}$ | $2.920\times10^{-4}$ |
| | | 1764 | 15.42 | $5.048\times10^{-5}$ | $3.570\times10^{-4}$ |
| Th-chain | $^{228}$Ac | 338 | 11.27 | $8.887\times10^{-4}$ | $3.471\times10^{-4}$ |
| | | 911 | 25.84 | $4.319\times10^{-4}$ | $1.888\times10^{-4}$ |
| | | 969 | 15.83 | $-5.786\times10^{-4}$ | $2.722\times10^{-4}$ |
| | $^{212}$Pb | 239 | 43.34 | $4.161\times10^{-4}$ | $1.145\times10^{-4}$ |
| | | 300 | 3.283 | $2.608\times10^{-3}$ | $1.270\times10^{-3}$ |
| | $^{212}$Bi | 727 | 6.585 | $-4.412\times10^{-4}$ | $5.195\times10^{-4}$ |
| | $^{208}$Tl | 583 | 84.57 | $2.495\times10^{-4}$ | $1.435\times10^{-4}$ |
| | | 861 | 12.42 | $-4.638\times10^{-4}$ | $7.820\times10^{-4}$ |
| | | 2614 | 99 | $-3.657\times10^{-5}$ | $3.380\times10^{-4}$ |
| | $^{40}$K | 1461 | 11 | $1.546\times10^{-3}$ | $8.570\times10^{-4}$ |
| | $^{60}$Co | 1173 | 99.974 | $-4.206\times10^{-6}$ | $4.456\times10^{-5}$ |
| | | 1333 | 99.986 | $-8.242\times10^{-5}$ | $4.341\times10^{-5}$ |

表 3.24: 基板材料 (その他) の測定結果

表 3.24 より，基板材料 (その他) の重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) は以下のようになる。

| | |
|---|---|
| U-chain | $(3.86 \pm 0.72)\times10^{-4}$ Bq/g |
| Th-chain | $(3.44 \pm 0.79)\times10^{-4}$ Bq/g |
| $^{40}$K | $(1.55 \pm 0.86)\times10^{-3}$ Bq/g |
| $^{60}$Co | $-(4.43 \pm 3.11)\times10^{-5}$ Bq/g |

表 3.25: 基板材料 (その他) の重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq)

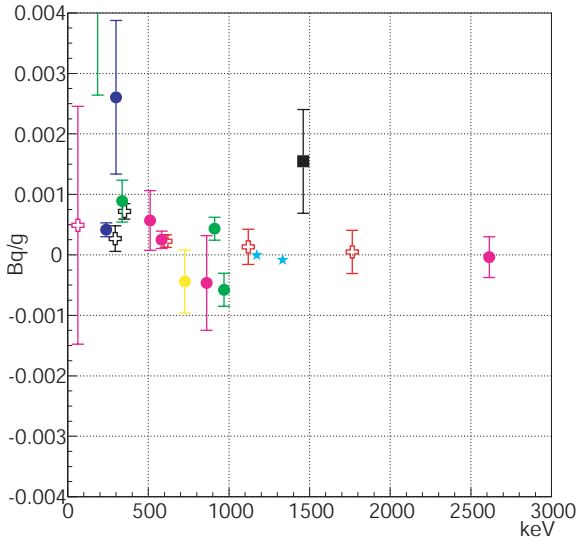


図 3.29: 基板材料 (その他) の測定結果

桃十字は $^{234}$Th，緑十字は $^{226}$Ra，黒十字は $^{214}$Pb，赤十字は $^{214}$Bi のウラン系列を表し，青丸は $^{212}$Pb，緑丸は $^{228}$Ac，黄丸は $^{212}$Bi，桃丸は $^{08}$Tl のトリウム系列を表し，黒四角は $^{40}$K を，水色星は $^{60}$Co をそれぞれ表す

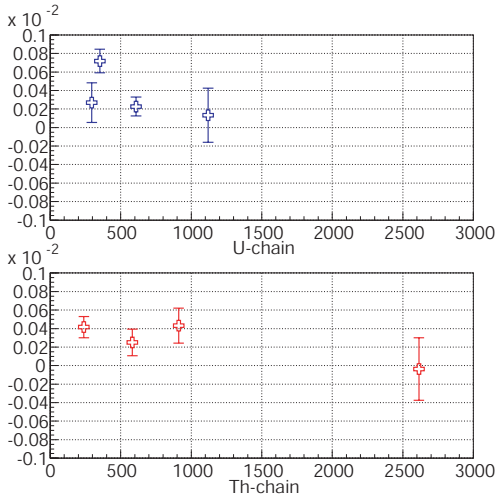


図 3.30: 基板材料 (その他) の測定結果 (ウラン系列とトリウム系列)

### 3.7.9 光電子増倍管に使用されるその他の部品

測定時間は 410414.87sec∼4.8days で，測定重量は 1.0g である。各ガンマ線のグラム (g) あたりの崩壊数 (Bq) と誤差を表 3.26 に，これらの値を示したものが図 3.31 で，横軸がエネルギー (keV)，縦軸が重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) を表す。また，ウラン系列，トリウム系列の放射能の見積もりに使用する値を示したものが図 3.32 で，横軸はエネルギー (keV)，縦軸は重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) を表す。上図がウラン系列，下図がトリウム系列である。

| 系列 | 核種 | energy(keV) | branch(%) | activity(Bq/g) | error(Bq/g) |
|---|---|---|---|---|---|
| U-chain | $^{234}$Th | 63 | 4.85 | $1.998\times10^{-2}$ | $1.307\times10^{-2}$ |
| | | 92 | 2.8 | $2.665\times10^{-2}$ | $1.519\times10^{-2}$ |
| | $^{226}$Ra | 186 | 3.596 | $1.635\times10^{-2}$ | $9.091\times10^{-3}$ |
| | $^{214}$Pb | 295 | 19.32 | $1.452\times10^{-3}$ | $1.486\times10^{-3}$ |
| | | 352 | 37.64 | $7.067\times10^{-4}$ | $7.329\times10^{-4}$ |
| | $^{214}$Bi | 609 | 46.15 | $-3.711\times10^{-4}$ | $6.151\times10^{-4}$ |
| | | 1120 | 15.12 | $2.932\times10^{-3}$ | $2.217\times10^{-3}$ |
| | | 1764 | 15.42 | $-1.741\times10^{-3}$ | $3.264\times10^{-3}$ |
| Th-chain | $^{228}$Ac | 338 | 11.27 | $3.783\times10^{-3}$ | $2.454\times10^{-3}$ |
| | | 911 | 25.84 | $1.510\times10^{-3}$ | $1.269\times10^{-3}$ |
| | | 969 | 15.83 | $-7.041\times10^{-6}$ | $2.120\times10^{-3}$ |
| | $^{212}$Pb | 239 | 43.34 | $1.836\times10^{-3}$ | $8.006\times10^{-4}$ |
| | | 300 | 3.283 | $1.462\times10^{-2}$ | $8.920\times10^{-3}$ |
| | $^{212}$Bi | 727 | 6.585 | $8.519\times10^{-4}$ | $3.996\times10^{-3}$ |
| | $^{208}$Tl | 583 | 84.57 | $1.164\times10^{-3}$ | $9.450\times10^{-4}$ |
| | | 861 | 12.42 | $-3.903\times10^{-3}$ | $5.418\times10^{-3}$ |
| | | 2614 | 99 | $-5.218\times10^{-4}$ | $2.481\times10^{-3}$ |
| | $^{40}$K | 1461 | 11 | $-3.545\times10^{-3}$ | $5.870\times10^{-3}$ |
| | $^{60}$Co | 1173 | 99.974 | $-1.311\times10^{-4}$ | $3.385\times10^{-4}$ |
| | | 1333 | 99.986 | $-3.543\times10^{-4}$ | $3.421\times10^{-4}$ |

表 3.26: その他の部品の測定結果

表 3.26 より，その他の部品の重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq) は以下のようになる。

| | |
|---|---|
| U-chain | $(3.08 \pm 4.40)\times10^{-4}$ Bq/g |
| Th-chain | $(1.45 \pm 0.54)\times10^{-3}$ Bq/g |
| $^{40}$K | $-(3.54 \pm 5.87)\times10^{-2}$ Bq/g |
| $^{60}$Co | $-(2.42 \pm 2.41)\times10^{-4}$ Bq/g |

表 3.27: その他の部品の重量 (g) あたりの崩壊数 (Bq)

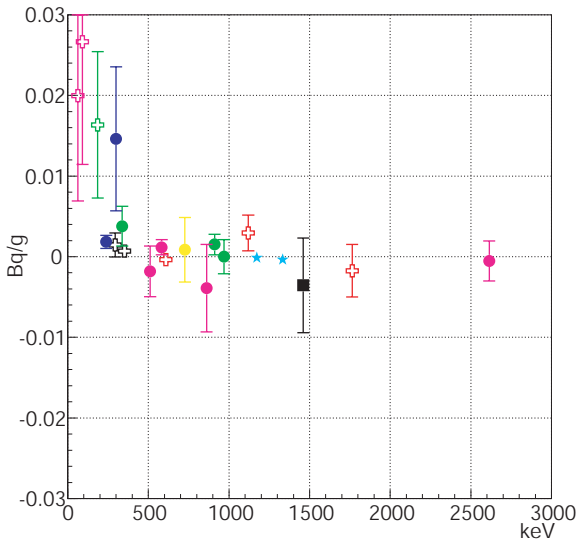


図 3.31: その他部品の測定結果

桃十字は $^{234}$Th，緑十字は $^{226}$Ra，黒十字は $^{214}$Pb，赤十字は $^{214}$Bi のウラン系列を表し，青丸は $^{212}$Pb，緑丸は $^{228}$Ac，黄丸は $^{212}$Bi，桃丸は $^{08}$Tl のトリウム系列を表し，黒四角は $^{40}$K を，水色星は $^{60}$Co をそれぞれ表す

