

修士論文  
ANKOK 実験における  
TPC 多チャンネル大型化と  
基礎性能及び位置再構成法の評価

早稲田大学大学院 先進理工学研究科  
物理学及応用物理学専攻 修士 2 年 寄田研究室  
学籍番号 : 5316A101-3

矢口徹磨

2018 年 7 月 6 日



## 概要

暗黒物質とは、宇宙の組成の約 3 割を占める未知の物質である。これまで、様々な宇宙観測からその存在が示唆されており、WIMP は暗黒物質の候補の一つである。ANKOK 実験は、気液 2 相型アルゴン検出器を用いて、質量  $10\text{GeV}/c^2$ 、散乱断面積  $10^{-40}\text{cm}^2$  の領域の探索を行う。検出器の大型化や位置再構成による壁際背景事象の分離は、探索において鍵となる重要な要素である。そのため、PMT 上下 1 本、質量  $0.45\text{kg}$  の小型プロトタイプ検出器に対し、ドリフト長の延長 (3 倍) や PMT の増強 (上下 3 本) といった拡張を行ってきた。

本研究では、小型プロトタイプ検出器を一新し、PMT 上下 7 本、質量  $5.3\text{kg}$  の検出器の設計・製作、基礎性能の評価および位置再構成手法の評価を行った。検出器設計では、まず、標的質量、PMT 有感面、電場印可を考慮して大きさを決めた。電場設計は、小型プロトタイプ検出器の設計を踏襲した。また、有限要素法により、一様な電場を形成できることを確認した。一方、構造設計に関しては、PTFE の収縮等を考慮した設計を行い、液体アルゴン試験において低温耐性に問題ないことを確認した。さらに試験では、14ch 全ての PMT において S1,S2 信号が取得できることを確認した。基礎性能についても評価を行い、電場印可、アルゴン純度に関しては問題がないことを確認した。一方、検出光量に関しては、期待される量より少ない約  $3\text{p.e./keVee}$  という結果が得られた。これは、大型 ITO 石英に TPB を真空蒸着するため拡張した真空蒸着容器において、TPB の蒸着方法が再最適化されていないことが原因であると考えられ、今後、最適化を進める必要がある。

また、S2 光量重心による位置再構成を Bi-Po 事象を用いて評価した。ウラン系列である  $^{214}\text{Po}$  は半減期が  $164\mu\text{s}$  と短寿命であるため、 $^{214}\text{Bi}$  と  $^{214}\text{Po}$  は連続的に崩壊し、同じ位置で発光する。この Bi-Po 事象を遅延同時計測法等により特定し、得られた 135 イベントに対し、上側 PMT により観測された S2 で光量重心をとった。そして、 $^{214}\text{Bi}$  と  $^{214}\text{Po}$  の両者の光量重心の位置関係から、発光位置と光量重心に相関があることを確認した。

# 目次

目次	1
1 序論	3
1.1 暗黒物質	3
1.1.1 銀河の回転曲線	3
1.1.2 銀河団の衝突	3
1.1.3 CMB	4
1.2 WIMP	6
1.3 WIMP 直接探索の現状	6
2 ANKOK 実験	8
2.1 ANKOK 実験の目標	8
2.2 アルゴン	9
2.3 気液 2 相型アルゴン検出器	10
2.4 実験装置概要	11
3 検出器開発の現状	14
3.1 近年の検出器開発	14
3.2 検出光量	15
3.3 アルゴン純度	16
3.4 電場	18
3.5 位置分解能	18
3.6 大型化	20
4 新検出器設計と性能評価	21
4.1 液体アルゴン用 PMT	21
4.2 検出器サイズの最適化	22
4.3 検出器部材	23
4.4 電場設計	29
4.5 機構設計	29
4.6 検出器性能評価	36
4.6.1 PMT ゲイン較正	36
4.6.2 多チャンネル PMT による信号取得	37
4.6.3 検出光量	40
4.6.4 アルゴン純度	40



4.6.5	重心法による位置再構成 . . . . .	44
4.6.6	$^{60}\text{Co}$ による $xy$ スキャン . . . . .	46
4.6.7	重心法による位置再構成の評価 . . . . .	48
5	まとめと今後の展望	53
6	謝辞	55
	参考文献	56
	付録 A	58
A.1	真空断熱配管 . . . . .	58

# 1 序論

## 1.1 暗黒物質

暗黒物質とは、宇宙の組成の約3割を占める未知の物質である。最初に暗黒物質の存在を示唆したのは、1933年のZwickyによるかみのけ座銀河団の観測である。その後、銀河の回転曲線、重力レンズ、CMB(cosmic microwave background)、銀河団の衝突等、我々の知る通常の物質のみでは説明できない現象が観測され、暗黒物質の存在が示唆されてきた。そこで、世界中で暗黒物質を探索する実験が行われてきたが、この85年間、未だ発見には至っていない。まずは、以下に暗黒物質の存在を示唆する観測についていくつか説明する。

### 1.1.1 銀河の回転曲線

渦巻銀河の回転曲線とは、横軸を銀河中心からの距離  $r$ 、縦軸を回転速度の大きさ  $v$  としたときにプロットされる曲線である。銀河の外側の方では、ケプラーの法則より

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

が成り立つ。ただし、 $M$  は銀河の中心の質量、 $r$  は銀河中心からの距離、 $v$  は回転速度の大きさ、 $G$  は重力定数である。式 (1.1) を変形すると、

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}} \quad (1.2)$$

となり、回転速度  $v$  は、 $r^{-\frac{1}{2}}$  に比例するはずである。ところが、図 1.1 に示す渦巻銀河 NGC6503 のように、回転速度  $v$  は、 $r^{-\frac{1}{2}}$  に比例せず、平坦となっている。図 1.1 の点線と鎖線はそれぞれ、光学的観測により見積もられる銀河のディスクと星間ガスの寄与であるが、銀河の回転曲線を十分に説明できていない。そこで、図 1.1 の一点鎖線のように暗黒物質が銀河の外側に広がっていると仮定すると、観測結果を説明することができる。

### 1.1.2 銀河団の衝突

天体における物質の分布を観測する手段として、重力レンズを利用した方法がある。重力レンズとは、光源と観測者の間に存在する物質の重力により、光の経路が曲げられるため、光源が歪んで見えるというものである。これにより、光学的に観測されない暗黒物質の分布を見積もることができる。図 1.2 は、銀河同士の衝突を観測したものである。赤色の部分は光学的に観測される物質の分布、青色の部分は重力レンズによって観測される物質の分布である。図 1.2 からわかるように、光学的に観測される物質は衝突により、後ろに尾を引いているが、重力レンズによって観測される物質はお互いすり抜けている。これは、暗黒物質がほとんど相互作用しない物質であることを示唆している。

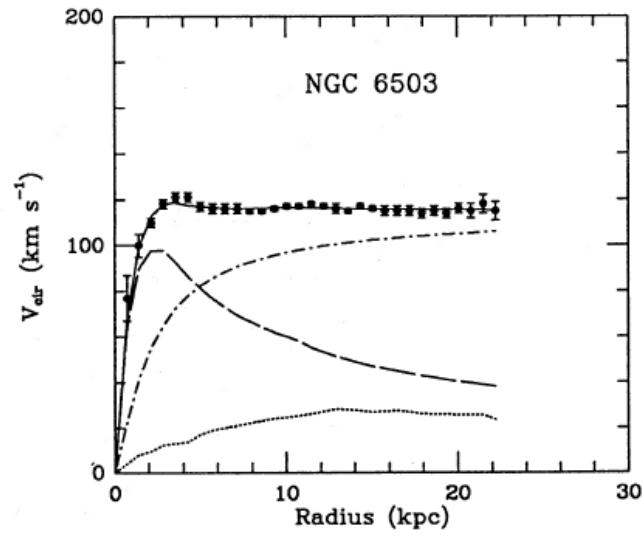


図 1.1 渦巻銀河 NGC6503 の回転曲線 [1]

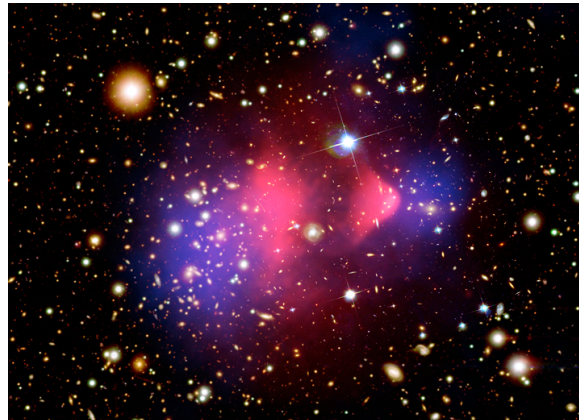


図 1.2 銀河団の衝突 [3]

### 1.1.3 CMB

宇宙誕生から約 38 万年後、電子と陽子が結合し、水素原子として存在するようになった。これにより、光子は宇宙を直進できるようになり、宇宙を満たした (宇宙の晴れ上がり)。この時放射された光子が、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) である。CMB は全天から観測でき、約 2.7K の黒体放射のスペクトルに一致している。ところが、この CMB の温度にはわずかなゆらぎが存在し、

宇宙の物質の密度等を反映している。そのため、CMBの温度ゆらぎは、宇宙パラメータを決める重要な手掛かりとなる。図1.3と図1.4はPlanck衛星で観測されたCMBの温度ゆらぎである[2]。図1.4は、縦軸にゆらぎの強度をとっており、実線は $\Lambda$ CDMモデルと呼ばれる、宇宙モデルによるフィットである。このフィット結果から、暗黒物質の密度は $\Omega_c h^2 = 0.11889$ であり、宇宙の組成は、暗黒物質が26.8%、通常物質が4.9%、ダークエネルギーが68.3%であることが分かった。

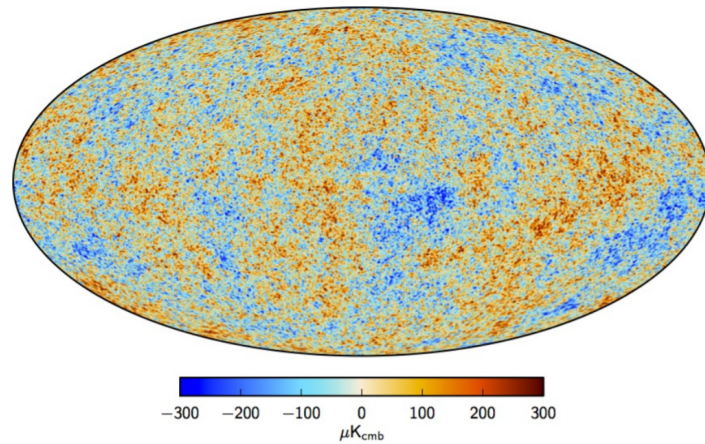


図 1.3 CMB の温度分布 [2]

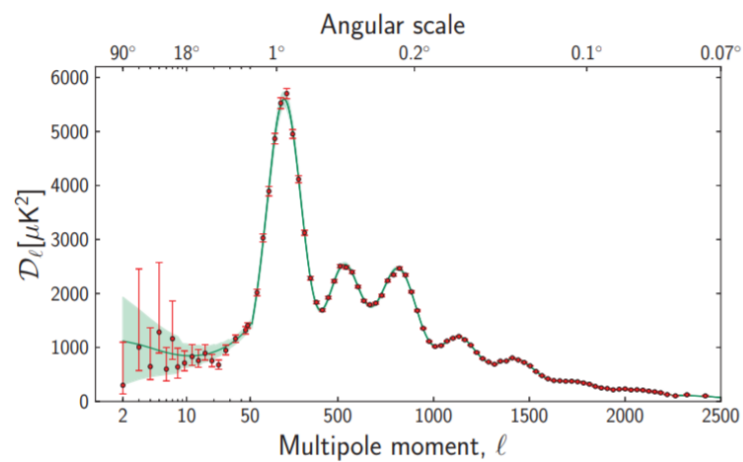


図 1.4 CMB の温度ゆらぎの強度分布 [2]

## 1.2 WIMP

WIMP(Weakly-Interacting Massive Particle) とは、標準模型の粒子と弱い相互作用程度の大きさの相互作用をする中性粒子の総称で、暗黒物質の候補の一つである。ビッグバン後、宇宙の温度が下がり、暗黒物質の消滅過程は凍結された。凍結後の暗黒物質残存量は式 (1.3) となる [4]。

$$\Omega_{DM}h^2 = \frac{3 \times 10^{-27} \text{cm}^3 \text{s}^{-1}}{\langle \sigma_{AV} \rangle} \quad (1.3)$$

$\sigma_A$  は、暗黒物質の消滅断面積である。ここで、数百 GeV の WIMP を考えると、 $\langle \sigma_{AV} \rangle = 10^{-27} \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$  となり、先述の Planck 衛星による観測で得られた暗黒物質の密度に一致する。この WIMP の候補としては、超対称模型で予言されているニュートラリーノが挙げられる。図 1.5 は WIMP の探索方法をまとめたものである。

WIMP の探索方法には、WIMP の消滅により生成される標準模型粒子を観測する間接探索、標準模型粒子から WIMP を生成させる加速器探索、WIMP と標準模型粒子との相互作用を観測する直接探索がある。加速器実験には、LHC の ATLAS や CMS、間接探索実験には、Fermi、IceCUBE、スーパーカミオカンデ等があげられる。直接探索実験には、LUX、XMASS、DarkSide 等があげられ、ANKOK 実験も含まれる。

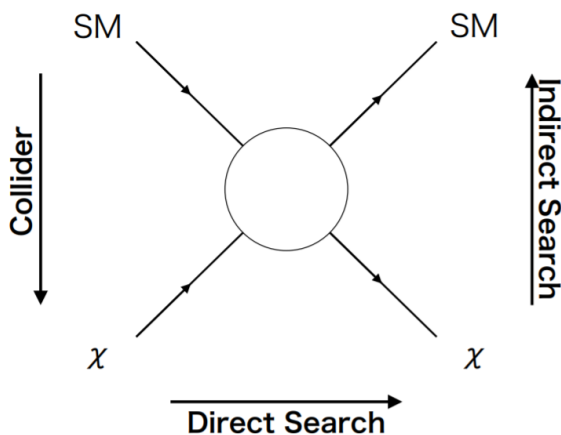


図 1.5 WIMP 探索方法

## 1.3 WIMP 直接探索の現状

図 1.6 に WIMP 直接探索の現状を示す。横軸は WIMP の質量、縦軸は散乱断面積である。図中に曲線を引いている実験は、曲線より上側の領域で WIMP の存在を棄却しており、枠線で囲っ

ている実験は、その中の領域に WIMP の存在を主張している。WIMP の標的核となる原子は、NaI(DAMA)、Ge(CoGeNT)、Ar(DarkSide)、Xe(LUX) 等、実験ごとに様々である。現在、Xe を標的核とした LUX 実験が大きな制限を与えているが、NaI を標的核とした DAMA 実験は質量 10GeV、断面積  $10^{-40}$  の領域に WIMP の存在を主張している。そこで、ANKOK 実験では Ar で DAMA 領域の探索を行うことにより、標的核依存の知見を深める。

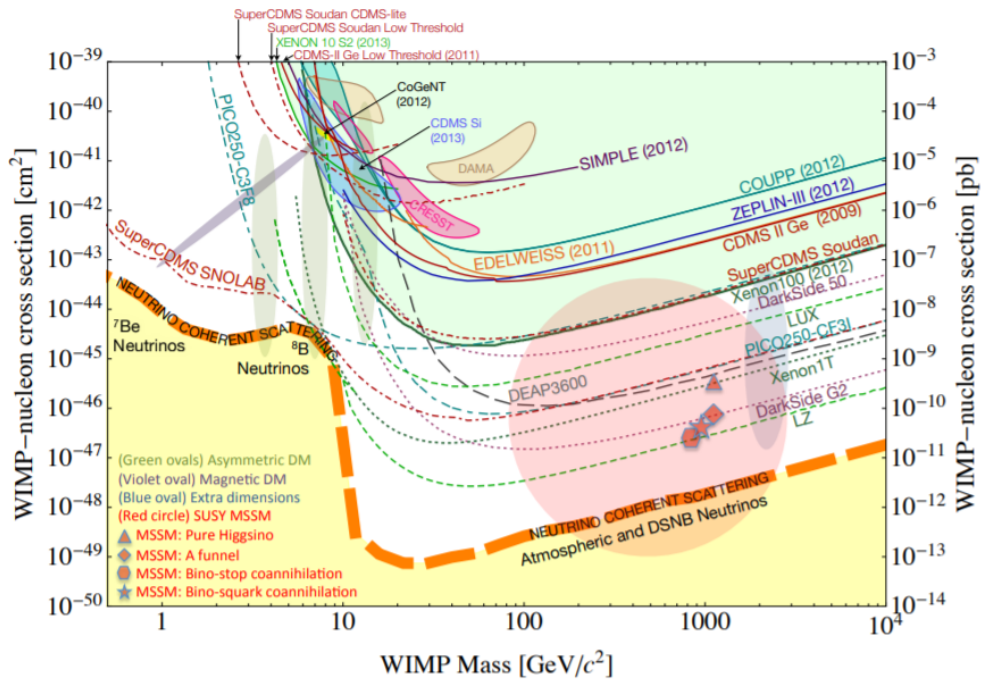


図 1.6 WIMP 直接探索の現状 [4]

## 2 ANKOK 実験

### 2.1 ANKOK 実験の目標

第1章で述べたように、ANKOK 実験では DAMA 領域の探索を目標としている。図 2.1 は、ANKOK 実験の探索感度を示したもので、横軸に WIMP の質量、縦軸に散乱断面積をとっている [6]。赤色点線で囲っているのは、目標としている DAMA 領域である。また、図 2.2 は、 $10\text{GeV}/c^2$  及び  $50\text{GeV}/c^2$  WIMP によりアルゴンが反跳されたときのエネルギースペクトラムを示したもので、横軸は反跳エネルギー、縦軸は反応レートを表している。探索感度においてパラメータとなるのは、標的の質量  $\text{kgd}(\text{kg}\times\text{day})$  とエネルギー閾値である。標的の質量を大きくすれば、より断面積の小さい WIMP を探索することができる。一方、エネルギー閾値を下げれば、より低質量の WIMP を探索することができる。有効質量  $30\text{kg}$  の検出器を 30 日間運用した場合、約  $1000\text{kgd}$  となり、エネルギー閾値  $20\text{keV}_{nr}$  以下を達成することができれば、図 2.1 の赤太線のように DAMA 領域に感度を持たせることができる。ANKOK 実験では、この  $30\text{kg}$  の検出器を本検出器と呼び、地下施設にて本検出器で 30 日間行う物理 Run を本実験とし、本実験を目標に開発を進めている。一方で、有効質量が小さな検出器であっても、エネルギー閾値を下げることができれば、DAMA 領域に感度を持たせることができる。例えば、有効質量  $5\text{kg}$  の検出器を 20 日間運用 (約  $100\text{kgd}$ ) し、エネルギー閾値  $10\text{keV}_{nr}$  以下を達成することができれば、青線のように DAMA 領域の大部分を探索することができる。

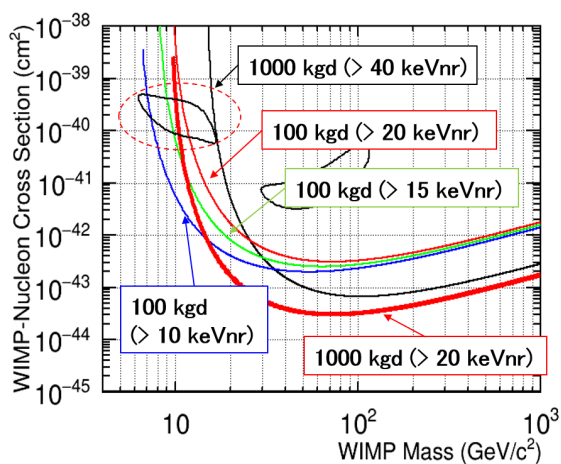


図 2.1 ANKOK 実験のターゲットと物理感度 [6]

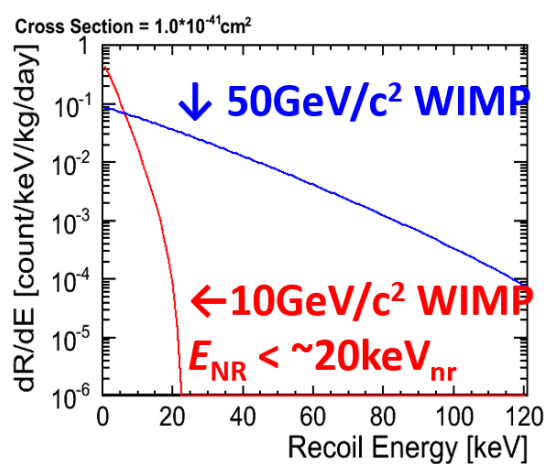


図 2.2 暗黒物質によるアルゴンの反跳スペクトラム

## 2.2 アルゴン

希ガスは、入射粒子と相互作用すると多くの光を放出するため、シンチレータとして有用である。その中でも、アルゴンは高い波形弁別 (PSD) 能力を持つため、WIMP 直接探索実験のような背景事象の分離が重要となる実験に適している。また、アルゴンはキセノンに比べて軽いため、WIMP による反跳エネルギーが大きく、より高い感度が期待できる。さらに、アルゴンはキセノンに比べて安価であるという利点がある。表 2.1 に、アルゴンの基礎特性を示す [7]。

表 2.1 アルゴンの基礎特性 [7]

原子番号	18	
原子量	39.95	
密度	1.69g/cm <sup>3</sup>	気体, 258K, 1atm
密度	1395.4g/cm <sup>3</sup>	液体, 87.5K, 1atm
沸点	87.5K	1atm
融点	84.0K	1atm
W 値	19.5eV	蛍光
W 値	23.0eV	電離
蛍光波長	128nm	

