

XMASS 実験における実データを用いたクリプトン事象の同定

神戸大学大学院理学研究科物理学専攻  
博士前期課程 2 年  
学籍番号 106s104s 大塚 康平

平成 24 年 2 月 20 日

## 概要

これまでの宇宙観測の結果から我々の宇宙には光では捉えられない暗黒物質 (Dark Matter) が存在する事がわかっており、現在世界中で暗黒物質を検出するための実験が行われている。WIMPs(Weakly Interactive Massive Particles) は現在最も有力な Dark Matter の候補である。その WIMPs の候補の 1 つがニュートラリーノと呼ばれる粒子である。ニュートラリーノは標準理論の拡張である SUSY(超対称性理論) から導かれる粒子であり、その中で最も軽い LSP(Lightest Supersymmetric Particle) が候補として有力視されている。

XMASS 実験は神岡鉱山内の地下 1000m において行われている、検出器部分に液体キセノン (Xe) を約 1ton 用いた極低バックグラウンド環境下での暗黒物質直接探索実験である。

市販されている Xe には、微量のクリプトン (Kr) が含まれており、放射性不純物である  $^{85}\text{Kr}$  も含まれている。 $^{85}\text{Kr}$  崩壊により起きる  $\beta$  崩壊のエネルギーは暗黒物質が検出器中で落とすエネルギー帯と重なるため、暗黒物質探索の致命的なバックグラウンドとなる。そこで、XMASS 実験では Xe 中の Kr 濃度を 1ppt( $10^{-12}\text{mol Kr/mol Xe}$ ) 以下に低減させるために、5 桁以上の Kr 濃度低減能力のある Kr 除去蒸留装置を開発し、本実験用に 1.2ton の Xe を蒸留した。

XMASS 実験用には Kr 濃度を低減した 1.2ton の Xe を調達した。その Xe 中の Kr 濃度を高感度ガスクロマトグラフ装置で測定すると、310ppb 程度であった。開発した Kr 蒸留装置に 5 桁以上の Kr 濃度低減能力を仮定すると、精製後のキセノンには 3ppt 以下の濃度の Kr が含まれている事が期待される。しかし、この精製キセノン中の超低濃度 Kr は前述した高感度ガスクロマトグラフ装置の検出感度以下であるため正確に定量することができていない。

一方、Xe を精製する際に取り出されるオフガス中の高濃度 Kr をガスクロマトグラフ装置で測定すると 29ppm であった、そこから間接的に精製 Xe 中の Kr 濃度を評価すると  $(23\pm 32)\text{ppb}$  と見積もられた。

XMASS 実験では検出器内部の 642 本の PMT により捉えられた Xe 発光事象の波形を FlashADC(以後、FADC) により取得している。一方、 $^{85}\text{Kr}$  は 0.43% の割合で半減期  $1.015\ \mu\text{s}$  で 173keV の  $\beta$  崩壊のあと 514keV の  $\gamma$  線を放出する。この連続した事象の波形を FADC を用いて捉える事で  $^{85}\text{Kr}$  の崩壊事象を同定し、その頻度から量の推定を行なう。本論文では実際に XMASS 実験検出器の FADC で 2011 年の 2 月から 3 月と 8 月から 9 月にとられたデータを、波形解析する事によって検出器内部の液体キセノン中の  $^{85}\text{Kr}$  の量を推定した。

# 目次

<b>第 1 章 序章</b>	<b>1</b>
1.1 Dark Matter	1
1.2 暗黒物質の密度	2
1.3 Cosmic Microwave Background	3
1.4 Local density of Dark Matter	4
1.5 暗黒物質候補	5
1.5.1 Baryonic Dark Matter	5
1.5.2 Non baryonic Dark Matter	5
1.5.3 Hot Dark Matter 候補	6
<b>第 2 章 XMASS 実験</b>	<b>7</b>
2.1 Xe について	7
2.1.1 Xe の物理性質	7
2.1.2 Xe シンチレーション光	8
2.1.3 Xe シンチレーション効率	10
2.2 XMASS 実験装置	12
2.2.1 XMASS 実験 DAQ システム	15
2.2.2 XMASS 実験検出器シミュレーション	21
2.2.3 XMASS 実験検出器キャリブレーション	25
<b>第 3 章 Kr バックグラウンド</b>	<b>30</b>
3.1 Kr バックグラウンド	30
3.2 Xe の蒸留	31
<b>第 4 章 ガスクロマトグラフ装置による Xe 中 Kr 濃度測定</b>	<b>34</b>
4.1 測定結果	34
<b>第 5 章 FADC による Kr 事象の同定</b>	<b>35</b>
5.1 $^{57}\text{Co}$ エネルギーキャリブレーション	36
5.2 FADC での波形情報	37
5.3 ピークサーチアルゴリズム	37
5.4 Event Reduction クライテリア	40
5.4.1 First Cut	41
5.4.2 Eye Scan	43
5.4.3 Final Cut	43

5.5	Accidental rate . . . . .	44
5.6	結果 . . . . .	45
5.6.1	Kr 濃度上限値 . . . . .	45
5.7	考察 . . . . .	47
<b>第 6 章</b>	<b>結論</b>	<b>57</b>

# 第1章 序章

## 1.1 Dark Matter

これまでの宇宙観測により明らかにされた暗黒物質 (Dark Matter) の証拠は多岐に及ぶ。例えば重力による空間の歪みにより引き起こされる重力レンズ効果 [1](図 1.1 参照) や、Wilkinson Microwave Anisotropy Probe(WMAP) 衛星の宇宙背景マイクロ波観測がある。WMAP の結果によると、この暗黒物質は宇宙の質量の約 23%を占めているとされ、その正体を解き明かすために暗黒物質探索の意義はますます高まっていると言える。しかし、未だ暗黒物質は直接検出されるには至っておらず、その詳細な性質は不明である。

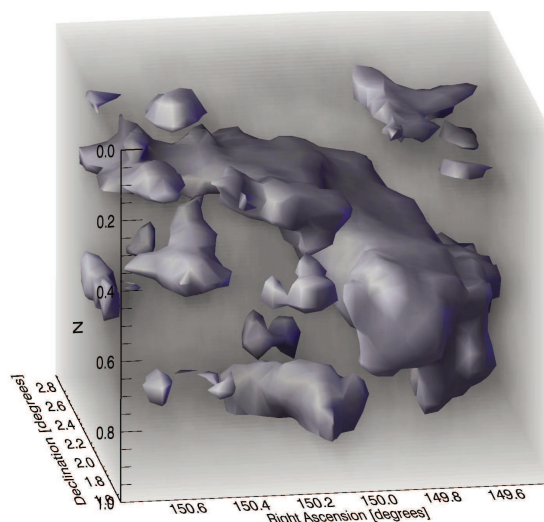


図 1.1: 重力レンズ効果を使って測定した暗黒物質の 3D 分布:水平方向横軸が赤径、水平方向縦軸が赤緯、鉛直方向は視線方向を表し、下に行くほど遠方になる。[1]

暗黒物質の存在が示唆され始めた経緯は 1933 年の F.Zwicky に遡る。彼がかみのけ銀河団の赤方偏移による観測から ”見える物質” だけでは銀河団が平衡状態にあるのは難しく、重力を感じるが ”目に見えない物質” の必要性を示した。この ”目に見えない物質” が暗黒物質と呼ばれる。

1960 年代には電波観測により、銀河の回転速度の観測が行われた。図 1.2 に NGC6503 渦巻銀河の回転曲線を示す。銀河の回転速度は、銀河中心からの距離  $r$ 、速度  $v(r)$ 、 $r$  内に含まれる質量  $M(r)$  とするとケプラーの法則から

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

と求める事が出来る。 $G$ は重力定数である。また $r$ 、 $v$ を観測から求める事で式 1.1 から半径  $r$  内の質量  $M(r)$  を推定する事ができる。目に見える物質は銀河の中心からおよそ半径 5kpc 以内に集中している。この場合銀河の回転速度は半径  $r$  が増加するに従って減少するはずである。しかし、図 1.2 のように、回転曲線は  $r$  が大きくなっても一定の値を持っている。このような回転曲線を描くには、“目に見えない物質”つまり、暗黒物質が存在する必要がある。

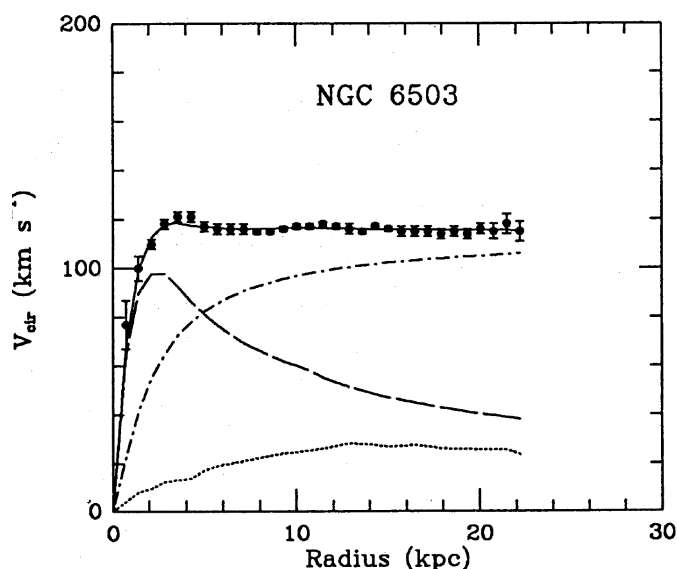


図 1.2: 渦巻銀河 NGC6503 の回転曲線:測定点のプロットは銀河の中心からの距離  $r$  の関数として測定された角回転速度。破線は観測された disk、点線は観測された gas による寄与、点破線は観測とあうために必要になる dark halo である。[2]

## 1.2 暗黒物質の密度

計量テンソル  $g_{\mu\nu}$ 、リッチテンソル  $R_{\mu\nu}$ 、リッチスカラー  $R$ 、エネルギー運動量テンソル  $T_{\mu\nu}$  を用いて Einstein 方程式を示すと

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} \quad (1.2)$$

となる。 $\Lambda$  は宇宙項、 $G$  は万有引力定数である。Einstein 方程式は、左辺が空間を表し、右辺が物質の振る舞いを表す。また、等方的であることから 3 次元の球面極座標を用い、3 次元空間の線素に時間を加え 4 次元時空の線素を示すと

$$ds'^2 = c^2 dt^2 - \left[ \frac{dr^2}{1 - Kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \phi^2) \right] \quad (1.3)$$

となる。これは一様等方膨張宇宙での時空を決定する線素である。この計量を用いて Einstein 方程式 (1.2) を解くと行列の対角成分が計算でき (0,0) 成分から Friedmann 方程式

(1.4) が導かれる。

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{Kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda c^2}{3} \quad (1.4)$$

つぎにハッブル定数 (1.5) を次のように定義する。

$$H \equiv \frac{\dot{a}}{a} \quad (1.5)$$

ハッブル定数を用いて Friedmann 方程式を書き直し、さらに宇宙項をエネルギー密度に含ませ、宇宙全体のエネルギー密度を  $\rho_{tot}$  とすると

$$H^2 + \frac{Kc^2}{a^2} = \rho_{tot} \frac{8\pi G}{3} \quad (1.6)$$

となる。この式 (1.6) で曲率  $K = 0$  のときのエネルギー密度は

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G} \quad (1.7)$$

となる。 $\rho_c$  は臨界密度と呼ばれ、宇宙が平坦であるときのエネルギー密度を示す物質、宇宙項のエネルギー密度をこの  $\rho_c$  で規格化したものを密度パラメータといい

$$\Omega_i \equiv \frac{\rho_i}{\rho_c} \quad (1.8)$$

と定義する。 $i$  には物質の  $M$ 、宇宙項の  $\Lambda$  が入る。

式 (1.9) より一般に宇宙の全密度パラメータの合計を  $\Omega$  とすると

$$\Omega = \sum_i \Omega_i = \Omega_M + \Omega_\Lambda \quad (1.9)$$

が定義される。ここで、 $\Omega_M$  は宇宙の物質密度、 $\Omega_\Lambda$  は宇宙のエネルギー密度である。

### 1.3 Cosmic Microwave Background

宇宙の全密度パラメータ  $\Omega$  は宇宙背景放射 (Cosmic Microwave Background) 等の観測により見積もることができる。CMB は Big bang 過程で放出された photon の名残であり、宇宙全体にほぼ一様に分布しているが初期宇宙で発生した宇宙空間の質量密度の揺らぎによる若干の異方性がある。

1992 年に COBE 衛星が初めて CMB の若干の異方性を確認した。その後観測技術の進歩により、より高精度の観測が可能になった。WMAP はその代表例で、WMAP の結果 (図 1.3 参照)[3] により

$$\Omega_\Lambda = 0.734 \pm 0.029 \quad (1.10)$$

$$\Omega_M = 0.266 \pm 0.029 \quad (1.11)$$

となり。物質密度はさらに分けられ

$$\Omega_M = \Omega_b + \Omega_{CDM} \quad (1.12)$$

となる。 $\Omega_b$  はバリオン密度で、 $\Omega_{CDM}$  は Cold Dark Matter の密度である。この2つの値も WMAP の結果から

$$\Omega_b = 0.0449 \pm 0.0028 \quad (1.13)$$

$$\Omega_{CDM} = 0.222 \pm 0.026 \quad (1.14)$$

となることがわかっている。この観測結果から宇宙に存在する物質の大部分が暗黒物質であることがわかった。

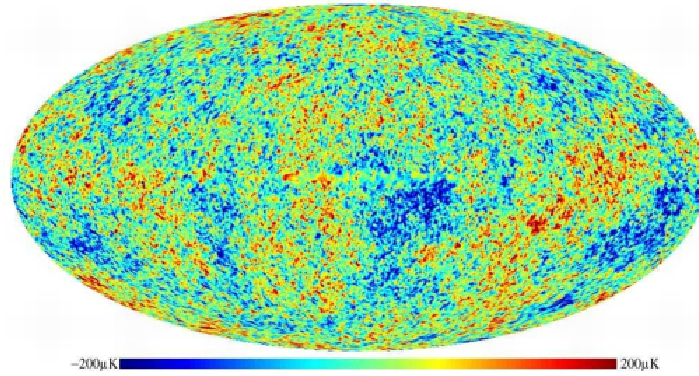


図 1.3: WMAP による宇宙背景放射全天マップ:各部分の色はその点での温度を表し、赤側にいくほど温度が高い。角度分解能は 0.3 度、温度測定精度は 20  $\mu$  K。[3],[4]

## 1.4 Local density of Dark Matter

暗黒物質の存在は示唆されている。暗黒物質の密度は地球上で暗黒物質を直接検出する際の検出頻度に関係しているため、その量を見積もる事は暗黒物質直接探索実験にとって重要である。そのためには太陽系内での局所的な暗黒物質密度  $\rho_{CDM}$  と暗黒物質の速度分布  $v_{CDM}$  を知る必要がある

銀河の回転曲線の観測は太陽系内での局所的な暗黒物質密度  $\rho_{CDM}$  と暗黒物質の速度分布  $v_{CDM}$  を知るために重要である。しかし、我々の銀河の回転曲線は NGC6503 銀河のような銀河系外星雲ほど正確には測定する事ができない。そこで我々の銀河を通常の渦巻銀河だと仮定すると我々の銀河の回転曲線は図 1.4 のようになる。

一様な halo では、暗黒物質の密度分布を以下のように仮定することで回転曲線の形状を説明できる。

$$\rho_{CDM}(r) = \frac{\rho_0}{1 + \frac{r^2}{r_0^2}} \quad (1.15)$$

ここで  $\rho_{CDM} \sim 0.3 \text{ GeV}/\text{cm}^3$  と見積もられる。



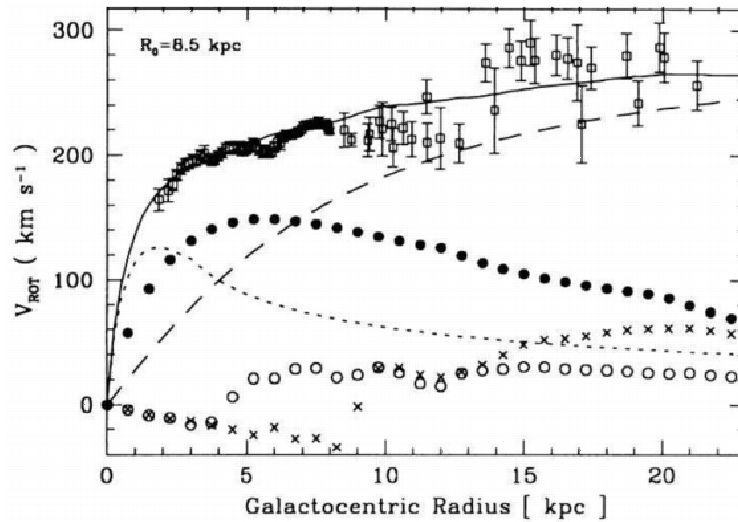


図 1.4: 我々の銀河の回転曲線:ドットは bulge、黒塗りの丸は disk、クロスは HI 層、白塗りの丸は  $H_2$  層、ダッシュは dark halo、実線は合計の寄与を表す。[5]

## 1.5 暗黒物質候補

暗黒物質の候補は Baryonic、Non baryonic なものに分類できる。

### 1.5.1 Baryonic Dark Matter

Baryonic Dark Matter 候補には白色矮星、中性子星、ブラックホールなどがある。これらを総称して MACHOs(MAssive Compact Halo Objects) と呼ぶ。MACHO が観測する星の視線を通過すると、恒星の光が重力レンズ効果によって増光する。これを重力マイクロレンズ効果と呼ぶ。その効果を観測する実験が MACHO[6,7]、OGLE[8]、EROS[9]、MOA[10] で行われた。MACHO プロジェクトでは LMC(Large Magellanic Cloud) の 8.5 億個の恒星の光の曲線を観測し、12 個の候補が見つかったと主張した。この候補数は期待されるバックグラウンド以上ではあるが、銀河のダークハローの実質的な部分を形成するものとは考えられていない。0.5 $M_{\odot}$  の質量を持つと推論され、これら物質はハローの質量の 20%以下となっている。したがって、MACHO の観測結果は Baryonic matter は Dark Matter の一部ではあるが主要な要素にはならないことを表している。EOGLE、EROS、MOA の 3 グループは MACHO グループと同じ領域で MACHOs 発見には至らず、MACHO グループの結果と矛盾している。

### 1.5.2 Non baryonic Dark Matter

Non Baryonic Dark Matter は Hot と Cold の 2 つに分類することができる。宇宙初期に相対論的な運動エネルギーを持っていたものを熱い Hot Dark Matter と、非相対論的な

運動エネルギーを持っていた Cold Dark Matter に分けることができる。

### 1.5.3 Hot Dark Matter 候補

#### Neutrinos

Neutrino(ニュートリノ)は近年までは Dark Matter の最大候補であった。ニュートリノは、素粒子の標準理論においてレプトンの一つに位置づけられている素粒子である。電子型 ( $\nu_e$ )、ミュー型 ( $\nu_\mu$ )、タウ型 ( $\nu_\tau$ ) の 3 つに分けられており、それぞれに反粒子が存在する。ニュートリノは太陽、超新星爆発、高エネルギー宇宙線と大気の相互作用の中で粒子の崩壊や相互作用における生成物として大量に生成される。Super Kamiokande(以下 SK)の大気ニュートリノ観測 [11] や、太陽ニュートリノ観測 [12] から質量があることが証明され、これらのニュートリノ振動解析結果から異なる型のニュートリノの質量差の 2 乗  $\Delta m^2$  は

$$\sim 7 \times 10^{-5} eV^2 < \Delta m^2 < \sim 3 \times 10^{-3} eV^2 \quad (1.16)$$

もし、ニュートリノの質量が  $1 \sim 50 eV$  の範囲内であるならば、Dark Matter の大きな要素になる。 $m_\nu \geq 20 eV$  であるなら、Dark Matter のほとんどがニュートリノである。しかし、tritium decay からの質量の limit は、 $m_\nu \leq 2.8 eV$  である。よって、ニュートリノの臨界密度への寄与は

$$0.001 \leq \Omega_\nu \leq 0.18 \quad (1.17)$$

となる。これより、ニュートリノも Dark Matter の一部ではあるが主要な要素とはならないと言える。

#### Cold Dark Matter 候補

##### Axions

Axions(アクシオン)は素粒子物理学の CP 対称性の破れを解決するために導入された粒子である。アクシオンもまた Dark Matter の候補として議論されてきた。アクシオンは質量が  $10^{-6} eV \sim 10^{-2} eV$  の範囲であれば Dark Matter の候補となり得る。

##### WIMPs

WIMPs(Weakly Interactive Massive Particles)は現在最も有力な Dark Matter の候補である。その WIMPs の候補の 1 つがニュートラリーノと呼ばれる粒子である。ニュートラリーノは標準理論の拡張である SUSY(超対称性理論)から導かれる粒子であり、その中で最も軽い LSP(Lightest Supersymmetric Particle)が候補として有力視されている。