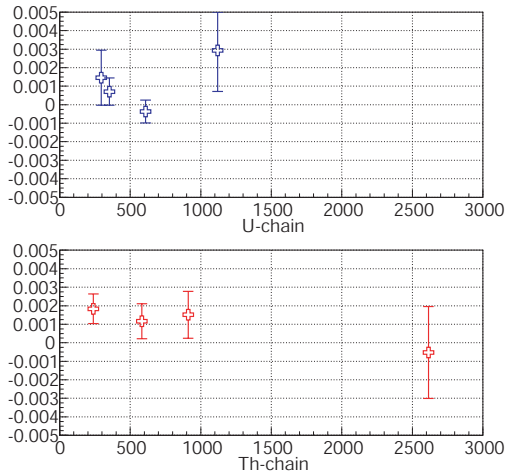


図 3.32: その他の部品の測定結果 (ウラン系列とトリウム系列)

## 3.8 測定結果のまとめ

光電子増倍管一本あたりの放射能を計算する際に用いる，光電子増倍管一本あたりに使用されるサンプル毎の重量 (g) を以下に示す。各サンプルの測定結果を表 3.28 で示されている重量倍する

| 測定サンプル | 重量 |
|---|---|
| ダイノード材料 | 16.5 g/PMT |
| 電極材料 | 8.29 g/PMT |
| 側管材料 (上部) | 14.29 g/PMT |
| 側管材料 (下部) | 62.02 g/PMT |
| ステム | 21.37 g/PMT |
| リード線 (内部継線) | 13.01 g/PMT |
| 入射窓 | 11.01 g/PMT |
| シール材 | 0.25 g/PMT |
| 基板材料 (厚さ：1.5mm) | 14.16 g/PMT |
| 基板材料 (厚さ：1.0mm) | 9.44 g/PMT |
| 基板材料 (その他) | 1.02 g/PMT |
| その他 | 0.05 g/PMT |

表 3.28: 光電子増倍管一本あたりの測定サンプルの重量

ことで光電子増倍管一本あたりの放射能を求めた。また，各サンプルの光電子増倍管一本あたりの放射能を表 3.29 に示す。中心値がマイナスのもの，中心値がゼロから $3\sigma$ 以上離れていないものに関しては信頼度 95% の上限値とした。

| 測定サンプル | U-chain(Bq/PMT) | Th-chain(Bq/PMT) | $^{40}$K(Bq/PMT) | $^{60}$Co(Bq/PMT) |
|---|---|---|---|---|
| ダイノード材料 | $\leq 1.07\times10^{-4}$(95% C.L.) | $\leq 5.97\times10^{-4}$(95% C.L.) | $\leq 6.07\times10^{-3}$(95% C.L.) | $\leq 4.21\times10^{-4}$(95% C.L.) |
| 電極材料 | $\leq 1.08\times10^{-4}$(95% C.L.) | $\leq 1.77\times10^{-4}$(95% C.L.) | $\leq 1.11\times10^{-3}$(95% C.L.) | $\leq 1.01\times10^{-4}$(95% C.L.) |
| 側管材料 (上部) | $\leq 8.18\times10^{-5}$(95% C.L.) | $\leq 1.68\times10^{-4}$(95% C.L.) | $\leq 1.06\times10^{-3}$(95% C.L.) | $(4.12 \pm 0.40)\times10^{-4}$ |
| 側管材料 (下部) | $\leq 2.74\times10^{-4}$(95% C.L.) | $\leq 4.75\times10^{-4}$(95% C.L.) | $\leq 2.21\times10^{-3}$(95% C.L.) | $(1.42 \pm 0.11)\times10^{-3}$ |
| ステム | $(2.31 \pm 0.12)\times10^{-3}$ | $(2.29 \pm 0.12)\times10^{-3}$ | $(1.60 \pm 0.14)\times10^{-2}$ | $\leq 1.68\times10^{-4}$(95% C.L.) |
| リード線 (内部継線) | $\leq 1.38\times10^{-4}$(95% C.L.) | $\leq 1.38\times10^{-4}$(95% C.L.) | $\leq 5.43\times10^{-4}$(95% C.L.) | $\leq 4.65\times10^{-5}$(95% C.L.) |
| 入射窓 | $\leq 6.10\times10^{-4}$(95% C.L.) | $\leq 5.64\times10^{-4}$(95% C.L.) | $\leq 6.16\times10^{-3}$(95% C.L.) | $\leq 2.43\times10^{-4}$(95% C.L.) |
| シール材 | $\leq 7.86\times10^{-5}$(95% C.L.) | $\leq 9.53\times10^{-5}$(95% C.L.) | $\leq 5.92\times10^{-4}$(95% C.L.) | $\leq 1.62\times10^{-5}$(95% C.L.) |
| 基板材料 (厚さ：1.5mm) | $(7.93 \pm 0.22)\times10^{-3}$ | $(3.08 \pm 0.16)\times10^{-3}$ | $(1.23 \pm 0.13)\times10^{-2}$ | $\leq 1.34\times10^{-4}$(95% C.L.) |
| 基板材料 (厚さ：1.0mm) | $(1.98 \pm 0.18)\times10^{-3}$ | $(2.01 \pm 0.19)\times10^{-3}$ | $(1.30 \pm 0.18)\times10^{-2}$ | $\leq 1.70\times10^{-4}$(95% C.L.) |
| 基板材料 (その他) | $(2.74 \pm 0.51)\times10^{-4}$ | $(2.44 \pm 0.56)\times10^{-4}$ | $\leq 2.1\times10^{-3}$(95% C.L.) | $\leq 3.67\times10^{-5}$(95% C.L.) |
| その他 | $\leq 5.15\times10^{-5}$(95% C.L.) | $\leq 1.17\times10^{-4}$(95% C.L.) | $\leq 7.30\times10^{-4}$(95% C.L.) | $\leq 2.51\times10^{-5}$(95% C.L.) |

