# 修士論文

# 神岡地下環境中性子測定のための

# 液体シンチレータ検出器の 極低バックグラウンド化

# 早稲田大学 先進理工学部物理学及応用物理学専攻修士2年 寄田研究室

# 岩澤 広大

# 2022年7月29日

暗黒物質の最有力候補の1つであるWIMP は物質と電弱スケール程度の弱い相互 作用を起こす重い粒子とされている。このWIMP を探索する手法として物質との原 子核反跳を検出する直接探索実験が世界各地で行われている。暗黒物質直接探索実験 において主要な背景事象となるのは、環境中性子である。背景事象となる高速中性子 もWIMP 同様、原子核反跳を起こし PSD による分離ができないため、そのフラック スやスペクトラムを正確に見積もることが非常に重要となる。

特に地下環境では、宇宙線の影響は小さいが、岩盤の影響を強く受ける。各実験 サイトによって岩盤の組成が異なるためにそれぞれの場所で精密な環境中性子測定を 行う必要がある。また、環境中性子は一般的に 1/E 則に従うとされてきたが、先行研 究のシミュレーションの結果から低エネルギー側 (10<sup>-7</sup>MeV 付近) と高エネルギー側 (1MeV 付近) において 1/E 則から大きく外れることが示唆された。以上のことから、 セットアップが容易な検出器を用いて暗黒物質直接探索において主要な背景事象とな る高速中性子の直接測定を行い、そのスペクトラムを正確に見積もることが本研究の モチベーションとなる。

検出器はステンレス容器と PMT で構成され、高速中性子に直接感度をもち電子 反跳事象との弁別能力の高い液体シンチレータを用いて環境中性子測定を行う。本研 究において課題となるのは、検出器内部起因のα線背景事象である。α線も原子核反 跳事象を起こし PSD により分離できないため、このα線を極力低減化した極低バッ クグラウンド検出器の作成が要求される。本論文ではα線源の低減化を施した検出器 による測定結果とそこから見積もられるα線バックグラウンドの見積もり結果、低減 化手法の検討事項について述べる。 目 次

1	序論		8
	1.1	暗黒物質	8
	1.2	暗黒物質直接探索の手法.............................	9
	1.3	暗黒物質直接探索の現状	10
<b>2</b>	環境	<b>钟性子</b>	11
	2.1	地下環境における環境中性子........................	11
	2.2	環境中性子測定の現状	13
	2.3	液体シンチレータを用いた環境中性子測定原理...........	15
		2.3.1 液体シンチレータの性質	15
		2.3.2 測定セットアップ	17
		2.3.3 キャリブレーション	18
3	環境	記中性子測定における背景事象	<b>21</b>
	3.1	背景事象の起因	21
	3.2	γ線背景事象の分離	23
	3.3	α線背景事象の評価方法	24
	3.4	シミュレーションを用いたα背景事象の理解	25
	3.5	本研究における開発方針	27
4	液体	<b>エシンチレータ容器における低バックグラウンド化</b>	28
	4.1	低バックグラウンド手法	28
		4.1.1 超音波洗浄	28
		4.1.2 表面処理方法	29
		4.1.3 液体シンチレータの純化	29
	4.2	先行研究における液体シンチレータ検出器	33
		4.2.1 先行研究における液体シンチレータ検出器の R & D	33
	4.3	電解複合研磨 (ECP) を施した液体シンチレータ容器による測定	36
		4.3.1 キャリブレーション	36
		4.3.2 電解複合研磨を施した検出器におけるα線バックグラウンドレート	37
		4.3.3 検出器の分解能	38
5	検出	器改善による極低バックグラウンド化	42
	5.1	溶接箇所を変更した新検出器による測定	43
		5.1.1 測定セットアップ	43
		5.1.2 α線レートの時間変動	44
		5.1.3 α線スペクトラムによる背景事象の起因	44
		5.1.4 液体シンチレータの純化工程の改善	45
	5.2	液体シンチレータの窒素ガスバブリングによる Rn 低減効果	47
		5.2.1 測定セットアップ	47
		5.2.2 α線レートの時間変動	48

6	まとめと今後の展望	51
7	謝辞	52
$\mathbf{A}$	表面処理サンプルの光学測定	<b>54</b>

# 表目次

2.1	神岡地下 Lab-B における岩石成分の重量比 [5] ..........	13
2.2	BC-501A の物性値 [7]	16
5.1	測定セットアップ概要	43

# 図目次

1.1	NGC6503 の回転曲線 [2]	8
1.2	宇宙の組成	9
1.3	暗黒物質探索に対するアプローチ	9
1.4	世界における WIMP 探索 [3]	10
1.5	世界の地下実験サイトにおける宇宙線ミューオンフラックス [4]	10
2.1	宇宙線起因の環境中性子............................	11
2.2	岩盤起因の環境中性子・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	12
2.3	U/Th 系列の崩壊過程	12
2.4	<sup>3</sup> He 比例係数管を用いた測定セットアップ	14
2.5	2セットアップの検出レート比と Geant4 により推定されるスペクトラム .	14
2.6	液体シンチレータの発光過程...............................	15
2.7	BC-501A の発光波長 [7]	16
2.8	実際の液体シンチレータ検出器	17
2.9	液体シンチレータ検出器の概略図	17
2.10	測定セットアップの外観	18
2.11	液体シンチレータ検出器における中性子測定原理	18
2.12	キャリブレーションセットアップ	19
2.13	液体シンチレータと NaI シンチレータの光量の相関関係........	19
2.14	Back Scatter イベントについてガウシアン Fit 結果	20
2.15	検出位置と LR Asymmetry の関係	20
3.1	<sup>222</sup> Rn 濃度の季節変動 [8]	21
3.2	検出器内部起因のα線バックグラウンド	22
3.3	U 系列の崩壊過程の一部	22
3.4	原子核反跳事象と電子反跳事象の波形......................	23
3.5	<sup>252</sup> Cf を用いた測定データにおける PSD	23
3.6	Background 測定データにおける PSD	24
3.7	Bi-Po タグ	24
3.8	10mBq, 1.0mBq, 0.1mBq で生成される <sup>222</sup> Rn と <sup>218</sup> Po, <sup>214</sup> Po の信号間隔 .	25
3.9	各生成レートでの <sup>222</sup> Rn の崩壊間隔と、 <sup>222</sup> Rn と <sup>218</sup> Po の∆ t の比較	26
3.10	生成レートによる時間分布のパターン..................	26
3.11	環境中性子測定に向けた液体シンチレータ検出器のセットアップ概要	27
4.1	液体シンチレータ容器の超音波洗浄.........................	28
4.2	電解複合研磨手法と実際の容器内部の状態	29
4.3	純化系	29
4.4	純化系の配管図	30
4.5	超純水タンクの詳細	30
4.6	超純水装置	31
4.7	混合タンクの詳細...................................	31
4.8	検出器 1 における <sup>214</sup> Po の α レートの時間変動 [10]	33
4.9	検出器 1 における α 線バックグラウンドの位置依存性 [10]	33

4.10	検出器 2 における <sup>214</sup> Po の α レートの時間変動 [10]	34
4.11	検出器 2 における α 線バックグラウンドの位置依存性 [10]	34
4.12	α線バックグラウンドの位置依存性の比較 [10]	35
4.13	LR Asymmetry と検出器位置の関係	36
4.14	光量と LR Asymmetry の関係	36
4.15	電解複合研磨を施した検出器におけるα線バックグラウンドの時間変動	37
4.16	0.8mBq における α 線バックグラウンドレベル ...........	37
4.17	位置分解能 (LR Asymmetry)	38
4.18	位置分解能 (検出位置)	39
4.19	<sup>214</sup> Poのエネルギー分解能	39
4.20	<sup>137</sup> Cs のエネルギー分解能	40
4.21	<sup>222</sup> Rn と <sup>218</sup> Po のエネルギー分解能	40
4.22	エネルギー分解能と光量の関係.........................	41
5.1	溶接箇所を変更した新容器........................	42
5.2	新容器の溶接箇所..............................	42
5.3	新容器による測定セットアップ	43
5.4	新容器におけるα線レートの時間変動	44
5.5	新容器におけるα線スペクトラム	44
5.6	新容器におけるα線バックグラウンドの位置依存性	45
5.7	混合タンクの洗浄	45
5.8	純化工程改善後のα線レートの時間変動	46
5.9	純化工程改善後のα線スペクトラム	46
5.10	純化工程改善後のα線バックグラウンドの位置依存性	47
5.11	液体シンチレータの窒素ガスバブリングセットアップ	47
5.12	液体シンチレータの窒素ガスバブリング後のα線レートの時間変動	48
5.13	早稲田に組み上げた純化系	49
5.14	早稲田に組み上げた純化系のタンク詳細	49
5.15	次期液体シンチレータの窒素ガスバブリングセットアップ	50
A.1	使用したサンプルの表面写真.............................	54
A.2	光学測定セットアップ	54
A.3	反射率測定結果	55

## 1 序論

#### 1.1 暗黒物質

暗黒物質の存在が最初に示唆されたのは、1993 年に F.Zwicky による。[1] F.Zwicky は かみの毛座銀河団を望遠鏡により観測し、ビリアルの定理を適用することによる銀河の速 度分散から得られる銀河の重力が、光学的に得られた銀河の重力の約 400 倍も大きいこと から光学的に観測できない暗黒物質の存在を示唆した。

その後、1970年代後半において渦巻き銀河の回転速度分布の観測や重力レンズ効果から光では観測できない質量を持つ物質の存在が立証され、より強く暗黒物質の存在が示唆 されてきた。