## 第2章 XMASS実験

XMASS 実験は低バックグラウンドの液体 Xe シンチレーターを用いた実験でその構想は 2000 年に想起された [13]。XMASS 実験の物理的な Targets は暗黒物質の直接探索、低エネルギー太陽ニュートリノの観測によるニュートリノ振動パラメータの精密測定、 $0\nu\beta\beta$  崩壊の半減期測定による、ニュートリノの絶対質量の決定である。現在はこの中でも Dark Matter の直接探索に向けて実験が行われている。理論から WIMP 型の Dark Matter は液体 Xe 中で原子核反跳を起こしてシンチレーション光を発生すると考えられている。我々はこのシグナルを捉える事によりその検出を目指している。

我々はまず 1st phase として 100kg の Xe を用いた試作器での事象再構成精度、自己遮蔽効果、バックグラウンド等の研究開発を終えた後、2007 年から 2nd phase として 1ton の Xe を用いた検出器の建設が行われた。これから説明するように、この 1ton Xe 検出器は世界中の他の暗黒物質直接探索実験に比べてバックグラウンドを約 2 桁程度落とせることが期待される (図 2.1)。

### 2.1 Xe について

#### 2.1.1 Xe の物理性質

XMASS 実験で暗黒物質探索のターゲット物質として用いられる Xe の主な性質は表 2.1 の通りである。液体 Xe は密度が  $2.96\text{g}/\text{cm}^3$  であるため、800kg(XMASS 検出器内有効体積部) でも直径 80cm の球に入り、コンパクトな実験装置になる。また、Xe は放射長が 28.7mm と短く、 $\gamma$  線は液体 Xe 内部に入ると急速に減衰する。したがって有効体積部の事象を選択することで WIMPs 探索のバックグラウンドを低減させることができる。液体 Xe シンチレーションでは原子核反跳と電子反跳ではシンチレーション光の時定数が異なる [15] よって発光の時定数によって原子核反跳 ( $\alpha$  線、中性子、WIMP) と電子反跳 ( $\beta$  線、 $\gamma$  線) を区別する事により電子反跳によるバックグラウンドを落とすことができる。

図 2.2 は Xe の相図を表している。これを見てわかる通り液体 Xe は比較的扱いやすい温度であり、また、気体液体間の状態変化を行いやすく、ゲッターなどを用いてガス状態での不純物除去が可能である。検出器は通常冷凍機や寒剤を用いて 170K 付近の温度でオペレートされる。

図 2.3 は  $\gamma$  線の Xe 中での減衰係数を表している。Xe は原子番号が大きいいためその分減衰係数もほかの原子と比べて大きい。

表 2.2 は Xe の自然存在比を表している。Xe は長寿命の放射性同位体を持っていない。アルゴン (Ar) やゲルマニウム (Ge) をターゲットとして用いた検出器よりも質量数が大きいいため、スピンに依存しない相互作用の反応断面積もこれらの物質と比べて大きい。さら

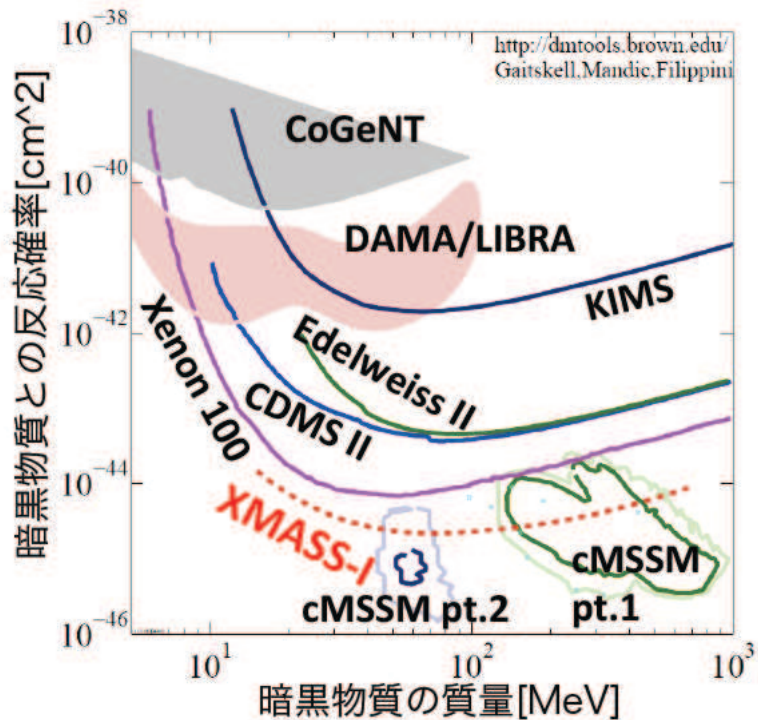


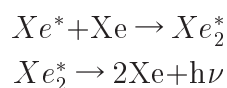
図 2.1: スピンに依存しない弾性散乱 (SI 反応) に対する検出感度:横軸は WIMP の質量、縦軸は核子で規格化された SI 反応断面積、それぞれの線や領域は既存の実験による検出感度及び理論からの予測で、赤い点線が XMASS 実験で目指す検出感度である。作図には dmtools を用いた [14]。

に、 $^{129}\text{Xe}$  や  $^{131}\text{Xe}$  はスピンに依存する相互作用に対する反応断面積は大きい。このような理由から Xe は比較的暗黒物質探索に向いている。

### 2.1.2 Xe シンチレーション光

ネオン (Ne) や Ar などの他の希ガスと同様に、Xe もダイマー状態から脱励起過程を経る際にシンチレーション光を出す [15]。Xe のシンチレーション過程は下式のように表される。

[再結合無しの発光プロセス]



[再結合有りの発光プロセス]

表 2.1: Xe の性質

性質	値	状況
原子番号	54	-
質量数	131.29	-
沸点	165.1K	1atm
融点	161.4K	1atm
密度	2.96g/cm <sup>3</sup>	161.5K
放射長	28.7mm	液体時
シンチレーション光	175nm	-
屈折率	1.61	光波長 177± 5nm 時
時定数 (再結合プロセス)	45ns	$\beta$ 、 $\gamma$ 散乱 (電子反跳)
時定数 (singlet)	4.2ns	$\alpha$ ,n 散乱 (原子核反跳)
時定数 (triplet)	22ns	$\alpha$ ,n 散乱 (原子核反跳)

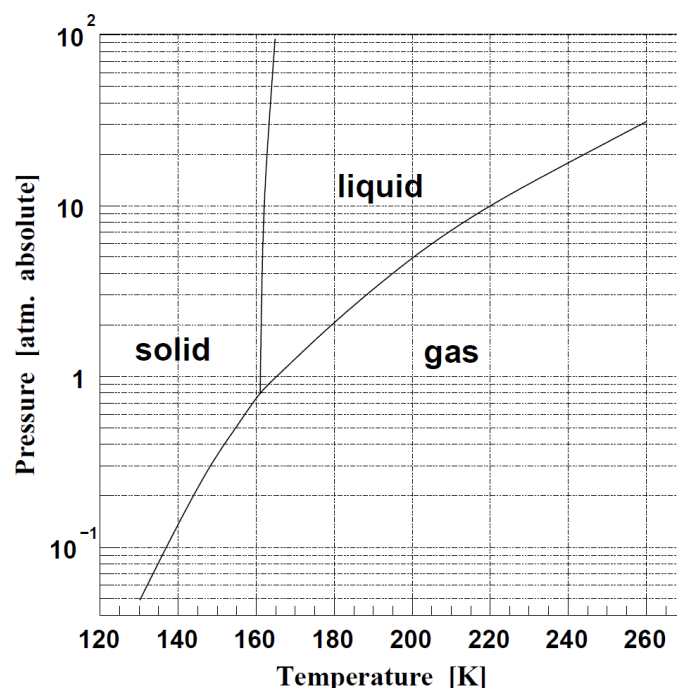


図 2.2: Xe 相図:横軸は温度 (K)、縦軸は圧力 (atm)

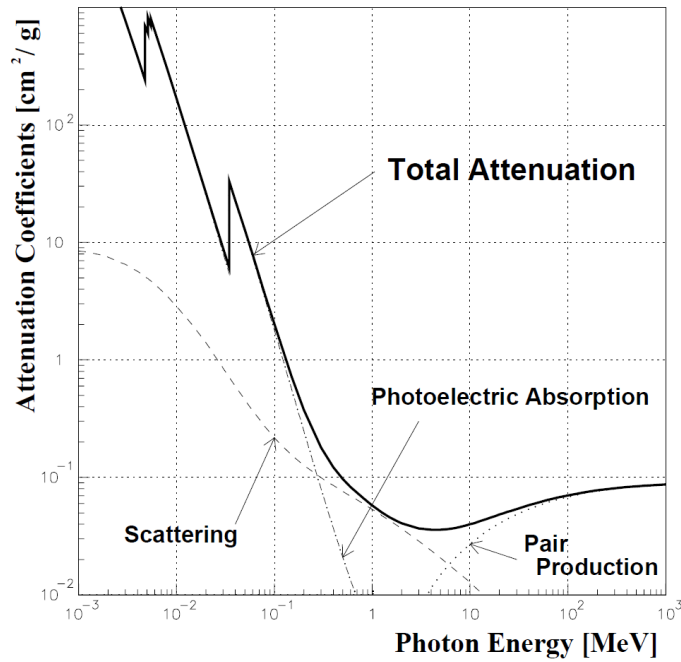


図 2.3:  $\gamma$  線の Xe 中減衰係数:横軸は  $\gamma$  線のエネルギー (MeV)、縦軸は減衰係数 ( $cm^2/g$ )

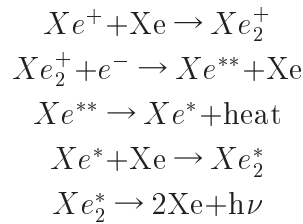


図 2.4 は液体 Xe のシンチレーション光発光過程を表している。シンチレーション過程は再結合過程を含むかどうかで分類される。再結合過程を含む発光プロセスは Xe 原子のイオン化から始まる。まず、イオン化された Xe 粒子が周囲の原子に作用し、電子-イオン対をつくる。その後その電子は thermalize される。そのイオンは局所的に他の Xe 原子と分子イオン ( $Xe_2^+$ ) を形成する。そしてその thermalize された自由電子とその分子イオンの再結合が起き、Xe の励起子 ( $Xe_2^*$ ) が作られる。最終的にその励起子が脱励起する際にシンチレーション光を放出する。

加えて、その脱励起の過程は singlet と triplet と呼ばれる 2 つの過程で構成される。singlet 過程は spin singlet state ( $^1\Sigma_u^+$ ) により引き起こされる。triplet 過程は spin triplet state ( $^3\Sigma_u^+$ ) により引き起こされる。

### 2.1.3 Xe シンチレーション効率

原子核反跳によって作られる電子-イオン対は同じエネルギーの電子反跳から得られる量より大きい。したがって、原子核反跳と電子反跳では発生するシンチレー

表 2.2: Xe の同位体自然存在比

同位体	量 (%)
$^{124}\text{Xe}$	0.096
$^{126}\text{Xe}$	0.090
$^{128}\text{Xe}$	1.92
$^{129}\text{Xe}$	26.44
$^{130}\text{Xe}$	4.08
$^{131}\text{Xe}$	21.18
$^{132}\text{Xe}$	26.89
$^{134}\text{Xe}$	10.44
$^{136}\text{Xe}$	8.87

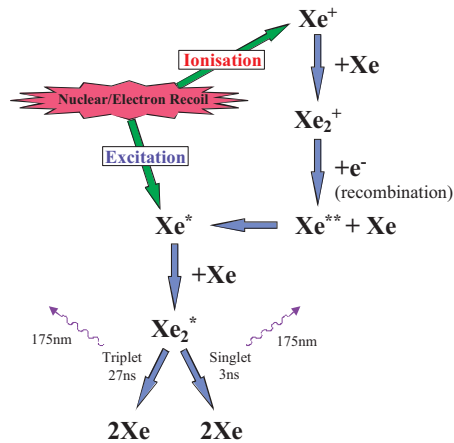


図 2.4: Xe のシンチレーション光発光プロセス

シンチレーション光のエネルギー当たりの生成率が異なる。

この2つの反跳によるシンチレーション光の生成率はrelative scintillation efficiency( $L_{eff}$ )と呼ばれ、下の式で表される。

$$L_{eff} = (\text{原子核反跳での Energy deposit}) / (\text{電子反跳での Energy deposit})$$

我々が検出を目的としている暗黒物質はXe原子核と原子核反跳を起こすため、 $L_{eff}$ をあらかじめ測定により知っておくことは重要である。液体Xeの $L_{eff}$ はこれまで多くの他の実験により測定されている(図2.5参照)。暗黒物質のイベントレートは低エネルギー領域において指数関数的に増加する(図2.6参照)。 $L_{eff}$ は原子核反跳エネルギー $5\text{keV}_{nr}$ のところでは0.11、そこから $50\text{keV}_{nr}$ のところくらいまではおよそ0.2であることがわかっている。ここで $\text{keV}_{nr}$ とは原子核反跳時のエネルギー

ギースケールでの Energy を表す。最近では  $5keV_{nr}$  以下のエネルギーについても  $L_{eff}$  の測定の取り組みが行われている。

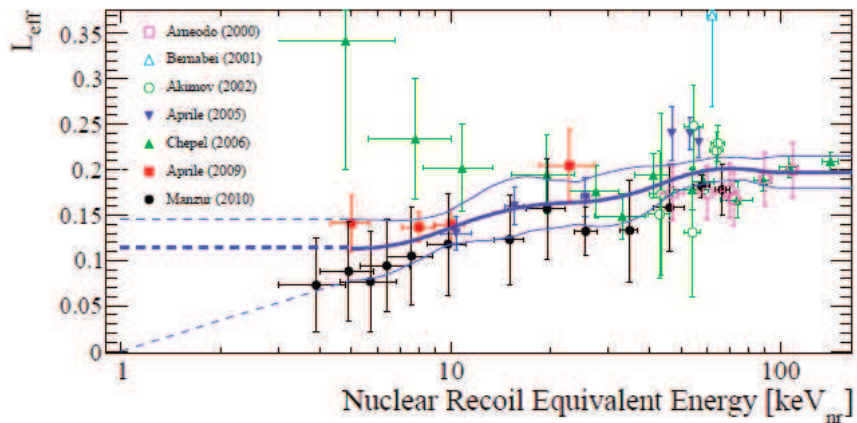


図 2.5: シンチレーション光生成率測定の Global fit: 全  $L_{eff}$  測定実験からの Fit が実線で示される。また、細い実線によって囲まれる区間は、 $5keV_{nr}$  から  $100keV_{nr}$  までの範囲で 90% 信頼区間での誤差である。[16]

## 2.2 XMASS 実験装置

### 実験場所

XMASS 実験検出器は岐阜県飛騨市の神岡鉱山内地下 1000m に設置されている。表 2.3 は神岡鉱山内での、宇宙線  $\mu$  粒子、熱中性子、高速中性子、ラドン濃度、環境  $\gamma$  線のフラックスを表している。これらは暗黒物質探索のバックグラウンドとなる。

表 2.3: 神岡坑内と地上とのラドン (Rn) 濃度、中性子、 $\gamma$  線のフラックス

場所	地上	神岡鉱山内
宇宙線 $\mu$ [ $cm^{-2}s^{-1}$ ][17]	$1.1 \times 10^{-2}$	$\sim 10^{-7}$
熱中性子 [ $cm^{-2}s^{-1}$ ]	$1.4 \times 10^{-3}$ [18]	$8.3 \times 10^{-6}$ [19]
高速中性子 [ $cm^{-2}s^{-1}$ ]	$1.2 \times 10^{-2}$ [18]	$1.2 \times 10^{-5}$ [19]
Rn[Bq/ $m^3$ ](Summer)[20]	40	1200
Rn[Bq/ $m^3$ ](Winter)[20]	40	40
環境 $\gamma$ 線 ( $\geq 500keV$ )[21]	-	$0.71/cm^2/s$



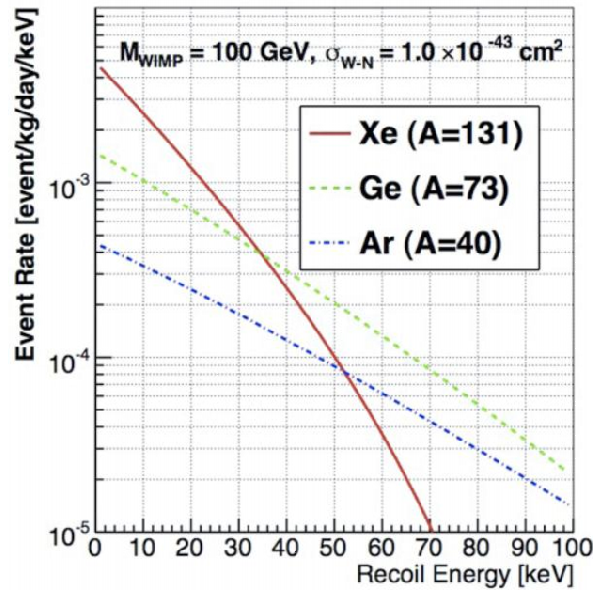


図 2.6: 暗黒物質の各ターゲット物質との反応率:横軸は反跳エネルギー [keV]、縦軸は反応レート [counts/day/kg/keV]、WIMP の質量 100GeV、WIMP とターゲット原子核核子との反応断面積を  $1.0 \times 10^{-43} \text{ cm}^2$  を仮定した。

### 検出器部分

図 2.7(右) は XMASS 実験で用いる検出器の概略図である。検出器は大きく分けて、無酸素銅 (OFHC) 製の IVC (Inner vacume chamber) と OVC (Outer vacume chamber) と呼ばれる 2 部分で構成されている。IVC と OVC の間の空間は断熱のために真空に保たれている。図 2.7(左) は XMASS 実験で用いられているバックグラウンド低減用の純水タンクを表している。純水タンクの直径は 10m、高さは 11m であり、中心部に XMASS 検出器が設置されている。この純水タンクは宇宙線  $\mu$  粒子や環境  $\gamma$  線、環境中性子を低減するためのものである。宇宙線  $\mu$  粒子 veto 用の 72 本の 20inch PMT が内部表面に取り付けられている。

図 2.8(左) は XMASS 検出器の実際の写真である。

IVC 内には 1ton の液体 Xe が満たされており、内部に 642 本の 2inch PMTs (630  $\times$  R10789-11s and 12  $\times$  R10789-11MODs) が取り付けられている。図 2.8(右) のように、この 642 本は OFHC 製の正五角形の PMT ホルダーを 12 個用いて IVC 内部に固定されている。このセットアップでの 642 本の PMT による光電被覆率は 63.4% である。また、使用する Xe の量を抑えるために OFHC 製の filler が使用されている。

IVC 内部において、PMT フォトカソード面を球面とした領域は半径 40cm の球であり液体 Xe 800kg に相当する。この検出器の有効体積は半径 20cm を想定して

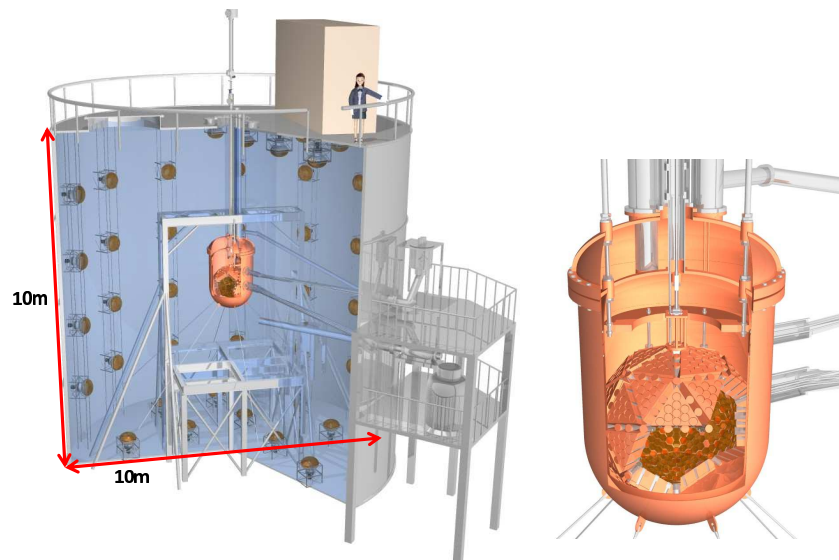


図 2.7: (左)バックグラウンド低減用純水タンク (右)XMASS 実験検出器

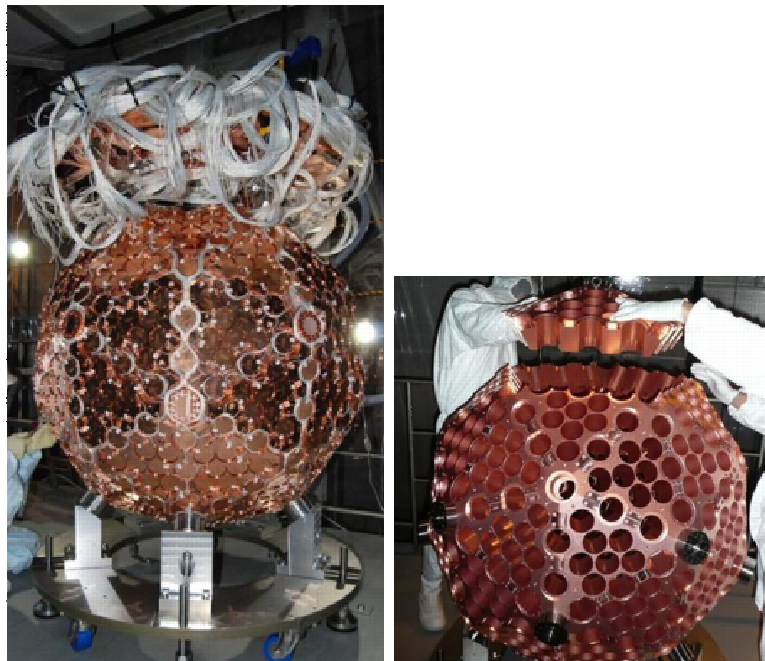


図 2.8: (左)XMASS 実験の検出器本体 (右) 検出器 PMT ホルダー部分

おりこの部分は液体 Xe 100kg に相当する。

## 2.2.1 XMASS 実験 DAQ システム

### エレキハット

純水タンクの上部に XMASS 実験で用いられているデータ取得用の ATM(Analog Timing Module、後述) と FADC などの電子機器が設置されている。これらの電子機器を収容したエレクトロニクスハット内部には冷却水により冷やした空気を循環させており約 20 度に保たれている。図 2.9 は純水タンク上部に設置されたエレクトロニクスハットで、左が ATM 側から見た場合、右は FADC 側から見た場合の様子である。