図 2.3 にアルゴンの発光機構を示す。図のようにアルゴンの発光過程は、電離する場合としない場合で異なる。以下にそれぞれの場合における発光過程を示す。

電離しない場合



電離する場合



アルゴン蛍光は、励起状態にあるアルゴンの二量体が基底状態に落ちた際に放出される。二量体の励起状態にはスピン一重励起状態 (Singlet) とスピン三重励起状態 (Triplet) があり、それぞれの



時定数は 6ns と 1.6 $\mu$ s(液体アルゴン中の場合) である。これにより、図 2.6 のように S1 波形は減衰が早い成分と遅い成分を持つ形となる。また、式 (2.6) のように、再結合を伴う発光過程があるため、アルゴンの電離蛍光特性は電場によって変化する。そこで ANKOK 実験では、電離蛍光特性の電場依存を利用して、背景事象分離能力向上に取り組んでいる(詳細は第 3 章参照)。

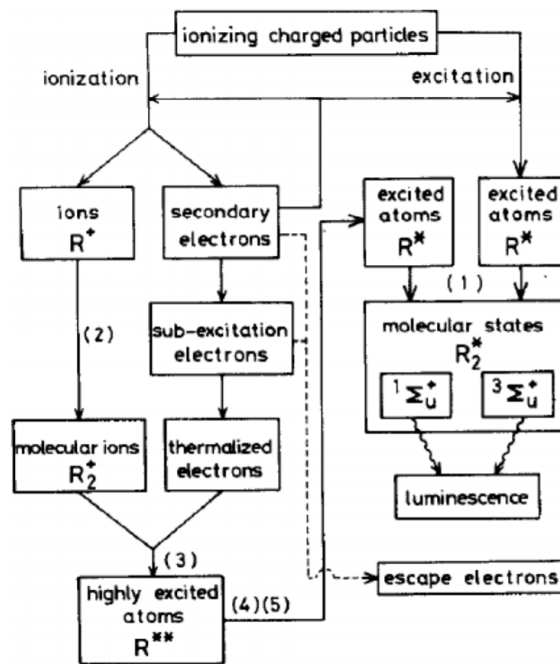


図 2.3 アルゴンの発光機構

### 2.3 気液 2 相型アルゴン検出器

図 2.4 は検出器の検出原理を示したものである。図 2.4 のように、検出器内は気体アルゴンと液体アルゴンで満たされている。検出器に粒子が入射すると、1 次蛍光 (S1) と電離電子を放出する。検出器内には、有感領域に 1kV/cm 程度の電場 (ドリフト電場)、液面少し下から気相に 4kV/cm 程度の電場 (取り出し電場) が印可されている。電離した電子は検出器内に印可された電場によって気相へドリフトし、2 次蛍光 (S2) を放出する。この S1 と S2 を上下の光電子増倍管 (PMT) で観測する。ただし、アルゴン蛍光の波長は 128nm である。低温で使用可能な PMT の窓材は 128nm の光を透過させることができないため、S1 と S2 を直接観測することができない。そこで、波長変換材 (TPB) によって、128nm のアルゴン蛍光を 420nm に変換して観測する。波長変換材は、図 2.4 のように、反射材 (ESR) や ITO 石英の表面有感領域側、つまり、検出器内側に蒸着されている。図 2.5 のように、 $\gamma$  線や  $\beta$  線の電子反跳事象 (ER 事象)、中性子や WIMP の原子核反跳事

象 (NR 事象) で、S1 波形や S1/S2 比が異なることを利用して、ER 事象を分離する。図 2.6 に S1 の平均波形を示す。横軸は S1 の立ち上がり時間 0s とした観測時間、縦軸は観測光量をピーク値で規格化したものである。図のように S1 波形には、減衰が早い成分 (時定数約 6ns) と遅い成分 (時定数約 1.5 $\mu$ s) があり、それぞれを Fast 成分と Slow 成分と呼び、Total=Fast+Slow とする。図のように Slow/Total の値から、ER 事象と NR 事象を識別することができる (PSD)。

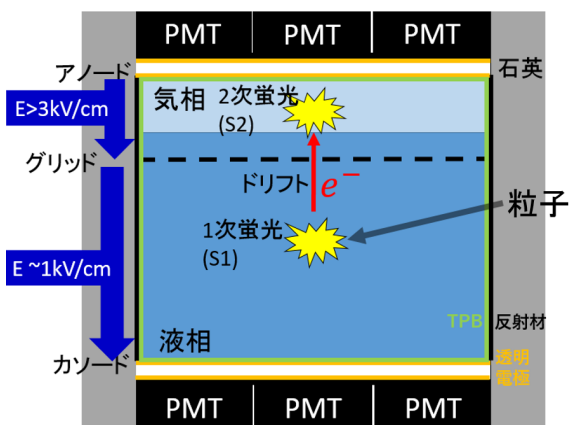


図 2.4 検出原理

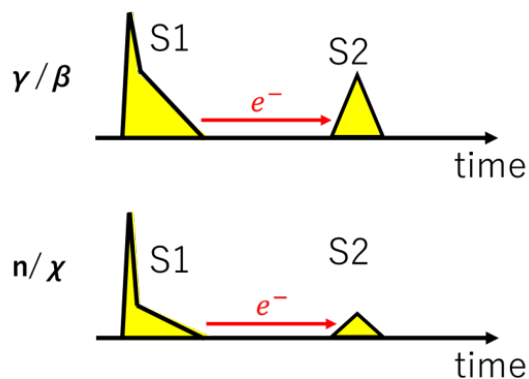


図 2.5 S1 と S2

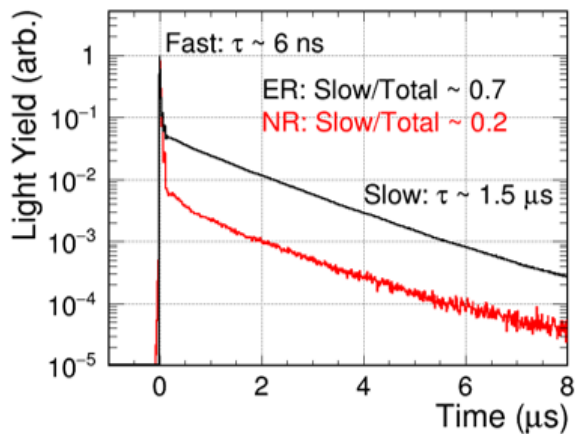


図 2.6 S1 平均波形

## 2.4 実験装置概要

ANKOK 実験は早稲田大学理工キャンパスで行われている。実験スペースは 4m × 4m × 3m ほどで、地下施設での実験に向けて、コンパクトであることが特徴である。図 2.7 に実験装置の概

略図を示す。実験装置は、主に検出器、容積 200L の真空断熱容器 (以下 200L 容器)、配管系 (充填ライン、循環ライン)、エレキラック、モニター用デスクから構成されている。200L 容器内には 87K の液体アルゴン約 140kg と検出器、および液面計などの容器内の安定性をモニター (以下スロー) するためのセンサーが入っている。200L 容器外側には、下面に 5cm と側面に 10cm 厚分の鉛が設置されており、環境  $\gamma$  を遮蔽している。

配管系は充填ラインと循環ラインから構成される。図 2.8 に ANKOK 実験配管系を示す。充填ラインは、商用の液体アルゴンタンクから 200L 容器までのラインで、両者の間には液体アルゴン中の水や酸素を除去する液体フィルターが用意されている。また、循環ラインには、水や酸素を除去する MICROTORR(SAES Pure Gas 社) や窒素を取り除く窒素フィルター (PURERON 社) が用意されている。さらに、これら純化フィルター取り付けられたが循環パネルにはデータロガーが設置されており、スローセンサーの値が読み出しを行っている。循環ライン下流の液化器は、容積 75L の真空断熱容器に冷凍機が取り付けられたもので、内側に液体アルゴンが貯められている。この貯蔵された液体アルゴンによって冷却されたコイルに、気体アルゴンを通すことでアルゴンを液化する。

その他、エレキラックには、PMT からの信号をデジタイズする FADC などがある。モニター用デスクでは、データロガーからのスローや FADC からのデータを PC でモニターする。液体アルゴン試験中は、スローコントロールや安全管理を行う DCS とデータ管理を行う DAQ の主に 2 人体制でモニターを行う。

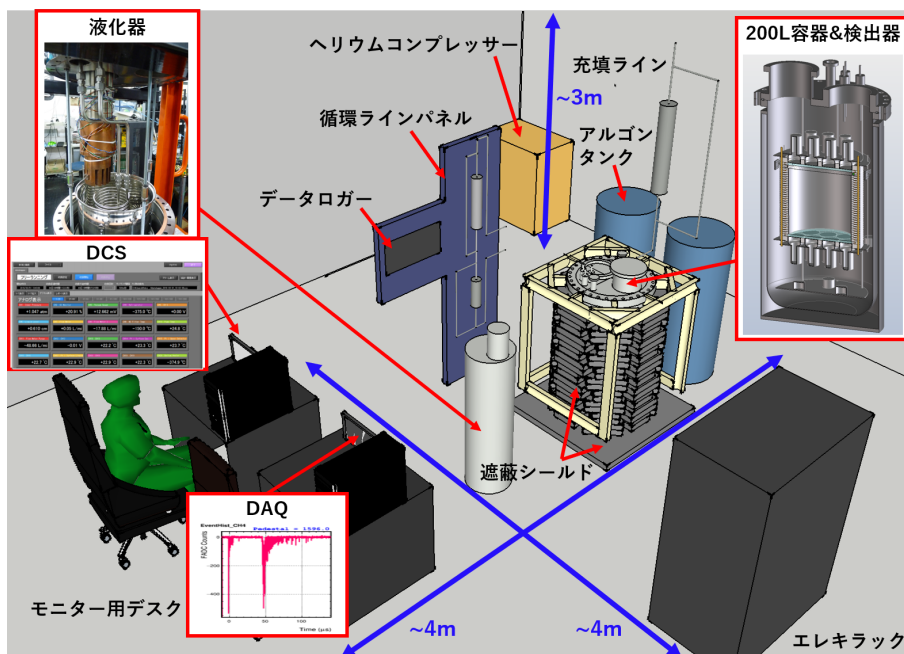


図 2.7 実験装置概略図



### 3 検出器開発の現状

#### 3.1 近年の検出器開発

DAMA 領域の探索のために、検出器の低温耐性、検出光量、アルゴン純度、電場印可、位置分解能、大型化等が重要な開発要素となる。特に、位置分解能や大型化に関しては、2018年2月までの約2年間、図3.1のように検出器の拡張を行ってきた。直径6.4cm、高さ10cm、PMT上下1本ずつの検出器を基本の小型プロトタイプ検出器とし、高さ30cmに延長した検出器や、上下PMT3本ずつに増強した検出器の開発を行ってきた。低温耐性、検出光量、アルゴン純度、電場印可に関しては、小型プロトタイプ検出器の開発(詳細は鷺見修論参照[9])において一定の目途が立っているが、検出器の大型化に伴い、再検証する必要がある。ANKOK 実験では、DAMA 領域の探索の手段の一つとして、PMT上下12本、質量30kgの検出器を30日間運用することを検討している。そこで、本研究では、多チャンネル大型化に伴う問題点の洗い出しや位置分解能等の評価のために、PMT上下7本、質量5.3kgの検出器を設計・製作した。本章ではまず、検出光量、アルゴン純度、電場印可、位置分解能、大型化等の検出器に対する要請と現状について述べる。

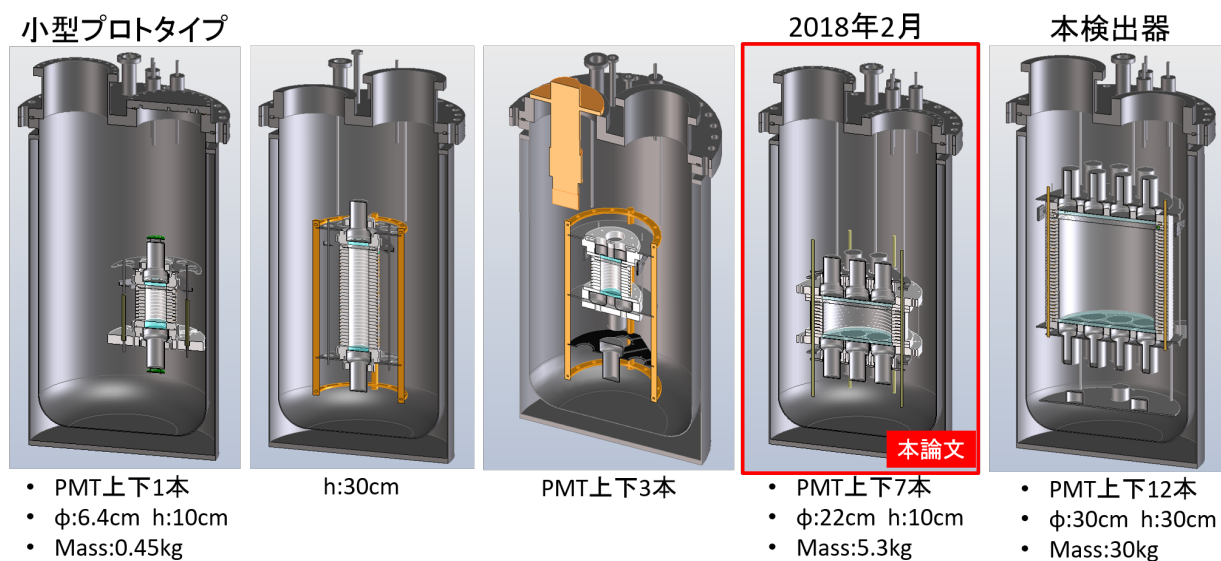


図 3.1 近年の検出器拡張

### 3.2 検出光量

第2章で述べたように、S1のPSDによりER事象を分離する。図3.2は、 $^{252}\text{Cf}$ の線源データである。横軸はS1Total、縦軸はSlow/Totalである(以下、SPT)[13]。図からS1光量の少ない低エネルギー側では、SPTの分散が大きく、分離が難しくなることがわかる。また、図3.3は、モンテカルロシミュレーションの結果である[14]。 $x$ をある値としたとき、横軸はEfficiency=(SPT< $x$ を満たすNR事象数)/(全NR事象数)、縦軸はRejection=(全ER事象数)/(SPT< $x$ を満たすER事象数)であり、[0,1]で $x$ を変化させている。このように、PSDによる分離能力はS1光量に依存する。そのため、図3.4のように小型プロトタイプ検出器では光量を最大化するための開発が行われ、無電場で約10p.e./keVeeを達成した[9]。反射材の導入、TPB真空蒸着の開発、ITO透明電極の導入、反射回数を減らすような検出器構造の改善、高Q.E.PMT(R11065)の導入、アルゴン純度の改善により、光量が大きく向上した。また、S2光量はS1/S2によるER事象分離能力や位置分解能に影響を与える。S2光量は、先程挙げた項目の中でも、特に液体アルゴン純度に大きく依存する。新検出器設計、製作及び試験では、これらS1,S2の光量を損なわないような検出器構造、TPB真空蒸着、アルゴン純度等を達成する必要がある。

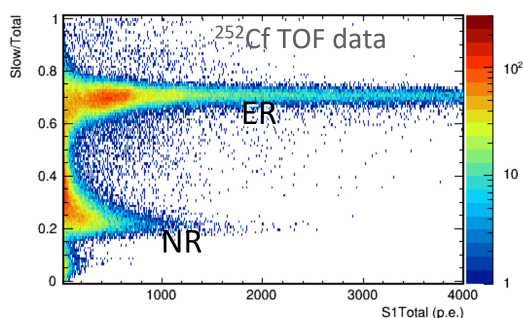


図 3.2 Slow/Total のエネルギー依存 [13]

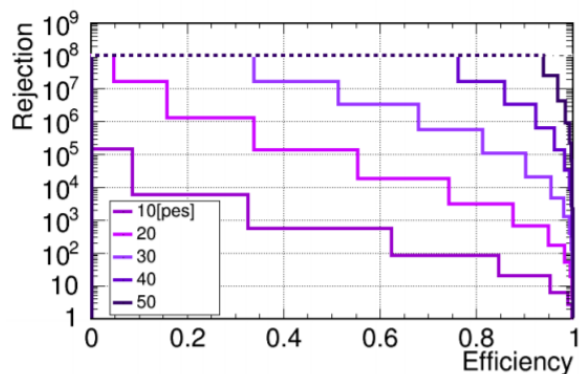


図 3.3 PSD による分離能力光量依存 [14]

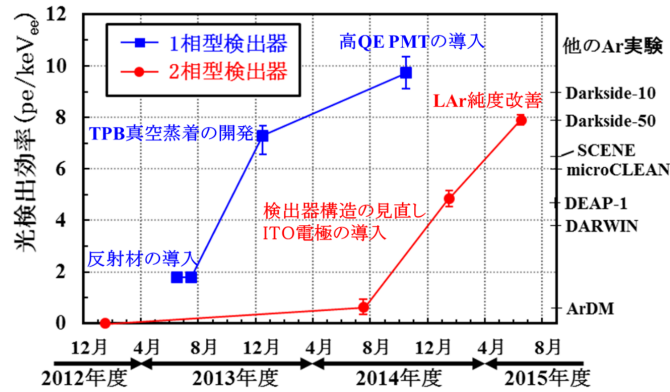


図 3.4 光量最大化のためのこれまでの開発 [9]

### 3.3 アルゴン純度

第 2 章で述べたように、電離した電子は、検出器内に印可された電場によって気相へドリフトし、S2 を放出する。ところが、アルゴンに酸素や水等の不純物が混入すると、ドリフト電子を吸収し、S2 光量を減少させる。電子寿命は、これら酸素や水の不純物に対し、 $300\mu\text{s/ppb}$  である。ドリフト長 30cm 検出器に  $1\text{kV/cm}$  のドリフト電場を印可した場合、検出器底の事象のドリフト時間は約  $150\mu\text{s}$  である。そのため、不純物の混入量は  $1\text{ppb}$  以下にする必要がある。また、酸素や水以外にも、窒素が混入した場合、S1 の光量を減少させる。図 3.5 は酸素不純物濃度と S1slow 成分の時定数の関係、図 3.6 は、窒素不純物濃度と S1Slow 成分の時定数の関係である。十分な S1 光量を得るためには、窒素不純物濃度を  $100\text{ppb}$  以下にする必要があることがわかる。表 3.1 に不純物目標濃度をまとめる。

表 3.1 不純物目標濃度

不純物	S1 光量	S2 光量 (ドリフト電子)	目標濃度
N <sub>2</sub>	減少	減少	100ppb 以下
O <sub>2</sub>	減少	激減	1ppb 以下
H <sub>2</sub> O	減少	激減	1ppb 以下

表 3.1 の不純物目標濃度を達成するために、ANKOK 実験では第 2 章で述べたように、配管系に純化フィルターを用意している。使用する商用液体アルゴンに含まれる不純物濃度は、窒素不純物濃度が  $10\text{ppm}$  以下、酸素及び水不純物濃度が  $\mathcal{O}(\text{ppm})$  である。そこで、充填ラインでは液体フィルターにより、酸素及び水不純物濃度を  $\mathcal{O}(\text{ppb})$  まで抑える。一方、循環ラインでは、窒素

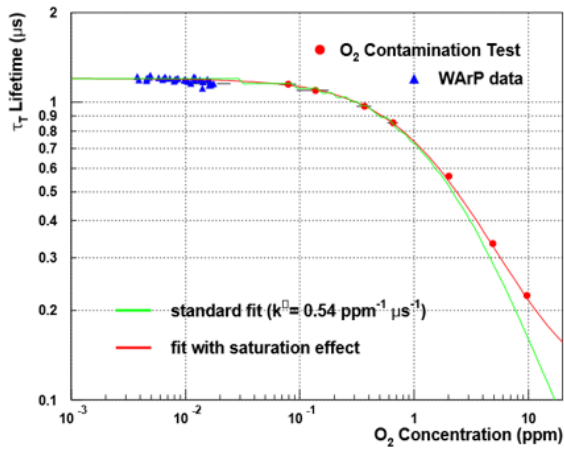


図 3.5 酸素濃度と S1slow 成分時定数 [10]

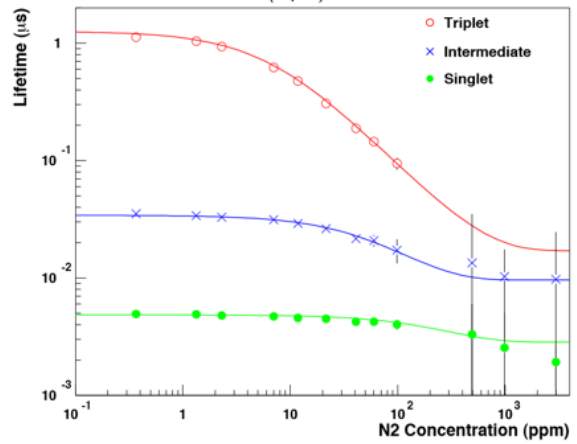


図 3.6 窒素濃度と S1slow 成分時定数 [11]

フィルターにより窒素不純物濃度を  $\mathcal{O}(\text{ppb})$  まで、MICROTORR により酸素及び水不純物濃度を  $\mathcal{O}(100\text{ppt})$  まで抑える。

図 3.7 と図 3.8 は、Run17.1(小型プロトタイプ検出器、2017 年 7 月実施)での純度測定の結果である。図 3.7 は S1 の平均波形を取ったもので、slow 成分のフィット結果時定数  $\tau=1.5\mu\text{s}$  より、窒素濃度は目標値を達成できていることがわかる。酸素及び水不純物に関しては、コリメートされた  $^{60}\text{Co}$  を検出器に照射し、z 方向にスキャンした。図 3.8 は、その測定結果で、横軸に電子のドリフト時間、縦軸に S2 光量をとっている。フィット結果から、時定数は約  $1.9\text{ms}$  であり、目標値を十分に達成できていることがわかる。