近傍の銀河においては今までの観測から回転速度がよく計算されており、銀河中心からの関数 (回転曲線) が得られている。銀河の回転速度 v は、銀河質量を M、銀河中心からの距離を r、万有引力定数を G とするとケプラーの法則に従って以下の式で表される。

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

この式から銀河の回転速度は距離に依存し、距離の平方根の反比例に従い遅くなると予 想される。ここで渦巻銀河である NGC6503 について電場を用いて観測された回転曲線を 以下に示す。



図 1.1: NGC6503 の回転曲線 [2]

実線が観測値で点線が中性水素分子が出す 21cm 線の観測により得られた銀河内に存在 するガスの回転曲線、破線が観測により得られた銀河の回転曲線である。また破点線は上 記2要素以外の未知の物質からの寄与を示す。このことから、光学的には銀河中心に質量 が集まる構造をしている渦巻き銀河において電磁相互作用を起こさず、重力相互作用を起 こす暗黒物質が存在し、それにより銀河中心からの離れた位置でも回転速度が変化しない と考えられる。 また、今までの観測により宇宙の組成が以下の図のようにわかっている。現在観測でき る物質は 4.9 %であり、残りのうち 26.8 %が暗黒物質、68.3 %が暗黒エネルギーと推定さ れている。



図 1.2: 宇宙の組成

#### 1.2 暗黒物質直接探索の手法

暗黒物質探索は直接探索と間接探索、加速器実験による探索の3つのアプローチがある。 直接探索は、暗黒物質が地上や地下に置かれた検出器に入ってきた時に物質と相互作用を 起こし、そこで発生するシンチレーション光などを検出することにより観測する。間接探 索は、地上や上空にあげた検出器を用いて、暗黒物質が宇宙で対消滅した際に生じる粒子 を検出することにより観測する。加速器実験では高エネルギーに加速した粒子を衝突させ て生成された粒子の中から暗黒物質を探索する手法である。これらのアプローチは以下の 図に示したファインマンダイアグラムの見る方向を変えたものに相当する。



図 1.3: 暗黒物質探索に対するアプローチ

#### 1.3 暗黒物質直接探索の現状

暗黒物質のモデルの中で最も有力な候補の一つとして WIMP(Weakly Interactive Massive Particle) が挙げられる。WIMP は冷たい残存粒子のモデルの一つで物質と電弱スケー ル程度の弱い相互作用をする重い粒子とされている。世界中でこの WIMP 探索を目的と した直接探索実験が行われており、主な検出原理としては、検出器内部に入ってきた暗黒 物質が原子核と衝突し、反跳された原子核のエネルギーを光や熱に変換することで検出す る。現在、世界で行われている WIMP 探索の現状を以下の図に示す。



図 1.4: 世界における WIMP 探索 [3]

横軸が WIMP の質量、縦軸 WIMP と原子核の散乱断面積である。色の塗られた領域に ついては、各実験においてその領域に暗黒物質があると主張しており、曲線についてはそ れよりも上部の領域に関して暗黒物質の存在を棄却している。

反跳原子核のエネルギーは1~100keV と低いエネルギーであるため暗黒物質直接探索 実験において検出器の高感度化や、背景事象の除去や正確な理解が非常に重要となる。特 に地下環境においては宇宙線の影響が小さい代わりに岩盤からの環境中性子の影響を大き く受けてしまう。各地下実験サイトにおける宇宙線ミューオンフラックスを示したものを 以下に示す。



図 1.5: 世界の地下実験サイトにおける宇宙線ミューオンフラックス [4]

### 2 環境中性子

環境中性子は、暗黒物質探索実験やニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊検出実験な どの稀事象探索実験において主要な背景事象となる。特に暗黒物質探索実験においては中 性子が WIMP と同様、原子核反跳事象を起こすため、これら二つの信号を分離することは 困難である。そのため環境中性子の正確な理解が非常に重要となる。本研究では、WIMP と同エネルギー帯である sub MeV~MeV 領域の高速中性子と呼ばれる領域の測定を目的 とするものである。

#### 2.1 地下環境における環境中性子

環境中性子の主な起因は、

- ・宇宙線起因
- ・岩盤起因
- の2つに分けられる。

宇宙線起因とは、宇宙線が大気中の物質と反応し生じる二次宇宙線としての中性子と、 二次宇宙線のミューオンが岩盤の物質と原子核破砕を起こし生じる中性子がある。



図 2.1: 宇宙線起因の環境中性子

特に二次宇宙線ミューオンは物質を貫通する能力が高いため岩盤の物質と原子核破砕し て生じる中性子が地下環境においても背景事象となりうる。この事象は通過する岩盤の厚 さによって減衰する。例えば、地下 1000m にある神岡の実験サイトは宇宙線ミューオン のフラックスが地上に対して、10<sup>-5</sup> である。また、二次宇宙線の中性子はコンクリート や水といった水素を多く含む物質と散乱し減衰するため、地下環境において影響は小さく なる。 岩盤起因とは、岩盤中に含まれる U/Th 系列の放射性核種が α 崩壊を起こした際に生じる α 線が周囲の物質と (α,n) 反応を起こす場合と、岩盤中に含まれる<sup>238</sup>U などが自発核分裂を起こす場合がある。



図 2.2: 岩盤起因の環境中性子

U/Th 系列の崩壊過程について以下の図に示す。



図 2.3: U/Th 系列の崩壊過程

U/Th 系列の崩壊における  $\alpha$ 線の最大エネルギーは Th 系列の <sup>212</sup>*Po* の  $\alpha$ 崩壊 8.785MeV である。地殻の主な組成は 0, Si, Ca が挙げられるが <sup>16</sup>0 の同位体である <sup>17</sup>0 や <sup>18</sup>0 は閾値 を超えるエネルギーであるため ( $\alpha$ , n)反応が生じる。

以上のことから、地下環境において岩盤起因の中性子が支配的となり、それは各実験サ イトがある岩盤の組成に依存して変化する。環境中性子は暗黒物質直接探索の主要な背景 事象となるため一般的には水やポリエチレンのシールドを用いて遮蔽するが、シールド部 材との相互作用により出てくる中性子や、検出器部材由来の中性子はこれらのシールドで 防ぐことができない。検出器作成において検出器由来の背景事象を極力減らした極低バッ クグラウンドな検出器を作成することが非常に重要となる。

#### 2.2 環境中性子測定の現状

地上では環境中性子のフラックスが大きく、スペクトラムも含めよく理解されている。 しかし地下ではフラックスが小さく要求されるバックグラウンドレベルが非常に高く、ス ペクトラムを測定している結果は少ない。

神岡地下における環境中性子のスペクトラムをシミュレーションにより推定した先行研 究を述べる。[5] この先行研究では、宇宙線起因と岩盤起因の環境中性子をシミュレーショ ンにより見積もるために岩盤の組成を測定している。その結果を以下の表に示す。

Sample	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	MnO	MgO	CaO	$Na_2O$	$P_2O_5$	$SO_3$	ZnO	Ohters
Sample 1	35.60	11.30	10.90	1.08	0.99	39.20	0.02	0.35	0.10	0.03	0.43
Sample 2	33.40	0.73	23.70	4.58	1.90	34.00	0.32	0.02	0.17	0.17	1.01
Sample 3	25.60	0.25	19.30	3.73	1.16	41.50	0.00	0.02	3.01	5.34	0.09
JR-1[6]	75.45	12.83	0.89	0.10	0.12	0.67	4.02	0.02	0.00	0.00	5.90
JA-3[6]	62.27	15.56	6.60	0.10	3.72	6.24	3.19	0.12	0.00	0.00	2.20

表 2.1: 神岡地下 Lab-B における岩石成分の重量比 [5]

上記表の結果は、神岡 Lab-B における壁面の岩石の 3 サンプル (Sample1,2,3) について 蛍光 X 線分析を用いて化学組成を調べたもので、JR-1,JA-3 については地球科学標準物 質データベース [6] の神岡地域に広く分布するとされる岩石組成である。この表から岩石 組成については値にばらつきがあることがわかる。これは神岡坑内に様々な種類の、岩石 が存在し組成が一様ではないことためにある特定の組成を決定することができないことを 示す。

また、環境中性子の以下の成分について見積もる。

- ・U/Th系列由来のa線による (a,n) 反応で生じる中性子
- ・<sup>238</sup>U の自発核分裂
- ・宇宙線ミューオンと岩盤の原子核との核破砕
- ・岩盤内での中性子の輸送

特に岩盤中を通過する中性子は岩盤に含まれる水分量によって減衰されるため、複数の水 分量 (2 %, 4 %) を過程してシミュレーションによりスペクトラムを推定する。 以下にあるようなセットアップを用いて、一方は<sup>3</sup>He比例係数管に入ってくる熱中性子 を測定し、もう一方は<sup>3</sup>He比例係数管をボロンシートで囲み、高速中性子に感度を持た せて測定することで、2つのセットアップにおけるカウントレートを測定する。



図 2.4: <sup>3</sup>He 比例係数管を用いた測定セットアップ

上記セットアップにおける検出レート比によってシミュレーションで推定したスペクト ラムをノーマライズすると以下の図のようなスペクトラムが得られる。



図 2.5: 2セットアップの検出レート比と Geant4 により推定されるスペクトラム

赤線が Sample1 の岩盤組成と水分量 2 %を仮定した場合のシミュレーションにより推 定されるスペクトラム、青線が Sample1 の岩盤組成と水分量 4 %を仮定した場合のシミュ レーションにより推定されるスペクトラム、黒線が尤もらしいスペクトラム (Sample1 の 岩盤組成と水分量 3 %を仮定)、赤の破線が 1/E 則に従うと仮定した時のスペクトラムで ある。

