

修士論文

ANKOK 地上実験テストスタンドの構築
及び環境 γ 線の低減

2017 年 2 月 8 日

早稲田大学 先進理工学研究科
物理学及応用物理学専攻 素粒子実験研究
寄田浩平研究室

中新平

概要

暗黒物質は幾つかの天文学的な観測事実からその存在は予想されているが未だ発見には至っておらず、世界中で探索実験が行われている。ANKOK 実験は気液 2 相型 Ar 光検出器を用いた暗黒物質直接探索実験である。主に $10\text{GeV}/c^2$ 付近の領域の探索を目的としており、2012 年からは検出光量の最大化、電子反跳・原子核反跳事象の分離能力の評価を当面の目的として小型プロトタイプ検出器の用いた R & D を開始した。

本論文では主に以下の 2 項目に関して報告する。

- 新テストスタンドの構築・運用実験 (第 4 章)

2015 年には基礎開発に一定の目処が立ち、大型検出器を用いた地上実験、更には地下における探索実験のために実験設備・環境 (テストスタンド) の拡大・増強を行ってきた。本論文ではテストスタンドを構成する各要素の設計・製作やその試験結果に関して述べ、大型検出器を運用するに当たり十分な性能を持つテストスタンドを構築したことを示す。

- シールドの構築による環境 γ 線の低減と ^{39}Ar の観測 (第 5 章)

Ar 中に含まれる放射線同位体である ^{39}Ar ($1\text{Bq}/\text{kg}$ の β 崩壊) は暗黒物質探索の背景事象となるため、その定量的評価と理解は非常に重要な研究課題である。しかし環境 γ 線の信号量は地上と地下で変わらず、 ^{39}Ar と比べて 100 倍近くある。そのためシールド等によって環境 γ 線を低減しなくては ^{39}Ar は観測出来ない。本論文では ^{39}Ar の観測を目的にシールドの設計・構築を行い、実験データとシミュレーションの比較により ^{39}Ar 信号を初観測したことに関して論ずる。

目次

第 1 章	はじめに	1
1.1	暗黒物質とは	1
1.2	暗黒物質の候補	3
1.3	暗黒物質探索の現状	4
1.4	ANKOK 実験	5
第 2 章	ANKOK 実験の概要	10
2.1	実験機器構成	10
2.2	検出器運用	14
第 3 章	研究の流れ	17
3.1	新テストスタンドの構築・運用実験の流れ	17
3.2	シールドの構築による環境 γ 線の低減と ^{39}Ar の観測の流れ	18
第 4 章	新テストスタンドの構築・運用実験	19
4.1	200L 真空断熱容器の製作	19
4.2	トップフランジ制作	21
4.3	トップフランジ架台制作	21
4.4	200L 容器の運用試験 (RunVIII)	22
4.5	Ar 循環システムの構築	23
4.6	新テストスタンドの運用実験・評価 (RunIX)	25
4.7	液化機の製作	30
4.8	実験室の移転	34
4.9	液化機を導入した新テストスタンドの運用実験・評価 (RunX)	35
第 5 章	シールドの構築による環境 γ 線の低減と ^{39}Ar の観測	39
5.1	ANKOK 実験における背景事象とそれに対する取り組み	39
5.2	シールド設置の意義	40
5.3	シールド構築	42
5.4	シールド効果の評価	45
5.5	環境 γ 線スケール値に関する考察	51
5.6	^{39}Ar の見積もり $\sim 1.3\text{Bq/kg}$ (仮) の検証・考察	53
5.7	まとめ	55
第 6 章	まとめと今後の展望	56
6.1	本研究により達成された事項	56
6.2	地上における探索感度評価実験に向けた課題	56

6.3	地下における探索実験に向けた課題	56
付録 A	低温用ウェブカメラの製作	A.1
付録 B	図面	B.2
B.1	200L 容器図面	B.2
B.2	トップフランジ図面	B.3
B.3	トップフランジ架台図面	B.4
付録 C	配管図	C.5
C.1	RunVIII 配管図	C.5
C.2	RunIX 配管図	C.5
C.3	RunX 配管図	C.6

図目次

1.1	宇宙の物質の存在比	1
1.2	渦巻銀河の回転曲線 [1]	2
1.3	暗黒物質探索の現状 [2]	4
1.4	気液 2 相型 Ar 光検出器	6
1.5	電子反跳事象と原子核反跳事象	6
1.6	電子反跳と原子核反跳による S1 波形の違い	7
1.7	酸素の混入の影響 [3]	8
1.8	窒素の混入の影響 [4]	8
1.9	WIMP による反跳エネルギー分布	9
1.10	ANKOK 実験の目標物理感度	9
2.1	ANKOK 実験テストスタンド概念図	10
2.2	液体フィルター概念図	11
2.3	窒素フィルター加熱時の安定性	12
2.4	冷凍機 CH-110 の出力値 [5]	13
2.5	冷凍機 CH-110 スペック表 [5]	13
2.6	右図:シフター環境の写真 (RunIX 時)。奥が DAQ シフターで手前が DCS シフター の位置となっている。左図:データロガーの出力画面の一例	16
3.1	研究の流れ	17
3.2	光検出効率の推移 [6]	18
3.3	ER 事象と NR 事象の分離能力の向上 [6]	18
4.1	200L 容器と本検出器	19
4.2	内槽容器側面を円筒に見立てた図	20
4.3	液面高さ と 熱流入 の 関係	20
4.4	W チェンバーの再現図	22
4.5	W チェンバーと 200L 容器を組み合わせた図	22
4.6	トップフランジ架台	23
4.7	200L 容器とリフター	23
4.8	RunVIII スロープロット	24
4.9	液体アルゴン蒸発時の液面の減り方	24
4.10	循環ラインの配管図	26
4.11	製作した循環ラインパネル	26
4.12	200L 容器と RunIX 検出器	26
4.13	RunIX 検出器断面図	26
4.14	RunIX スロープロット	27
4.15	平均波形	28
4.16	実験期間中における S1 波形 S 時定数の変化	28

4.17	^{60}Co 線源によるコリメータスキャンの概念図	29
4.18	位置による S2 光量の変化	29
4.19	ドリフトタイムと S2 光量の関係	29
4.20	液化機を導入する前の実験概念図	31
4.21	液化機を導入した実験概念図	31
4.22	液化機の概念図	31
4.23	製作した液化機の写真 (容器は開いた状態)	31
4.24	200L 容器内に液体アルゴンが入る様子	32
4.25	液化機内の様子	32
4.26	液化 Run スロープロット	33
4.27	早稲田大学西早稲田キャンパス	34
4.28	実験室サイズ比較	35
4.29	200L 容器と RunIX 検出器	36
4.30	RunX 検出器断面図	36
4.31	RunX スロープロット	37
5.1	^{39}Ar スペクトラム	40
5.2	環境 γ 線と ^{39}Ar の信号量の違い (シミュレーション)	41
5.3	RunX ジオメトリの再現 (Geant4)	42
5.4	側面 5cm 厚, 上下 5cm 厚の場合	43
5.5	側面 10cm 厚, 上下 5cm 厚の場合	43
5.6	側面への鉛ブロックの配置	43
5.7	シールド構築前	44
5.8	実装した RunX シールド	44
5.9	線源を当てるために鉛の一部を外した様子	45
5.10	上面への鉛の実装	45
5.11	クサビ鉛を側面の隙間に入れた様子	45
5.12	クサビ鉛	45
5.13	^{137}Cs 線源による全吸収ピーク (662keV)	46
5.14	PSD 分布図 (左:Cut 前。右:Cut 後)	47
5.15	Background run におけるエネルギースペクトラム	47
5.16	Drift Time の分布図	48
5.17	Drift Time Cut と検出器高さの関係	48
5.18	Drift Time Cut 後のエネルギースペクトラム	48
5.19	Drift Time と TBR の関係図 (1)	49
5.20	Drift Time と TBR の関係図 (2)	49
5.21	Top Bottom Ratio Cut 後のエネルギースペクトラム (0~2.5MeV _{ee})	50
5.22	Geant4 での RunX シールド再現	50
5.23	再現した RunX シールドの効果	50

5.24	スケール値と χ^2/ndf の関係	51
5.25	スケール前のエネルギースペクトラム	52
5.26	スケール後のエネルギースペクトラム	52
5.27	Veto Cut 前後の比較	53
5.28	新旧実験室のレート	53
5.29	クサビ鉛挿入後を円筒形に近似	54
5.30	円筒形に近似したエネルギースペクトラム	54
5.31	PSD 分布図 (左:検出器上側。右:検出器下側)	55
5.32	検出器上側	55
5.33	検出器下側	55
A.1	ケースを取り外したウェブカメラ HD-5000	A.1
B.1	200L 容器図面 1	B.2
B.2	200L 容器図面 2	B.2
B.3	トップフランジ図面 1	B.3
B.4	トップフランジ図面 2	B.3
B.5	トップフランジ架台図面 1	B.4
B.6	トップフランジ架台図面 2	B.4
C.1	RunVIII 配管図	C.5
C.2	RunIX 配管図	C.5
C.3	RunX 配管図	C.6

表目次

1.1	希ガスの性質	5
1.2	不純物の影響	8
4.1	75L 容器と 200L 容器の比較	21
4.2	75,200L 容器や W チェンバーの ICF フランジの個数	22
4.3	印加 Drift 電場と S2 検出の期待値	29

第1章 はじめに

1.1 暗黒物質とは

現在、我々の宇宙で観測できている物質は全体の5%ほどにすぎない(図1.1)。残りの95%の内の約27%が光学的には捉えることのできない暗黒物質(ダークマター)で、あとの残りは暗黒エネルギー(ダークエネルギー)である。暗黒物質は目には見ることはできないが様々な観測・研究結果からその存在が示唆されている。暗黒物質は光学的には捉えられない、すなわち電磁波を放射・吸収しないため、力学的な方法を用いてその存在や質量が測られる。

以下から暗黒物質の存在を示す観測・研究結果やその候補について述べていく [1]。

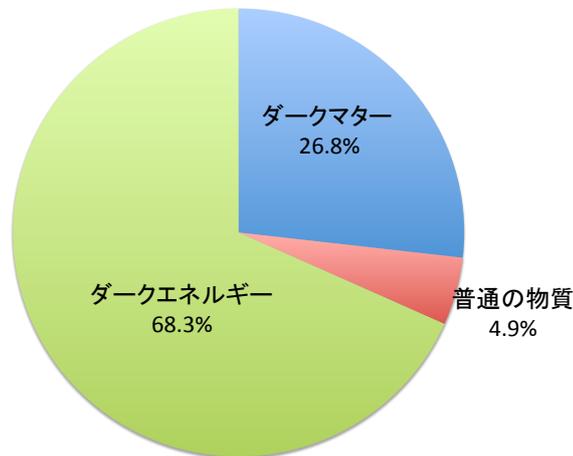


図 1.1 宇宙の物質の存在比

1.1.1 銀河に付随する暗黒物質

暗黒物質の存在の証拠として挙げられるのが渦巻銀河の回転曲線である。万有引力定数を G 、銀河の中心からの距離を r 、そこでの回転速度と半径 r 内に存在する質量をそれぞれ $V(r)$ 、 $M(r)$ とすると、ケプラーの法則により式 1.1 が表される。この式 1.2 を変形して式 1.2 が得られる。

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

$$V(r)^2 = G \frac{M(r)}{r} \quad (1.2)$$

もしも銀河の質量のほとんどが中心に集まっているとすると、距離 r が大きくなるにつれて質量の増加がなくなり回転速度が遅くなる。その回転速度は中心からの距離 r の平方根 \sqrt{r} と反比例の関係で

