

修 士 学 位 論 文

XMASS実験におけるラドンバックグラウンドの研究

平成 25 年 2 月 27 日

専 攻 名 物理学専攻

学籍番号 119s122s

氏 名 村田亜紀

神戸大学大学院理学研究科博士課程前期課程

概要

2012年。ついに CERN では神の粒子とも呼ばれる Higgs らしき新しい素粒子の発見に至った。このように科学が進歩し、人工的に粒子を作り出して研究を推進できる世の中になった今でも、宇宙のエネルギー組成の約 96% は未だによくわかっていない。

このうち約 23 % を占めているのが暗黒物質と呼ばれる未知の物質である。私達 XMASS 実験グループは、この暗黒物質を直接的に観測し、その性質を明らかにすることを目的として、岐阜県の地下 1000m に設置した、約 1 トンの液体キセノンシンチレータ検出器を用いて研究を進めている。XMASS 実験での暗黒物質の観測原理は、キセノンの原子核と暗黒物質の弾性散乱によってキセノンが発光する光を光電子増倍管という高感度な光センサーで捕えるというものである。しかし暗黒物質は通常の物質とほとんど相互作用せず、しかも相互作用しても非常に微弱な光しか発しないと考えられている。よってこの光が十分に捕らえられる低バックグラウンド環境がなければならない。これを実現するために、XMASS 実験では地下深くに検出器を設置し、純水を用いた遮蔽やキセノンの自己遮蔽能力によってバックグラウンドをできる限り低減している。つまりいかに低いバックグラウンドを実現するかが実験の鍵を握っている。XMASS 実験における私の役割は、主要なバックグラウンドであるラドン濃度を測定し、キャリブレーション用の線源とは相補的に検出器の較正ができるコントロールサンプルを作ることと、ラドンを除去するためのトラップ技術を大幅に改善することである。ラドンは検出器内部の部品に含まれるウラン・トリウムから湧き出し、キセノン中に溶け込んでいる。本論文では、ラドンが特徴的な連続崩壊をすることを用いて他の事象から弁別し、この濃度を測定した。また、気体キセノン中のラドンを物理吸着するために活性炭を用いる試験を行なった。活性炭は炭素物質を高温で薬品と反応させて作られる微細孔を持つ炭素である。キセノンとラドンはどちらも希ガスで原子番号が近いので 2 つの吸着過程は競合し、これまでに高い吸着効率を実現したシステムの報告は成されていない。よってキセノンを通しラドンのみを吸着してくれる適切な活性炭を選び、より吸着効率の良い条件をそろえることができれば、目的は達成されることが期待できる。

目次

第 1 章 序章	1
1.1 暗黒物質	1
1.1.1 暗黒物質存在の証拠	1
1.1.2 暗黒物質の候補	5
1.2 暗黒物質探索実験の現状	6
1.2.1 直接検出	8
1.2.2 間接検出	8
第 2 章 XMASS 実験	10
2.1 XMASS 検出器	10
2.1.1 XMASS 実験の目的	10
2.1.2 検出原理	10
2.1.3 検出器	10
2.2 液体キセノン	15
2.2.1 液体キセノンを利用する利点	15
2.2.2 キセノン純化方法	17
第 3 章 バックグラウンドとその低減	19
3.1 バックグラウンドの種類	19
3.2 外部バックグラウンド	19
3.2.1 検出器外からのバックグラウンド	19
3.2.2 構造物からのバックグラウンド	20
3.3 内部バックグラウンド	22
3.4 ^{222}Rn	23
3.5 バックグラウンドの評価	25
第 4 章 キセノン中のラドン測定	27
4.1 目的	27
4.2 ラドン娘核候補の弁別	27
4.2.1 アクシデンタル事象の見積り	31
4.3 ラドン濃度の見積り	35
4.4 純度の向上	35
4.5 まとめ	37
第 5 章 ラドン除去装置の改良	38
5.1 活性炭	38
5.2 吸着の仕組み	39
5.3 ラドン検出器とセットアップ	39
5.3.1 80L ラドン検出器	40

5.3.2	活性炭トラップ	42
5.4	アルゴン中のラドン除去	44
5.5	キセノン中のラドン除去	45
5.5.1	モルシーボン X _{2M} 4/6	46
5.5.2	ラドン検出器の湿度特性	46
5.5.3	Carboxen-1021	50
5.5.4	Carboxen-569	53
5.5.5	白鷺 G _{2X} 4/6	55
5.6	まとめ	55
第 6 章 結論と課題		58

第1章 序章

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) や、大規模構造、そして Ia 型超新星など最近の観測結果から、宇宙は 73% の暗黒エネルギーと 23% の暗黒物質、そして 4% がバリオンと呼ばれる通常の物質でできていることが判明した [1]。現在は未だ未解明の暗黒エネルギーと暗黒物質についての研究が世界中で行われている。特に焦点が当てられているのが暗黒物質であり、これが観測できれば標準理論を超えた新しい物理の発見につながると考えられている。

本章では、暗黒物質の性質と存在する証拠を示し、超対称性理論 SUSY (SUper SYmmetry theory) と共に候補となっている物質を紹介する。そして最後に、最近の暗黒物質探索実験の現状を述べる。

1.1 暗黒物質

1.1.1 暗黒物質存在の証拠

暗黒物質の存在は 1934 年から予言されてきた。未だ発見に至らない暗黒物質がなぜ存在すると考えられているのか、その証拠を紹介する。

宇宙背景放射 (CMB)

宇宙背景放射 (CMB) は全地球上で等方的に観測される電磁波のことで、宇宙初期から残るビッグバンの名残りと考えられている。1992 年、NASA の COBE 衛星が CMB の小さなゆらぎを観測した [2]。同じ証拠を 2003 年 Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) がより高い感度で観測し報告した [1]。図 1.1 は WMAP による宇宙背景放射のエネルギー密度を図示化したものである [3]。色の違いは密度のゆらぎを表す。CMB の異方性は初期宇宙の物質密度ゆらぎと関連しており、初期宇宙の研究に役立てることが出来る。

例えば、CMB 等の観測から宇宙のエネルギー密度がわかる。臨界密度に対する、ある宇宙構成要素のエネルギー密度の比 (密度パラメータ) Ω_i は、構成要素 i のエネルギー密度 ρ_i と臨界密度 ρ_c を用いて以下の式で表される。

$$\Omega_i = \frac{\rho_i}{\rho_c} \quad (1.1)$$

ここで、 ρ_c は、

$$\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G} \quad (1.2)$$

である。 H_0 はハッブル定数で、 G は万有引力定数である。

宇宙の全エネルギー密度 Ω_{tot} は、

$$\Omega_{tot} = \sum_i \Omega_i = \Omega_M + \Omega_\Lambda \quad (1.3)$$

となる。ここで、 Ω_M は宇宙の物質密度、 Ω_Λ は宇宙定数の密度パラメータである。近年の WMAP による宇宙背景放射測定の結果 [1] から、宇宙の物質密度は

$$\Omega_M h^2 = 0.1349 \pm 0.0036 \quad (1.4)$$

で [4]、通常物質 (バリオン) 密度が

$$\Omega_b h^2 = 0.02260 \pm 0.00053 \quad (1.5)$$

である [5]。h は規格化したハッブル定数 (H_0 を 100km/s/Mpc で規格化した無次元のハッブル定数) で、 $h = 0.704 \pm 0.013$ [4] を用いた。この 2 つの密度の差は、非バリオンの暗黒物質の存在を示唆している。

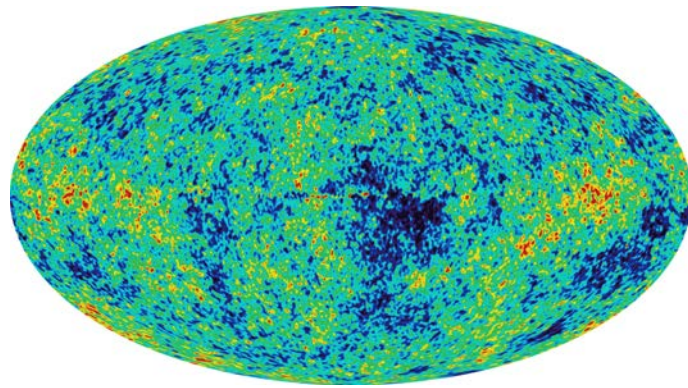


図 1.1: WMAP による宇宙背景放射のエネルギー密度 [3]

銀河の回転曲線

暗黒物質の最も有力な証拠となっているのが、渦巻銀河の質量分布と回転速度 v_c の違いによるものである。

ケプラーの法則から以下の式が導ける。

$$\frac{v_c(r)^2}{r} = G \frac{M(r)}{r^2} \quad (1.6)$$

ここで、 r は銀河中心からの距離であり、 $M(r)$ は半径 r 内の質量の総和、 G は万有引力定数である。回転速度は星のスペクトルのドップラー効果 (赤方偏移) によって測定される。この回転速度 v_c から、渦巻銀河の質量分布 $M(r)$ は式 (1.1) から決定できる。光学観測では銀河の中心近くに質量が集中していることがわかった。銀河の全質量が銀河の中心に集中していると仮定するならば、 v は $r^{\frac{1}{2}}$ に比例して減衰するはずである。しかし、測定された銀河の大半で銀河の中心から遠ざかっても速度は一定であった。このことは半径 r が大きいところで $M(r)$ が r に比例しているということと、輝く物質の質量よりもずっと大質量の輝かない物質が存在していることを表す。

図 1.2 は渦巻銀河 NGC6503 の写真 [6] である。最も星が集中している銀河の中心をバルジといい、その周囲に広がる星や星間ガスの入り混じった円盤状の部分をディスクという。そして、銀河の周囲

には光学的に観測されない暗黒ハローが球状に存在していると考えられている。図 1.3 は渦巻銀河 NGC6503 の回転速度の理論値と観測値である [2]。黒点が観測値で、破線 (disk) が星等の目に見える成分、点線 (gas) は星間ガスの成分を示す。この銀河では、輝く全ての物質は銀河の中心から 5kpc 以内に存在する。つまり、全ての物質がこの半径内にとどまっているなら、回転速度カーブは図のディスクのように半径が大きくなるにつれて減衰するはずである。しかし、観測された回転速度カーブは半径が大きなところでも減衰せず一定の値を示した。これは光学的に観測されない球状の物質 (暗黒ハロー) の存在を暗に示唆している。

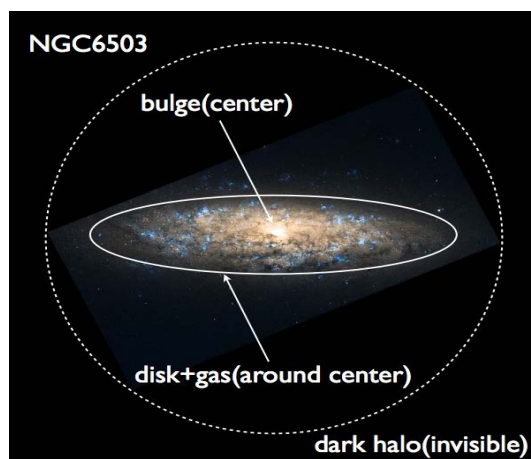


図 1.2: 渦巻銀河の構造

写真は渦巻銀河 NGC6503[6] である。銀河の中心部分をバルジと言い、その周囲に広がる円盤状の部分をディスクという。そして、光学的には観測されない暗黒ハローが球状に存在している。

この観測に基づいて、暗黒ハローの典型的なエネルギー密度は以下のように見積もられる [2]。

$$\Omega_{halo} \geq 0.1 \quad (1.7)$$

一方、銀河の見える星のエネルギー密度は、

$$\Omega_{luminous} \leq 0.01 \quad (1.8)$$

と見積もられる。よって、この比較から、1つの銀河のスケールで暗黒物質の存在が証拠づけられる。

重力レンズ効果と弾丸銀河団

重力レンズ効果とは、一般相対性理論の効果で大質量物質の側を通る光が進路を曲げられるというものである。図 1.4 は重力レンズ効果の模式図で、ある天体 (galaxy) と地球の間に大質量の銀河団 (galaxy cluster) があることによって遠くの天体の光が進路を曲げられて地球に届く様子を表している。図 1.5 は、重力レンズ効果により実際に天体の光が曲げられて地球に到達することで、1つの天体からの光がいくつもの像となって見えている様子である。図 1.5 で青く円形に見えている銀河が、図 1.4 の lensed galaxy images であり、実際には円の中心付近にある銀河の像がその円周上にいくつも並んで見えている。

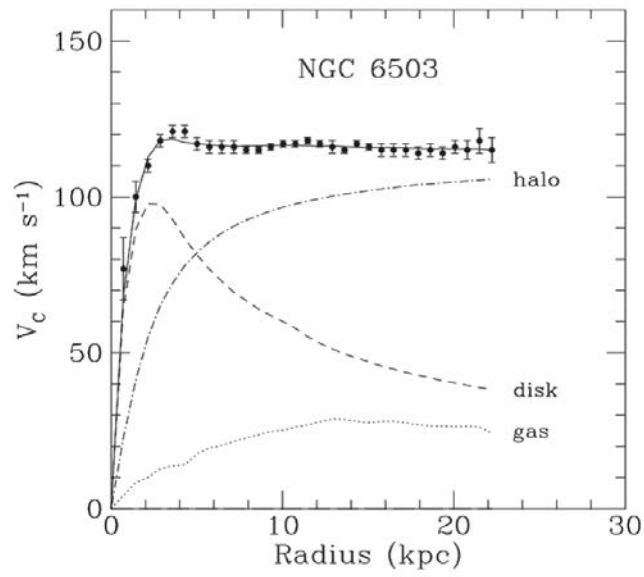


図 1.3: 銀河の回転速度 [2]

横軸を銀河の中心からの距離 r 、縦軸を回転速度 v_c として渦巻銀河 NGC6503 の回転速度をプロットしたのが黒点である。破線で示された disk、点線で示された gas の寄与を合わせても観測データに一致しない。このことから点-破線で描かれた dark halo による寄与が想定される。

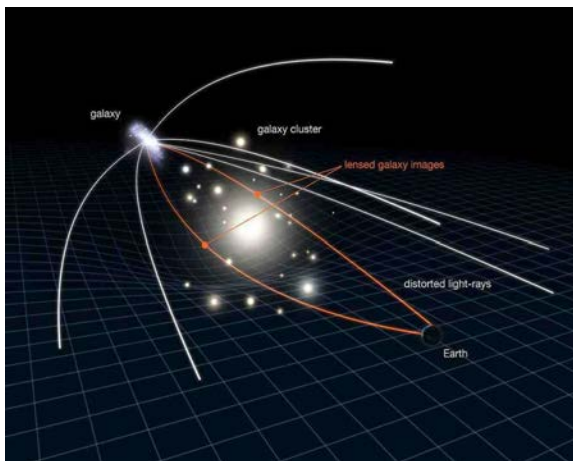


図 1.4: 重力レンズ効果模式図 [7]

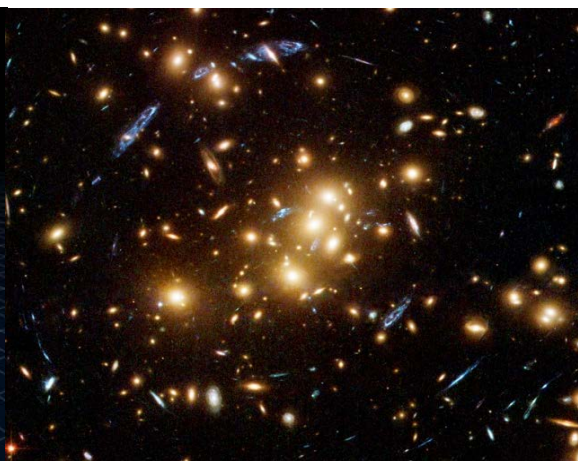


図 1.5: 重力レンズ効果 [8]

弾丸銀河団とは、小さな銀河団が大きな銀河団の中を突き抜けてできた銀河団のことである。図 1.6 は、チャンドラ衛星を用いた X 線観測と HST による観測を組み合わせて画像処理をした 1E 0657-56 の画像である [9]。ピンク色はチャンドラの観測した高温ガスの領域で、衝突した銀河団の弾丸ガスと、衝突された大銀河団のガスを表している。一方、NASA のハッブル宇宙望遠鏡 (HST) やヨーロッパ南天天文台の VLT が、重力レンズ効果を使って銀河団の中の質量分布を調べると、青色の部分に大質量物質があることがわかった。ピンクで示された星間ガス付近よりも青の領域に質量が集中していることがわかった。暗黒物質を想定しない理論では、銀河団の質量の多くが星間ガスだと考えなければいけないためこの結果を説明できない。つまり、青い領域に存在するのは暗黒物質だということになる。



図 1.6: 弾丸銀河団

1.1.2 暗黒物質の候補

暗黒物質の候補は、大きく 2 種類に分けられる。バリオンの暗黒物質と非バリオンの暗黒物質である。バリオン候補には白色矮星、中性子星、ブラックホールなどが挙げられる。これらは総称して Massive Compact halo Object (MACHO) と呼ばれ、暗黒物質の一部ではあるが、ハローの実質的な部分を形成するだけの質量は持たないと考えられている。非バリオン候補は、熱い暗黒物質に分類されるのがニュートリノ、冷たい暗黒物質と分類されるアクシオンと Weakly Interacting Massive Particles (WIMP) である。Super-Kamiokande でニュートリノ振動が観測され、ニュートリノ質量の制限がつけられたが、その質量は非常に小さいため、ニュートリノ単体では暗黒物質になりえない。残る候補である冷たい暗黒物質については以下で詳しく説明する。

アクシオン

アクシオンは素粒子物理学における CP 対称性の破れを解決するために導入された。素粒子物理学でアクシオンの質量に対する制限はないが、いくつかの実験結果や、宇宙論的制限から、 10^{-6}eV

$\leq m_a \leq 10^{-3} \text{ eV}$ もしくは、 $2 \text{ eV} \leq m_a \leq 5 \text{ eV}$ のみが許される [10]。

WIMPs

素粒子物理学の標準理論に対して現在最も指示されている拡張である超対称性理論によって WIMPs の存在が示唆されている。この理論では WIMPs は弱い相互作用と重力相互作用のみをして、非常に重い質量を仮定されている。WIMPs は暗黒物質の特徴と良く一致しており、宇宙論的にも存在が許される可能性が高く、暗黒物質の最有力候補となっている。以下で超対称性理論について説明する。

超対称性理論 (SUSY)

SUSY は素粒子物理学の標準理論の問題を解決するために導入された。標準理論における問題点を以下に挙げる。

- パラメーターの数が多すぎる
- CP の破れの起源の問題
- 大統一理論 (GUT) における階層性問題

図 1.7 の上図のように標準理論では 3 つの結合定数が一点で交わらない。標準理論の電弱相互作用と強い相互作用を 1 つの結合定数で記述するためには、3 つの結合定数があるエネルギースケールで一致しなければならない。この問題に自然な解答を出せるのが標準理論に超対称性を導入する超対称性理論である。超対称性を導入すると図 1.7 の下図のように、3 つの結合定数が一点で交わる [11]。The minimal supersymmetric extension of the standard model(MSSM) は標準理論の最小限の拡張で、標準理論でのいくつかの疑問を説明する。MSSM では、標準模型に含まれる素粒子に対してそれぞれスピンの $1/2$ だけ異なる超対称性パートナー (SUSY) 粒子を仮定し、ボソンとフェルミオンの入れ替えに対応する超対称性を導入した理論である。

ニュートラリーノ

ニュートラリーノは最も軽い超対称性粒子 (lightest supersymmetric particle; LSP) である。MSSM では、SUSY 粒子と標準粒子との相互作用は、R パリティに支配されている。R パリティは

$$R = (-1)^{3B + L + 2S} \quad (1.9)$$

で定義される。B はバリオン数、L はレプトン数、S はスピンである。SUSY 粒子は奇数 (-1)、標準粒子は偶数 (+1) の R パリティを持っている。R パリティ保存に従えば、重い SUSY 粒子はより軽い SUSY 粒子に崩壊し、最も軽いものは安定で無くてはならない。標準粒子に崩壊すると、R パリティが破れてしまうためである。

そこで、ニュートラリーノは暗黒物質の有力な候補と考えられており、その測定を目的とした様々な実験が行われているがまだ発見には至っていない。

1.2 暗黒物質探索実験の現状

現在の暗黒物質探索実験は WIMP を最有力候補と考えて、電氣的に中性で、電磁相互作用をせず、太陽系近傍にある $0.3 \text{ GeV}/c^2/\text{cm}^2$ の密度の粒子の検出に焦点をあてている実験が多い。検出方法は大きく分けて直接検出と間接検出の 2 種類あり、以下で詳細を述べる。

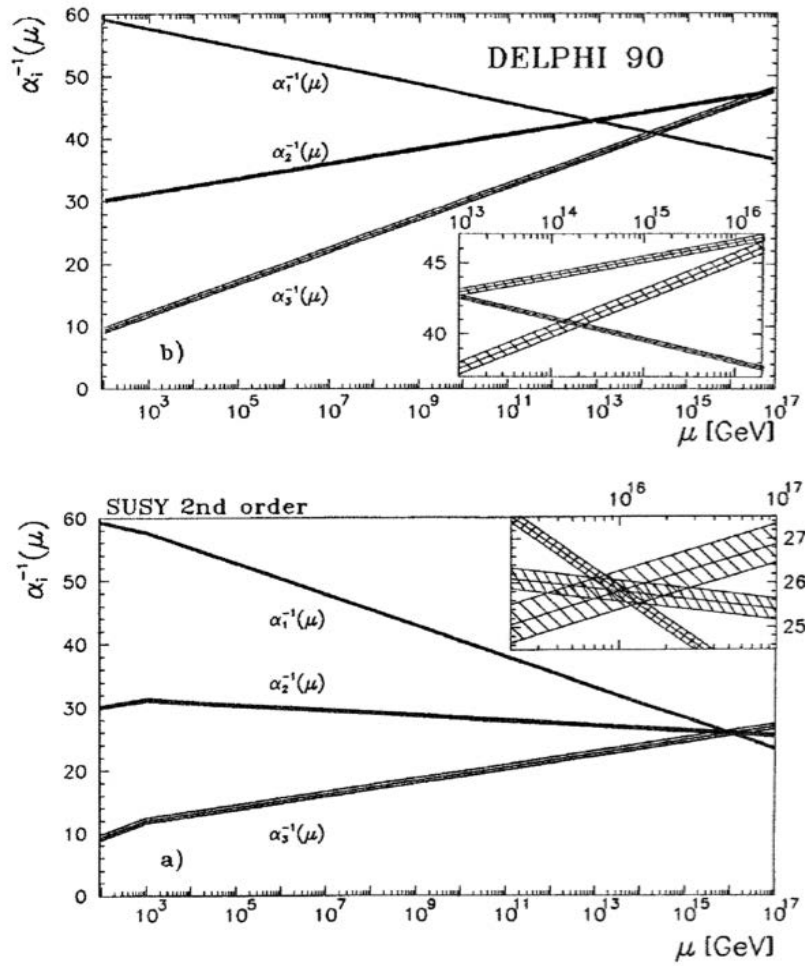


図 1.7: 標準理論と MSSM における 3 つの力の結合定数の関係 [11]