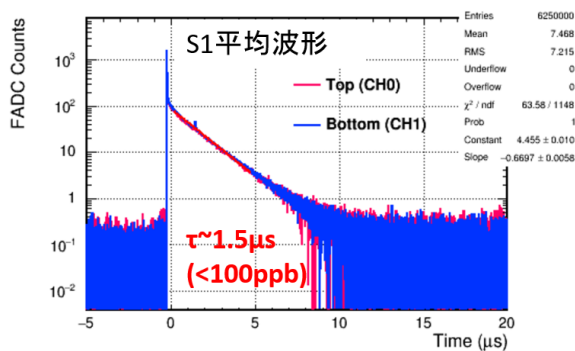


図 3.7 窒素濃度 (Run17.1)

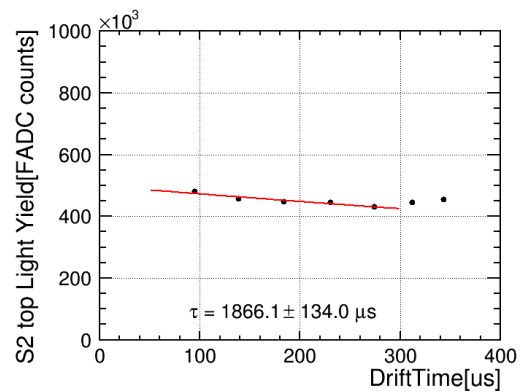


図 3.8 酸素及び水の濃度 (Run17.1@50V/cm)



### 3.4 電場

検出器に電場を印可することで、S1/S2 による ER 事象分離やドリフト方向 (以下、 $z$  方向) における位置再構成が可能となる。図 3.9 は、キセノンにおける電離電子蛍光比 (S1/S2 比) の特性を示したもので、横軸は反跳エネルギー、縦軸は電離電子蛍光比の対数をとっている。プロット上側が NR 事象、下側が ER 事象で、低エネルギー側で両者が分離できていることがわかる。また、電場を高くするにつれて分離能力が向上していることがわかる。キセノンと同じ希ガスであるアルゴンにおいても、同様に低エネルギー領域で ER 事象の分離能力が向上することが期待されている。図 3.10 に、キセノンとアルゴンそれぞれのドリフト電子の電場依存性を示す。図 3.10 のように、アルゴンがキセノンと同等のドリフト電子を生成するためには、より高い電場強度が必要となる。そのため、ANKOK 実験では、ドリフト長 30cm で、2kV/cm の電場印可を目標としている。ただし、電場を印可するために、チェンバー外部から高電圧を導入しようとする、フィードスルーや気相での放電が問題となる。そこで、チェンバー内部液相で高電圧を生成するための CW 回路の開発が行われてきた [20]。また、高電圧印可のためには、カソードと下側保護電極間の放電が問題となる。例えば、1kV/cm の電場を印可する際、ドリフト長 10cm の場合カソードの電位は 10kV となり、ドリフト長 30cm の場合は、30kV となる。そこで、絶縁性の高い部材の選定や、カソードと下側保護電極間の距離を離す等の工夫により、高電場を達成した。現在、世界のアルゴンによる暗黒物質探索実験のドリフト電場は最大で約 1kV/cm であるのに対し、ANKOK 実験では図 3.11 のように、ドリフト長 10cm において 3kV/cm まで正しく電場を印可することができている。図 3.11 は横軸にドリフト時間、縦軸にドリフト速度をとっており、ドリフト速度はコリメートされた  $^{60}\text{Co}$  を  $z$  方向にスキャンすることで算出している。また、ドリフト電場が非一様であると、S2 の分散やドリフト時間の分散が大きくなり、S1/S2 による分離能力や位置分解能が低下する。特に  $z$  方向の位置分解能について、ドリフト長 30cm、電場 2kV/cm の場合、約 10mm 以下の位置分解能を実現するためには、電場のばらつきを 5% 以下にする必要がある。そのため、小型プロトタイプ検出器では有限要素法による電場計算や [21]、コリメートされた  $^{60}\text{Co}$  の  $z$  方向のスキャンにより、電場の一様性を確認した。図 3.12 はスキャン結果で、 $z$  方向のみ電場の一様性を確認している [9]。図 3.12 の横軸は  $^{60}\text{Co}$  コリメーターの  $z$  方向の位置、縦軸はドリフト時間で、複数の電場下において測定を行い、同色が同電場である。

### 3.5 位置分解能

検出器壁際事象は、ANKOK 実験において分離しなければならない重要な背景事象の一つである。問題となる壁際事象は、検出器部材に含まれる放射性不純物からの  $\alpha$  線が、エネルギーの一部を不感領域で落とし、有感領域に染み出すような事象であり、低エネルギーの事象として観測され、WIMP と区別することができない。そこで、検出器が位置分解能を持ち、事象発生位置を正しく再構成することができれば、このような壁際事象をタグし、取り除くことができる。このよう

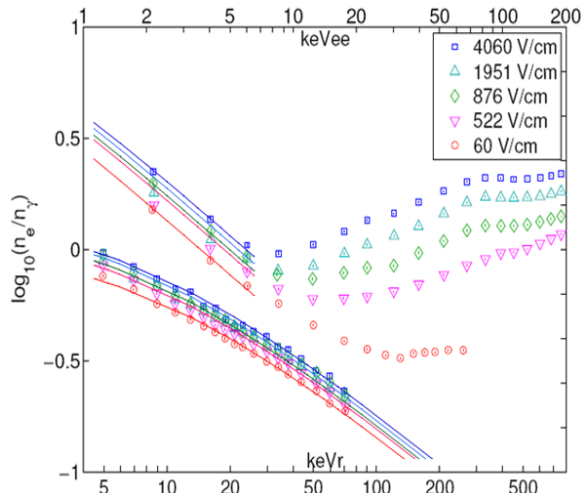


図 3.9 Xe における電離電子蛍光比特性 [17][18]

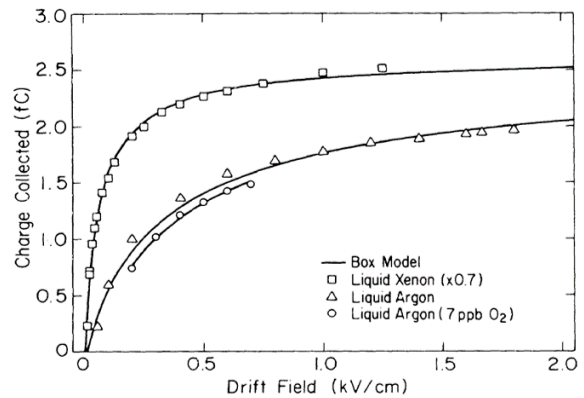


図 3.10 ドリフト電子の電場依存 [19]

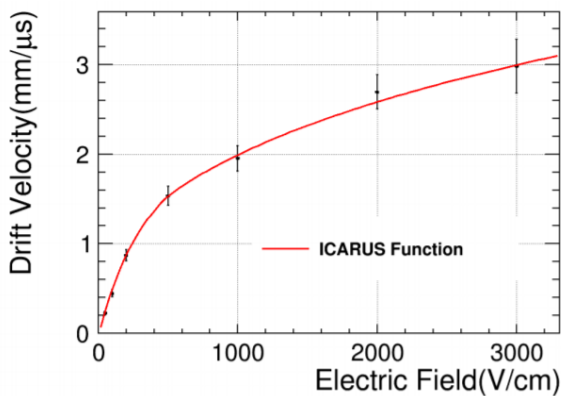


図 3.11 ドリフト速度の電場依存 [20]

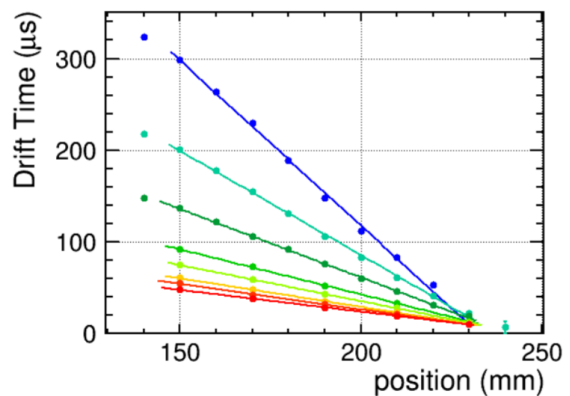


図 3.12  $^{60}\text{Co}$  によるコリメータースキャン [9]

に、表面での事象と表面から少し離れた事象を区別し、壁際事象がないと保障される領域を選択することを、以下“Fiducial Cut”と呼ぶ。ANKOK 実験では、電子のドリフト時間から  $z$  方向に、PMT や MPPC による検出光量比から  $xy$  方向に位置分解能を持つ検出器を目指している。液体アルゴン中における、5MeV の  $\alpha$  線の飛程距離は約  $46\mu\text{m}$  である [22]。そのため、検出器内壁表面から数十  $\mu\text{m}$  程度のわずかな領域の事象を取り除けばよい。このわずかな領域の事象を効率よく取り除き、かつ、できるだけ検出器の有効質量を損なわないようにするためには、位置分解能が重要となる。検出器上下の ITO 石英表面については、ドリフト時間の長いイベントまたは短いイベントを選択することにより、Fiducial Cut を行うことができる。図 3.13 は、横軸に S2 光量、縦軸に  $z$  方向の位置分解能をとったものである [16]。図 3.13 に示すように、 $z$  方向の位置分解能は 1mm 程度である。一方、 $xy$  方向に対する位置分解能については、これまで少しずつ理解を進めてきたが、定量的に評価し、Fiducial Cut をするまでには至っていない。そのため、PMT 上下 12 本、

直径 30cm の 30kg 本検出器において、Fiducial Cut による有効質量の損失は未知数である。本検出器で Fiducial Cut を行う場合、有効質量の損失は、壁際 1cm では 13%、壁際 6cm では 64% となる。本論文では触れないが、本検出器では、PMT に加えて、MPPC を気相側面に併用することで壁際の位置分解能を向上させることができると考えており [9]、Run9 では上下 3 本の PMT と気相に 4 つの VUV-MPPC を配置した検出器でアルゴン試験を行った。しかし、Fiducial Cut をするまでには至っていない。一方で、他実験である DarkSide[23] や LUX[29] は、上下に配置した PMT のみで発光位置再構成を行う方法を確立している。いずれにおいても、検出器光学シミュレーションを利用しているが、ANKOK 実験における検出器光学シミュレーションは構築途中である。そこで、本研究では、まずはシンプルに PMT のみを使用した検出器を設計製作し、位置再構成には光学シミュレーションを必要としない重心法を用いた。

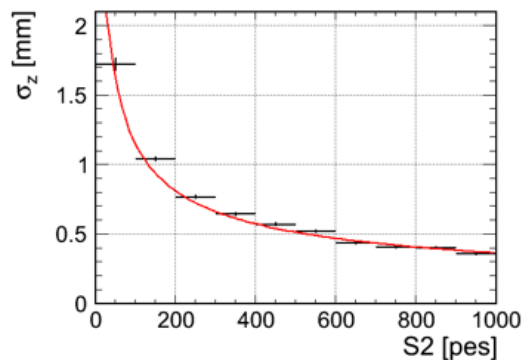


図 3.13 z 方向の位置分解能 [16]

### 3.6 大型化

小型プロトタイプ検出器からの大型化に伴う懸念事項としてまず、低温耐性が挙げられる。PTFE は液体アルゴン温度で約 1.9% 収縮する。つまり、例えば検出器の内径の収縮が小型プロトタイプ検出器では 1.2mm 程であったのに対し、本検出器では 5.7mm 程になる。そのため、大型化すると、PTFE の収縮によって検出器の構造が破壊される可能性が高くなる。また、データ取得に関して、標的質量や PMT のチャンネル数の増加により、トリガレートや取得データ量が増加し、安定的にデータ取得を行うことができない可能性がある。また、これまでよりも多くの部材を使用するため、アウトガス増加による純度の低下が懸念される。その他、検出光量の減少や電場印可時の放電等が懸念され、これらを検証する必要がある。

## 4 新検出器設計と性能評価

### 4.1 液体アルゴン用 PMT

ANKOK 実験で使用する PMT は、液体アルゴン温度で使用可能な浜松ホトニクス社の R11065 である。図 4.1 に R11065 の外観写真、図 4.2 に R11065 の図面を示す。有感波長領域は 160nm から 650nm であり、420nm の光に対しては Q.E. 約 30% と、高 Q.E. であることが特徴である。表 4.1 に R11065 のその他の仕様をまとめる [25]。PMT はデバイダー回路を用いて、1.7kV 程度の正電圧または負電圧で駆動する。正電圧での駆動は、アンダーシュートが問題となったため、ANKOK 実験では、負電圧で PMT を駆動する。ただし、PMT 光電面と筐体が導通しているため、負電圧を印可した場合、筐体は-1.7kV 程度になる。また、PMT はゲインを揃えて運用するが、ゲイン特性に個体差があるため、個体ごとに印可電圧が異なる。そのため、PMT を並べて使用する場合、お互いの筐体で導通しないように注意する必要がある。さらに、PMT 筐体が ITO 石英の保護電極と導通しないように注意する必要がある。ANKOK 実験では、これまで、24 本 PMT の本検出器に向けて、高価な R11065 を少しずつ買い足してきた。現在、15 本の R11065 を保有している。表 4.2 に使用した 14 本の PMT(R11065) の常温でのスペック値を示す。本章では、多チャンネル大型化に伴う問題点の洗い出しや位置分解能等の評価のために行った、PMT 上下 7 本、質量 5.3kg の検出器を設計・製作について述べる。



図 4.1 PMT(R11065) の外観写真

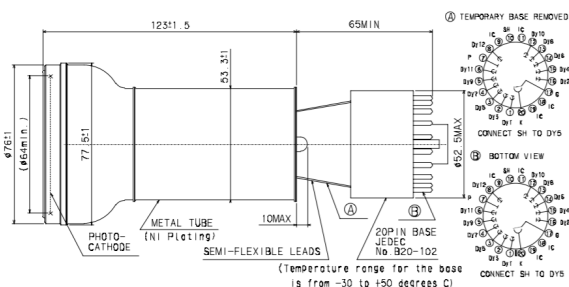


図 4.2 PMT(R11065) の図面 [25]

表 4.1 R11065 の仕様 [25]

有感波長		160-650nm
最大感度波長		420nm
窓材		合成石英
光電面	素材	バイアルカリ (Cb, K, Cs)
	有感領域	直径64mm
ダイノード	構造	Box & Linear-focused
	段数	12
カソードアノード間最大供給電圧		1750V

表 4.2 手持ちの R11065 常温スペック値

チャンネル	PMTの名前	gain@1500V (*e6)	QE@420nm (%)	
上	1	J20	2.681	32.46
	2	J10	2.52	30.26
	3	J03	2.993	32.43
	4	J09	2.422	31.33
	5	J18	1.8	30.07
	6	J19	1.72	30.31
	7	J01	1.967	33.88
下	8	J21	5.711	31.4
	9	J14	5.889	30.02
	10	J17	7.797	30.22
	11	J16	4.465	30.46
	12	J07	4.27	30.82
	13	J11	4.299	30.14
	14	J06	4.759	31.23

## 4.2 検出器サイズの最適化

図 4.2 のように、PMT の外径は 77.5mm、有感径は 64mm である。この PMT を上下に 7 本ずつ並べるが、4.1 で述べたように、お互いが導通しないようにするためと、PMT を確実に固定するために、PTFE に穴を開け、そこに PMT を差し込むようにして並べる。図 4.3 は PMT の並べ方を z 方向から見たものである。7 つの円は、上または下の 7 本の PMT 径を表しており、外側の円は外径、内側の円は有感径を表している。また、1 つの大きな円は検出器内径 22cm を表している。さらに、赤点は有感領域、黒点是不感領域を表している。不感領域をできるだけなくするために、PTFE の加工が可能な範囲で、PMT 間の距離をできるだけ近づけている。PMT 同士の最近接距離は約 2mm である。Photocoverage=(有感領域面積)/(有感領域面積 + 不感領域面積) とする。ただし、不感領域は上面または下面のみのことで、側面は除く。図 4.4 は、検出器有感領域の高さを 10cm に固定した状態で、内径をスキャンし、Photocoverage を計算したものである。横軸に標

的質量、縦軸に Photocoverage をとっている。尚、有感領域の高さについて、本検出器では 30cm であるが、検出器の大型化や構造変化に伴う放電耐性の変化が未知数であるため、本論文では、まずは有感領域の高さは 10cm に設定し、確実に電場を印可することを優先する。検出器径については、できるだけ標的質量を大きくしつつ、Photocoverage が大きく損なわれないような径を考える。Photocoverage が小さいほど、検出器内での光の反射回数が増え、光量は減少すると考えられる。検出器光学シミュレーションは構築途中であるため、期待される光量を Photocoverage と過去の Run の光量から考える。RunIX では、上下に 3 本ずつの PMT を配置した。上側の PMT には、MEG 実験で使用されている R6041-506(Q.E.25%@420nm)、下側には R11065 を用いた。上下それぞれ図 4.5 のように配置し、Photocoverage はそれぞれ、上側は 66%、下側は 58% であり、光量は約 5p.e./keVee であった。図 4.4 の星印のように、検出器の内径が 22cm の時、標的質量は 5.3kg(運用時は PTFE が液体アルゴン温度で収縮するため 5kg) で、上下面の Photocoverage は 61% である。また、図 4.6 は、これまでの Run の中でも主に縦横比のみが異なる検出器の光量を比べたもので、横軸に (カソードからアノードまでの距離 H)/(検出器直径 2R) をとったものである [26]。RunIX 検出器では  $H/2R=1.7$ 、直径 22cm の検出器では  $H/2R=1.7$  であり、図 4.6 によると、直径 22cm の検出器の光量は RunIX 検出器の 1.4 倍、つまり、約 7p.e./keVee の光量が期待される。

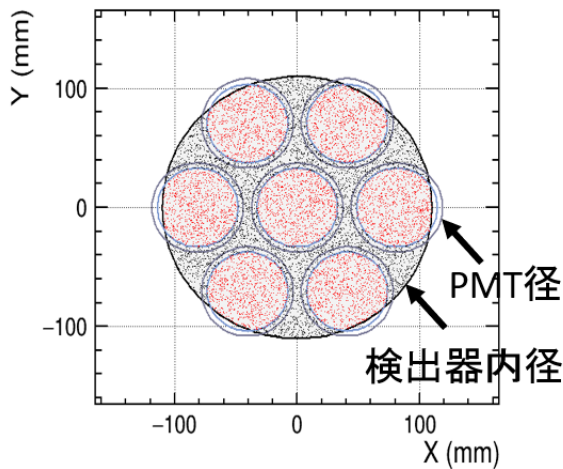


図 4.3 PMT の並べ方

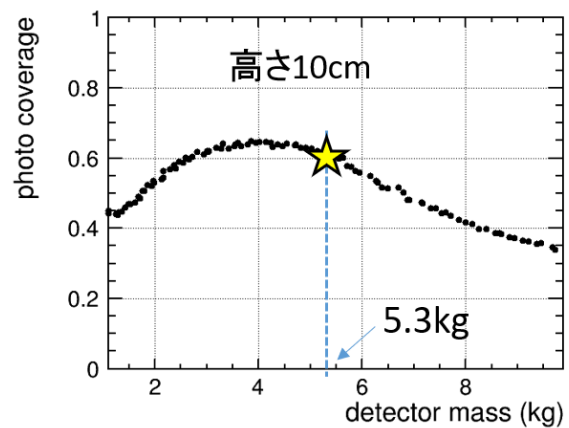


図 4.4 検出器の内径と Photocoverage

### 4.3 検出器部材

図 4.13 に設計した検出器の断面図を示す。図 4.13 のように、検出器は PMT の他に、PTFE、PEEK、ITO 石英、反射材、波長変換材、フィールドシェーパー、グリッド、液面計、ステンレス固定具から構成される。以下、それぞれの特性について説明する。

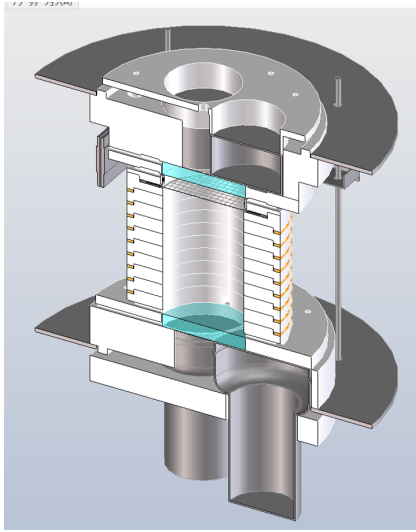


図 4.5 RunIX 検出器

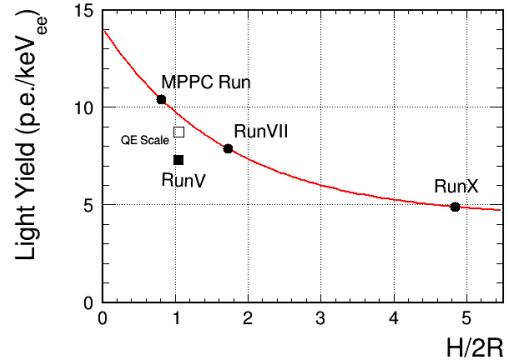


図 4.6 各 Run の検出器上下比と光量 [26]

## PTFE

検出器の主要部分に使用。PTFE は低温下での強度や絶縁性、低アウトガス性に優れ、低温、高電場、高純度という要請に対して適した素材である。また、放射線不純物の含有量が少ないという特徴がある [12]。DarkSide や LUX 等の液体希ガスを使用する他実験においても検出器の主要部分には PTFE を用いている。ただし、PTFE は液体アルゴン温度で約 1.9% 収縮するため、それを考慮して設計を行う必要がある。