表 3.29: 光電子増倍管一本あたりの測定サンプルの放射能

表 3.29 を示した図を以下に示す。

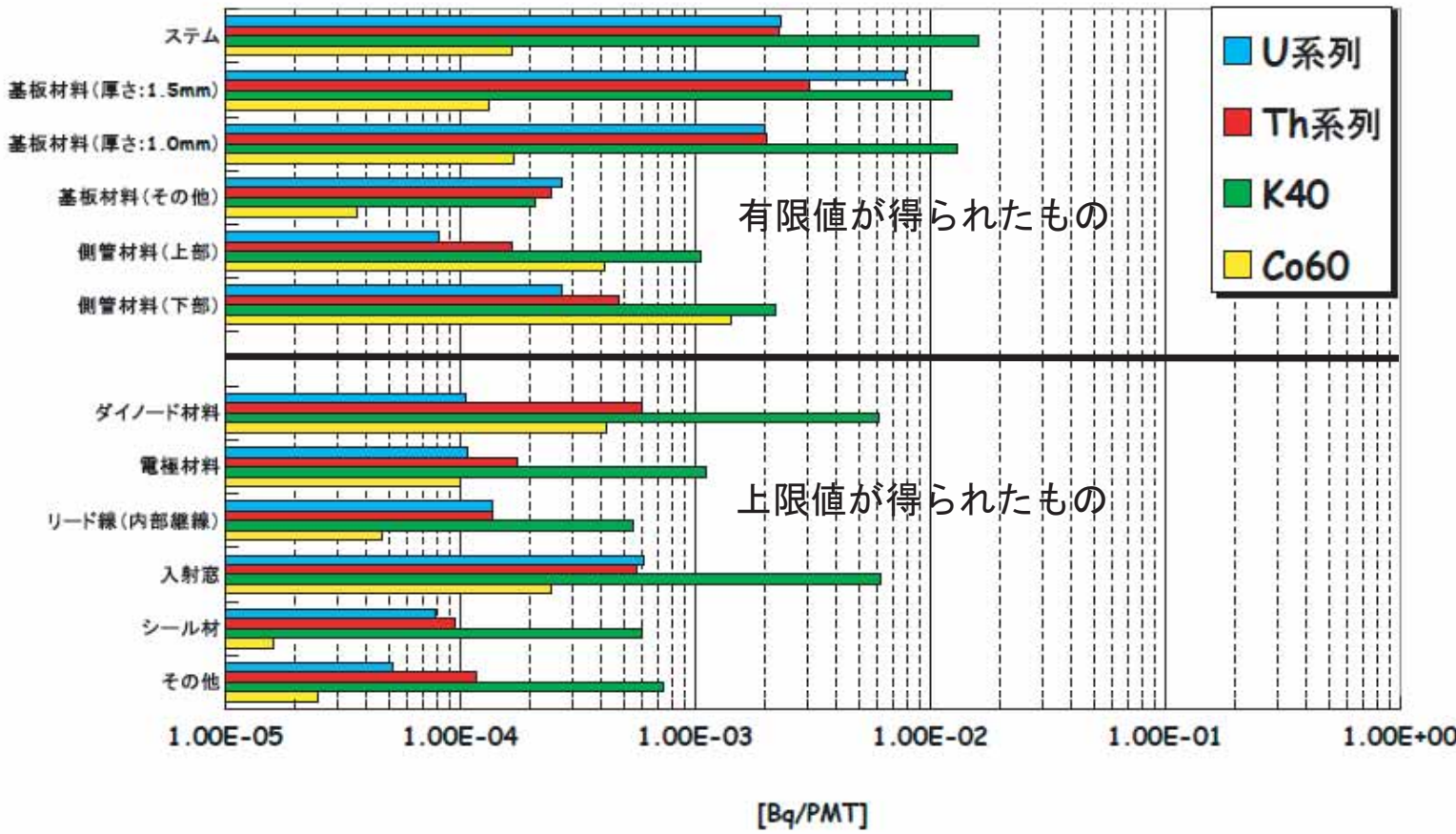


図 3.33: 光電子増倍管一本あたりの測定サンプルの放射能

# 第4章　考察

## 4.1　有限値の得られたものの評価

今回の測定において有限値が得られたものは，ステム，基板材料，側管材料である。その内訳を図 4.1 に示す。基板材料は厚さが 1.5mm のものと 1.0mm のものを測定した結果があるが，現在液体キセノン 100kg 検出器で使用している光電子増倍管について議論するため，基板材料については厚さ 1.5mm の結果を使用する。

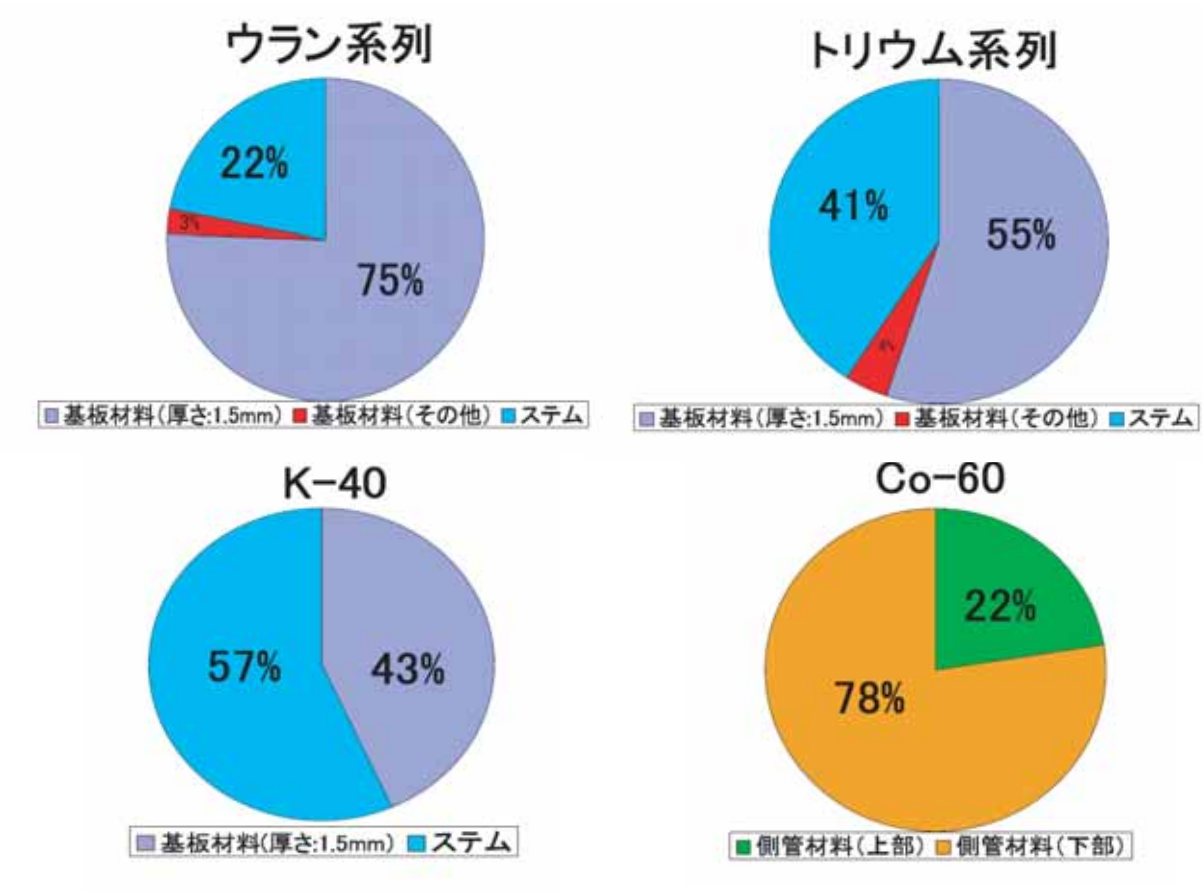


図 4.1: 有限値が得られたサンプルの内訳

有限値の得られた測定結果を合計した値と光電子増倍管 1 本を XMASS グループが測定した値を表 4.1 に示す。。

| | 有限値の値を足し合わせたもの | 光電子増倍管 1 本の測定結果 (表 3.1) |
|---|---|---|
| ウラン系列 | $(1.05 \pm 0.03)\times10^{-2}$ Bq/PMT | $(1.8 \pm 0.2)\times10^{-2}$ Bq/PMT |
| トリウム系列 | $(5.61 \pm 0.21)\times10^{-3}$ Bq/PMT | $(6.9 \pm 1.3)\times10^{-3}$ Bq/PMT |
| $^{40}$K | $(2.83 \pm 0.19)\times10^{-2}$ Bq/PMT | $(1.4 \pm 0.2)\times10^{-1}$ Bq/PMT |
| $^{60}$Co | $(1.83 \pm 0.12)\times10^{-3}$ Bq/PMT | $(5.5 \pm 0.9)\times10^{-3}$ Bq/PMT |

表 4.1: 有限値の合計

測定結果を評価すると，全ての測定結果が XMASS グループで行われた，光電子増倍管 1 本の測定結果よりも低い値となった。しかし，$^{40}$K 以外はオーダーで合っており，以前の測定は大きく間違っていないといえる。

## 4.2 上限値の見積もりと評価

ウラン，トリウム，$^{40}$K，$^{60}$Co のそれぞれについて，上限値の見積もりを行った。ここでは，上限値が得られた部品をまとめて同時に測定したものと仮定をしている。方法は，上限値の得られたサンプルについて，各放射性核種の放出するガンマ線の 1 秒あたりの観測数 (ピーク面積) に，各サンプルを光電子増倍管 1 本分に相当するための定数を乗じ，そのあと各サンプルの検出効率で割った値を足し合わせ，同様にサンプル無しの時の各放射性核種の放出するガンマ線の 1 秒あたりの観測数 (ピーク面積) に，各サンプルを光電子増倍管 1 本分に相当するための定数を乗じ差をとる。その値は表 4.2 のようになる。

| | 上限値の見積もり |
|---|---|
| ウラン系列 | $(3.999 \pm 0.176)\times10^{-3}$ Bq/PMT |
| トリウム系列 | $(2.723 \pm 0.101)\times10^{-3}$ Bq/PMT |
| $^{40}$K | $(6.722 \pm 0.202)\times10^{-2}$ Bq/PMT |
| $^{60}$Co | $(1.309 \pm 0.086)\times10^{-3}$ Bq/PMT |

表 4.2: 上限値の見積もり

よって光電子増倍管 1 本あたりの放射性不純物量は，表 4.3 のようになる。

| | 有限値の合計 | 上限値の見積もり | 合計 |
|---|---|---|---|
| ウラン系列 | $(1.05\pm0.03)\times10^{-2}$ Bq/PMT | $(3.999\pm0.176)\times10^{-3}$ Bq/PMT | $(1.45\pm0.04)\times10^{-2}$ Bq/PMT |
| トリウム系列 | $(5.61\pm0.21)\times10^{-3}$ Bq/PMT | $(2.723\pm0.101)\times10^{-3}$ Bq/PMT | $(8.33\pm0.23)\times10^{-3}$ Bq/PMT |
| $^{40}$K | $(2.83\pm0.19)\times10^{-2}$ Bq/PMT | $(6.722\pm0.202)\times10^{-2}$ Bq/PMT | $(9.55\pm0.28)\times10^{-2}$ Bq/PMT |
| $^{60}$Co | $(1.83\pm0.12)\times10^{-3}$ Bq/PMT | $(1.309\pm0.086)\times10^{-3}$ Bq/PMT | $(3.14\pm0.15)\times10^{-3}$ Bq/PMT |