このシミュレーションによるスペクトラムは低エネルギー領域 (10<sup>-7</sup>*MeV* 付近) と高エ ネルギー領域 (1*MeV* 付近) で 1/E 則から大きくズレることを示唆した。特に高エネルギー 領域の 1MeV 付近においては暗黒物質直接探索において主要な背景事象となる環境中性子 のエネルギーであり、今まで仮定していた 1/E 則に従うスペクトラムよりも 2 桁近く多い 結果を示唆しており、この部分を直接測定を行うことで正確に見積もる必要がある。 神岡における環境中性子測定は、中性子測定コンソーシアムの一環で行われている。中 性子測定コンソーシアムとは、実験グループを跨ぎ測定技術・機材などを共有し、測定手 法を確立したうえで、多地点・長期間の測定を行い、その結果を公表・共有することを目 的とした枠組みである。環境中性子スペクトラムの直接測定を行うことで<sup>3</sup>He 比例係数 管での推定結果との相互理解が非常に重要である。

本研究の目的は、暗黒物質直接探索において主要な背景事象となる高速中性子のスペク トラムを直接測定することにある。そのため MeV 領域に直接感度を持つ液体シンチレー タを用いた検出器の作成、どこでも測定可能なセットアップの確立、MeV 領域における 環境中性子の直接測定を行う。

#### 2.3 液体シンチレータを用いた環境中性子測定原理

#### 2.3.1 液体シンチレータの性質

液体シンチレータは有機シンチレータの一つで溶媒と蛍光体と波長変換剤からなる。溶 媒には励起しやすい芳香族化合物がよく用いられる。

荷電粒子が液体シンチレータに入ると溶媒である芳香族化合物が励起し蛍光体を励起さ せる。蛍光体が基底状態に準位を落とすときにシンチレーション光を発し波長変換剤がそ の光を検出可能な波長に変換する。発光過程は以下の図に示す。また、中性子やγ線は液 体シンチレータに豊富に含まれる水素原子核や炭素原子核と弾性散乱やコンプトン散乱す ることで、荷電粒子が反跳原子核として検出される。



図 2.6: 液体シンチレータの発光過程

蛍光体の発光過程は2種類あり、それぞれ蛍光と燐光と呼ぶ。蛍光は、通常のシンチ レーション発光で、光量を時間の関数で表したときに鋭いピーク成分 (ns オーダー) を作 り Fast と定義される。燐光は準位を落とす時に系間遷移を起こしスピン転換が起きるため 長時間かけ発光し、時間の関数においてなだらかなピーク成分を作り Slow(μs オーダー) と定義される。 燐光成分は荷電粒子の電離能に依存するため、原子核反跳事象の方が電子反跳事象より も燐光 (Slow) 成分の割合が大きくなる。このことを利用して原子核反跳事象と電子反跳 事象を分離することができる。

本研究には液体シンチレータとして Saint-Goban 社製の BC-501A を用いる。以下の表 にその物性値を示す。[7]

密度 [g/cc]	0.874
水素原子数 [/cc]	$4.82\times10^{22}$
炭素原子数 [/cc]	$3.98  imes 10^{22}$
水素/炭素 原子比	1.212
電子数 [/cc]	$2.87  imes 10^{23}$
最大放出波長 [nm]	425
光出力 [% Anthracene]	78
発光時定数 [ns]	3.16, 32.3, 270
屈折率	1.505
発火点 [℃]	26
沸点 [℃ @1atm]	141

表 2.2: BC-501A の物性値 [7]



図 2.7: BC-501A の発光波長 [7]

また発光波長を上図に示す。表にもある通り 425nm にピークを持ち、380nm~520nm に分布する。

#### 2.3.2 測定セットアップ

本研究で用いる液体シンチレータ検出器を以下の図に示す。



図 2.8: 実際の液体シンチレータ検出器



こちらは、実際の検出器を上から撮った写真である。また検出器の概略図を以下に示す。

図 2.9: 液体シンチレータ検出器の概略図

液体シンチレータ検出器を横から見た時の概略図となる。検出器は大きく分けて両読みの PMT と中央の液体シンチレータ容器で構成される。

液体シンチレータ容器は、ステンレス製でφ 14cm, 長さ 31cm で、液体シンチレータが約 4.7L 入る。上部についている煙突部分より液体シンチレータの充填を行う。また、両サイド にφ 14cm, 暑さ 1.2cm のビューポートがついており PMT でシンチレーション光の両読み を行う。PMT は Hamamatsu 製の H6527 を用いている。また、DAQ には FADC(CAEN V1724D) を用いており、分解能は 14bit、サンプリングレートは 100MS/s である。 また環境γ線を遮蔽し、低減するため周囲には鉛 10cm, 銅 5cm のシールドを組み測定 を行う。測定時の外観を以下に示す。



図 2.10: 測定セットアップの外観

#### 2.3.3 キャリブレーション

データ解析をするにあたり以下の2つのキャリブレーションを行なっている。・クエン チング効果のキャリブレーション・発光位置のキャリブレーション ますはじめに液体シンチレータによる中性子測定原理を以下の図に示す。



図 2.11: 液体シンチレータ検出器における中性子測定原理

高速中性子が液体シンチレータの原子核と弾性散乱し、反跳された原子核が液体シンチ レータを励起することでシンチレーション光を発する。PMT でその光を検出し電圧値と して光量を得られるが、実際はエネルギーが光に変換される時にクエンチングを起こすた めそのキャリブレーションが必要となる。クエンチング効果のキャリブレーションはγ線 源である<sup>137</sup>Csを用いて、Back Scatter イベントから行う。 キャリブレーションのセットアップを以下に示す。



図 2.12: キャリブレーションセットアップ

赤い四角で示したものが線源で、鉛ブロックを 2cm の間隔を開けコリメータとして利用 している。線源は検出器中央から 15cm 離して設置。また線源の後ろ 5cm 離したところに NaI シンチレータを置いている。<sup>137</sup>*Cs* のγ線が液体シンチレータ容器中央で電子を反跳 したときに得られる光量を <sup>137</sup>*Cs* が発するγ線が液体シンチレータ落とすエネルギーと対 応づける。この時電子反跳事象を用いているため光量の単位は [*keVee*] となる。

γ線が液体シンチレータ内部でコンプトン散乱を起こし、180°跳ね返るイベントを Back Scatter イベントと呼ぶ。Back Scatter イベントは線源の後に置いた NaI シンチレータを 用いて ID する。実際の測定データを以下に示す。縦軸は液体シンチレータの光量、横軸 は NaI シンチレータの光量とすると図の赤枠部分に Back Scatter イベントが分布する。



図 2.13: 液体シンチレータと NaI シンチレータの光量の相関関係

Back Scatter イベントについてガウシアンで Fit することで Mean 値を得たものが以下 のヒストグラムとなる。



図 2.14: Back Scatter イベントについてガウシアン Fit 結果

<sup>137</sup>*Cs* の 662keV の  $\gamma$  線を用いた場合、Back Scatter イベントでは、液体シンチレータ に 478keV 落とし、NaI シンチレータに 184keV を落とす。つまり上記ヒストグラムによっ て得られた光量 298[FADC counts] は 478*keV*<sub>ee</sub> に相当する。

次に検出器位置のキャリブレーションについては、両読みの PMT の光量比 LR Asymmetry を用いて行う。LR Asymmetry は以下の式で与えられる。

 $LRAsymmetry = \frac{LeftPMT の光量 - RightPMT の光量}{LeftPMT の光量 + RightPMT の光量}$ 

クエンチング効果のキャリブレーションのセットアップを用いて線源の位置を変更し Position Scan を行うことで検出位置と LR Asymmetry の値を対応させる。得られた検出 位置と LR Asymmetry の関係を以下に示す。相補誤差関数による Fit を行なっている。



図 2.15: 検出位置と LR Asymmetry の関係

## 3 環境中性子測定における背景事象

環境中性子測定において環境γ線やα線が背景事象となる。これらは暗黒物質探索実験 においても背景事象となるためその理解が非常に重要である。特にα線は中性子と分離で きない主要な背景事象となるため、正確な見積もり、検出器改善による低バックグラウン ド化が課題となっている。

#### 3.1 背景事象の起因

・環境γ線

主に岩盤に含まれる放射性核種の自発核分裂や崩壊に起因して生じる。外部起因であれば 鉛によるシールドによって遮蔽が可能である。

· α線

放射性核種のα崩壊が主な起因となる。検出器外部、例えば岩盤に含まれるU/Th系列の 放射性核種のα崩壊により生じるα線はγ線の遮蔽シールドで止まる。ただし地下環境は 岩盤に囲まれており閉鎖的な空間であるためU/Th系列における<sup>222</sup>Rn や<sup>220</sup>Rn が気体 として存在し、その濃度も地上に比べて非常に高いため液体シンチレータの移送などは外 気に触れない閉じた系で行う必要がある。

また、季節により風向きが変わるため、<sup>222</sup>*Rn* 濃度に季節依存性が現れることがわかっている。神岡において神岡 Rn 検出器を用いて測定された<sup>222</sup>*Rn* 濃度の季節依存性を以下に示す。[8]



図 3.1:<sup>222</sup>Rn 濃度の季節変動 [8]

図上部の (a) は Super Kamiokande の実験サイトに繋がる坑道にて測定した結果で図下 部の (b) は XMASS の実験サイトに繋がる坑道で測定した結果である。このことから 10 月~4 月にかけては 100Bq/m<sup>3</sup> なのに対して 4 月~10 月にかけては 2000Bq/m<sup>3</sup> と、冬季 と夏季の間で 20 倍もの濃度変動が見られる。これら外部起因の a 線は、鉛や銅シールド あるいは液体シンチレータ移送の系を閉じることによって十分に減らすことができる。 一方で問題となるのが、検出器内部起因の a 線である。今までの研究から a 線バックグ ラウンドは検出器部材内部や液体シンチレータ起因であることがわかっている。