横軸がエネルギー、縦軸は結合定数。3 つの力（電磁気力、弱い力、強い力）の強さを LEP 等で測定し（ 10^2 GeV の部分が観測データ）、繰り込み群方程式を解くことによって高エネルギーでの強さを計算した。標準理論では一致しなかった 3 つの力が SUSY が 1 TeV 付近にあると仮定すると、 10^{16} GeV で統一される。

$\alpha_1^{-1}(\mu)$ は電弱力、 $\alpha_2^{-1}(\mu)$ は電弱力、 $\alpha_3^{-1}(\mu)$ は強い力。

1.2.1 直接検出

直接検出の方法は、WIMP が弱い相互作用によって相手の原子核と弾性散乱し、その原子核が観測可能なエネルギーを放出することで観測できるようになる仕組みである。ただし、WIMP は銀河の重力によって引きつけられているため、相手の原子核に対して相対論的な運動エネルギーは持たない。よって散乱によるエネルギーの伝達は 100keV 以下と大変小さく、実際に観測されるのは数十 keV 以下と考えられている。この低エネルギー領域にはバックグラウンドが多く、WIMP の信号を捕えるのは難しい。よってバックグラウンドを如何に低減できるかが鍵となる。

直接探索検出器は観測する信号別に分類すると、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、混合タイプの 4 つに分類される。近年の傾向として、粒子識別を行うために複数の信号を観測する混合タイプの検出器が高感度を達成するようになってきている。しかし、混合タイプの検出器は検出器構造が比較的複雑になるため大型化が難しく、更なる感度向上に向けた工夫が必要とされる。

WIMP に対する (スピンに依存しない) 検出感度を図 1.8 に示す。暗黒物質の質量を横軸、暗黒物質と核子の反応率を縦軸として示した。各曲線は既存の実験による上限値、グレーの領域は CMSSM の理論で暗黒物質の存在が予想されているところである。以下で図 1.8 を代表的な実験の紹介とともに説明する。

二相式検出器の代表的な実験に XENON100 が挙げられる [12]。図 1.8 では 10^{-44} cm^2 の散乱断面積までを除外し、50GeV/c² の WIMP に対しては最も検出感度が良い結果を出している。二相式検出器は、液相と気相の 2 つを 1 つの検出器で使用する、イオン化とシンチレーションの混合タイプである。液体のシンチレーションの信号を観測する (S1) と共に、弾性散乱時に発生した電子を電場によって気相へ誘導し増幅して観測 (S2) する。この S2/S1 比の違いによって各相互作用を識別する。

ボロメータとイオン化の混合タイプ検出器の代表的な実験として CDMS が挙げられる [13]。図 1.8 では、茶色の曲線で表されている。数年前まで最高感度を持つ実験であったが、大型化が困難な検出器構造のため近年は感度を伸ばせずにいる。CDMS ではゲルマニウムやシリコンの結晶を超低温に冷やして検出器媒体として用いる。イオン化による電子の信号と散乱時に生じる熱による結晶の格子振動からの信号を同時に観測することで、弾性散乱 (シグナル) と電磁相互作用 (バックグラウンド) を識別する。

NaI を用いたシンチレーション検出器の代表的な実験が DAMA/LIBRA である。粒子識別は行わず、太陽の銀河中心に対する回転と地球の公転によって生じる暗黒物質の季節変動観測をターゲットとして観測を行っている。DAMA/LIBRA は 13 年という大変長い期間の観測データを持ち、その結果から 8.9σ で暗黒物質による季節変動を観測したと報告している [14]。それが図 1.8 の赤色で囲った領域である。しかし μ 粒子事象の季節変動等他にも説明できるとの反論もあり、更なる検証を必要としている。

1.2.2 間接検出

WIMP 同士は対消滅を起こすと考えられている。WIMP は天体の重力に引きつけられて存在しているため、大きな質量を持つ天体に集まる WIMP の対消滅は比較的頻繁に起きていると考えられる。そこで、太陽や銀河中心方向からの WIMP 対消滅で生成されたニュートリノを検出することで、WIMP を間接的に検出しようという実験も行われている。

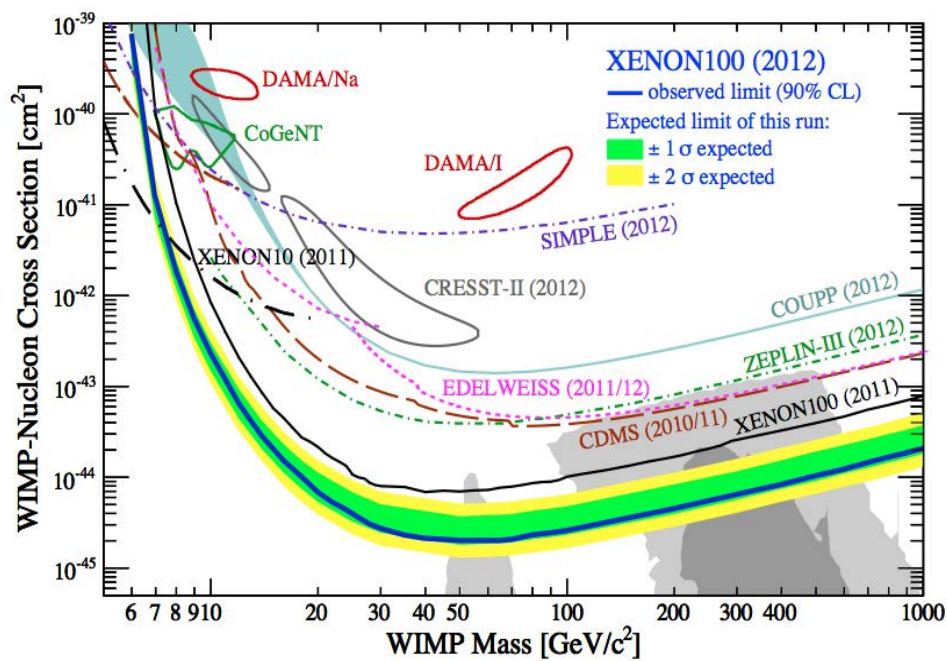


図 1.8: 感度曲線 [12]

暗黒物質の質量を横軸、暗黒物質と核子の反応率を縦軸として示した。50GeV/c² の WIMP に対して最も良い感度を示しているのが青色の曲線 (XENON100) である。グレーの領域は理論で暗黒物質の存在が予言されているところである。

第2章 XMASS実験

2.1 XMASS 検出器

2.1.1 XMASS 実験の目的

XMASS 実験は、液体キセノンを約 1200kg 用いた 1 相式シンチレーション検出器を用いた多目的実験である。検出器は地下約 1000m に設置され、極低バックグラウンド環境を実現している。

XMASS 実験の目的は

- 暗黒物質探索
Xenon detonator for weakly interacting MASSive particle
- 低エネルギー太陽ニュートリノ
Xenon MASSive detector fot Solar neutrino
- ニュートリノレスダブルベータ崩壊
Xenon neutrino MASS detector

であり、XMASS 実験という名称の由来にもなっている。どの項目にもあるようにこの実験の鍵を握るのは液体キセノンである。液体キセノンの詳細は 2.2 章で述べる。

2.1.2 検出原理

検出媒体に液体キセノンを用いて、暗黒物質やその他粒子、放射線等によるキセノン原子との相互作用によって発生したシンチレーション光を光電子増倍管 (PMT) を用いて観測する。シンチレーション発光の原理は図 2.1 のようにイオン化と原子の励起という 2 通りある。これらは最終的に波長 175nm の紫外線を出すため PMT で捕えることができる。ただし、WIMP のような重い粒子が衝突した際にはキセノン原子核の励起が起こるが、その後反跳された原子核が周囲のキセノンをイオン化するため、結局両方のプロセスが起こる。

2.1.3 検出器

XMASS 検出器は 2000 年に提案されてから 2009 年に東京大学宇宙線研究所の神岡宇宙素粒子研究施設で建設が始まり、2010 年に完成した。神岡地下約 1000m の実験室に設置され、極低バックグラウンドが特徴の大容量液体キセノンシンチレーション検出器である。検出器は大きく 2 つの構造体に分けられる。1 つは内部検出器 (800kg 検出器)、もう 1 つは外部検出器 (OD) である。図 2.2 に XMASS 検出器の 2 つの構造体を示す。800kg 検出器は 642 本の PMT が球型に取り付けられ、内部は -100°C に保たれた液体キセノンで満たされている。OD は 72 本の 20 インチ PMT が取り付けられた水タンクであるが、そのちょうど中心部に 800kg 検出器がある設計になっている。OD は宇宙線 μ

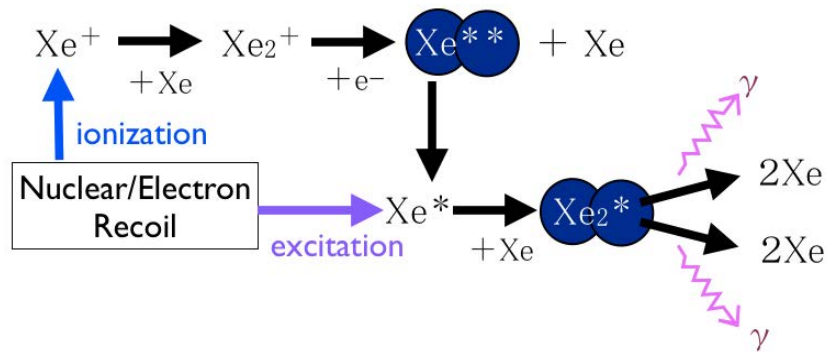


図 2.1: キセノンのシンチレーション光発生仕組み

粒子や γ 線、中性子線の遮蔽体に用いられている。

OD (水タンク、20 インチ PMT)

約 800 トンの純水で満たされた円筒型水タンクが、800kg 検出器を囲むように設置されている。水タンクは高さ 10.5m、直径 10m で、放射性物質の遮蔽体として用いられる。水の遮蔽体が鉛や銅の遮蔽体よりも適しているのは、宇宙線 μ 粒子から中性子がほとんど生成されず、高速中性子を低減できるためである。中心部に設置された ID は全方向から 4m の厚みの水シールドで囲まれていることになる。シミュレーションでは 2m の水シールドがあれば ID の PMT に寄与しないレベルまで γ 線を減少させることができるため 4m の水シールドタンクは十分に大きい。また、72 本の 20 インチ PMT は浜松ホトニクス社製の HAMAMATSU R3600 はタンクの内部表面に装着されており、宇宙線 μ 粒子によるチェレンコフ事象の排除に使用されている。

800kg 検出器

800kg 検出器は Inner Vacuum Chamber(IVC) と Outer Vacuum Chamber(OVC) からなっており、IVC の中には 630 本の六角形の PMT(HAMAMATSU R10789-11) と 12 本の円形 PMT(HAMAMATSU R10789-11MOD) が無酸素銅ホルダーに取り付けられている。ホルダーは図 2.3 のように直径 80cm の球体に近い形であるが、正確には五方十二面体 (pentakis dodecahedron) と呼ばれる、60 個の二等辺三角形でできた多面体になっている。六角形の PMT を使って陰極部分の面積を広げることで、約 7 割の高い光電面被覆率を達成している。IVC 内部全体が液体キセノンに浸されており、IVC を囲む外側の容器：OVC は断熱真空を保つためのものである。

極低バックグラウンド PMT

XMASS 実験では、極力バックグラウンドを低減するため、浜松ホトニクス社と PMT を開発した。放射性同位体の含有量は市販の PMT より約 1/10 少ない。XMASS 検出器の光電面被覆率を高くするために、六角形 (R10789-11) と円形 (R10789011MOD) が用いられているが、どちらも基本性

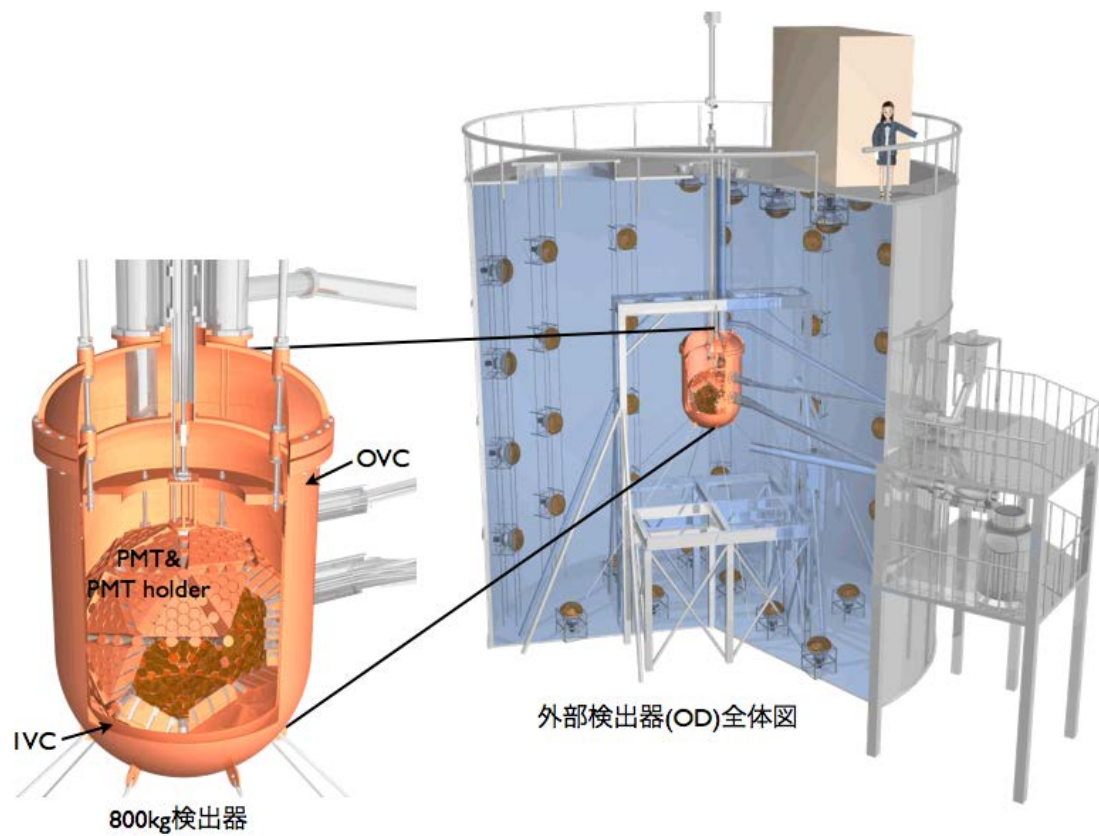


図 2.2: XMASS 検出器



図 2.3: XMASS 検出器

能は同じである。-100 °Cのキセノン温度でも動作し、液体キセノンのシンチレーション光を観測できる。図 2.4 は六角形 PMT の写真である。光電面にバイアルカリを用いて、真空紫外光でも垂直入射に対して約 30 %の量子効率 (QE) を実現している。単一光子におけるパルスの半値幅は 12ns 以下である。電流増倍率は約 1500V の印加電圧で 1×10^7 が得られる。暗電流パルスは 25 度で 2000Hz 以下、-5 度で 200Hz 以下の仕様となっているが、液体キセノン温度下における測定ではこれより一桁低いノイズレートが実現された [15]。

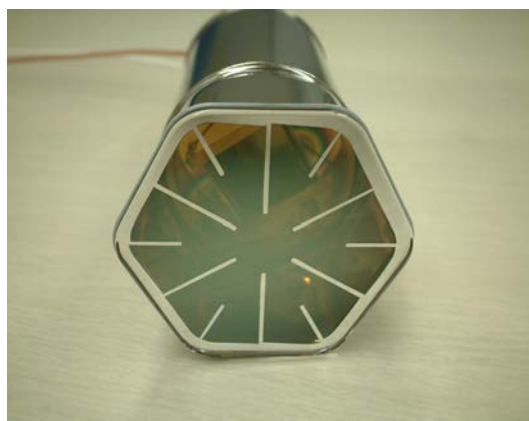


図 2.4: 六角形 PMT(R10789-11)

データ取得回路

図 2.5 にデータ収集システムの全体像を示す [16]。ID からの 642 本の PMT の信号は同軸ケーブルとフィードスルーを通してエレクトロニクスハットに送られる。ID の信号は増幅、分割され、Analog-timing-modules(ATMs)[17] と CAEN V1751 flash analog-to-digital converter(FADC) に入れられる。ATMs はもともと Super-Kamiokande で開発、使用されていたものを XMASS 実験で再利用している。ATM は Analog-to-Digital Converter(ADC) による電荷積分情報と、Time-to-Digital Converter(TDC) による時間情報を同時に取得することができる。FADC はバックグラウンドの更なる理解と暗黒物質のシグナル探索のために 2011 年 12 月に導入された。OD からの 72 本の PMT シグナルもエレクトロニクスハットで処理されデジタル化されて、ATM で記録される。

ATM の出力信号は HITSUM と呼ばれ、トリガーロジック回路を通してグローバルトリガー信号が生成される。OD のためのトリガー条件は 2011 年 09 月 28 日までは 9 ヒットで、OD ATM ボードで OD 信号からアナログ方式で作られる。ID と OD に対する典型的トリガーレートはそれぞれ 4Hz と 7Hz である。ID と OD トリガー信号は、VME トリガーモジュール (TRG) に入れられる。TRG も、Super-Kamiokande で使用されていたものである。TRG モジュールは 20ns の分解能を持っており、トリガー時間・トリガータイプ・事象数を同時に記録する。多数のアフターパルスによるトリガーを避けるため一度トリガー信号を出力したあとは 6 μ 秒の間 veto が適用され、新しいトリガーはかからない。

ATM が出力する PMTSUM 信号とは 1 つのボードの 12 チャンネルのアナログ信号の和で 8 分の 1 にしたものである。XMASS では 60 枚の ATM ボードがあるため、60PMTSUM 信号は CAEN V1721 FADCs(500MHz サンプリングレート) に入る。

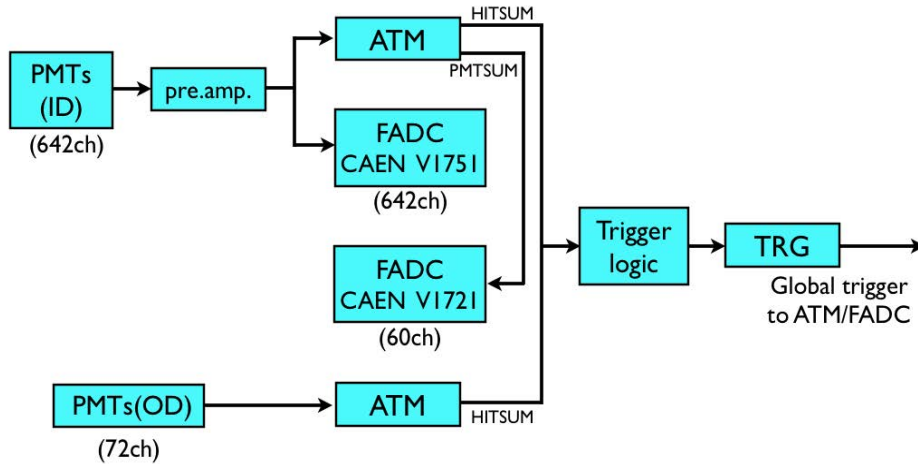


図 2.5: データ収集システム

キャリブレーション

キャリブレーションシステムはタンクトップに設置されており、800kg 検出器と繋がっている。よって線源を 800kg 検出器の内部に入れ、キセノン中の放射性不純物を仮定して測定することが可能となる。内部に線源を入れるための銅ロッドは 800kg 検出器の中央の鉛直方向に沿って設置されており、1mm の精度で線源の場所を決めることができる。また、800kg 検出器の外にもキャリブレーション用の U 字型をしたホースがあり、ホースに沿って線源の場所を変えることができる。

表 2.1 に線源とエネルギー対応表をまとめた。

表 2.1: キャリブレーションソースとエネルギー

*印はそれぞれ ^{109}Cd と ^{57}Co の線源の容器に使用されている銅とタングステンからの K_{α} X 線である。

線源	エネルギー [keV]
^{55}Fe	5.9
^{109}Cd	8*, 22, 58, 88
^{241}Am	17.8, 59.5
^{57}Co	59.3*, 122
^{137}Cs	662

観測結果

XMASS 実験の現在の WIMP に対する (スピンに依存しない) 観測結果を図 2.6 に示す。暗黒物質の質量を横軸、暗黒物質と核子の反応率を縦軸として示した。図 1.8 で説明したように、DAMA が季節変動を観測した領域がグレーや緑色で示されており、同じように季節変動を観測した CoGeNT や CRESST の結果が領域で示されている。XMASS 実験では既に DAMA の一部領域を排除しており、特に低エネルギー領域で既存の実験より高い感度を達成することを目指している。図 2.6 は全体

積を使った解析であるが、今後有効体積のみを用いた解析によって図 2.7 で期待される領域まで感度を上げていく予定である。

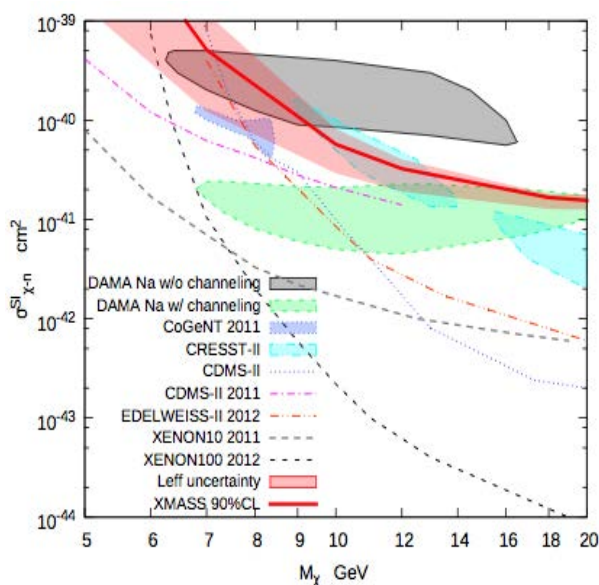


図 2.6: 現在の観測結果 [18]