表 4.3: 光電子増倍管 1 本あたりの放射性不純物量

## 4.3 液体キセノン 800kg のバックグラウンドの見積もり

現在の液体キセノン 100kg でバックグラウンドのモンテカルロシミュレーションを行った。

図 4.2 は，液体キセノン検出器のバックグラウンドシミュレーションの結果を示している。縦軸は events/day/kg/keV で，横軸は energy である。赤線は光電子増倍管からのウラン系列 ($1.8\times10^{-2}$Bq/PMT)，緑線は光電子増倍管からのトリウム系列 ($6.9\times10^{-3}$Bq/PMT)，青線は光電子増倍管からの $^{40}$K($1.4\times10^{-1}$Bq/PMT)，桃線は光電子増倍管からの $^{60}$Co ($5.5\times10^{-3}$Bq/PMT)，黄線は遮蔽対からの Pb，水色線は外部由来ガンマ線，黒線はこれらの合計を示す。

図 4.2 に対して，検出器の壁から 10cm 以内の事象は図 4.3 の用になる。各線色の定義は図 4.2 と同様である。この図より，光電子増倍管からの $^{40}$K や $^{60}$Co の影響は少ないと考え，液体キセノン 800kg 検出器のバックグラウンドの見積もりは，ウラン系列とトリウム系列に関して行う。

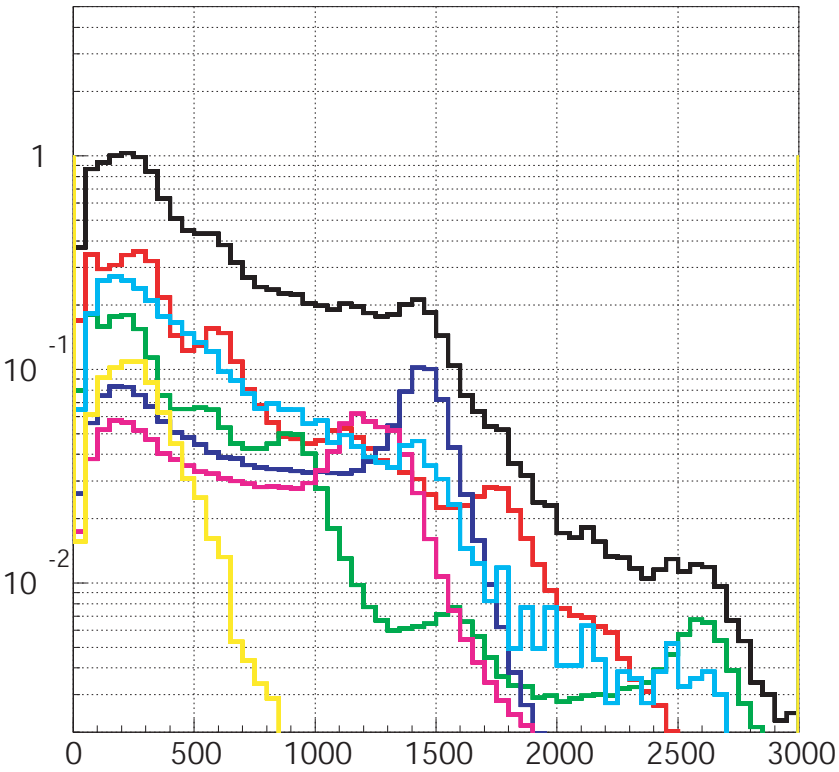


図 4.2: 液体キセノン 100kg 検出器のバックグラウンドシミュレーション

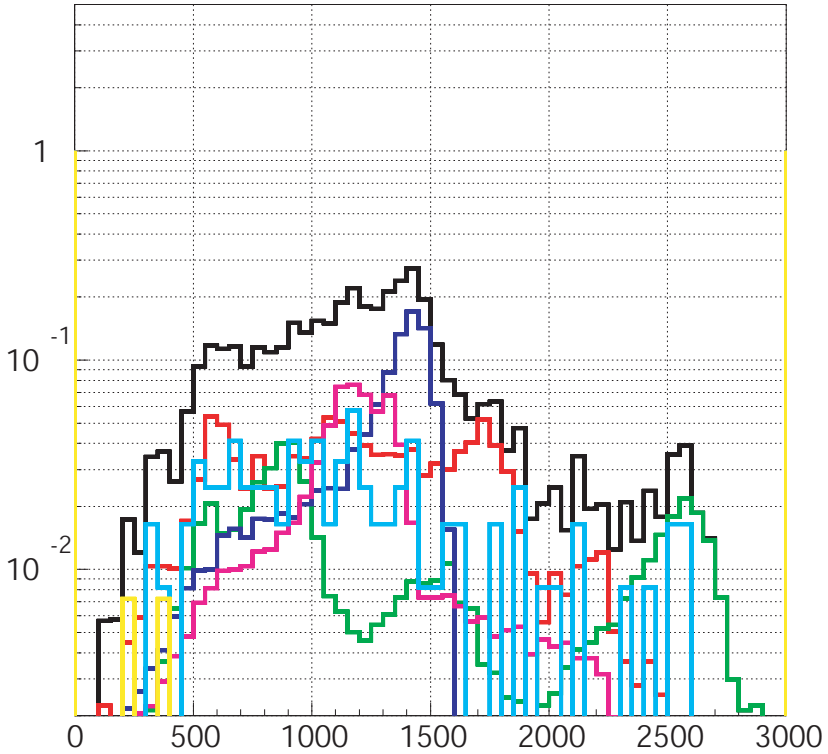


図 4.3: 液体キセノン 100kg 検出器のバックグラウンドシミュレーション

今回の測定で有限値の得られたステムと基板材料 (厚さ:1.5mm) のウラン・トリウム量を仮に 1/10 にできたと仮定する。上限値の見積もりの結果も考量に入れるとウラン・トリウム量は，ウランが $5.297\times10^{-3}$Bq/PMT，トリウム系列が $3.504\times10^{-3}$Bq/PMT となる。このウラン・トリウム量で液体キセノン 800kg 検出器のバックグラウンドの見積もりを行った。その結果を図 4.4 に示す。縦軸が event rate(dru) で，横軸が energy(keV) である。青線はダークマターシグナル，緑線は今回測定した結果 (ウラン:$1.45\times10^{-2}$Bq/PMT，トリウム:$8.33\times10^{-3}$Bq/PMT) で，検出器の壁から 20cm 以内の事象を示し，桃線はステム，基板材料 (厚さ:1.5mm) のウラン・トリウム量を 1/10 に減らせたと仮定した場合で，検出器の壁から 20cm 以内の事象を示している。赤線は将来計画されている液体キセノン 800kg 検出器の目標バックグラウンドレベルを表す。この結果，ステム，基板材料 (厚さ:1.5mm) のウラン・トリウム量を 1/10 に減らすことができれば約 $3\times10^{-4}$ 事象/day/kg/keV を達成できることがわかった。

また，液体キセノン 800kg 検出器において，このバックグラウンドレベルで 5 年間測定を行った場合の暗黒物質に対する検出感度は図 4.5 のようになる。現在世界最高感度で暗黒物質探索実験を行っている CDMS II 実験よりも約 100 倍もよい感度で実験を行える。また，図の黒点は理論で予言されているものを指標として選んだもので，はじめてこの領域に大きく踏み込むことができる。

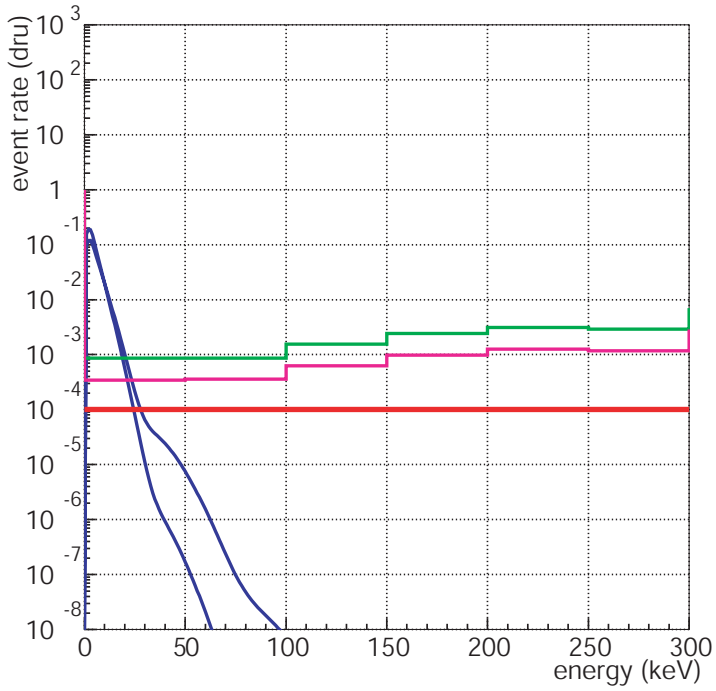


図 4.4: 液体キセノン 800kg 検出器のバックグラウンド

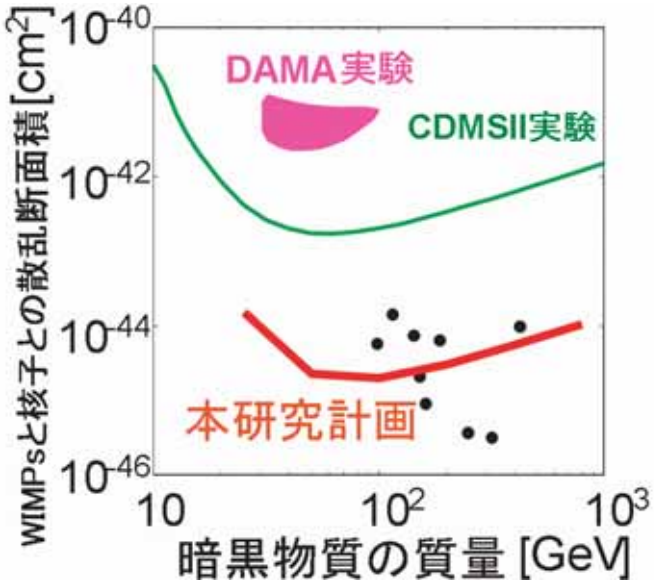


図 4.5: 液体キセノン 800kg 検出器の暗黒物質に対する検出感度

# 第5章　結論

本論文では，超低バックグラウンド光電子増倍管を開発するために，現在使用している光電子増倍管の部品の放射性不純物の定量測定を行った。測定の結果，光電子増倍管の側管に使用されている金属，基板材料，ステム部品に放射性不純物が多く含まれていることがわかった。また，基板材料とステム部品のウラン・トリウムの量を 1/10 にできたと仮定すると，将来計画されている液体キセノン 800kg 検出器でのバックグラウンドレベルは約 $3\times10^{-4}$ 事象/day/kg/keV になると見積もることができた。