あるといえる。

しかし実際に銀河の回転速度を観測してみると 1.2 のような結果が与えられている。

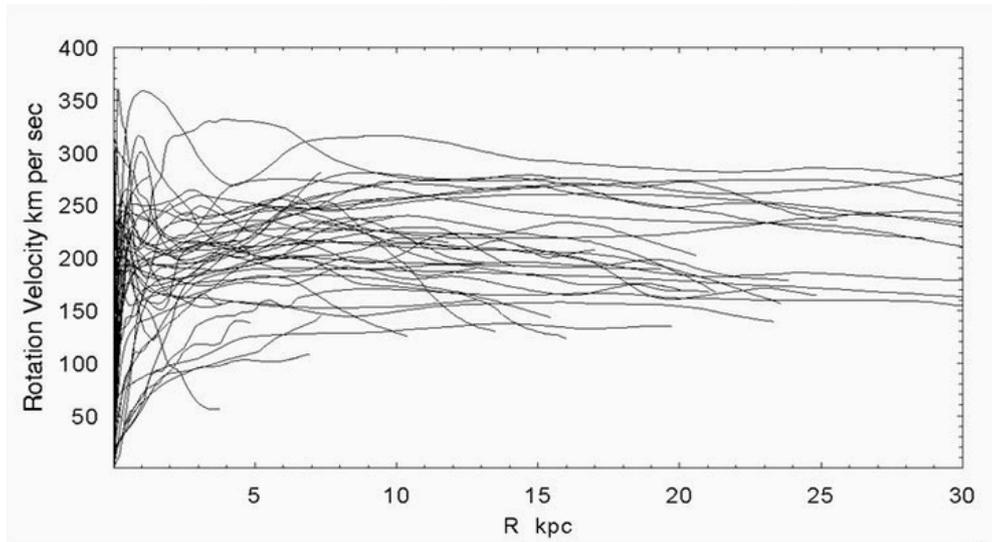


図 1.2 渦巻銀河の回転曲線 [1]

図 1.2 の横軸は銀河の中心からの距離を表しており、単位として使っている kpc は 1000pc のことであり、1pc は 1 光年を表す。また縦軸は銀河の回転速度を表している。すなわち図 1.2 は銀河の中心から離れたとしても回転速度が変わらず、そのことは銀河の中心から離れても質量が増え続けていることを示している。

また渦巻銀河の他に銀河の主要な形態として知られる楕円銀河にもダークマターの存在を示唆するものがある。楕円銀河とは渦巻銀河と違い、回転をほとんどしておらず、星々が自由に動きまわって重力との釣り合いを保っている。よって星の運動から質量を計算することができるが、観測によってそれが可能なのは銀河の中心付近のみである。しかし楕円銀河は星団以外にも $10^7 K$ ほどのガスが付随しており、X 線で輝いている。このような高温のガスを閉じ込めることができるような重力の大きさから、銀河の質量を考える事ができる。ガス密度を ρ 、圧力を p とすると式 1.3 のように表され、左辺は X 線スペクトルによって組成とガスの温度、X 線の強度からガス密度を求めることによって決定される。この方法で測られる楕円銀河の全質量は、星とガスを合わせた 5~10 倍にもなる。このことから光学的には捉えることのできない質量を持つ物体が存在していると考えられる。

$$-\frac{1}{\rho} = G \frac{M}{r^2} \quad (1.3)$$

1.1.2 銀河団に付随する暗黒物質

銀河が数百-数千集まって出来ている銀河団にも暗黒物質が付随していることが観測によって示されている。例として以下に 3 つ挙げる。

一つは楕円銀河と同様に X 線によってガス温度とガス密度を測定すると、高温ガスと銀河の質量を足しあわせたものの 6 倍近い質量が銀河団の領域内にあることになり、暗黒物質の存在を示してい

る。

二つ目は重力レンズによる測定方法で、遠方の天体が我々のところまでに届くまでの間にある重力場によって像が分離したり歪んだりする現象を利用する。地球から見て銀河団の背後にある多数の銀河団の形状に歪みによって、銀河団の質量分布を見積もると X 線による測定とほぼ一致した結果にあることが知られている。

三つ目は銀河団を運動している各銀河の速度分散を用いる方法である。これは 1993 年にツヴィッキー (F.Zwicky) によって初めて暗黒物質の存在が示唆された方法である。系の運動エネルギーを K 、全ポテンシャルエネルギーを U とし銀河団が力学的に十分緩和した状態の系であると仮定すると、 K と U の間にビリアル定理 $2K + U = 0$ が成り立つ。これにより以下の式 1.4 を得る。

$$\sigma^2 = \frac{GM_v}{\kappa R_v} \quad (1.4)$$

σ : 銀河団の重心運動に対する銀河の速度分布

M_v, R_v : ビリアル定理が成り立つ領域の総質量・半径

κ : ビリアル定理が成り立つ領域内の速度分布に依存する係数。おおよそ 2 程度の値とされる。

速度分散は銀河の分光観測によって視線成分が求められ、銀河の運動の等方性を仮定して 3 次元成分を得る。この測定方法でも光学的に観測される質量を上回る。

1.2 暗黒物質の候補

暗黒物質の性質として以下のことが条件として挙げられる。

- 電氣的に中性で光子と相互作用しない
- カラーを持たない
- 質量を持つ
- 銀河スケール (10kpc) に局在できる

これらの暗黒物質としての条件を満たすものとして、質量を持つニュートリノ、アクシオン、WIMP がある。

1.2.1 冷たい暗黒物質と熱い暗黒物質

暗黒物質は、非相対論的運動をする冷たい暗黒物質 (CDM; Cold Dark Matter) と相対論的運動をする熱い暗黒物質 (HDM; Hot Dark Matter) の 2 つに大別される。CDM にはアクシオンや超対称粒子の中で最も軽いもの (LSP; lightest supersymmetric particle)、WIMP、が当てはまり、HDM には質量を持つニュートリノが当てはまる。

これらの暗黒物質の違いは宇宙の形成に大きな変化をもたらす。HDM が宇宙の構造を形成する際には大きな構造が分裂して小さな構造ができ、CDM の場合は小さな構造が集まって大きな構造を作る。HDM については構造形成の過程が現在の宇宙観測に対して合っていないため、暗黒物質の候補としては有力ではない。

1.2.2 冷たい暗黒物質の候補

- アクシオン

強い相互作用が CP を保存することを説明するために存在が提言されている未発見の粒子。質量は非常に軽く、 10^{-5}eV のオーダーとされている。

- WIMP

物質弱い相互作用程度の大きさの相互作用をする、質量の大きな ($\sim\text{GeV}$ 程度) 素粒子の総称。超対称性粒子のうち、電氣的に中性である粒子のことをニュートラリーノと呼び、その中でもっとも質量の小さな超対称性粒子のことを LSP(lightest supersymmetric particle) と呼ぶ。現在ニュートラリーノが WIMP の最有力候補とされている。

1.3 暗黒物質探索の現状

図 1.3 は暗黒物質探索の実験の状況を示した図である。横軸が WIMP の質量、縦軸は WIMP の原子核反跳の反応断面積を表している。反応断面積が小さい方向には検出器を大きくし、統計数を増やす必要がある。また低質量領域の探索を行うためには、WIMP の落とすエネルギーが少ないのでより大光量検出可能な検出器を用いる必要がある。

図中の曲線は 90 % の信頼度で暗黒物質の存在を棄却し、曲線で囲まれている部分は各実験が WIMP の存在を各実験が主張している領域である。DAMA や CoGeNT のような低質量領域で WIMP の存在を主張する実験グループがある一方、XENON100 のようにそれらを棄却するグループがあるといった状況になっている。

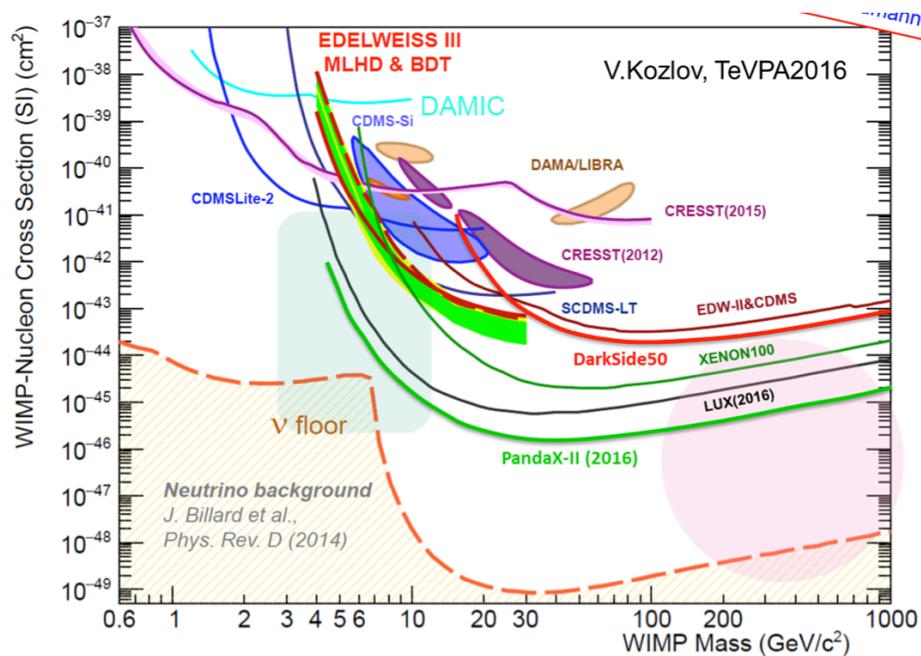


図 1.3 暗黒物質探索の現状 [2]

1.4 ANKOK 実験

液体希ガスを使った暗黒物質探索実験はいくつかあり、液体アルゴンをシンチレータとして用いる実験は DarkSide や WArP などがあり、や液体キセノンを使用する実験は X-MASS や LUX などがある。以下の表 1 にアルゴンとキセノンの諸性質を示す。

表 1.1 希ガスの性質

	LAr	LXe	単位
原子番号 Z	18	54	
原子量 A	39.95	131.3	
密度	1.39	3.10	g/cc
融点	83.8	161.4	K
沸点	87.3	119.8	K
ドリフト速度 (1kV/cm)	1.8	2.2	mm/ μ s
放射長	14.3	2.77	cm
dE/dx	2.11	3.89	MeV/cm
W 値 (ionization)	23.6	15.6	eV
W 値 (scintillation)	19.5	13.8	eV
時定数 (fast)	6.5	4.0	ns
時定数 (slow)	1600	22.0	ns
屈折率 (波長 170nm)	1.24	1.60	
比誘電率	1.53	1.95	

アルゴンやキセノンを液体シンチレータとして用いることの長所としては

- 電子は配置が閉殻であり電離電子を捕獲しにくい
- 原子番号が大きく、WIMP との反応断面積が大きい
- 発光量が 50photon/keV ほどと大きい (NaI シンチレータの発光量は 4000photon/MeV 程度とされる)

などのことがある。

早稲田大学寄田研究室ではアルゴンをシンチレータとする気液 2 相型 Ar 光検出器を用いた暗黒物質探索実験 (ANKOK 実験) を行っている。アルゴンを使う利点としては以下のことが主にあげられる。

- キセノンなど他の希ガスにに比べ安価 (キセノンの 100 分の 1 ほどの値段)
- 電子の移動度が大きい
- シンチレーション光の時定数が長く、波形分別に役立つ

キセノンと比べると電離や励起の W 値がキセノンの方が大きかったり、原子番号や密度もキセノン

の方が大きいので WIMP との反応の頻度や光量に関してはキセノンのほうが優れている。しかしアルゴンはシンチレーション光の fast、slow(後述)ともにキセノンよりも長い時定数を持っておりその差も大きい。このことは波形分別能力において役立つ。さらにアルゴンは空気中に含まれていることから安価であり、検出器の大型化がしやすかったり、検出器自体を改良を重ねることが簡単に出来て、実験のサイクルを早く保つことができる。しかしアルゴンを使う欠点もある。アルゴンには ^{39}Ar という放射性同位体が含まれている。これは大気中で宇宙線との作用で生まれるもので液体アルゴン 1kg に対して 1Bq ほどの割合で含まれ、 β 線を放出し本実験の主な背景事象となる。