## PEEK

Poly Ether Ether Ketone の略。検出器の固定のために、支柱部分やねじに使用。PEEK は絶縁性や低アウトガス性に優れ、高電場、高純度という要請に対して適した素材である。

## ITO 石英

ライトガイド及び電場形成や PMT 保護のための電極として使用。ITO は、Indium Tin Oxide の略で、酸化インジウム (III)( $\text{In}_2\text{O}_3$ ) と酸化スズ (IV)( $\text{SnO}_2$ ) の無機化合物である。可視光の透過率が高い透明電極として、産業分野では、タッチパネル等に使用されている。ANKOK 実験では、ジオマテック株式会社にて石英両表面に 10nm の ITO 膜を成膜した ITO 石英を使用している。小型プロトタイプ検出器では、厚さ 10mm、直径 66mm の ITO 石英を使用し、S2 不感領域における事象の撲滅や光量向上を達成した。新検出器においても同様の ITO 石英を作製した。ただし、新たに作製した ITO 石英は、厚さ 10mm、直径 224mm と従来と比較して大型であり、既存の小型蒸着装置では ITO 石英表面に波長変換材を蒸着することができないため、図 4.8 のように大型の蒸着装置を新たに作製した [27]。



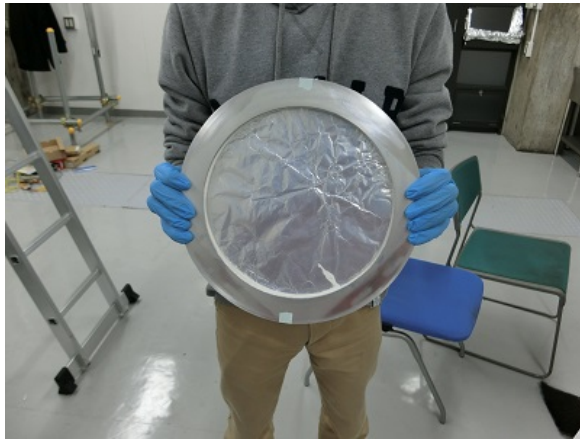


図 4.7 作製した直径 224mm の ITO 石英

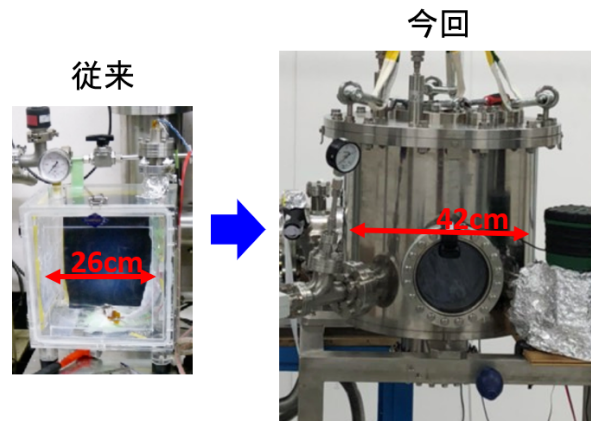


図 4.8 拡張した真空蒸着容器 [27]

### シムリング

厚さ  $100\mu\text{m}$ 、内径 220mm、外径 270mm のステンレスリング。ITO 透明電極と外部との接続 (図 4.14) 及び、電場の整形として使用。図 4.9 に小型プロトタイプ検出器設計における、シムリング無しと有りの場合の有限要素法による電場計算を示す [21]。シムリングによって、有感領域への電場の染み出しが抑えられていることがわかる。

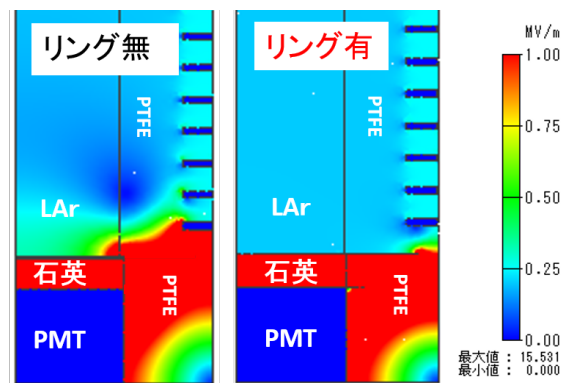


図 4.9 シムリング無しと有りの場合の電場計算 [21]

### 反射材

検出器側面に放出される光を効率良く収集するために、検出器内側側面には高反射率の反射材 ESR(住友 3M 社) を用意している。ESR は、Enhanced Specular Reflector の略である。ポリエステル系樹脂でできており、屈折率の高い樹脂と低い樹脂が交互に重なった多層膜構造になってい



る。膜厚を入射光の波長の 1/4 にすることで、反射光の位相を揃い、お互い強め合い、高い反射率を得ることができる。ESR では、可視光波長領域で 98% 以上の高い反射率を有している。ESR には、フィルム厚 32 $\mu\text{m}$  や 65 $\mu\text{m}$  があるが、ANKOK 実験では 80 $\mu\text{m}$  の ESR を使用している。

#### 波長変換材

128nm の Ar 蛍光を R11065 で直接読み出すことはできない。そのため、波長変換材によって、420nm に変換して、観測する。波長変換材には、TPB(テトラフェニルブタジエン)を用いている。TPB は、ITO 石英表面や反射材表面に蒸着される。図 4.10 に、波長変換効率と ITO 石英透過率の蒸着量依存を示す。このように、従来の真空蒸着では、可視光透過率をできるだけ損なわずに、波長変換効率を最大にする蒸着方法の最適化がされていた。先程述べた図 4.8 のように、真空蒸着容器の拡張を行ったが、蒸着方法の再最適化はされていない。そのため、今後、大型真空蒸着容器での蒸着方法の再最適化を行っていく必要がある。また、TPB に  $\alpha$  線等が入射すると発光する。DarkSide 実験では、TPB での発光事象を波形弁別することで、壁際事象の識別を試みている [28]。

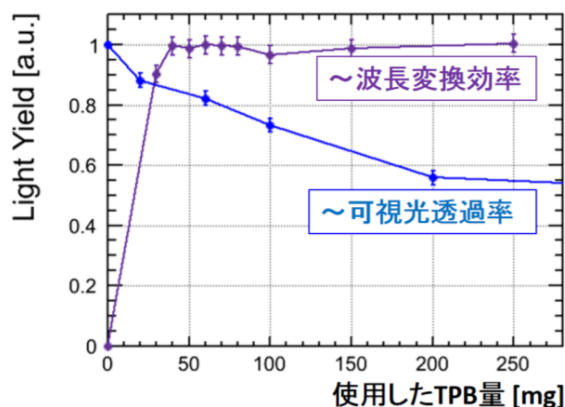


図 4.10 波長変換効率と ITO 石英透過率の TPB 蒸着量依存 [9]

#### Grid

ドリフト電場及び取り出し電場形成のための電極として使用。液面から約 5mm 下に配置。厚さ 100 $\mu\text{m}$  のステンレスをエッジング処理することで、幅 100 $\mu\text{m}$ 、4mm ピッチのグリッドを作製 (図 4.11)。開口率は 95% である。縁は内径 240mm、外径 260mm、厚さ 2mm のステンレスリングでサンドするようにして固定した。また、グリッドから、位置再構成において有用な情報が得られる可能性がある。取り出し電場がグリッドのワイヤーを避けるように形成されるため、S2 の発光位置は格子状になると考えられる。そのため、S2 の再構成位置にグリッド構造が確認できれば、位置分解能等の評価を行うことができる。キセノン実験である、LUX や ZEPLIN[31] では、位置再構成によりグリッドのワイヤー構造がみられている。図 4.12 に示すのは、PMT 上下 3 本の検出器 (RunIX 検出器) において、S2 光量重心をとったものであるが、グリッド構造を示唆するよう

な、S2 光量重心のイベントの偏りが確認された [24]。S2 光量重心についての詳細は後述する。今回の新検出器では、RunIX と同様の 4m ピッチの 2D グリッドにすることで、位置再構成において有用な情報が得られることが期待される。ただし、本研究では、グリッド構造を利用した評価は行わず今後の展望とし、Bi-Po 事象を利用した評価を行った。



図 4.11 作製したグリッド

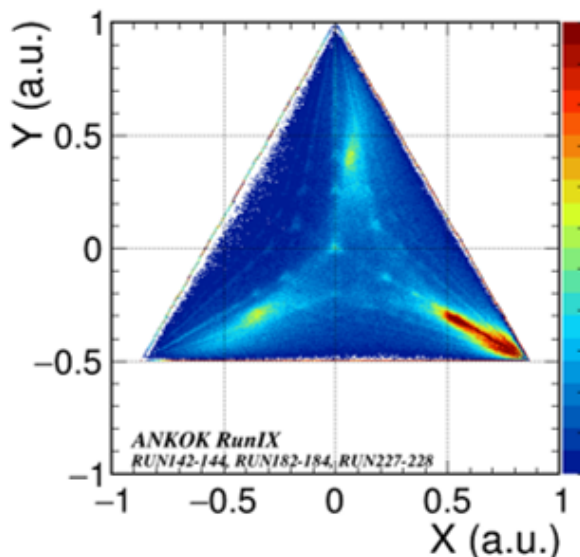


図 4.12 RunIX 検出器における S2 光量重心 [24]

### Field Shaper

無酸素銅リングを、電場整形する Field Shaper として使用。無酸素銅リングは、内径 240mm、外径 260mm で厚さは 2mm である。10mm ピッチで配置。検出器外側に配置された CW 回路から電圧を印可。

### ステンレス固定具

検出器支柱の固定及び、検出器とトップフランジの接続部分の固定具として使用。検出器の総重量約 20kg に耐える厚さ 5mm の固定具を用意。また、PMT を固定するため厚さ 5mm の固定具も用意した。

### 液面計

実験中の液面のモニターに使用。S2 光量は液面の高さにも依存するため、液面のモニターは重要である [15]。液面計は検出器外側 3 箇所を設置。小型プロトタイプ検出器には、液面計を固定する支柱に M4 のステンレスねじを用いていたが、放電対策のために新検出器では PEEK ねじを使用。液面計に関する詳細は、高橋卒論参照 [30]。

### CW 回路

検出器外側に配置。グリッド、カソード、シェーパーに接続し、直流高電圧を印可。新検出器では、RunX 及び RunX-II で使用した 30 段 CW 回路をコンパクトにした 10 段 CW 回路を新たに作製し、使用。CW 回路に関する詳細は、菊地修論参照 [20]。

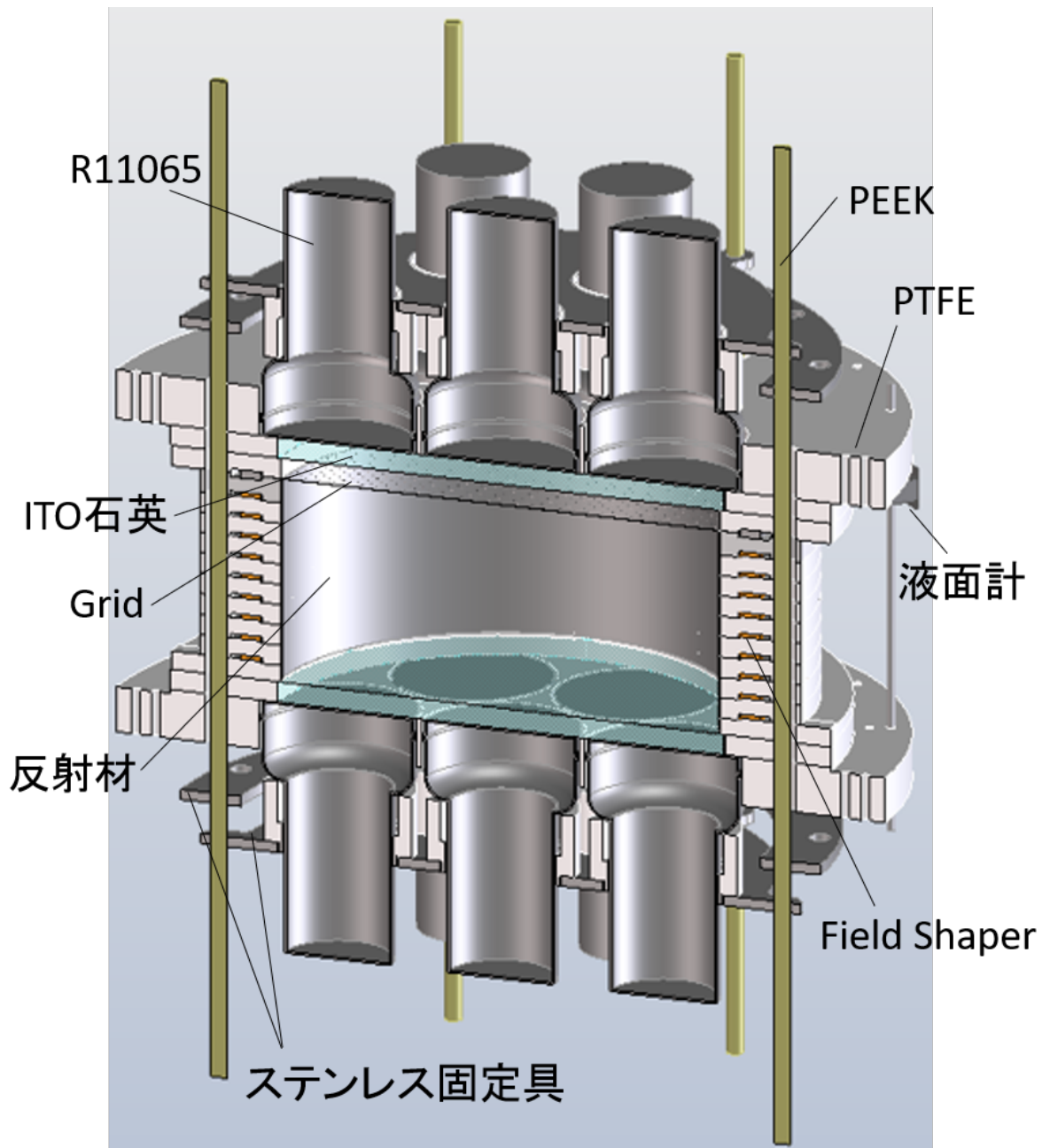


図 4.13 新検出器設計外観図

## 4.4 電場設計

図 4.15 のように、検出器の有感領域の径は 220mm、高さは 110mm であり、上側 5mm 気相、下側 105mm が液相である。検出器上下の PMT には、先述の浜松ホトニクス社の R11065 を使用している。PMT の前には、ITO 石英が配置されている。図 4.14 のように、ITO 石英の縁 2mm は厚さ 100 $\mu$ m のステンレスリングと接触させ、検出器外側の電極と接続できるようにした。液面下 5mm の位置には Grid を配置し、有感領域外側には、10mm 間隔で Field Shaper を配置した。これら、透明電極 (カソード)、グリッド、シェーパーには高電圧生成のための CW 回路が接続される。ただし、ITO 透明電極に関してアノード側は別途 HV を接続、上下の PMT 側保護電極は、上下それぞれ任意の一本の PMT (上側 J10, 下側 J06) の筐体と接続し、PMT の HV と ITO 面の間の電位差を PMT 同士の電位差程度にしている。図 4.16 は、ドリフト電場 500V/cm、取り出し電場 4.5kV/cm を実現するための電圧印可条件であり、図 4.16 は有限要素法での電場計算結果である。カソード付近の高さ 10mm、幅 5mm の領域で電場が少し崩れているが、その他の領域では、 $\pm 1\%$  の範囲で電場が一様であることがわかる。

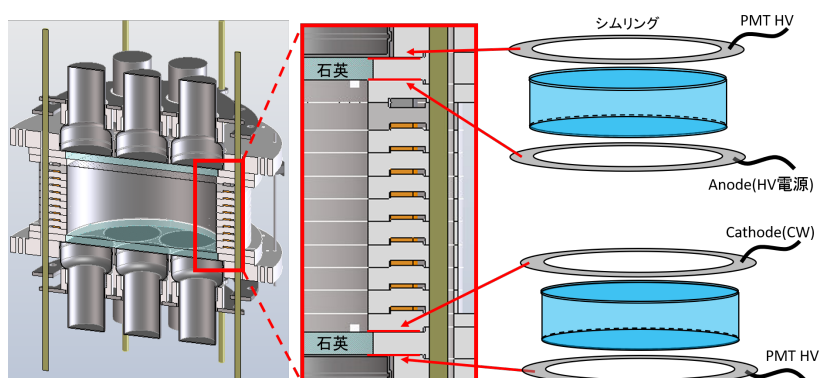


図 4.14 シムリングの位置

## 4.5 機構設計

検出器の円筒部分は、小型プロトタイプ検出器と同じように、リング状の PTFE (以下基本部品) を積み重ね、基本部品間にシェーパーを配置していくことで高さ方向に拡張性のある設計にした。基本部品は、厚さ 11mm、内径 220mm、外径 300mm である。表裏にはそれぞれ凹凸があり、組み上げ時の横ずれや回転防止など、組み上げやすい形状にしている (図 4.17)。図 4.18 の右側写真のようにシェーパーは基本部品の溝部分に収まるようになっているが、図 4.18 左側のように外側に余裕を持たせた設計になっている。また、支柱用の穴が 6 箇所あるが、楕円形にしており、

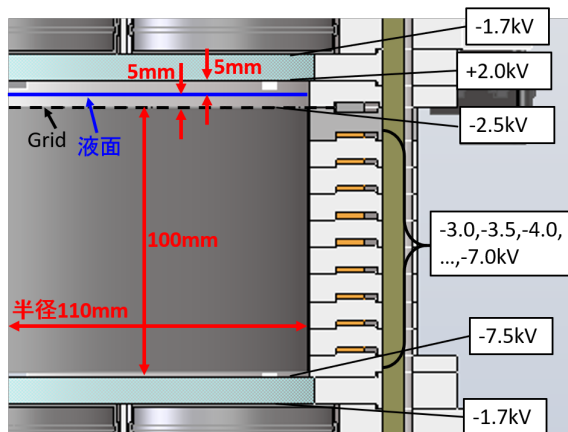


図 4.15 有限要素法における電圧印可条件

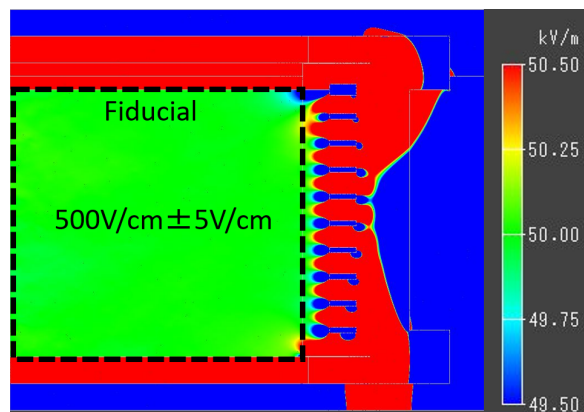


図 4.16 有限要素法による電場計算結果

常温下では、支柱が検出器内側寄りに位置するようになっている。これらは、低温時に PTFE が収縮した際に、シェーパーや支柱に力がかからないようにするためである。無酸素銅やステンレスは、PTFE に比べて収縮率が 1,2 桁低いため、図 4.18 のように外側に余裕がなければ、シェーパーや、ステンレス固定具に固定された支柱に力がかかり、破損や検出器の歪みの原因となる。

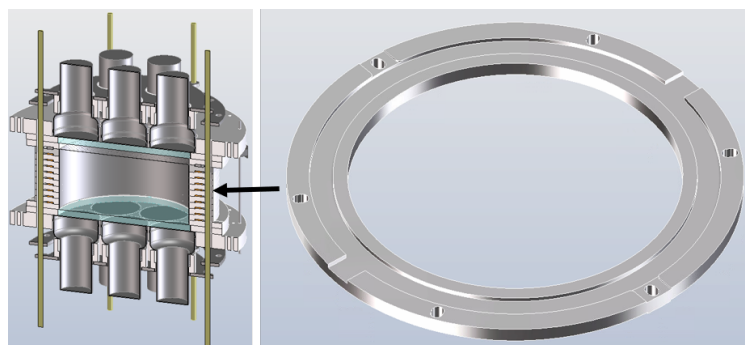


図 4.17 基本部品



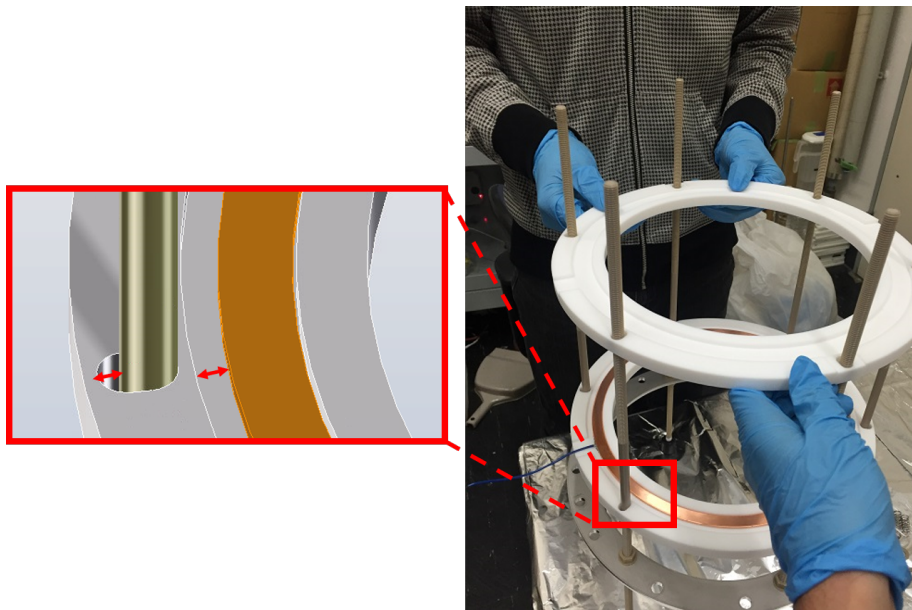


図 4.18 組み上げ時の様子 (右) と収縮を考慮した設計 (左)