また，将来計画されている液体キセノン 800kg 検出器で約 $3\times10^{-4}$ 事象/day/kg/keV のバックグラウンドレベルを達成でき，かつこのレベルで 5 年間測定を行えば，現在世界最高感度で暗黒物質探索を行っている CDMS II 実験よりも，さらに 100 倍よい感度実験できることができる。

ステム，基板材料のウラン・トリウム量を 1/10 にしたものは，HPGe 検出器を使用して約 10g を約 1 週間程度測定すれば $3\sigma$ 以上で有限な値が得られる。また，上限値の見積もりには，上限値が得られた部品をまとめて測定したものと仮定して見積もりを行った。測定時間がなくできなかったが，上限値の見積もりから得られた値を検証するために，上限値が得られた部品をまとめて測定することが必要である。

# 付 録 A　半導体検出器

半導体検出器は有感部が固体であるから，荷電粒子 ($\alpha$ 線，$\beta$ 線など) はもとより，光子 (X 線，$\gamma$ 線) に対しても全エネルギー吸収の確率が高いためエネルギーの測定に適している。

## A.1　動作の原理

半導体結晶に入射した荷電粒子 (光子の場合は，相互作用で生成した高速二次電子) は，そのエネルギーに正確に比例した多くの電子・正孔対を生成し，電子と正孔は結晶中の電場に沿って速やかに電極に到達してパルス信号をつくる。以下にそのプロセスについて述べる。

1. 電荷のキャリヤ (電子と正孔) がきわめてすくないことから，空乏層 (depletion layer) といわれる，放射線に有感な半導体検の領域内に荷電粒子が入射し，電離作用によって，その飛跡に沿って多くの電子・正孔対が生成する (図 A.1)。

2. 生成した電子は結晶内の電場によって陽極 ($n^+$ 層) へ移動し，正孔は陰極 ($p^-$ 層) へ移動する。結晶中の電場に沿って，近傍の中性原子から電子が次々と正孔に移動するため，正電荷が移動することになる。見かけ上正孔が移動するこの現象が，気体中の陽イオンの移動と本質的に異なる。十分に高い電場中では，生成した全ての電子と正孔は結晶中の不純物に捕獲されることなく電極に集められ，吸収したエネルギーに比例した大きさ (パルス波高) の信号がつくられる。

3. いくつかの価電子帯準位からいくつかの伝導帯準位にわたって電離作用が生じるため，個々の放射線の電離過程ではそれぞれ少し異なったエネルギーが吸収される。また，生成した電子がより高いエネルギーをもつときは，さらに電子・正孔対を生成する。

4. $E$(eV) のエネルギーが有感領域内で吸収されて，$N$ 個 ($=E/\varepsilon$) の電子・正孔対が生成し，$Q(\mathrm{Coulomb}) = 1.602 \times 10^{-19} N$ の電荷信号が生じる ($\varepsilon$ 値については後で説明する)。

現在，Si と Ge およびいくつかの種類の化合物半導体が放射線検出器として使われている。その特徴は次に示すようひ，半導体自体の物理的特性によって決まる (表 A.1)。

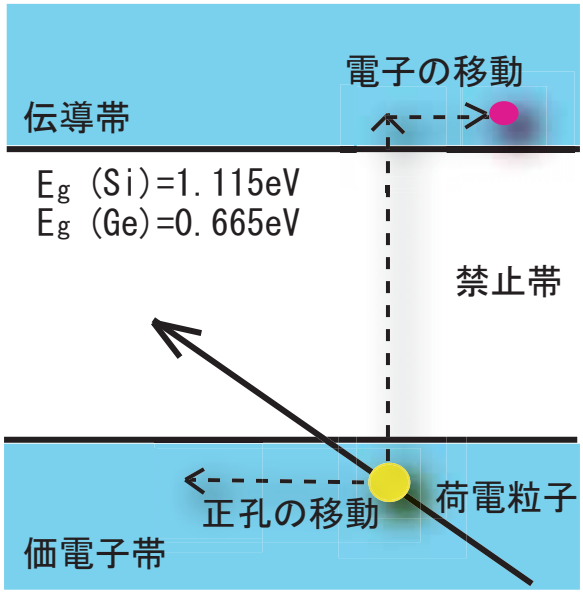


図 A.1: 半導体中における電子・正孔対の生成

| 半導体 | 原子番号 Z | 密度 $(g/cm^3)$ | $E_g$ (eV) | $\varepsilon$ (eV) | $\mu(cm^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$ 電子 正孔 | 寿命 $\tau$(s) 電子 正孔 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Si | 14 | 2.33 | 1.12 | 3.36<br>*3.76 | 1,500 480<br>*$2.1 \times 10^4$ *$1.1 \times 10^4$ | $3 \times 10^{-3}$ $3 \times 10^{-3}$ |
| Ge | 32 | 5.32 | 0.665 | <br>*2.96 | 3,900 1,900<br>*$3.6 \times 10^4$ *$4.2 \times 10^4$ | $1 \times 10^{-3}$ $1 \times 10^{-3}$ |
| GaAs | 31, 33 | 5.31 | 1.43 | 4.27 | 8,500 420 | $1 \times 10^{-7}$ $1 \times 10^{-7}$ |
| CdTe | 48, 52 | | 1.5 | 4.43 | 1,000 80 | $1 \times 10^{-6}$ $1 \times 10^{-6}$ |
| $HgI_2$ | 80, 53 | 7.70 | 2.1 | 4.15 | 100 4 | $1 \times 10^{-7}$ $1 \times 10^{-8}$ |

表 A.1: 検出器として使われる半導体の物理的特性 (*印は 77K，他は 300K における値)

1. 原子番号は光子 (X 線，$\gamma$ 線) のスペクトル測定では大変重要である。光電効果の確率はほぼ $Z^5/E^{3.5}$ に比例するので，原子番号 ($Z$) が高いほど，またエネルギー ($E$) が低いほど光子に対する全エネルギー吸収の確率が高い。そのため，$Z$ の低い Si は低エネルギー光子のスペクトル測定に，Ge は低 ~ 高エネルギー光子のスペクトル測定に使われる。

2. エネルギーギャップ ($E_g$，禁止帯幅) が大きいほど常温での電気伝導度が小さく，したがって，漏洩電流による雑音が低い。$E_g$ の大きい Si は常温で動作可能であるが，$E_g$ の小さい Ge は常温では使用できず，液体窒素温度 (77K，-196 ℃) に冷却 (絶縁体になる) しなければならない。

3. $\varepsilon$ 値は 1 個の電子・正孔対を生成するのに要する平均のエネルギー (eV) として定義される。この値は気体の $W$ 値に比べて 1/10 程度であり，吸収エネルギー当たり多くの電子・正孔対

がつくられる。そのため出力信号が大きく，エネルギー分解能が高い。また，$\varepsilon$ 値がエネルギーにほとんど依存しないことは，エネルギー測定にとって大変都合がよい。

4. 移動度 ($\mu$) は結晶温度に大きく依存し，低温ほど原子振動が小さいため，$\mu$ は大きな値となる。結晶中の電場強度を $F(V\cdot cm^{-1})$ とすると，電子と正孔の移動度 ($v$) は次のように表される。

$$v(cm\cdot s^{-1}) = \mu(cm^2\cdot V^{-1}\cdot s^{-1}) \times F(V\cdot cm^{-1}) \tag{A.1}$$

速度 ($v$) が高いほど，電荷収集過程における損失が小さくなり，また，出力信号のライズタイム (立ち上がり時間) が短くなってエネルギー分解能の向上につながる。通常の半導体検出器では，結晶に電圧を印加して 1kV/cm 程度の電場をつくるが，速度は $10^7$cm/s 程度の値に飽和する。