図 2.9: (左)ATM 側から見たエレクトロニクスハットと (右)FADC 側から見たエレクトロニクスハット

### 光電子増倍管 (PMT)

XMASS 実験では Xe シンチレーション光を高い効率で測定するために検出器の内面に PMT を密に配置している。一方、これらの PMT(2inch,642 本) が XMASS 実験での主要なバックグラウンド源となっている。XMASS 実験の目標とする暗黒物質検出感度を達成するには PMT からのバックグラウンドが半径 20cm の有効体積内で  $10^{-4}dru$ (differential matter rate unit=event/day/kg/keV) 以下であることが必要である。そこで、我々は浜松フォトニクスと共同で低バックグラウンド PMT(R10789-11)[22,23] を開発した。この PMT は液体 Xe 温度で正常動作すること、さらに Xe の出す真空紫外光に感度があることを条件に開発されている。また、PMT の量子効率約 30% となっている。表 2.4 に XMASS 実験用の PMT に含まれる放射性不純物の放射能を示す。これらの放射能は一般的な PMT と比較して、1/10~1/100 程度以下になっている。また、表 2.5 に XMASS 実験で用いられてい

るPMTの主な性能を示す。図2.10はXMASS検出器のPMTの写真とその構造である。

表 2.4: XMASS 実験用の PMT に含まれる放射性不純物の放射能

不純物	$U$	$Th$	$K$	$^{60}Co$
値 (mBq/PMT)	$0.704 \pm 0.282$	$1.51 \pm 0.31$	$< 5.10$	$2.92 \pm 1.61$

表 2.5: XMASS 実験用の PMT(R10789-11) の性能

Gain	$10^7$
Dark Noise Rate(室温)	200Hz
Dark Noise Rate(-100C°)	20Hz
量子効率 (Q.E)	~30%

## ATM

ATM(Analog Timing Module)は信号の電荷を知るためのQAC(charge-to-analog converter)と信号が来たタイミングを知るためのTAC(time-to-analog converter)が1つのモジュールとなったもので、カミオカンデ3、及びスーパーカミオカンデ実験のために開発された(図2.11)[24]。ATMは1ボードで12チャンネルのPMTからの信号を扱う事ができる。XMASS実験では検出器からくる642本の2 inch PMTと純水タンク表面の20 inch PMTからくる72本の信号を66ボードのATMを用いてデータ取得する。

各PMTからの信号は4つに分けられる。その中の1つは10倍に増幅された後、0.2光電子(p.e)相当のthreshold(400mV)に設定されたディスクリミネータをとおる。もしPMT信号の波高がthresholdを超えると、短形波(幅200ns高さ11mV)が生成される。この12個の短形信号は合計され、HITSUM信号として出力される。同時にhit信号として900ns幅の短形波と12本のPMT信号を合計したPMTSUMを生成する。この900nsの間はPMT信号が来てもvetoされる。この短形波によりTACの充電が開始し、globalトリガーが来ると充電は終了する。

PMTからの別の信号はQACへ送られ、そこでディスクリミネータの出力後400nsの間、電荷が集積される。もしglobalトリガーがPMT信号後1300ns以内に到着しなかった場合、TACおよびQACの電荷は捨てられる。globalトリガーが到着した時は、ADCによるTAC/QACのコンデンサーに蓄積された電荷のAD変換が開始される。また、各チャンネルにはQAC/TACが2つずつあり交互に切り替えることにより、デッドタイムを減らすことを可能にしている(図2.12)。

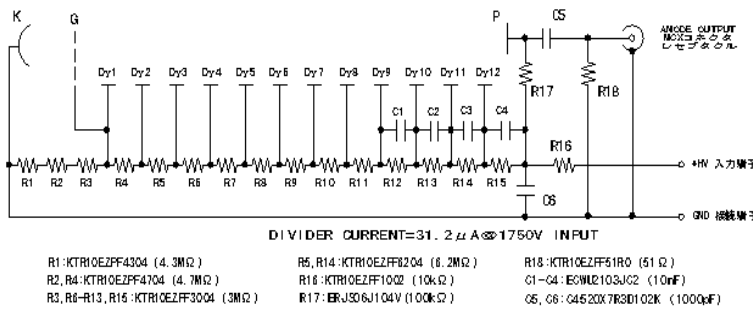


図 2.10: 光電子増倍管 (R10789-11) とその構造 [22,23]

ATM ボードは1つのTKO BOX[25]に20ボード設置できるので、3BOX(60ボード)を用いて、検出器からくる642本のPMT信号を取得する。また、もう1つBOXを用いて6ボードのATMを設置し、純水タンクからくる72本のPMTの信号を取得する。この信号はそのままATMへ送られる。表2.6はXMASS実験で用いられているATMの性能を表している。

表 2.6: ATM の性能

QAC/TAC 分解能	12 bit
QAC ダイナミックレンジ	0~400 pC
TAC ダイナミックレンジ	0~1 $\mu$ s

## FADC

FADC(Flash Analog to Digital Converter)とは、入力されたアナログ電圧信号を連続的にデジタル信号に変換するモジュールである。今回用いたFADCは500MHzのサンプリングレートで連続的にAD変換する。主に $\mu$ 粒子崩壊電子の検出効率の向上と高エネルギー事象の解析を目的に開発された。本研究ではATMモジュールから送られてくるPMTSUM信号を入力信号としている。

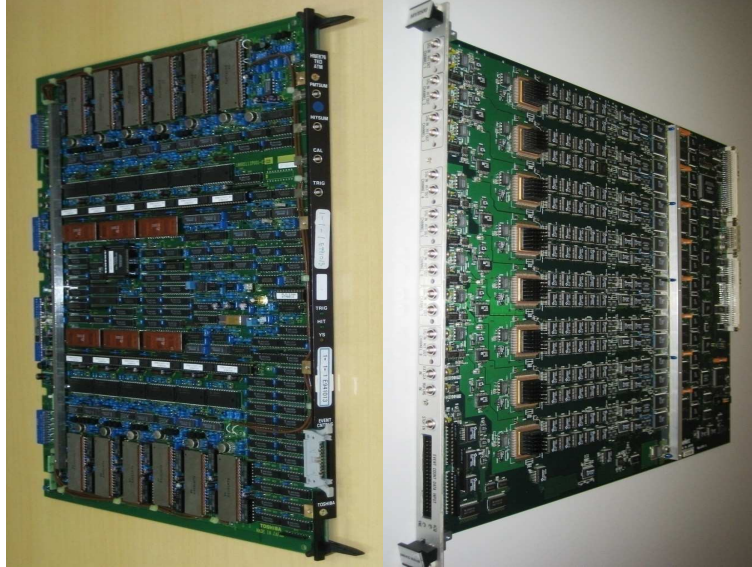


図 2.11: 左のモジュールが ATM、右が FADC である。ATM は信号の電荷とタイミング、FADC が波形情報を取得して双方の補完を行う。

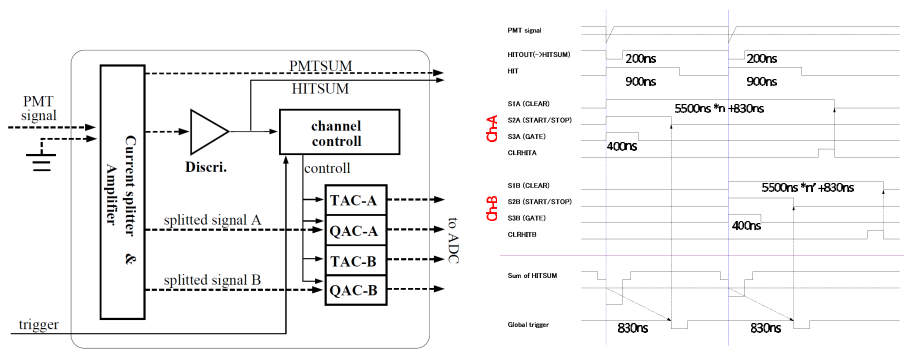


図 2.12: (左)ATM ボードの構造 (右)ATM のデータ取得フローチャート

図 2.13(左) は今回の研究で用いた FADC[CAEN-V1721] である。表 2.7 はその主な仕様である。1 枚のボードで 8ch 分の入力部があり、測定できる範囲は-0.5 ~+0.5、変換精度は 8bit である。また、FADC は、通常の VME アクセスの他にブロック転送の機能もサポートされており、最大 18Mbyte/s 程度で計算機へのデータ転送が可能となっている。さらに、FADC では、デッドタイムを短縮するために、FIFO(容量 8kbyte) を 2 つ、またデータ書き込み・読み出し用のバッファ(容量 256kbyte) を 2 つ持たせている。

FADC 内部でのデータの流れを図 2.13(右) に示す。入力された信号は、設定された閾値を超えたものについて ADC によって 500MHz のサンプリングレートで AD 変換され FIFO に書き込まれる。FIFO に 1 イベント分のデータが書き込まれると、そのデータはデータコンプレッション CPU へと送られる。FADC は FIFO を 2 つ持っているため、このデータ転送中に次のイベントが入力されたとしても、もう 1 つの FIFO で処理することができデータ転送中のデッドタイムを無くすことができる。データコンプレッション CPU ではあらかじめ設定されたプリサンプリング数分のデータについてデータの圧縮を行う。それと共に 16bit のイベントカウンタのデータが付加して 1 イベントのデータとして一時メモリに書き込まれる。LOCAL CPU は一時メモリの状態を監視し、データを RDB(Readout Data Buffer) へ転送する。RDB の容量はそれぞれ 256kbyte で、一方のデータ書き込みが終わるとその RDB はデータ読み出し用となり、同時に別の RDB はデータ書き込み用となる。したがって、計算機からデータを読み出している間のデッドタイムを無くすことができる。なお、このバッファ切り替えは LOCAL CPU によって行われるが、その条件は以下の 4 つから選択可能であり、実際の測定ではイベント数によるバッファ切り替えを用いている。

- ソフトウェアによる RDB 切り替え要求があった場合。
- 指定のイベント数に達した場合。
- データサイズが指定した値を超えた場合。
- 外部信号によるバッファ切り替え要求が発生した場合。

図 2.14 は FADC を含めた XMASS 実験の DAQ フロー図である。各 PMT12 本からの波形を ATM で合計した波形 (PMTSUM) を FADC の 1ch で読み込む。表 2.8 はデータ収集時の FADC の主な条件である。

また、FADC がイベントデータを取る条件の設定として以下の 3 つのモードがある。

- Software trigger
- Multi event with conditional trigger

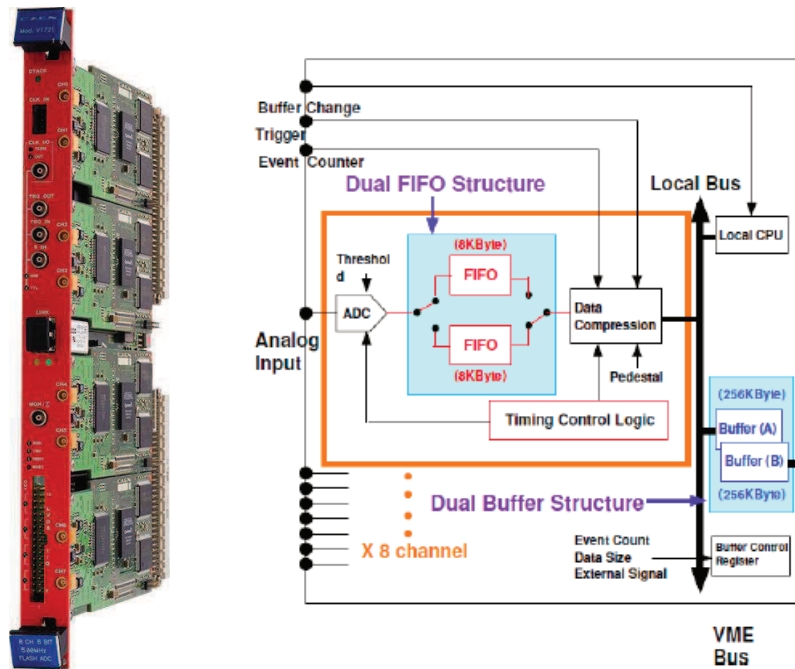


図 2.13: (左)FADC[CAEN-V1721](右)FADC の内部構造

- Multi event with unconditional trigger

1) では外部トリガー信号を用いずに、ソフトウェアによる指示でトリガーをかけイベントデータを取る。ソフトウェアによって好きなタイミングでデータを取ることができるため、このモードはオフセット調整の際に用いられている。2) ではFADCのフロントパネルから入力される外部ストップ信号によってトリガーをかけている。そしてさらにソフトウェアによって設定された閾値を超える信号があった場合のみAD変換をしてイベントデータを取る。この測定モードとデータ圧縮を用いることにより、ノイズとなるデータを取り除き、データサイズを小さくできるため、実際の測定ではこのモードが用いられている。3) は2) とほぼ同じであるが、ソフトウェアによって設定された閾値に関わらず、外部信号によりイベントデータを取るモードである。

### New FADC

2011年の11月に642本のPMT全てに対応する新しいFADC[CAEN-V1751]を導入した(図2.15(左)参照)。表2.9は新しいFADC[CAEN-V1751]の仕様である。500MHzの内部クロックもしくは外部クロックを用い、OutputとしてのADC-CLKは1GHz、TRG-CLKは125MHz、CLK-OUTは62.5MHzである(図2.15(右)参照)



# Overview of electronics

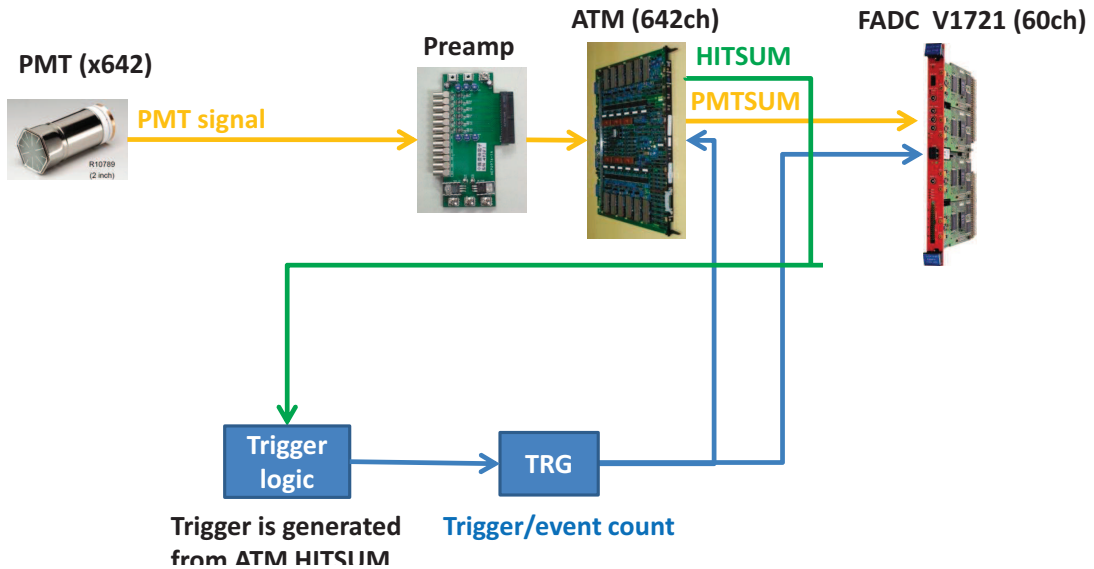


図 2.14: DAQ フロー図

表 2.7: FADC[CAEN-V1721] の仕様

サンプリングレート	500MHz
ADC 分解能	8 bit
ダイナミックレンジ	$\pm 0.5V$
チャンネル数	8 ch

この新しいFADCの導入により各chからの波形を1つずつ記録する事ができ、事象のより詳細な評価ができる(図 2.16 参照)。

## 2.2.2 XMASS 実験検出器シミュレーション

検出器内部で起きる事象を理解できているかを知るためには、実際の検出器の挙動をよく再現するシミュレーションが必要である。そこで我々はGEANT4を用いてXMASS 実験検出器を再現するシミュレーションプログラムを開発した。

GEANT4は、素粒子が物質中で起こす複雑な振る舞いや反応を正確にシミュレーションする大規模ソフトウェアである[26]。GEANT4は物理プロセスや検出器のジオメトリー、データ生成やその保存、視覚化等の多くのツールキットから構成されており、現在高エネルギー物理学や宇宙線、原子核物理学において頻繁に用

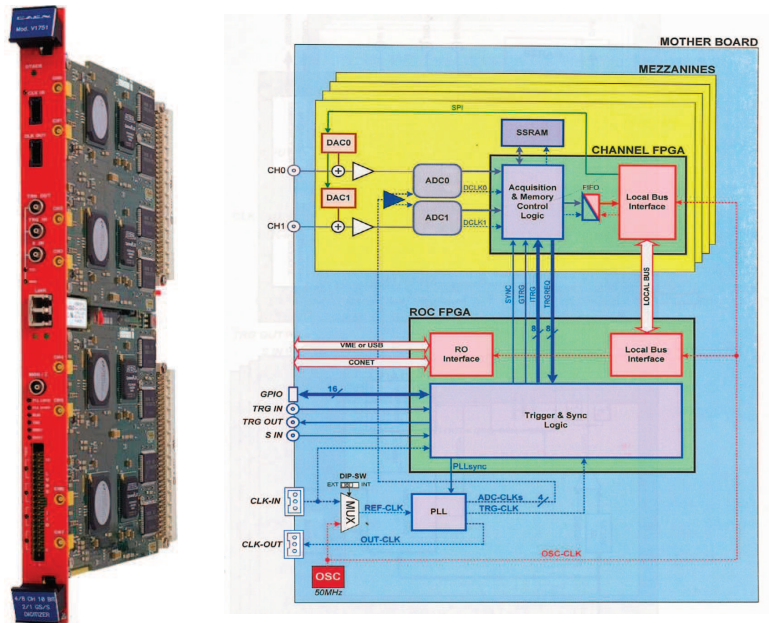


図 2.15: (左) 新しい FADC(CAENV1751) と (右) ブロックダイアグラム

## Overview of new electronics

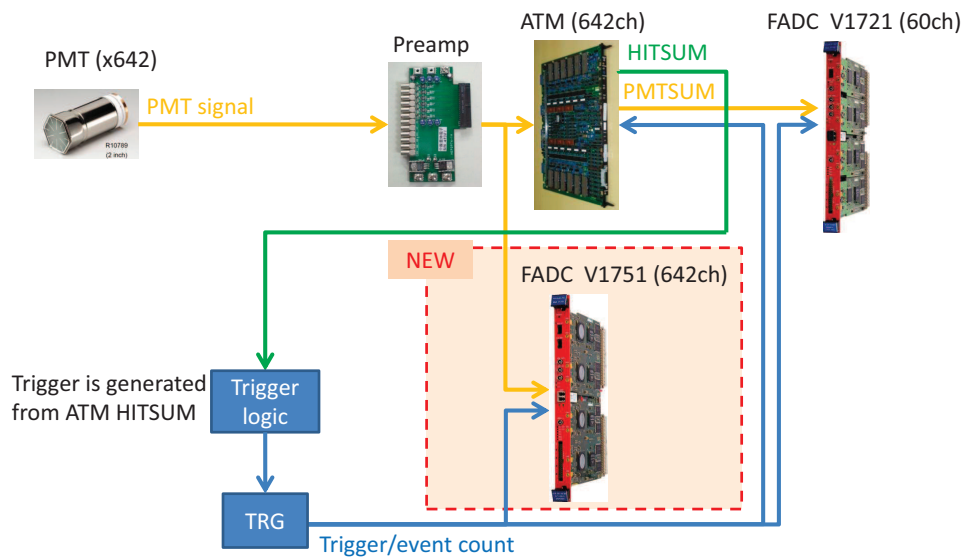


図 2.16: 新しい FADC 導入後の DAQ フロー

表 2.8: データ収集時の FADC の主な条件

FADC 台数	8 台
1 サンプル当たりの時間	2ns
データ取得幅	4 $\mu$ s
(トリガー前サンプル時間幅)	1 $\mu$ s
(トリガー後サンプル時間幅)	3 $\mu$ s