検出器内部表面の拡大図

図 3.2: 検出器内部起因のα線バックグラウンド

上図に示したように検出器内部起因のα線バックグラウンドは主に2種類ある。まず一つは液体シンチレータ容器のステンレス内部に含まれる U 系列の<sup>226</sup> Ra がα崩壊したときに生じる<sup>222</sup> Rn はガスであるためステンレスから染み出してくることがある。染み出してきた<sup>222</sup> Rn がα崩壊することでこれがα線バックグラウンドとなる。

そしてもう一つが液体シンチレータに放射性不純物が含まれる場合である。これも同様 に放射性核種の半減期に従い、α崩壊を起こすことでα線バックグラウンドとなる。また、 U系列の放射性核種が含まれるとその後段のα崩壊もバックグラウンドとなる。以下にU 系列の一部を示す通り<sup>226</sup>Ra や<sup>222</sup>Rn だけでなく<sup>218</sup>Po や<sup>214</sup>Po もα線バックグラウン ド源となる。



図 3.3: U系列の崩壊過程の一部

#### 3.2 γ線背景事象の分離

液体シンチレータ検出器において、γ線は電子反跳事象を起こす。これは先の章でも述 べた通り、原子核反跳事象に対して燐光 (Slow) 成分が小さくなる。以下に原子核反跳事 象と電子反跳事象の波形の違いについて示す。



図 3.4: 原子核反跳事象と電子反跳事象の波形

鋭いピークである蛍光成分が支配的な領域を Fast と定義し、その後のなだらかな燐光成 分が支配的な領域を Slow と定義する。PSD(Pulse Shape Discrimination) では Total(光 量) に対する Slow の割合、Slow/Total の値により反跳事象を分離する。

以下に液体シンチレータ検出器で中性子線源である<sup>252</sup>Cf を用いた測定データについて、縦軸を Slow/Total、横軸を Total[keVee] とした相関関係を示す。



図 3.5: <sup>252</sup>Cf を用いた測定データにおける PSD

この Slow/Total と Total の相関関係により、上側に中性子のバンド、下側にγ線のバンドを引いてよく分離されていることがわかる。

#### 3.3 α線背景事象の評価方法

検出器内部起因のα線バックグラウンドは中性子と同様、原子核反跳事象となるため PSD により分離ができない。実際の Background run データでは以下のヒストグラムのように中性子のバンド領域にα線バックグラウンドが乗っている。



図 3.6: Background 測定データにおける PSD

このα線量の評価にはBi-Poタグを用いている。Bi-Poタグとは、<sup>214</sup>Poの半減期が164 μsと他と比べて非常に短いことから、<sup>214</sup>Biのβ崩壊と<sup>214</sup>Poのα崩壊の信号の時間差 を利用してタグする手法である。



図 3.7: Bi-Po タグ

この手法を用いて <sup>214</sup>*Po* は非常に強力にタグされる。また、<sup>214</sup>*Po* のデータからそれより上段のα崩壊する核種についても見積もることができる。

#### 3.4 シミュレーションを用いたα背景事象の理解

U 系列の崩壊過程をコード上で再現することで放射性核種の生成レート、つまり<sup>222</sup>*Rn* の染み出しレートとα崩壊の信号間隔を簡単にシミュレーションができる。ある一定の レートで生成される<sup>222</sup>*Rn* とそれぞれの半減期に従いα崩壊する<sup>218</sup>*Po*(半減期:3.1分) と<sup>214</sup>*Po*(半減期:164 μ s) について信号間隔のシミュレーションを行なった。



図 3.8: 10mBq, 1.0mBq, 0.1mBq で生成される<sup>222</sup>Rn と<sup>218</sup>Po, <sup>214</sup>Po の信号間隔

図上部のプロットは縦軸に ParentID、横軸を時間としたものである。ParentID とは、 親核種に ID ナンバーをふり、後段の放射性核種がどの <sup>222</sup>*Rn* から崩壊したのか ID する ための数字である。ParentID が同じ <sup>222</sup>*Rn*, <sup>218</sup>*Po*, <sup>214</sup>*Po* は同じ起源から崩壊した放射性 核種であることを示す。

図下部のプロットはそれぞれのレートにおける時間分布となっており検出器で見える信 号を想定したものである。

<sup>214</sup>*Po* は Bi-Po タグによって除去できるので、<sup>222</sup>*Rn* と <sup>218</sup>*Po* に注目する。10mBq の <sup>222</sup>*Rn* 生成レートにおいて、<sup>222</sup>*Rn* と <sup>218</sup>*Po* を $\Delta$  t によるタグできないのは当然であるが、 1.0mBq においても <sup>222</sup>*Rn* と <sup>218</sup>*Po* の $\Delta$  t によるタグが困難であることがわかる。例え ば <sup>222</sup>*Rn* 生成レートが 1.0mBq の ParentID vs Time の分布において、ParentID が 5 の <sup>222</sup>*Rn* と <sup>218</sup>*Po* の α 崩壊信号の間に ParentID が 6 の <sup>222</sup>*Rn* と <sup>218</sup>*Po* の α 崩壊信号が入っ てくる。この時、検出器では、<sup>222</sup>*Rn*(Parent ID:5), <sup>222</sup>*Rn*(Parent ID:6), <sup>218</sup>*Po*(Parent ID:6), <sup>218</sup>*Po*(Parent ID:5) の順番で α 崩壊の信号が見えることになる。Bi-Po では信号間 隔が非常に短いために、<sup>214</sup>*Bi* と <sup>214</sup>*Po* の間に信号が入らず、 $\Delta$  t により非常に強力にタ グすることができるが、このように <sup>222</sup>*Rn* 生成レートでは <sup>222</sup>*Rn* と <sup>218</sup>*Po* の α 崩壊信号 の間に、他の親核種からの <sup>222</sup>*Rn* 生成レートでは <sup>222</sup>*Rn* と <sup>218</sup>*Po* の α 崩壊信号の間に、他の 親核種からの <sup>222</sup>*Rn* と <sup>218</sup>*Po* の α 崩壊信号がほとんど入らない。 <sup>222</sup>*Rn* と <sup>218</sup>*Po* と信号の時間差と、各生成レートによる <sup>222</sup>*Rn* の崩壊間隔を以下に示す。



図 3.9: 各生成レートでの<sup>222</sup>Rnの崩壊間隔と、<sup>222</sup>Rn と<sup>218</sup>Poの∆tの比較

黒線が <sup>222</sup>*Rn* と半減期 3.1 分に従い崩壊する <sup>218</sup>*Po* の $\Delta$  t 分布 (<sup>218</sup>*Po*(Parent ID: n) の崩壊時間 - <sup>222</sup>*Rn*(Parent ID: n) の崩壊時間)、緑とマゼンタ、シアンの線がそれぞれ 10.0mBq, 1.0mBq, 0.1mBq で崩壊する <sup>222</sup>*Rn* の崩壊間隔 (<sup>222</sup>*Rn*(Parent ID: n+1) の崩壊時間 - <sup>222</sup>*Rn*(Parent ID: n) の崩壊時間) である。

この分布の比較から、1.0mBqにおいては $\Delta t < 500s$ で、0.1mBqにおいては $\Delta t < 1000s$ で <sup>222</sup>Rn と <sup>218</sup>Po の信号間隔が優位であるとわかる。<sup>218</sup>Po の半減期が 3.1 分であるから  $\Delta t < 500s$ において <sup>218</sup>Po の 85.4 %が崩壊しており、 $\Delta t < 1000s$ において <sup>218</sup>Po の 97.9 % が崩壊している。しかし $\Delta$ t のみでタグを行うためには、<sup>222</sup>Rn の崩壊間隔が、<sup>222</sup>Rn と <sup>218</sup>Po の信号間隔よりも十分に長い必要がある。<sup>222</sup>Rn の崩壊間隔による 3 つのパターン を以下に示す。



図 3.10: 生成レートによる時間分布のパターン

<sup>222</sup>*Rn*の崩壊レートが高い (<sup>222</sup>*Rn*の崩壊間隔が短い) 場合、Bi-Po タグのようなΔ t に よる Cut ではタグが困難となる。そのため、崩壊位置が 数分のスケールでは動かないこ とや各崩壊エネルギーの情報を追加することで ID ができる可能性がある。 一方でパターン3のように<sup>222</sup>*Rn*の崩壊間隔が、<sup>222</sup>*Rn*と<sup>218</sup>*Po*の信号間隔よりも十分 に長いと単純なΔtによるCutによってタグが可能である。そのため0.1mBqにおいてΔ tによるタグができる可能性がある。実際の測定データではγのコンタミやアクシデンタ ル、検出器の分解能などを考慮する必要があるためシミュレーションによる更なる理解が 重要となる。

#### 3.5 本研究における開発方針

環境中性子測定におけるセットアップ概要、信号と背景事象について以下に示す。



図 3.11: 環境中性子測定に向けた液体シンチレータ検出器のセットアップ概要

環境中性子測定に向けた液体シンチレータ検出器の開発方針を以下にまとめる。

・検出器

液体シンチレータとその容器 (SUS 製)、PMT で構成される容易なセットアップ →どこでも測定がしやすい

- ・信号:環境中性子 →液体シンチレータの原子核 (H,O など) との原子核反跳により反跳エネルギーを得る。
- ・背景事象:環境γ線 鉛や銅シールドを用いて低減化 (トリガーレート:200Hz → 50Hz) 残る環境γ線については PSD によって原子核反跳事象と分離
- ・背景事象: α崩壊事象
  検出器改善による低減化 (次の4章1節で述べる)
   表面積を減らすことでステンレス内部からの<sup>222</sup>Rnの染み出しの低減化
   純化により液体シンチレータ内部に含まれる放射性不純物の除去