5. 寿命 ($\tau$) は結晶の純度に大きく依存し，$\tau$ が長いほど損失なく全生成電荷を信号として出力することができる。Ge では電荷が不純物などに捕獲されることなく移動できる距離 (trapping lenght ; $v\tau$) は，およそ $10^7$(cm/s)$\times 10^{-3}$(s) $= 10^4$cm となり，電極間距離 (3cm 程度) に比べてはるかに長いので捕獲される確率が大変低い。

## A.2 信号の大きさと広がり

電離過程で生成される電子・正孔対の数は統計的な『ゆらぎ』をもっている。$E$ なる一定のエネルギー吸収に対して電子・正孔対が平均 $m$ 個でき，個々の電離過程では $n$ 個できるとすると，その統計的『ゆらぎ』を表す分散は次の式で表される。

$$\overline{(n-m)^2} = F \times m \tag{A.2}$$

$F$ はファノ (Fano) 係数といわれる値 (0.05∼0.1) で，個々の電離過程が完全に独立な統計的事象ではないことに起因する。$F$¡1 ということは，$n$ の分散がポアソン分布に従わないことを意味する。$m$ に対する標準偏差は $\sigma = (F \times m)^{1/2}$ であるので FWHM(Full width at half maximum) は単一エネルギーに対する広がりで，次式で表される。

$$FWHM(eV) = 2.355\varepsilon(F \times m)^{1/2} \tag{A.3}$$

1. 一般的な大きさの同軸型 Ge 半導体検出器では,
   FWHM(1332keV) $\cong$ 1.7 $\sim$ 2.0keV,
   FWHM(662keV) $\cong$ 1.3 $\sim$ 1.5keV

2. 低エネルギー X 線用 Ge 検出器および Si 検出器では,
   FWHM(5.90keV) $\cong$ 140 $\sim$ 200eV

3. $\alpha$ 線スペクトロメータ用の Si 半導体検出器では,
   FWHM(5MeV $\alpha$ 線) $\cong$ 15 $\sim$ 20keV

である。

標準的なサイズと性能の同軸型 Ge 検出器の 662keV に対する FWHM は通常の 3”$\phi$×3”NaI(Tl) シンチレーション検出器の FWHM(662keV) ≅7%(46keV) に比べて約 30 倍もよい。
なお，式 A.3 において，$\varepsilon = 2.96$eV， $F = 0.1$ とすると，1,332keV$\gamma$ 線 ($^{60}$Co) について計算される理論的な FWHM は $2.355\times(0.1\times2.96\times1.332\times10^6)^{1/2}$ ≅1.5keV である。よって，現在の同軸型 Ge 検出器のエネルギー分解能はほぼ理論的な限界に近い。

## A.3　ゲルマニウム検出器

ゲルマニウムは原子番号 (Z=32) が大きいので光電効果の確率が高く，広いエネルギー範囲の $\gamma$ 線スペクトロメータとして使われている。しかし，禁止帯幅 (0.665eV) が小さいため常温では使用できず，液体窒素温度 (77K，-196 ℃) に冷却して使用しなければならない。高純度 Ge 検出器 (HPGe) は使用時のみ冷却すればよく，使用しないときは室温で保存できる。

一般的な同柱同軸型 HPGe 検出器に使われる結晶中の不純物濃度は $10^{10}/\mathrm{cm}^3$ 程度以下であるが，結晶の直径が大きいほどさらに高い純度が要求される。結晶内部の全領域を空乏層にするのに必要な電圧は空乏電圧 (depletion voltage) といわれ，結晶の直径が大きいほど，不純物濃度が高いほど，空乏電圧は高くなる。

結晶精製後の HPGe に残る微量の不純物によって，Ge 結晶は p タイプと n タイプに分類される。アクセプタ (主に Al 不純物) 濃度がドナー (主に P 不純物) 濃度より高い結晶が p タイプ Ge 結晶，その逆が n タイプ Ge 結晶である。エネルギー分解能などの検出器の基本的な性能は両者にほとんど差はないが，結晶表面の電極の厚さの違いによって低エネルギー光子に対する検出効率に大きな違いがある。このことに関しては次で述べる。

### A.3.1　検出器の種類と構造

#### 同軸型 Ge 検出器

結晶の外側表面に高電圧 (HV) 印加電極が，結晶中心部分にあけた細い穴 (7〜8mm$\phi$) に信号電極がつくられる。半導体の整流特性によって，結晶内に電場をつくるためには逆バイアスになるように電圧 (HV) を印加する。p タイプ結晶の検出器では結晶の外側表面の $n^+$ 電極に正の HV を印

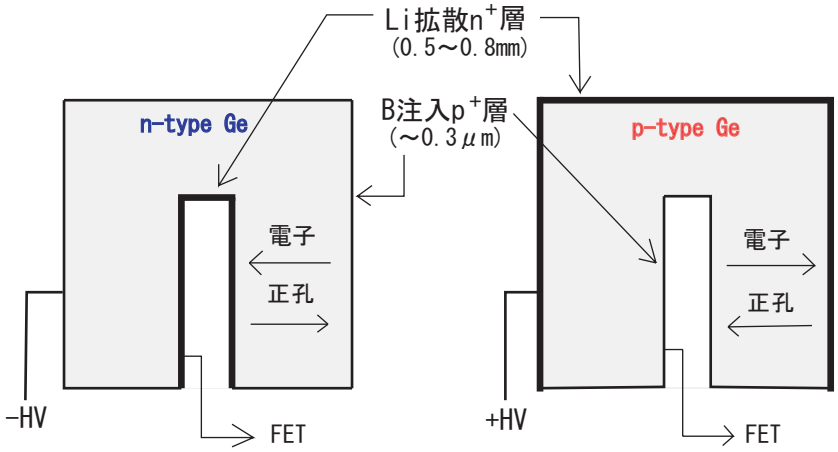


図 A.2: p タイプと n タイプの同軸型高純度 Ge 検出器の電極構造，および電荷の移動

加し，n タイプ結晶の検出器では結晶の外側表面の $p^+$ 電極に負の HV を印加する。現在の HPGe 検出器では，$n^+$ 電極をつくるには金属リチウムを Ge 結晶表面に蒸着または電着して熱拡散 (250〜300 ℃，5〜10 分) し，$p^+$ 電極をつくるにはボロンイオンを 50keV 程度に加速して注入する方法が使われている。

リチウム拡散によって生成する $n^+$ 電極の厚さは 0.5~0.8mm，ボロンイオン注入によって生成する $p^+$ 電極の厚さは 0.3$\mu$m 程度である。これらの電極部分は信号を生じない不感層であるので，p タイプ HPGe 検出器では 100keV 程度以下の低エネルギー光子は $n^+$ 不感層において減弱し，ピーク検出効率が低下する。検出器エンドキャップにアルミニウムの入射窓 (厚さ 1mm 程度) をもつ通常の p タイプ HPGe 検出器のピーク効率は，80keV 程度以下で急激に低下する。

一方，n タイプ HPGe 検出器では，薄い不感層 (0.3$\mu$m) とベリリウムなど低原子番号の物質からできている入射窓 (厚さ 0.5mm 程度以下) のため減弱が小さく，3keV 程度まで測定可能である。

エネルギー分解能は，相対効率が 40% 未満の検出器で 1.8~2.0keV 程度，それ以上の大型検出器では 1.9~2.3keV 程度となる。また，大型の n タイプ検出器では p タイプより 10% 程度分解能が悪い。

### 結晶の冷却

Ge 結晶は真空のクライオスタット内に置かれ，コールドフィンガー (~2cm$\phi$ 銅棒) を通して液体窒素温度 (77K，-196 ℃) に冷却される。クライオスタット内部には，真空に保つためにモレキュラシーブなどの気体吸着剤が入っている。結晶には 2,000~5,000V の高い電圧が印加されるので，絶縁体 (窒化ボロンなど) でコールドフィンガーとは電気的に絶縁されている。多くの場合，前置増幅器の初段に使われている FET(field effect transistor) はクライオスタット内で冷却されており，Ge 結晶に印加する HV の端子，FET への供給電源と FET からの信号端子がハーメチック シールを通してクライオスタットの外にある前置増幅器に結ばれている。

検出器の遮蔽を容易にする点から，前置増幅器の形状がクライオスタットとほぼ同じ直径のストリーム (またはスリムライン) 形のものが多く，コールドフィンガーのところで着脱して，In-Situ 測定など目的に応じて種々の液体窒素容器と組み合わせて使用できるものもある。環境試料など低レベル放射能の測定には，バックグラウンドを低減させるため，クライオスタットの材料 (アルミなど) に含まれる天然の放射性物質を特別に吟味してつくられたものもある。液体窒素容器と検出器クライオスタットの組み合わせには，次のようなものがある。

**●縦型 (ディップスティック型)**

クライオスタットの下部が液体窒素容器の液体窒素注入口に挿入され，一部露出したコールドフィンガーの下部が液体窒素に直接触れている。入射窓が上向きの検出器は一般的な試料 (点線源，液体試料など) の測定および環境試料 (円筒形試料容器やマリネリ形容器など) の測定に多く使われるタイプのものである。類似のタイプで，入射窓が横向きのものはビーム実験などに使われる。

**●J または L 型**

クライオスタットが液体窒素容器の側面に取り付けられている。遮蔽体の構造を比較的シンプルにでき，低バックグラウンド測定に適している。液体窒素の注入口を大きくできるので補給が容易であり，また，床に設置できるので地震などに対して安定性が高い。