表 2.9: FADC[CAEN-V1751] の仕様

サンプリングレート	1GHz
ADC 分解能	10 bit
ダイナミックレンジ	$\pm 1V$
チャンネル数	8 ch

いられている。GEANT4 で実験を忠実にシミュレートする事により理論が予測する事象の結果をあらかじめ予想する事ができる。シミュレーション中では1つ1つのオプティカルフォトンを追跡している。

図 2.17(左) は開発したプログラム中でシミュレートされた XMASS 実験検出器である。図 2.17(右) は実際にシミュレーションプログラムを動かして検出器内部に中心から半径 35cm の位置で 10keV の  $\gamma$  線を発生させた時の様子である。

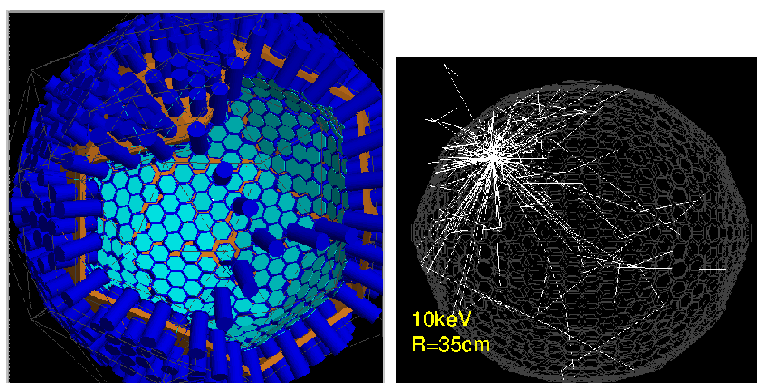


図 2.17: (左) シミュレーション時の XMASS 検出器ジオメトリ,(右)10keV の  $\gamma$  線を検出器内に発生させた時の様子。

シミュレーションでは現実をより再現するようにプログラム中に組み込むパラメーターのチューニングが必要である。XMASS 実験では詳細なチューニングに関してはまだ初期段階にある。チューニングすべきパラメータは非常に多くあ

るため、現状では銅やアルミニウムの反射率などは一般的に測定されている値などを設定し、その上で最もよく実データを再現する Xe シンチレーション光の吸収長・散乱長などのパラメータを選択している。例えば本研究では吸収長・散乱長については、

- 吸収長=600cm
- 散乱長=60cm

を用いており、散乱長などは一般的に期待される液体 Xe のそれに比べて長い値が用いられている。図 2.18 は吸収長パラメーターが 600 センチメートル、散乱長パラメーターが 60 センチメートルのときのキャリブレーション実データとシミュレーションでの各 PMT の nPE 分布の一致の様子を表している。吸収長 400 センチメートル以上、散乱長  $\pm 10$  センチメートルの変化は、再構成結果に有意な違いを与えない。

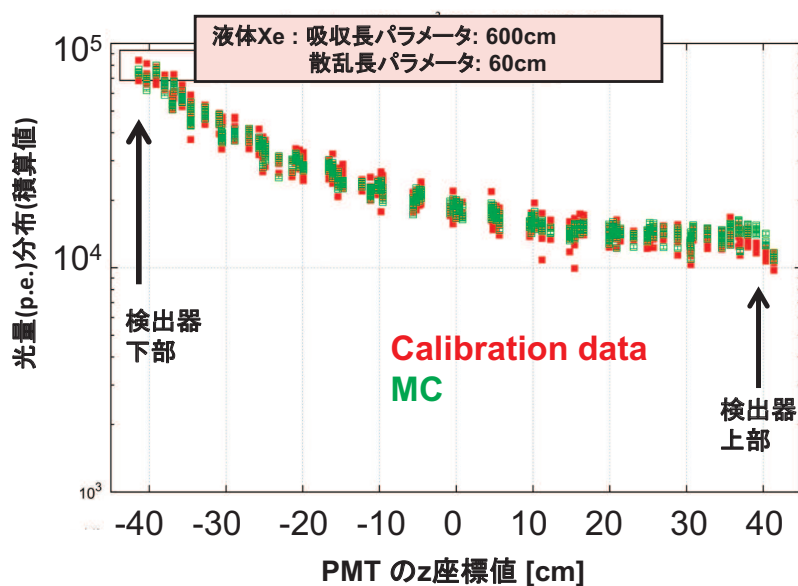


図 2.18: キャリブレーション線源を検出器中心から 20 センチメートル下に配置した場合の各 PMT の光量 (pe) 分布:横軸は PMT の z 座標 [cm]、縦軸は pe 分布の積算値である。z が大きいほど検出器上部の PMT を表す。赤の点はキャリブレーションデータ、緑の点はシミュレーションデータである。

液体 Xe 中を通過したシンチレーション光は各 PMT の光電面に入射し、その後光電面で反射、吸収、透過のいずれかに振り分けられる。光電面は数十 nm ほどであり、そこでの振る舞いは薄膜の光学理論によって導入されている [27]。Xe のシンチレーション光の波長 175nm において具体的に反射率、吸収率、透過率の計算を行うと図 2.19 のようになる。図 2.19 では、吸収率はその後光電子が放出され

て信号として記録される確率(赤)と、されない確率(マゼンダ)に分けて表示してある。

真空の屈折率1に対して液体Xeの屈折率は約1.6なので、入射角 $40^\circ$ で臨界角となり、それ以上では透過は起きない。このことにより $40^\circ$ の境として、吸収・反射ともに大きく変化している。

また、最後に光電面でシンチレーション光が吸収された場合、吸収が起きれば光電効果によって光電子が生成されるが、必ずしもこの光電子がPMTによって増幅されイベントとして記録されるわけでは無い。それを再現するために、吸収が起きた各PMTある一定の確率でイベントとして記録されるようになっている。この際の確率は量子効率(QE)と呼ばれ、各PMTの値が個別に測定され、シミュレーション中で使われている。

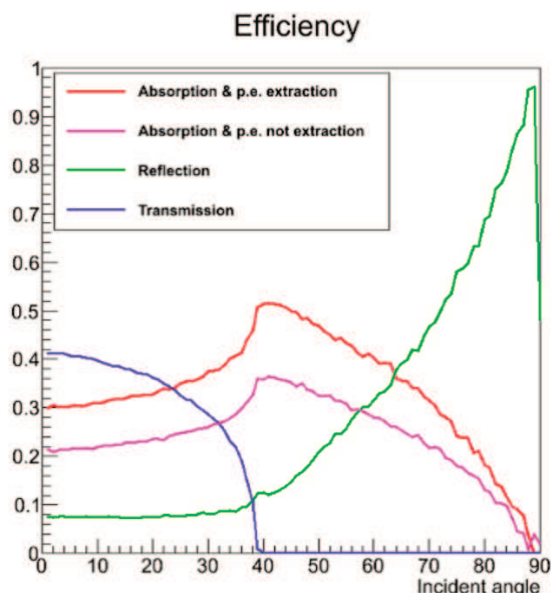


図 2.19: 光電面での反射・吸収・透過率。赤線は光電子が放出され信号として記録された場合の吸収率、マゼンダ色の線は光電子が放出されなかった場合。

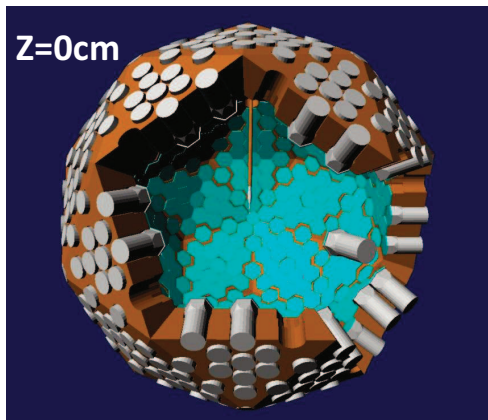
図 2.20 は次節で説明するキャリブレーションロッドも含めたキャリブレーション時検出器の状況を GEANT4 シミュレーションを用いて再現した様子である。

### 2.2.3 XMASS 実験検出器キャリブレーション

検出器内部でおこった事象のエネルギー再構成、位置再構成を正確に行うためには、既知のエネルギーの線源を用いてキャリブレーションを行う必要がある。そこで我々は検出器の内部に線源を入れるためのキャリブレーションシステムを構築した。

このキャリブレーションシステムの主な特徴は以下の通りである。

GEANT4でシミュレートされた  
キャリブレーション時検出器



GEANT4でシミュレートされた  
キャリブレーションロッド先端

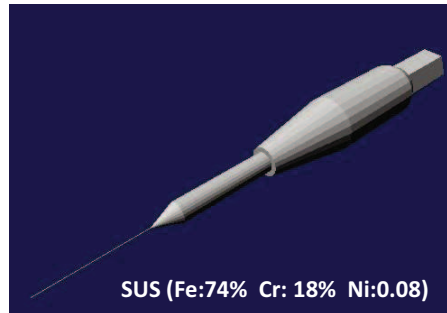


図 2.20: シミュレーションによるキャリブレーション時の再現

- 内部の Xe を保持したまま検出器内部に線源を出し入れする。
- 鉛直方向に沿って  $\pm 1\text{mm}$  の位置精度で線源を移動可能。
- キャリブレーションロッドの先端を取り換えることで  $^{57}\text{Co}$ 、 $^{241}\text{Am}$ 、 $^{109}\text{Cd}$ 、 $^{55}\text{Fe}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  などの線源の切り替えが可能 (図 2.21 参照)。
- シンチレーション光が線源自身に妨げられる (影効果) 割合を減らすため、約  $0.2\text{mm}$  直径のチューブに線源を封止。

図 2.21 は放射線源を取り付けるキャリブレーションロッドである。キャリブレーションロッドの本体部分は放射性不純物の少ない無酸素銅できており、直径は  $12\text{mm}$ 、長さは  $1560\text{mm}$  である。その先には線源取り付けホルダーがついており、線源の取り換えの際はこの部分を交換する。更にその先端に実際線源を取り付けるホルダーがついている。アダプターとホルダーはステンレス製である。また、今回の位置再構成、エネルギー再構成のためのキャリブレーションで用いた  $^{57}\text{Co}$  線源は強度  $100\text{Hz}$ 、直径  $0.21\text{mm}$ 、またその形状による影効果の割合は  $1.6\%$  である。

図 2.22 はこのキャリブレーションシステムの全体図である。キャリブレーション時は純水タンク上部にあるステッピングモーターにより、ステンレス製の直径  $0.3\text{mm}$  のステンレスワイヤーを送り出すことで、キャリブレーションロッドを駆動させる。使用されているステッピングモーターの仕様は  $1000\text{step}=0.9995\text{mm}$  である。キャリブレーションロッドが検出器上部に到達した後、磁気カップリング式直線回転導入機により最上部の PMT を一旦外し、その空間からキャリブレーションロッドを検出器中に駆動させる。

実際検出器中で鉛直方向の位置を変化させながらキャリブレーションデータを取得する時は、検出器最下部をスタート位置としてそこから上部に移動させる。こ

のときの位置駆動精度は1mm 以下である。

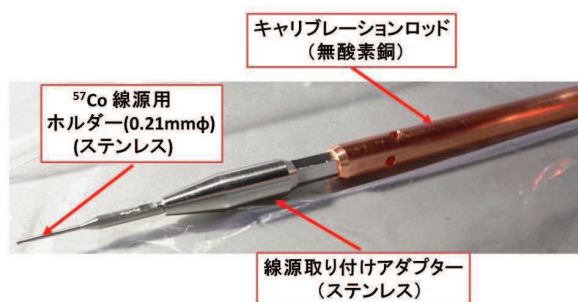


図 2.21: キャリブレーションロッド写真

図 2.23 はキャリブレーションロッドを検出器内部まで移動させたときの断面の概略図である。キャリブレーションロッドはガイドパイプ内を伝って下まで移動する。検出器中の PMT の外側まで下ろした後、一番上の PMT を遠隔操作で外しその穴から PMT 内部の領域へ下ろしていく。

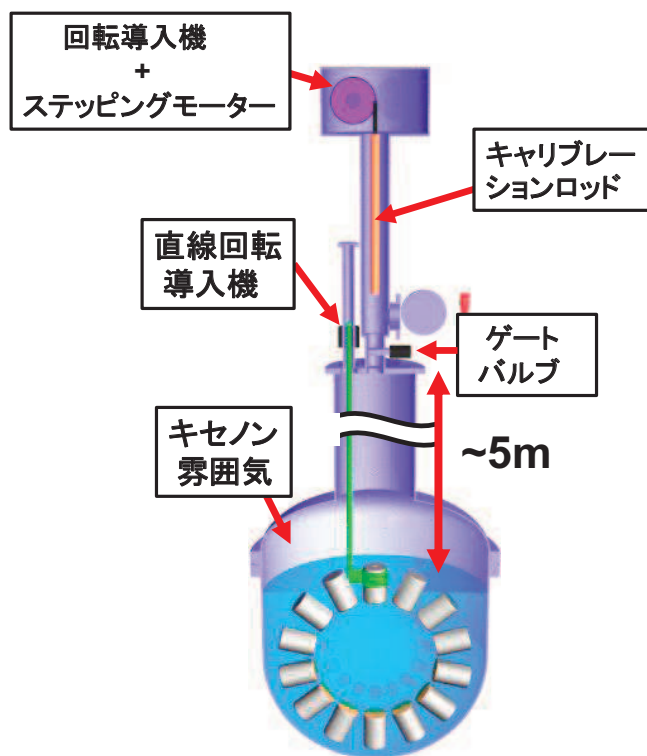


図 2.22: キャリブレーション装置全体図

図 2.24 は  $^{57}\text{Co}$  を検出器内 z 軸 (鉛直方向) に沿って 10cm ごとに移動させたキャリブレーション実データとシミュレーションによる位置再構性の結果である。図 2.24(左) がキャリブレーションデータで図 2.24(右) がシミュレーションデータを用

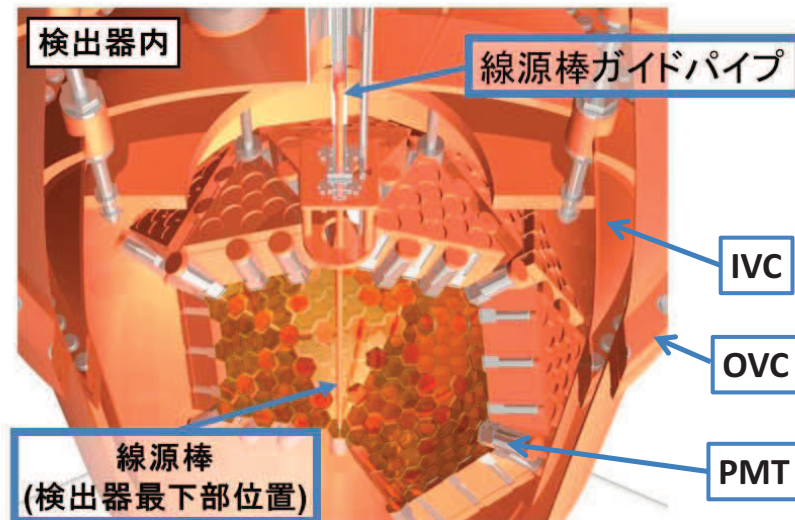


図 2.23: キャリブレーション時断面図

いた結果である。それぞれ、XMASS 検出器中の鉛直方向に  $10\text{cm}$  刻みに  $^{57}\text{Co}$  線源を配置した時のデータを用いている。位置再構性の精度は検出器中心部 ( $z=0$ ) では  $\text{RMS}=1.4$ 、 $z=\pm 20\text{cm}$  では  $\text{RMS}=20\text{cm}$  の精度であり、シミュレーションもよく再現している。

XMASS 実験ではエネルギーは PMT で受けた光量 (p.e.) の合計 (nPE) で表す。図 2.25 は  $^{57}\text{Co}$  を用いたエネルギー再構成の結果である。青線がキャリブレーションデータ、赤線がシミュレーションデータを表し、どちらも  $^{57}\text{Co}$  線源を検出器中心に配置したときのものである。図 2.25(上) が nPE 分布であり、nPE 分布から  $^{57}\text{Co}$  の各崩壊事象のエネルギーによるピークを確認し、そのピークからエネルギースケールを決定し横軸をエネルギー [keV] に変換したものが図 2.25(下) である。 $^{57}\text{Co}$  線源の主要  $\gamma$  線である  $122\text{keV}$  のものほかに  $59.3\text{keV}$ ,  $136\text{keV}$  のピークが確認できる。この結果により XMASS 検出器での発光量が ATM からの情報では  $16.0 \pm 1.0 \text{pe/keV}$  であることがわかった。またそのエネルギー分解能 (RMS) は  $^{57}\text{Co}$  線源のエネルギー帯 ( $122\text{keV}$ ) で  $\sim 4\%$  である。またシミュレーションとデータの比較により検出器中心での nPE 分布と Energy 分布はシミュレーションでよく再現されていることがわかる。



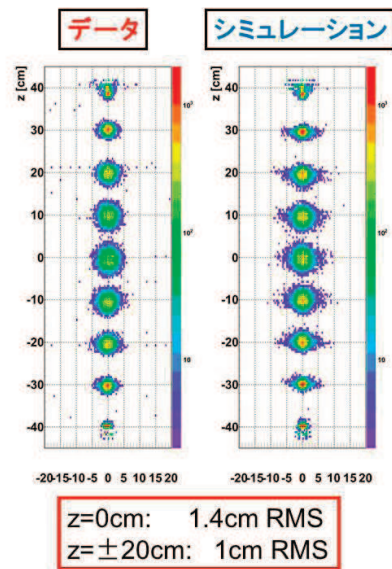


図 2.24: キャリブレーションデータの位置再構性:横軸検出器の水平方向軸、縦軸検出器鉛直方向

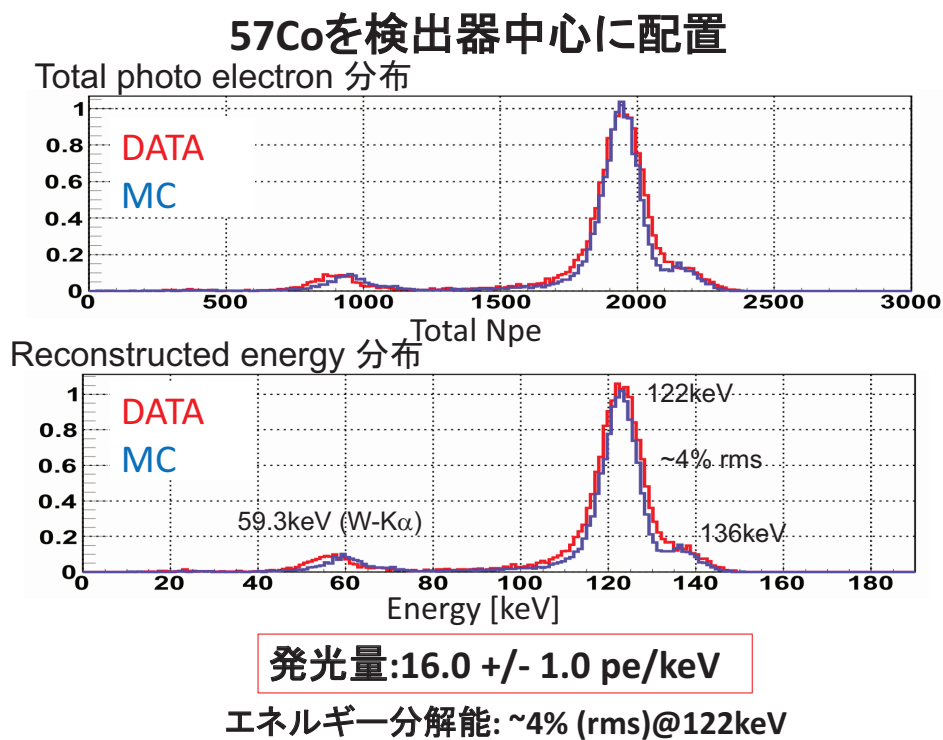


図 2.25:  $\text{Co}57$  によるエネルギーキャリブレーション

## 第3章 Krバックグラウンド

### 3.1 Krバックグラウンド

XMASS 実験は極低バックグラウンド実験である。暗黒物質探索のバックグラウンドとなるものの1つに $^{85}\text{Kr}$ による崩壊事象がある。 $^{85}\text{Kr}$ は半減期 10.8 年で 687keV の $\beta$ 崩壊を起こす(図 3.1 参照)。このエネルギー領域は暗黒物質探索のシグナル帯域と被っておりバックグラウンドになる(図 3.2 参照)。Krは市販のXe中にわずかに含まれており、暗黒物質探索にこれまでXeが用いられてこなかったのもこれが原因の1つである。我々はKrを特別に低減した市販Xeを購入した。しかし、それでも微量のKrが含まれており、このままでは暗黒物質探索実験には用いる事はできない。そこで、我々は購入したXeからKrを除去し高純度のXeを精製するための蒸留装置を開発した[2]。図 3.3はこの蒸留装置の原理と蒸留の概略を示している。