1.4.1 気液2相型 Ar 光検出器

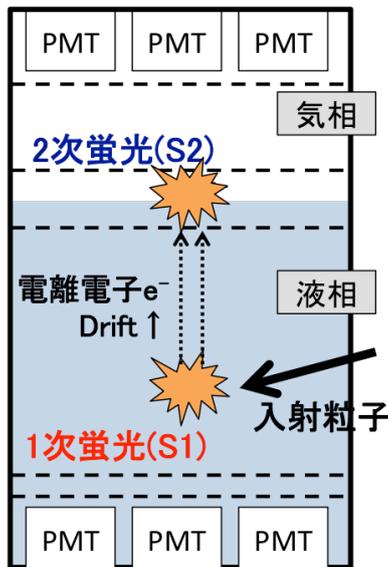


図 1.4 気液2相型 Ar 光検出器

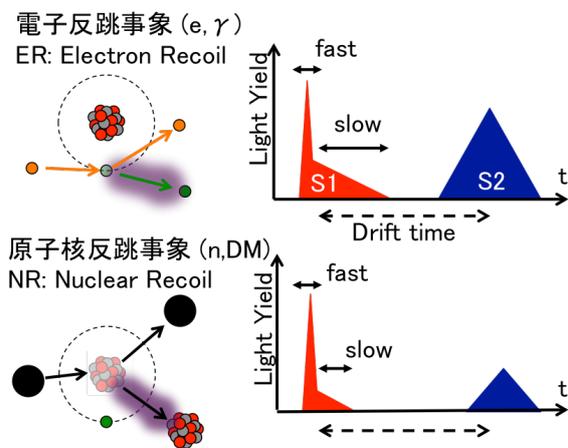


図 1.5 電子反跳事象と原子核反跳事象

図 1.4 に気液2相型 Ar 光検出器の概要図を示す。粒子が入射するとアルゴンと相互作用することで1次シンチレーション光(S1)と電離電子を発生させる。電離電子を検出器内部に Cockcroft-Walton 回路(CW 回路)によって印加したドリフト電場($\sim\text{kV}/\text{cm}$)によって液面まで移動させる。液面まで辿り着いた電子は取り出し電場($\sim 3\text{kV}/\text{cm}$ 以上)によって加速され、気相に取り出される。その際にも加速された電子によってガスアルゴンが励起され2次シンチレーション光(S2)を発生させる。これらのシンチレーション光を光電子増倍管(PMT)などで読み出すことで信号を得ており、その波形情報から入射粒子を判別している。

S1 信号には時定数が約 6ns の早い成分と時定数が約 $1.5\mu\text{s}$ の遅い成分の2つの信号によって成り立っている(図 1.5, 図 1.6)。先でも述べたようにアルゴンはキセノンに比べてシンチレーション光の fast、slow の時定数の差が大きい。WIMP の場合は弱い相互作用によってアルゴンの原子核を反跳するのに対し、 γ 線はアルゴン原子の電子を電磁相互作用によって反跳する。この2つは dE/dx の違いによって検出される波形も異なってくる。この波形情報から WIMP 信号と γ 線信号の分離が可能になっている。

また原子核反跳と電子反跳とでは S1 信号と S2 の信号2つの信号の光量比が異なっており(図 1.6)、この情報からもさらなる粒子分別が可能である。さらに S1 信号と S2 信号の時間差とその時の

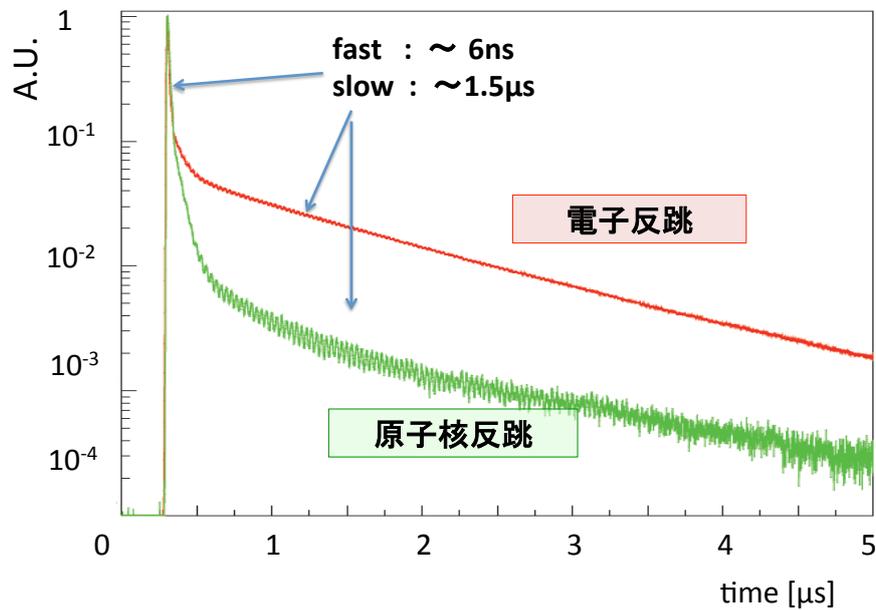


図 1.6 電子反跳と原子核反跳による S1 波形の違い

電場における電子のドリフト速度を見ることで S1 信号が発生した位置から液面までの垂直方向の距離を $\sim 1\text{mm}$ の精度で決めることができる。

1.4.2 Ar 内の不純物の影響

気液 2 相型 Ar 光検出器は S1 光と S2 光を検出し、WIMP 探索を行う。この時液体アルゴン内に H_2O や O_2 、 N_2 といった不純物が存在すると検出光量に影響を与える。この節では不純物の混入によるアルゴンへの影響を述べる。まず電気陰性度の大きい H_2O や O_2 の混入はドリフト電子の捕獲を起こしてしまう (式 1.5, 式 1.6)。



これは結果として S2 の光量の減少として観測される。特に電子のドリフト距離が長くなる検出器下側においてこの現象は顕著となる。混入物が酸素の場合、ドリフト電子の寿命はその混入量に比例した時定数 300s/ppb となっていることが知られている。

N_2 の混入はアルゴンの励起状態を奪う現象 (ペニング過程) が起こす (式 1.7)。これは S1 光量の減少として観測される。



表 1.2 に不純物の影響とその目標の濃度を整理する。目標濃度に関しては先行研究による結果から定めた (図 1.7, 1.8)。これらの不純物は大気内に存在するものであり、容易に混入してしまう。混入の

原因としてはいくつかあり、液体アルゴンの精製過程における混入、配管リークによる大気の混入、容器・配管内からのアウトガスによる混入などが挙げられる。ANKOK 実験ではアルゴンの充填前にポンプによる真空引きを十分に行いアウトガスを低減することや、アルゴンガスを循環しフィルターを通すことで実験期間中もアルゴンの純化を行っており、これら不純物混入量の目標値をクリアする技術を持っている。

表 1.2 不純物の影響

不純物	S1 発光量	電離電子数	目標濃度
H ₂ O	減少	激減	1ppb 以下
O ₂	減少	激減	1ppb 以下
N ₂	激減	影響小	100ppb 以下

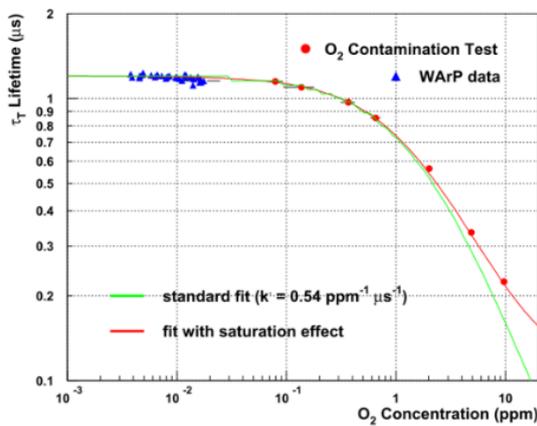


図 1.7 酸素の混入の影響 [3]

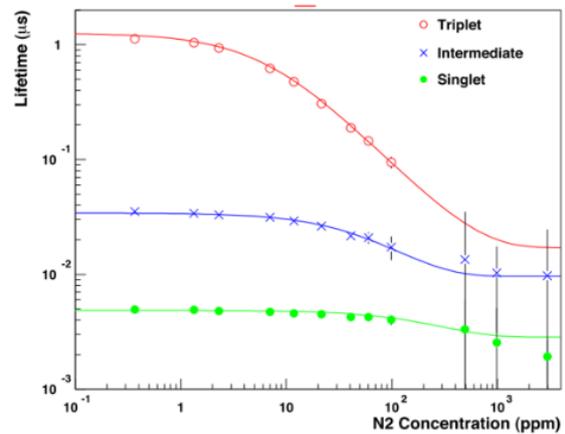


図 1.8 窒素の混入の影響 [4]

1.4.3 ANKOK 実験のターゲット

ANKOK 実験図は 1.3 において、発見を主張する結果と棄却を主張する実験結果が混在する低質量 (10GeV/c²) 領域の探索を目的としている。図 1.9 に WIMP の質量が 10GeV/c² と 50GeV/c² の 2 つの場合での反跳エネルギー分布を示す。また図 1.10 に ANKOK 実験のターゲットとする領域を示す。ANKOK 実験と同様にアルゴンを用いている実験に DarkSide 実験があるが、ANKOK 実験はより低エネルギー領域の探索を行おうとしている。これには DarkSide 実験よりも低閾値の検出器を開発することが欠かせない。

2012 年度より ANKOK 実験は小型容器プロトタイプ検出器 (有効質量~1kg) の製作・運用を開始し、以下の 2 点に注力し R & D を開始した。

- 検出光量の最大化
- 電子反跳事象と原子核反跳事象の分離能力の評価

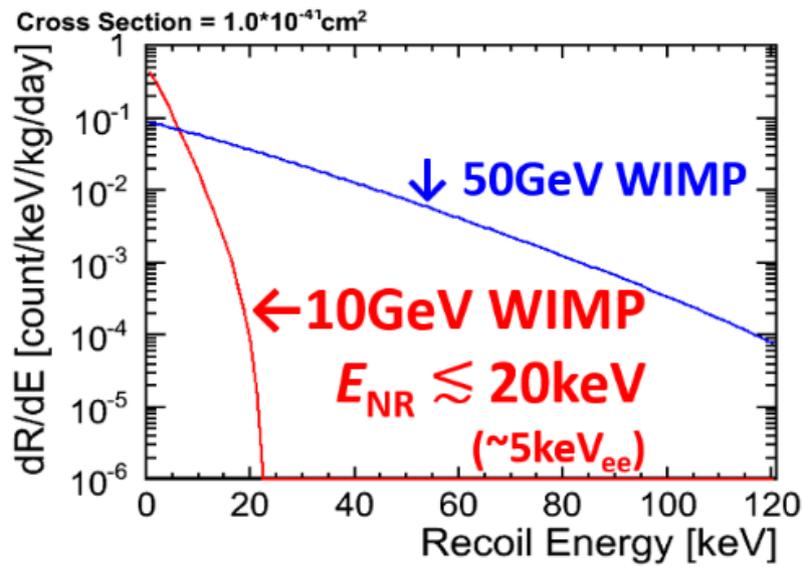


図 1.9 WIMP による反跳エネルギー分布

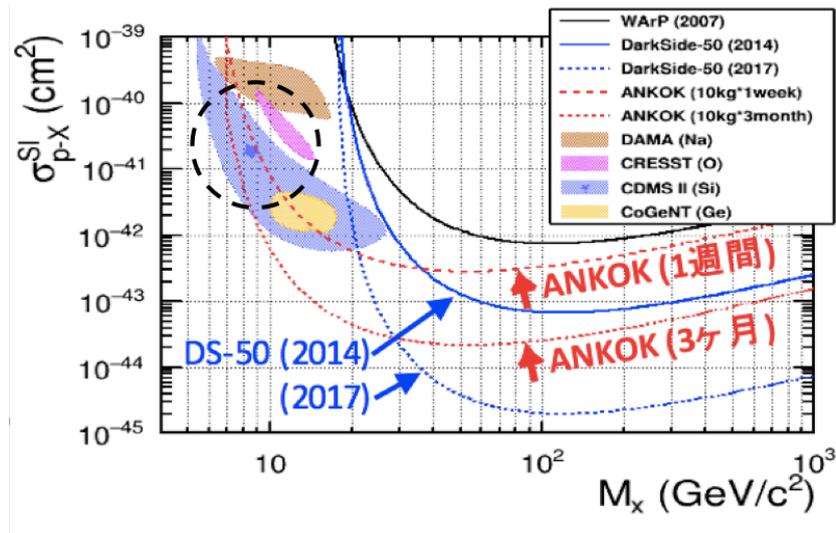


図 1.10 ANKOK 実験の目標物理感度

1.4.4 本研究の目的

上記の2つの開発項目に一定の目処が立ち、2015年度からは本実験検出器(有効質量~30kg)を用いた実験に向け、実験環境(テストスタンド)の増強を開始した。本研究では地下実験施設でも同様の展開が可能な地上実験テストスタンドの構築を行った。開発項目や評価項目が多岐にわたるため、第3章にて整理するので参照されたい。