また、今回の PTFE の加工の公差は  $\pm 0.1\text{mm}$  であるが、 $100\mu\text{m}$  程度の加工精度のばらつきでも、基本部品同士を隙間なく組み上げようとすると全体的に数ミリ程度の歪みが生じる。さらに、PTFE 部品の位置によって、低温における収縮率のばらつきがあるため、部品同士に隙間がない場合、無理な力がかかる可能性がある。そこで、部品同士のはめ合いに  $1\text{mm}$  の隙間を設けることで、組み上げ時や低温下で部品同士に無理な力がかからないようにした。

シェーパーと CW 回路各段との接続は、小型プロトタイプ検出器と同様に、シェーパーにはんだ付けで導線を取り付けて接続した (接続した様子は図 4.25 参照)。一方、小型プロトタイプ検出器とは異なり、シェーパーをむき出しにしないことで、チェンバー等との絶縁性を高めている。Grid は、上下の PTFE にサンドされることで固定される。CW 回路への接続は、シェーパーと同様に行った。

円筒部分上下には気体及び液体アルゴンが出入りするための穴を用意している。上下の穴の大きさは幅  $10\text{mm}$  高さ  $3\text{mm}$  で、それぞれ 5 箇所ずつである。上側の穴は後述するキャリブレーション用の光学ファイバーの入口としても使用している。

検出器内側表面には図 4.19 のように、ESR を配置する。市販の ESR は  $15\text{cm}$  角であるため、小型プロトタイプ検出器で使用実績のある接着剤でつなぎ合わせて使用する。蒸着後は、表面に触れると TPB が落ちてしまうので、注意しながら検出器内側に取り付ける。低温での収縮を考慮して、ESR を取り付ける径は検出器内径より小さめにする。基本部品と ESR を同時に液体アルゴンに浸した状態で径を合わせることで、ESR を取り付ける径を決定した。

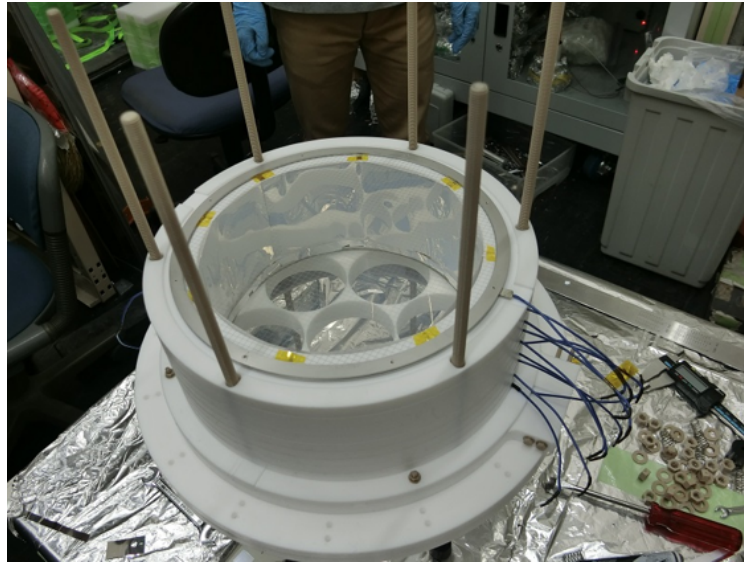


図 4.19 検出器内側側面に ESR を取り付けた様子

ITO 石英は、図 4.20 のようなブーメラン型の部品 (以下石英フォルダー) を側面両側から挟み、お互いを M4 の PEEK ねじでねじ止めて固定する。小型プロトタイプ検出器では、外径 66mm の ITO 石英を同じ内径のリング状の PTFE に押し込めるように設置していた。一方、このような側面両側から挟む方式の固定により、224mm の ITO 石英を無理なく固定することができ、また、TPB が蒸着面に触れるリスクも軽減できる。ところが、ITO 石英を PTFE でピッタリ固定することで、低温時に PTFE が ITO 石英を締め付け、破壊することが懸念される。小型プロトタイプ検出器の運用時には問題とならなかったが、径が大きくなることで、PTFE が石英を締め付ける力が大きくなる。一方で、これまで、PTFE の締め付けにより、カソードと保護電極間の絶縁性を高めていたとも考えられる。そこで、今回は絶縁性を高めることを優先し、ITO 石英を PTFE でピッタリ固定する設計にした。また、ITO 石英の径 (224mm) を検出器内径 (220mm) よりも 4mm 大きくしたのは、検出器上下方向にも固定できるようにするためである。図 4.21 のように、PMT を差し込む部品 (以下 PMT フォルダー) と有感領域側の部品 (以下溝付部品) でサンドするようにして固定する。支柱の外側に M4 ネジで固定する場所を 4 箇所設け、検出器円筒部分とは独立して、石英フォルダー、PMT フォルダー、溝付部品で ITO 石英を固定できるようにした。これにより、ITO 石英を破損させることなく、検出器を安全に組み上げることができる。また、先述のように、PMT フォルダーと石英フォルダーの間、石英フォルダーと溝付部品の間には、それぞれシムリングを挟んだ。

PMT フォルダーの穴の大きさは、低温下で収縮した際に、PMT を締め付けないような大きさになっている。PMT は PMT フォルダーに差し込み、PMT の窓材が ITO 石英に接する。そして、PMT の首部分を抑え、PMT を ITO 石英に押し付けるようにして固定する。ただし、PMT

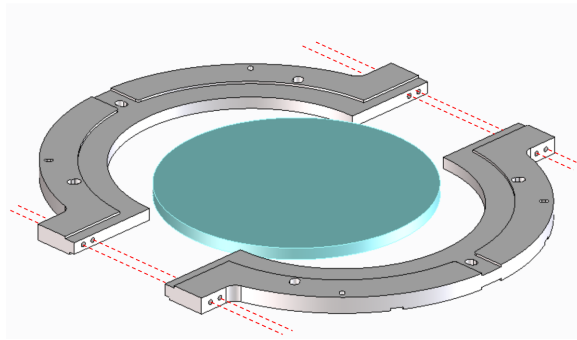


図 4.20 石英フォルダーによる固定

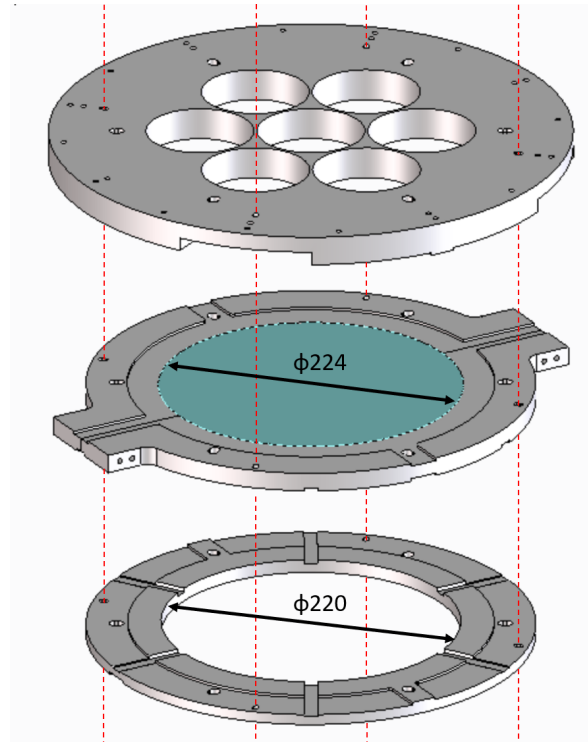


図 4.21 石英フォルダー (上)、PMT フォルダー (中)、溝付部品 (下) による固定

に PMT 抑え用ステンレスを直接接触させると、PMT の筐体同士が導通してしまうため、図 4.22 のように PMT 抑え専用の PTFE 部品を PMT と PMT 抑え用ステンレスの間に用意した。また、PMT 窓面縁の筐体部分と ITO 面の距離は 1mm 程度となる。両者間での放電防止のために、PMT 窓面縁の筐体部分はテフロンテープで覆った。テフロンテープを巻く際は、PMT 窓面と ITO 面の間に隙間ができないように注意した。

図 4.25 に組みあがった検出器の外観を示す。図 4.25 にあるように、上下の PMT フォルダーは、液面計 (左側) や CW 回路及び放電棒 (右側) を固定するための台も兼ねている。また、液面計を固定するための M4 の支柱ねじには PEEK を用いている。このように、固定台や支柱ねじなど、できるだけ絶縁性の高い部材を使用することで、放電のリスクを軽減している。



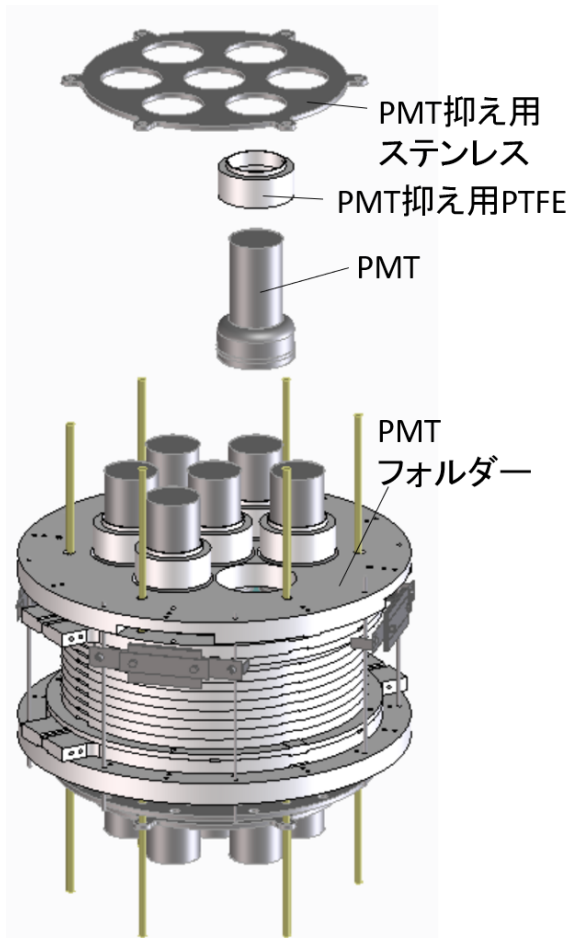


図 4.22 PMT 固定方法

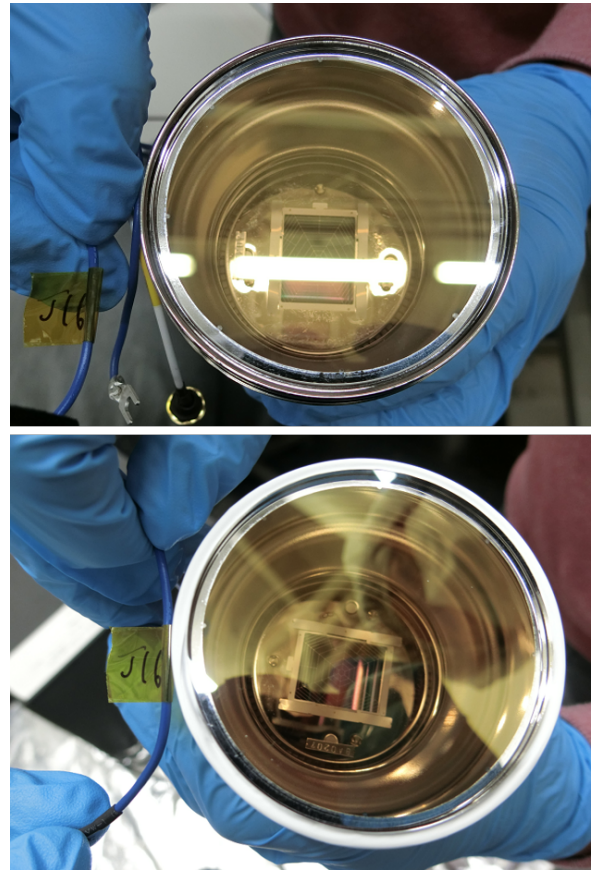


図 4.23 テフロンテープを巻く前 (上) と巻いた後 (下)



図 4.24 検出器上側から中を覗いた様子

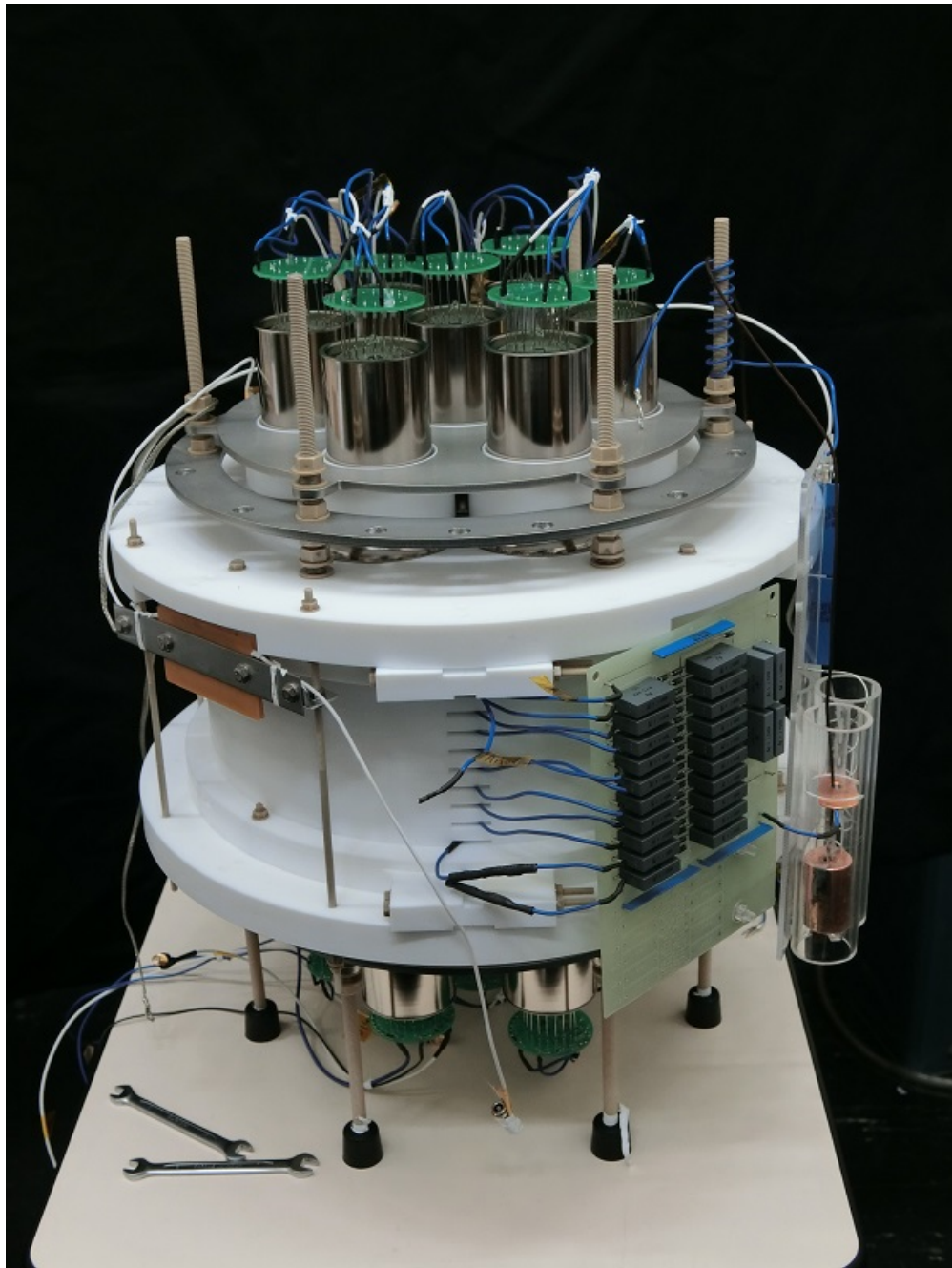


図 4.25 組み上げ後の検出器外観

## 4.6 検出器性能評価

作製した新検出器 (PMT14 本、標的質量 5kg) のアルゴン試験を 2018/2/23-2018/3/4 の期間約 10 日間行った (Run17.3)。主な目的は、低温耐性、多チャンネル読み出し、電場印可、アルゴン純度、検出光量、S2 光量重心による位置再構成の評価である。試験期間の約 10 日間、検出器を安定して運用することができ、低温耐性には問題なかった。また、電場印可については、1.5kV/cm まで放電することなく電場を印可し、データ取得することができた。

試験におけるジオメトリについては、検出器の液面がトップフランジから 52.4cm の位置になるように、検出器をトップフランジに固定した。チェンバーの側面には厚さ 1cm、底面には厚さ 2cm の無酸素銅を配置し、さらにその側面外側には厚さ 10cm、底面外側には厚さ 5cm の鉛を配置した。チェンバー上側には、配管系やフィードスルーと干渉しない範囲で厚さ 1cm の無酸素銅と厚さ 5cm 程度の鉛を配置した。液体アルゴンの維持及び純化のための配管系は、図 2.8 の通りである。S2 光量は容器内圧に依存するが、容器内圧は主に 1.4atm または 1.1atm で運用した。PMT への高電圧供給については、iseg 社の EDS F1 30m を用いた。また、データ取得には、SIS 社の 16ch、14bit、250MS/s の FlashADC(SIS3316) を用いた。

### 4.6.1 PMT ゲイン較正

Run17.3 の前に、PTFE をアクリルで代用した検出器でアルゴン試験を 2018/1/9-2018/1/12 の約 4 日間行った (Run17.2)。Run17.2 では、液体アルゴン中で LED を用いた PMT のゲイン較正を行った。ゲイン較正のセットアップを図 4.26 に示す。図 4.26 のように、チェンバー外の暗箱で LED を Function Generator によって点滅させ、Optical ファイバーを通じて検出器内に、LED 光を導入した。ファイバーは、検出器側面上側の穴から入れており、ファイバーの先端は上側石英の目の前に配置した。LED 光は PMT で観測され、Function Generator をトリガーとして、FlashADC で取得される。ただし、Run17.2 と Run17.3 では上下の PMT が入れ替わっている。図 4.27 は印可電圧-1750V の時の R11065(J21) の電荷分布である。0-3p.e. の電荷分布を式 (4.1) でフィットすることで、Gain を算出する。

$$f(q) = \sum_{n=0}^3 \frac{\mu^n}{n!} \exp(-\mu) \times \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_n^2}} \exp\left(-\frac{(q - q_{ped} - neg)^2}{2\sigma_n^2}\right) \quad (4.1)$$

$$\sigma_n^2 = \sigma_{ped}^2 + n\sigma_{spp}^2 \quad (4.2)$$

ただし、 $q$ :電荷量、 $\mu$ :ポアソン分布の期待値、 $q_{ped}$ :ペDESTALの中心値、 $n$ :光電子数、 $e$ :素電荷、 $g$ :ゲイン、 $\sigma_n$ : $n$  光電子の分散、 $\sigma_{ped}$ :ペDESTALの分散、 $\sigma_{spp}$ :1 光電子の分散である。他の PMT についても同様に Gain の算出を行い、印可電圧を変えて測定した結果が図 4.28 と図 4.29 である。

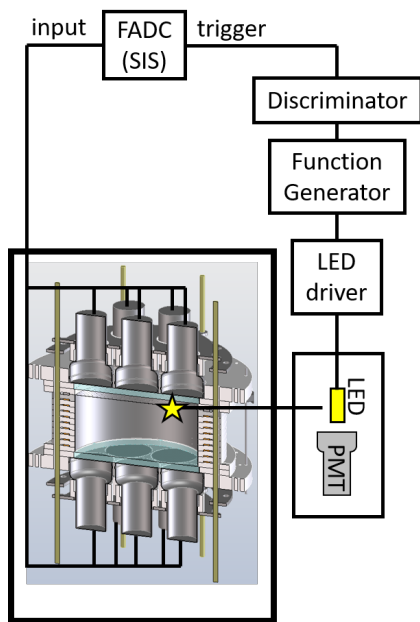


図 4.26 Gain 較正セットアップ

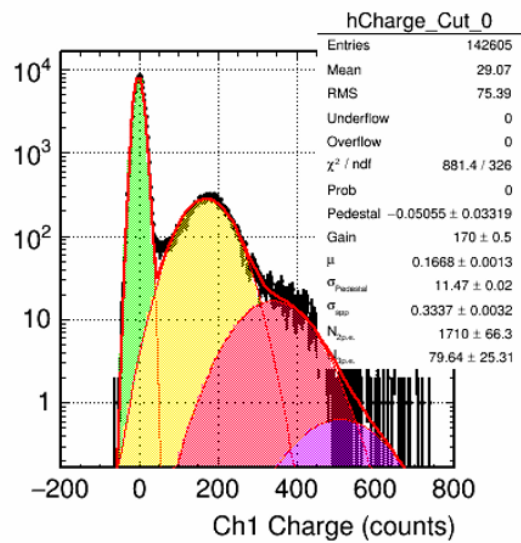


図 4.27 R11065(J21)@1750V の電荷分布

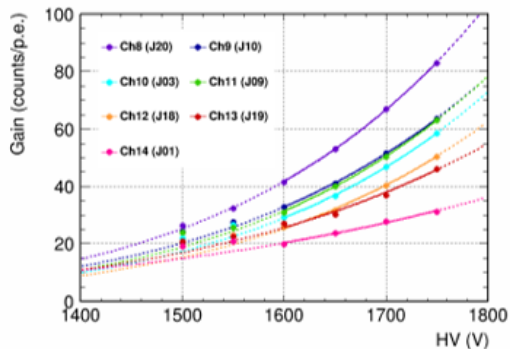


図 4.28 上側 PMTGain 測定結果

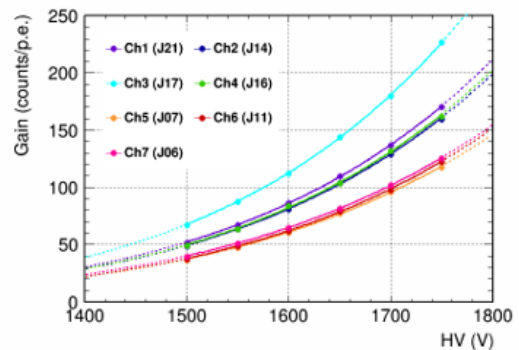


図 4.29 上側 PMTGain 測定結果

#### 4.6.2 多チャンネル PMT による信号取得

Run17.3 で取得した波形例を示す。図 4.30 は ER 事象の波形例である。図左側が上側 PMT、右側が下側 PMT で観測したもので、それぞれのプロットの位置は検出器を上から見た時の PMT の位置に対応しており、左右それぞれの中心のプロットが、それぞれ上下面の中心の PMT からの信号である。横軸はトリガー時刻を  $t=0$  として定義しており、トリガー前- $10\mu\text{s}$ 、トリガー後  $100\mu\text{s}$  の時間幅 (Time Window) でデータを取得している。ただし、Cosmic 等の大きな信号が来た際に爆発的なレート増加やノイズの取得を防ぐために、データ取得後  $100\text{-}200\mu\text{s}$  程度の間は、トリガーを禁止している (veto gate)。図 4.30 の run167 は、ドリフト電場  $500\text{V}/\text{cm}$ 、取り出し電場