**●携帯型**

小型の液体窒素容器をもち，野外などの現場での測定に使用する。液体窒素の容量は 3~10 リットルで，Ge 結晶の大きさによるが 2~7 日間使用可能である。なお，液体窒素を注入してから動作可能になるまでの時間は，Ge 結晶の大きさによるが，3~7 時間程度である。

#### 放射線損傷

Ge 結晶は高速中性子に照射されると正孔の捕獲中心となる欠陥ができて，エネルギー分解能が劣化する。中性子束が $10^8 \sim 10^{10}\mathrm{cm}^{-2}$ において，n タイプ HPGe は同じ大きさの p タイプ HPGe に比べて数倍から数 10 倍の耐性がある。n タイプ HPGe の場合は結晶外側表面の $p^+$ 電極に負電圧が印加されており，正孔が電極へ移動する距離が平均的に短いので捕獲される確率が小さいため，と説明されている。放射線損傷によって性能が劣化した HPGe 結晶は，100 ℃前後，数 10 時間のアニーリング処理を行うことによって，エネルギー分解能が回復する。そのさい，中心電極が $n^+$ 層の n タイプ HPGe では，リチウム拡散層の厚さが増加することによる有感容積の減少が少ないので，p タイプ HPGe に比べて，ピーク効率の減少もわずかである。

### A.3.2 特性および性能

#### エネルギー分解能

同軸型 Ge 検出器のエネルギー分解能は，1,332keV$\gamma$ 線 ($^{60}$Co) のピークに対する半値幅 (FWHM) として定義される。通常の Ge 検出器では，FWHM=1.7∼2.0keV，122keV$\gamma$ 線 ($^{57}$Co) に対しては 0.8∼0.9keV である。

観測されるピークの FWHM は原因によって次のように表される。電子・正孔対の数の統計的な変動による成分を $\sigma_S$，結晶内における電荷収集のばらつきによる成分を $\sigma_C$，結晶表面などにおける漏洩電流や他の電気的な雑音成分を $\sigma_N$，ドリフトによる成分を $\sigma_D$ とすると，次式で表される。

$$(FWHM)^2 = \sigma_S^2 + \sigma_C^2 + \sigma_N^2 + \sigma_D^2 \tag{A.4}$$

$\sigma_S$ は $2.355(F\varepsilon E)^{1/2}$ と表され，$\sigma_C$ は結晶内における電荷生成の位置と二次電子の飛程によって若干異なるのでエネルギー依存性があり，$\sigma_N$ はエネルギーに依存しない一定値である。もし，$\sigma_C$ のエネルギー依存性が小さく，さらに $\sigma_D$ が無視できるなら，FWHM は次式のように表される。

$$(FWHM)^2 = a + b \cdot E \tag{A.5}$$

ここで，a と b は定数である。

#### 相対効率

同軸型 Ge 検出器の相対効率は感度に相当する指標であり，1,332keV$\gamma$ 線 ($^{60}$Co) に対する Ge 検出器のピーク効率 ($\varepsilon_{Ge}$) と 3"$\phi$×3"NaI(Tl) シンチレーション検出器のピーク効率 ($\varepsilon_{NaI}$) の比 (%) で定義される。ただし，$^{60}$Co 点線源とそれぞれの検出器の表面までの距離を 25cm として測定する。線源・検出器間距離が 25cm における 3"$\phi$×3"NaI(Tl) 検出器のピーク効率は $\varepsilon_{NaI}$=1.200×$10^{-3}$ であるから，Ge 検出器によるピーク計数率を n(cps)，$^{60}$Co の放射能を A(Bq) とすると，相対効率は次のように表される。

$$\text{相対効率 (\%)} = \frac{\varepsilon_{Ge}}{\varepsilon_{NaI}} \times 100 = 0.833 \times 10^5 \frac{n}{A} \tag{A.6}$$

相対効率が同じ検出器の場合でも，実際の測定における効率は立体角に依存するので結晶のアスペクト比 (直径/長さ) が大きいほど高い効率になる。特に低・中エネルギー $\gamma$ 線の線源を近い距離で測定するときは，アスペクト比は大きくきいてくる。

### ピーク・コンプトン比

ピーク・コンプトン比は，1,332keV$\gamma$ 線のピークの高さ $P$(計数値) と連続スペクトル中の 1,040〜1,096keV の平均計数値 $C$ の比 $(P/C)$ で定義される。エネルギー分解能が高いほど，また，相対効率が高いほど $P/C$ は大きな値を示すので，検出器の『よさ指標』(fiure of merit ; FOM) を表すパラメータである。

### ピーク効率

ピーク効率のエネルギー依存性は Ge 検出器の種類，結晶の大きさ (直径と長さ) などによって異なる。測定に使用した p タイプ HPGe 検出器について，光子エネルギーとピーク効率の関係を図 A.3 に示す。

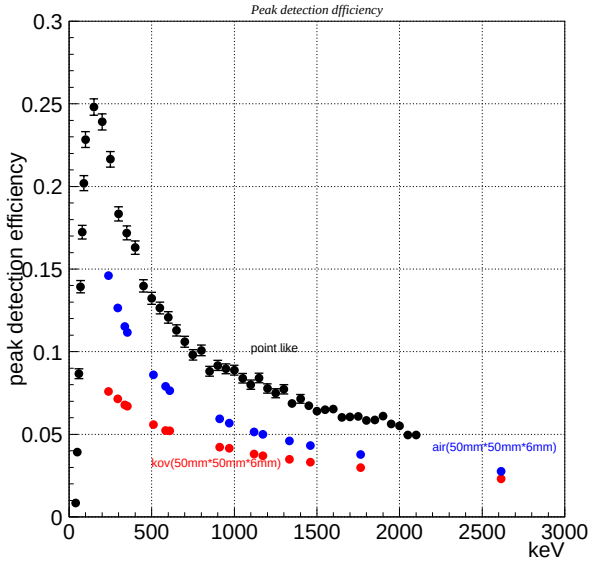


図 A.3: p タイプ HPGe 検出器のピーク効率

図は測定に使用した p タイプ HPGe 検出器の光子エネルギーとピーク効率の関係を GEANT 4 を用いてシミュレーションした結果である。黒点は点線源を仮定し検出器の直上から $4\pi$ に打ち込んだもの，青点は 50mm×50mm×6mm の大きさの空気を仮定したもの，赤点は 50mm×50mm×6mm の金属を仮定したものである。

同軸型 p タイプ Ge 検出器の効率で 100keV 以下の低エネルギーにおいて効率は急激に減少する。低エネルギー領域においてピーク効率が落ちる理由は，クライオスタットの光子入射窓および結晶外側の不感層 (特に p タイプ検出器の $n^+$ 層) における光子の減弱によるためである。高エネルギー側でピーク効率が下がる理由は，散乱線の多重相互作用による全エネルギー吸収の確率が下がるためである。また，Ge 結晶が大きいほどピーク効率が高く負のこう配が小さくなるのだが，理由としては，立体角の関係もあるが，同様に多重相互作用の確率による。つまり，結晶内の有感部に生じた散乱線が続いて結晶内で相互作用を行って結果的に全エネルギーが結晶有感部に吸収される効果が大きいことにある。

### A.3.3 スペクトル測定装置

$\gamma$ 線のエネルギー測定はスペクトロメトリー (spectrometry) またはスペクトロスコピー (spectroscopy) といわれ，放射能測定のもっとも基本的で重要な測定法である。スペクトル測定装置の基本的な構成を図 A.4 に，その概要を以下に示す。

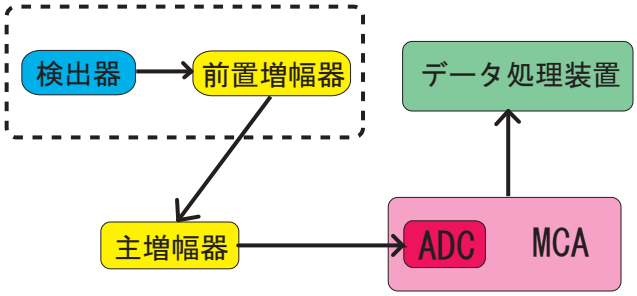


図 A.4: スペクトロメータの基本構成

#### 検出器

数 10keV 以下の低エネルギー光子には Si(Li) や小型のプレーナ型 Ge 検出器，中・高エネルギーの $\gamma$ 線スペクトルの測定には同軸型 Ge 検出器，高いエネルギー分解能を必要としない場合には NaI(Tl) シンチレーション検出器が使われる。

#### 前置増幅器

検出器からの信号は微弱であり，かつ，出力インピーダンス (交流成分に対する抵抗) が高いので，前置増幅器で信号の増幅，信号・雑音比 (S/N) の改善，インピーダンス整合などが行われる。検出器からの信号の減衰と SN 比の劣化を最小限にするため，前置増幅器の初段に使われる FET は検出器のすぐ近くに置かれ，場合によっては検出器と一体構造になっている。検出器で生成した電荷信号を $Q$，検出器の静電容量を $C_D$，前置増幅器の入力静電容量を $C_I$ とすると，前置増幅器の入力端におけるパルス波高は $V_{in} = Q/(C_D + C_I)$ となる。半導体検出器では $C_D$ は印加電圧によって変化するので，その影響を受けない電荷有感型前置増幅器 (charge sensitive preamplifier) が用いられる。