スピンに依存しない観測結果を暗黒物質の質量を横軸、暗黒物質と核子の反応率を縦軸として示した。赤の曲線が XMASS 実験で、全体積を用いた解析による結果である。

期待される信号

XMASS 実験の目的ごとに期待される信号を図 2.7 に示す。青は 10^{-42}cm^2 の断面積、クエンチングファクター 0.2、そして質量 50GeV と 100GeV 両方を仮定した WIMP がキセノンと弾性散乱した際に 800kg 検出器で観測することが期待される信号である。また、pp と 7Be それぞれの太陽ニュートリノに対しては緑で示してある。検出器デザインでは、検出器中心から半径 20cm 以内に侵入する γ 線が赤、30cm が黒となるため、デザイン通りのバックグラウンドレベルで有効体積のみを用いた解析では、低エネルギー領域で暗黒物質の信号が観測できると考えられている。

2.2 液体キセノン

2.2.1 液体キセノンを利用する利点

液体シンチレーターにキセノンを用いたのは、以下に述べるような特長があるためである。

- 高純度

キセノンにはいくつかの放射性同位体が存在するが、どれも短寿命であるため中性子の当たらない環境に保管しておくことで低減できる。また、放射性でないものなどの不純物の純化も液相、ガス相のどちらでも行うことができる。安定同位体の中にはスピンを持つものがあり、暗

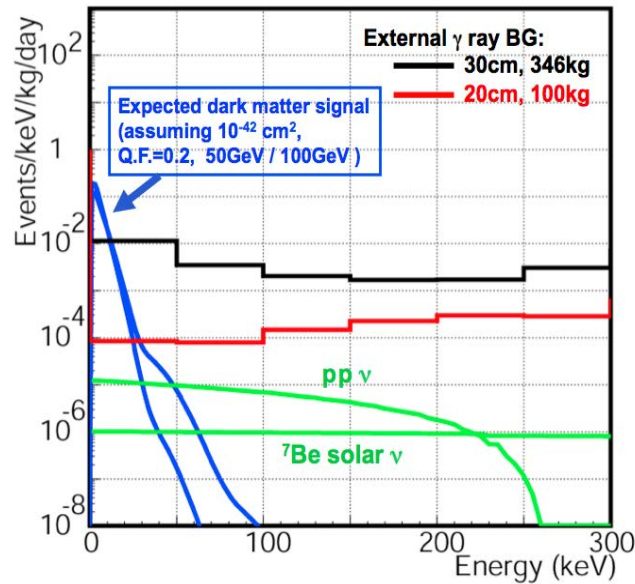


図 2.7: XMASS 検出器で期待されるシグナル

黒物質探索実験においてスピンに依存する相互作用と非依存の相互作用の断面積の両方を探索できる。

表 2.2: キセノンの同位体自然存在比

Xe 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

- 高密度 ($3\text{g}/\text{cm}^3$) と大きい原子番号 ($Z=54$)
液体で約 $3\text{g}/\text{cm}^3$ の密度を持つため、検出器をコンパクトにできる。また、液体シンチレータとして用いられる元素は Ne、Ar、Xe があるが、その中でも一番大きい原子番号であり、外部からの γ 線を急激に減衰することができる自己遮蔽能力を持つ。
- 高発光量 ($\sim 42,000\text{photon}/\text{MeV}$)
シンチレーション発光において、1MeV のエネルギーに対して約 42,000 個の光子を放出する。これも他の液体シンチレータより多く、検出器の閾値を下げることができ、エネルギー分解能も高くなる。暗黒物質によるシンチレーションの信号は数十 keV 程度以下ため、閾値を下げることは大変重要である。
- 長波長 (175nm)
キセノンの発光波長は他の希ガスシンチレーター (Ar $\sim 128\text{nm}$) と比べて長波長であり、真空紫外領域にある。よって波長変換材を用いなくても PMT で直接観測が可能である。よって変換材による損失無く光子を捕えることができ、変換材起源の放射性物質などのバックグラウン

ドの恐れもない。

- 比較的扱いやすい温度で状態変化させることが可能

図 2.8 はキセノンの相変化である。キセノンの液体相は 1 気圧下で 165K で、他の希ガスより高温であるため扱いやすい。XMASS 実験では-100 度(=173K) でキセノンを運用しており、-100 度は気相と液相の境界付近に位置するため、気化、液化が容易に行えるという利点がある。よって純度を保ったまま長時間の連続運転が可能となる。

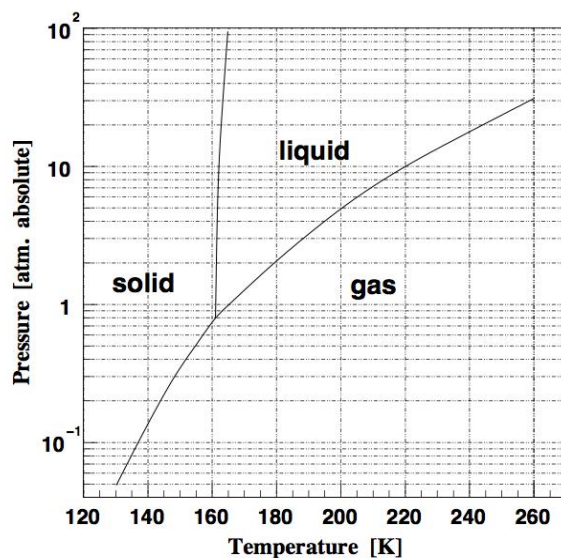


図 2.8: キセノン相変化

2.2.2 キセノン純化方法

図 2.9 は、キセノン純化システム全体の模式図である。キセノンの純度を保つことは XMASS 実験にとって非常に重要である。キセノンは実験前は液体キセノン貯蔵タンク (Liquid xenon reservoir tank) に入れられ、冷凍機と真空断熱材によって一定の温度に保たれている。800kg 検出器 (ID) に液体キセノンを満たすときは、ロッドヒーターを使って貯蔵タンクで蒸発させる。キセノンガスは 2 つの直列に繋がれたゲッターによって純化される。最初のゲッターは高温で制御されており、2 つめのゲッターは水素の不純物を取り除くのに都合が良いよう室温で制御されている。キセノンガスは液体窒素によって-100 °Cに冷却され、2 つの冷凍機によって液化される。この作業は 5 日かかる。キセノンを 800kg 検出器から回収する場合には、800kg 検出器から貯蔵タンクまで 2L/m の液体フローレートで回収する。約 3 時間でキセノン収集は完了する。冷凍機が故障した場合などの緊急時には、液体窒素を使って冷却し、2 つの 10m³ 緊急ガスタンクにキセノンを集める。また、800kg 検出器の液体キセノンは液体キセノン循環器とフィルターを使って循環、純化ができる。循環スピードは液体で 2L/m。液体ラインは PMT ホルダーの inside/outside や top/bottom から循環器までつながっている。

液体キセノン中のラドン濃度は XMASS 検出器で記録されたデータから、 ^{222}Rn に対して 800kg 検出器全体で $7.8 \pm 0.5 \text{mBq}^1$ 、 ^{220}Rn に対して、 0.28mBq 以下であると見積もられた。ラドンによる BG レベルは十分低いと考えられる。さらなるスタディは 5 章で述べる。

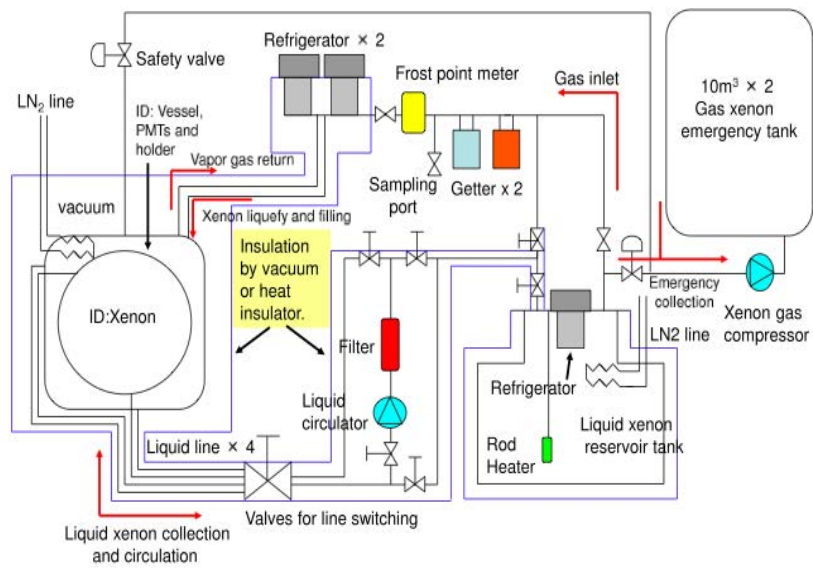


図 2.9: キセノン純化システム

¹公式に発表した数字は $8.2 \pm 0.5 \text{mBq}$ となっているが [27]、これには PMT のヒット数が少ない場合の事象をカットした efficiency を 5% 含んでいる値である。しかし、その後の研究により実際にはこの効果は含まれていないことがわかった。よって本論文では $7.8 \pm 0.5 \text{mBq}$ を採用する。

第3章 バックグラウンドとその低減

3.1 バックグラウンドの種類

暗黒物質の反応頻度は稀である上に、検出されるエネルギーが小さい。よって少ない信号を正確かつ確実に捕えるためには、バックグラウンドの低減が重要となる。そこで、バックグラウンドの種類とその低減方法について説明する。まず、バックグラウンドは以下のように分類できる。

- 外部バックグラウンド
 - －検出器外からのバックグラウンド
 μ 粒子、中性子、 γ 線、ラドン
 - －検出器自身からのバックグラウンド
 γ 線、 ^{210}Pb 、 ^{238}U 、 ^{14}C
- 内部バックグラウンド
 - －キセノン中バックグラウンド
 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{85}Kr

検出器自身のバックグラウンドのうちいくつかは、2012年から行なっている検出器の改良によって取り除く予定である。以下、各バックグラウンドについて詳しく述べる。

3.2 外部バックグラウンド

外部バックグラウンドとは、液体キセノンの外部からの放射線のことである。大きく検出器からのバックグラウンドと検出器外からの環境放射線バックグラウンドに分けられる。

3.2.1 検出器外からのバックグラウンド

検出器外からのバックグラウンドを表3.1にまとめた。この表の項目について説明する。

宇宙線 μ 粒子

エネルギーの高い宇宙線は、地球の大気と反応してエネルギーの小さいものへ崩壊してゆく。2次宇宙線として発生する μ 粒子が検出器付近の物質と反応して生成する放射性同位体は暗黒物質探索のバックグラウンドとなりうるが、XMASS実験では神岡地下約1000mに検出器を設置しているため、山が遮蔽体となって μ 粒子を約 10^{-5} 倍に減らすことができる。

表 3.1: 神岡地下実験施設における主なバックグラウンド

	地上	神岡地下実験施設
宇宙線 μ [$cm^{-2}s^{-1}$]	1.1×10^{-2} [19]	$\sim 10^{-7}$ [19]
熱中性子 [$cm^{-2}s^{-1}$]	1.4×10^{-3} [20]	8.3×10^{-6} [21]
熱以外の中性子 [$cm^{-2}s^{-1}$]	1.2×10^{-2} [20]	1.2×10^{-5} [21]
ラドン (夏)[Bq/m^3]	0 ~ 10	~ 2000 [19]
ラドン (冬)[Bq/m^3]	0 ~ 10	40[19]
環境 γ 線 (>500keV)	-	0.71[22]

環境中性子

中性子の大きな特長は電荷を帯びていないためクーロン相互作用しないことである。よって物質の透過性が大きく厄介なバックグラウンドといえる。これらの中性子が作られる原因は (1) μ 粒子が岩盤中で原子核破砕反応を起こすことによるもの、(2) 岩盤に含まれる U、Th から核分裂によるもの、(3) 岩盤に含まれる U、Th が崩壊するときに発生する α 線が岩盤と反応することによるものが考えられる。中性子の遮蔽は水が最も効果的である。中性子は電磁相互作用はしないが、中性子と同程度の質量を持つ他の物質と弾性散乱させることで大きくエネルギーを失う。この他の物質に適しているのが水分子中の水素原子核 (陽子) である。よって XMASS 実験では、直径 10m、高さ 10m の円柱型水タンクを検出器の周囲に設置することによって中性子を遮蔽できる。

環境 γ 線

γ 線は、中性子と同様、岩盤に含まれる U、Th から核分裂する際に発生する。水シールドで大半は遮蔽され、残りは液体キセノンの自己遮蔽能力 (3.2.2 章参照) によって有効体積内には侵入できない。

環境ラドン

季節によって変動はあるが、地上よりも神岡坑内のラドン濃度は高い。これは岩盤に含まれる U 系列から放出されたラドンが坑道内に溜まっているためであると考えられる。そこで、地上の空気中のラドンを活性炭で取り除いた Super Rn Free Air で OD 内部の検出器と空気が接触する空間を満たすことによって、地上よりもラドン濃度が少ない環境を作っている。

3.2.2 構造物からのバックグラウンド

PMT からのガンマ線

外部からのバックグラウンドは OD で遮蔽できる。しかし、800kg 検出器内部に存在するバックグラウンドは直接キセノン中に放出されるため問題となる。XMASS で使用する PMT は放射性不純物をできる限り減らした極低バックグラウンドの PMT であるが、それでも PMT は検出媒体となる液体キセノンに接しており、その数も多いため XMASS 実験にとって主要なバックグラウンド源となる。ゲルマニウム検出器で放射性物質を測定したところ PMT に含まれる ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{40}K 、 ^{60}Co から発生する高エネルギーの γ 線が検出された。コミッションングランの間のデータを解析すると、

PMT の body に使われている Kovar と PMT の body と窓の間に使われているアルミニウムが γ 線の原因となっている。ただし、窓の正面で起こったバックグラウンド事象は PMT のヒットパターン解析によって除外できる [16]。

また、液体キセノンは高密度で、大きい原子番号を持つため、シンチレーターでありながら遮蔽体としても振る舞う。このことを液体キセノンの自己遮蔽能力と呼ぶ。自己遮蔽能力のシミュレーションを行ったものが図 3.1 である。青色が γ 線の軌跡、中心のピンク色部分は XMASS 検出器の有効体積部分を表している。このシミュレーションでは液体キセノン表面から ^{238}U を崩壊させて、放出されるガンマ線がどの程度液体キセノンの有効体積まで届くのかを示している。この液体キセノンの自己遮蔽によって、半径 20cm の有効体積では 100KeV 以下のエネルギー領域において、目標バックグラウンドレベル (図 2.7 の赤線) の $10^{-4}\text{event/day/kg/keV(dru)}$ を十分に下回る [23]。

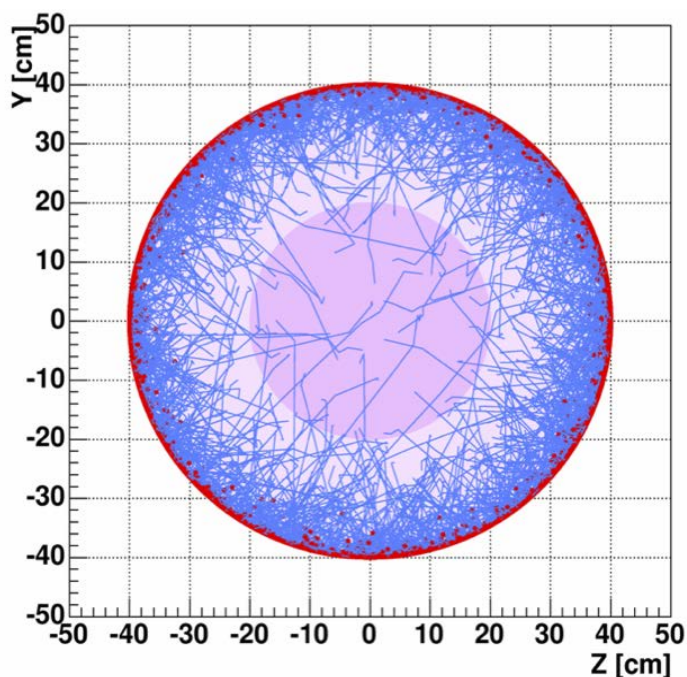


図 3.1: キセノンの自己遮蔽能力のシミュレーション

^{210}Pb

FADC を使った粒子識別によって 800kg 検出器の IVC 内部に使用されている無酸素銅表面に ^{210}Pb が付着していることがわかった。検出器製作時から付着していた ^{222}Rn の娘核種の可能性が高く、 ^{210}Pb 換算で約 40mBq 相当存在する。これらは銅表面を電解研磨によって洗浄することで除去が可能である。実際に電解研磨によって ^{210}Pb 、 ^{210}Po の洗浄に効果があるかは現在試験中である。

アルミニウムからの放射性物質

図 3.2 は PMT に使用されているアルミニウムシールの写真である。アルミニウムは PMT 窓に約 200g 使用しており、 ^{238}U 、 ^{210}Pb が多く含まれることがわかった。アルミニウムを覆うカバーを装

着することで防ぐことができる見込みである。



図 3.2: PMT に使用されている Al シール

図 3.3: GORE-TEX®

GORE-TEX® からの放射性物質

図 3.3 は PMT とホルダーの間に使用されている GORE-TEX® の写真である。GORE-TEX® は背面からの光漏れ対策として約 120g 使用しており、 ^{14}C 、 ^{210}Pb を含む可能性がある。GORE-TEX® は今後撤去される予定である。

3.3 内部バックグラウンド

内部バックグラウンドとはキセノン内部のバックグラウンドである。検出器の有効体積内に存在するため、遮蔽することができない。よってこれらをキセノン中から除去することが重要である。

^{85}Kr

^{85}Kr は、市販のクリプトン低減キセノンガス中に約 0.1ppm 含まれる。 ^{85}Kr の β 崩壊は、暗黒物質の観測で重要なエネルギー領域に影響するためバックグラウンドとなる。 ^{85}Kr の低減方法は蒸留である。クリプトンとキセノンは沸点が異なるため、蒸留によって分離することができる [24]。蒸留後、XMASS 検出器中のクリプトン濃度は上限値で <2.7ppt となった。

ラドン

^{222}Rn は ^{238}U の娘核種で、放射性的の希ガス元素である。発生した ^{222}Rn は検出器内外を浮遊し、やがて液体キセノン中に溶け込むため除去が必要となる。XMASS 実験では ^{222}Rn の除去に活性炭を用いた装置が開発された [25]。本論文では ^{222}Rn 濃度の見積もりと、ラドン除去装置の改良について

て述べる。また ^{222}Rn の詳細の議論は 3.4 章で行う。

トリウム系列の ^{220}Rn については既に測定され (2.2.2 章参照)、バックグラウンド目標値に比べて十分に少ないことがわかっている [27]。

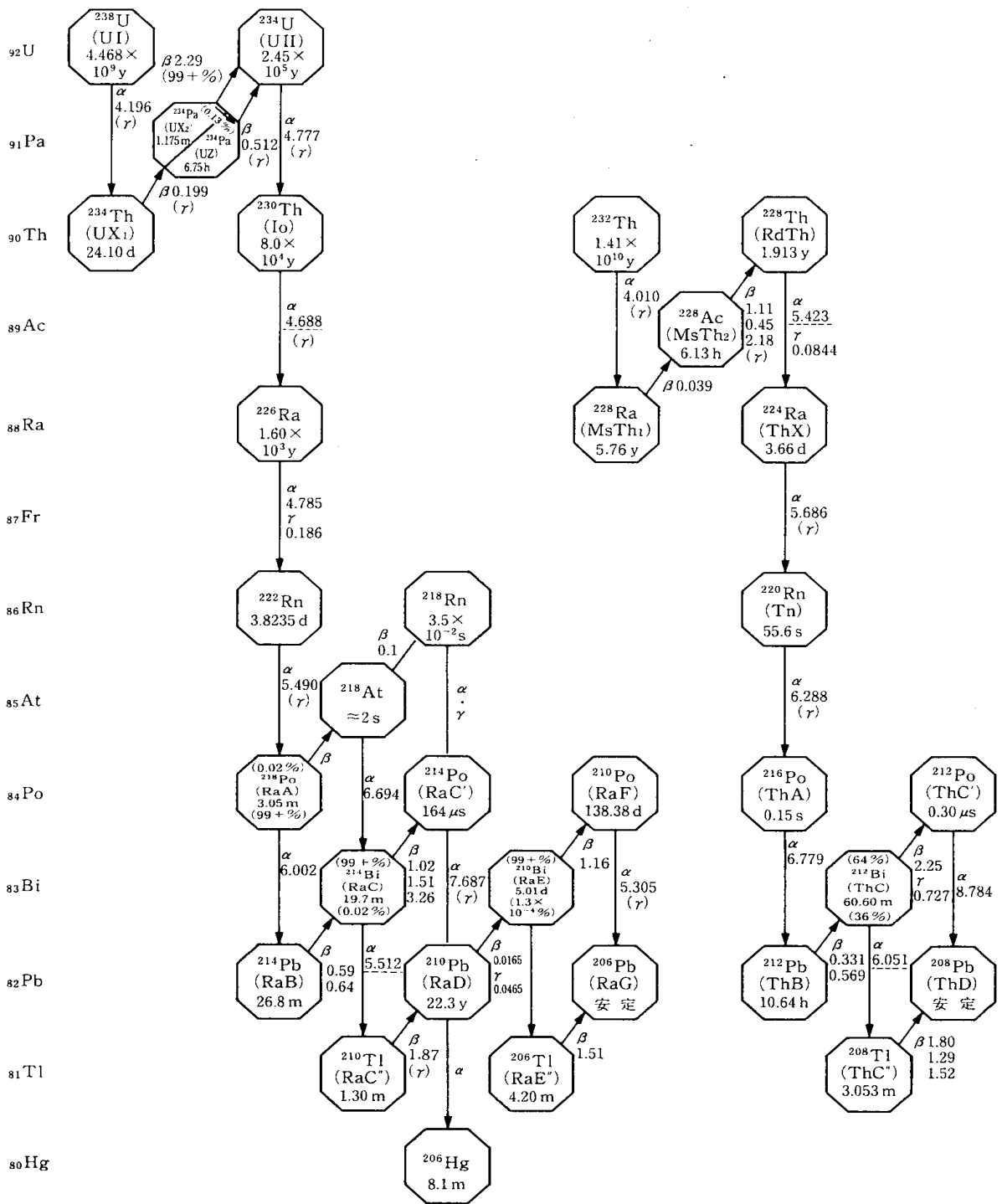
3.4 ^{222}Rn

^{222}Rn はラドンの放射性同位元素の 1 つで、他の物質と化学反応をほとんどしない希ガスの原子配置を持っている。図 3.4 はウラン系列 (左) とトリウム系列 (右) の崩壊系列を示す。 ^{222}Rn の半減期は 3.82 日で、ウラン系列に分類され、放射線を出しながら安定な ^{206}Pb になるまで崩壊する。 ^{238}U は半減期 4.468×10^9 年を持つ放射性同位体であるが、一部の壊変した U238 は半減期 1.60×10^3 年の ^{226}Ra で存在しており ^{238}U との放射平衡は成立していない可能性がある。よって ^{222}Rn の親は ^{226}Ra であり、濃度は ^{238}U とは個別に測定する必要がある。 ^{226}Ra から気体の状態で放出される ^{222}Rn は半減期が比較的長い不活性ガスであるため検出器から遠い部材でも発生場所に関わらずキセノンに溶けて検出器の有効体積内に存在する。よって、XMASS 実験において重要な内部バックグラウンドとなっているのである。