4.5kV/cm、 $^{60}\text{Co}$  線源を設置したデータである。時刻  $t=0$  の波形が S1、 $t=40\mu\text{s}$  付近の波形が S2 である。すべてのチャンネルで S1 と S2 を観測し、波形を取得できていることがわかる。

また、ch3 においては他のチャンネルより観測された S2 信号が大きい。これは、S2 が PMTch3 の目の前で発生したと考えられる。このように、上側 PMT で観測される S2 光量の PMT チャンネル依存性が、下側 PMT で観測される S2 や上下 PMT で観測される S1 に比べて大きい。そのため、上側 PMT で観測される S2 を使った位置再構成が、最も位置分解能良いと考えられる。そこで、後述のように上側 PMT で観測される S2 の光量重心をとることで、位置再構成を行った。

また、図 4.31 に NR 事象の波形例、図 4.43 に Cosmic 事象の波形例を示す。図 4.31 の run282 は、ドリフト電場 500V/cm、取り出し電場 6kV/cm、 $^{252}\text{Cf}$  線源を設置したデータである。図 4.43 の run227 は、ドリフト電場 500V/cm、取り出し電場 6kV/cm、線源なしの BG データである。Cosmic 事象では、入射粒子の飛跡に沿って連続的にドリフト電子が発生する。そのため、Cosmic がドリフト方向に沿って突き抜けると、 $t=0$  からフルドリフトの時間 (ドリフト電場 500V/cm の場合、ドリフト速度はより  $1.5\text{mm}/\mu\text{s}$  なので、 $67\mu\text{s}$ ) まで S2 が観測され続ける。純度が悪い場合、S2 光量が観測時間に従って減衰するが、顕著な減衰は見られない。

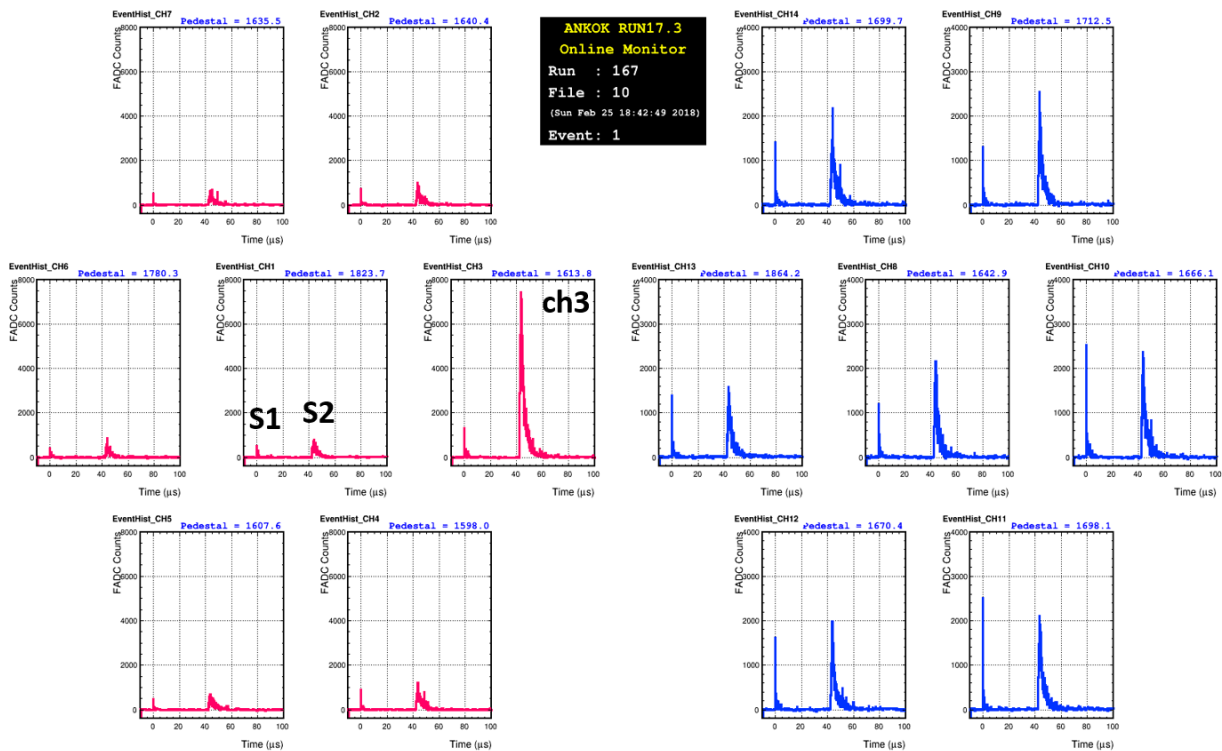


図 4.30 ER 事象取得波形例



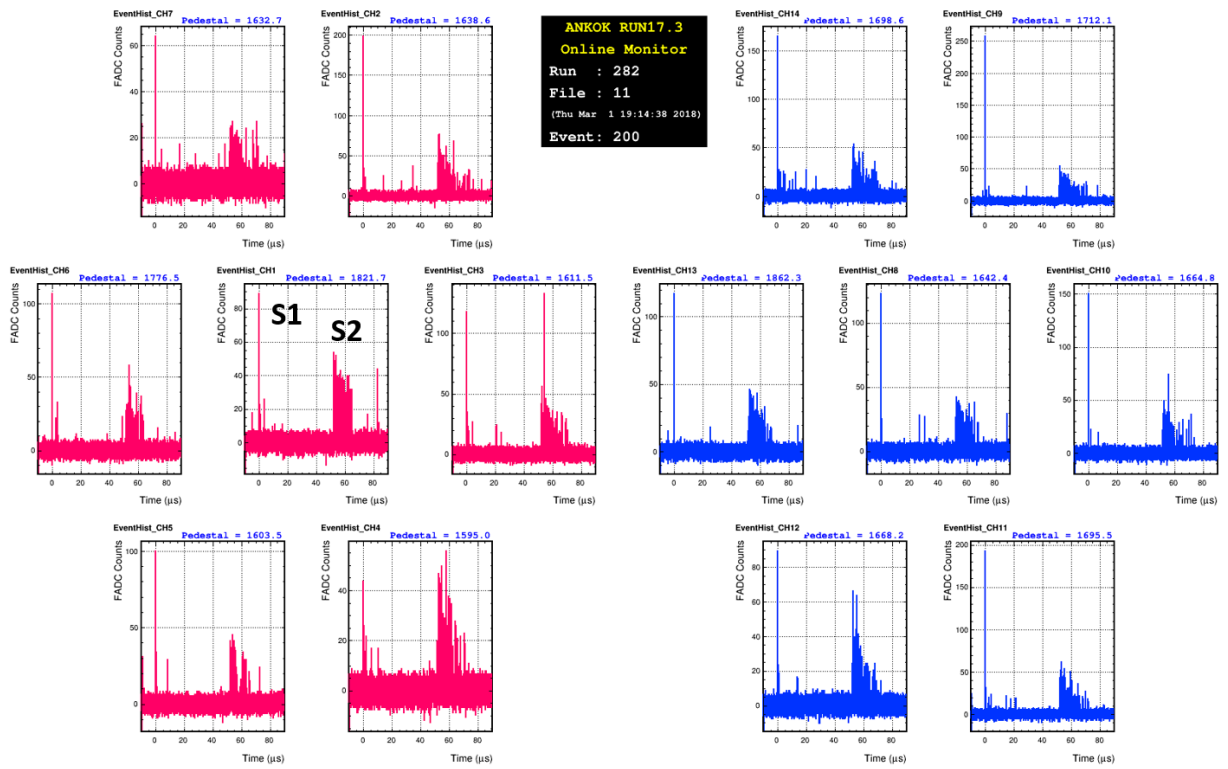


图 4.31 NR 事象取得波形例

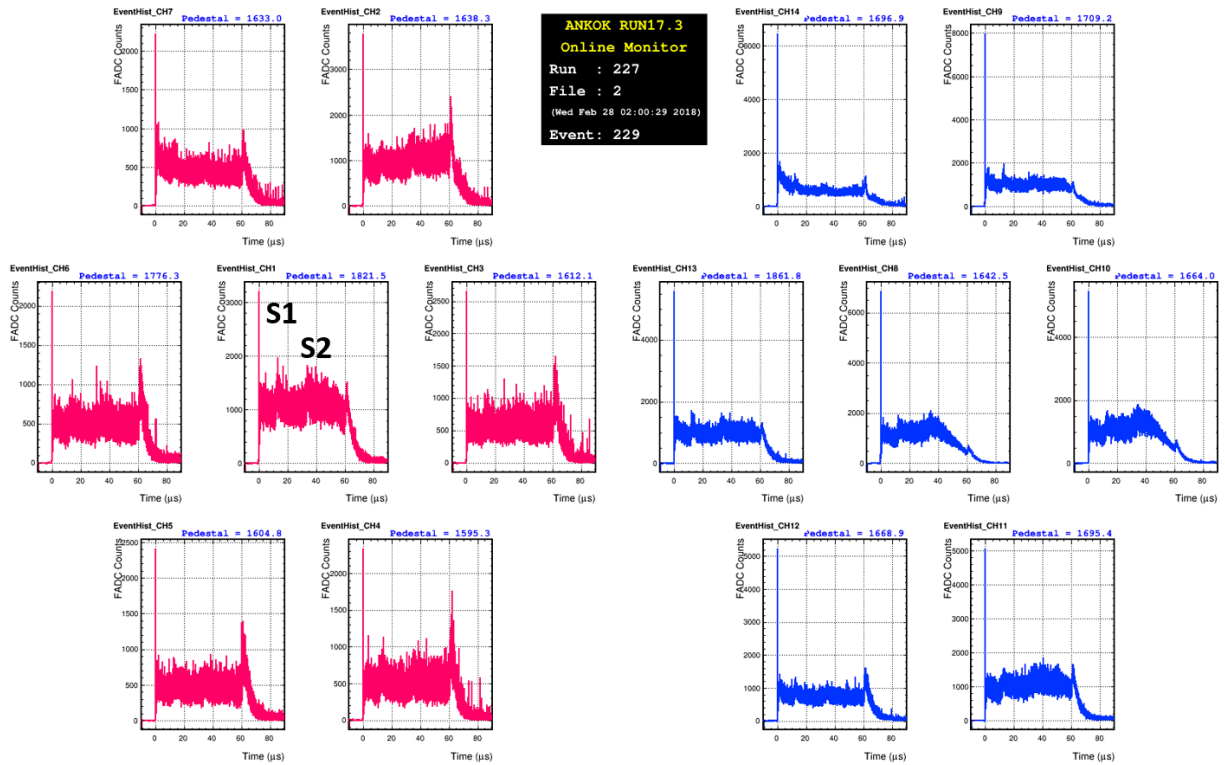


図 4.32 Cosmic 事象取得波形例

#### 4.6.3 検出光量

$^{137}\text{Cs}\gamma$  線源を用いて、検出光量の評価を行った。 $^{137}\text{Cs}$  は放射性壊変により、662keV の  $\gamma$  線を放出するため、検出器のキャリブレーションにおいて有用である。 $^{137}\text{Cs}\gamma$  線源を 200 容器の外側から検出器に照射し、表 4.3 の条件でデータ取得を行った。図 4.33 は、 $^{137}\text{Cs}\gamma$  線源による光量測定の結果で、横軸は S1 全光量、縦軸はイベント数である。図のように、662keV の  $\gamma$  線のピークに対して、ガウシアン+exp 関数+定数のフィット関数でフィットを行い、ピークを中心値 1873p.e. を得た。つまり、検出光量は  $1873\text{p.e.}/662\text{keVee}=2.83\text{p.e.}/\text{keVee}$  であった。

#### 4.6.4 アルゴン純度

検出器の大型化に伴い、使用部材が多くなるため、アウトガスが増加し、純度悪化が懸念される。特に PTFE に関して、小型プロトタイプ検出器においては、使用量が約 6.7kg に対し、新検出器では約 19kg と 3 倍程である。図 4.34 と図 4.35、図 4.36 と図 4.37 はそれぞれ、小型プロトタイプ検出器の Run17.1 と新検出器の Run17.3 のアルゴン充填前の真空引き期間における、アウトガスレートと真空度の変化である。実験開始直前のアウトガスレートについては、Run17.1

表 4.3 run101 のデータ取得条件

データ取得期間	2018/2/24 15:32 - 2018/2/24 16:01
1file のイベント数	1000
取得ファイル数	486
線源	$^{137}\text{Cs}$
ドリフト電場	null
取り出し電場	null
PMT ゲイン	約 50FADCCcounts/p.e.
Time Window	$[-5, 20]\mu\text{s}$
トリガー条件	全 PMT 任意の 3ch の Coincidence

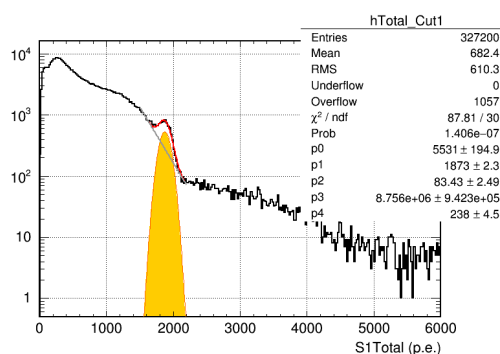


図 4.33  $^{137}\text{Cs}$  による検出光量評価

では 6Pa/h、Run17.3 では 5Pa/h であり、到達真空度については、Run17.1 では  $2.65 \times 10^{-3}\text{Pa}$ 、Run17.3 では  $1.37 \times 10^{-3}\text{Pa}$  である。このように、Run17.1 から Run17.3 にかけてアウトガスの増加や真空度の悪化はみられない。

図 4.38 に不純物濃度の測定結果を示す。図 4.38 は、run362 の 1 ファイル分のデータから作製した S1 平均波形であり、全 PMT チャンネルの平均をとっている。表 4.4 に run362 のデータ取得条件を示す。図 4.38 のように、S1 平均波形の Slow 成分に対する  $exp$  関数によるフィット結果から時定数  $\tau=1.5\mu\text{s}$  が得られ、 $\text{N}_2$  不純物濃度は目標濃度を達成できていることが確認できた。

続いて、コリメートされた  $^{60}\text{Co}$  を 200L 容器外側から検出器に照射し、z 方向にスキャンすることで、 $\text{O}_2$  濃度と  $\text{H}_2\text{O}$  濃度の測定を行った。任意の位置 (グリッドあたり) を  $z=0$  とし、検出器下側に向かって、 $^{60}\text{Co}$  を  $z=0.7, 1.7, 2.7, 3.7, 4.7, 5.7, 6.7, 7.7, 8.7, 9.7\text{cm}$  で測定を行った。一連のデータ取得条件を表 4.5 に示す。各点 10 ファイル分のデータを用いて解析を行った。解析で



は、 $^{60}\text{Co}$  のコンプトンエッジ付近の事象選択後、ドリフト時間で事象選択を行った。事象選択後、各  $z$  位置におけるドリフト時間と S2 分布に対してフィットを行い、mean 値を図 4.39 にプロットした。図 4.39 は、横軸ドリフト時間、縦軸 S2 光量である。図中の赤線は各点に対するフィットの様子である。フィット結果から、時定数 1.5ms 程度、つまり、300ppb/ $\mu$  から不純物濃度は 0.2ppb 程度という結果が得られ、目標不純物濃度を達成した。

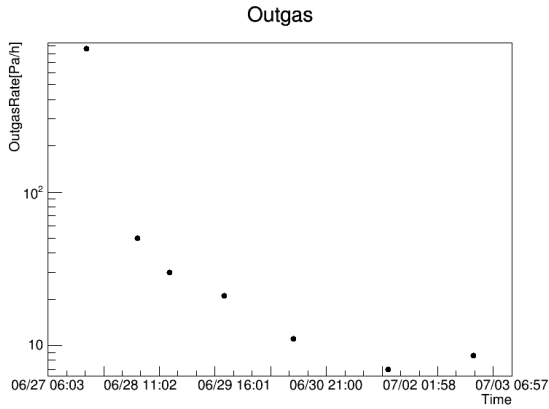


図 4.34 Run17.1 におけるアウトガスレートの変化

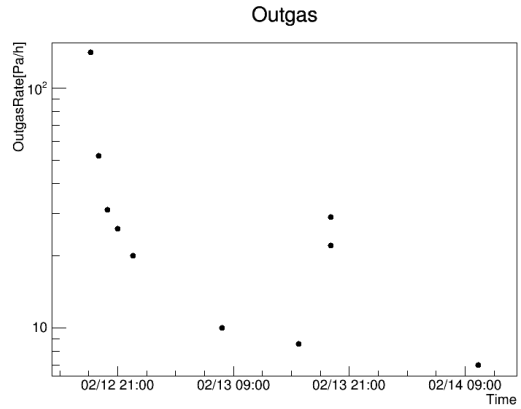


図 4.35 Run17.3 におけるアウトガスレートの変化

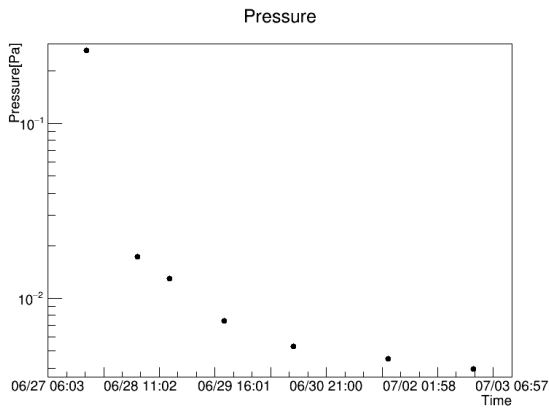


図 4.36 Run17.1 における真空度の変化

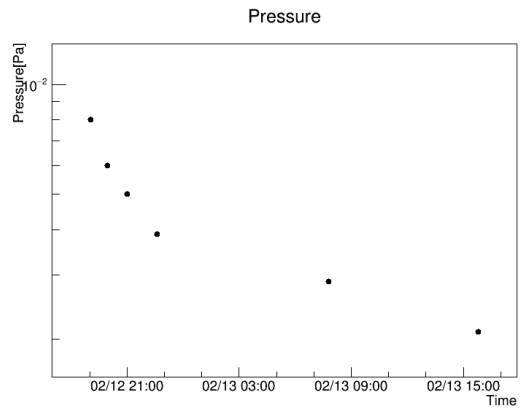


図 4.37 Run17.3 における真空度の変化

表 4.4 run362 のデータ取得条件

データ取得期間	2018/3/4 10:59 - 2018/3/4 11:14
1file のイベント数	1000
取得ファイル数	251
線源	$^{137}\text{Cs}$
ドリフト電場	null
取り出し電場	null
PMT ゲイン	約 50FADCcounts/p.e.
Time Window	$[-5, 20]\mu\text{s}$
トリガー条件	全 PMT 任意の 3ch の Coincidence

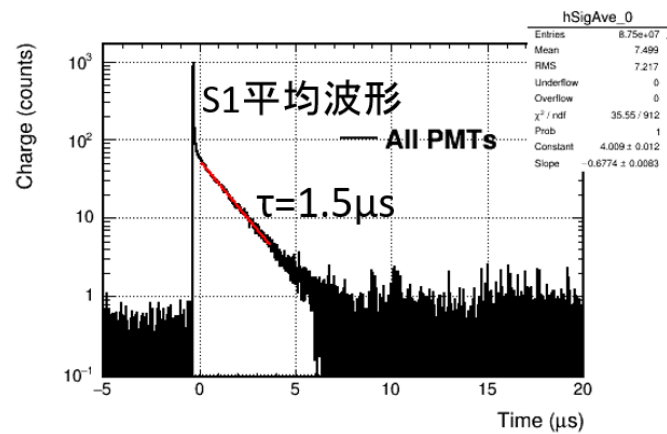


図 4.38 S1 平均波形による  $\text{N}_2$  不純物濃度測定

表 4.5 コリメータースキャンデータ取得条件

データ取得期間	2018/2/25 11:12 - 2018/2/25 16:31
1file のイベント数	400
取得ファイル数	220(1 点につき)
線源	$^{60}\text{Co}$
ドリフト電場	200V/cm
取り出し電場	4.5kV/cm
PMT ゲイン	約 50FADCcounts/p.e.
Time Window	$[-10,130]\mu\text{s}$
トリガー条件	全 PMT 任意の 4ch の Coincidence