シミュレーション結果で得られたように 0.1mBq の α レートであれば、 α 線背景事象に ついては解析的に取り除くことができる可能性がある。そのため検出器側の改善により 0.1mBq を達成数ことを目標とする。並行して、解析手法の改善も進める。エネルギーや崩 壊間隔 (Δ t)、崩壊位置などのパラメータのシミュレーションによる理解が重要となるた め検出器の位置分解能やエネルギー分解能を実装する。(4章 3節の解析結果にて述べる)

## 4 液体シンチレータ容器における低バックグラウンド化

環境中性子測定を行うためには検出器内部起因のα線バックグラウンドを0.1mBq ほど まで落とした極低バックグラウンド検出器を作成する必要がある。

#### 4.1 低バックグラウンド手法

低バックグラウンド手法として、

- ・超音波洗浄
- ·電解複合研磨
- 液体シンチレータの純化

を行なっている。

#### 4.1.1 超音波洗浄

液体シンチレータ容器について筐体やビューポート、煙突部のブランクフランジなど液 体シンチレータに触れる部分については、超音波洗浄を行い、表面についたゴミを取り除 く。実際の様子を以下に示す。



図 4.1: 液体シンチレータ容器の超音波洗浄

エタノールで超音波洗浄を行うが、エタノール節約のため超音波洗浄器には水を張り、 各部品は小分けにしてエタノールに浸した状態で超音波洗浄を行った。液体シンチレータ 容器内部においても水バックでエタノールの傘増しを行い、表面にエタノールが触れてい る状態で超音波洗浄を行った。超音波洗浄器は出力 (High, Middle, Low) と時間、温度を 設定でき、今回は High で 30 分、室温の状態での洗浄をエタノールを取り替え、2 セット 行なった。

#### 4.1.2 表面処理方法

検出器部材内部からの<sup>222</sup>*Rn*の染み出しの低減化手法として、液体シンチレータ容器内部に電解複合研磨を施している。これは、電気分解と研磨剤による研磨を複合的に行う手法でステンレスに含まれる Cr を用いた不動態皮膜が張られる。



図 4.2: 電解複合研磨手法と実際の容器内部の状態

実際の容器内部は鏡面のように磨かれており、その様子を上図の右側に示す。電解複合 研磨により表面積を減らすことで、<sup>222</sup>*Rn*の染み出しを低減する。この手法は神岡 Rn 検 出器にも用いられている技術である。[9]

#### 4.1.3 液体シンチレータの純化

液体シンチレータに含まれる放射性不純物を取り除くため純化を行う。純化は超純水を 用いた液液抽出によって行う。神岡の Lab-D で構築した純化系こちらである。



図 4.3: 純化系

### また、純化系の配管図を以下に示す。



図 4.4: 純化系の配管図

純化系は液体シンチレータの純化、検出器への充填の工程において外気に触れない系と なっている。概形は、超純水タンクと混合タンク、検出器をナフロンチューブで繋ぐ構造 となっている。

超純水タンクの配管にはそれぞれ以下の図のような役割がある。



図 4.5: 超純水タンクの詳細

超純水タンクには純化で用いる超純水を10Lほど充填するが、充填する前に超純水による共洗いを行う。神岡で用いている超純水は2種類あり以下の図にようなものである。



図 4.6: 超純水装置

手前にあるものが E-POD と呼ばれ、16.0~17.0[M Ω・cm @25 ℃] ほどのイオン交換水 を精製している。奥にあるものが Q-POD と呼ばれ、18.0~19.0[M Ω・cm @25 ℃] ほど の超純水を精製している。イオン交換水で 3 度共洗いしたのち、超純水でも共洗いをし、 10L の超純水を充填する。

混合タンクの配管の役割について以下に示す。



図 4.7: 混合タンクの詳細

液体シンチレータと超純水を撹拌、窒素ガスによるバブリングを行いそれぞれの液体が 触れる表面積を増やし、効率よく液液抽出を行う。 純化後、静置すると液体シンチレータが上、超純水が下に層分離する。超純水を 4L ほ ど入れた時に液体シンチレータ移送用の SUS 管の下端が層分離面にくるように設計して あるため、タンクに圧力をかけて上から液体シンチレータを押し出すことが可能である。 一方で、写真にもあるが、タンク内部は外から見ることができないため層分離した面が正 しい位置にあるとは限らない。管が超純水層にある場合は、純化後の水を通してしまい、 これは検出器に入れられないが、3 方バルブで分岐した方向に廃液することができる。水 面が下り、液体シンチレータが移送されてくれば、再度 3 方バルブを切り替え、検出器に 通す。

液体シンチレータの純化と移送の大まかな工程を以下に示す。

・純化系を組んだ後、リークチェック

→ <sup>222</sup>*Rn* 濃度の高い外気を系に入れてはいけないのはもちろんのことだが、液体シンチ レータが可燃物のため念入りに行う必要がある。リークチェックには SNOOP と加圧試験、 減圧試験を行い、確認する。

・純化系のバッチパージ (窒素ガスによる加圧と真空)

→これにより系に残る大気を追い出す

・超純水タンクを加圧、混合タンクを減圧し、その圧力差によって超純水を 4L 混合タン クへ移送する

液体シンチレータを混合タンクへ移送する

・混合タンクを撹拌

・窒素ガスによるバブリング

→液体に溶け込んだ<sup>222</sup>Rn 追い出すことと、気泡により表面積を増やし液液抽出を促 す。

・静置して層分離を待った後、液体シンチレータを検出器へ移送する

→液体シンチレータ移送用の管に繋がるナフロンチューブを注視して水が入らないよう 細心の注意を払う。

#### 4.2 先行研究における液体シンチレータ検出器

早稲田における液体シンチレータ検出器のアップデートをここで述べる。

#### 4.2.1 先行研究における液体シンチレータ検出器の R&D

1. 検出器 1[10]

特徴

・PMT 両読みにより分解能向上

・電解研磨により表面積を減らし、<sup>222</sup>Rn 染み出し効果の低減

・純化を施し、液体シンチレータに含まれる放射性不純物を除去

上記特徴を持つ検出器によるαレートの時間変動を以下に示す。また、αレートは先の章 で述べた通り、Bi-Po でタグされた<sup>214</sup>Po のα崩壊信号を用いて評価する。



図 4.8: 検出器1における<sup>214</sup>Poのαレートの時間変動[10]

この結果において、半減期が<sup>222</sup>*Rn* とコンシステントであるため、初期状態に<sup>222</sup>*Rn* が 多き含まれていたことを示唆する。定常状態で 4.2mBq となった。また、このα線バック グラウンドについて位置依存性を確認すると以下のようになる。



図 4.9: 検出器1におけるα線バックグラウンドの位置依存性 [10]

赤の分布が<sup>214</sup>*Po*の分布から推定される<sup>226</sup>*Ra* Selection(FADC counts  $\in$  (150,200) & *dt* > 1*ms* (Anti Bi-Po Cut))をかけた結果。緑の分布が<sup>214</sup>*Po*の分布から推定される<sup>218</sup>*Po* Selection(FADC counts  $\in$  (300,500) & *dt* > 1*ms* (Anti Bi-Po Cut))をかけた結果。黒が <sup>214</sup>*Po*の位置依存性を見ている。これによるとα線バックグラウンドが両端が優位であり、 窓部材がα線源になっている可能性を示唆している。

2. 検出器 2[10]

改善

・窓部材を放射性不純物の少ないものに変更(石英窓→合成石英窓)

・外気に触れない純化系の構築

検出器1の結果を受け、上記事項に関して改善を行ない得られたα線レートの時間変動を 以下に示す。



図 4.10: 検出器 2 における <sup>214</sup> Po の a レートの時間変動 [10]

純化の効果で初期純度は 0.2mBq、定常状態で 1.3mBq を達成した。時間変動による増加は <sup>222</sup>*Rn* の半減気 3.8 日とコンシステントであることからステンレス内部からの <sup>222</sup>*Rn* の染み出しの効果であると言える。またこちらの結果についても同様に a 線バックグラウンドの位置依存性をみる。



図 4.11: 検出器 2 における α 線バックグラウンドの位置依存性 [10]

LR Asymmetry の値を検出器位置に換算し、検出器1の結果と比較すると以下のようになる。



図 4.12: α線バックグラウンドの位置依存性の比較 [10]

ビューポートの部材を変えたことによりそこからの寄与は無くなったものと思われる。 そしてこの結果からα線バックグラウンドが液体シンチレータ容器の壁からの寄与が大 きいと思われるためよりグレードの高い電解複合研磨を施した検出器を作成。次節にてそ の結果を述べる。

#### 4.3 電解複合研磨 (ECP) を施した液体シンチレータ容器による測定

前述した通り、液体シンチレータ容器内部を電解複合研磨した検出器による測定を行 なった。

データ取得期間:2021/3/9~2021/12/1

#### 4.3.1 キャリブレーション

 $^{137}Cs$ の Position Scan データから LR Asymmetry と検出器位置関係は以下のように示される。



図 4.13: LR Asymmetry と検出器位置の関係

相補誤差関数による Fit を行い、最大値と最小値の値からデータに対して –0.7229 < LRAsymmetry < 0.727 の Cut をかけ、検出器の外側での発光と思われる事象を取り除 く。また、この関数により LR Asymmetry の値を検出位置に換算することができる。 次に光量と LR Asymmetry の関係を以下に示す。



図 4.14: 光量と LR Asymmetry の関係

この時、縦軸の光量とは左右の PMT で検出した光量の和のことである。光量に位置依 存性があると正確にエネルギースペクトラムが描けないため2次関数で Fit した結果の検 出器中央 (0cm) の値にスケールする補正をかける。