表 3.2 は、XMASS 検出器構成材料から発生する ^{222}Rn の量を見積もったものである。主要な放出源は PMT のケーブルであることがわかった [15]。

表 3.2: XMASS 検出器構造物から発生するラドン量

相	材料	^{222}Rn 濃度 [mBq/使用量]	total[mBq/使用量]
気体	H.V./signal connector	< 1.18	< 1.61
	H.V./signal feed through	< 0.09	
	monitor feed through1	0.06 ± 0.01	
	monitor feed through2	< 0.11	
	monitor pin	0.05 ± 0.02	
	source introducer	< 0.76	
気体と液体	H.V. cable	< 9.1	< 10.67
	signal cable	< 3.4	
	monitor cable1	0.57 ± 0.3	
	monitor cable2	< 0.25	
	SUS welding	0.58 ± 0.23	
	fiber scope	< 1.02	
液体	thermometer	< 0.12	< 16.75
	PMT base	< 10.9	
	PMT	< 12.7	
	GORE-TEX [®]	< 1.9	
	connector pin	< 0.31	
	LED holder(PTFE)	< 1.25	
	total	< 19.09	



ウラン系列 (4n+2) 系列

トリウム系列 4n 系列

図 3.4: ラドン崩壊系列 [26]

3.5 バックグラウンドの評価

ここではXMASS実験におけるバックグラウンドを評価する方法について述べる。図3.5は、XMASS検出器における3GeVまでのバックグラウンド、図3.6は、100keV以下のバックグラウンドを拡大して示してある。黒は、約5.7日分のノーマルランのデータで、800kg検出器内に存在している事象から、チェレンコフ事象によるノイズや、ラドンによる連続的に起こる事象を除いたものである。その他の色はバックグラウンド別に色を分けて示してある。1~3MeVの高エネルギー領域ではPMTからの γ 線(黄)が主なBGとなり、5keV~1MeVの中間エネルギー領域ではアルミニウム及び銅表面(濃緑)からのBGが主となっており、5keV以上のエネルギー領域ではデータ(黒)とモンテカルロ・シミュレーション(その他色)は一致している。しかし、5keV付近の観測データにおいて主なBG源は当初から予想されていたPMTからの γ 線(黄)と考えられていたが、実際には新しく見つかったPMTのアルミニウムからの放射性物質や、無酸素銅表面の ^{210}Pb によるバックグラウンドが大きな割合を占めていた。

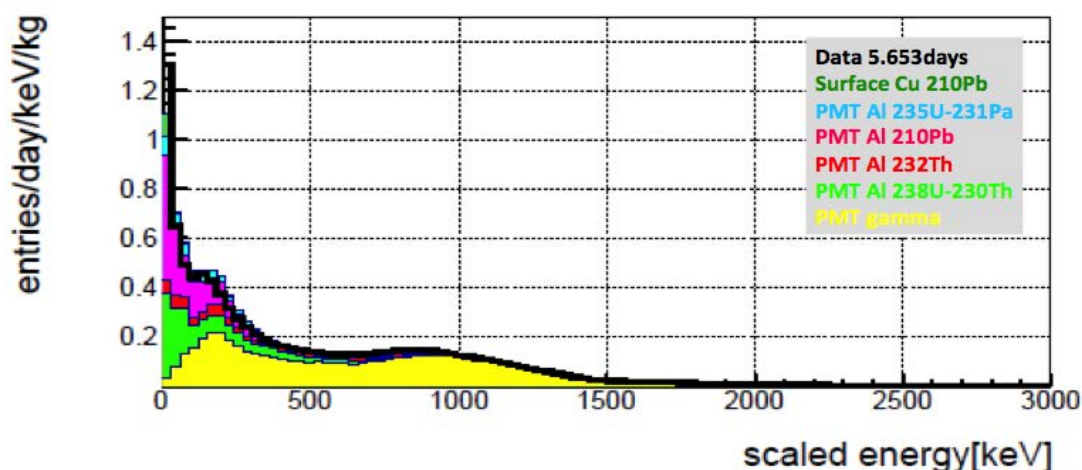


図 3.5: 3GeV までのバックグラウンド [27]

黒は、800kg 検出器内の全事象から、チェレンコフ事象によるノイズや、ラドンによる連続的に起こる事象を除いたデータである。黄色は当初から予定されていたPMTからの γ 線、その他の色は新しく見つかったPMTのアルミニウムや銅表面の鉛からのバックグラウンドを示す。

また、5keV以下のバックグラウンドについてさらに詳しく解析したところ、データ(黒)で存在するが、モンテカルロで示されていない(色のついていない)部分はGORE-TEX[®]が有力なBG源である可能性が高いことがわかった。ただし、GORE-TEX[®]内のキセノン発光プロセス、透過率、modern carbon含有率に不定性が残っている。よって検出器の改良ではGORE-TEX[®]を除去する予定である。原理上、以上のバックグラウンドは事象再構成で除去することが可能であるはずである。しかし、PMTの死角で発生した事象については正確に事象再構成されないものも存在している。

表 3.3 に現在存在しているバックグラウンドをまとめた。

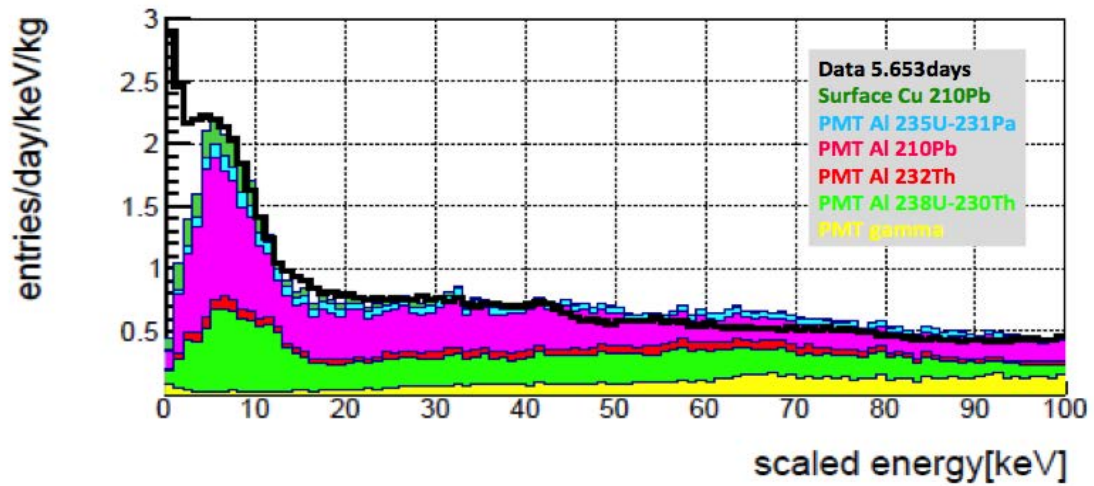


図 3.6: 100keV 以下のバックグラウンド [27]

図 3.5 の 100keV 以下を拡大した 800kg 検出器内のバックグラウンドである。5keV 以上のバックグラウンドについては理解できているが、5keV 以下はモンテカルロとデータが一致していない。

表 3.3: XMASS 実験におけるバックグラウンドの見積もり [27]

材料	RI	濃度 [mBq]
PMT	^{238}U	0.704 ± 0.28
	^{232}Th	1.51 ± 0.31
	^{60}Co	2.92 ± 0.16
	^{49}K	9.10 ± 2.15
PMT Al(210g)	^{238}U - ^{230}Th	$1.5 \times 10^3 \pm 0.4 \times 10^3$
	^{210}Pb	$5.6 \times 10^3 \pm 2.3 \times 10^3$
	^{232}Th	96 ± 18
	^{235}U	67
検出器表面	^{210}Pb	40
GORE-TEX [®] (120g)	^{14}C	$0.4 \times 10^3 \pm 0.2 \times 10^3$
	^{210}Pb	1.02
Xe 中 RI	^{85}Kr	< 2.7 [ppt]
	^{214}Pb	7.1

第4章 キセノン中のラドン測定

4.1 目的

ラドンが XMASS 検出器材料から連続的に供給されることは第3章で述べた。希ガスであるラドンはキセノン中に溶け込み、主要なバックグラウンドとなる。よって 800kg 検出器内のラドン濃度を測定することは非常に重要である。これまでに XMASS 実験で気体キセノン中のラドン濃度、液体キセノン中のラドン濃度は既に測定されており、少量ながら 800kg 検出器内にラドンが存在していることが確認された [27]。しかし、以前の測定では半数の PMT のゲインを 1/20 に落とした約 2 日分のデータからラドンを弁別して濃度を測定をした。これは PMT のサチュレーションを防ぐために行った手法である。本論文ではゲインを下げずにジャンクランを取り除いたノーマルラン約 30 日分のデータを用いて、また新しい弁別条件を用いてラドンを弁別し、その濃度測定を行った結果を述べる。

本研究では、純度の高い ^{214}Bi の選定を行い、 ^{222}Rn 濃度を見積もることを目的とする。この研究が有意となるのは、XMASS の再構成性能評価の、1つのコントロールサンプルとして ^{222}Rn の娘核を用いた方法が挙げられること、また、キャリブレーションソースの設置できる中心軸上に無い、一様と考えられる ^{222}Rn の娘核の事象を調べることで、再構成性能を中心軸上較正のみである線源較正とは相補的に調べることが可能となる可能性がある。

XMASS 実験のデータで重要となるのは、10keV 以下程度の低エネルギー領域である。なぜなら、暗黒物質とキセノンのシンチレーション光による信号が観測できるのがこの範囲だからである。しかし、今までに低エネルギー領域の信号がどのように観測されるのか実際のデータで確認されていない。というのも、暗黒物質のように一様に存在するものであっても再構成のプログラムの癖のため一様分布に見えない可能性がある。そこで、 ^{214}Bi は β 崩壊をするため低い領域にもエネルギーを落とすこと、また、検出器に一様に存在することから、XMASS 実験にとって重要な役割を果たすコントロールサンプルとなる。

4.2 ラドン娘核候補の弁別

図 3.4 にウラン系列とトリウム系列の崩壊系列を示す。ウラン系列において、 ^{222}Rn の娘核種の ^{214}Bi と ^{214}Po に着目する。 ^{214}Po の半減期が $164 \mu\text{s}$ と非常に短いために ^{214}Bi の $\beta + \gamma$ 崩壊 (^{214}Bi は 99% 以上が β 崩壊) と ^{214}Po の α 崩壊が連続的に起こる。また、 ^{214}Po から放出される α 線は 7.69MeV と ^{214}Bi の β 崩壊に比べて高いエネルギーを持つ。これら特徴を用いて、BiPo 事象を弁別する。

解析的弁別条件

解析は以下の流れで進める。

1. チェレンコフライク事象のカット
2. TDC ヒットタイミングによるノイズ事象のカット
3. 1 事象目と 2 事象目の事象間の時間差を用いたカット
4. 2 事象目の光量を用いたカット

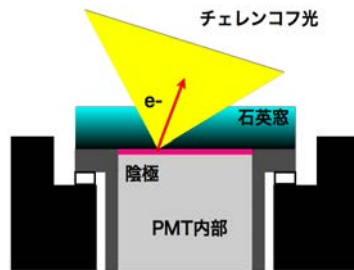


図 4.1: チェレンコフライク事象概念図

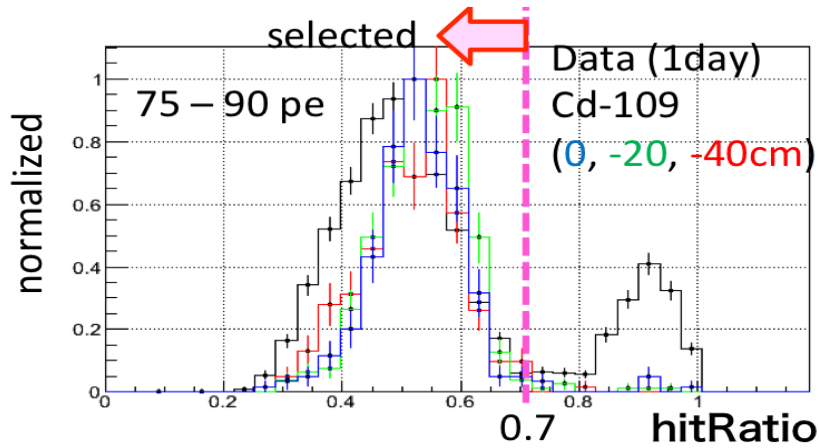


図 4.2: チェレンコフライク事象

黒が ^{109}Cd でキャリブレーションしたデータで、青、緑、赤はシミュレーションによってそれぞれ検出器の中心から鉛直軸方向に 0cm、-20cm、-40cm からガンマ線を発生させたものである。

1. チェレンコフライク事象カット

暗黒物質の信号はシンチレーション光で観測されるが、物質中を通過する電子が光速を超えるとときに発生するチェレンコフ事象がバックグラウンドとして存在している。XMASS 実験では図 4.1 のように、チェレンコフ事象を引き起こす原因は PMT の陰極のカリウムから電子が石英窓に放出されることによるものと考えられている。

シンチレーション光の信号は時間の幅が広いのに対して、チェレンコフ事象は最初のヒットから 20n 秒までにまとまった信号が届く。よって 20n 秒以内の光を受けた PMT(hitPMT) 数と全体の hitPMT 数の比が 1 に近づくとチェレンコフ事象であるとみなして除去し、0.7 以下ならシンチレーション事象として残す。(式 (4.1) 参照) 図 4.2 は、実際の hitPMT 数の比 (hitRatio) をプロットしたものである。

$$\text{hitRatio} \equiv \frac{\text{Number of hitPMT [0 ~ 20nsec]}}{\text{Number of hitPMT}} < 0.7 \quad (4.1)$$

2. TDC タイミングを用いたノイズカット

図 4.3 に TDC によって取得された各 PMT からの時間情報 (TDC タイミング) の概念図を示す。TDC タイミングの Root Mean Square(RMS) をプロットすると、本物の事象のヒットはポアソン分布をするが、アクシデンタル事象はランダムにやってくるため、TDC RMS が大きくなる。本解析においては TDC RMS が 280ns 以上の事象はノイズ事象としてカットする。

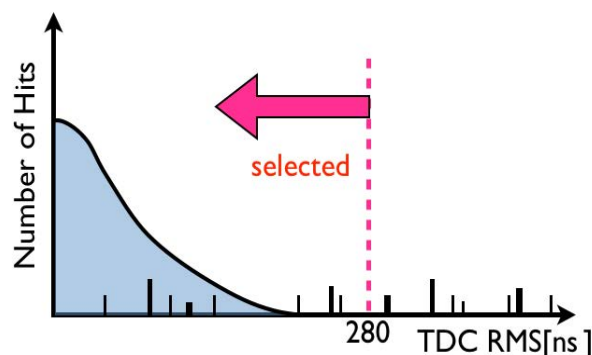


図 4.3: TDC タイミングの概念図

3. 1 事象目と 2 事象目の事象間の時間差を用いたカット

Bi 事象と Po 事象が連続的に崩壊する特徴を用いて、「窓」の中に入る事象を選ぶ。今回は、この「窓」を 0.9ms に設定して、時間差 dT が $0.1\text{ms} < dT < 1\text{ms}$ に入る事象を BiPo 事象として選別し、その他の事象をカットした。このように「窓」というのは、コインシデンスに含まれる時間幅である。0.1ms までを含めていないのは、0.1ms までの非常に短い時間中に 2 つの事象の信号が来た場合 AD 変換が追いつかず 2 事象目が記録されなくなるという ATM の仕様による。また、1ms を選んだのはおおよそ全ての BiPo 事象が含まれるためである。ここまでのカットでできる 1 事象目 (^{214}Bi) の光量分布が図 4.4、2 事象目 (^{214}Po) の光量分布が図 4.5 となる。

^{214}Bi & ^{214}Po ペアが観測されたとき、 ^{214}Po は α 崩壊するので光量が大きくなる。よって図 4.5 で、低エネルギー領域に見えているのはアクシデンタル事象である。

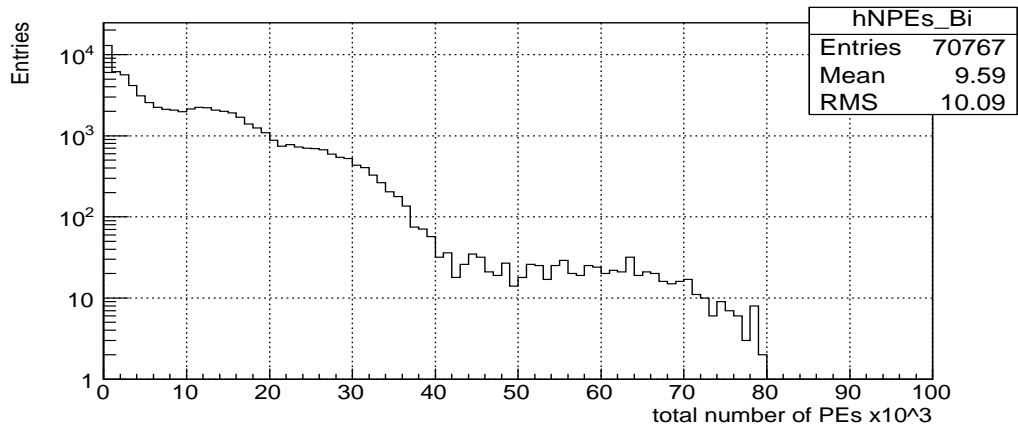


図 4.4: ID 内の事象に 1 ~ 3 までのカットを適用した 1 事象目のスペクトル

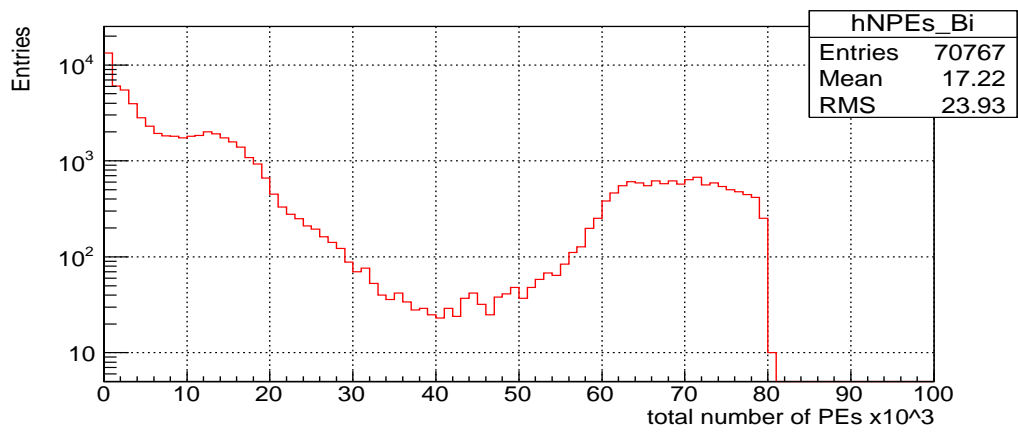


図 4.5: ID 内の事象に 1 ~ 3 までのカットを適用した 2 事象目のスペクトル

4. 2事象目の光量を用いたカット

4.2章の3で述べた低エネルギー領域のアクシデンタル事象を取り除くために光電子数 4×10^4 p.e. 以上を ^{214}Po からの α 線とみなし、 4×10^4 p.e. 以下の事象をカットする。しかし、実際には 4×10^4 p.e. 以下にも ^{214}Po が存在している。なぜなら、壁際で起きたイベントが実際のエネルギーより低く観測されている事象があることがわかっているためである。この 4×10^4 p.e. 以下に染み込んだ Po の正確な量は見積もっていない。以前の測定では、6.6%の ^{214}Po 事象がカットされたとわかっている。ただし、ゲインを下げたランのデータであったため弁別条件が異なり、 3×10^4 p.e. 以下のカットを用いていた。

1~4の条件に当てはまる事象を、30日分のノーマルランデータから選定した結果11350事象が残った。 ^{214}Bi 、 ^{214}Po それぞれの全光量分布を図4.6と図4.7に示す。 ^{214}Bi は低エネルギー領域までだらだらと続く $\beta + \gamma$ 崩壊のスペクトルを持ち、 ^{214}Po は比較的高いエネルギー領域に α 崩壊のスペクトルを持つ。図4.7で低エネルギーに尾をひいているのは、サチュレーションを起こした ^{214}Po 事象である。

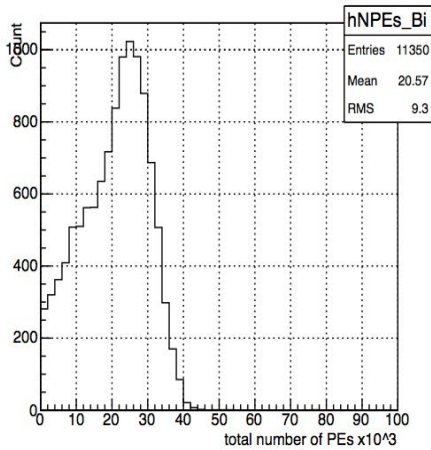


図 4.6: ^{214}Bi のスペクトル

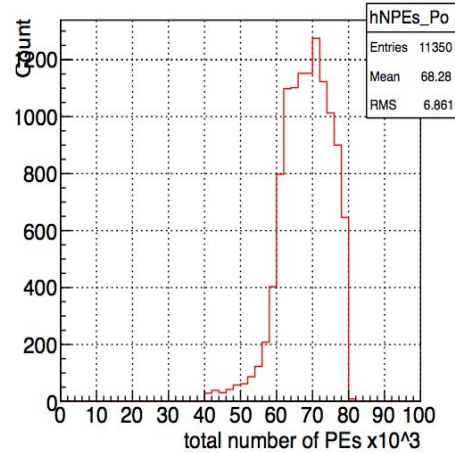


図 4.7: ^{214}Po のスペクトル

4.2.1 アクシデンタル事象の見積り

時間差を用いた見積り

2事象間の時間差をプロットした図は図4.8で、横軸は時間差、縦軸は事象数である。この分布を崩壊曲線(4.2)でフィットした。

$$F(t) = P2 + P0 \times \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{P1}} \quad (4.2)$$