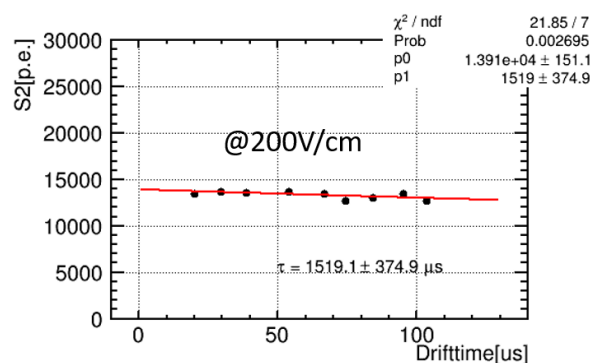


図 4.39  $^{60}\text{Co}$  による  $\text{O}_2$  及び  $\text{H}_2\text{O}$  不純物濃度測定

#### 4.6.5 重心法による位置再構成

先述したように、上側 PMT で観測される S2 光量は PMT のチャンネル依存性が大きく、光量比から位置再構成を行うことができると考えられる。位置再構成で最も簡単な方法は、式 (4.3) のように、光量重心をとることであり、今回はまず、上側 PMT で観測された S2 で光量重心とる方法を採用した。

$$\hat{x} = \frac{\sum_i X_i A_i f_i}{\sum_i A_i f_i}, \hat{y} = \frac{\sum_i Y_i A_i f_i}{\sum_i A_i f_i} \quad (4.3)$$

ここで、 $(X_i, Y_i)$  はチャンネル  $i$  の PMT の中心座標、 $A_i$  はチャンネル  $i$  の PMT で測定された電荷量、 $f_i$  はゲインや Q.E. を考慮した補正係数である。今回はチャンネル  $i$  の PMT にける検出光量を  $A_i f_i$  としている。

図 4.50 は、約 100 万イベントの BG データに対し、光量重心をとったものである。BG データの取得条件は表 4.6 に示す。図 4.50 の xy 座標は検出器径で規格化されており、図中の大きな円は検出器の内径を表している。一方、小さな円は PMT の有感径を表しており、中心が PMTch1、右上が PMTch2、そこから時計回りに PMTch3,4,5,6,7 となっている。光量重心には、PMT の中心座標を使用しているため、イベントの分布は外側の PMT の中心を頂点とした六角形になっている。六角形の頂点のイベントは、その PMT のみで光子が検出されたイベントで、六角形の辺上のイベントは、外側の隣り合う二つの PMT のみで光子が検出されたイベントである。これらは、光量の小さなイベントであり、光量が大きくなると、例えば、検出器壁際で発生したイベントも発光位置に最も近い PMT だけでなく、中心や原点に関して反対側の PMT においても多くの光子が検出され、六角形が中心に寄るような形になる。ただし、発光位置が各 PMT に近いほど、その PMT の検出光量が、上側 PMT 検出した S2 全光量に占める割合が多くなるため、光量重心の分布は、頂点が外側 PMT の中心に向いたヒトデのような形になる。

表 4.6 BG データ取得条件

run	256, 260, 261, 263, 264, 266
データ取得期間	2018/3/1 0:33 - 2018/3/1 9:38
1file のイベント数	400
取得ファイル数	908(run256),339(run260),923(run261), 67(run263), 235(run264), 1201(run266)
解析ファイル数	400(run256),339(run260),923(run261), 67(run263), 235(run264), 750(run266)
解析総イベント数	1085600
線源	なし
ドリフト電場	1 kV/cm
取り出し電場	6 kV/cm
PMT ゲイン	約 50FADCcounts/p.e.
Time Window	[-10,90] $\mu$ s
トリガー閾値	1p.e. 以下
トリガー条件	上下 PMT 任意の 2ch の Coincidence

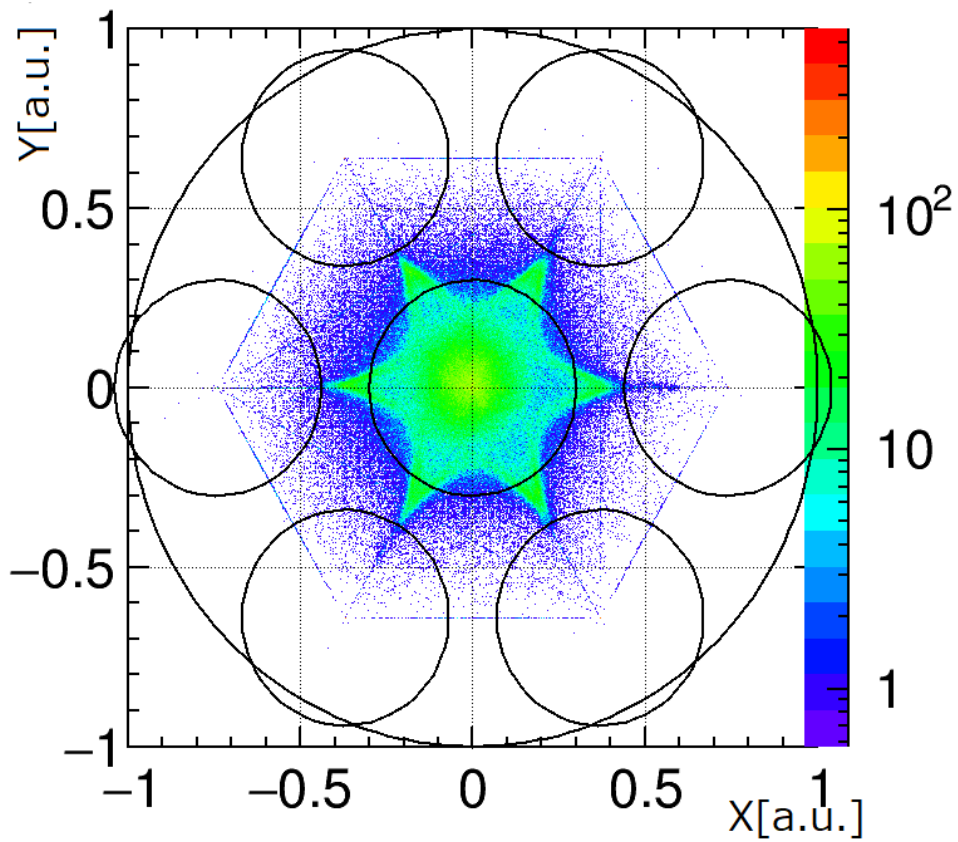


図 4.40 上側 PMT で観測された光量重心

#### 4.6.6 $^{60}\text{Co}$ による $xy$ スキャン

上側 PMT で観測された S2 の光量重心と発光位置の相関を検証するために、コリメートされた  $^{60}\text{Co}$  を水平 4 方向から、検出器に照射した。 $^{60}\text{Co}$  は、すべて検出器  $z$  方向に関して中心あたりに照射した。水平 4 方向からの  $^{60}\text{Co}$  照射の一連のデータ取得は表 4.7 の条件で行った。図 4.43 は、それぞれ水平 4 方向から  $^{60}\text{Co}$  を照射した時の、上側 PMT で観測された S2 の光量重心である。図中の矢印の方向が、 $^{60}\text{Co}$  の入射方向である。図のように、 $^{60}\text{Co}$  の入射方向に光量重心のイベントの偏りがみられ、光量重心と発光位置におおよそ相関があることを確認した。

表 4.7  $^{60}\text{Co}$  を 4 方向から照射した際のデータ取得条件

run	150, 163, 164, 165
データ取得期間	2018/2/25 11:12 - 2018/2/25 11:42
1file のイベント数	400
取得ファイル数	220(1 点につき)
線源	$^{60}\text{Co}$
ドリフト電場	200V/cm
取り出し電場	4.5kV/cm
PMT ゲイン	約 50FADCcounts/p.e.
Time Window	$[-10,130]\mu\text{s}$
トリガー条件	全 PMT 任意の 4ch の Coincidence

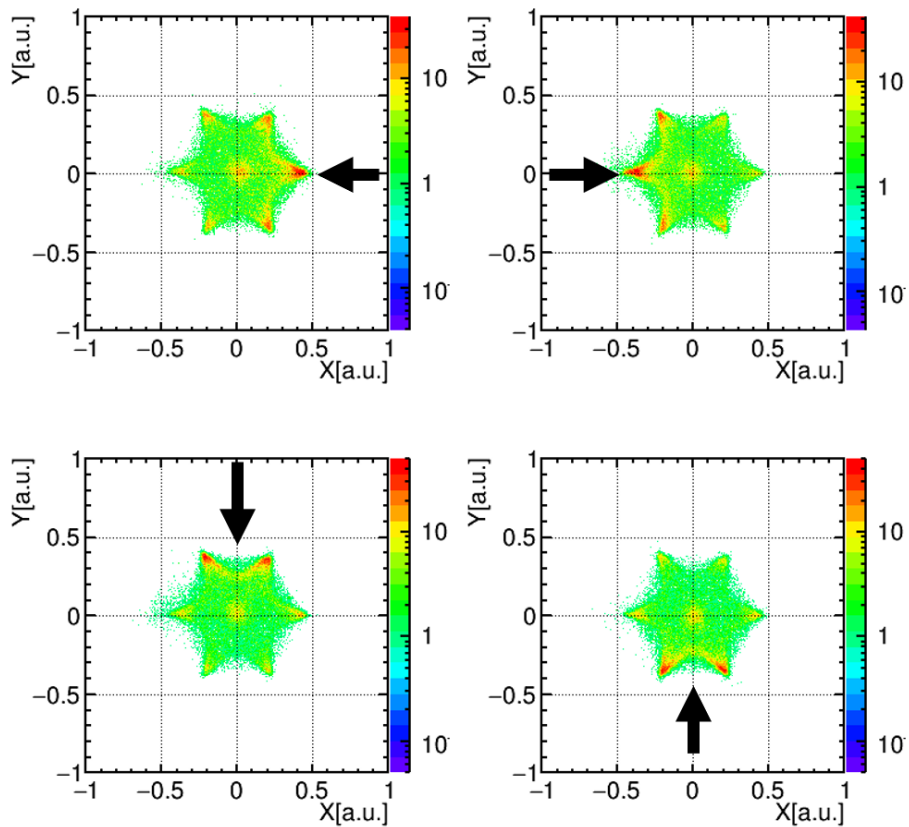


図 4.41  $^{60}\text{Co}$  入射方向と上側 PMT で観測された S2 光量重心

#### 4.6.7 重心法による位置再構成の評価

上側 PMT で観測された S2 光量重心による位置再構成を評価するために、Bi-Po 事象を用いた。図 4.42 の  $^{238}\text{U}$  の崩壊系列に示すように、Bi-Po 事象の  $^{214}\text{Bi}$  は  $\beta$  崩壊、 $^{214}\text{Po}$  は  $\alpha$  崩壊を起こすが、 $^{214}\text{Po}$  の半減期が  $164\mu\text{s}$  と短いため、両者の崩壊は連続的に起こる。そのため、 $^{214}\text{Bi}$  と  $^{214}\text{Po}$  は同じ位置で発光し、位置再構成において有用な情報となる。そのため、Bi-P 事象は位置再構成においてよく利用され、DarkSide では  $^{214}\text{Bi}$  と  $^{214}\text{Po}$  の位置再構成を行った後、両者の距離から検出器の位置分解能を評価している [23]。

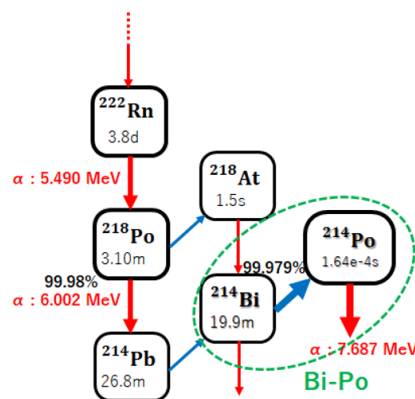


図 4.42  $^{238}\text{U}$  の崩壊系列

図 4.43 に  $^{214}\text{Bi}$  と  $^{214}\text{Po}$  が連続的に崩壊した事象の波形例を示す。図 4.43 の run255 は、ドリフト電場  $1\text{kV}/\text{cm}$  のデータである。時刻 0 の小さな信号が  $^{214}\text{Bi}$  の S1 信号、時刻  $50\mu\text{s}$  の信号が  $^{214}\text{Bi}$  の S2 信号、時刻  $90\mu\text{s}$  の大きな信号が  $^{214}\text{Po}$  の S1 信号、時刻  $140\mu\text{s}$  の信号が  $^{214}\text{Po}$  の S2 信号である。波形から  $^{214}\text{Bi}$  の崩壊後、 $90\mu\text{s}$  後に  $^{214}\text{Po}$  が崩壊していることがわかる。また、両者のドリフト時間は共に  $50\mu\text{s}$  であり、ともに S2 信号のチャンネル依存 (ch4 における S2 信号が両者とも大きい) に同じ傾向がみられており、同じ位置で発光していることと矛盾がないことがわかる。さらに、ドリフト電場  $1\text{kV}/\text{cm}$  におけるドリフト速度は  $2\text{mm}/\mu\text{s}$  である。つまり、 $50\mu\text{s}$  はフルドリフト時間であり、 $^{214}\text{Bi}$  と  $^{214}\text{Po}$  は正に帯電するため、検出器カソードに張り付いていると考えられる。

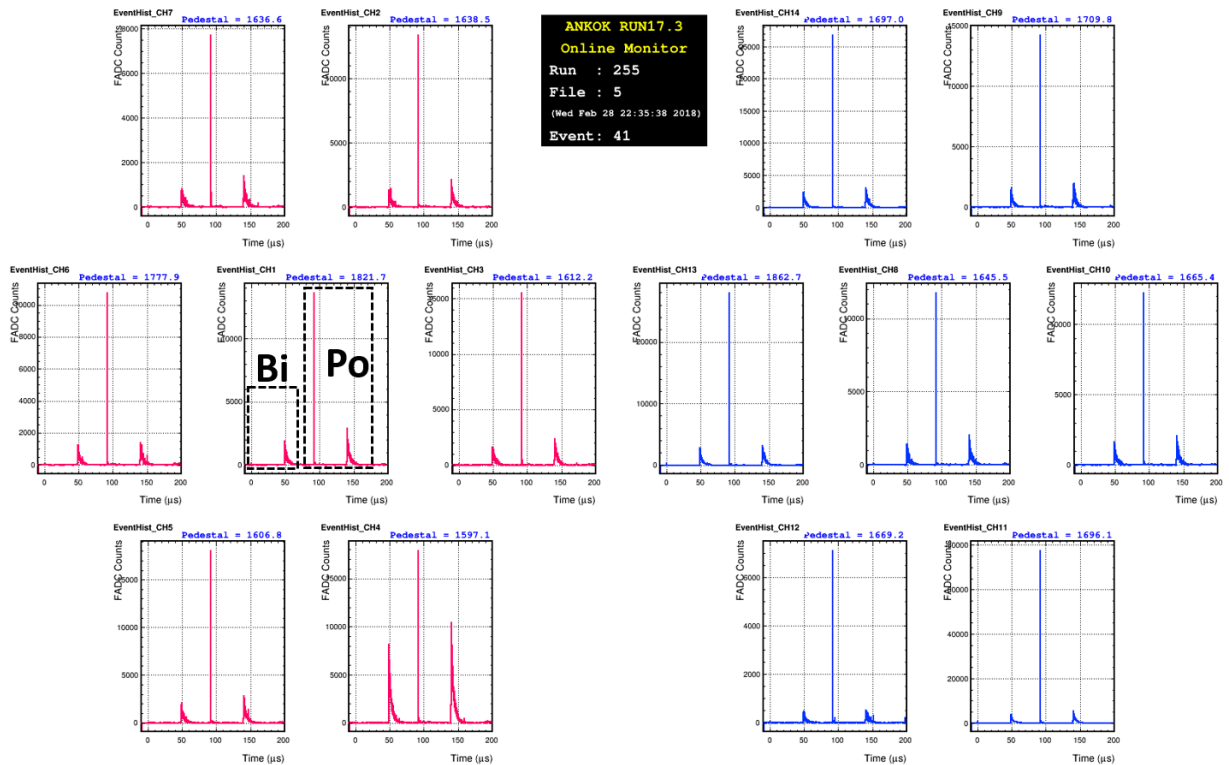


図 4.43 Bi-Po 事象取得波形例

位置再構成法の評価のための、Bo-Po 事象解析には、表 4.6 に示したデータを使用した。解析では以下のイベントセレクションを行った。

### PSDCut

図 4.44 は、横軸 S1 光量、縦軸 Slow/Total(SPT) をとったものである。SPT=0.65 付近のバンドは ER 事象で、SPT=0.25 付近のバンドは NR 事象である。PSD Cut では、効率良く Bi-Po 事象を抽出するために、まず  $\beta$  線事象より事象数の少ない  $\alpha$  線事象の抽出を行った。0.2 < SPT < 0.3 を要求することで、 $\alpha$  線 like の事象を抽出した。さらに、 $\alpha$  線 like の事象の前の事象に 0.55 < SPT < 0.75 を要求することで、 $\alpha$  線の前に、 $\beta$  線があるような事象を抽出した。



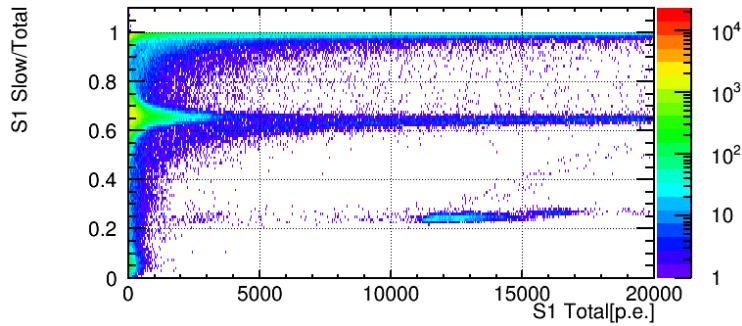


図 4.44 PSD プロット

### Delayed Coincidence(遅延同時計測法)

$^{214}\text{Bi}$  と  $^{214}\text{Po}$  は連続的に崩壊するため、Bi-Po 事象とその他の事象を効率良く区別するためには、 $\beta$  線と  $\alpha$  線のトリガー時間の差が短い事象をセレクションすればよい (Delayed Coincidence)。ここでは、両者の時間差  $< 1\text{ms}$  を要求した。図 4.45 は、それぞれのセレクション後の S1 光量分布で、最初のセレクション後では 3 つのピークが見られる。これは、左から、 $^{222}\text{Rn}$ (5.5MeV)、 $^{218}\text{Po}$ (6.0MeV)、 $^{214}\text{Po}$ (7.7MeV) である。Delayed Coincidence から、 $^{214}\text{Po}$  のみが抽出できていることがわかる。さらに、図 4.45 のように、 $^{214}\text{Po}$  に対してガウシアンでフィットし、 $2\sigma$  以内の事象を選択した。

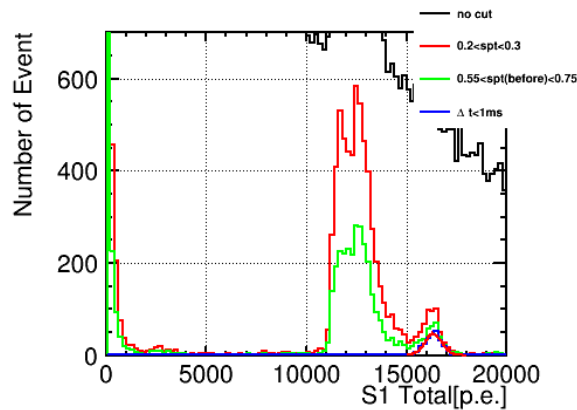


図 4.45 S1 光量分布

### Drift Time Cut

$^{214}\text{Bi}$  と  $^{214}\text{Po}$  が同じ位置で崩壊していることを保証するために、両者の崩壊が検出器ドリフト方向に関して同じ位置で起きている事象を抽出する。図 4.46 は、Delayed Coincidence 要求後の、Bi-Po のドリフト時間差の分布である。分布からわかるように、ほとんどのイベントが  $\Delta t < 1\mu\text{s}$  である。ここでは、ドリフト時間の差  $\Delta t < 1\mu\text{s}$  を要求した。ただし、Bi-Po のドリフト時間  $dt$  は式 (4.4) のように重心をとっている。

$$dt = \frac{\sum_i Dt_i A_i f_i}{\sum_i A_i f_i} \quad (4.4)$$

ただし、 $Dt_i$  はチャンネル  $i$  の PMT の波形から算出されるドリフト時間である。

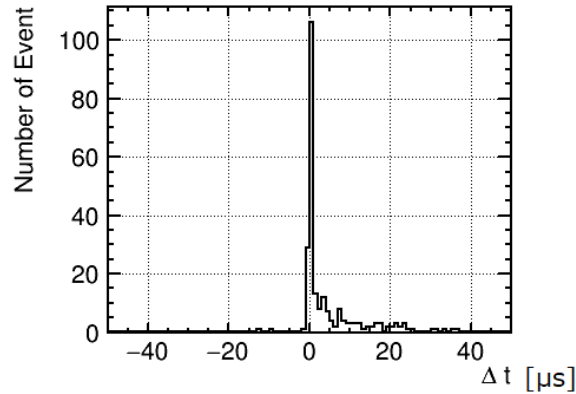


図 4.46 ドリフト時間差分布

以上のイベントセレクションを経て、135 イベントの Bi-Po 事象を抽出した。抽出した Bi-Po 事象について、上側 PMT で S2 光量重心をとったものが図 4.48 である。一方、図 4.47 は縦軸を  $y$  軸、横軸をドリフト時間としている。十字は先発信号である  $^{214}\text{Bi}$  の  $\beta$  線、丸は後発信号である  $^{214}\text{Po}$  の  $\alpha$  線で、同色が 1 セットの Bi-Po である。なお、図 4.48 において、左上に外れている  $^{214}\text{Bi}$  のイベントは、光量が少ないために、 $^{214}\text{Po}$  と同じ位置に光量重心が取れていないイベントである。先述のように、図 4.42 崩壊図において、 $^{218}\text{Po}$  以降は正に帯電するため、検出器のカソードに集まると考えられる。図 3.11 より、ドリフト電場  $1\text{kV}/\text{cm}$  の時のドリフト速度は  $2\text{mm}/\mu\text{s}$  であり、 $10\text{cm}$  のフルドリフト時間は  $50\mu\text{s}$  である。図 4.47 のように、ほとんどの Bi-Po 事象がフルドリフト時間  $50\mu\text{s}$  に集中していることがわかる。