#### 4.3.2 電解複合研磨を施した検出器におけるα線バックグラウンドレート



この検出器における<sup>214</sup>*Po*のα線バックグラウンドレートを以下に示す。

図 4.15: 電解複合研磨を施した検出器におけるα線バックグラウンドの時間変動

定常状態で 0.8mBq を達成した。前回検出器では 1.3mBq であったため低減効果は見ら れたが大幅な改善には至らなかった。現状、0.8mBq レートの a 線バックグラウンドレベ ルを以下に示す。



図 4.16: 0.8mBq における a 線バックグラウンドレベル

黒は Geant4 シミュレーションによって見積もられた 1/E 則に従う環境中性子のスペク トラム。赤の点線がデータをガウシアン Fit することにより得られた<sup>214</sup>Poのスペクトラ ム。緑、紫、青の点線がそれぞれ<sup>214</sup>Poのスペクトラムから見積もられた<sup>226</sup>Ra、<sup>222</sup>Rn、 <sup>218</sup>Poのスペクトラムである。また赤の実線は<sup>226</sup>Ra、<sup>222</sup>Rn、<sup>218</sup>Po、<sup>214</sup>Poの4成分を 足し合わせた時のバックグラウンドレベル、青の実線は<sup>222</sup>Rn、<sup>218</sup>Po、<sup>214</sup>Poの3成分を 足し合わせた時のバックグラウンドレベルを重ね描いている。

α線バックグラウンドは、200 $keV_{ee}$ ~1900 $keV_{ee}$ に分布し、環境中性子スペクトラムに対して、2桁以上も優位な背景事象となる。一方で 0.8mBq というレートは 1250s に 1 回 <sup>222</sup>*Rn* が崩壊しているということである。そこで <sup>218</sup>*Po* の半減期が 3.1 分であることと、崩壊位置が大きく動かないこと、各エネルギーの情報を用いて <sup>222</sup>*Rn* と <sup>218</sup>*Po* の Delay Coincidence を検証する必要がある。そのためにはまずはシミュレーションによりこれらのパラメータの理解が重要となる。

現状、低エネルギー領域 (0keVee~200keVee) との高エネルギー領域 (1900keVee) につ いて感度をもつ検出器ができたと言える。特に低エネルギー領域では中性子量を多いため 現状の測定データでも見える可能性がある。今後この低エネルギー領域における解析も進 めていく。

#### 4.3.3 検出器の分解能

検出器の情報をシミュレーションに反映させるため分解能について求める。

・位置分解能

Bi-Po により強力にタグできる <sup>214</sup>*Po* とその前の事象 (<sup>214</sup>*Bi*) を用いて位置分解能を求め る。<sup>214</sup>*Po* の半減期が 164.3  $\mu$  s と非常に短いことから <sup>214</sup>*Bi* の崩壊位置からほとんど動い ていないと思われる。つまりこの 2 つの事象の位置のズレは検出器の分解能に依存する。 <sup>214</sup>*Po* Selection としてかけた Cut は、 $\Delta t < 1ms \& {}^{214}Po$ の光量中心から ± 1  $\sigma$ 。これ により得られた <sup>214</sup>*Po* 事象とその前事象 (<sup>214</sup>*Bi*) との LR Asymmetry の差をとったもの を以下に示す。



図 4.17: 位置分解能 (LR Asymmetry)

このヒストグラムに対してガウシアン Fit により LR Asymmetry においてσ=0.1を分 解能として得られる。



また、<sup>214</sup>Poと<sup>214</sup>Biとの検出位置の差をとったものを以下に示す。

図 4.18: 位置分解能 (検出位置)

こちらも同様にして、σ=2.5[cm]を分解能として得られる。

・エネルギー分解能

まずは Bi-Po により強力にタグできる<sup>214</sup>Po 事象についてエネルギー分解能を求める。



図 4.19: <sup>214</sup>Po のエネルギー分解能

この分布について黒のデータ点に対して、赤が Bi-Po の  $\Delta t < 1ms$  の Cut をかけた事 象。緑が anti Bi-Po の  $\Delta t > 1ms$  の Cut をかけた事象。水色が緑の事象 (anti Bi-Po) を赤 の事象 (Bi-Po) にスケールしたもの。青が赤から水色を差し引き <sup>214</sup> Po 事象優位なヒスト グラム。そのためこれについてガウシアン Fit を行いエネルギー分解能 19.2 % @1146keV<sub>ee</sub> が得られる。 また、キャリブレーションで用いた<sup>137</sup>Csの線源データから以下のようにエネルギー分解能が算出できる。



図 4.20: <sup>137</sup>Cs のエネルギー分解能

エネルギー分解能:40%@476.9keVee

また、 a 線バックグラウンド領域について光量中心から ± 2  $\sigma$  のボックスカットを行い、 a 線信号のみのデータに対して  $1ms < \Delta t < 60s$  の Tight な Cut をかけることで <sup>218</sup> Po とその前事象である <sup>222</sup> Rn のエネルギー分解能を以下のように得た。



図 4.21: <sup>222</sup>Rn と <sup>218</sup>Po のエネルギー分解能

<sup>222</sup>Rnの事象より、エネルギー分解能:21.3% @637.5keVee <sup>218</sup>Poの事象より、エネルギー分解能:24.6% @713.5keVee



以上のことからエネルギー分解能には光量に依存し、以下の関係式に従う。

図 4.22: エネルギー分解能と光量の関係

今後の検討課題として、これら検出器の情報を実装したシミュレーションサンプルを用 いて<sup>222</sup>*Rn* と<sup>218</sup>*Po*の Delay Coincidece が取れるバックグラウンドレベルの検証、Delay Coincidece を取るための条件の最適化を行う必要がある。

一方で、検出器改善も並行して進めている。現在進めている検出器の改善については次 章で述べる。

# 5 検出器改善による極低バックグラウンド化

検出器改善については以下のことを検討している。

・溶接位置の変更

→溶接位置が角部分にあり研磨が不十分である可能性がある

・定期的に液体シンチレータを直接、窒素ガスバブリングを行うことによって染み出して くる <sup>222</sup> Rn の低減効果の検証

→初期純度が良いことからステンレス内部から染み出してくる<sup>222</sup>*Rn* を低減できれば 低いα線バックグラウンドレベルでの測定を期待している。今までの結果から数日でα線 バックグラウンドレベルが増大することを受けて 1,2 日おきにバブリングが必要となる。 ・表面処理方法の変更を検討

→ GEP と呼ばれるステンレスに Fe と Cr の不動態皮膜を張る処理方法を検討中。皮膜 が厚くなることでスレンレス内部から染み出してくる <sup>222</sup>*Rn* の低減効果を期待している。

そこで新しい検出器を作成し、2021/12/31より測定を開始した。新しく作成した検出 器の情報を以下に示す。

・溶接箇所の変更



図 5.1: 溶接箇所を変更した新容器

煙突部の接続に溶接を行なっているため上図の左のように角に溶接箇所が存在していた。 また液体シンチレータを移送する管が煙突部の側面から伸びており、そこも研磨がしにく いポイントとなっていた。

そこで新しい検出器では筐体の一部を引っ張ることで溶接箇所を側面にし、管の接続を トップフランジとした。変更後の溶接箇所の様子を以下に示す。



図 5.2: 新容器の溶接箇所

・表面処理は電解研磨

前検出器ではよりグレードの高い電解複合研磨を施していたが、今回の検出器は電解研 磨を施した検出器となっている。これは検出器改善において GEP に表面処理方法の変更 することを検討していることに由来する。今回、検出器を製作いただいた日章アステック (株)様とのご相談で電解研磨をほどこした検出器であれば、測定後に GEP に再研磨が可 能ということがあり電解研磨を施した検出器で、まず溶接箇所変更による影響をみること を目的に測定を開始した。

#### 5.1 溶接箇所を変更した新検出器による測定

#### 5.1.1 測定セットアップ

測定期間	$2021/12/31 \sim 2022/1/21$
液体シンチレータ容器	ステンレス製
サイズ	φ 14cm, 長さ 31cm
液体シンチレータ	約 4.7L
$\operatorname{PMT}$	Hamamatsu 製 H6527 2 本両読み
シールド	周囲を鉛 10cm、上部に銅 5cm

#### 表 5.1: 測定セットアップ概要



図 5.3: 新容器による測定セットアップ

#### 5.1.2 α線レートの時間変動

測定結果を以下に示す。



図 5.4: 新容器におけるα線レートの時間変動

増大傾向にあり、2.5mBq で定常状態となった。この結果は同じ電解研磨を施した検出 器である先行研究における検出器2に比べて2倍ほど多い。

#### 5.1.3 α線スペクトラムによる背景事象の起因

α線バックグラウンドが増えた原因の考察のため、以下にそのスペクトラムを示す。



図 5.5: 新容器におけるα線スペクトラム

黒がデータ点 (α線スペクトラム)、赤の点線がデータより得られた<sup>214</sup>Poのスペクトラム。緑、紫、青の点線がそれぞれ<sup>214</sup>Poのスペクトラムから見積もられた<sup>226</sup>Ra、<sup>222</sup>Rn、<sup>218</sup>Poのスペクトラムである。また、赤の実線は<sup>226</sup>Ra、<sup>222</sup>Rn、<sup>218</sup>Po、<sup>214</sup>Poの4成分を足し合わせた時のスペクトラム、青の実線は<sup>222</sup>Rn、<sup>218</sup>Po、<sup>214</sup>Poの3成分を足し合わせた時のスペクトラム。また、ホのヒストグラムから検出器内部に<sup>226</sup>Ra が含まれることを示唆している。また、αバックグラウンドの起因を調べるため位置依存性をみる。