$F(t)$ は時間差 $t[\mu\text{秒}]$ の関数である。フィッティングのパラメーター $P0 \sim P2$ の結果は図4.8の通りで、正しく ^{214}Bi と ^{214}Po が選ばれていれば、 $P1$ の結果が ^{214}Po の半減期と一致する。図4.8から、 $P1 = 168 \pm 4.1[\mu\text{秒}]$ であるから、 ^{214}Po の半減期の $164 \mu\text{秒}$ と一致している。

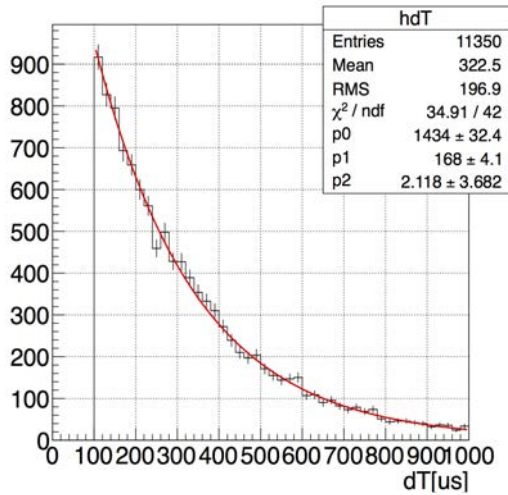


図 4.8: ^{214}Bi と ^{214}Po の事象間の時間差 [μ 秒]

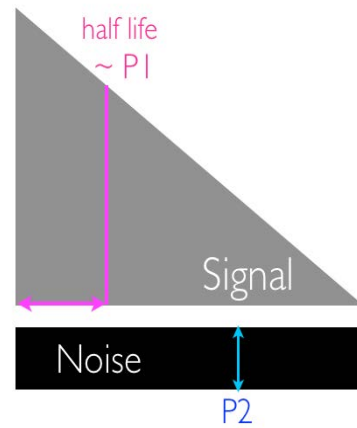


図 4.9: イメージ図

実際に ^{214}Bi 事象の純度を計算で求める。図 4.9 が、ノイズ（アクシデンタル事象）と Bi 事象の存在イメージを示す。アクシデンタルな事象はランダムに起こるため、BiPo 事象の時間差とは関係なく存在することから下側の長方形部分がアクシデンタル事象の数であると考えられる。よって P2 を用いてアクシデンタル事象の数を見積もることができる。P2=2.1±3.7 より、

$$(2.1 \pm 3.7) \times 45\text{bin} = 95 \pm 167 \quad (4.3)$$

であるから、全事象 (11350(30 日分)) のうちアクシデンタル事象が占める割合は以下ようになった。

$$(\text{アクシデンタル事象}) \div (\text{全事象}) = (95 \pm 167) \div 11350 = 0.8 \pm 1.5\% \quad (4.4)$$

約 99% の純度で Bi 候補を弁別することができた。

スペクトルを用いた見積り

ここまでのカットによって選ばれた事象を図 4.10 に表す。1 事象目が黒、2 事象目が赤、そして青は以下に述べる 2 事象目に混じっているであろうアクシデンタル事象である。

このとき考えるアクシデンタル事象とは、4.2 章の 1 & 2 のカットをした後の ID 内の全事象が、偶然 0.9m 秒以内に連続して起こる確率を考えることで見積もることができる。この手法をランダムコインシデンスと言う。一般的にランダムコインシデンスとは、偶発的な事象 (γ 線などの BG となるアクシデンタル事象) の起こる確率のことである。1 & 2 のカットを適用した後の ID 内の全事象レート 2.9count/秒であるのでランダムコインシデンスを用いた 2 事象目に対するアクシデンタル事象数は以下の式になる。

$$\begin{aligned} & (\text{1 事象目のレート}) \times (\text{2 事象目のレート}) \times (\text{時間窓}) \\ & = 2.9\text{count/秒} \times 2.9\text{count/秒} \times 0.9\text{m 秒} \\ & = 7.6 \times 10^{-3}\text{count/秒} \end{aligned} \quad (4.5)$$

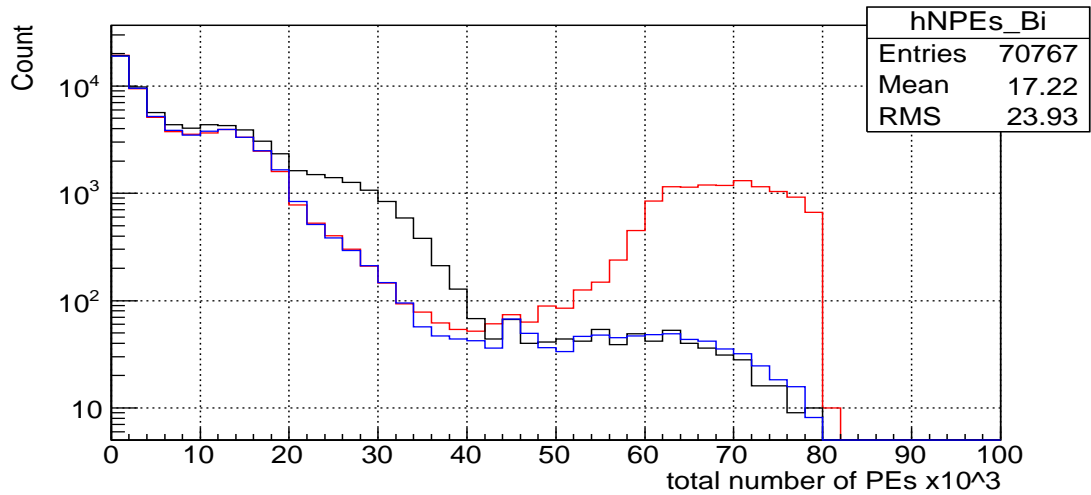


図 4.10: 2 事象目に対するアクシデンタルスペクトル
 黒が 1 事象目、赤が 2 事象目、青が 2 事象目に対するアクシデンタルスペクトル。

弁別条件に 2 事象目の光量を用いたカットを用いたのはこの図 4.10 からわかるように 4×10^4 p.e. 以下では赤と青のスペクトルが一致しており 4×10^4 p.e. 以下にはほとんど Po 事象は含まれていないと判断出来るためである。

次に、1 事象目に対するアクシデンタル事象を見積もる。図 4.11 は 4.2 章の 1~4 のカットを適用した ^{214}Bi と ^{214}Po のスペクトル (それぞれ黒、赤) に 1 事象目に対するアクシデンタル事象のスペクトル (青) を重ねたものである。

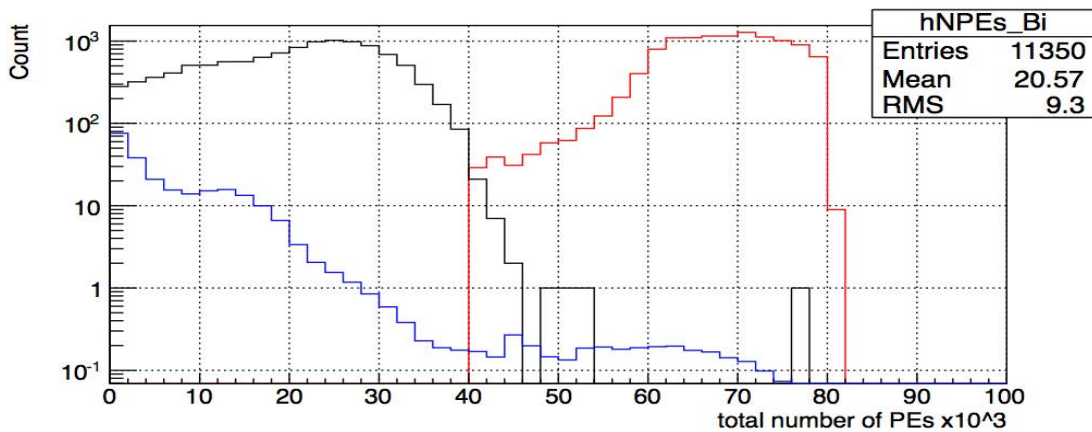


図 4.11: 1 事象目に対するアクシデンタルスペクトル
 黒が 1 事象目、赤が 2 事象目、青が 1 事象目に対するアクシデンタルスペクトル。

1 事象目に対するアクシデンタル事象は 1&2 のカットをした後の ID 内の全事象が起こってから 0.9m 秒以内に 1~4 のカットを適用した後の 4×10^4 p.e. 以上の ^{214}Po 以外の事象が起こる確率である。 4×10^4 p.e. 以上の全ての事象は 3.8×10^{-2} count/秒であるから、2 事象目のレートは以下のよ

うに求められる。

$$11350 \text{ 事象} \div \text{runtime} = 4.7 \times 10^{-3} \text{ count/秒} (^{214}\text{Po} \text{ のレート}) \quad (4.6)$$

$$3.8 \times 10^{-2} \text{ count/秒} - 4.7 \times 10^{-3} \text{ count/秒} = 3.3 \times 10^{-2} \text{ count/秒} \quad (4.7)$$

よってアクシデンタル事象は以下の式で計算できる。

$$\begin{aligned} & (1 \text{ 事象目のレート}) \times (2 \text{ 事象目のレート}) \times (\text{時間窓}) \\ & = 2.9 \text{ count/秒} \times 3.3 \times 10^{-2} \text{ count/秒} \times 0.9 \text{ m 秒} \\ & = 8.6 \times 10^{-5} \text{ count/秒} \end{aligned} \quad (4.8)$$

Bi 事象のレートは ^{214}Po 同様 $4.7 \times 10^{-3} \text{ count/秒}$ であったので、Bi 事象に含まれるアクシデンタルな事象の割合は、

$$8.6 \times 10^{-5} \text{ count/秒} \div 4.7 \times 10^{-3} \text{ count/秒} = 1.8\% \quad (4.9)$$

となった。

式 (4.8) で見積もったアクシデンタルのスペクトルは青線で図 4.11 に示した。

1 事象目、すなわち ^{214}Bi の純度をスペクトルで示す。図 4.12 は Bi 事象とアクシデンタル事象のシグナルノイズ比 (S/N 比) を求める為に、[Bi 事象のスペクトル (図 4.11 の黒)] ÷ [アクシデンタル事象のスペクトル (図 4.11 の青)] としたものである。

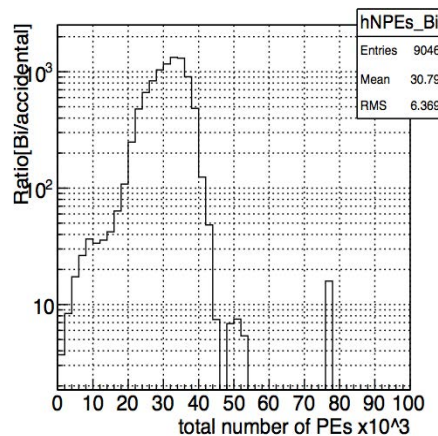


図 4.12: ^{214}Bi の S/N 比

トータルの S/N 比ではアクシデンタル事象は十分少ないとわかったが、エネルギーを区切ると、低エネルギー領域で比が小さくなっていることがわかる。

暗黒物質の観測に重要となる 2000p.e. 以下の S/N 比が小さいため、さらなるスタディが必要である。

4.3 ラドン濃度の見積り

これまでの解析から、ラドン濃度を見積もる。

- 約 30 日分のノーマルランデータの内、Bi 候補と考えられる事象数は 11350 事象
- アクシデンタル事象の数は $8.6 \times 10^{-5} \text{count/秒} \times 2399779 \text{秒} = 206 \text{事象}$
- 時間差の efficiency 65.6 %
ここで、時間差の efficiency とは、BiPo 事象の時間差 0~0.1m 秒をカットした後に残る本物の事象の比率である。
- よって 800kg 検出器内部のラドン濃度は、

$$(11350 - 206) / (2399779 \times 0.656) = 7.1 \pm 0.1 \text{mBq} \quad (4.10)$$

となる。本解析を各ランごとに行い、横軸を時間、縦軸をラドン濃度にした図を図 4.13 に示す。

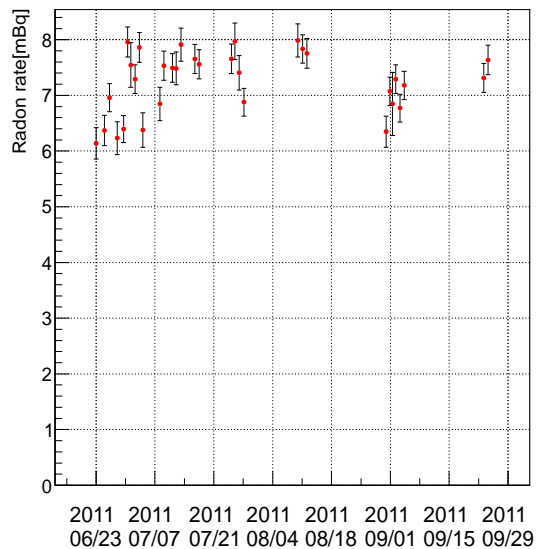


図 4.13: ラドンレート

約 30 日分のノーマルランデータのラドンレートである。解析を行った期間はほぼ一定のラドン濃度であることがわかった。

4.4 純度の向上

Bi 候補の純度を向上させるために、2 事象間と検出器中心を結ぶ角度について考える。先ほども述べたように、 ^{214}Bi 、 ^{214}Po の崩壊は連続的に起こる。つまり 2 事象の崩壊点は非常に近い。図 4.14

はアクシデンタル事象と BiPo 角度相関の模式図を表したものである。検出器の中心から Bi の崩壊点までをつないだ紫の線分と検出器の中心から Po の崩壊点をつないだ赤の線分との間の角度 θ は 0° 付近に偏る。一方、青色のアクシデンタル事象は検出器内部で一様に崩壊するため角度はばらつくはずである。

このことから、図 4.15 に Bi と Po の間の角度をプロットした。

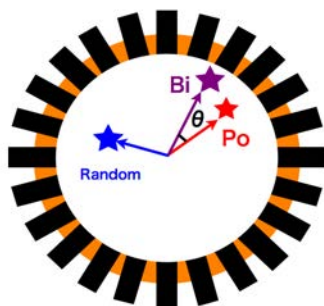


図 4.14: アクシデンタル事象と BiPo 角度相関のイメージ図

アクシデンタル事象と BiPo 角度相関のイメージ図 BiPo 事象は連続的に起こるため角度が小さくなるはずである。一方、アクシデンタル事象はランダムに発生し、角度がばらつく。

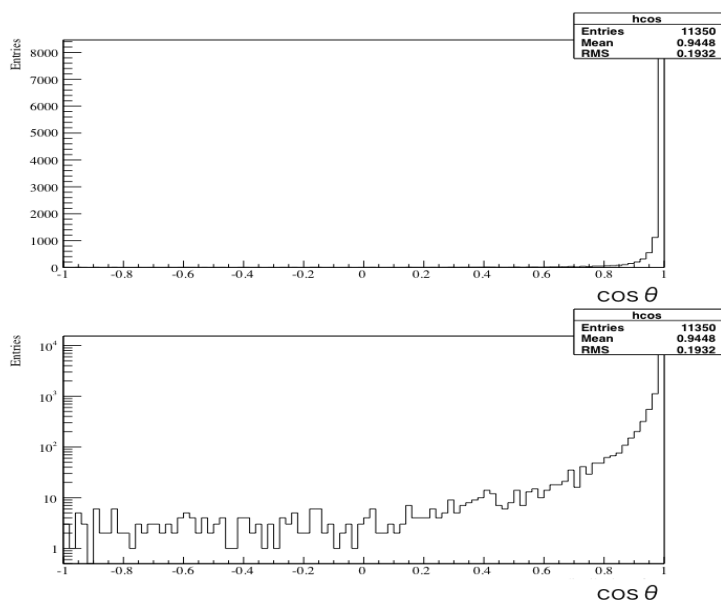


図 4.15: Bi と Po の角度相関

上図がリニアスケール、下図がログスケールの BiPo の角度相関をプロットしたものである。横軸は $\cos\theta$ 、縦軸は事象数。

横軸は $\cos\theta$ で、 $-1 \sim +1$ の値をとる。縦軸は事象数である。 $\theta = 0^\circ$ 、つまり $\cos\theta = 1$ に事象が集まるはずであるが、図では $\cos\theta = -1$ までだらだらと事象が存在する。 $\cos\theta < 0$ ($270^\circ > \theta > 90^\circ$) はアクシデンタル事象と仮定すると、142 事象あった。このことから、全方向で 284 事象存在すると仮定して全事象 (11350(30 日分)) のうちアクシデンタル事象が占めるおおよその割合を評価すると以

下のようになる。

$$(\text{アクシデンタル事象}) \div (\text{全事象}) = 284 \div 11350 = 2.5 \pm 0.2\% \quad (4.11)$$

近似的ではあるが、他の評価と同等な値を得られた。よって、今後角度相関を利用した事象弁別を行うことにより、更なる純度の向上が期待できる。ただし、角度相関が良いとは限らない。例えば BiPo 事象が検出器の中心付近で起きた場合、角度はランダムな値をとる。よって中心付近ではアクシデンタル事象評価の可能性がある。

4.5 まとめ

ノーマルラン約 30 日分のデータを解析した。XMASS 実験では以前、半数の PMT のゲインを 1/20 に下げた 2 日分のデータから 800kg 検出器内のキセノン中ラドン濃度を測定した (2.2.2 章参照)。本解析での改善点は、以前の測定では 2 日分のデータだったことに対して約 30 日分にデータを増やしたことと、時期の異なるデータを使用して解析したことである。解析の結果、800kg 検出器内のキセノン中の ^{222}Rn 濃度はほぼ一定で、平均値は $7.1 \pm 0.1 \text{ mBq}$ であることがわかった。

また、2つの方法で Bi 事象のコントロールサンプルの純度を見積もった。BiPo 連続崩壊の時間差を用いたアクシデンタル事象の見積りでは $0.8 \pm 1.5\%$ 、ランダムコインシデンスを用いたアクシデンタル事象の見積りでは 1.8% が得られた。

さらに、より純度の高いコントロールサンプルを作るために BiPo 事象間の角度を解析した。BiPo 事象の時間差やスペクトルの解析とは異なる方法においてもコントロールサンプル中のアクシデンタル事象は多くとも $2.5\% \pm 0.2$ 以下ということがわかった。角度相関を用いれば、壁際で起きた事象を取り除くことができ、さらに純度を上げることができると期待される。

第5章 ラドン除去装置の改良

ラドンは第3章、第4章で述べた通り、XMASS 実験において主要なバックグラウンドとなる。そしてこれまでの研究から、800kg 検出器内にラドンが存在することが明らかとなった (2.2.2 章参照)。よって XMASS 実験におけるバックグラウンド目標を達成するためにラドンの除去が必要である。これに対して XMASS 実験では活性炭を用いたラドンの物理吸着を開発した [25]。しかし、吸着効率が悪いので XMASS 実験で用いるには少なくとも 4.8kg 程度の活性炭が必要となる。これでは活性炭自身から放出される放射性不純物が問題となってくる。本研究では、新たな活性炭を用いてより効率良くラドンを吸着する手法の開発に取り組んだ。以下に、活性炭と吸着の原理の説明から改良後の結果を述べる。

5.1 活性炭

活性炭は、石炭やヤシ殻などの炭素物質を原料として高温でガスや薬剤と反応させて作られる微細孔を持つ炭素である。図 5.1 のように様々な大きさ (直径 5~500 Å) の微細孔があり、微細孔によって 1g あたりの表面積は 800~2000m² にも達するため炭より圧倒的な吸着能力があり、昔から吸着剤として広く使用されてきた [29] [30]。

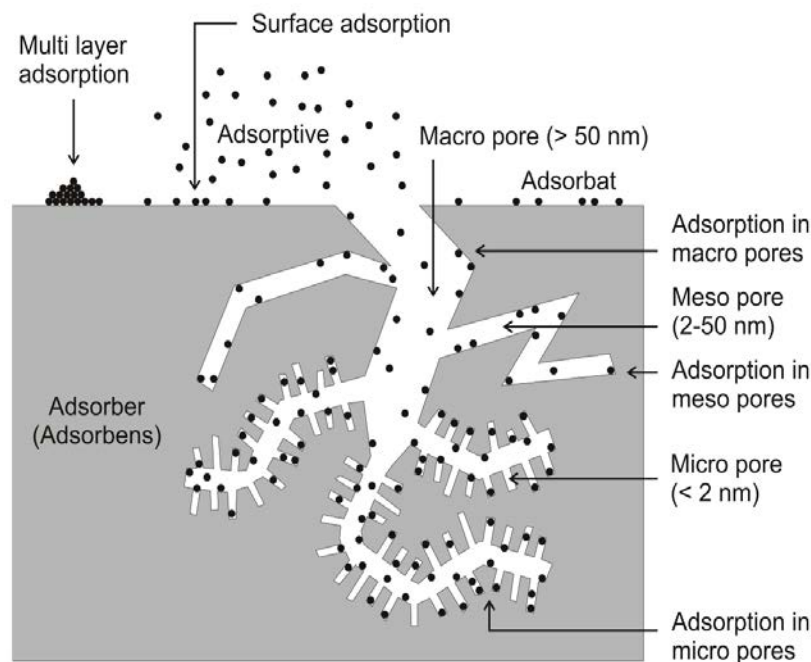


図 5.1: 活性炭の物理吸着イメージ図 [28]

活性炭の微細孔 (pore) には、Macro pore、Meso pore、Micro pore など様々な大きさがある。

5.2 吸着の仕組み

物質の表面からの引力（ファンデルワールス力）によって物質の分子が引き寄せられることを界面現象という。吸着は界面現象の1つで、さらに吸着を助長するのが毛管現象である。毛管現象によって気体が凝縮して液体になり、吸着量が増加する。界面現象や毛管現象を総称して物理吸着という。物理吸着の吸着速度は速く、可逆的であるため温度制御のみで脱着可能である。活性炭を冷却すると吸着能力が高まり、逆に過熱することで脱着できることが知られている [29]。

5.3 ラドン検出器とセットアップ

ラドン吸着実験のセットアップを下図 5.2 に示す。⊗はバルブを示し、青で open、赤で close の状態である。よって青色のバルブを辿れば、活性炭トラップとラドン検出器を含んだサイクルとなっている。以下ではセットアップにあるラドン検出器と活性炭トラップについて詳しく説明する。