第2章 ANKOK 実験の概要

本章では ANKOK 実験を構成する機器や、アルゴン試験 (Run) を行う時の流れに関して述べる。

2.1 実験機器構成

2017年2月現在の ANKOK 実験の概念図を図 4.21 に示す。この節で各実験機器の構成を説明する。

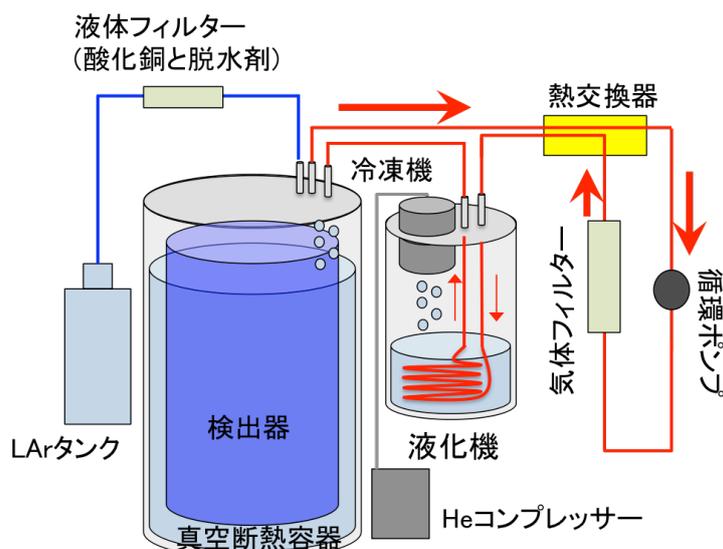


図 2.1 ANKOK 実験テストスタンド概念図

2.1.1 検出器

基本的な原理や設計は 1.4 節を参照。本検出器による実験に向け、小型プロトタイプ検出器を用いた R & D 段階にあり、各実験における目的などによって、TPC 径高さ、上下面に配置する PMT の個数等は変わる。

2.1.2 真空断熱容器

検出器と液体アルゴンを内包する断熱容器を指す。内槽容器と外槽容器の 2 槽構造になっており、外槽容器を真空状態 $O(10^{-2})\text{Pa}$ にすることで内槽容器への外部からの熱流入を抑制している。また内槽容器と外槽容器の間にはスーパーインシュレータが巻かれている。これはマイラーシートにアルミを蒸着したものであり、多層に巻くことで輻射による熱の流入を軽減する。

また、容器上部に取り付ける蓋の事をトップフランジと呼称している。ICF フランジ規格などを溶接によって取り付けであり、ガスやエレキの導入口としている。

2015 年に新しく容積 200L の真空断熱容器を製作した（詳しくは第 4 章を参照。）。本論文ではこれを 200L 容器と呼称する。同様に 200L 容器製作の前に使用していた容器を 75L 容器と呼称する。

2.1.3 熱交換器

容器から循環ラインへ向かうガスアルゴン (低温) と、フィルターを通り純化され容器に戻るガスアルゴン (常温) の熱を交換する目的で実装してある。プレート式熱交換器 BXC-314-PI-30 (日阪製作所製) を使っている。

2.1.4 液体フィルター

既製品ではなく、自作したものを使用している。長さ 60cm のステンレス製円筒容器内にフィルター剤を詰め、ICF114 のフランジによって密閉している。フィルター剤は酸化銅触媒 R3-11 と脱水性モレキュラーシーブ (ゼオライトの一種、多孔質で水分子を吸着) を使用している。モレキュラーシーブは合成ゼオライトの商品名であり、吸着触媒として様々な分野で使用されている。式 2.1 に化学式を示す。



特性として、結晶水を加熱除去することで再度活性化が可能な点がある。真空中もしくは乾燥したガスアルゴン中で 300-350°C に加熱することで乾燥を行う。また酸化銅触媒 R3-11 の還元は Ar に H₂ を 2% 混合したガスを通し、250°C に加熱して行う。式 2.2 に還元時の化学式を示す。

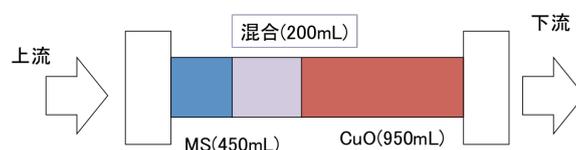


図 2.2 液体フィルター概念図

実験開始時におけるガスアルゴン・液体アルゴンの充填時にはこの液体フィルターを通して、H₂O や O₂ といった不純物を取り除くようにしている。

2.1.5 マイクロトール

気体フィルターの一つとして循環ラインに実装しており、MC1500 (SAES 社製) を使用している。最大流量は 250L/min、公称流量 (40L/min) で寿命~1 年が推奨値となっている。最大圧力は~1.8MPa である。三酸化クロムの触媒 (902 媒体) を使用しており、H₂O や O₂ を 100ppt 未満まで低減させる純化能力を持つ。窒素フィルターと異なり常温使用が可能である。

2.1.6 窒素フィルター

気体フィルターの一つとして循環ラインに実装しており、GP-10(PURERON 社製) を使用している。推奨流量は 2~10L/min。5L/min で寿命 1 年が推奨値となっている。入口 (一次側) からの不純物合計が 10ppm と仮定した場合の値で、この間再活性化処理が必要。最高使用圧力は 0.97MPa。

アルゴン純化時は 400°C に熱して使用 (図 2.3)。加熱には同社製品の専用のジャケットヒーター [GCW-10-100] を使用している。

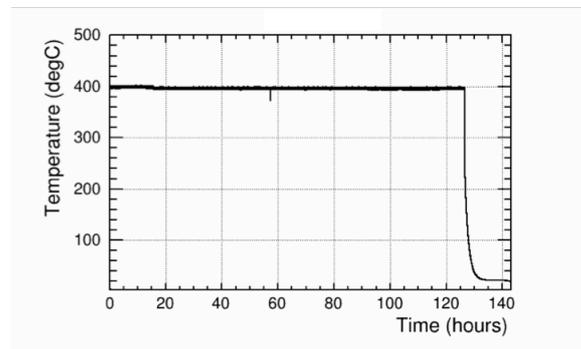


図 2.3 窒素フィルター加熱時の安定性

2.1.7 液化機

2016 年度に ANKOK 実験のシステムに液化機を導入した。詳しくは 4.7 節を参照。

2.1.8 冷凍機

容器内を液体アルゴン温度に保つために使用している。ANKOK 実験で現在使用しているのは住友重機械工業製の GM 冷凍機 CH-110 であり、90K で 200W の冷凍能力となっている。コールドヘッド (冷凍機ヘッド) と呼ばれる冷却部分には無酸素銅製のパーツ (ヒートシンク) を取り付けてあり、表面積を広げることで冷却の効率を上げている。スペックを図 2.4 と図 2.5 に示す。また GM 冷凍機は加熱部分を冷やし続ける必要があり、これには住友重機製の F70 圧縮機 (He コンプレッサー) を使用し He によって冷却することで稼働している。また He 自体の冷却のためには F70 圧縮機に随時冷却用の水を 8L/min 以上の量で常に供給し続ける必要がある。この冷凍機自体には温度をコントロールする機能はない。容器内を液体アルゴン温度に保つためには冷凍機の冷却能力に対して外部から熱を流入させなくてはならず、これを行わないとアルゴンは冷え続け、固体アルゴンになってしまう。温度管理や調節の方法として、PID (Proportional Integral Derivative) 制御機能を持った温度調節器 E5CN-CT (OMRON 製) を使用している。冷凍機ヘッドの温度変化を白金抵抗 (100Pt) によって読み取り、その温度変化に応じて冷凍機の出力を調節している。

2.1.9 流量計

循環ライン等で、ガスアルゴンの流量を見る際には、azbil 社製のマスフローメータ CMS シリーズを使用している。センサー側の設定により、アルゴン以外にも空気や窒素といった各種の気体の流量を測定可能となっている。

2.1.10 真空配管部品

アルゴンの充填や循環ラインにおいてその気密性を保つことは純度の保持観点から重要である。試験時の温度・圧力等を考慮し、適切な規格の物で配管を構成する必要がある。

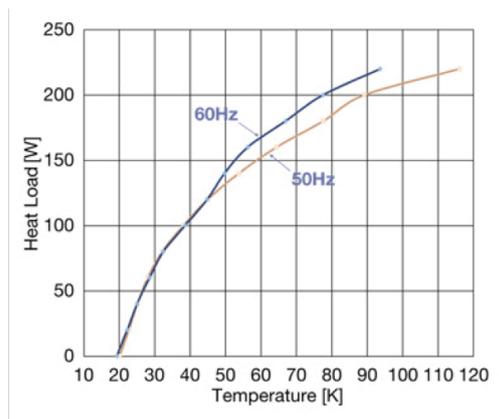


図 2.4 冷凍機 CH-110 の出力値 [5]

項目	77K GM冷凍機 CH-110	
	50Hz	60Hz
冷凍能力1st Stage @ 77K	175	200
クールダウンタイム (20Kまで)	35分	30分
重量 kg(lbs.)	13.7(30.2)	
メンテナンスサイクル (時間)	13,000	

図 2.5 冷凍機 CH-110 スペック表 [5]

- swagelok

ナットを締めることで SUS 管にフェールが食い込むことで気密性を保持する。高真空 ($>10^{-5}$ Pa) まで使用可能。ナット・フェール・SUS 管があれば構築可能であり、汎用性が高い。一度ナットを緩めて開けたとしても増し締めにより複数回使用可能。VCR と比べると安価であることとその再利用し易い点から液化機設計などの R & D に用いる。

- VCR

継ぎ手の間にガスケットを挟みナットを締めることでガスケットが潰れ、金属同士のシールによって密閉性が保たれる。超高真空 ($<10^{-5}$ Pa) まで使用可能。swagelok と比べると、ガスケットが再利用出来ない点や、新たに VCR 継ぎ手を構成したい場合は SUS 管への溶接が必要な点などがあり汎用性は低いといえる。しかしその密閉性の高さからアルゴンの充填・循環ライン等で主に使用される。swagelok で改善を施しつつ設計をし、最終的に VCR へと移行するという段階を踏むことで効率良く配管の構築を行える。

- NW フランジ

O リングを継ぎ手の間にはさみ、クランプで締めることで密閉性を保つ。金属製の O リングも存在するが、ゴム (バイトン) 製の O リングが基本的に使用される。O リングは再利用可能であり、配管施工の作業も簡易である。ANKOK 実験では真空断熱容器の真空引きラインで使用する。ICF フランジと比べると耐低温製や密閉性は弱いため、低温環境にならず純度に対する要請のない外槽容器の真空引きのラインに使用している。

- ICF フランジ

フランジ部に金属ガスケットを挟み、規定のトルクでボルトを締めることで密閉性を保つ。金属ガスケットを使用することで低温化でも十分な気密性を保つことが可能である。ANKOK 実験ではアルゴン試験時に低温環境になる部分や、特に気密性を保証し純度を保持する必要がある内層容器と繋がる部分に使用している。

2.1.11 ポンプ

容器の真空引きやガス循環に使う真空ポンプを以下で述べる。

- HiPace300
ファイファーバキューム製のターボ分子ポンプである。排気速度は N_2 において 260L/s の性能である。取り付け姿勢が自在であり、フランジ部は ICF152 となっている。ゲートバルブを介して 200L 容器上部の W チェンバー (4.2 参照) に取り付けしており、内槽容器の真空引きを行う。
- SP-250C
アネスト岩田製のスクロールポンプであり、油を使用しないため内槽容器など、極力不純物が入る機会を除去する必要のあるものに対して使用する。排気速度は 250L/s、到達圧力は 1.6Pa でありターボポンプを使用する前の空引に使用する。
- YTP-50M
ULVAC 製ターボ分子ポンプ (UTM シリーズ) であり、ロータリーポンプ、フォアバルブ、ピラニ真空計と制御系から構成される簡易型高真空排気ユニットである。各種ポンプや真空計が一体型になっているため汎用性が高い。ANKOK 実験では外槽容器の真空引きに使用している。
- メタルベローズポンプ (MB-302)
IBS 社製のメタルベローズポンプを循環ラインに組み込み、アルゴン循環用のポンプとして使用している。最大流量は 84.9L/min であり、これがそのままアルゴンの循環量の最大値となる。