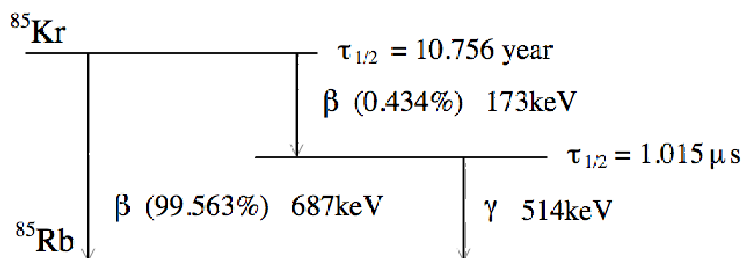


図 3.1:  $^{85}\text{Kr}$  崩壊図

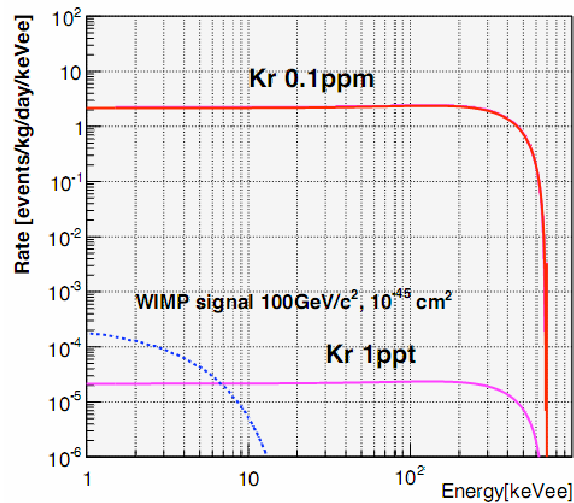


図 3.2: Kr バックグラウンド事象のエネルギー帯と暗黒物質のシグナル領域:横軸はエネルギー [keVee(電子反跳時のエネルギースケールで表したもの)], 縦軸はイベントレート [events/kg/day/keVee]。青線は質量  $100\text{GeV}/c^2$ 、反応断面積  $10^{-45}\text{cm}^2$  を仮定した時の WIMP のシグナル、赤線は Kr 濃度  $0.1\text{ppm mol Kr/mol Xe}$  を仮定した時、ピンク色の線は Kr 濃度  $1\text{ppt}$  を仮定した時。

### 3.2 Xe の蒸留

Xe と Kr では沸点が異なる。開発した蒸留装置ではこの違いを利用して Xe 中から Kr を分離した。開発した蒸留装置の仕様条件は以下の 3 である。

- 原料 Xe に含まれる Kr の濃度を 5 桁以上低減する能力。
- 原料 Xe に対する精製 Xe の回収率が 99% である。
- 原料 Xe を  $4.7\text{kg/hr}$  の流量で処理する能力 ( $1\text{ton Xe}$  を 10 日で処理できる)。

一般に高純度の製品を得るためには 1 つの段に原料を入れて蒸留を行う単蒸留ではなく、段数を増やし多段にした精留という手法が用いられる。我々の蒸留装置も精留操作を用いて Xe 中の Kr を除去する装置である。この精留を行う部分を精留塔 (図 3.3 参照) と呼ぶ。精留塔ではリボイラーと冷凍機で精留塔内の Xe を循環させる。沸点の高い Kr は上部に集まるので、下部の Xe 中の Kr は減る。この Kr が少なくなった精製 Xe を下部から取り出す。

この蒸留装置を用いて 2009 年 7 月に精留塔の仕様を確認するために神岡鉱山内で蒸留装置試験を行った。この試験では原料 Xe 中に Kr  $10\text{ppm}$  含有の Xe を 20 キログラム用いた。その時の結果は原料 Xe 中 Kr 濃度が  $12 \pm 0.8\text{ppm}$  であったのに対して精製 Xe 中 Kr 濃度は  $<0.6\text{ppb}$  であった。以上より、この蒸留装置での Xe 一

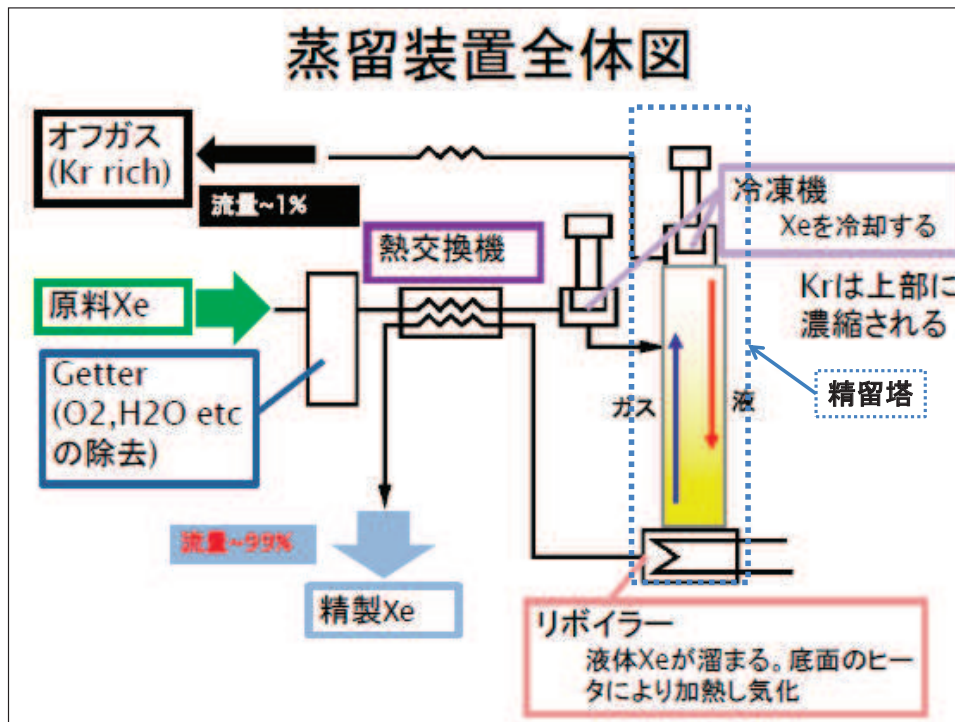
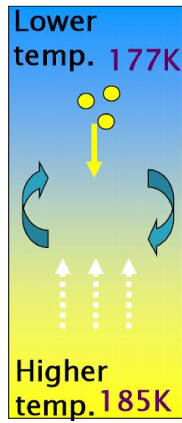


図 3.3: (左上) 蒸留装置原理 (右上) 蒸留装置精留塔 (下)Xe 蒸留概略図

回の蒸留により Xe 中 Kr を  $5 \times 10^{-5}$  低減する能力を確認した。この蒸留装置を用いて 2010 年 9 月に XMASS 実験に用いる約 1.2ton の Xe について処理を行った。

## 第4章 ガスクロマトグラフ装置によるXe中Kr濃度測定

第3章で記述した通り XMASS 実験では暗黒物質探索実験のバックグラウンドとなるKr除去のために蒸留を行った。2009年のこの蒸留装置の蒸留試験ではXe中の0.1ppmの濃度のKrを5桁以上低減させる事が確認された。今回の本実験に導入される約1.2tonのXeの蒸留にもこれと同じ蒸留装置を用いている。

まず、我々が購入した原料Xe中のKr濃度は高感度ガスクロマトグラフ装置で測定したところ表4.1の結果が得られた。5桁以上のKr濃度低減能力を仮定すると、蒸留の結果Kr濃度は3ppt以下になっている事が期待されが、このことを確認するには精製後のXeをサンプリングし、そのKr濃度を測る必要がある。

しかし、精製後のXe中のKrの濃度は上記のガスクロマトグラフ装置の検出限界以下なのでそのまま定量することはできない。そこで我々はXe蒸留中に同時に排出されるKr濃度の高いオフガス(図3.3参照)のKr濃度を測定し、その値から精製されたXe中のKr濃度を見積もった。その結果はオフガス中のKr濃度が29ppmでこれにより精製Xe中のKr濃度を見積もると、 $(23 \pm 32) \text{ppb}$ となった

$$\begin{aligned} \text{精製Xe中Kr濃度} &= [((310 \pm 11) \text{ppb}) \times 1 - ((28700 \pm 1000) \text{ppb}) \times 0.01] / 0.99 \\ &= (23 \pm 32) \text{ppb} \end{aligned}$$

### 4.1 測定結果

表 4.1: 原料Xe中Kr濃度測定結果

メーカー	量 (kg)	Kr濃度 [mol/Xe(mol)]
A社	975kg	$(310 \pm 11) \text{ppb}$
B社	201kg	$< 2.8 \text{ppb}$
C社	50kg	$(1100 \pm 26) \text{ppb}$
100kg 試作機で使用していたもの	26kg	$(13 \pm 2) \text{ppb}$

## 第5章 FADCによるKr事象の同定

第4章では検出器内のXe中Kr濃度を間接的に評価した。ここではFADCを用いて実機の試験運転中のデータから検出器中のXeに残留するKr濃度の見積もりを行う。 $^{85}\text{Kr}$ は0.43%の確率で173keVの $\beta$ 崩壊のあと半減期1.015  $\mu\text{s}$ で514keVの $\gamma$ 線を放出する。この連続した事象の波形をFADCを用いて捉える事により $^{85}\text{Kr}$ の崩壊事象を同定し、その頻度から含有量を推定する。

まず、試算としてXMASS実験のKr濃度目標の1pptのKrを含む場合の事象頻度を見積もった。

XMASS検出器有効体積部829.2kg中のXe原子(質量数131.293)の数が、

$$N_{\text{Xe}}=(829.2\text{kg}/131.293\text{g}) \times 6.02 \times 10^{23}=3.8 \times 10^{27}(\text{個})$$

である。 $^{85}\text{Kr}/\text{Kr}$ の割合は測定により $0.6 \times 10^{-11}$ とわかっている。Xe中Kr濃度を1ppt(= $10^{-12}$ )と仮定した場合の検出器有効体積部分内の $^{85}\text{Kr}$ 数は

$$N_{\text{Kr}}=3.8 \times 10^{27} \times 10^{-12}=3.8 \times 10^{15}(\text{個}/\text{ppt Kr})$$

$$N^{85}\text{Kr}=3.8 \times 10^{15} \times 0.6 \times 10^{-11}=2.3 \times 10^4(\text{個}/\text{ppt Kr})$$

となる。また、 $^{85}\text{Kr}$ は寿命が10.756年、0.434%で問題としている崩壊を起こすので、そこから期待されるイベントレートを計算すると、

$$10.756 \text{年}=3929 \text{日}(=10.756 \times 365.25)$$

$$\text{Ratio}(\text{decay}/\text{day})=1-\exp(-1/3929)=0.000254(\text{decay}/\text{day})$$

$$2.3 \times 10^4 \times 0.000254 \times 0.00434=0.025(\text{event}/\text{day}/\text{ppt Kr})$$

となり、40日間の観測で、1事象程度発生すると予想される。

本論文では実際にXMASS実験検出器に取り付けられたFADCで2011年の2月から3月、2011年の8月から9月に取得したlive time 61日分のデータを、波形解析することによって検出器内部のXe中のKr濃度を推定した。

## 5.1 $^{57}\text{Co}$ エネルギーキャリブレーション

FADC を用いて実データからの Kr 事象の同定を行うまえに、既知のエネルギーの崩壊を起こす放射線源を用いて FADC でのエネルギーキャリブレーションを行う必要がある。そこで本研究では同程度のエネルギー帯の崩壊を起こす  $^{57}\text{Co}$  を線源として選んだ。 $^{57}\text{Co}$  が崩壊する時は 85.6% の確率で 122keV の  $\gamma$  線をだす (図 5.1 参照)。この 122keV の  $\gamma$  線を用いて FADC で取得したデータのエネルギーキャリブレーションを行った結果、17p.e./keV が得られた。図 5.2 はその時の nPE 分布である。図 2.25(上) と比べて、Resolution が悪い理由としては、考察でも述べるが、合計している 12ch の各 ch ごとに QE 補正を行っていないためであると考えられる。

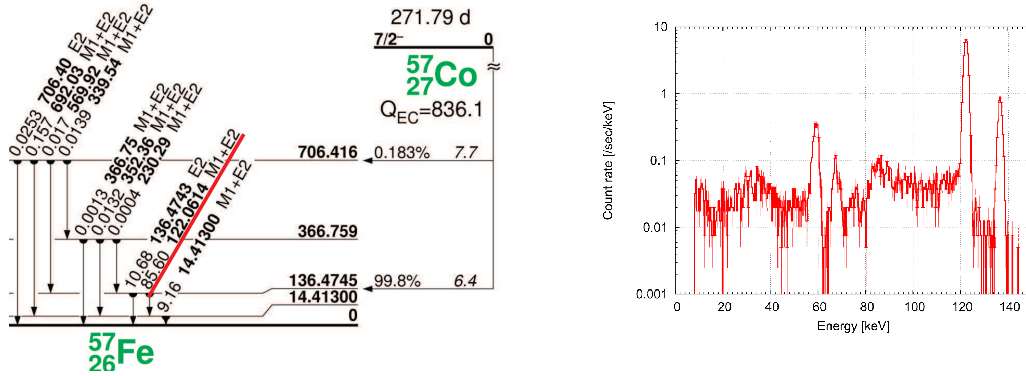


図 5.1: (左) $^{57}\text{Co}$  崩壊図と (右)Ge 検出器で測定した崩壊のエネルギースペクトラム

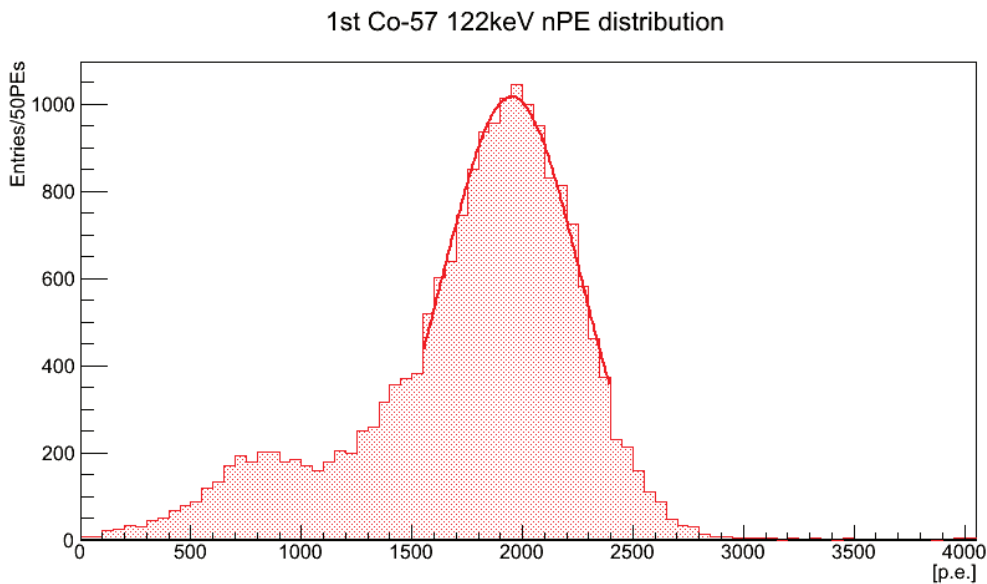


図 5.2: FADC で取得した  $^{57}\text{Co}$  の  $\gamma$  線事象の nPE 分布:横軸 nPE、縦軸 Entry 数



## 5.2 FADCでの波形情報

前述したとおり XMASS 実験の DAQ システムでは 642 本の PMT が 60 台の ATM に配分されており、FADC ではこの 60 台の ATM からの PMTSUM を足し合わせた信号を読み込む。この波形の面積から各事象ごとの電荷やエネルギー、光電子数 (nPE) の情報を得る。実際に FADC で取得される電子反跳候補の典型的な波形が図 5.3 である。

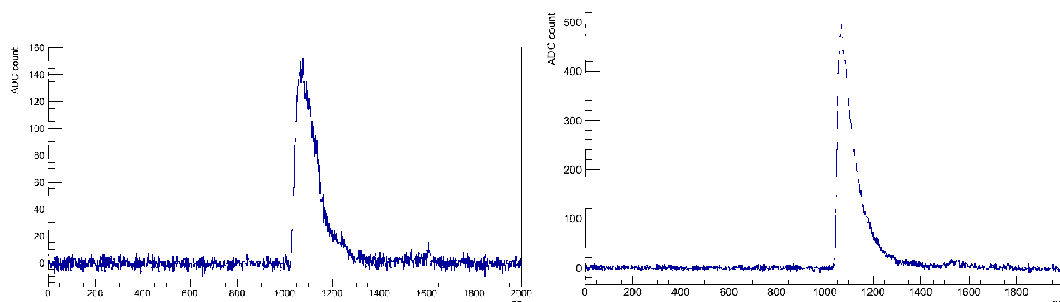


図 5.3: (左)173keV 相当の事象と (右)514keV 相当の事象:横軸は時間, 縦軸は ADC counts

2.1.1 で述べたように液体 Xe シンチレーションでは原子核反跳と電子反跳ではシンチレーション光の時定数が異なるため電子反跳事象 ( $\beta$ 、 $\gamma$ ) と、原子核反跳事象 ( $\alpha$ 、Dark Matter) の選別が可能である。本研究ではこの選別により電子反跳事象を選んだ。

## 5.3 ピークサーチアルゴリズム

XMASS 検出器内で起こった各事象は、図 5.3 のような FADC のプロット中でピークを持つ波形として検出される。そこで、解析をするためには取得した全てのデータの中からファイルごとにこのピークを認識しそのピークをもつ波形の情報を抽出する必要がある。用いたピークサーチのアルゴリズムは以下の手順に沿っている (図 5.4、図 5.5 参照)。

- 1.FADC データの初めの 200 サンプルの平均を計算しそれを Baseline とする。
- 2.ADC count が 20 を超えたらそこをピーク波形の起点とする。その点を時間の原点として [-50ns,300ns] の区間を積分する。トリガタイミング以外は高いエネルギー事象のテールまで取得するため [-50ns,350ns] を積分する。その後積分した電荷量を nPE に換算して記録する。
3. ピーク波形の終点を判断する。

- Pulse height < 800 ADC count の場合:その後 10 ADC count まで下がったらそこをピーク波形の終点とする。
- Pulse height > 800 ADC count の場合:その後 Pulse height の 10% まで下がったらそこをピーク波形の終点とする。

4. 次のピークサーチに移り (順序 2 へ戻る)、FADC の最後のサンプルデータまでピークサーチを繰り返す。

1 つの FADC 事象内で、トリガタイミングのピークを「1st peak」、それ以外で最も Pulse height が高いピークを「2nd peak」と定義する。

ピークサーチのアルゴリズムの手順 2 で示したように、トリガタイミングは < 173 keV の測定ができれば良いので図 5.3(左)よりピークのしきい値以後の積分範囲を 300 ns と決めた。それ以外は ~ 500 keV までの測定が必要なので積分範囲を広げた。(図 5.3(右)参照)

このピークサーチ時に以下の情報を抽出して記録した。

- ピーク波形の起点の時間
- ピーク波形の最大 ADC count 時の時間
- ピーク波形の起点を原点とした時の [-50 ns, 300 ns 又は 350 ns] 間の面積 [ADC count] とそこから見積もられる nPE
- ピーク波形の起点と終点の間の時間幅
- ピーク波形スロープの時定数

また、図 5.3 より、1st peak と 2nd peak の時間差 (dT) を 300 ns 以上に限定した時に 1st peak と 2nd peak の重なりはない。本解析では  $dT > 300$  ns の領域を調べる事にする。

図 5.6 は  $^{85}\text{Kr}$  の崩壊曲線を表している。FADC の時間幅を考慮すると、本解析で使用する範囲は  $300 \text{ ns} < dT < 3000 \text{ ns}$  である (図 5.6 中青色の線の範囲)。

次に、時間幅を変化させて *Significance* の変化を調べた。表 5.1 にその結果を示す。

$$\text{significance} = \frac{\text{Efficiency}^2}{\text{Range}} \quad (5.1)$$

その結果、最も Significance の高い時間範囲は  $300 < dT < 2000$  ns であることがわかった (図 5.6 中ピンク色の線の範囲)。