図 4.49 は、図 4.48 の平面上における Bi-Po 事象の両者の距離の分布を示したものである。黒のヒストグラムは 1 セットの  $^{214}\text{Bi}$  と  $^{214}\text{Po}$  の距離をとったものであり、赤のヒストグラムは両者の位置に相関がない、異なるセットの  $^{214}\text{Bi}$  と  $^{214}\text{Po}$  の距離をとったものである。分布から、異なるセットの  $^{214}\text{Bi}$  と  $^{214}\text{Po}$  は、光量重心により異なる位置に再構成されているのに対し、1 セットの  $^{214}\text{Bi}$  と  $^{214}\text{Po}$  は、光量重心により同じ位置に再構成されていることがわかる。

また、図 4.50 と図 4.51 はそれぞれ、図 4.48 の平面上における  $^{214}\text{Bi}$  と  $^{214}\text{Po}$  の方位角の差、 $^{214}\text{Bi}$  と  $^{214}\text{Po}$  の中心からの距離の差である。黒と赤のヒストグラムは図 4.49 と同様に、それぞれ、1 セットの  $^{214}\text{Bi}$  と  $^{214}\text{Po}$  のと、異なるセットの  $^{214}\text{Bi}$  と  $^{214}\text{Po}$  の組み合わせである。図 4.50 と図 4.51 においても、図 4.49 と同様に、異なるセットの  $^{214}\text{Bi}$  と  $^{214}\text{Po}$  は、光量重心により異なる位置に再構成されているのに対し、1 セットの  $^{214}\text{Bi}$  と  $^{214}\text{Po}$  は、光量重心により同じ位置に再構成されていることがわかる。以上のことから、上側 PMT で観測された S2 光量重心と発光位置には、明らかに相関があることが確認できた。ただし、両者の相関関係がどのようなものであるかは今後、光学シミュレーションによって理解する必要がある。

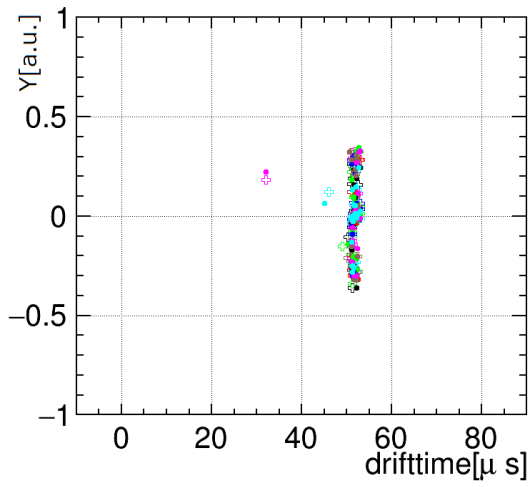


図 4.47 Bi-Po 事象のドリフト時間分布

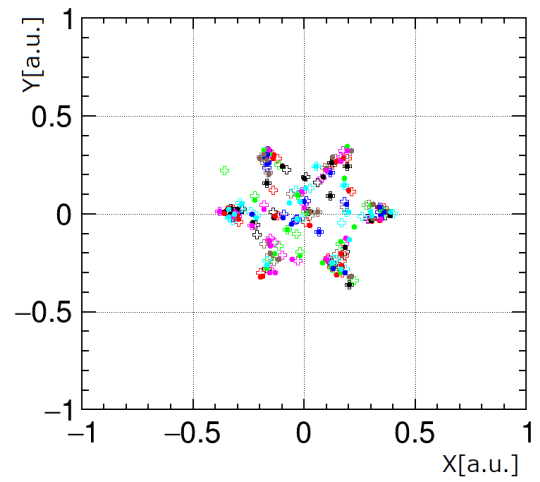


図 4.48 Bi-Po 事象の S2 光量重心

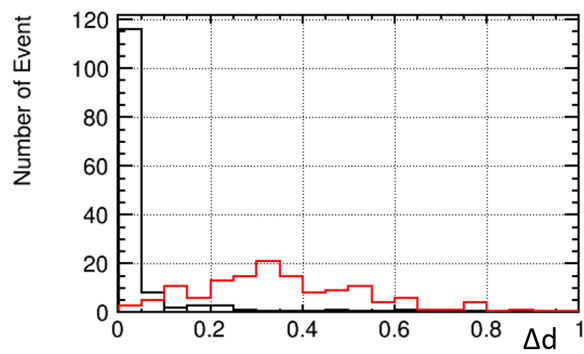


図 4.49  $^{214}\text{Bi}$  と  $^{214}\text{Po}$  の距離の分布

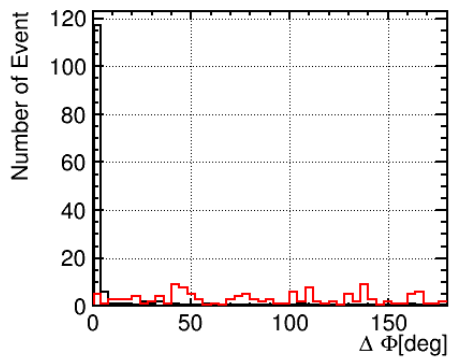


図 4.50  $^{214}\text{Bi}$  と  $^{214}\text{Po}$  の方位角の差の分布

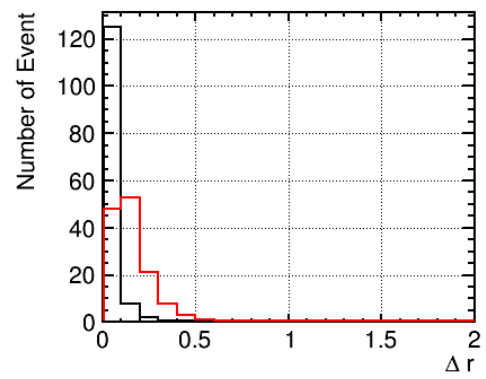


図 4.51  $^{214}\text{Bi}$  と  $^{214}\text{Po}$  の中心からの距離の差の分布

## 5 まとめと今後の展望

本研究では、PMT 上下 7 本、質量 5.3kg の検出器を設計・製作した。これにより、壁際背景事象の分離が可能になり、100kgd を約 20 日間で達成することができるようになった。設計では、まず質量、PMT の有感面、電場印可を考慮して、検出器の大きさを決めた。電場設計では、小型プロトタイプ検出器の設計を踏襲し、有限要素法による電場計算で、一様な電場が形成できることを確認した。また、構造設計では、PTFE が液体アルゴン温度で約 2% 収縮することを考慮した。

また、基礎性能や位置再構成法の評価のために液体アルゴン試験を行った。液体アルゴン試験では、検出器が約 10 日間安定して運用できることを確認した。そして、14ch 全ての PMT において S1,S2 信号が取得できていることを確認した。その他試験では、検出光量、電場印可、アルゴン純度等の基礎特性の評価もおこない、電場印可やアルゴン純度に関しては問題がみられなかった。ただし、電場の一様性については、今後評価していく必要がある。一方、検出光量では、 $^{137}\text{Cs}$  を使用して測定を行い、約 3p.e./keVee という結果が得られた。これは、設計において期待された約 7p.e./keVee より小さい。原因としては、大型の ITO 石英に TPB を蒸着するため拡張した、真空蒸着容器において、蒸着方法の再最適化がされておらず、波長変換が不十分であったためであると考えられる。そのため、今後、蒸着方法の最適化を進めていく必要がある。

試験ではさらに、位置再構成法の評価を行った。位置再構成には、上側 PMT で観測された S2 の光量重心をとる簡単な方法を採用した。この位置再構成手法を検証するために、コリメートされた  $^{60}\text{Co}$  を検出器水平 4 方向から照射したところ、入射方向にイベントが偏る傾向がみられた。より詳細な評価には、Bi-Po 事象を用いた。遅延同時計測法やドリフト時間差等のイベントセレクションにより、Bi-Po 事象を抽出し、それぞれに対し S2 光量重心をとった。両者の光量重心の差の分布から、発光位置と光量重心に相関があることを確認した。ただし、発光位置再構成には、光学シミュレーションを利用して、発光位置と光量重心等との相関関係の理解を進める必要がある。図 5.1 は、光学シミュレーションにおいて S2 を発生させ、上側 PMT で光量重心をとったものである。一方、図 5.2 はその S2 の発光位置である。このように、現在、光学シミュレーションはある程度まで構築できており、ITO 石英の TPB 蒸着面における反射等の光学パラメーターをチューニングできれば、光学シミュレーションを利用した位置再構成を行うことができる。そのため、今後はまず、Run17.3 で取得したデータで光学パラメーターのチューニングを行う。そして、光学シミュレーションを利用した位置再構成により、壁際背景事象を確実に分離し、有効質量をできるだけ損なわないような最適な Fiducial Cut を進めていく。

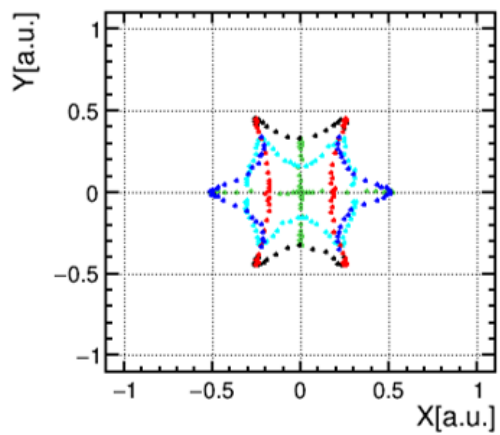


図 5.1 上側 PMT の S2 光量重心 (Simulation)

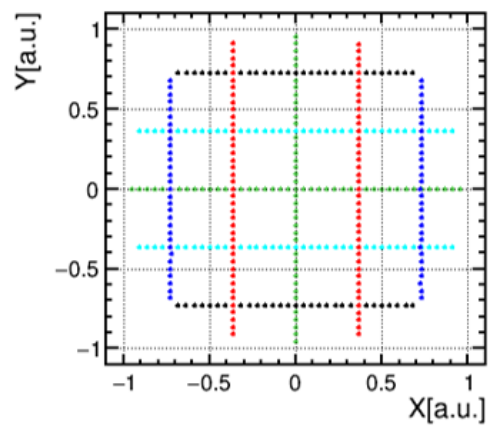


図 5.2 S2 発光位置 (Simulation)

## 6 謝辞

本研究を行うにあたって、まず、寄田浩平教授に感謝致します。寄田先生には、ANKOK 実験という、素粒子物理学の最先端で思いっきり研究する環境を与えて頂き、研究に没頭することができました。また、田中雅士准教授にも感謝致します。田中さんは、自分の研究をいつも気にかけてくださり、ミーティングの場に限らず、気軽に相談に乗って頂き、沢山のアドバイスを頂きました。また、お二方には、時には厳しく指導して頂き、研究姿勢や安全に対する高い意識を身に付けることができたと思っています。さらに、何度も飲みに来て行ってくくださり、そこでは研究に限らず、様々なことに相談に乗って頂き、また、多くのことを学ばせて頂きました。

招聘研究員である蛭名幸二さんは、いつも気さくに話しかけてくださり、研究室に和やかな雰囲気を作って頂きました。また、PC に弱い自分が困ったときは、いつも助けてくださいました。秘書である坂本敦子さんは、物品を購入することが多かった自分を、いつもサポートして頂きました。

また、ここまで共に頑張ってきた ANKOK 実験のメンバーや研究室同期にも感謝致します。助手である鷺見貴生さんには、検出器の設計・製作を行うにあたって、検出器のいろはを教えてくださいました。博士2年の木村真人先輩は、自分のどんな質問でも、真摯に答えてくださり、また、人としても大変尊敬できる先輩でした。また、卒業した中新平先輩、鈴木優飛先輩にはバルバーの技術と魂を伝授して頂き、卒業後も飲みに来て行ってくださいました。同期である菊地崇矩君、竹村祐輝君は、益田匠君、粉山慶輔君は、3年間苦楽を共にし、つらい時には飲みに行く貴重な仲間であり、心の支えになっていました。また、後輩である青山一天君、武田知将君、平良文香さんは非常に優秀で、Run 準備から運用まで大いに力を発揮してくれました。さらに、4,5ヶ月という短期間で PMT 上下7本、質量 5.3kg の検出器を作製することができたのは、寄田先生、田中さん、ANKOK 実験メンバーの強力なサポートや同期の心の支えの他に、無理なお願いを聞いて下さった沢山の企業の方々の協力があったおかげであり、大変感謝しております。

そして最後に、大学及び大学院の6年間半、遠方でずっと応援してくれた両親に感謝の意を表して謝辞と致します。

## 参考文献

- [1] K.G.Begeman *et al*, “Mon. Not. R. astr. Soc”. 249 (1991) 523-537
- [2] Planck Collaboration, “Planck 2015 results. I. Overview of products and scientific results”, A&A (2016), [DOI:10.1051/0004-6361/201527101]
- [3] NASA/CXC/CfA/M.Markevitch *et al*, <http://chandra.harvard.edu/photo/2006/1e0657/>.
- [4] G. Jungman, M. Kamionkowski, and K. Griest, “Supersymmetric dark matter”, Phys. Rept., vol. 267, pp. 195-373, 1996, hep-ph/9506380.
- [5] P.Cushman *et al.*, “Snowmass CF1 Summary: WIMP Dark Matter Direct Detection”, arXiv:1310.8327 (2013).
- [6] 田中雅士, “ANKOK 実験 19 : 質量 30kg 検出器の構築状況と今後の展望”, 日本物理学会第 72 回年次大会, 20pk24-6
- [7] E. Aprile *et al.*, “Noble Gas Detectors ”(2006).
- [8] 中新平, “ANKOK 地上実験テストスタンドの構築及び環境  $\gamma$  線の低減”, 修士論文 (2016 年度, 早稲田大学)
- [9] 鷺見貴生, “ANKOK 実験における大光量 2 相型プロトタイプ検出器の開発と性能評価”, 修士論文 (2014 年度, 早稲田大学)
- [10] R.Acciarri *et al.*, “Oxygen contamination in liquid Argon: combined effects on ionization electron charge and scintillation light”, JINST 5 (2010), [DOI:10.1088/1748-0221/5/05/P05003]
- [11] R.Acciarri *et al.*, “Effects of Nitrogen contamination in liquid Argon”, JINST 5 (2010), [DOI:10.1088/1748-0221/5/06/P06003]
- [12] radiopurity.org, <https://www.radiopurity.org/>
- [13] 木村真人, “電子反跳事象分離能力の理解”, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 15pTT-6
- [14] 小瀬樹, “Likelihood 法による Ar 蛍光の波形解析”, 卒業論文 (2015 年度, 早稲田大学)
- [15] 武田知将, “ANKOK 実験における 2 次蛍光量の検出器内環境依存性”, 卒業論文 (2017 年度, 早稲田大学)
- [16] 加地俊瑛, “気液 2 相型アルゴン光検出器の蛍光 (S1 · S2) 基礎特性”, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 21aSJ-2
- [17] Matthew Szydagis, “NEST: Noble Element Simulation Technique”, UCLA DM(2014)
- [18] Carl Eric Dahl, “The physics of background discrimination in liquid xenon, and first results from Xenon10 in the hunt for WIMP dark matter”, Ph.D. thesis(2009, Princeton University)
- [19] J. Thomas and D. A. Imel, “Recombination of electron-ion pair in liquid argon and liquid xenon”, Phys. Rev. 36, 614 (1987)
- [20] 菊地崇矩, “ANKOK 実験における高電場形成と消光因子測定”, 修士論文 (2017 年度, 早稲田

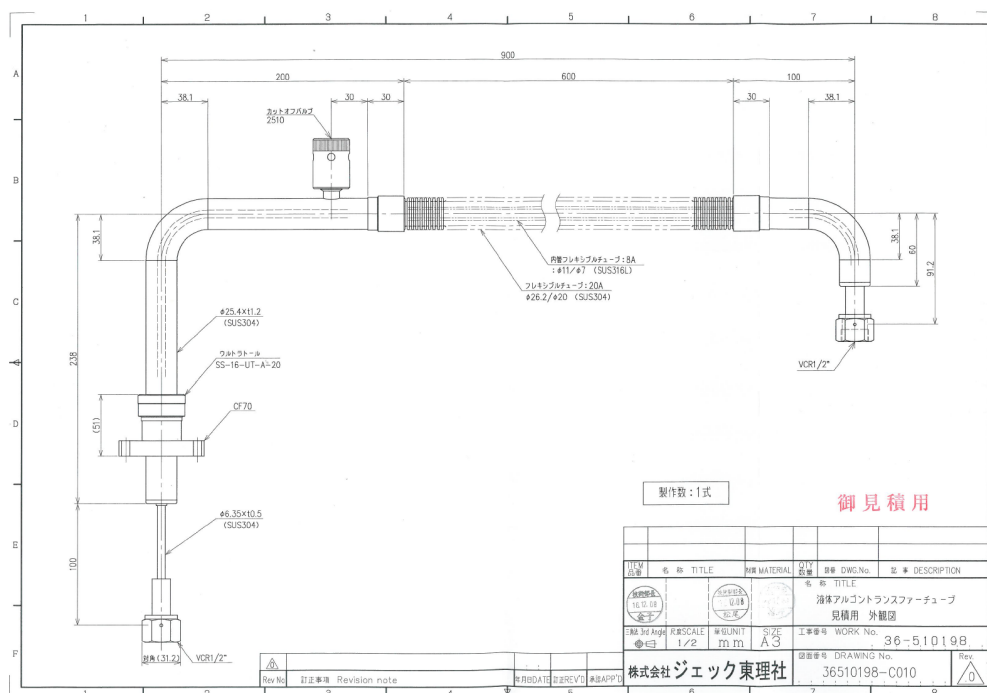
- 大学)
- [21] 木村真人, “2 相型 Ar 光検出器の電場最適化と電子比例蛍光発生機構の研究”, 卒業論文 (2014 年度, 早稲田大学)
  - [22] M. Berger, J. Coursey, M. Zucker, and J. Chang. ESTAR, PSTAR, and ASTAR: Computer Programs for Calculating Stopping-Power and Range Tables for Electrons, Protons, and Helium Ions (version 1.2.3), 2005. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
  - [23] Jason Philip Brodsky, “xy Position Reconstruction in DarkSide-50”, Ph.D. thesis(2015, Princeton University)
  - [24] 矢口徹磨, “ANKOK 実験 10: 発光位置同定手法の構築と検証”, 日本物理学会第 71 回年次大会, 21aAA-6
  - [25] 浜松ホトニクス株式会社, R11065 DataSheet
  - [26] 鷺見貴生, “DM 探索 液体アルゴン技術開発”, アクティブ媒質 TPC 開発座談会 (2017)
  - [27] 青山一天, “ANKOK 本実験に向けた LAr 蛍光の直接及び間接検出手法の研究”, 卒業論文 (2017 年度, 早稲田大学)
  - [28] Chris Stanford et al., “Surface background suppression in liquid argon dark matter detectors using a newly discovered time component of tetraphenyl-butadiene scintillation”, arXiv:1804.06895 (2018).
  - [29] LUX collaboration., “Position Reconstruction in LUX”, arXiv:1710.02752 (2018).
  - [30] 高橋智栄, “ANKOK 実験における液体アルゴン充填環境改善に向けた液面計の開発と性能評価”, 卒業論文 (2016 年度, 早稲田大学)
  - [31] V.N. Solovov et al., “Position Reconstruction in a Dual Phase Xenon Scintillation Detector”, arXiv:1112.1481 (2012).



# 付録 A

## A.1 真空断熱配管

ANKOK 実験では、低温の液体アルゴンを保持するために、冷凍能力 200W@77K の冷凍機によって系を冷却している。つまり、液体アルゴンを安定運用するためには、系全体の熱流入は冷凍機の冷凍能力 200W@77K 以下に抑える必要がある。そこで、図 2.8 に示すように、ANKOK 実験配管系では、液化器で液化されたアルゴンを 200L 容器に輸送するラインに真空断熱配管を用意している。図 付録 A.1 と図 付録 A.2 は作製した真空断熱配管の図面と写真である。2 重管部分にウルトラトールが付いており、図 2.8 にあるように 2 重管部分を液化器内まで通すことによって、液化器と真空断熱配管の接続部分で熱流入を抑える構造になるように設計した。真空断熱配管の導入により、数 W 程度であった余剰熱流入を 20-60W 程度に改善することができた。また、液化器と 200L 容器の間に余裕を作ることができ、シールドを設置することが可能になった。ただし、真空断熱配管の性能は、真空部分の真空度が悪くなると低下するため、定期的にオペレーターバルブを使って、カットオフバルブから再真空引きする必要がある。



図付録 A.1 真空断熱配管図面 (ジェック東理社)



図付録 A.2 真空断熱配管写真 (ジェック東理社)

学籍番号: 5316A101-3

## 研究活動の不正行為 定義確認書

2018年6月25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

物理学及応用物理学 専攻 2年

本人氏名 矢口 徹磨

(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。