2.2 検出器運用

ANKOK 実験のアルゴン試験 (Run) のおおまかな流れは以下のようになっている。

1. 検出器の組み立て・真空断熱容器内への設置

各実験の目的によって検出器の寸法は異なるが、独立に組み立てた検出器をトップフランジに固定する。

2. 外槽容器・内槽容器の真空引き

まずはじめに外槽容器の真空引きを行う。内槽容器を真空引きした際に側面にかかる圧力を低くするためである。この時十分な時間をかけて内槽容器の真空引きを行うことが高重度の達成において重要となる。容器内に入れた検出器の大きさやケーブルの量などによって真空度の下がり具合は変わるが、 $O(10^{-4})$ Pa まで真空引きし、アウトガスの量が 10Pa/hour 以下まで抑えられることが十分真空引きが出来ているかどうかの目安となっている。真空引き期間中にリークチェックを行い、リークへの対応を素早く行うことでこの目標の真空度やアウトガス量を達成する。

3. アルゴンの充填

実験は容器へのアルゴンの充填により始まる。冷凍機を稼働し、容器内の圧力を 1~2atm の間を保ちながらガスアルゴンを充填し、徐々に容器内の温度を下げていく。容器内への液体アルゴンの充填は内部に複数設置した白金抵抗や、液面計によって観測する。

4. データ取得期間

データ取得期間は内圧・温度等が一定の値を保ち、安定することが求められる。

5. 実験終了

各種データ取得が終了すると実験の終了へと移行する。容器内には 100L 程度の液体アルゴンが充填されており、冷凍機の稼働を停止したとしてもその蒸発には時間がかかる (~4 日)。この期間もアルゴンの急激な蒸発等の危険を防ぐため、温度・圧力等のモニターは引き続き行う。完全にアルゴンが蒸発仕切ったことを確認した後に、実験は終了となる。

各期間において温度や圧力といったスロー項目を測定し、随時その値を確認し、実験の遂行上安全性が保たれていることを保証する必要がある。各項目を測定するセンサーからの出力の管理にはデータロガー GL820(グラフテック製)を使用している。接続した機器からの出力を csv ファイルに保存することが可能であり、モニターコードによってプロットを作成し、値の変化を確認している。

以下に Run 時において特に重要である項目を整理する。

- 内圧

ANKOK 実験は液化したアルゴンを使用しているため、圧力の管理は非常に重要な項目である。容器内が ~3atm 以上の高圧になった場合、容器の破裂・爆発といった危険な状態になる。また圧力の急降下はアルゴンの固化や、負圧によるリーク部からの空気の侵入による純度の悪化のおそれがある。実験時は ~1.4atm に保つようコントロールしており、容器内の圧力のモニターは長野計器製のデジタル圧力計による読み出し (GC-61, KP-15) の他、ブルドン管によるチェックも行っている。また何かしらの問題 (停電による機器の停止など) による圧力の急上昇に備えて緊急用のガス放出弁も用意してある。

- 温度

容器内部では容器底から上部、検出器付近や冷凍機ヘッドの温度をモニターする。白金抵抗による読み出しを行っており、各温度から容器内の情報を読み取っている。特に冷凍機ヘッドの白金抵抗は温度管理によって冷凍機ヒーターの出力を管理しているため重要であり、予備として複数とりつけたり、熱変化の応答が早いものを使用するようにしている。

充填時には液面計とは別に液体アルゴンが充填されている高さを読み取ることが出来る。また容器外では循環ポンプや He コンプレッサー冷却用水の温度を K 熱電対によって管理している。

- 真空度

真空引き期間中は内槽・外槽容器の真空度をモニターする。主にキャノンアネルバ製の真空計 (M-360CP) を使用している。真空度の下がり方や、真空引きを中断した際の圧力の上がり方からリークの有無やアウトガス量の評価を行う。実験開始前には 10Pa/hour 以下までアウトガス量を減らすまで真空引きを行うことを目安としている。

アルゴンが容器内に充填されている状態の時は外槽容器の真空度を保つことで内槽容器中の液体アルゴンへの熱流入を抑制している。外槽容器の真空の破れは液体アルゴンへの熱流入の急増が予測され、圧力の急上昇へとつながるため管理が重要である。

- 液面

Run 時は液面は内槽容器内の高さ ~50cm の位置でオペレーションしている。2 相型検出器

は液面の変化による S2 光量の変化があるため、実験期間中の液面を一定に保つことや、液面位置を正確に記録・管理することが重要である。液面の管理には現状 2 種類の液面計を用いている。Model186(AmericaMagnetics 製) は全長 51.5cm で有感長さが 35cm の静電容量式液面計であり、35cm の感度を活かして充填時や蒸発時の液量の管理に用いる*1。また液面付近に自作した液面計を 3 つ設置している。LCR メーター (DER EE Electrical Instrument 社製:DE-5000) で容量を測定し、液面に変換する仕組みである。mm 単位で液面を読み取る目的であり、3 点の測定により容器自体の水平性も測定可能である。

● 酸素濃度

希ガスを用いる実験において実験室内の酸素濃度を管理するのは必須である。空気中の酸素濃度が 18 % を下回ると人間の活動に支障が出て、窒息の危険が大きくなる。ジュー製の酸素濃度計 (JKO-25WD3) を使用しデータロガーに出力してモニターしている。その他にも理研計器株式会社製の酸素濃度計 (型式:OX-01) も使用しており、これは乾電池で動くため持ち運びが可能で実験室の各所に設置できる。これを複数 (現在 3 つ) 用意しシフター (後述) がいる位置の他に容器近くやアルゴンタンク付近などに設置し、酸素濃度が低下した時に警告音を出すようにしている。

実験期間中はデータ取得を主に行う係 (DAQ シフター) と、スロー項目の管理・記録を行う係 (DCS シフター) を必ず用意して行う。データロガーにある値が設定した範囲を超えた (下回った) 時にエラーを周知する機能が備わっているが、Run の最中はシフターがスロープロットの確認の他に 15 分に 1 度スロー項目の値を紙媒体で記録することで、値の変化を早急に検知出来る体制を整えている。



図 2.6 右図:シフター環境の写真 (RunIX 時)。奥が DAQ シフターで手前が DCS シフターの位置となっている。左図:データロガーの出力画面の一例

*1 現状この長さでは液面位置をモニターするよう設置した際、容器底までは届かない。より長い液面計を現在設計・製作中である。

第3章 研究の流れ

この章では以降の章での研究内容の経緯を述べ、整理する。本研究の大きな目的は地上で行う WIMP 探索感度評価実験や地下で行う探索実験に向け、十分な性能を発揮するテストスタンドを構築することである。本論文ではこれらの研究を以下の2項目に大きく分けて報告・議論する。

- 新テストスタンドの構築・運用実験 (第4章)
- シールドの構築による環境 γ 線の低減と ^{39}Ar の観測 (第5章)

図 3.1 に各項目の開発時期や試験のタイミングを示す。新テストスタンドの構築・運用実験として 200L 容器の製作～RunX までを第4章にまとめる。シールドの構築やその性能の評価に関しては第5章にて述べる。以下の節において2項目の概要を述べるが詳しくは該当する章を参照されたい。

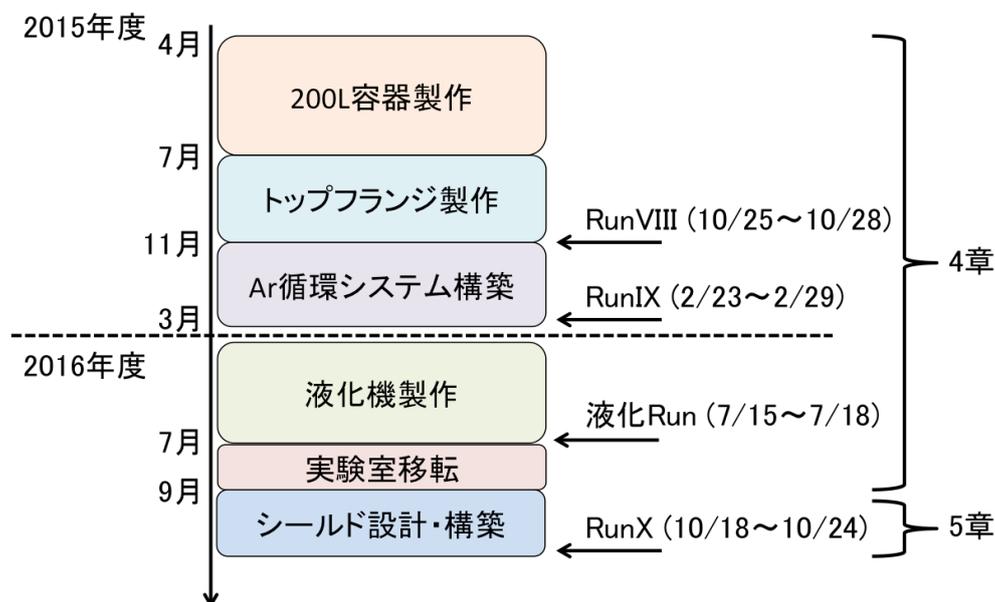


図 3.1 研究の流れ

3.1 新テストスタンドの構築・運用実験の流れ

ANKOK 実験は 2012 年から「検出光量の最大化」と「電子反跳事象と原子核反跳事象の分離能力の評価(向上)」の2つを当面の目的とし R & D を開始し、75L 容器を中心とした旧テストスタンドで小型プロトタイプ検出器を運用する Run を 10 回以上行ってきた。その過程でこれら2つの開発項目に一定の目処が付いた(各 Run の詳細は鷲見修論 [6] の 2.3.2 節を参照されたい。)。光検出効率の向上と ER 事象と NR 事象の分離能力の向上を示す図をそれぞれ図 3.2 と図 3.3 に示す。

2015 年からはそれまでの R & D を踏まえ、大型検出器を用いた地上での探索感度評価実験、更には地下における探索実験のためにテストスタンドの拡大・増強を行ってきた。

2015 年度は、200L 容器とトップフランジの製作と液体アルゴンの保持性能評価試験 (RunVIII)

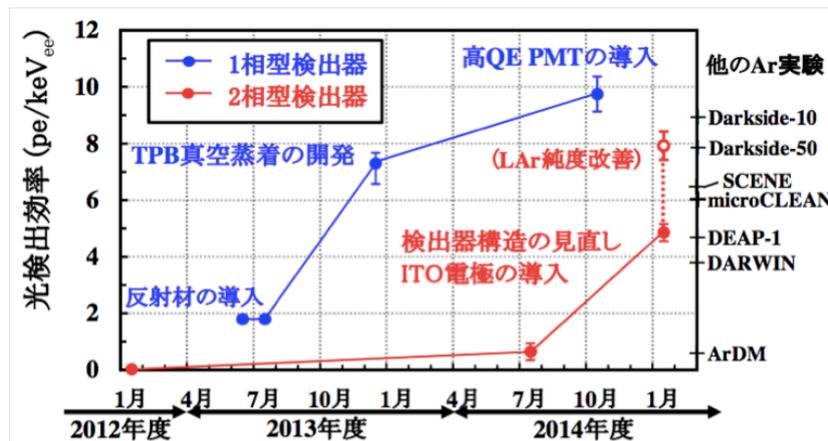


図 3.2 光検出効率の推移 [6]