以下ではこれらの情報をもとに  $^{85}\text{Kr}$  の崩壊事象の探索を行った。

### Pulse height < 800 [ADC count]

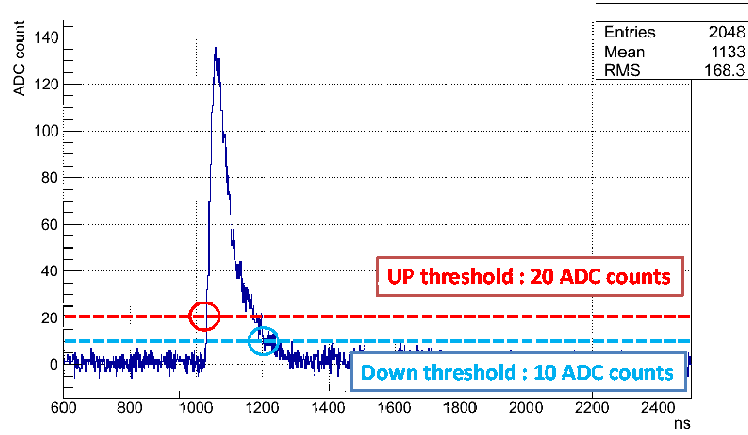


図 5.4: pulse height が 800 を超えない事象のピークサーチ

### Pulse height > 800 [ADC count]

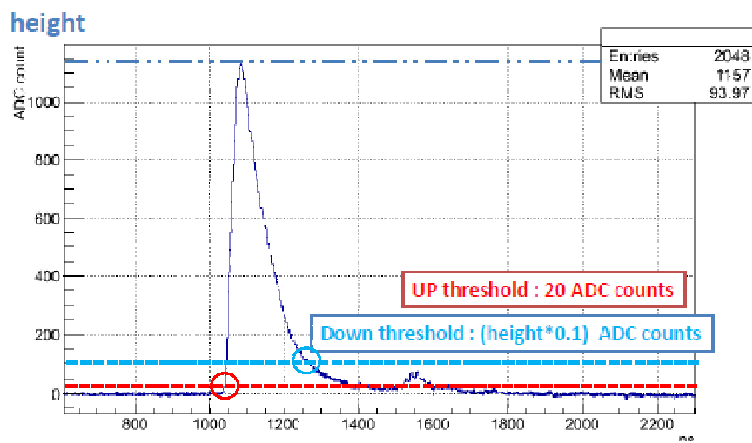


図 5.5: pulse height が 800 を超える事象のピークサーチ

表 5.1: 異なる dT カット範囲での Significance の例

Cut 範囲	Range	Efficiency	Significance
$300 < dT < 1500 \text{ ns}$	1200	0.46	0.0176
$300 < dT < 2000 \text{ ns}$	1700	0.56	0.0184
$300 < dT < 2500 \text{ ns}$	2200	0.63	0.0180
$300 < dT < 3000 \text{ ns}$	2700	0.69	0.0170

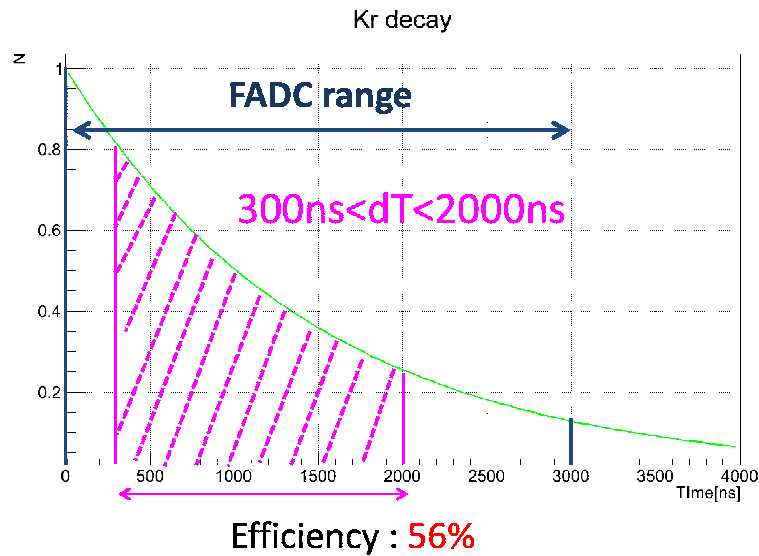


図 5.6:  $^{85}\text{Kr}$  崩壊曲線

## 5.4 Event Reduction クライテリア

期待される  $^{85}\text{Kr}$  事象の特徴を考慮して、事象の選別を行う。実際に FADC により同定した  $^{85}\text{Kr}$  崩壊事象の頻度により Kr 濃度を見積もるためには、そのバックグラウンドとなる事象の頻度も評価する必要がある。

この FADC を用いた解析のバックグラウンドとなるものとして  $^{85}\text{Kr}$  の崩壊事象のうち初めに起きる  $\beta$  崩壊のエネルギー帯と同じエネルギー帯のシングルピーク事象と、その後に起きる  $\gamma$  崩壊のエネルギー帯と同じエネルギー帯のシングルピーク事象が FADC の時間幅内で連続して起きた場合 (以下、アクシデンタル事象) が考えられる。つまり、このアクシデンタル事象数を減らす事ができれば、この解析の目的となるシグナルのバックグラウンドを減らす事ができ、検出感度をあげることにつながる。

アクシデンタルレートを減らすためのアプローチとして、 $^{85}\text{Kr}$  崩壊事象同定の

際に用いる事象選別のためのカットを、実際の<sup>85</sup>Kr崩壊事象における1st事象と2nd事象にできるだけフィットするように決める。本研究では系統誤差が少ない解析(後述、First Cut)とバックグラウンドを減らすことを目指した解析(後述、Final Cut)の2つを行った。

#### 5.4.1 First Cut

まず<sup>57</sup>Coのエネルギーキャリブレーションから、<sup>85</sup>Kr崩壊事象でのβ崩壊のエネルギー帯(～173keV)とγ線のエネルギー帯(～514keV)からエネルギーに関するゆるい制限をかける。1st peakに関しては $Q_{max}=173\text{keV}$ の1.5倍に相当する、4400p.e.の上限を設定する。今ピークサーチの閾値が20ADC countで、これは約20p.e.のパルスに相当する。2nd peakに関しては、514keVの0.5～1.5倍に相当する、4400～13200p.e.を設定した。また、 $300\text{ns}<dT<3000\text{ns}$ とした。これらをFirst Cutとし以下のクライテリアにする。また以下では1st event目のnPEを<sup>1st</sup>nPE、2nd event目のnPEを<sup>2nd</sup>nPEと定義する。

- First Cut [<sup>1st</sup>nPE<4400p.e. & 4400p.e.<<sup>2nd</sup>nPE<13200p.e. & 300ns<dT<3000ns]

<sup>85</sup>Krの崩壊の際に起きるβ崩壊事象とγ線事象のnPE分布をより詳しく知るために2.2.2節のシミュレーションを用いて調べた。図5.7はXMASS検出器シミュレーションにより、<sup>85</sup>Krの $Q_{\beta}=173\text{keV}$ のβ崩壊と514keVのγ線を発生させた時の検出器で測定されるnPE分布である。

γ線は低いnPE領域にも低い分布が見られる。これは検出器の端で発生したγが検出器中に一部のエネルギーだけ落として検出器外に抜けて行ったか、もしくはPMTとPMTホルダーとのすき間等で発生してPMTに光が十分に届かなかったためだと考えられる(図5.8参照)。<sup>2nd</sup>nPEカットの上限値についてはFirst Cutの範囲に十分おさまることがわかる。

また、First CutでのEfficiencyは表5.2のようになる。First Cutでは計65%の

表 5.2: First Cut での各 Efficiency

<sup>1st</sup> peak nPE Cut<4400	99%
4400< <sup>2nd</sup> peak nPE Cut<13200	94%
300ns<dT<3000ns	69%
Total Efficiency	65%

Efficiency が得られる。

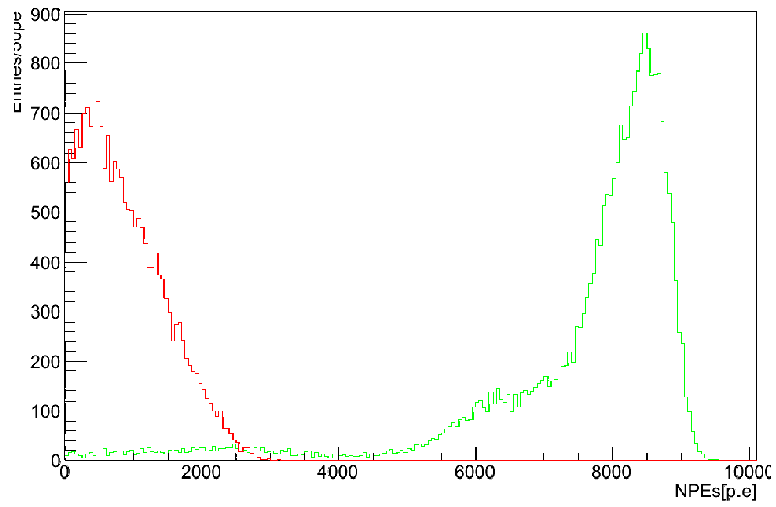


図 5.7: GEANT シミュレーションによる nPE 分布 [(赤) $^{85}\text{Kr}$  の  $\beta$  崩壊事象と (緑)514keV の  $\gamma$  線事象]

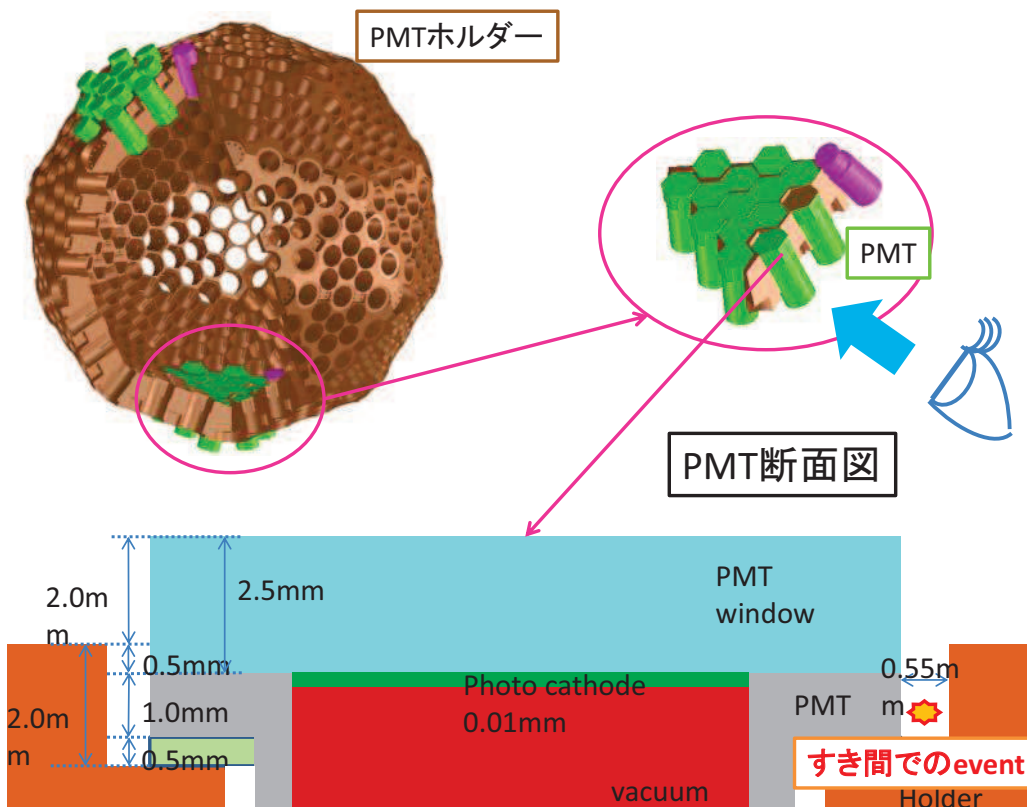


図 5.8: PMT とホルダーの隙間での event の概略図

### 5.4.2 Eye Scan

First Cut 後に残った FADC の波形をチェックし、明らかに問題としている事象と異なるものを除いた。図 5.8 は Eye Scan で除かれた事象の例である。

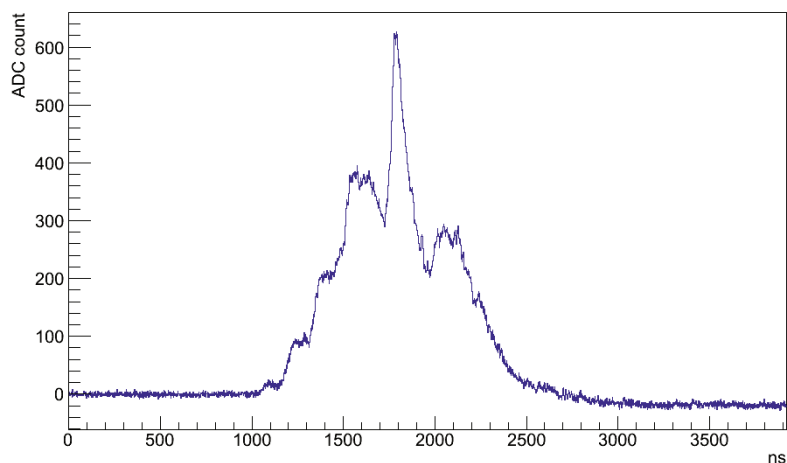


図 5.9: Eye scan により除かれた事象の例

### 5.4.3 Final Cut

First Cut を適用した時よりもアクシデンタルレートを下げて、検出感度を上げるためには nPE のカットをより  $^{85}\text{Kr}$  崩壊事象に適したものにする必要がある。そこで分布からカット範囲を 1st peak に関しては  $200 \sim 2200$  p.e. を設定し、2nd peak に関しては  $7500 \sim 9300$  p.e. を設定した。

時間差は図 5.6、表 5.1 から最も Significance の良い  $300\text{ns} < dT < 2000\text{ns}$  を選んだ。

- Final Cut [ $200\text{p.e.} < {}^{1st}\text{nPE} < 2200\text{p.e.}$  &  $7500\text{p.e.} < {}^{2nd}\text{nPE} < 9300$  &  $300\text{ns} < dT < 2000\text{ns}$ ]

Final Cut での Efficiency は表 5.3 のようになる。Final Cut では計 27% の Efficiency が得られる。

表 5.3: Final Cut での各 Efficiency

$200 < {}^{1st}\text{peak nPE Cut} < 2200$	76%
$7500 < {}^{2nd}\text{peak nPE Cut} < 9300$	64%
$300\text{ns} < dT < 2000\text{ns}$	56%
Total Efficiency	27%

図 5.10(左) は First Cut の範囲、図 5.10(右) は Final Cut の範囲を表している。

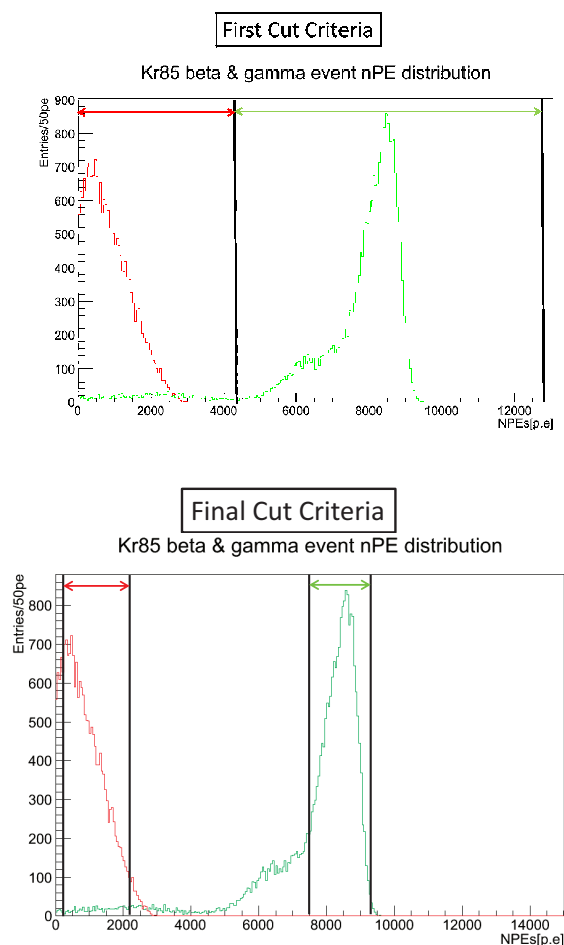


図 5.10: (上)nPE での First Cut 区間,(下)nPE での Final Cut 区間

## 5.5 Accidental rate

前述したように Accidental rate とは今回の測定対象となる  $^{85}\text{Kr}$  の崩壊事象のように 2 つのイベントのコインシデンスをとる場合に、偶然起きた相互に関係のない信号が同時に計測され、間違った信号として出力され、計測されるときに頻度のことである。 $^{85}\text{Kr}$  の崩壊事象の頻度を測定する前にこのアクシデンタルレートを見積もる必要が有る。

通常のデータで First Cut、Final Cut それぞれのカットについて、nPE のクライテリアに入る事象のレート (Hz) を求め、それに各カットの dT 時間幅 (ns) をかける。最後に 1 日当たりの頻度 (event/day) に変換した。

- First Cut : accidental rate :  $0.61\text{Hz} \times 0.86\text{Hz} \times 2700\text{ns} \times 86400\text{sec/day} = 0.12\text{event/day}$



- Final Cut : accidental rate :  $0.20\text{Hz} \times 0.16\text{Hz} \times 1700\text{ns} \times 86400\text{sec/day} = 0.010\text{event/day}$

ここで1番目の Rate[Hz] は 1st peak の nPE の、2番目は 2nd peak の nPE のクライテリアに入る事象の Rate である。

各アクシデンタルレートと第5章の冒頭での 1ppt の場合には  $^{85}\text{Kr}$  崩壊事象が  $0.025[\text{event/day/ppt Kr}]$  になるという試算からそれぞれのカットを適用した場合のこの  $^{85}\text{Kr}$  同定解析の検出感度 (アクシデンタルが全て  $^{85}\text{Kr}$  事象と仮定した時の Kr 濃度) を計算すると、

- First Cut : 検出感度 :  $\sim 7.4\text{ppt Kr}$
- Final Cut : 検出感度 :  $\sim 1.5\text{ppt Kr}$

と見積もられた。

## 5.6 結果

本研究では XMASS 検出器の試験観測期間 2011/02~03 と 2011/08~09 のうち総計の live time 61 日に対して前述した 2 つの Cut を適用し、 $^{85}\text{Kr}$  崩壊事象の探索を行った。表 5.4 は用いたデータセットと本研究での解析結果である。また、表 5.5 に First Cut で残った  $^{85}\text{Kr}$  崩壊事象候補と、その事象情報を示す。

表 5.4: データセットと解析結果

期間	2011/02~2011/03	2011/08~2011/09	総計	Accidental
live time	13 日	48 日	61 日	61 日
First Cut	5event	26event	31event	-
Eye scan	5event	21event	26event	7.32event
Final Cut	0event	1event	1event	0.61event

図 5.10 は Final Cut で残った event である。1st peak はカットクライテリア  $200\text{p.e.} < 1^{\text{st}}\text{nPE} < 2200\text{p.e.}$  に対して  $778\text{p.e.}$ , 2nd peak は  $7500\text{p.e.} < 2^{\text{nd}}\text{nPE} < 9300\text{p.e.}$  に対して  $9415\text{p.e.}$ , dT は  $300\text{ns} < \text{dT} < 2000\text{ns}$  に対して  $944\text{ns}$  である。

結果を見てわかる通り、Final Cut+Eye Scan と First Cut で残った event の差が大きい。今回は残った event が全て  $^{85}\text{Kr}$  崩壊事象かどうかは今後より詳細に調べる必要がある。今回は残った event がすべて  $^{85}\text{Kr}$  崩壊事象だと仮定して Kr 濃度の上限値を見積もる。

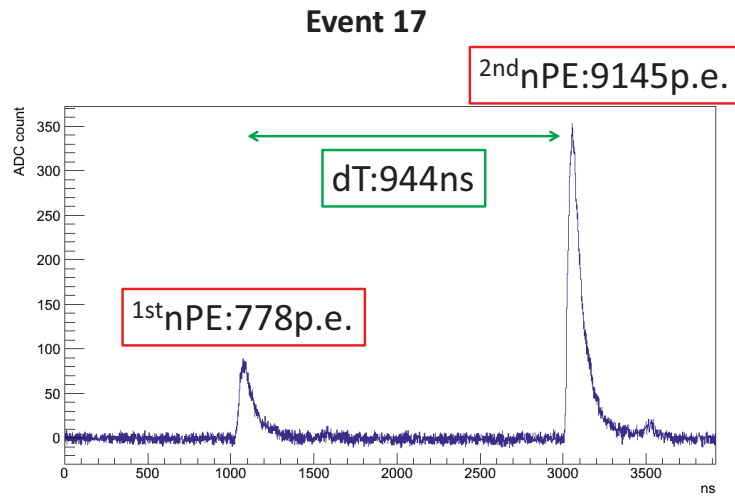


図 5.11: Final Cut 後に残った事象の FADC による波形プロット (Event 17)

### 5.6.1 Kr 濃度上限値

今回の解析で First Cut を適用した結果前述の通り、アクシデンタルレートは  $0.12 \text{ event/day}$  であった。また解析にもちいたデータの日数は 61 日である。このことからバックグラウンドの数は、

- $N_{BG} = 0.12 \text{ event/day} \times 61 \text{ days} = 7.32 \text{ event}$

一方 FADC の情報から得られた  $^{85}\text{Kr}$  崩壊事象

- $N_{\text{Kr}_{obs}} = 26 \text{ event}$

である。

これら 2 つの値から、Feldman&Cousins[29] の方式を用いて 90% 信頼区間で event 数の上限値を見積もると、

- $N_{\text{Kr}_{true}} < 28 \text{ event}$

となる。よってこの値から XMASS 検出器内 Xe 中 Kr 濃度の上限値を Efficiency を考慮して求めると、

$$\text{Kr}/\text{Xe} < 28 \text{ ppt Kr} [90\% \text{ C.L.}]$$

となる。

同様に Final Cut を適用した結果は前述の通り、アクシデンタルレートが  $0.010 \text{ event/day}$  であった。また解析にもちいたデータの日数は 61 日である。このことからバックグラウンドの数は、