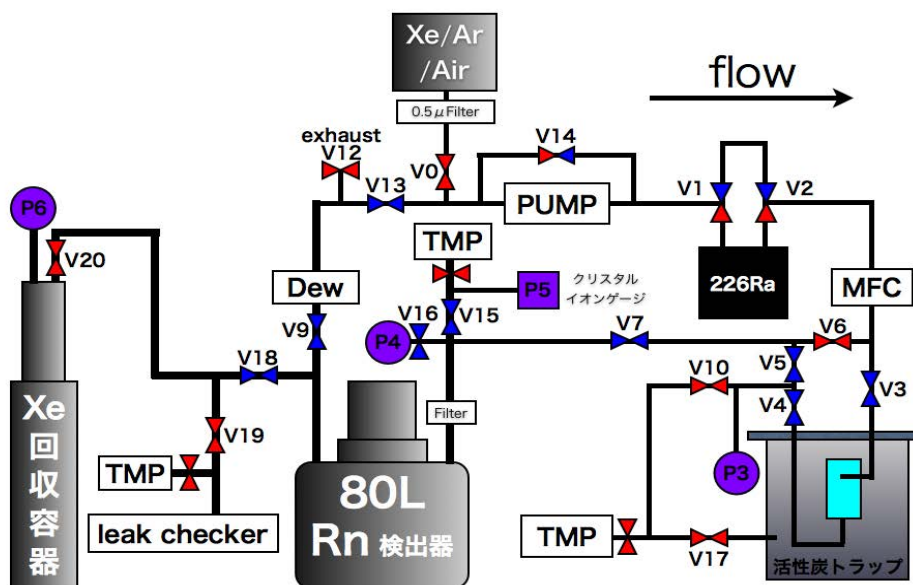


図 5.2: ラドン吸着配管図

「Xe/Ar/Air」がガスの供給口である。⊗はバルブを表し、青が open、赤が close の状態を表す。ただし V14 は流量調節のため半開で、V1、V2 はバイパスもしくはラドンソース (^{226}Ra) のどちらかにガスを流すことができる。V0 を open にしてアルゴンを封入し、図の通り時計回りにガスが循環する。活性炭トラップを通る系は、ラドンソースをバイパスするとき V1、V2 を通った後、V3、V4 間でトラップされ、その後 Rn 検出器と Dew(露点計) を通って 1 周する仕組みとなる。活性炭トラップを通らない系は V1、V2 を通った後、V3、V5 を閉じ V6 を開いた系を通り、Rn 検出器と Dew(露点計) を通って 1 周する。

5.3.1 80L ラドン検出器

Super-Kamiokande 実験の空气中ラドン濃度測定用に開発された 70L ラドン検出器 [31] を改良し、2011 年に開発された新型ラドン検出器は、ステンレス製で 80L の容積がある。図 5.3 は、80L ラドン検出器の模式図である。旧型で使用していたアクリル板を取り除き、高真空用のフランジを使用したことによって高真空度、高検出感度を達成した。ラドン検出器の測定は ^{222}Rn の娘核が正に帯電していることを利用して静電捕集によって行う。

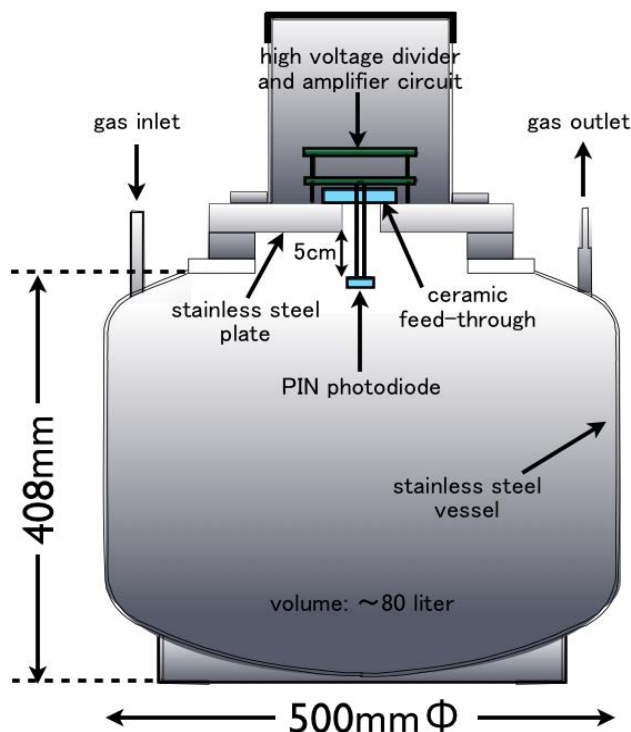


図 5.3: ラドン検出器

^{222}Rn 自身は電荷を帯びていないため検出できないが、娘核の ^{214}Po や ^{218}Po は正に帯電している。よって PD に負の電圧をかけることによってこれらが捕集される。これを静電捕集という。ラドン娘核種が PD 表面で崩壊し、 α 線が PD に放出された際に信号が得られる。

検出原理

ラドン検出器の検出原理は静電捕集によるものである。静電捕集法とは、電圧によってラドン娘核を捕集し、そのラドン娘核種が α 崩壊して PIN Photodiode (以下 PD) にエネルギーを落とすことによって信号が観測されるという仕組みである。 ^{222}Rn は正に帯電していないため捕集されない。しかし、 ^{222}Rn 娘核種、特に ^{218}Po は 90 % 以上が正に帯電する性質があり、PD に負の電圧 (-0.3~2.0kV) を印加することによって陽イオンを捕集できる。よって陽イオン化している ^{218}Po 、 ^{214}Po 、 ^{214}Pb を収集し、 ^{218}Po と ^{214}Po からの α 線による信号を計測する。収集されたラドン娘核種は、PD 表面で α 崩壊し、 α 線が PD にエネルギーを落とすことによって信号が得られる。静電捕集法の利点は、ラドン濃度を濃縮して測定でき、統計精度が高くなることである。実際に ^{222}Rn が存在するとき、図 5.4 のようなスペクトルが観測できる。縦軸は α 線の検出数で、横軸は ADC チャンネル。 α 線のエネルギー

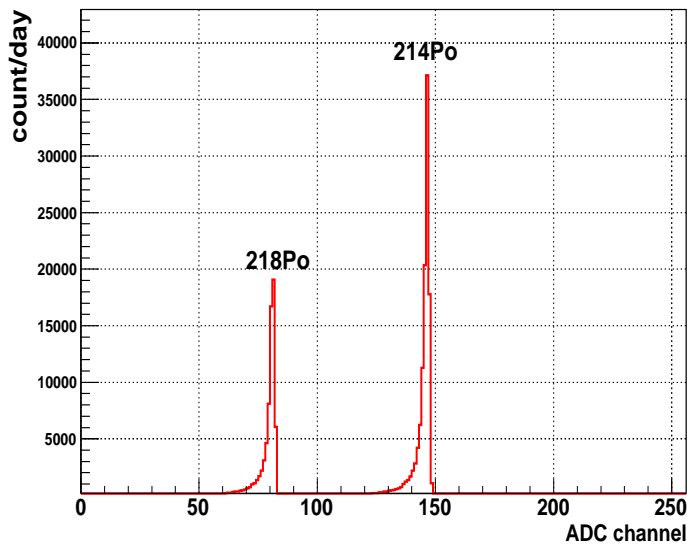


図 5.4: ^{218}Po と ^{214}Po のエネルギースペクトル

ラドン検出器中に ^{222}Rn が存在した場合、図のような娘核種のスペクトルが観測される。横軸は ADC チャンネルで、縦軸は α 線の検出数である。 ^{218}Po より ^{214}Po が崩壊系列の下流であるのに ^{214}Po の検出数が多いのは、 ^{218}Po の方が ^{214}Pb より半減期が短いため PD に到達する前に崩壊してしまうためと考えられる。

ギーに対応する単位時間中の事象数が求められる。エネルギーが測定できるため、どの核種からの α 線かを判別することができる。また、このスペクトルから、ADC の ch.60~85 は ^{218}Po 、ch.120~150 は ^{214}Po とみなし、この範囲の信号を積分することによって横軸が時間、縦軸を事象数にした事象数の時間変化の図を描くことができる。各ピークの低エネルギー側に尾をひいているのは、PD に対して α 線の入射角度が大きい場合、一部のエネルギーだけが観測されるためである。

80L ラドン検出器の構成

検出器は図 5.3 のように、PD、高電圧分割回路とプリアンプ (high voltage divider and amplifier circuit)、セラミック製フィードスルー (ceramic feed-through) で構成されており、80L の円筒型容器である。PD に負の電圧を印加すると検出器内部に電場が発生するが、PD とステンレス容器部分 (stainless steel vessel) はセラミック製フィードスルーによって絶縁されている。また、検出器内部はバックグラウンドを低減するため電解研磨が施されている。経験則から、表面積を小さくすることによってバックグラウンドが低減できることがわかっている [31]。

PIN Photodiode

PD は浜松ホトニクス社製の S3204-06 を使用しており、 α 線が観測できるよう受光面を覆うカバーを取り除いたタイプの物である。受光面の大きさは $16\text{mm} \times 16\text{mm}$ で、有効厚は $500 \mu\text{m}$ 、容量が 80pF となっている。PD を使用したのは、(α 線の) エネルギー分解能が高いため α 線源を弁別しやすいことと、安価であるためである。

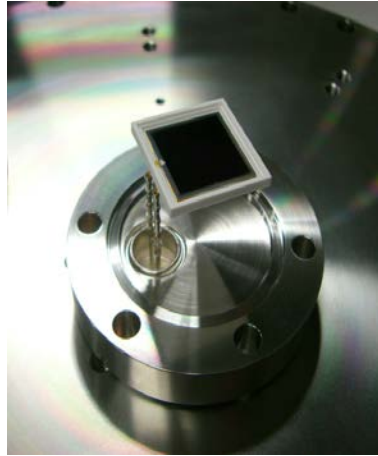


図 5.5: フィードスルーに取り付けた PIN photodiode

較正定数

較正定数は、ラドン検出器の検出効率を表す指標となる。

$$\text{較正定数} [(\text{count}/\text{day})/(\text{mBq}/\text{m}^3)] = \frac{^{214}\text{Po} \text{ の } \alpha \text{ 線の検出数 } [\text{count}/\text{day}]}{\text{ラドン濃度 } [\text{mBq}/\text{m}^3]}$$

ここで、Rn 濃度は封じ込めで測定するとき以下の式で表される。

$$\text{ラドン濃度 } [\text{mBq}/\text{m}^3] = \frac{\text{ソース強度 } [\text{Bq}] \times (1 - \exp^{-\lambda t})}{\text{体積 } [\text{m}^3]}$$

本研究で使用した ^{226}Ra 線源の強度は $78.3[\text{Bq}]$ である。また、 λ は ^{222}Rn の崩壊定数で $0.0001258[\text{分}^{-1}]$ 。t はラドンが蓄積する時間 [分] で、線源を使用したある時間から次に使用するまでの時間であるから、今回の測定ではすべて 1 週間程度以上期間をあけて使用したため t が無限大と仮定する。

ラドン検出器の検出効率は水分含有量によって異なることがわかっているため、湿度特性を測定した。詳しくは 5.5.2 章で述べる。

5.3.2 活性炭トラップ

ラドンの物理吸着を目的として、活性炭を用いて開発した装置が活性炭トラップである。活性炭の温度制御のために、冷凍機とヒーターを用いる。熱効率が良くなるように開発した装置が図 5.6 である。右図水色部分に活性炭が入っており、実際のトラップ部分となる。冷凍機とヒーターを組み合わせで活性炭の温度を制御し、複数の温度計でモニターする。

今回活性炭を外真空容器上部から回収できるような容器を設計し、製作した。

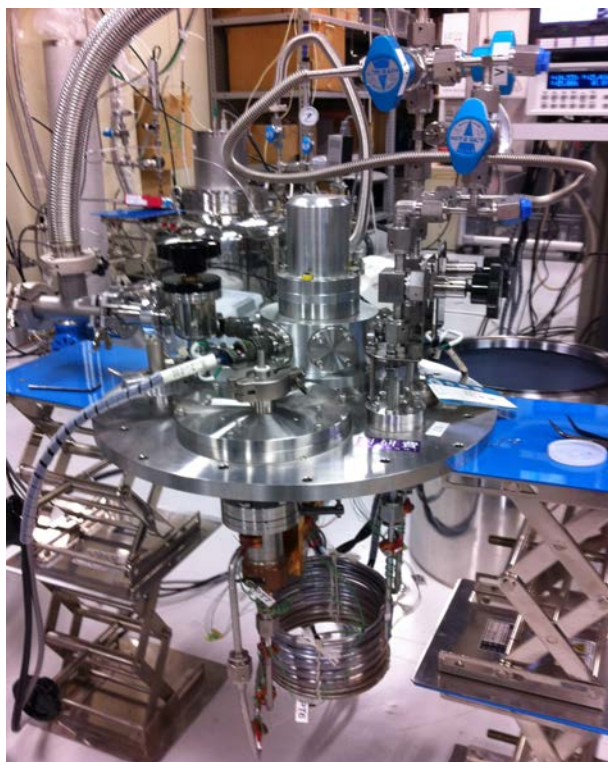


図 5.6: 外真空容器を外した活性炭トラップ写真

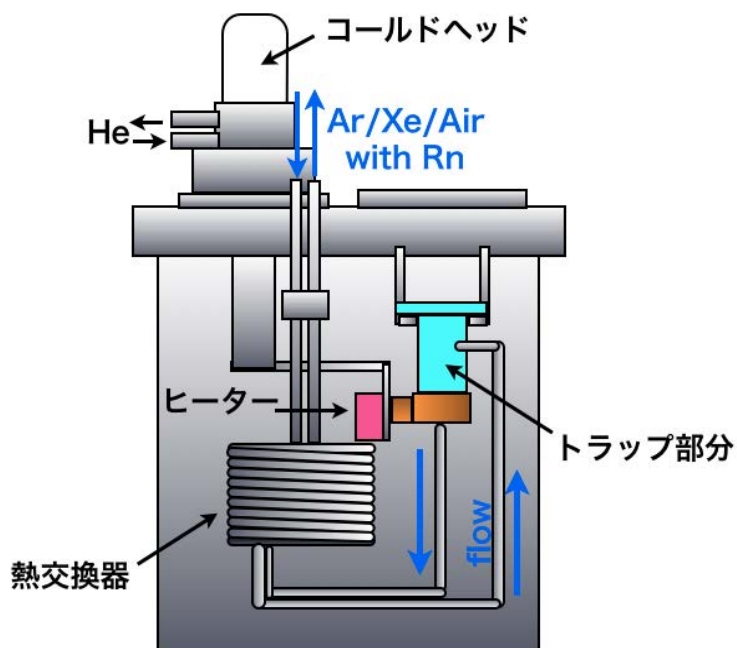


図 5.7: 活性炭トラップ模式図

水色部に活性炭が入っており、実際のトラップ部分となる。接合部の数カ所に銅を用いて熱伝導率を上げている。コールドヘッドを通して冷凍機が作動しており、ヒーターと組み合わせて活性炭の温度を制御する。

5.4 アルゴン中のラドン除去

キセノン中のラドン除去を最終目標として、まずは試験用に行ったアルゴン中のラドン吸着について述べる。アルゴンは空気(窒素 N_2 や O_2)と同様、ラドンに比べてかなり原子が小さく、分離が比較的容易であることがわかっている。また、キセノンに比べて大変安価で簡単に手に入ることから、アルゴンを最初に用いた。

実験手順を以下に示す。活性炭は日本エンバイロケミカルズ社のモルシーボン X_{2M} 4/6 を使用した。

1. 装置全体を $O(10^{-3})Pa$ まで TMP 真空ポンプで引く (装置内部の不純物の除去)
2. Ar ガスを封入
3. ^{226}Ra ソースから ^{222}Rn を供給し、トラップを通る系をバイパスして崩壊曲線を確認
図 5.2 で V3 と V5 を閉じ、V6 を開けた系を通る
4. V10 を開けて活性炭部分のみ TMP 真空ポンプで引きながら、活性炭を $85^{\circ}C$ でベーキング (吸着した水分等の除去)
5. V10 を閉じて活性炭トラップを冷凍機で $-105^{\circ}C$ まで冷却
6. Rn 入り Ar を活性炭トラップへ流す
図 5.2 で V6 を閉じ、V3, V5 を開けた活性炭を通る系を流れる
7. Rn 濃度の変動を確認し、 $85^{\circ}C$ で活性炭をベーキング (吸着した Rn 等の除去)
8. トラップに流したまま活性炭を $-105^{\circ}C$ まで冷却
9. 流量を変えてトラップ試験 7&8 を繰り返す

図 5.8 に流量依存を含めたラドン吸着の結果を示す。縦軸は α 線の崩壊数、横軸は経過時間である。最も吸着効率が良かった流量 $0.5L/min$ に切り替えた時間を図中に示した。赤がラドン検出器で測定した ^{214}Po 、緑がラドン検出器で測定した ^{218}Po 、黒い実線は ^{222}Rn の理論的な崩壊曲線を表す。ラドンの崩壊曲線は、半減期が 3.82 日であることから P_0 、 P_1 を係数として次の式で表される。

$$F(t) = P_1 + P_0 \times \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{3.82}} \quad (5.1)$$

ここで、 $F(t)$ は時間 t [日] の計数率である。図 5.8 ではラドンの崩壊の様子と、活性炭トラップによって吸着されラドン濃度が減少する様子が交互に起こっている。上部の実線はベーキング時に安定した点 (y_{Max}) をラドンの半減期でフィッティングした崩壊曲線で、下部の点線は活性炭トラップで最もラドンが吸着された点 (y_{Min}) を通る崩壊曲線である。この差を求めることによって吸着率を求めると、以下のようなになる。

$$yMax(t = 0) = 50000 \quad (5.2)$$

$$yMin(t = 0) = 400 \quad (5.3)$$

$$(yMax - yMin)/yMax = 99.2 \quad (5.4)$$

アルゴン中のラドンは活性炭によって 99.2% 吸着されていることになる。ただし、ここではラドン検出器の湿度特性は補正されていない。また、3度吸着実験を行った結果、流量 0.5L/min を使用した最後の測定が最も吸着効率が良かった。よって流量が少ない方が吸着効率が高い可能性があることを考慮して主に 0.5L/min や 0.25L/min で測定を進めた。

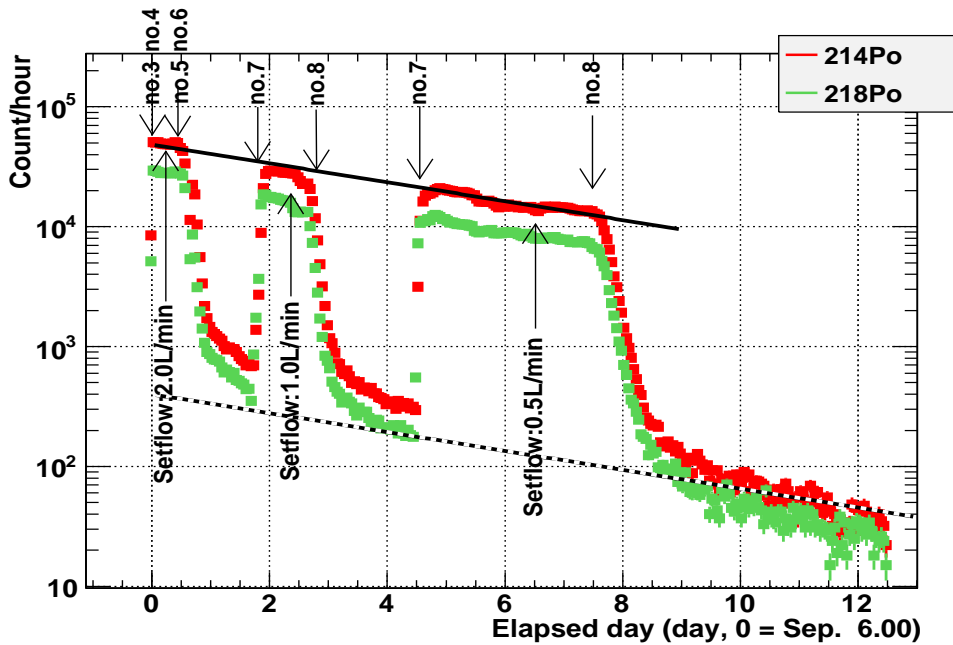


図 5.8: アルゴン中ラドン除去

赤が ^{218}Po 、緑が ^{214}Po の計数率を表した図。実線に沿って減少するのは、親の ^{222}Rn が崩壊するためである。急激に減少しているところは、活性炭トラップによって Rn が吸着されていることを示す。増加しているところはベーキングによって Rn が活性炭から離脱したことを示す。図中の「no.」は 5.4 章での操作を行ったタイミングを示す。

5.5 キセノン中のラドン除去

キセノンの原子の大きさは大きく、ラドンとかなり近い。よって簡単には分離できない。しかし、より小さな微細孔を持つ活性炭を用いてラドンの原子サイズに近づけることで、より効率よくキセノン中ラドンの吸着ができるか調べた。表 5.1 は、本研究で使用した活性炭とポアサイズをまとめたものである。

表 5.1: 活性炭のポアサイズ比較

活性炭の種類	ポアサイズのピーク [Å]	形状
モルシーボン X _{2M} 4/6	6	粒状
Carboxen-1021	5 ~ 8	粉末状
Carboxen-569	5 ~ 8	粒状
白鷺 G _{2X} 4/6	8	粒状

5.5.1 モルシーボン X_{2M} 4/6

実験手順はアルゴンの時と同様、まずはアルゴン中のラドンを良く吸着した活性炭がキセノン中になるとどう変化するかを確認した。

モルシーボン X_{2M} 4/6 の結果を図 5.9 に示す。

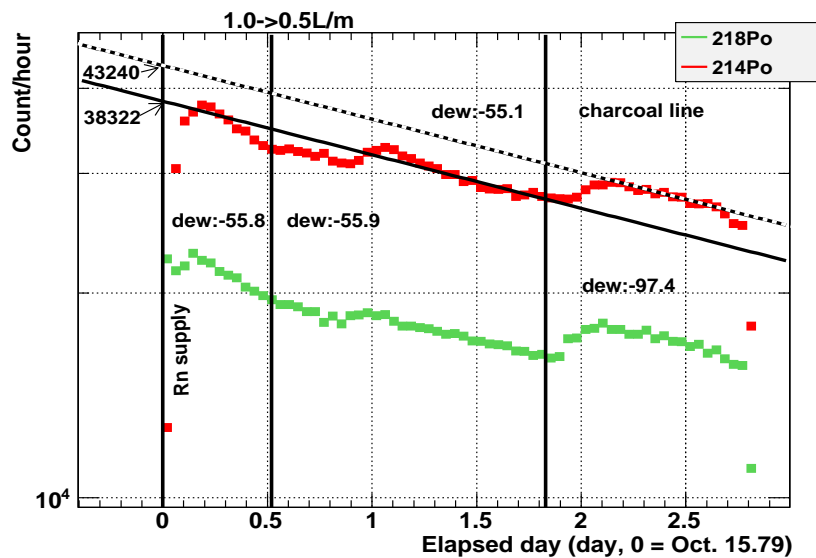


図 5.9: モルシーボン X_{2M} 4/6 によるキセノン中ラドン吸着

ラドンを供給した後、1.0L/min から 0.5L/min に流量を変更した。ラドンの循環が安定してから、バイパスラインから活性炭ラインへ切り替えて、循環させた。図 5.9 では、キセノンとラドンの混合ガスが活性炭ラインで循環してから、ラドンの量が増えているように見える。これは、実際にはラドン検出器の湿度特性によるもので、露点が下がることで検出効率が上がり、一見ラドンが増加したように見えている。補正の方法については 5.5.2 章で述べる。ただしこの結果から、アルゴン中では露点補正無しで 99.2 % の吸着効果のあった活性炭でも、キセノン中のラドン吸着となると難しいことが証明された。