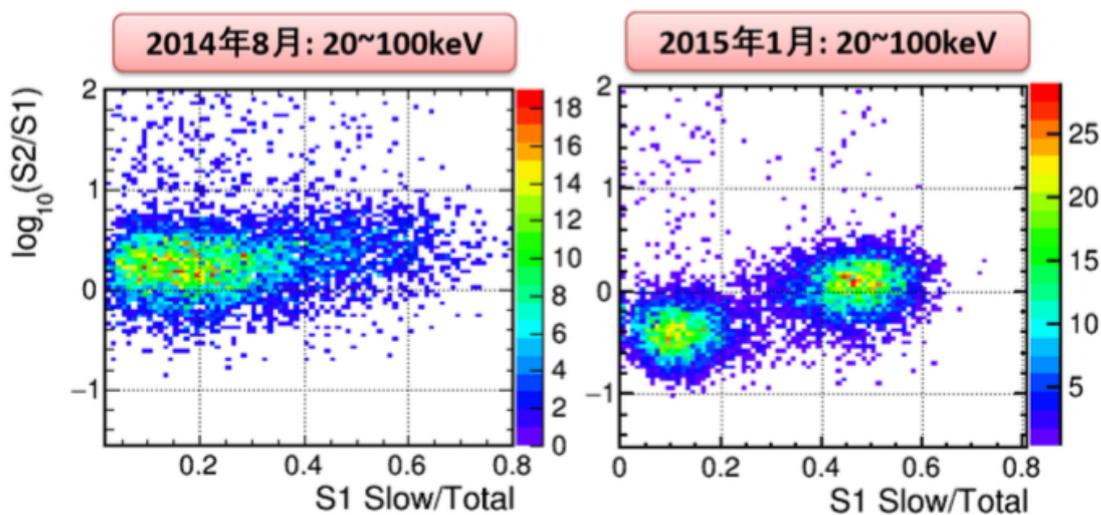


図 3.3 ER 事象と NR 事象の分離能力の向上 [6]

や、アルゴン循環システムの構築とそれを実装したテストスタンドの性能評価試験 (RunIX) を行い、スロー系の安定性やアルゴンの純度を評価した。

2016 年度は地下実験を意識し、液化機の開発と実装に向けての性能評価を行った (液化 Run)。また同年 7~9 月に実験室の移転を行い、移転先の実験環境を整備した。同年度 10 月末に、新実験室において液化機を含めたアルゴン循環システムでの試験 (RunX) を行い、スロー系の安定性を評価した。

3.2 シールドの構築による環境 γ 線の低減と ^{39}Ar の観測の流れ

2016 年度に行った実験室の移転により、環境 γ 線を低減するための十分なシールドを構築することへの現実性が上がった。これを踏まえ、RunX に実装するためのシールドをシミュレーションを用いて設計し、調達した鉛を使用してシールドを構築した。RunX によって得たエネルギースペクトラムに ^{39}Ar による信号の兆候が見られ、その評価を実験データとシミュレーションの 2 軸で行った。

第4章 新テストスタンドの構築・運用実験

4.1 200L 真空断熱容器の製作

真空断熱容器への主な要請は以下である。

- 本検出器を内包できるサイズ
- 十分な耐圧性能
- 液体アルゴンを保持できる断熱性能

図 4.1 に示すように、ANKOK 実験では本実験検出器として直径約 30cm、高さ約 30cm の有効体積～30kg の円筒形検出器を想定している。本検出器を内包できるサイズとして内層容器は直径 50cm、高さ 95cm とした*2。詳しい図面は B.1 を参照されたい。

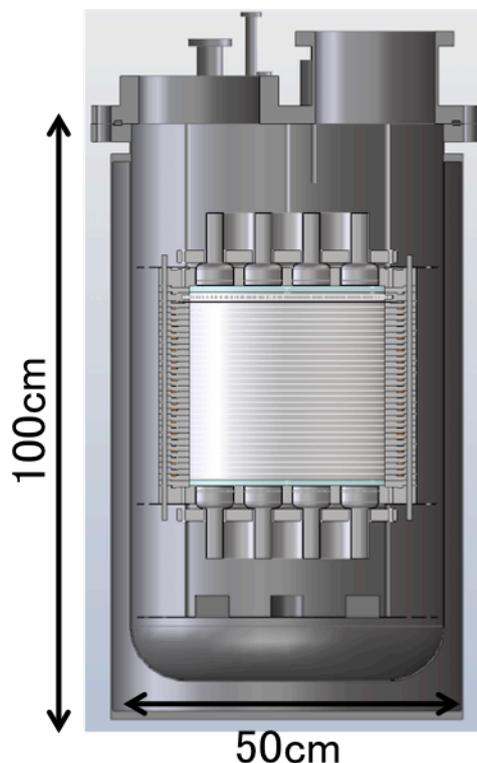


図 4.1 200L 容器と本検出器

真空引きから実験終了までの間の圧力変化 ($\mathcal{O}(10^{-4})\text{Pa}\sim 0.2\text{MPa}$) を十分に耐えうる側面の厚さが要請される。単純に厚くするほど耐圧性能は高くなるが、側面の厚さが厚いほど熱伝導による外から内部への熱流入量は多くなってしまい、液体アルゴンの保持が難しくなってしまう。使用している冷凍機の冷却能力は 200W であるため、循環による熱流入等と合わせてこの 200W を超えないこと

*2 より大きい容器の制作も可能ではあったが、実験室への搬入経路による制限や、周囲にシールドを積んだ際に想定される重量が実験室の耐荷重制限を超えると予想され、このサイズで制作した。

が必須の条件である。

内槽容器の側面の厚さを決定する際には、トップフランジや外気と触れる部分から、アルゴン液面への熱伝導による熱流入量を考慮した。この時内槽容器を円筒と近似して計算した。円筒の断面を $S[\text{m}^2]$ 、高さを $L[\text{m}]$ 、上下面の温度差を $T[\text{K}]$ とすると、上面から下面への熱伝導は以下の式 4.1 で表される。この時 γ は熱伝導率であり、ステンレスを仮定している。

$$Q = \gamma \frac{ST}{L} \quad (4.1)$$

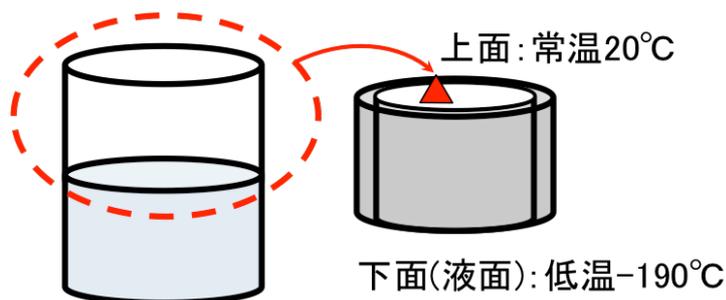


図 4.2 内槽容器側面を円筒に見立てた図

図 4.3 に内槽容器の厚さを 2mm, 3mm, 5mm の 3 つの場合の液面高さ と熱流入の関係を示す。こ

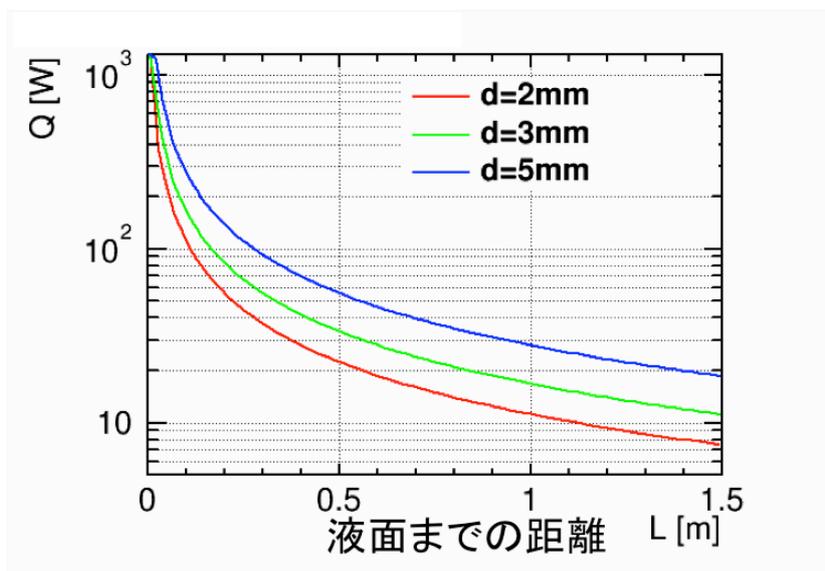


図 4.3 液面高さ と熱流入の関係

れを元に、試験時の液面高さ (~50cm) における熱流入量が ~30W 程度に収まるよう内槽容器の厚みは 2mm とした。

またシール部には U タイツシールを使用する。アルミメッキ製の物 (白井国際産業製: CS20080AI0V530) の使用を前提にフランジ部に用いるボルトのサイズや個数の設計を行った。さらに内槽容器の内側の表面はラドン (5.1 節参照) 抑制のために電解研磨を施してある。表 4.1 に各種の 75L 容器から 200L 容器に変更点を整理する。

また容器側面には ICF70 フランジが2つついており、これは外槽容器を真空引きするラインとなっており、内1つは真空計やブルドン管を取り付け、もう片方から真空引きを行う。

表 4.1 75L 容器と 200L 容器の比較

	75L 容器	200L 容器
内槽容器直径	30cm	50cm
内槽容器側面厚さ	3mm	2mm
外槽容器側面厚さ	3mm	3mm
全高	100cm	110cm
シール部	ICF 銅ガスケット	U タイトシール
電解研磨	なし	あり (ラドン抑制)

4.2 トップフランジ制作

トップフランジには以下のことが求められる。

- 200L 容器の蓋としての密閉性
- 十分な数のフィードスルー
- 配管等を取り付けた際の作業性の高さ

まずは真空計や圧力計といった、200L 容器に近接して設置すべきセンサー類や、容器内に本検出器を設置した場合の干渉を考慮して各フランジのサイズ・位置を決定した。またガス・液入れ口として 3/8 インチの SUS 管に VCR ナットを溶接してある。75L 容器では2つであったが配管類の拡張性を高めるために4つにした。また各フランジの高さは配管施工時の作業の簡易化のために、外側から内側にかけて高くなる等の工夫も施した。

表 4.2 に ICF フランジの個数を整理する。2つある ICF253 は、1つは手持ちのチェンバー (W チェンバーと呼称 4.4) を、もう1つは冷凍機を取り付けることを想定している。W チェンバーには各サイズの ICF フランジが存在している (表 4.2)。冷凍機のフランジは ICF フランジでは無いが、後に液化機の導入により 200L からは冷凍機を取り外す予定であった。冷凍機を取り外した後の拡張性や汎用性を考え、ICF253 への変換フランジも合わせて製作し、それを介して取り付けるようにした。またトップフランジ裏側 (容器内側) には M8 サイズのネジ穴が直径 30cm,40cm,45cm の円周上にそって各 4 箇所空けてある。これは検出器の取り付けの際に使用するものである。詳しい図面は B.2 を参照されたい。

4.3 トップフランジ架台制作

トップフランジを上げ下げすることによる容器の開閉や、トップフランジを容器とは別に自立させるための機構を設計・製作した。容器の開閉の方法としてはトップフランジを上げ下げするか、容器を上げ下げするかである。後者の場合はトップフランジを最低でも容器の2倍の高さの位置に固定し、容器をリフターなどで上下させる必要がある。75L 容器を用いた旧テストスタンドではラックを

表 4.2 75,200L 容器や W チェンバーの ICF フランジの個数

規格	75L 容器トップフランジ	200L 容器トップフランジ	W チェンバー
ICF34	2 個	2 個	1 個
ICF70	2 個	2 個	10 個
ICF114	-	-	5 個
ICF152	1 個	-	2 個
ICF203	-	-	2 個
ICF253	-	2	1 個

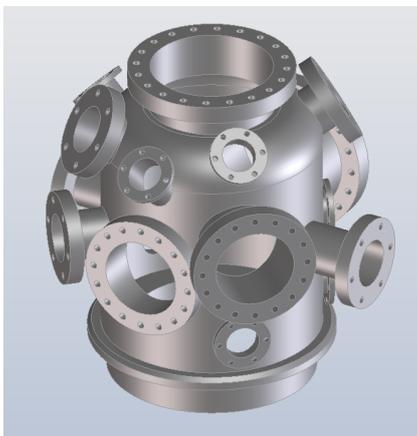


図 4.4 W チェンバーの再現図



図 4.5 W チェンバーと 200L 容器を組み合わせた図

構成し高さ～2m の位置にトップフランジを固定することでこの手法をとっていた。こちらの手法の利点としてはトップフランジを動かさずに済み、トップフランジと繋がる配管を崩さずに容器の開閉が行えることである。しかし新テストスタンドでは W チェンバーやターボポンプなどを取り付けられたトップフランジ自体の重さが 100kg 近くになると見積もられる。またその後の試験において循環ラインや充填ラインの配管は何度も組み替えられることも予想できたため前者の方法をとることにした。またトップフランジの側面にネジ穴を開け架台を取り付けているため、旧テストスタンドの様に強固なラックを構成することで将来的に後者の手法への移行も十分可能である。