- $N_{BG}=0.010\text{event/day} \times 61\text{days}=0.61\text{event}$

一方 FADC の情報から得られた  $^{85}\text{Kr}$  崩壊事象

- $NK_{r_{obs}}=1\text{event}$

である。

これら 2 つの値から、Feldman&Cousins の方式を用いて 90%信頼区間で event 数の上限値を見積もると、

- $NK_{r_{true}} < 3.8\text{event}$

となる。よってこの値から XMASS 検出器内 Xe 中 Kr 濃度の上限値を Efficiency を考慮して求めると、

$$Kr/Xe < 9.3\text{pptKr}[90\%C.L]$$

となる。

## 5.7 考察

First Cut においてアクシデンタルレートは  $0.12\text{event/day}$  であり live time は 61 日なので、期待される頻度は  $0.12 \times \text{event/day} \times 61\text{day}=7.3\text{event}$  だと考えられる。一方 Eye scan による  $^{85}\text{Kr}$  崩壊事象探索により残った事象数は  $26\text{event}$  である。期待される事象数と  $^{85}\text{Kr}$  崩壊事象探索により残った数に約  $20\text{event}$  数分の差がみられる。この原因は現在調査中であるが、 $^{85}\text{Kr}$  以外の X 検出器中の他の放射性物質による事象が含まれている可能性がある。また、そもそも  $^{85}\text{Kr}$  崩壊事象探索の際に用いた、2 つのカット (First Cut, Final Cut) 間での  $^{85}\text{Kr}$  崩壊事象候補の数に大きな開きがある。もし Final Cut が上手く  $^{85}\text{Kr}$  崩壊事象に FIt したカットクライテリアを設定できているとすると、この差はもっと小さくなると期待される。よって今回 First Cut 後に残った  $26\text{event}$  全てが  $^{85}\text{Kr}$  崩壊事象によるものかどうかは今後詳しく study する必要がある。

$^{85}\text{Kr}$  崩壊事象以外の候補の 1 つに  $^{238}\text{U}$  系列の放射性物質がある。 $^{238}\text{U}$  系列の  $^{214}\text{Bi}$  は 99.98% の割合で  $\beta$  崩壊し  $^{214}\text{Po}$  となる。そのときの  $Q_{\beta}$  は  $3.27\text{MeV}$  である。 $^{214}\text{Po}$  は  $\alpha$  崩壊し、 $7.687\text{MeV}$  のエネルギーの  $\alpha$  線を出し  $^{210}\text{Pb}$  になる。この時の  $^{214}\text{Po}$  の半減期は  $164.3 \mu\text{s}$  である (図 5.12、図 5.13 参照) この連続して起きる 2 つの事象が  $^{85}\text{Kr}$  崩壊事象と間違っ判断される可能性を検討する。XMASS 実験ではこの  $^{214}\text{Bi}$  の親核種である  $^{222}\text{Rn}$  の量を Xe 中で  $<1.0\text{mBq}$  にまで低減する事を目標としている。実際この  $^{222}\text{Rn}$  の量を  $^{214}\text{Bi}$  の  $\beta$  崩壊と  $^{214}\text{Po}$  の  $\alpha$  崩壊の連続事象を用いて同定した候補数の結果から頻度を見積もるとこの事象は  $(8.2 \pm 0.5)\text{mBq}$  であった。この Rate から見積もると  $^{214}\text{Bi}$  により連続して起きる崩壊事象の一日当たり

の頻度は約 708event/day となり、live time 61 日では  $708\text{event/day} \times 61\text{day} = 4.3 \times 10^4\text{event}$  とであると考えられる。本研究では First Cut において 1st peak と 2nd peak の時間間隔  $dT$  のカットクライテリアを  $300\text{ns} < dT < 3000\text{ns}$  と設定している。 $^{214}\text{Po}$  の  $^{210}\text{Pb}$  への崩壊曲線から  $300\text{ns} < dT < 3000\text{ns}$  カットによる Efficiency は 1.13% と見積もられた (図 5.14 参照)

また、 $^{214}\text{Bi}$  の崩壊事象の First Cut での 1st peak と 2nd peak の nPE カットクライテリアでの Efficiency を見積もるためには  $^{85}\text{Kr}$  の崩壊事象と同じように XMASS 検出器を再現した GEANT シミュレーションにより  $^{214}\text{Bi}$  の  $\beta$  崩壊、 $^{214}\text{Po}$  の  $\alpha$  崩壊の事象をシミュレートする必要があるが、現段階のシミュレーションプログラムでは発生する粒子のエネルギーが高すぎて計算時間が非常にかかり、メモリも大量に消費するので高い統計精度では生成できない。

そこでこの Efficiency を仮定により見積もった。 $^{214}\text{Bi}$  の  $^{214}\text{Po}$  への崩壊では  $\beta$  崩壊の他に  $\gamma$  崩壊も含まれる。その効果により、そのエネルギー分布は通常の  $\beta$  崩壊のエネルギー分布と異なる。そこでその分布を図 5.15 のように、仮定すると First Cut クライテリアの 1st peak の範囲に相当する部分は約 7% となる。

次に、続いて起きる  $^{214}\text{Po}$  から  $^{210}\text{Pb}$  への 7.687MeV の  $\alpha$  崩壊の event を  $^{85}\text{Kr}$  の 2nd event の 514keV の  $\gamma$  線と同様形の nPE 分布だと仮定すると、図 5.7 のように低い tail が低エネルギー側に続く。表 6.2 より、 $n\text{PE} < 4400\text{p.e.}$  ( $\sim 259\text{keV}$ ) の tail 部分の割合は 6% である。このエネルギースケールを 7.687MeV に変換すると、First Cut クライテリアの 2nd event の範囲に相当する部分は約 0.76% となる (図 5.16 参照)。最後に前述した時定数による原子核反跳事象と電子反跳事象の選別の Efficiency を 90% だと仮定する。

$dT$ 、nPE、時定数による電子核反跳、原子核反跳選別の Efficiency をトータルした Efficiency は  $0.07 \times 0.0076 \times 0.1 \times 0.0113 = 6.0 \times 10^{-7}$  となる。よって  $^{214}\text{Bi}$  により連続して起きる崩壊事象の live time 61 日当たりの頻度は Efficiency を考慮して、 $6.0 \times 10^{-7} \times 4.3 \times 10^4 = 0.026\text{event}$  となる。

また、もう 1 つの候補として  $^{232}\text{Th}$  系列の放射性物質がある。 $^{232}\text{Th}$  系列の  $^{212}\text{Bi}$  は 64% の割合で  $\beta$  崩壊し  $^{212}\text{Po}$  となる。そのときの  $Q_\beta$  は 2.25MeV である。 $^{212}\text{Po}$  は 8.785MeV のエネルギーの  $\alpha$  線を出し  $^{208}\text{Pb}$  になる。 $^{212}\text{Po}$  の半減期は 299ns である (図 5.17、図 5.18 参照)。この連続して起きる 2 つの事象が  $^{85}\text{Kr}$  崩壊事象探索で  $^{85}\text{Kr}$  事象と間違えて判断されてしまった可能性を検討する。XMASS 実験ではこの  $^{212}\text{Bi}$  の親核種である  $^{220}\text{Rn}$  を Xe 中で  $< 0.43\text{mBq}$  にまで低減する事を目標にしている。実際この  $^{220}\text{Rn}$  の量を  $^{220}\text{Rn}$  が 6.3MeV の  $\alpha$  崩壊の後に半減期 0.145s で起きる 6.8MeV の  $\alpha$  崩壊の連続事象を用いて ADC により同定した候補数の結果から頻度を見積もると  $< 0.28\text{mBq}$  [90% C.L.] であることがわかっている。この上限値から見積もると  $^{212}\text{Bi}$  により連続して起きる崩壊事象の一日当たりの頻度は  $< 15\text{event/day}$  となり、live time 61 日では  $15\text{event/day} \times 61\text{day} = < 9.2 \times 10^2\text{event}$  であると考えられる。

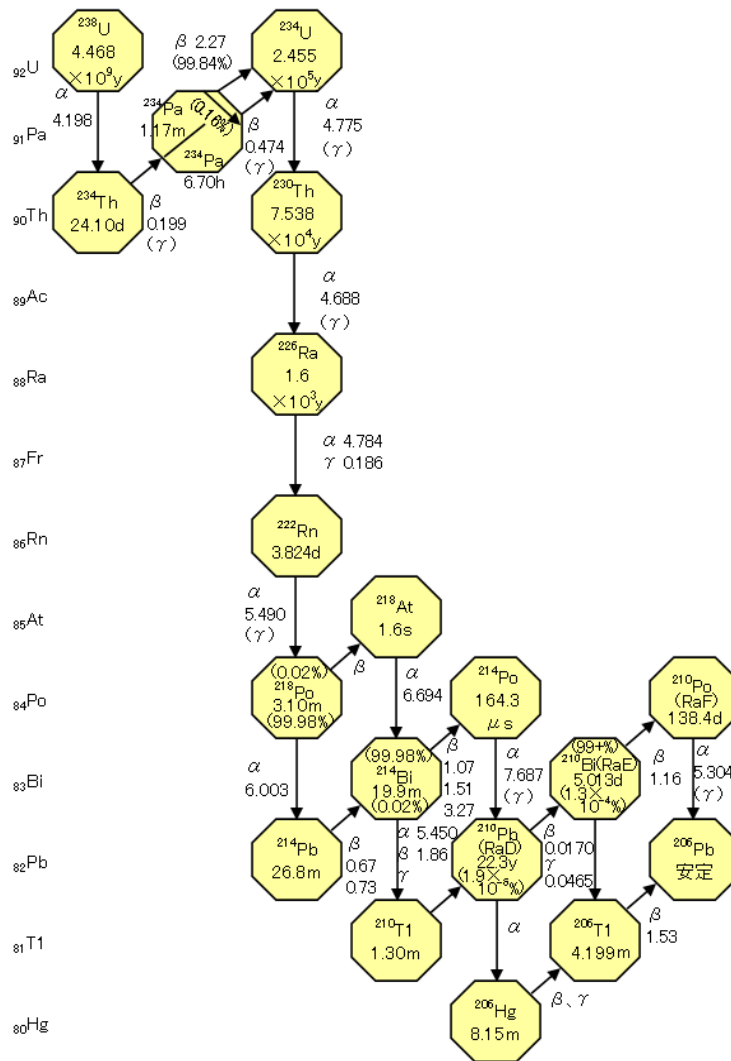


図 5.12: U 系列の崩壊

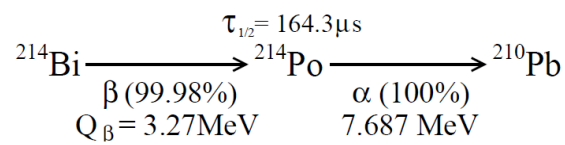


図 5.13:  $^{214}\text{Bi}$  の崩壊

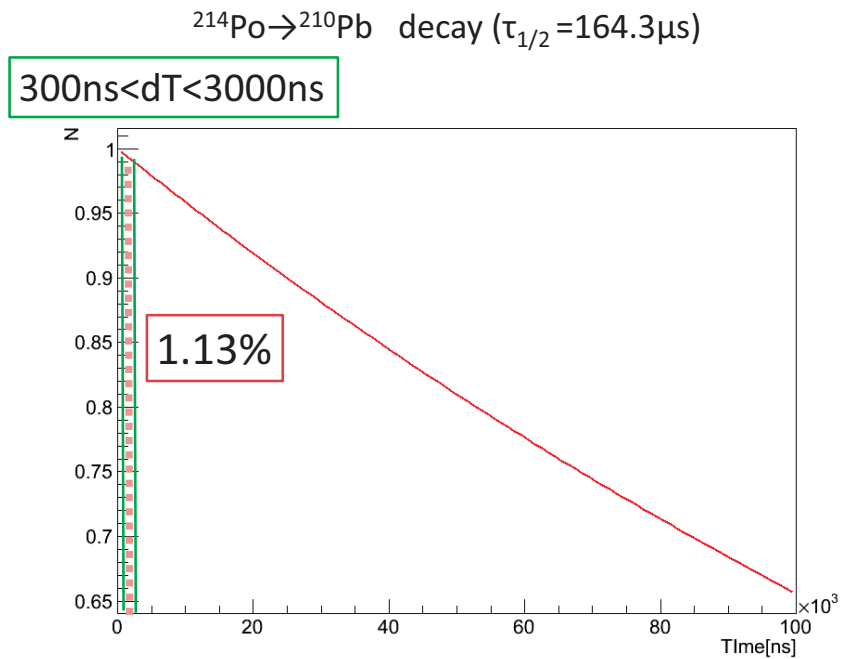


図 5.14:  $^{214}\text{Po}$  の崩壊曲線と First Cut による Efficiency:横軸時間 [ns] 縦軸 N[個]

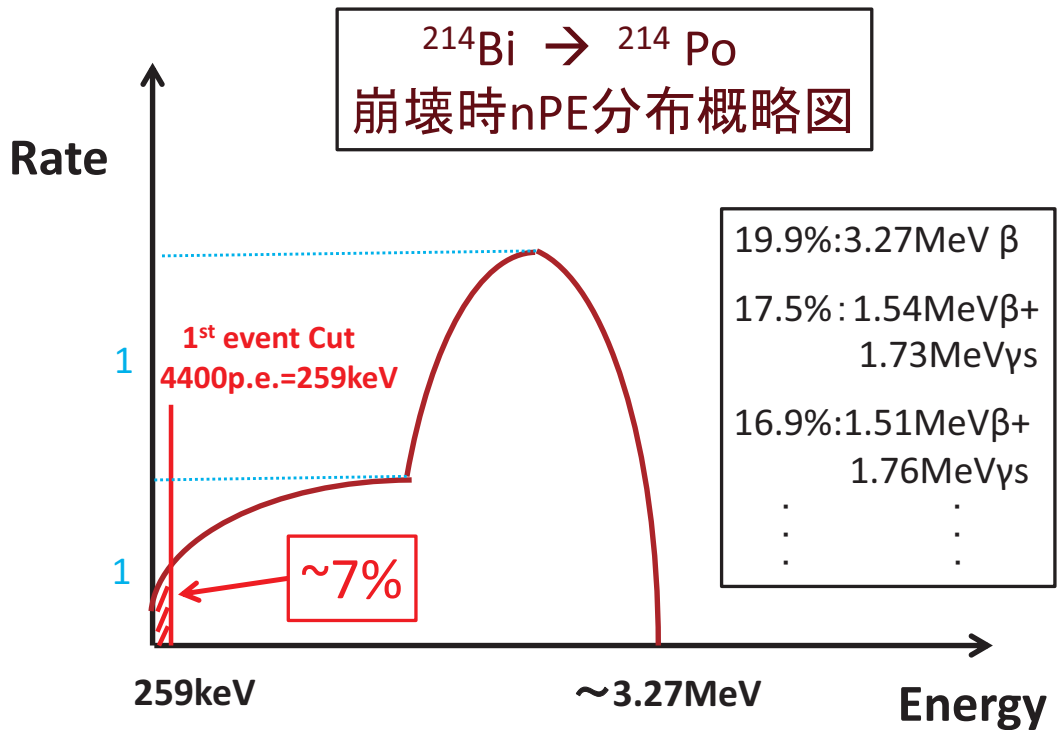


図 5.15:  $^{214}\text{Bi}$  の  $^{214}\text{Po}$  への崩壊時の Energy 分布モデル

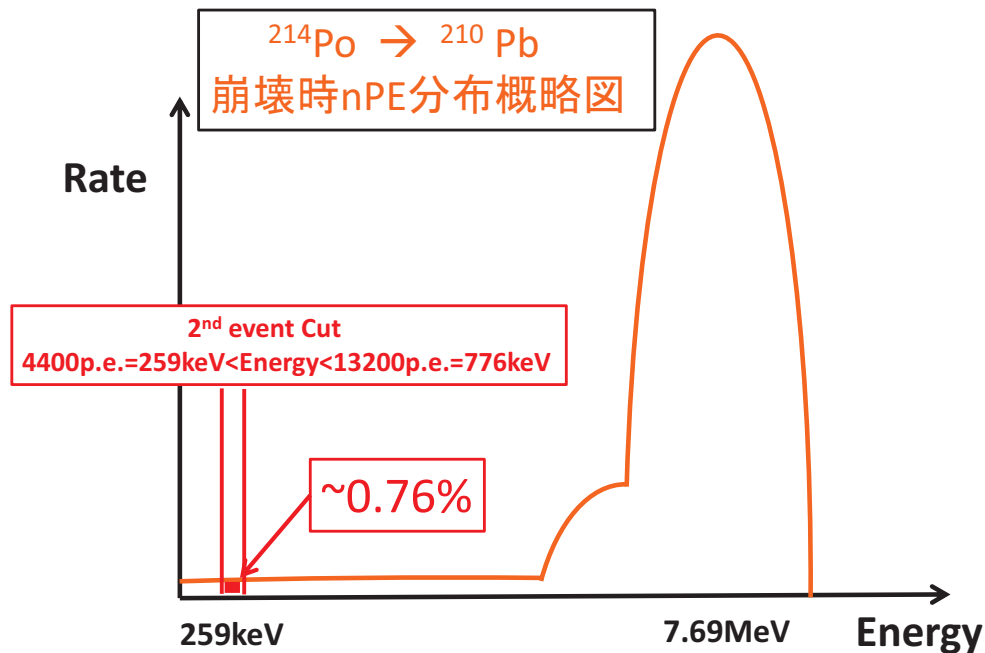


図 5.16:  $^{214}\text{Po}$  の  $^{210}\text{Pb}$  への崩壊時の Energy 分布モデル

この  $^{212}\text{Po}$  の事象は半減期が 299ns である。本研究では First Cut において 1st event と 2nd event の時間間隔  $dT$  のカットクライテリアを  $300\text{ns} < dT < 3000\text{ns}$  と設定している。 $^{212}\text{Po}$  の  $^{208}\text{Pb}$  への崩壊曲線から  $300\text{ns} < dT < 3000\text{ns}$  カットによる Efficiency は 50% と見積もられた (図 5.19 参照) また  $^{214}\text{Bi}$  事象と同様に  $^{212}\text{Bi}$  の nPE 分布を仮定してその Efficiency を計算すると約 10% 程度になる。そこで  $dT$  カット、nPE カット、時定数による  $\alpha$ 、 $\gamma$  カットのトータルの Efficiency を計算すると  $3.8 \times 10^{-5}$  となる。よって  $^{212}\text{Bi}$  により連続して起きる崩壊事象の live time 61 日当たりの頻度の上限値は Efficiency を考慮して、 $< 3.8 \times 10^{-5} \times 9.2 \times 10^2 = 0.035\text{event}$  となる。

よって、今回用いた live time 61 日分のデータで First Cut (+Eye Scan) 後に残る  $^{85}\text{Kr}$  崩壊事象候補が 26event だったのに対して、簡単な仮定により期待される  $^{212}\text{Bi}$  と  $^{214}\text{Bi}$  が混ざる数はそれぞれ、

- $^{212}\text{Bi} < 0.035\text{event}$
- $^{214}\text{Bi} = 0.026\text{event}$

となった。この見積もりからは、 $^{212}\text{Bi}$ 、 $^{214}\text{Bi}$  は 26event の  $^{85}\text{Kr}$  崩壊事象候補の中にはほとんど含まれない事になる。しかし、今回の仮定にはエネルギー分布など不正確な要素があるため、今後はシミュレーションプログラムの改良により高い統計精度で  $^{212}\text{Bi}$ 、 $^{214}\text{Bi}$  の崩壊事象をシミュレートし、その分布を正確に見積も