5.5.2 ラドン検出器の湿度特性

ラドン検出器には湿度特性がある。正に帯電した ²¹⁸Po⁺ や、空気中の酸素と反応した ²¹⁸PoO₂⁺ が、空気中に存在する水蒸気によって電氣的に中和されてしまうため検出効率が落ちることが原因で

ある。この電氣的中和現象の発生過程は以下のように考えられる [32]。

- イオン化エネルギーの高い $^{218}\text{PoO}_2^+$ が、低い物質と反応して電子を奪う
- 電子親和力の大きい物質が電子を受け取って負イオンとなり、そのイオンと再結合する



ここで、 \cdot は不対電子を表す。

本実験では、正確なラドン濃度を見積もるため、キセノン中の ^{214}Po を用いて湿度特性を測定した。 ^{214}Po を用いたのは、 ^{214}Po までに PD に捕集されている可能性が高く、寿命が短いため ^{218}Po より捕集される効率が高いことと、他の娘核種とエネルギー領域が重ならないためである。

測定方法

1. 活性炭トラップ部分には活性炭を入れず、銅ウールのみを入れておく。
2. $0(10^{-2})\text{Pa}$ まで真空引き。
3. キセノンガスを封入。
4. ^{226}Ra ソースから ^{222}Rn を供給し、 $0.9\text{L}/\text{min}$ で循環させておく。
5. 銅ウールを真空引きしながら 85°C でベーキング (付着した水分の除去)
6. 活性炭トラップ部を冷凍機で -105°C に、露点は -98°C 程度で一定の値になる。
7. 制御温度を -105°C から約 10°C ずつ上げる作業を数回繰り返す。
8. 最後に、ベーキングの状態の値を測定して終了。

ここで、流量を $0.9\text{L}/\text{min}$ にしたのは、以前純空気とアルゴンで行った湿度特性実験と条件を合わせるためである。HV は -1.0kV を印加した。設定温度と露点の変化の様子を図 5.10 に示す。このときのラドン濃度の変化を、図 5.11 に示す。この測定で得られた露点と室温の変化から絶対湿度を求めた。ここで、絶対湿度とは 1m^3 あたりに存在する水分含有量 (g) である。室温はエアコンで制御してほぼ一定の 23°C を維持した。よって全て 23°C と仮定する。また、設定温度で安定した露点 7 点での ^{214}Po α 線の検出数とラドン濃度から 80L ラドン検出器の較正定数を求めた。横軸を絶対湿度、縦軸を較正定数 $[(\text{count}/\text{day})/(\text{mBq}/\text{m}^3)]$ としてプロットしたのが図 5.12 である。

図 5.13 は、純空気中の ^{214}Po を用いて旧型ラドン検出器と新型ラドン検出器で湿度特性を測定したものである [34]。この図 5.13 のフィットに用いられている関数を導く。

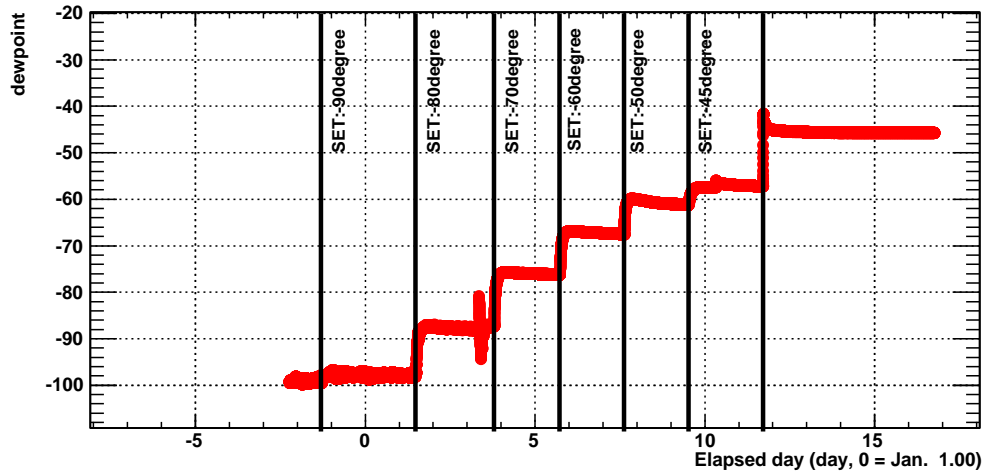


図 5.10: 設定温度と露点の相関

横軸は経過時間 [日]、縦軸は露点 [°C]。約 11 日間に渡り、約 10 °C ずつ温度を制御して露点の変化を測定した。

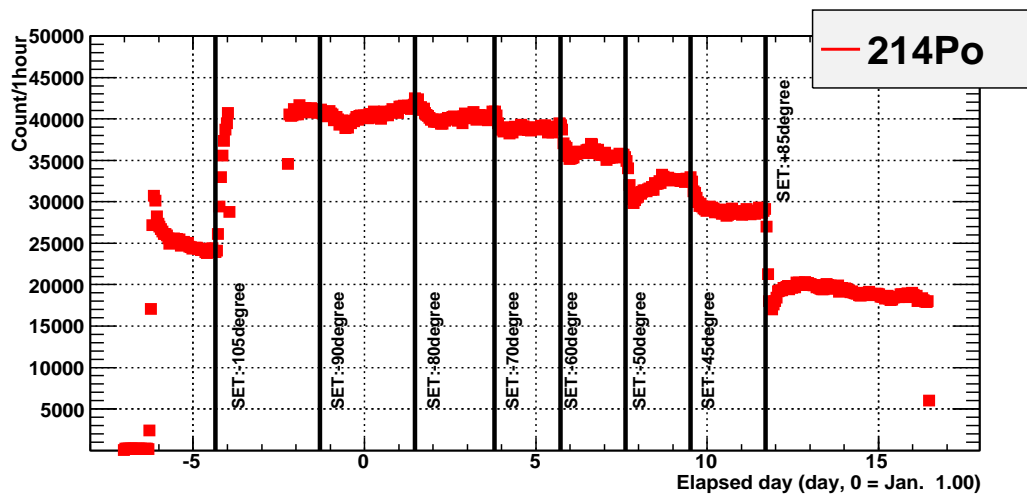


図 5.11: 露点とラドン検出器の湿度特性

横軸は経過時間 [日]

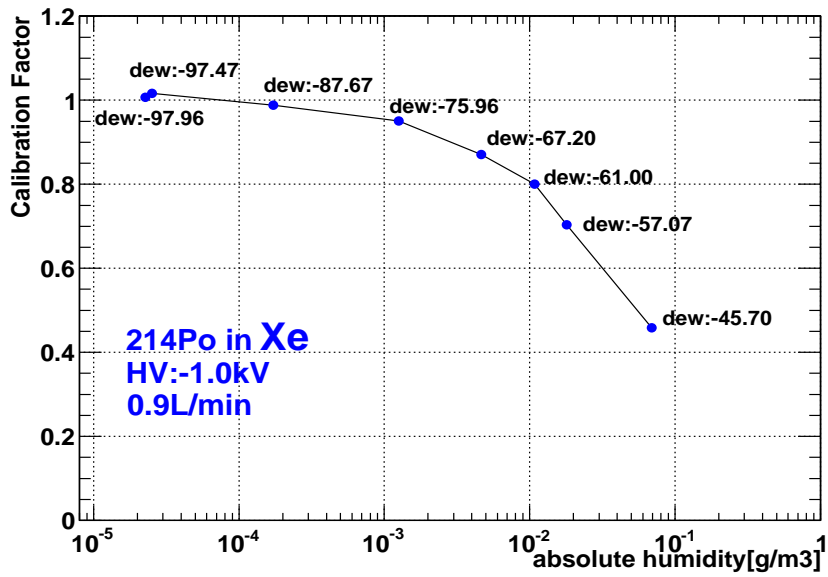


図 5.12: キセノン中の ^{214}Po を用いた 80L ラドン検出器の湿度特性
横軸は絶対湿度 [g/m^3]、縦軸は較正定数 $[(\text{count}/\text{day})/(\text{mBq}/\text{m}^3)]$ 。

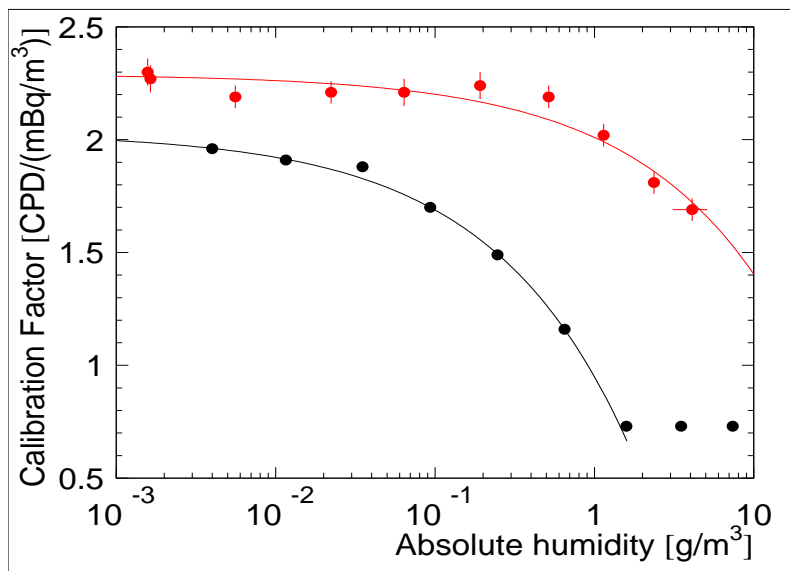


図 5.13: 純空気中の ^{214}Po を用いた新旧ラドン検出器の湿度特性 [34]
黒点が旧型のラドン検出器における較正係数の湿度依存性を表し、赤点が新型ラドン検出器の測定結果である。
曲線は較正定数の絶対湿度依存性を表す式 (5.9) と (5.10) である。

まず、較正定数の湿度依存性を定量的に考える。較正定数 CF は空気中の水分濃度の 1/2 乗に反比例する。よって絶対湿度 AH[g/m³] を用いて以下の式で表される。

$$CF = a + b\sqrt{AH} \quad (5.8)$$

ここで、a、b は正の定数である。旧型ラドン検出器では a、b は以下のようになった [33]。

$$CF = 2.03 - 1.08\sqrt{AH} \quad (5.9)$$

新型ラドン検出器は、純空气中で以下のようになった [34]。

$$CF = 2.3 - 0.2\sqrt{AH} \quad (5.10)$$

それぞれ式 (5.9) と (5.10) で測定点をフィッティングしたのが図 5.13 である。キセノンを用いた図 5.12 と比べて較正定数は 2 倍以上高く、キセノンでは検出感度が落ちることがわかる。

ここから述べる解析結果は、図 5.12 の較正定数を用いて ²¹⁴Po の α 線の検出数からラドン濃度に換算する。ただし、測定点と測定点の間は直線補間した値を用いる。

まず、モルシーボン X_{2M} 4/6 を使用した実験において、露点補正を行う。活性炭ラインで最もラドンが減少している点において、α 線検出数が 43240[count/hour]、この時の露点温度が -97.4[°C] であることを用いて、

$$AH(\text{露点} - 97.4\text{°C}, \text{室温 } 23\text{°C}) = 2.558 \times 10^{-5}[\text{g/m}^3] \quad (5.11)$$

$$CF(2.558 \times 10^{-5}\text{g/m}^3 \text{のとき}) = 1.02[(\text{count/day})/(\text{mBq/m}^3)] \quad (5.12)$$

となるから濃度は、

$$(43240[\text{count/hour}] \times 24[\text{hour}])/1.02[(\text{count/day})/(\text{mBq/m}^3)] = 1.017 \times 10^6[\text{mBq/m}^3] \quad (5.13)$$

と計算できる。同様にして、ベーキング時にラドンが安定している点の α 線検出数が 38322[count/hour]、この時の露点温度が -55.1 °C であるから、絶対湿度は 0.0230[g/m³] で CF は 0.66、よって濃度が 1.394 × 10⁶ mBq/m³ となる。

前者を yMin 後者を yMax とすれば、露点補正後の吸着効率は以下のように計算できる。

$$yMax(t = 0) = 1.394 \times 10^6 \quad (5.14)$$

$$yMin(t = 0) = 1.017 \times 10^6 \quad (5.15)$$

$$(yMax - yMin)/yMax = 0.270 \quad (5.16)$$

モルシーボン X_{2M} 4/6、5g、0.50L/min には露点補正後 27% の吸着効率があることがわかった。次に、流量 0.9L/min の結果を図 5.14 に示す。吸着効率は、4% となり、0.50L/min 時より低下した。

5.5.3 Carboxen-1021

シグマアルドリッチジャパン株式会社の Carboxen-1021 は、ポアサイズが 5~8 Å の粉状の活性炭である。今回はこの活性炭を 5 g 使用した。

図 5.16 は、Carboxen-1021 を用いてラドン吸着をおこなった結果である。キセノンとラドンの混合ガスを十分に冷却した活性炭を通るラインへ流量 0.25L/min で流してから、この活性炭をベーキングした。すると、α 線の検出数に僅かばかりの上昇がみられた最も α 線の検出数が少ないところを

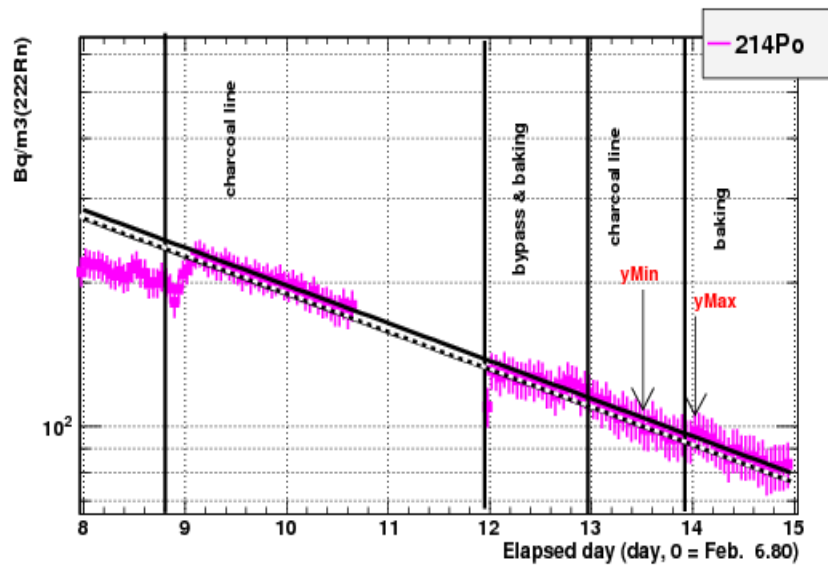


図 5.14: 湿度特性を考慮したモルシーボン X2M 4/6 を用いたキセノン中ラドン吸着【0.9L/min】
 トラップに流してからデータの途切れているところはプログラムの停止による。安定してデータのとれた2回
 目のトラップ時とベーキング時に yMax と yMin を設定した。



図 5.15: Carboxen-1021 を本研究で開発した銅容器に入れている様子

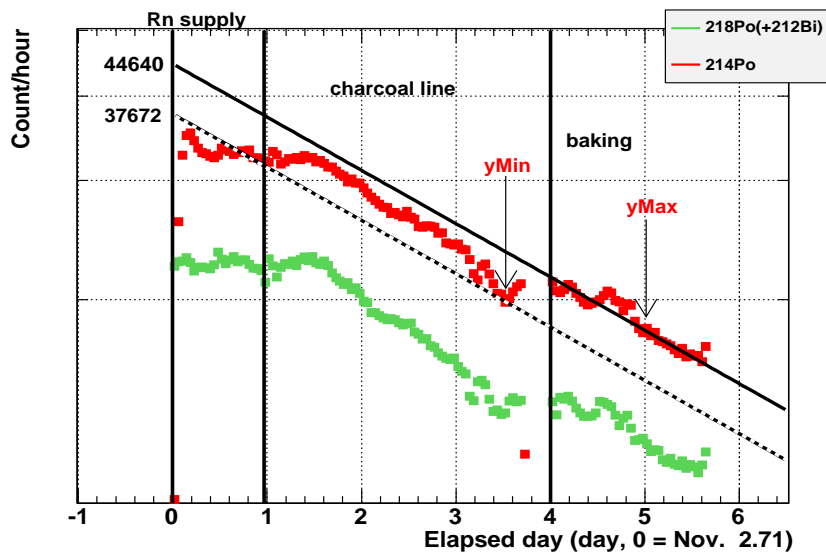


図 5.16: Carboxen-1021 を用いたキセノン中ラドン吸着

^{214}Po (赤) と ^{218}Po (緑) の 1 時間あたりのカウント数が縦軸、横軸は時間。データの途切れている部分は PC の不具合によりデータが取れなかったため無視する。活性炭トラップに流しているときに最もラドンが吸着された点を通るラドンの崩壊曲線が下線、ベーキングの安定したところを fit した線を通る崩壊曲線が上線。この差がトラップされたラドンの量と仮定すると 6 % 吸着された。

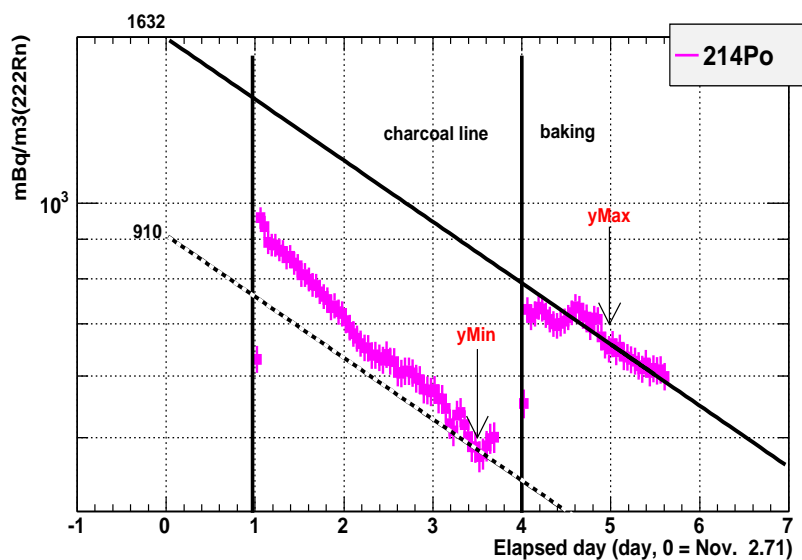


図 5.17: 湿度特性を考慮した Carboxen-1021 を用いたキセノン中ラドン吸着

露点温度のリアルタイム記録を始めたのが 11 月 03 日 (図の Elapsed day=1.0) のため、これ以前の露点補正は行っていない。活性炭トラップに流しているときに最もラドンが吸着された点を通るラドンの崩壊曲線が下線、ベーキングの安定したところを fit した線を通る崩壊曲線が上線。この差がトラップされたラドンの量と仮定すると 44 % 吸着された。

フィッティングしたラドン崩壊曲線と、ベーキング後安定して α 線が検出されたところをフィッティングした曲線の差を計算すると、トラップ中は6%減少していたことが確認できた。

つまり、活性炭はいくらかラドンを吸着していたことがわかった。ただし、これも露点補正をおこなっていない。5.5.2章で求めた絶対湿度と校正定数の関係から、露点補正を入れる。図5.16の赤、すなわち ^{214}Po の計数率に露点補正を入れて算出したラドン濃度を図5.17のピンクで示した。以下の式(5.17)で吸着効率を求める。

$$(yMax - yMin)/yMax = (1632 - 910)/1632 = 0.442 \quad (5.17)$$

図5.16で2本の崩壊曲線の幅は僅か6%であったのに対し、図5.17の露点補正後では、44%の吸着効率が確認できた。

次に、流量0.9L/minでは、図5.18のようになった。

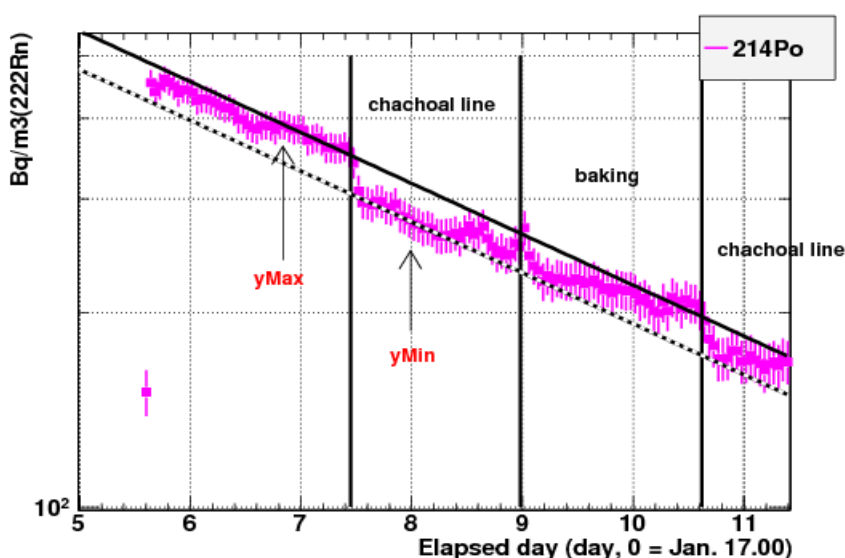


図 5.18: 湿度特性を考慮して Carboxen-1021 を用いたキセノン中ラドン吸着【0.9L/min】

吸着効率は13%となり、0.25L/min時より低下した。

5.5.4 Carboxen-569

次に使用するのも、シグマアルドリッチジャパン株式会社の Carboxen-569 である。1021 に比べて粒が少し大きいのが、ポアサイズは1021同様の5~8 Åであり、5g使用した。図5.19は、湿度特性を考慮した Carboxen-569 を用いたキセノン中ラドン吸着の結果である。今回も0.25L/minで循環させ、活性炭ラインからベーキングに切り替えた。露点補正の効果も入れてラドン濃度を解析すると、図5.19になる。yMinとyMaxの差から、36%の吸着効率を確認した。

$$(yMax - yMin)/yMax = (1720 - 1100)/1720 = 0.360 \quad (5.18)$$

ただし、実験終了後、2g程度の活性炭が容器から漏れてしまっていたため、5g分の吸着効率を測定できていない可能性がある。

次に、流量0.9L/minの結果を図5.20に示す。吸着効率は13%となった。

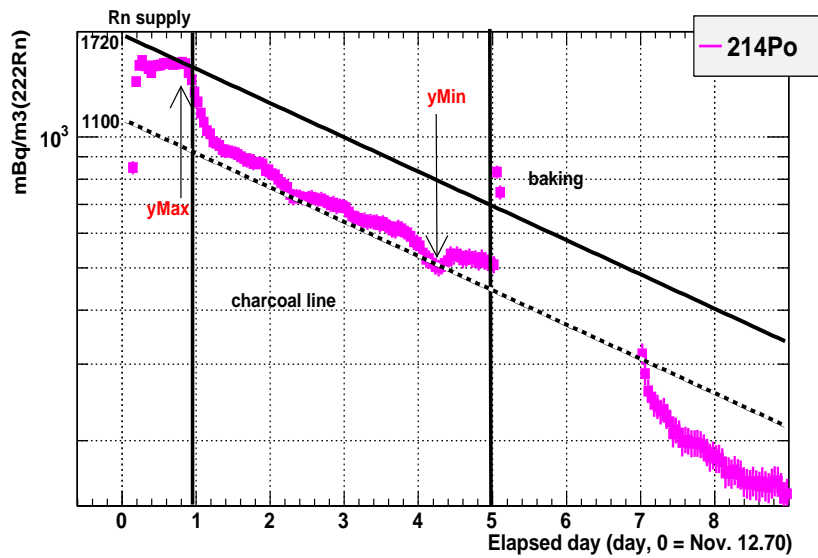


図 5.19: 湿度特性を考慮した Carboxen-569 を用いたキセノン中ラドン吸着
 ベーキング直後はデータテイキングのプログラムが停止した。その後、ラドン濃度が低下したように見える。
 これはラドン検出器の検出感度を落とす物質が Carboxen-569 から放出されていると考えられる。一度のト
 ラップで 36% の吸着効率を確認できたが、yMax は安定した点を用いていない。