4.4 200L 容器の運用試験 (RunVIII)

200L 容器とトップフランジの製作が完了し、新しい容器における液体アルゴン充填・保持の試験として RunVIII を行った。この時点ではアルゴンの循環システムは構築しておらず (詳しい配管図は付録付録 C を参照)、高純度アルゴンのデータ取得は難しいと考えられたがアルゴンによる信号確認のために PMT と MPPC を 200L 容器内に設置した。

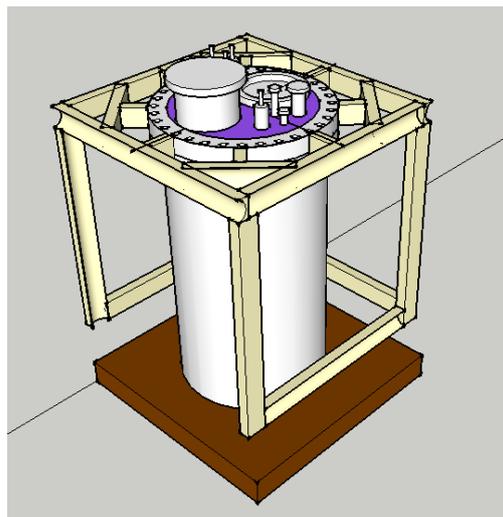


図 4.6 トップフランジ架台



図 4.7 200L 容器とリフター

4.4.1 RunVIII の概要

期間：2015年10月25日～10月27日

RunVIIIの目的は以下である。

- 200L 容器における液体アルゴン保持能力の確認
- 200L 容器におけるアルゴン信号の確認

図 4.8 に圧力や温度の推移を示す。RunVIII は約 3 日間という通常の Run と比べて短い期間ではあったが、液体アルゴンの充填と安定保持を行った。

以下の図 4.9 に RunVIII の蒸発期間における液面の減少を示す。液面の下がり方は 0.28cm/hour となっており、これから単位時間あたりの液の蒸発量が計算される。これによりオペレーション位置(高さ～50cm)における熱流入量は 35.3W と計算され、設計通りのスペックであることが示される。

また PMT, MPPC 共にアルゴンのシンチレーション光の観測も行うことが出来た。以上から十分 200L 容器で今後の試験は可能であると評価し、長期の検出器安定運用やアルゴンの高純度化を目指して循環システムの構築を開始した。

4.5 Ar 循環システムの構築

1.4.2 節で述べた様に、ANKOK 実験においてアルゴンの純化システムは重要であり、液体フィルターやマイクロトルと窒息フィルター (GP-10) によってアルゴンの純化を行っている。旧テストスタンドにおいても試験前の十分な真空引きに加え、液体フィルターや気体フィルターによって純度に関しては目標値をクリアしていた。新テストスタンドへの移行の際には、移行後も旧テストスタンドと同様に高純度を達成することがその後の R & D を行っていく上で必須の条件であった。

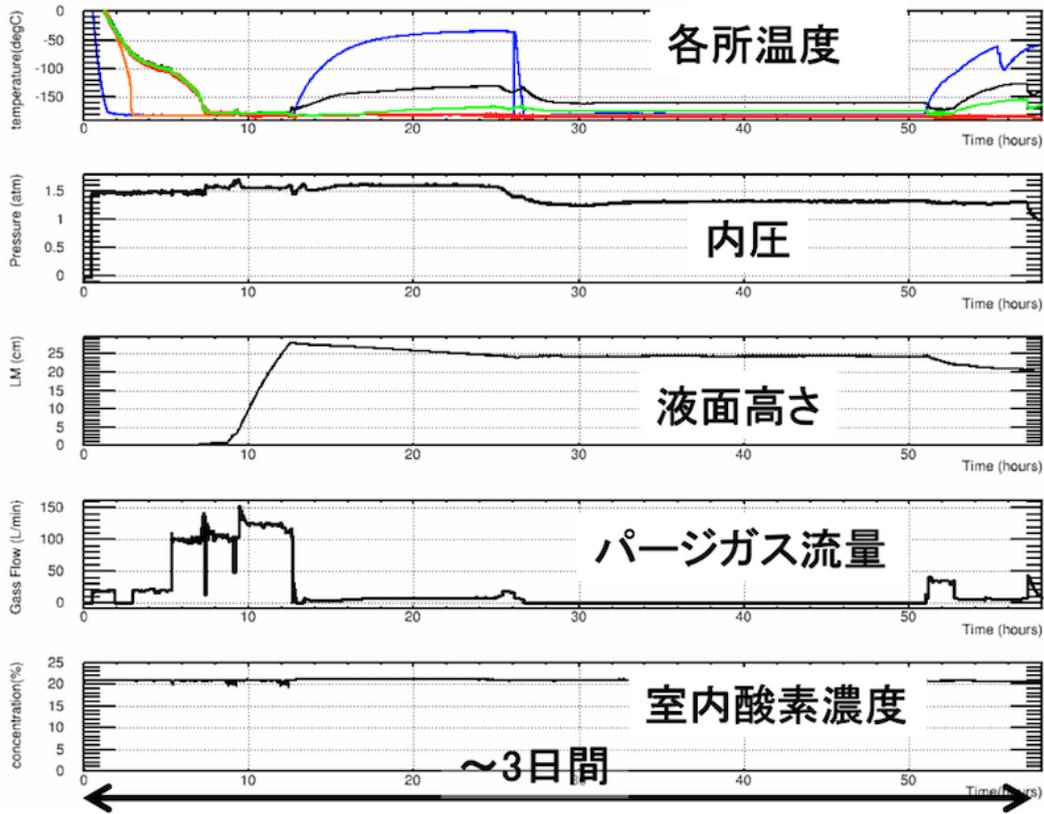


図 4.8 RunVIII スロープロット

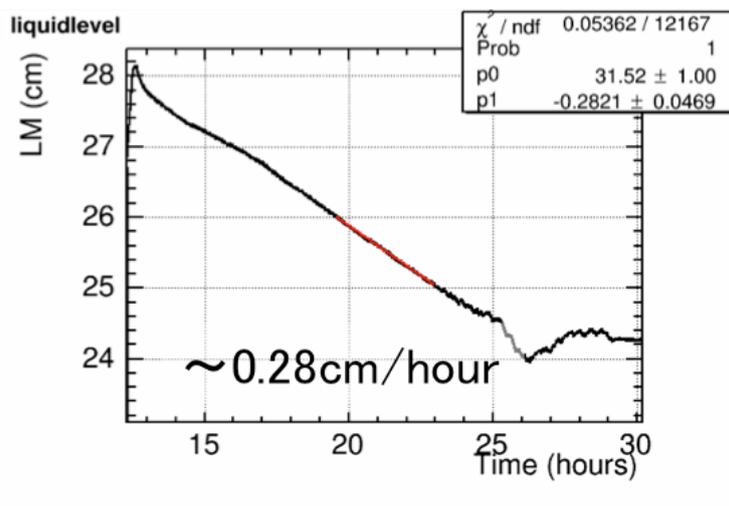


図 4.9 液体アルゴン蒸発時の液面の減り方

4.5.1 旧システムからの変更点

基本的な構造は旧テストスタンドと同様であり、真空断熱容器内の気相からガスアルゴンを取り出し、マイクロトールと窒素フィルターの二つのフィルターを通過することで不純物の除去を行った後に容器内気相へと返ってくる。循環ラインと容器の間には熱交換器があり、「容器から循環ラインに向かうガス」と「循環ラインから容器に戻るガス」の熱交換を行い、容器側を低温に保っている。新テストスタンドへの移行に伴い、以下のような幾つかの改善を行った。

- フィルターの直列・並列の両立

旧テストスタンドでは2つのフィルターを並列に通るラインしかなかったが、これをバルブの開閉によって直列・並列の変更が可能にようにした。この他にバイパスを通すようにすることでフィルターを通さずに循環が可能になっている。

- 循環ラインのパネル化

旧テストスタンドでは75L容器を中心に充填・循環ラインを構築していたが、各バルブやフィルターの距離が離れていた。これらを一箇所で管理・操作出来るように構築した配管をラックに固定した。またフィルターやバルブといった循環ラインが一体化されたため、循環ラインの出入り口以外の配管を崩さずにラックごと移動できるようになり、利便性が高くなった。

- 配管継ぎ手の規格の統一

継ぎ手の規格はこれまでswagelokとVCRの2種類が混在していた。今回循環ラインを一体化することに合わせて、ポンプや熱交換器の出入り口・バルブといった配管継ぎ手をVCRで統一した。

- 流量調節用のバルブの追加

流量調節用のバルブを開けると循環ポンプを出たガスが再び循環ポンプに戻るループが発生し、バルブを締めるとループはなくなる。これにより $\sim 1\text{L}/\text{min}$ の精度で流量の微調整が可能である。

製作した循環ラインパネルを図4.11に示す。窒素フィルターは 400°C に加熱して使用するためマイクロトールや流量計に影響がないよう距離を離して設置している。

4.6 新テストスタンドの運用実験・評価 (RunIX)

200L容器・トップフランジ・Ar循環ラインといったシステムの構築が完了し、その運用試験(以降ではRunIXと呼称する)を行った(詳しい配管図は付録付録Cを参照)。温度や液面といったスロー項目の安定性を報告し、得られたデータから窒素純度、酸素・水純度を評価する。

4.6.1 RunIXの概要

期間：2016年2月23日～2月29日

RunIXの目的は以下である。

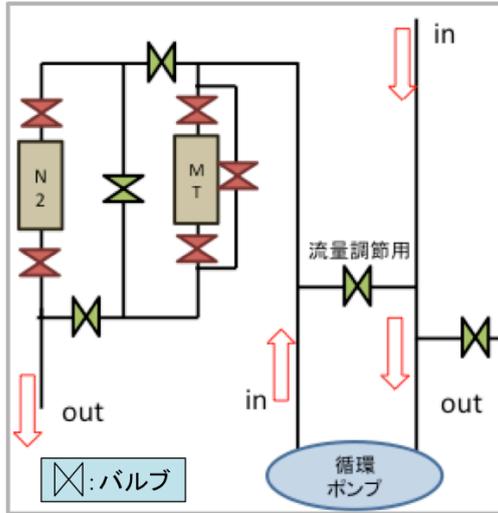


図 4.10 循環ラインの配管図



図 4.11 製作した循環ラインパネル

- 構築した新テストスタンドでのアルゴンの高純度化・保持の達成
- ~1 週間の検出器安定運用
- PMT と MPPC の多 ch 読み出しによる位置分解能力の検証

図 4.12 と図 4.13 に RunIX におけるジオメトリを示す。RunIX での検出器は上下面各 3 本の PMT と、気相側に MPPC を設置している。これにより検出器水平方向の発光位置分解能の評価を行ったが、本論文では割愛する。