図 5.6: 新容器におけるα線バックグラウンドの位置依存性

<sup>214</sup>*Po*のα崩壊事象は検出器一様に分布している。以上のことから、放射性不純物が液 体シンチレータに残っている可能性を示唆している。

#### 5.1.4 液体シンチレータの純化工程の改善

改善点

・混合タンクを洗浄



図 5.7: 混合タンクの洗浄

今まで一度も開けずに純化作業を繰り返していたため、タンクが汚れている可能性が示 唆されていた。エタノールを用いてキムワイプで拭き取り掃除を行った。キムワイプが黄 色くなるほど汚れていたが、これはタンク壁面に付着した、劣化した液体シンチレータの 波長変換剤だと考えている。

- ・液体シンチレータの純化回数を増加(1回→4回)
- ・純化した液体シンチレータによる検出器の共洗い

上記改善を経て、2022/2/5~2022/2/24 で測定を行なった。α線レートの時間変動を以下に示す。



図 5.8: 純化工程改善後のα線レートの時間変動

青が今回のデータであるが、前回結果(黒)が2.5mBqで定常状態であるのに対し、2.0mBq への低減が見られた。またα線スペクトラムを以下に示す。



図 5.9: 純化工程改善後のα線スペクトラム

この測定データにおける a スペクトラムも <sup>226</sup>Ra が存在していることを示唆している。 位置依存性についても以下に示す。



図 5.10: 純化工程改善後のα線バックグラウンドの位置依存性

こちらも検出器一様に分布していることを示唆している。今後の展望として、混合タン クを撹拌が不十分であった可能性を考えており、その検証を行うことを考えている。

#### 5.2 液体シンチレータの窒素ガスバブリングによる Rn 低減効果

今後、純化工程の改善を行う予定であるが、現状でも初期純度は十分に良いため、液体 シンチレータを窒素ガスバブリングすることにより初期純度を保持する測定手法について 検討する。今回は窒素ガスバブリングによる Rn 低減効果を確認するために短時間、小流 量でのテスト測定を2度行なっている。各測定期間は以下の通りである。

テスト1:2022/2/5~2022/2/24

テスト2:2022/2/24 現在も測定中

#### 5.2.1 測定セットアップ

測定セットアップを以下に示す。



図 5.11: 液体シンチレータの窒素ガスバブリングセットアップ

測定は先にも書いた通り2度行なっており、それぞれのバブリング条件を以下に示す。

テスト1:流した窒素ガスの総量 12L (= 0.2L/min × 60min)

テスト2:流した窒素ガスの総量 18L (= 0.1L/min × 180min)

流量を大きくすると排気ラインから液体シンチレータが漏れ出てしまうため、0.1L/min~ 0.2L/min の間で流量は制限されている。

#### 5.2.2 α線レートの時間変動

a線レートの時間変動を以下に示す。



図 5.12: 液体シンチレータの窒素ガスバブリング後のα線レートの時間変動

青のデータ点が純化改善を行なった後の測定データで、その直後に連続してテスト1(緑 のデータ点)、テスト2(紫のデータ点)を実施している。テスト1においてはバブラーを 検出器内部に入れる時に Top フランジを開けており、大気中の<sup>222</sup>Rn が混入し、十分に <sup>222</sup>Rn を追い出すことができずにレートが変化しなかったものと思われる。

テスト2ではテスト1の結果を受けて窒素の流す量を増やしている。これにより紫の データ点の初めの3つを見る約20%程度の低減効果が見られた。その後はBackground runを継続しているためステンレス内部からの<sup>222</sup>Rnの染み出しの効果で増大傾向にある。

このテストを受けて、十分な低減効果を見るためには約10倍の窒素を流す必要があると 推定している。現状流せる流量では10倍の量流すには10時間以上かかってしまう。まず は流量と液体シンチレータの吹き出しの関係を検証して最適な流量を決める必要がある。 今後の展望として、上記検討事項に関して早稲田でセットアップを作り検証しようと考 えている。現在、神岡と同様な純化系を早稲田でも組み上げ、純化工程の改善とバブリン グするための流量の最適化に向けて準備を進めている。



図 5.13: 早稲田に組み上げた純化系

この純化系は早稲田の実験室 60 号館の 207 室のドラフト内に構築した。実験室内の取 り回しの関係から配管の向きなど変えている部分はあるが、系としては神岡にあるものを 再現した。一部改善点としては、混合タンクと超純水タンク間のナフロンチューブを長く して、Mixing の作業をしやすいようにした点とバブラーの配管を曲げて、バブラーがで きる限り下方に着け、窒素ガスバブリングの効率を上げた。以下にその図を示す。



図 5.14: 早稲田に組み上げた純化系のタンク詳細

また、液体シンチレータの吹き出しを考慮したセットアップも構築中である。現在検討 しているセットアップについて以下に示す。



図 5.15: 次期液体シンチレータの窒素ガスバブリングセットアップ

中央に窒素ガスパージ用にバイパスを組んでいる。排気側の3つのガス置換瓶は左から 漏れ出る液体シンチレータのバッファーとしての役割、真ん中はモレキュラーシーブによ り気化した液体シンチレータが外に漏れないようにする役割、右は大気の逆流を防ぐため に水が入っている。

## 6 まとめと今後の展望

神岡地下環境における液体シンチレータ検出器を用いた中性子測定では、検出器内部起 因のα線が主要な背景事象となる。また、このα線は暗黒物質直接探索においても主要な 背景事象となりうる。そこでこれら背景事象の精密な見積もりが重要となってくる。

検出器内部起因のα線は主に以下の2つが挙げられる。

・検出器部材 (ステンレス) に含まれる U 系列放射性核種の <sup>226</sup>*Ra* が α 崩壊し生じる <sup>222</sup>*Rn* が液体シンチレータへ染み出し α 崩壊すること

液体シンチレータに含まれる放射性不純物がα崩壊すること

U/Th 系列の放射性核種が存在するとその後段のα崩壊も背景事象となってくる。前者は 液体シンチレータ容器内部を電解複合研磨することにより、後者は液体シンチレータの 純化を行うことによりα線背景事象を低減化した検出器による測定を行い、定常状態で 0.8mBqを達成した。

また、シミュレーションにより 0.8mBq での U 系列の崩壊過程についてその時間分布 を確認した。0.8mBq においては <sup>222</sup> Rn が <sup>218</sup> Po が崩壊する間に他の親核種を持つ <sup>222</sup> Rn, <sup>218</sup> Po の崩壊が生じ、Bi-Po のような単純な $\Delta$  t Cut による Delay Coincidence が困難で ある。しかし、<sup>218</sup> Po の半減期が 3.1min であること、<sup>222</sup> Rn と <sup>218</sup> Po がどちらも α 崩壊信 号であること、崩壊位置が動かないことなどを利用して Coinicedence を取れる可能性が ある。この条件を決めるためにエネルギーや崩壊位置などのパラメータを実装し、シミュ レーションによる理解が非常に重要となる。そこで検出器の情報をシミュレーションに反 映させるために位置分解能とエネルギー分解能を求め、実装した。

一方で、検出器改善も行なっており、主な検証事項は以下の2つとなる。

・溶接位置を研磨しやすい箇所に変えた検出器による測定

・液体シンチレータを直接窒素ガスバブリングすることによる<sup>222</sup>Rn 低減効果の検証

前者では、α線バックグラウンドレートが2.5mBqと以前の結果よりも増大する結果となった。これに対して、混合タンクの清掃や、純化回数の増加、純化した液体シンチレータによる検出器の共洗いによって2.0mBqへと低減したのを確認した。しかしα線スペクトラムやα線背景事象の位置依存性から<sup>226</sup>Raの存在が示唆され、これは<sup>222</sup>Rnよりも上段の放射性核種であるために液体シンチレータの純化が不十分であることを示唆する。現状では、混合タンクの撹拌不足を疑っており、今後検証する必要がある。

後者では、窒素を 18L 流して約 20 %の低減効果を確認している。しかし、優位な低減 効果をみるためには約 10 倍の量流す必要があると見込んでいるが、流量を大きくすると 排気口から液体シンチレータの泡が吹き出すことが懸念されている。純化工程の改善と窒 素ガスバブリングの流量、時間の最適化の検証のため早稲田の実験室 (60-207) に神岡同様 の純化系を構築した。今後これらの事項に関して検証を進め、神岡での作業に反映させる。

また、低エネルギー側では中性子のレートが高いため、現状の 0.8mBq の α レートデータ においても見える可能性がある。そのため、0.8mBq データの低エネルギー領域 (300*keVee*) における解析を進めている。

### 7 謝辞

まずは、研究の機会、モチベーションを与えて下さった寄田教授に感謝いたします。飲 み会での会話では、物理に対する考え方やものの捉え方について学ぶことも多く、自分が 研究するにあたり非常にモチベーションにつながりました。田中准教授には研究の方針や 解析の手法など多くのことを教えていただきました。また神岡での作業 (鉛ブロックの積 み上げなど)を手伝っていただき感謝しております。特に現場でのデータチェックや解析 では的確に指示いただき、その後の作業においてもスムーズにかつ安全に作業を行うため の指針となりました。