#### 主増幅器

主増幅器は，測定の目的に応じたパルス信号をつくるため，前置増幅器からの出力信号に対してパルス処理を行う。その主な機能は，パルス波高の増幅，S/N の改善，および計数率特性の改善などである。その他に主増幅器の一般的な機能としては，特に高い計数率の測定で必要となるパイルアップ除去 (pile-up rejector ; PUR)，ポールゼロ (pole-zero) 調整回路，およびベースラインレストアラー (baseline restorer ; BLR) などの回路が付加されている。

### ADC および MCA

通常，パルス波高分析はマルチチャンネル分析器 (multi-channel analyzer ; MCA，または，pulse height analyzer ; PHA) によって行われる。アナログ・デジタル変換器 (analog to digital converter ; ADC) は，MCA の心臓部に相当するものである。増幅器からの出力パルスの波高値 (アナログ量，ボルト単位) は ADC によってチャネル数 (デジタル量，チャネル単位) に，高速かつ正確に変換される。

変換方式としては，ウィルキンソン (Wilkinson) 型 ADC および逐次近似 (successive approximation) 型または逐次比較型といわれる ADC が使われ，通常，4k∼16kch の変換ゲイン，100M∼400MHz の内部クロック周波数のものが使われる。ADC に入力したアナログパルスの波高がチャネル数 (ch) に変換され，その数に等しいアドレスのデータメモリーに計数値が加算される。この過程が多くのアナログパルス信号について行われると，チャネル当たりの計数値のヒストグラム，つまりスペクトル (パルス波高分布) がつくられる。

# 参考文献


[1] K.G. Begeman, et al.,Mon. Not. R. Astron. Soc. 249(1991)219t.

[2] C.L.Bennet et al.,Astrophys.J.Supp.,148(2003)1.

[3] D.N.Spergel et al.,Astropys.J.Supp.,148(2003)175.

[4] W.Sutherland, Rev. Mod. Phys. 71(1999)421.

[5] Y.Fukuda et al.(Super-Kamiokande Collaboration),Phys. Rev. Let.81(1998)1562.

[6] S.Fukuda et al.(Super-Kamiokande Collaboration),Phys. Rev. Let.86(2001)5651.

[7] The SNO Collaboration, Phys.Rev. Let.87(2001)071301.

[8] R.D.Peccei and H.R.Quinn, Phys. Rev. Let.38(1977)1440.

[9] G.Jungman et al.,Supersymmetric Dark Matter, Physics Rep. 267(1996)195.

[10] M.W.Goodman and E.Witten, Phys. Rev. D31(1985)3059.

[11] The OPAL Collaboration, G.Abbiendi, et al.,Eur.Phys.J C35(2004)1-20.

[12] A.Morales et al. Phys. Lett. B532(2002)8.

[13] L.Baudis et al. Phys. Rev. D63(2001)022001

[14] R.Bernabei et al.,Phys. Lett. B389(1996)757.

[15] R.Bernabei et al.,Phys. Lett. B480(2000)23.

[16] R.Bernabei et al.,Phys. Lett. B436(1998)379.

[17] R.Bernabei et al.,Nucl. Phys. B563(1999)97.

[18] S.Yoshida et al.,Nucl. Phys. B(Proc.Suppl.)87(2000)58.

[19] N.J.Spooner et al.,Phys. Lett. B473(2000)330.

[20] N.J.Spooner et al., Proc. DM 2000,(Marina del Rey, 2000) ed. D. Cline p.365.

[21] G.Angloher et al., Astropart. Phys. 18(2002)43.

[22] W.Ootani et al., Phys. Lett. B461(1999)371.

[23] K.Miuchi et al., Astropart. Phys. 19(2003)135.

[24] A.Benoit et al., astro-ph/0206271v1.

[25] CDMS Collaboration, astro-ph/0405033.

[26] D.Cline et al., Astropart. Phys. 12(2000)373.

[27] M.Yamashita, Doctoral thesis, Waseda University, 2003.

[28] Rick Gaitskell and Vuk Mandic http://dmtools.berkeley.edu/limitplots/

[29] A. Baldini et al., physics/0401072v1.

[30] A.Hitachi,T.Takahashi,N.Funayama,K.Masuda,J.Kikuchi and T.Doke, Phys.Rev.B 27(1983) 5279.

[31] zeplin Status of Dark Matter Searches in the Boubllby Mine.

[32] Handbook of Chemistry & Physics, The Chemical Rubber Company.

[33] Particle Data Group:K. Hagiwara et al., Phys. Rev. D66, 01001(2002).

[34] 中村正吾 他, KEK「放射線検出器とその応用」研究会 (2004).

[35] J. Jortner et al., J. Chem. Phys.,42,4250(1965).

[36] N. Schwenter, E.E. Koch and J. Jortner, "Electronic Excitations in Condensed Rare Gases", Springer-Verlag, Berlin 1985.

[37] T. Doke et. al., Jpn. J. Appl. Phys. 41(2002)1538.

[38] T. Doke and K. Masuda Nucl. Instr. and Meth., A420, 62(1999).

[39] MEG proposal to PSI, Proposal to INFN at http://meg.web.psi.ch/docs/index.html

[40] The Super Kamiokande Collaboration, Phys. Lett. 452 (1999) 418.

[41] 大谷航, 東京大学理学系研究科修士論文 (1994).

[42] 身内賢太郎, 東京大学理学系研究科修士論文 (1999).

[43] 竹田敦，東京大学理学系研究科修士論文 (2000).

[44] 石塚正基, 東京大学理学系研究科修士論文 (2001).

[45] 橋本孝明，東海大学理学研究科修士論文 (2002).

[46] 足永洋行，東京大学理学研究科修士論文 (2004).

[47] 南野彰宏, 東京大学理学系研究科修士論文 (2004).

[48] 穂坂純也，東京大学理学研究科修士論文 (2005).

# 謝辞

本論文をまとめるにあたり多くの方に御指導していただき，深く感謝しています。

指導教官である福田善之先生には，本研究およびスーパーカミオカンデ実験に参加できる機会を与えていただき深く感謝しています。また，研究を進めるにあたり物理全般から，解析方法や研究者としての態度など，さまざまなことにおいて一から丁寧に御指導していただきました。行き詰まったときには親身になって相談に乗って頂きました。学部時代を含め 3 年間御指導して頂き，ありがとうございました。

神岡宇宙素粒子研究施設施設長である鈴木洋一郎先生には，物理全般の知識，研究者としての物の見方，物理に対する姿勢を教えて頂きました。また，多くの御助言を頂きました。ありがとうございました。

中畑雅行先生には，ミィーティングにおいて適切な助言をいただきました。また，実験に対する情熱，物理全般の知識を教えていただきました。ありがとうございました。

森山茂栄先生には，多くの質問，放射線，データ解析など様々なことで丁寧にわかりやすく御指導していただきました。ありがとうございました。

竹内康雄先生には，コンピュータについて教えていただきました。小汐由介先生には，コンピュータのことやシミュレーションについて教えていただきました。また，私生活面でも大変お世話になりました。竹田敦先生には，放射線，物理の基礎知識，コンピュータ，プログラミング，シミュレーションなど多くの分野で御指導していただきました。安部航先生には，さまざまな質問に答えていただきました。関谷洋之先生には，放射線，物理の基礎知識，コンピュータなどを教えていただきました。

塩澤真人先生，早戸良成先生，三浦真先生，大林由尚先生，亀田純先生には，研究施設内においてさまざまなことでお世話になりました。

早稲田大学の鈴木聡先生には，様々な知識など情報をいただきました。

研究員の小川洋先生には，放射線，データ解析，実験や測定など多くのことで御指導していただきました。また，行き詰まったときには適切なアドバイスを頂きました。ありがとうございました。満田史織先生 (超伝導低温工学センター) には，データ解析，実験や測定など御指導していただきました。また，私生活面でも大変お世話になりました。

東京大学ニュートリノセンターの奥村公宏先生，中山祥英先生，佐治超爾先生，樋口格先生，武長由美子さんには，物理の知識やコンピュータについて丁寧に教えていただきました。

古田登さん，水畑実さん，熊丸誠一さん，秋本真利さん，大倉洋子さん，岡田英里さん，前田由香利さんには，神岡で研究するにあたり様々な面でお世話になりました。

東京大学の南野彰宏さんには，物理のこと，コンピュータに関する様々なこと，シミュレーションやプログラミングや解析のことなど本当に様々なことで大変お世話になりました。また，熱心にそして丁寧に様々ことを教えていただきました。すでに卒業された穂坂純也さん，同級生で東京大学の三塚岳君，西野玄記君，早稲田大学の太田淳君，後輩で東京大学の石原千鶴枝さん，飯田崇史君，上島考太君，岡山大学の池田一得君には，神岡での研究生活で大変お世話になりました。

宮城教育大学福田研究室の方々にも大変お世話になりました。卒業生の佐藤勝士君，4 年生の秋山和士君，3 年生の西浦由里子さんには，さまざまなことでお世話になりました。

最後にこれまで私を支えてくれた家族と友人に深く感謝します。