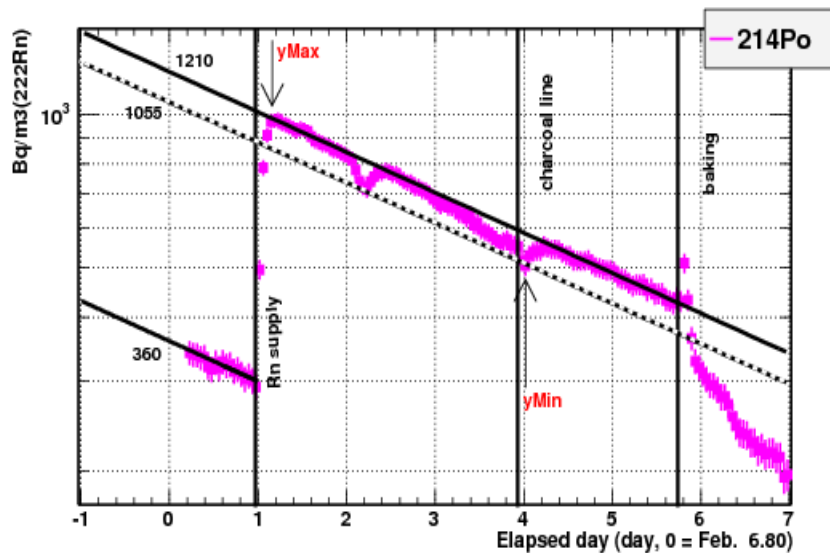


図 5.20: 湿度特性を考慮して Carboxen-569 を用いたキセノン中ラドン吸着【0.9L/min】
 0.25L/min のときと同様に、ベーキングするとラドン濃度が低下した。これはラドン検出器の検出感度を落と
 す物質が Carboxen-569 から放出されていると考えられる。

図 5.19 と図 5.20 より、ベーキングするとラドン濃度が落ちていることがわかる。このベーキングは吸着されたラドンを活性炭から離脱させるために行っているため、ラドン濃度は上昇するはずである。しかし、実際は減少していることから、ラドン検出器の検出感度を落とす物質が活性炭 Carboxen-569 から放出されていると考えられる。

5.5.5 白鷺 G_{2X} 4/6

次に、以前 XMASS 実験で 10g を使って流量 1-3L/min で約 26 ~ 30% のラドンを吸着した実績のある活性炭 [15] では、今回のセットアップでどれだけの効果があるのか実験する。ただし、以前の実験では露点補正をしていない。日本エンバイロケミカルズ社製の白鷺は、粒状でポアサイズのピークが 7 Å である。これまでの実験同様 5 g、流量 0.25L/min で測定した。

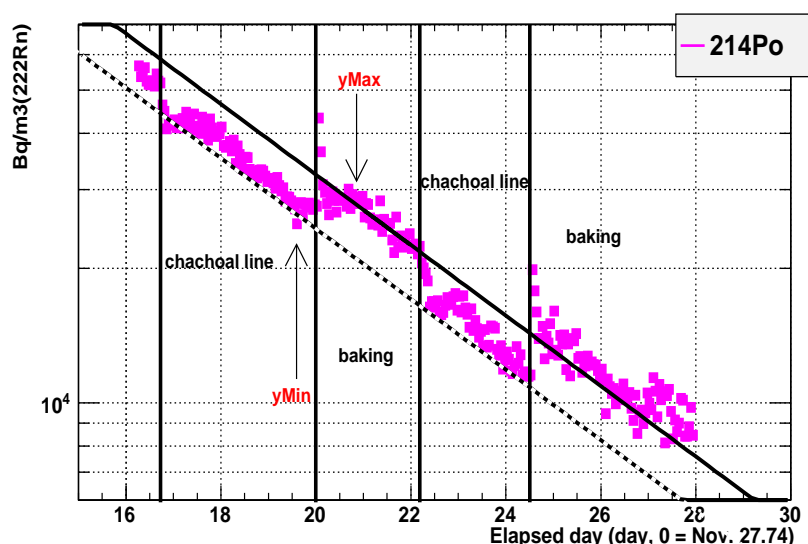


図 5.21: 湿度特性を考慮した白鷺を用いたキセノン中ラドン吸着

図 5.21 の最初の活性炭トラップライン循環で最もラドン濃度が低い点と、ベーキングでラドン濃度が安定した点の差は 12% となった。

次に、流量 0.9L/min では、図 5.20 のようになった。吸着効率は 23% となり、0.9L/min ではどの活性炭よりも吸着効率が高くなった。ただし白鷺 G_{2X} 4/6 は体積が大きく、本研究で開発した銅容器 (図 5.15) には入らなかったため、この容器無しで実験した。容器の有無で吸着効率が変化する可能性があることがわかった。

5.6 まとめ

XMASS 実験の 800kg 検出器内に存在しているラドンを除去することを最終目標に、本研究では新しい活性炭を用いて吸着効率を測定した。

以前 XMASS 実験で開発した活性炭トラップに用いられた、白鷺 G_{2X} 4/6 を 5g 用いて神戸大のセットアップで流量 0.25L/min のキセノン中のラドン吸着は 12% にとどまった。一方、新しい活性炭 Carboxen-1021 では 0.25L/min、5g で最大 44% 吸着することを確認した。

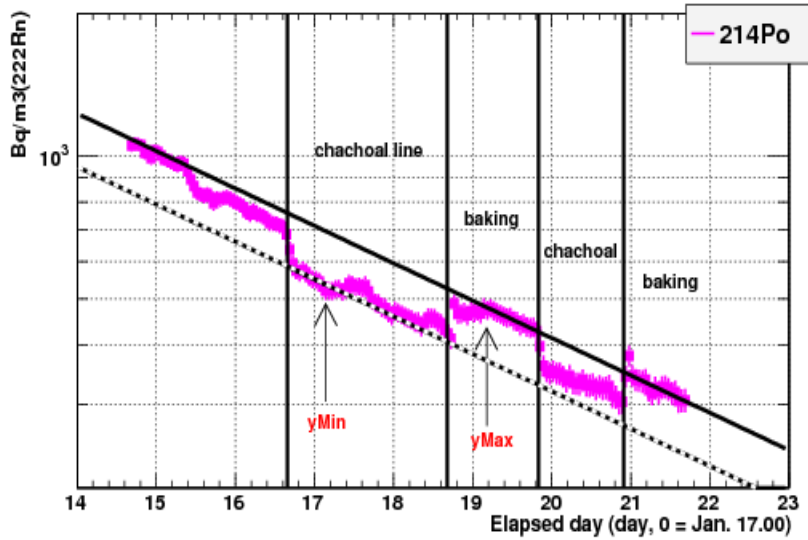


図 5.22: 湿度特性を考慮して白鷺を用いたキセノン中ラドン吸着【0.9L/min】

表 5.2: 活性炭のキセノン中の吸着効率比較

活性炭の種類	流量 [L/min]	吸着効率 [%]
モルシーボン X _{2M} 4/6	0.50	27
	0.90	4
Carboxen-1021	0.25	44
	0.90	13
Carboxen-569	0.25	36
	0.90	13
白鷺 G _{2X} 4/6	0.25	12
	0.90	23

XMASS 実験では、現在 $7.8 \pm 0.5 \text{ mBq}$ の ^{222}Rn が存在している。目標値の 1.2 mBq を達成するためには除去装置を用いて少なくとも $1/7$ にしなくてはならない。前回は $1/10$ にすることを目標に除去装置を開発した [25]。4 章冒頭でも述べたが、白鷺 G_{2X} 4/6 を用いて XMASS 実験で用いるキセノン中のラドンを自身の崩壊によって $1/10$ にするためには、少なくとも 4.8 kg の活性炭が必要となる。 ^{222}Rn の半減期が 3.82 日であることから、自身の崩壊によって $1/10$ になるには 12.7 日かかる。トラップを通り抜ける時間 $T_{Rn} = 12.7$ 日、流量 $f_{Xe} = 1 \text{ L/min} = 1.7 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ を用いて、トラップに必要な体積は以下の式で表される。

$$f_{Xe} \frac{v_{Rn}}{v_{Xe}} T_{Rn} = 17560 [\text{cm}^3] \quad (5.19)$$

ここで、ラドンの速度 v_{Rn} とキセノンの速度 v_{Xe} であり、白鷺 G_{2X} 4/6 の場合、

$$\frac{v_{Rn}}{v_{Xe}} = (0.96 \pm 0.10) \times 10^{-3} \quad (5.20)$$

の関係があることを用いている。

Carboxen-1021 を用いれば、吸着効率が白鷺 G_{2X} 4/6 より大きいため v_{Rn}/v_{Xe} がより大きくなるはずである。白鷺 G_{2X} 4/6 の密度は $4800/17560=0.27[\text{g}/\text{cm}^3]$ より、Carboxen-1021 の密度は $0.62[\text{g}/\text{mL}]$ より小さい。ただし、Carboxen-1021 に含まれる放射性同位体の量はまだ測定していないが、今後測定予定である。

第6章 結論と課題

XMASS 実験で主要なバックグラウンドとなっているラドンについて、ラドンの濃度を測定し、純度を上げることでラドンのコントロールサンプルを作った。キャリブレーション用の線源は軸上にしか設置できないが、ラドンのコントロールサンプルは 800kg 検出器内部に一様に存在する線源として振る舞うため検出器を較正できる。解析を行った期間中、ラドン濃度はほぼ一定であることがわかった。その期間中の平均のラドンの濃度は以下ようになった。

$$800\text{kg 検出器全体のラドン濃度} : 7.1 \pm 0.1\text{mBq}$$

また、800kg 検出器の較正を行うため、検出器中の純粋な ^{214}Bi 事象を弁別する手法の研究を行った。時間差を用いた解析からは、

$$\frac{\text{アクシデンタル事象}}{\text{全事象}} : 0.8 \pm 1.5\%$$

ランダムコインシデンスを用いた解析からは、

$$\frac{\text{アクシデンタル事象}}{\text{全事象}} : 1.8\%$$

という結果を得た。コントロールサンプルとして十分活用できるレベルの純粋な ^{214}Bi 事象を弁別することができた。

本研究の成果として以下が挙げられる。

- 長期間 (30 日分) のデータに対してラドン濃度を評価したこと
- 検出器の安定性を示したこと
- 高純度な ^{214}Bi を選定する手法を開発し、その純度の評価を初めて行ったこと

である。課題としては、 4×10^4 p.e. 以下の ^{214}Po の割合をシミュレーションを用いて求め、より厳密な濃度測定を行うことが挙げられる。

ラドンの吸着のための活性炭トラップを改良するため新しい数種類の活性炭を用いて吸着試験を行った。ポアサイズのピークが小さい活性炭を用いることで吸着効率を上げることができた。最も良い吸着効率だった Carboxen-1021 では

$$\text{Carboxen} - 1021 \text{ の吸着効率} : 44\%$$

となった。なお、これまで XMASS 実験で使用されていた活性炭は同じ条件では、12% の吸着効率を示した。今後、活性炭のバックグラウンド量の評価をすることや、流量依存性、再現性の確認等、より詳細な試験が必要である。

関連図書

- [1] D. N. Spergel et al., *Astrophys. J. Supp.* 148(2003)175
- [2] K. G. Begeman, A. H. Broeils and R. H. Sanders, *MNRAS* 249(1991)523
- [3] WMAP Highlights in NASA <http://wmap.gsfc.nasa.gov/resources/>
- [4] E. Komatsu, et al., *Astrophys. J. Supp.*, 192 (2011) 18.
- [5] N. Jarosik, et al., *Astrophys. J. Supp.*, 192 (2011)14.
- [6] <http://ru.wikipedia.org/wiki/NGC6503>
- [7] <http://www.spacetelescope.org/images/heic1106c/>
- [8] <http://www.spacetelescope.org/images/heic0709b/>
- [9] <http://chandra.harvard.edu/photo/2006/1e0657/>
- [10] M. S. Turner, *Phys. Rep.* 197 (1990) 67.
- [11] A. Sopczak, *Phys. Rep.* 359 (2002) 169.
- [12] E. Aprile, et al., *Phys. Rev. Lett.* 107 (2011) 131302.
- [13] D. S. Akerlib, et al., *Phys. Rev. Lett.* 96 (2006) 011302.
- [14] R. Bernabei, et al., *Eur. Phys. J. C*, 67 (2010) 39.
- [15] D. Motoki, doctor thesis, Tokai University , 2012.
- [16] K. Abe et al. (the XMASS collaboration),arXiv:1301.2815v1
- [17] The Super-Kamiokande Collaboration, *Nucl. Instrum. Meth.* A501(2003)418-462;
- [18] K. Abe et al. (the XMASS collaboration),arXiv:1211.5404
- [19] The Super-Kamiokande Collaboration, *Phys. Lett.* 452 (1999) 418.
- [20] W. Ootani, master thesis, University of Tokyo, 1994.
- [21] A. Minamino, master thesis, University of Tokyo, 2004.
- [22] M. Ishitsuka, master thesis, University of Tokyo, 2001.
- [23] A. Shinozaki, master thesis, University of Tokyo, 2010.
- [24] K. Abe et al. (the XMASS collaboration), *Astroparticle Physics* 31 (2009) 290-296
- [25] K. Abe et al. *Nucl. Instr. and Meth. in Phys.Res. A* 661 (2012) 50-57

- [26] <http://www.shse.u-hyogo.ac.jp/kumagai/eac/ea/nendai.htm>
- [27] ICRR ニュース No.77(2011.08.31)
- [28] H. Simgen, private communication
- [29] <http://www.uranokk.com/ac/index.htm>
- [30] <http://www.ngk.co.jp/C1/c1/gijyutsu/index.html>
- [31] Y. Takeuchi, K.Okumura, T.Kajita, S.Tasaka, H. Hori, M.Nemoto, H. Ogawa : Phys. Riv. A421(1999)334
- [32] Chu K.D. and Hopke P.K.: Environ. Sci. Technol. 22 711-717(1988)
- [33] M.Nemoto, master thesis, Tokai University , 1988.
- [34] Y. Nakano, master thesis, University of Tokyo, 2012.

謝辞

本研究を行うにあたって、大変多くの方々からご指導、ご協力をいただき感謝の意を表します。

指導教官の竹内康雄先生には、4年生から3年間 XMASS 実験でお世話になり、実験の基礎から、本論文を進めるにあたり細かい文章の校閲まで丁寧に御指導頂きました。実験開始時間も私の都合を考慮していただいたり、私の実験なのに、力のいる作業はお任せしてしまったり、理解力が低く何度も同じ質問をしたり、ご迷惑ばかりおかけしましたが、最後まで優しく熱心に御指導いただき本当にありがとうございました。身内賢太朗先生は学生目線で接していただき、質問もしやすかったです。いつでも明るい先生のお陰で楽しい院生生活を送ることができました。藏重久弥先生は、豊富な知識で素粒子物理学の面白さを教えて頂きました。学問だけでなくどんな話題でも詳しくご存知で刺激を受けました。原俊雄先生には、身近にある物理の話をお聞かせいただき、毎回勉強になりました。就職活動でもお世話になり、ありがとうございました。山崎祐司先生は難しい話でも噛み砕いて教えて下さり、大変わかりやすかったです。鈴木州先生にはコロキウムや暗黒物質ゼミの際など、丁寧に御指導いただきました。越智敦彦先生は、質問したことの何倍ものことを教えていただき勉強になりました。秘書の横山有美さんには、出張の手続きや、配達物の検品などでお世話になりました。ありがとうございます。

鈴木洋一郎先生には、ミーティングでの確かなアドバイスを頂きました。中畑雅行先生は、いつも優しく接していただきました。暖かく見守ってくださっていることが嬉しかったです。森山茂栄先生は解析グループ全体の指揮をとられており、お忙しい中でも、私の解析について優しく御指導いただきました。感謝しています。小川洋先生には、解析を1から10まで教わりました。休日でも電話で対応して下さったり何を聞いても優しく返答くださり、大変嬉しかったです。竹田敦先生は、熱心な研究者でありながら、オフのときは面白く、大変魅力的な先生でした。岸本康宏先生には、考えが至らなかった部分のコメントを頂き、勉強になりました。Jing Liu 先生には、私の拙い英語も理解して下さり、XMASS の解析ツールについて御指導いただきました。You listened to my poor English, and made an effort to understand it. Thank you for your kindness. Kai Martens 先生は、いつもいろんなことを教えていただきました。英語を完全には理解できていなかったかもしれませんが、楽しませていただきありがとうございました。I might not completely understand your English, but I had a good time talking with you. Thank you. 安部航先生には、シミュレーションについて御指導いただきました。関谷洋之先生はいつも賢明な考えを持っておられ、学ぶことが多かったです。山下雅樹先生には4年生の頃から研究で御指導いただきお世話になりました。小林兼好先生、平出克樹先生は、DAQ グループであまりいっしょに作業をする機会がなかったですが、ミーティングでDAQの発表を参考にさせていただきました。Yang Byeongsu 先生にも大変お世話になりました。岐阜大学の田阪茂樹先生は岐阜大学に出張に行かせていただき、ラドン検出器の詳細を御指導いただきました。東京大学の小汐由介先生、戸村友宣先生には、神岡の生活で様々な行事にお誘いいただき、研究の息抜きになりました。感謝しています。神岡事務室のみなさま、警備員のみなさま、XMASS 派遣シフトのみなさま、ドミトリーの食事係、掃除係のみなさまのおかげで神岡で快適に過ごすことができました。ありがとうございました。東北大学の本木大資さんは、私が4年生のときからシフトなど神岡で気に掛けていただき、いつでも親切に接して下さいました。横浜国立大学の藤井景子さんは、XMASS グループで出会った初めての女性でした。私がシフトに慣れていなかったころから優しく教えていただき、孤独な神岡で大変心強かったです。ありがとうございました。名古屋大学の内田裕義さんは誰にでも優しく、人見知りの私でも困ることはありませんでした。平野重利さんは研究のことからパソコンの便利なツールまで教えていただき、神岡で頼れる先輩でした。ありがとうございます。岡山大学の森俊彰さん、東京大学の横澤孝章さん、五代儀一樹さん、東北大学の上島孝太さんには、別の実験グループでありながら、本当の実験グループの後輩のように優しく接

してくださり、感謝しています。神戸大学で先輩の西山知徳さんのおかげで研究室に馴染むことができました。社会人になられた今でも交流して下さりありがとうございます。谷和俊さん、岸本巴さんはいつもスマートな研究姿勢で、勉強になりました。大塚康平さんは神戸の研究室で XMASS グループに所属した初めての先輩として、様々なことを教えていただきました。

同期の稗田啓介くんはいつも神岡に滞在して研究を頑張っていました。おかげで私が神岡に行くとき、一人で寂しい思いをしませんでした。ありがとうございます。高知尾理くんは、音楽の趣味が合い、話すのが楽しかったです。また交通の便が悪く困ったときに車を出してくれて非常に感謝しています。草場文雄くんはいつも面白い話で楽しませてくれました。瀧谷寛樹くんはいつもみんなのことを気遣い働いてくれていました。榎本大悟くんは、研究へのこだわりが強く、勉強になりました。中野佑樹くん、研究のことから神岡の生活まで、お世話になりました。細川佳志くんは研究室でも神岡でも一緒に、研究に関して最も長い時間を共に過ごしました。それと同時に最も迷惑をかけたと思います。それでも見放さずに仲良くしてくれてありがとうございます。研究室の同期の駒井英俊さん、江戸勇樹くん、渡邊一平くん、北村拓己くん、山口貴弘くんは共に励まし合い、研究を頑張ることができました。後輩の大西洋輔くん、XMASS グループを選んでくれてありがとうございます。稲丸由夫輝くんと来見田吏恵さん、鈴木淳くんはみんなしっかり者で先輩として何もしてあげられなかったけれど、後輩でいてくれてありがとうございます。岡直哉くん、中川克磨くんは神岡の後輩として仲良くしてくれてありがとうございます。神戸の4年生のみんな、研究のことは何も教えてあげられなかったけれど慕ってくれてありがとうございます。

最後に、お金の心配やその他何の心配もすることなく大学院まで進学させてくれた両親に深く感謝致します。

平成 25 年 2 月 村田亜紀