出張先で様々な人にお世話になることも多く、特に大阪大学の吉田准教授は神岡で作業 することが多く、液体シンチレータの純化手法を教えていただき、検出器の組み上げや シールドの構築など多くのことにご協力いただきました。また、解析結果や、次の実験戦 略についてもご助言いただくことが多く大変感謝しております。神戸大学の身内准教授に は、神岡の Lab-B で NEWAGE の隣に実験スペースをお貸しいただいただけでなく、ガ スボンベや配管、線源の使用などで大変融通を利かせていただき、また研究会などでは実 験結果に対してコメントをいただくなど多くのことでご協力いただきました。横浜国立大 学の南野教授には、研究会で多くのコメントをいただいたり、液体シンチレータの測定に 興味を持ってくださり、早稲田での作業について助言をいただきました。東北大学の清水 様には反射率測定のセットアップをお貸しいただきました。出張の際はコロナ禍というこ ともあり、感染症対策を最大限講じた中で、測定の機会を設けてくださり大変感謝してお ります。また、反射率測定に用いたサンプルに関しましては、日章アステック(株)様にご 提供いただきました。サンプルのご提供だけでなく表面状態の資料などもご提供いただき ました。

坂本秘書には、出張や物品購入が多くあり、手続き関係で大変お世話になりました。特 に出張は数日前など急に決まることも多い中、迅速にご対応いただきまして、毎回無事に 出張をすることができました。また、卓球に誘っていただいたりと研究生活をとても楽し く過ごすことができました。

青山一天さんは、とても話しやすく物品購入の手続きや研究のことを聞く機会が多かっ たと思います。聞くたびに丁寧に答えて下さって大変感謝しています。また、普段の研究 生活や飲み会でも他愛のない会話をすることが多く、研究生活を非常に豊かにしてくれて いたと思います。小津龍吉君、諸星博之君には、引き継ぎのタイミングで研究に対する情 熱に非常に影響を受けました。博士課程を CERN で頑張っている伊藤紘貴君が帰ってき たタイミングで、また4人で飲みに行けたらと思います。GRAMS グループの櫻井真由さ んや中曽根太一君とはミーティングや研究生活で関わることも多かったと思います。櫻井 さんには主にガラスバッジや安全管理でお世話になりました。中曽根君には神岡での作業 を手伝っていただきとても助かりました。二人とも普段から話す機会も多く慕ってくれて いたのでとても嬉しかったし、二人のバイタリティに発破をかけられることも多くありま した。また、同グループの清水虎冴君や谷口日奈子さんには、質問されて気づくことも多 く話していて学ぶことも多かったと思います。GRAMS はテスト測定含め、これからどん どん結果が出てくると思うので楽しみに思います。

最後に、家族には多くの心配をかけたと思いますが、健康面、精神面共に支えてくれて 大変感謝しております。

# A 表面処理サンプルの光学測定

液体シンチレータ容器内部の表面処理方法を検討する上で、3つのサンプルについて光 学測定を行なった。光学測定の目的は、表面処理を変更したことにより光量が著しく落ち てしまわないことを確認するためである。測定したサンプルを以下に示す。



図 A.1: 使用したサンプルの表面写真

測定した3つのサンプルに関しては、容器を作っていただいた日章アステック(株)様 よりご提供いただいた。また、東北大学にあるセットアップをお貸りして、光学測定を行 なった。用いた光学測定セットアップを以下に示す。



図 A.2: 光学測定セットアップ

レーザーの波長を変更するための分光器、レーザーを収束するためのレンズ (凸, 平面)、 絞りで構成されている。実験スペースの関係で鏡を用いて経路を確保している。また、サ ンプルは写真にあるような回転台に設置できるようになっており、反射したレーザー光は 積分球に入り、後段の PMT に送られ光量を測定する。またこの光学系を囲むように暗幕 が貼られ、測定時は外の光が入らないようになっている。 測定は回転台でサンプルの角度を0°に設定したとき (レーザー光が直接、積分球に入る)の光量を Reference データとして、反射角を15°,30°,45°,60°,75°と変えた時の光量を測定する。各角度において 300nm 600nm まで波長を変えたときの測定結果を以下に示す。



図 A.3: 反射率測定結果

縦軸の Ratio は Reference の光量に対する割合を表し、横軸にレーザー光の波長をとっ ている。この結果から EP と GEPW については反射率がおよそ 0.6 と変わらないが、GEP は短波長側でおよそ 0.2 に落ちることがわかった。実際にサンプル表面も赤く見えており その効果が表れていると言える。実際に GEP を施した検出器で測定する際は光量が落ち る可能性を考慮してキャリブレーションを行う必要がある。一方で、PMT が検出する光 量は落ちるが、反射率が悪いということは、直接 PMT に入る光が多くなるということで ある。そのため位置分解能は良くなる可能性がある。今回の反射率測定の結果は測定にお いて問題ないという結論に至った。

# 参考文献

- [1] F.Zwicky, Helv. Phys. Acta, 6 (1933) 110
- [2] K.G.Begeman et al, Mon. Not. R. astr. Soc. 249 (1991) 523-537
- [3] P.A. Zyla et al. (Particle Data Group), Prog. Theor. Eaxp. Phys. 2020, 083C01 (2020)
- [4] J.M.Carmona, Neutron background at the Canfranc underground laboratory and its contribution to the IGEX-DM dark matter experiment, Astroparticle Physics, Volume21, Issue5, 2004
- [5] Keita Mizukoshi et al., Measurement of ambient neutrons in an underground laboratory at the Kamioka Observatory, PTEP, 2018, 123C01, DOI: 10.1093/ptep/pty133
- [6] Shiro ITOH, Shigeru TERASHIMA, Noboru IMAI, et al. 1992 compilation of analytical data for rare-earth elements, scandium, yttrium, zirconium and hafnium in twenty-six gsj reference samples. Bulletin of the Geological Survey of Japan, Vol. 43, No. 11, pp. 659 - 733, 1992.
- [7] https://www.crystals.saint-gobain.com/radiation-detection-scintillators/liquidscintillators/neutron-gamma-psd-bc-501a-bc-519
- [8] G.Pronost et al., Developmen of new radon monitoring systems in the Kamioka mine, Prog. Theor. Exp. Phys. 2018, 093H01, DOI:10.1093/ptep/pty091
- [9] Y.Nakano et al., Measurement of radon concentration in super-Kamiokande's buffer gas, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 867(2017) 108-114, http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2017.04.037
- [10] 小津龍吉、早稲田大学修士論文(2020)

学籍番号: 5320 A 075 - 1
 研究活動の不正行為 定義確認書
 S022 年 7月 29日
 早稲田大学大学院先進理工学研究科長 殿
 早稲田大学大学院先進理工学研究科
 梅妃旁及心船物起旁 専攻 2年
 本人氏名 次天 な大
 (自署)
 私は、裏面に記載のある研究活動の不正行為に関する定義を理解し、修士論文提出において、不正行為または不正行為と疑われる行為を一切行っていないことを誓約します。
 なお、当該行為を行なうと、厳重な処分(無期停学・当該学期成績無効・修士論文不合)

格等)を受けること、学位取得後であっても学位取消となることを十分に認識した上で、 論文を執筆しました。

		研究倫理教育受講確認書	
		2022年7月 本人氏名 <u> 若澤 九大</u>	29
以は、修	を士論:	文の執筆にあたり、以下の研究倫理教育を受講しました。 GEC 設置科目「研究倫理概論」の受講	
	중士論: ✓	文の執筆にあたり、以下の研究倫理教育を受講しました。 GEC 設置科目「研究倫理概論」の受講 専攻設置科目の受講 科目名(	)

## 研究活動の不正行為(捏造、改ざん、盗用、剽窃)について

修士論文を作成するに当たっては、以下の点に十分留意してください。

◆既存の文書・資料や自ら取得したデータ等に関し、「捏造・改ざん」は絶対に行ってはいけません。 これらの行為は、社会人はもちろん、学生であっても当然守らなくてはならないルールです。

※捏造:事実でないことを事実のように仕立て上げること。でっちあげること。

※改ざん:文書やデータ等の全部あるいは一部を、故意に本来のものでない内容・形式 等期等 すること。悪意の有無は問わない。

 ◆学問の体系に新たな知見を加えるとき、その信頼性は命です。学術研究でも、そのたきの対応 られます。そこでは上記に加え、資料・データ等の適切な利用と管理、情報取得に当たっての オームドコンセントの適用、取得した個人情報の保護等に配慮しなければなりません。
 他人の著作物(書籍や論文などに加え、講演での発言やインターネットに掲載された文章・ ータ等も含む)を活用する場合には、「盗用・剽窃」に十分配慮してください。
 盗用・剽窃は、著作権法で禁止された行為です。社会人はもちろん、学生であっても当然守ら はならないルールです。

※盗用・剽窃:引用元を適切に記載せずに、他人の文章、結果、意見、アイデア、理論、学説などを自 分のものとして発表すること。

◆学問の発展は独創性・独自性が基盤です。初めにそれを公表した人のオリジナリティを尊重し、敬意を払うことは学問の府に身を置く者の当然の責務です。学術論文においても、自分の考えと他人の意見を明確に区別し、表現しなければなりません。

このためには、適切な「引用」が重要です。学術論文では、他人の意見・アイデア・理論などを参照・ 参考にした箇所ごとに番号を付け、巻末や脚注で、その出所を明らかにすることが一般的です。学会 等によって、その記載順序が若干異なりますが、以下を標準にします。

・論文・総説:著者、題名、掲載誌名、巻号、ページ、発表年(月)等

・国際会議・シンポジウム・ロ頭発表:著者、題目、シンポジウム等の名称、場所、年月、巻号、 ページ、出版元、出版年等

・著書:題目、著者、ページ、出版元、出版年等

インターネットのからの引用では、以下の通りとします。

・著者、タイトル、URL、検索日

◆プレゼンテーション用のパワーポイントでは、上記の引用方法を簡略化して用いることを認めます。 簡略化の原則は確認・参照の容易性です。例えば、論文からの引用では、著者、掲載誌名、発表年月 のみの記載を認めます。著書や論文、インターネットなどの文章をそのまま記載する場合は、「」を付 け、その文章を誰が公表しているかを明示するのが一般的です。