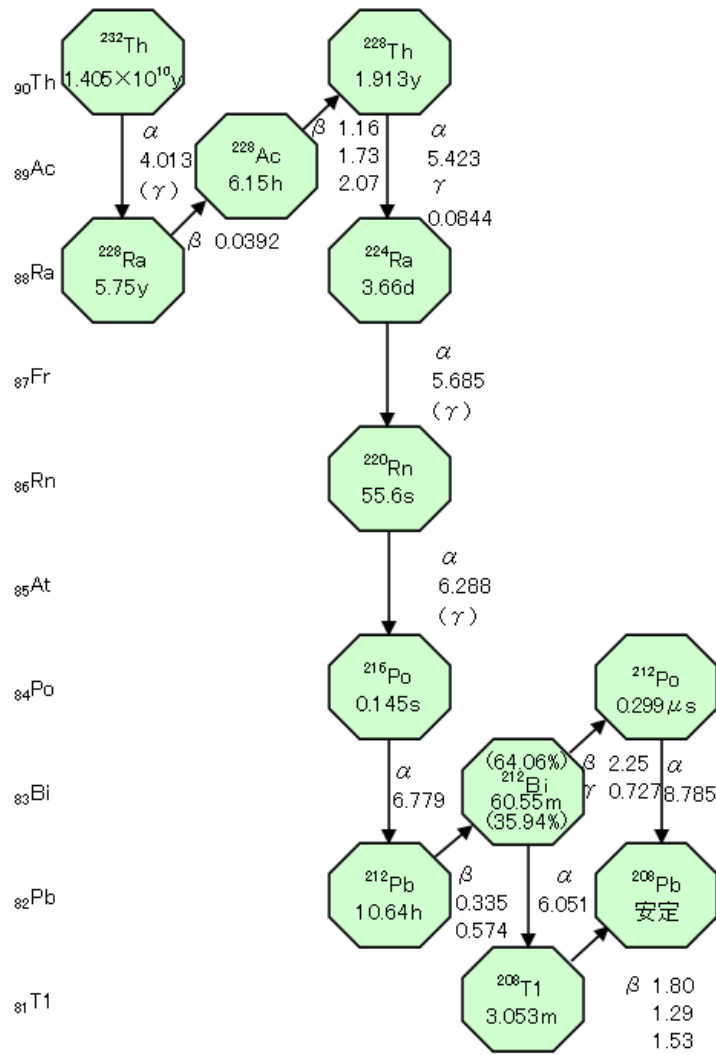


図 5.17: トリウム系列の崩壊

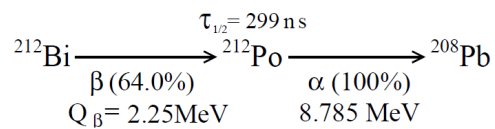


図 5.18:  $^{212}\text{Bi}$  の崩壊



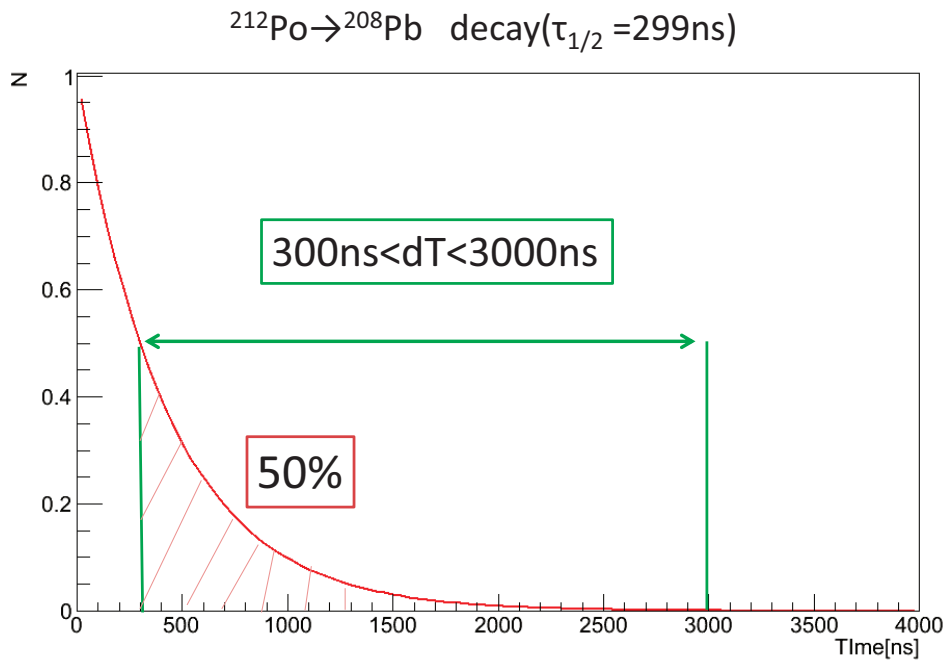


図 5.19:  $^{212}\text{Po}$  の崩壊曲線と First Cut による Efficiency:横軸時間 [ns] 縦軸 N[個]

る必要がある。また、それと同時に第 4 章で Xe 中 Kr の測定で用いた高感度ガスクロマトグラフ装置の測定ラインの改良や、測定手順の工夫により検出感度を向上させたい。検出器中からサンプリングした Xe 中の Kr 濃度を測定する必要がある。また、First Cut 後に残る可能性のある  $^{85}\text{Kr}$  崩壊事象以外の事象、原因についても今後より詳しい調査が必要である。

次に、図 2.25(上) 図のように ATM での  $^{57}\text{Co}$  エネルギーキャリブレーションによる nPE 分布では RMS が  $\sim 4\%$  であるが、図 5.2 のように FADC での  $^{57}\text{Co}$  キャリブレーションによる nPE 分布での RMS は約  $15\%$  である。FADC の方が ATM より Resolution が悪い理由は前にも述べたように FADC の場合本研究では ATM からの PMTSUM 信号 60ch 分を合わせた波形から nPE を見積もっており、各 ch 間のゲイン補正を行っていないためだと考えられる。図 5.7 に示した  $^{85}\text{Kr}$  の崩壊事象で  $\beta$  線と  $\gamma$  線のシミュレーションではこの FADC の Resolution は考慮していないが、この Resolution を考慮しても十分 First Cut の範囲内に分布は収まると考えられる。また、より Tight なカットを行った Final Cut での 2nd peak のエネルギー帯では Resolution は良くなると考えられる。しかしより詳細な研究の為に今後は PMT642 本分全てのチャンネル情報を新しい FADC で取得し、解析を行う。

また、今回はエネルギーキャリブレーションに  $122\text{keV}$  の  $^{57}\text{Co}$  を用いたが、図 5.7 にあるように  $^{85}\text{Kr}$  の崩壊事象には  $514\text{keV}$  の  $\gamma$  線事象がある。本研究ではエネ

ルギーと nPE の完全なリニアリティを仮定しているが、特に Final Cut の nPE カットクライテリアでは 2nd peak の範囲が狭く、このリニアリティのずれによる影響は大きいと考えられる。そこで、よりコンサーバティブに  $^{85}\text{Kr}$  の濃度の上限値を評価するために便宜的に 514keV の  $\gamma$  線事象のエネルギースケールを 17p.e./keV から  $\pm 10\%$  変化させたときの Efficiency を見積もった。結果は表 5.6 のようになった。

また 514keV の  $\gamma$  線事象の p.e./keV を 122keV の  $^{57}\text{Co}$  キャリブレーションにより見積もった値から  $\pm 10\%$  変化させたときに、Final Cut 後に残る  $^{85}\text{Kr}$  崩壊候補事象数は表 5.7 のようになった。

よって 2nd peak のエナジースケールを  $\pm 10\%$  変化させた時のそれぞれの場合の  $^{85}\text{Kr}$  崩壊事象の 90% C.L での上限値も Feldman&Cousins の方式により見積もると表 5.8 のようになる。

また、2nd peak のエナジースケールを  $\pm 10\%$  変化させた時のそれぞれの場合の Xe 中の Kr 濃度の上限値を見積もると、表 5.9 のようになった。

よってよりコンサーバティブには Xe 中 Kr 濃度は

$$Kr/Xe < 14ppt[90\%C.L]$$

となった。

表 5.5: First Cut 後のイベント情報:\*は Final Cut のクライテリアから外れる値 (上回っていたら値の右側に、下回っていたら値の左側に付く、一番右は Final Cut の結果)

Event	Time	<sup>1st</sup> peak nPE	<sup>2nd</sup> peak nPE	dT	Final Cut
1	02/18@18:07:03	1417	*5370	1700	-
2	02/20@14:13:46	313	*6353	1444	-
3	02/21@21:33:53	3953*	*5397	1972	-
4	02/26@13:18:42	3777*	*7471	1832	-
5	03/03@18:10:08	4481*	*5484	2612*	-
6	08/09@15:49:07	2599*	*5955	560	-
7	08/15@23:23:21	1185	9892*	1616	-
8	08/22@01:08:06	1838	11836*	1484	-
9	08/25@19:27:19	4051*	8372	472	-
10	08/30@05:59:06	280	*9524	1980	-
11	08/30@09:42:43	1232	*10960	1460	-
12	08/30@16:26:28	1095	*5725	2608*	-
13	08/31@10:52:04	4031*	11848*	1560	-
14	09/01@15:13:01	2315*	12312*	1532	-
15	09/06@09:01:28	1121	*5105	792	-
16	09/07@17:15:17	1697	10772*	380	-
17	09/09@03:17:09	778	9145	944	♡
18	09/12@01:06:30	740	12228*	1472	-
19	09/18@21:06:53	1552	*4845	348	-
20	09/19@03:38:37	833	11051*	1516	-
21	09/21@17:59:53	2126	12013*	1444	-
22	09/22@18:52:17	2743*	8433	980	-
23	09/26@11:29:05	1702	11280*	604	-
24	09/27@12:03:46	2271*	12415*	1564	-
25	09/27@13:28:53	2282*	*4679	496	-
26	09/27@14:57:10	1986	*5683	2600	-

表 5.6: 2nd peak のエナジースケールを 10% 変化させた時の Efficiency

17p.e./keV からの変化	Final Cut
±0	64%
+10%	46%
-10%	42%

表 5.7: 2nd peak のエナジースケールを 10% 変化させた時の  $^{85}\text{Kr}$  候補事象数

17p.e./keV からの変化	Final Cut
$\pm 0$	1event
+10%	0event
-10%	1event

表 5.8: 2nd peak のエナジースケールを 10% 変化させた時の  $^{85}\text{Kr}$  候補事象数の上限値 [90%C.L]

17p.e./keV からの変化	Final Cut
$\pm 0$	<3.8event
+10%	<1.8event
-10%	<3.8event

表 5.9: 2nd peak のエナジースケールを 10% 変化させた時の Xe 中 Kr 濃度の上限値 [90%C.L]

17p.e./keV からの変化	Final Cut
$\pm 0$	<9.3ppt/detector
+10%	<5.9ppt/detector
-10%	<14ppt/detector

## 第6章 結論

XMASS 実験は神岡鉱山内地下 1000m で行われている暗黒物質直接探索実験であり、検出器部分に自己遮蔽効果の高い液体 Xe 約 1.2ton を用いることにより極低バックグラウンド環境を実現している。

XMASS 実験では液体 Xe の自己遮蔽を用いる事ができない内部のバックグラウンドを下げる事が重要である。そのなかでも Xe 中に含まれる Kr の同位体である  $^{85}\text{Kr}$  の崩壊によって起きる  $\beta$  崩壊のエネルギーは暗黒物質が検出器中で落とすエネルギー帯と重なるため、暗黒物質直接探索の致命的なバックグラウンドとなる。

そこで我々は 2009 年に Xe 中 Kr を 5 桁以上低減させる能力を持つ Xe 蒸留装置を開発した。その後この蒸留装置を用いて本実験用に約 1.2ton の Xe を蒸留した。

蒸留後の精製 Xe 中の Kr 濃度は我々の持つ高感度のガスクロマトグラフ装置の検出感度以下であるため、正確に定量することができない。そこで蒸留により精製 Xe と同時に発生するオフガスをこの高感度ガスクロマトグラフ装置で測定する事により精製 Xe の Kr 濃度を評価したところ ( $23\pm 32$ )ppb という結果が得られた。

XMASS 実験では検出器内部の 642 本の PMT により捉えられた Xe 発光事象の波形を FADC により取得している。一方、 $^{85}\text{Kr}$  は 0.43% の割合で半減期  $1.015 \mu\text{s}$  で  $173\text{keV}$  の  $\beta$  崩壊のあと  $514\text{keV}$  の  $\gamma$  線を放出する。

この連続した事象の波形を FADC を用いて捉えるために、まず FADC の情報から 1 事象を認識するためのピークサーチアルゴリズムを作った。その後得られた各事象 (ピーク) に対して First Cut、Final Cut の 2 つのカットを用意し、2011 年 2 月～3 月、2011 年 8 月～9 月計 live time 61 日のデータからそれぞれの場合でのアクシデンタルレートと  $^{85}\text{Kr}$  崩壊事象の探索を行い、Xe 中 Kr の濃度を見積もった。

First Cut(+Eye Scan) の場合はアクシデンタルレートが  $0.12\text{event/day}$ 、 $^{85}\text{Kr}$  崩壊事象候補が  $26\text{event}$  であり、Xe 中 Kr 濃度は  $<28\text{ppt}[90\%C.L]$  であった。

Final Cut の場合はアクシデンタルレートが  $0.010\text{event/day}$ 、 $^{85}\text{Kr}$  崩壊事象候補が  $1\text{event}$  であり、Xe 中 Kr 濃度は  $<9.3 \text{ ppt}[90\%C.L]$  となった。

エネルギースケール  $\pm 10\%$  のシステムティックエラーを仮定した場合も Final Cut を適用した場合での Kr の上限値は  $<2.5\text{ppt/detector}[90\%C.L]$  と見積もられた。

最後に本研究で残った  $^{85}\text{Kr}$  候補の中に  $^{212}\text{Bi}$  崩壊事象、 $^{214}\text{Bi}$  崩壊事象が混ざっている可能性を検討した。それぞれの親核種の  $^{222}\text{Rn}$ 、 $^{220}\text{Rn}$  の量と、本研究で用いた live time 61 日分のデータから期待される  $^{212}\text{Bi}$ 、 $^{214}\text{Bi}$  崩壊事象数を見積もった。結果は  $^{214}\text{Bi}$  については  $0.21\text{event}$ 、 $^{212}\text{Bi} < 5.3\text{event}$  となった。

## 参考文献

- (1)R. Massey, Nature 445, 286 ,2007.
- (2)K.G.Begeman,et al. Extended rotation curves of spiral galaxies Mon ,Not ,R .astr .Soc .(1991)249,523-537
- (3)WMAP Cosmological Parameters (Model: lcdm + sz + lens Data: wmap7)  
<http://lambda.gsfc.nasa.gov/>
- (4)<http://space.mit.edu/home/tegmark/wmap.html>
- (5)R.P.Olling, MNRAS 311(2000) 361.
- (6)Alcock, C.,etal, 2000, ApJ, 542, 281A.
- (7)Bennett, D.P., 2005, ApJ, 633, 906.
- (8)Wyrzykowski, L., etal, 2010, MNRAS, 407, 189W.
- (9)Tisserand, P., 2007, AA, 469, 387T.
- (10) 牧田将太、2010、名古屋大学理学研究科、修士論文
- (11)Y. Fukuda et al., (Super-Kamiokande Collaboration), Phys. Rev. Lett.81(1998)1562.
- (12)S.Fukuda et al.,(Super-Kamiokande Collaboration), Phys. Rev. Lett.86(2001)5651.
- (13)Y.Suzuki ., arXiv:0008296
- (14)dmtools
- (15)S.Kubota, etal ., Phys.Rev.B 20(1979)3486.
- (16)E.Aprile, et al., arXiv:1005.0380
- (17) The Super-Kamiokande Collaboration, Phys.Lett.452(1999)418
- (18) W.Ootani, master thesis, University of Tokyo (1994)
- (19) A.Minamino, master thesis, University of Tokyo (2004)
- (20) K.Miuchi, master thesis, University of Tokyo (1999)
- (21) M.Ishitsuka, master thesis, University of Tokyo (2001)
- (22) 内田裕義、2011、名古屋大学理学研究科、修士論文
- (23)<http://jp.hamamatsu.com/>
- (24)The Super-Kamiokande Collaboration, Nucl. Instrum. Meth. A501(2003)418-462;
- (25)"TKO Specification", KEK Data Acquisition Development Working Group, KEK Report 85-10.
- (26)<http://geant4.web.cern.ch/geant4/>
- (27)D.Motta and S. Schonert, "Optical Properties of Bialkali Photocathodes"  
arXiv:physics/0408075v1 17 Aug 2004
- (28)Distillation of Liquid Xenon to Remove Krypton The XMASS Collaboration  
(K. Abe et al.) Astopart. Phys. 31, 290-296 (2009), arXiv: 0809.4413
- (29)G.J. Feldman and R.D. Cousins, Phys. Rev. D 57 (1998) 3873.

## 謝辞

修士二年間、本研究をする上で多くの方々から御指導、御力添えをいただきました。この場を借りてお礼を申し上げます。

竹内康雄先生には、何よりも XMASS 実験に参加させて頂く機会を頂きました。同じ研究室に先輩がいない事による不安も有りましたが、神岡での研究生活、研究の進め方について親身にサポートして頂き、研究に集中することができました。先生にはミーティング等でも研究発表の機会を積極的に与えて頂き、とてもいい勉強になりました。また、先生には研究面以外でも卒業後の進路や私生活についても色々と相談に乗っていただきました。特に私が体調を崩した時とても気にかけて頂き藏重先生と寮にまで訪ねてきて下さった事は忘れられません。2年間普通の学生に比べてとてもご迷惑をおかけしたと思います。特に先生は神戸大学に赴任されたばかりでお忙しくされてた中、丁寧に指導して頂き深く感謝しております。

藏重先生には、毎回のミーティングでの鋭い指摘やアドバイスをして頂きとても刺激を頂きました。また、先生から投げかけられる質問はいつもとても勉強になり物理学者としての定量的なデータの見方、実験の進め方など多くのことを教えて頂きました。先生に指導して頂いたために物理学を学んでいたという事を誇らしく思うようになりました。有難うございました。また、私が体調を崩したときも気にかけて頂きとても感謝しております。川越清以先生には、研究の面では、ミーティングやゼミの際にたくさんの助言を頂きました。また、私生活の面でもいろいろとお世話になりました。先生が発揮されるリーダーシップにはいつも学ばされるところが多かったです。

原先生には、ニュートリノミーティングの際に私の研究について貴重な指摘を頂きました。先生は他の学生のコロキウムなどの際に学生視点で捉えた問題を学生に向けてわかりやすく説明して頂きました。先生は研究の事以外の事もよくご存じで、とても興味深いお話をして頂きました。

青木先生にも、ニュートリノミーティングでは研究の事に関して丁寧なご指導をして頂きました。ニュートリノグループとの交流は大変貴重な経験でした。本当に有難うございました。

身内先生のおかげで楽しく研究活動を行う事ができました。また、新聞を届けて頂き、研究に没頭し過ぎて視野や見識が狭まる事を防ぐことができました。

山崎先生には、学部生の頃の卒業研究の際に大変お世話になりました。研究を始めた当初はプログラミングが苦手でしたが、先生の「プログラミング言語は英語よりも簡単。」という言葉信じ打ち込む事で人並みにはできるようになりました。有難うございます。

越知先生には、研究に対する姿勢を教えて頂きました。先生は夜中遅くまで研究室に残っておられ、その姿を見て自分も負けないようにと頑張れました。また、

先生の雑学はとても面白く、良い刺激を受けました。

鈴木先生には、研究の面での相談以外にもとてもフレンドリーに接して頂き、私が企画した行事にも積極的に参加して頂きました。

鈴木洋一郎先生には、いつも XMASS ミーティングで貴重なご指摘を頂きました。また、先生からはプロジェクトを指揮する際の姿勢を学びました。

中畑雅行先生には、Kr の蒸留、測定時に貴重なご指摘、アドバイスを頂きました。また、研究の取り組み方に対しても教えて頂きました。

森山茂栄先生には、解析、XMASS 実験の理論的な背景など細かい点まで教えて頂きました。また、今後社会に出てからも通用するような精神力と段取り力を鍛えて頂きました。

山下雅樹先生には、物理的な思考、表現の仕方など多くの刺激を受けました。また、研究の面以外にもいろいろと、とてもためになるお話をして頂きました。先生から受けた影響は少なくないです。

安部航先生には、シミュレーションやプログラミング、ネットワークの事に関してかなり指導して頂きました。安部さんと同じ部屋で解析を行う時はとてもはかどりました。有難うございました。

岸本康宏先生には、研究に対する姿勢を学びました。先生はとても学生の心情をわかっておられました。

小林兼好先生には、本 FADC での研究の件でとても丁寧に指導して頂きました。また、研究の内容以外にも本論文の製作についての方針などもご指導して頂きました。特に私が神戸にいる時にも、お忙しい中お時間をとって頂き TV 会議にていろいろとアドバイスして頂きました。本当に有難うございました。

竹田先生には、キャリブレーションシステムの事に関してとても丁寧に御指導して頂きました。特に遅い時間に私が電話したときもとても詳しくご指摘して頂きました。また、先生には私生活においても素敵な歌声を聞かせて頂き、いい刺激を受けました。

小川先生には、循環システムや、純化のことにとても丁寧にご指導して頂きました。また、解析部屋では隣同士ということもあり、とても刺激を受けました。

関谷洋之先生には、純粹循環システムのことなどでとても丁寧に御指導して頂きました。Jing 先生には、プログラミングや、解析ツールについて丁寧にご指導して頂きました。また、時折下さるお菓子が嬉しかったです。

Kai 先生には、シフトで一緒になった際に研究者としての心得を教えて頂きました。

Yang 先生には、研究の事以外にもいろいろなことを教えて頂きました。また、おいしいキムチも頂きました。

金沢元一さんには実験の中でガスの設置などで大変お世話になりました。有難うございました。



高倉孝司さん、神田寛之さん、大倉洋子さん、清水容子さん、高松翠さん、前田由香利さん、武長祐美子さんには神岡での生活面で様々なご支援を頂きました。有難うございました。

東 寿美子さんには、いろいろと気にかけて頂きました。ボタンが取れた服を縫っていただいたり、楽しいお話しをして頂きました。本当に有難うございました。

上島孝太先輩、本木大資先輩、村山育子先輩、藤井景子先輩、内田裕義先輩、西家宏典先輩、篠崎晃宏先輩、五代儀一樹先輩、には神岡での生活面、研究面で大変お世話になりました。神岡で楽しく研究生活を送る事ができたのも先輩方のおかげです。

後輩の細川佳志くん、村田亜紀さん、高知尾理くん、稗田啓介くん、草場文雄くん、瀧谷寛樹くん、榎本大悟くんいろいろお世話になりました。楽しかったです。

同期の平野重利くん、西谷雄輝くんとは同期ならではの触れ合いをできて楽しかったです。お互い卒業後も頑張りましょう。

最後に今まで自分を支えてくれた友人、そして家族、特に父芳文、母伸子に感謝します。

大塚 康平