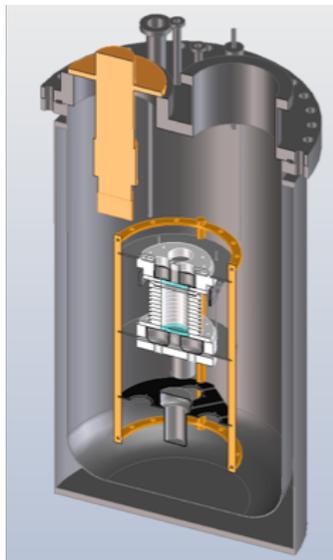


図 4.12 200L 容器と RunIX 検出器

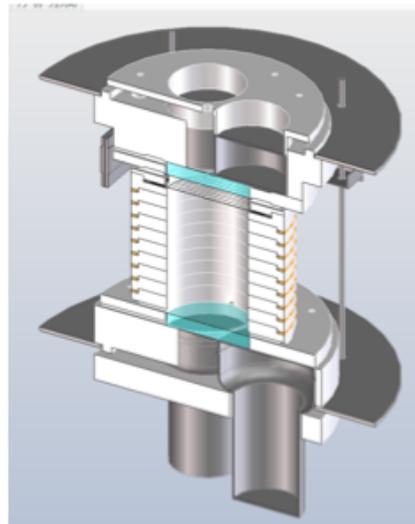


図 4.13 RunIX 検出器断面図

4.6.2 スロー系の安定性

2.2節で述べた様な項目が1週間の運用で安定であったかを議論する。アルゴン充填から実験終了までの約1週間の各項目のプロットを図4.14に示す。各項目とも問題なく安定しており、Runの最中もコントロール下に置くことが出来ていた。これにより新テストスタンドも旧テストスタンドと同様の検出器の安定運用を行う性能があり、1週間以上の長期的な運用にも問題はないと評価できる。

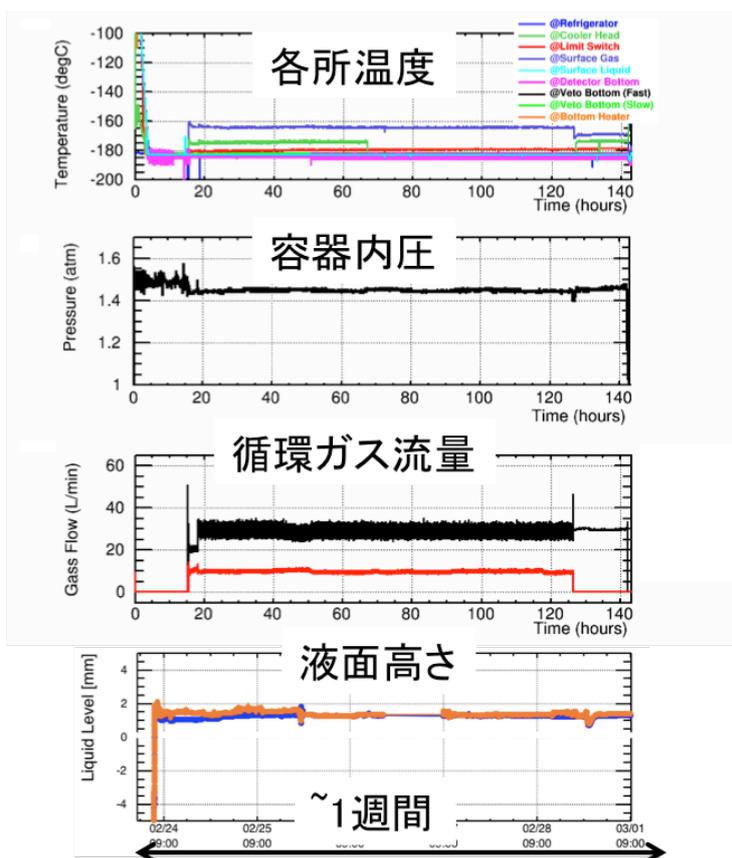


図 4.14 RunIX スロープロット

4.6.3 Ar の純度評価:窒素

200L 容器を含めた新環境でアルゴンの高純度を達成できたかどうかを議論する。ここでは窒素の混入量に関して評価を行う。1.4.2節で述べたように窒素の影響はS1の光量へ影響するため、Run期間中のS1光量を評価することで見積もることが可能である。ここでは検出器下面に配置した3つのPMTによって得られたS1の平均波形によって評価を行う。S1の平均波形は図4.15の様になる。これら3つの平均波形のslow成分の時定数を指数関数によるfittingで評価する。3つのPMTより得られる時定数の平均値のRunの間における推移を図4.16に示す。これにより実験期間中の時定数は $\sim 1.4\mu\text{s}$ を維持できており、図1.8と比較することで窒素の混入量が目標値の100ppb以下に抑制できたと示される。

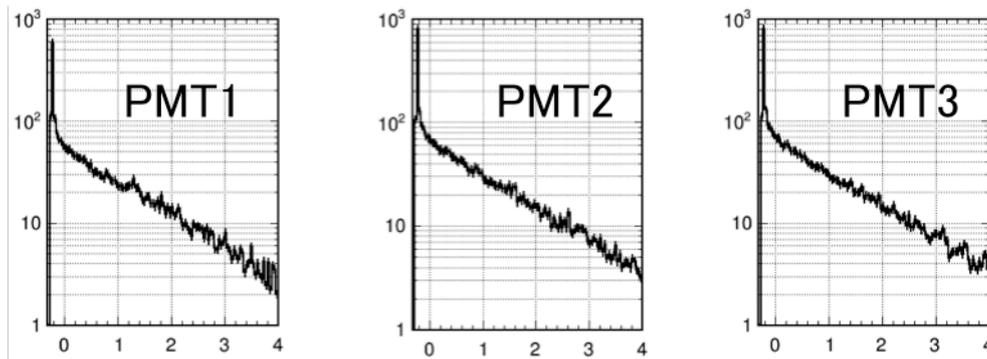


図 4.15 平均波形

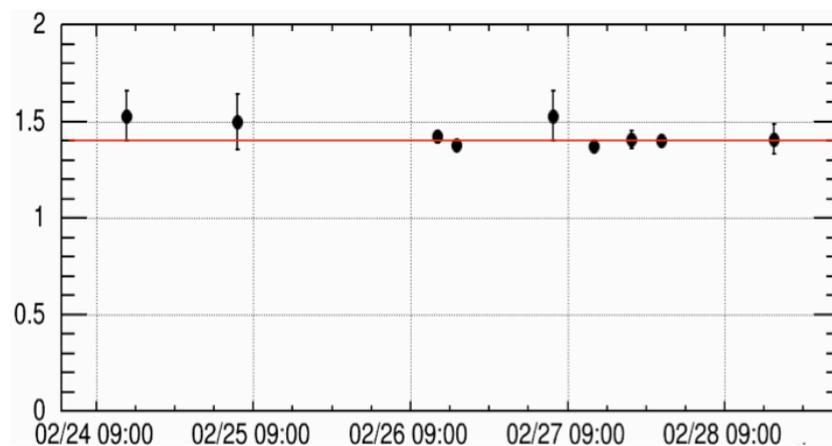


図 4.16 実験期間中における S1 波形 S 時定数の変化

4.6.4 Ar の純度評価:水・酸素

1.4.2 節で述べたように水や酸素はドリフト電子を捕獲し、S2 の光量を減少させる。こちらの純度に関しては ^{60}Co 線源によるコリメートスキャンの結果によって評価する。

^{60}Co 線源から放出される γ 線の方向を鉛によって制限した状態で、200L 容器の側面に設置することで検出器に任意の高さに位置に γ 線を当てることが可能である。今回は 6cm の間で線源を当てる箇所を 3 点で変えてデータ取得を行った。図 4.17 にその概念図を示す。矢印の位置は 4.18 や 4.19 のプロットの色と対応している。その時の Drift Time による S2 光量の変化をみるとその時定数は $872 \pm 159 \mu\text{s}$ となる。この時発光位置による光子の収集効率の影響をキャンセルするために S1 の光量は 3 つとも合うようにスケールしている。

この結果を評価すると、例えば酸素の場合、その混入量に比例した時定数 300s/ppb の電子寿命となることが知られており [3]、今回得られた値から目標の 1ppb 以下まで酸素と水の混入量を抑制できたと示される。また今回の S2 光量の変化の時定数の値で、本検出器 (高さ 30cm) にした場合の S2 光量の S1 発光位置 (高さ) による S2 光量の減衰を考察すると表 4.3 の様になる。RunIX では 10cm 程度の高さの検出器であったが、検出器の高さが 30cm になったとしても、今回の純度であれば検出器底で S1 が発生した事象においても S2 光は十分検出可能であると評価される。

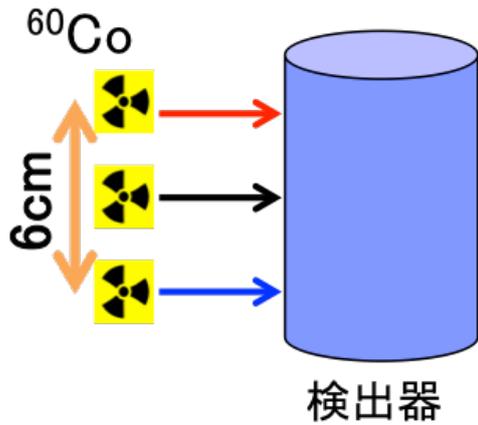


図 4.17 ^{60}Co 線源によるコリメータスキャンの概念図

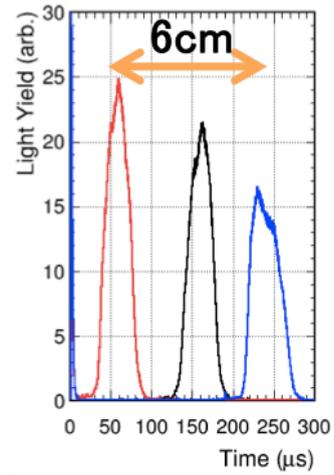


図 4.18 位置による S2 光量の変化

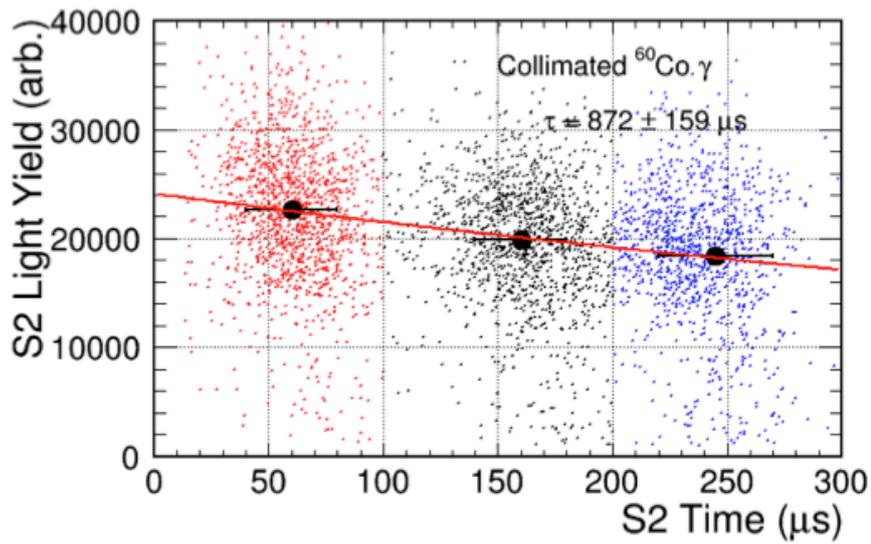


図 4.19 ドリフトタイムと S2 光量の関係

表 4.3 印加 Drift 電場と S2 検出の期待値

印加 Drift 電場 (V/cm)	200	500	1000
電子 Drift 速度 (mm/mus)	0.8	1.5	2.0
S2 光量 (30cm 検出器底)	65 %	80 %	84 %

4.6.5 まとめ

200L 容器を中心とした新テストスタンドにおいて、検出器の1週間の安定運用とアルゴンの純化と保持に成功した。スロー項目の安定性から1週間以上の Run においても検出器を安定して運用できると評価した。また純度解析の結果により、高さ 30cm 検出器底の事象においても S2 光を検出可能なレベルまでアルゴンを純化するシステムを実装できたといえる。これにより本検出器を用いて地上で行う探索感度評価実験が十分実現可能な実験環境を構築できたと示された。

4.7 液化機の製作

本節では 2016 年度に製作し、ANKOK 実験のシステムに導入した液化機の製作やその性能試験の結果について述べる。

4.7.1 液化機の必要性

旧テストスタンドでの試験や RunIX では検出器を内包する容器の上部に冷凍機を設置していた。ANKOK 実験のシステムに液化機を導入する意義は大きく 2 つある。

1 つは検出器部分とアルゴンの液化を行うシステムの部分を切り分けることである。システムの切り離しによって検出器と干渉せずに冷凍機やそれに付随する機器のメンテナンスが可能となる。これは本検出器運用による WIMP 探索実験のような地下実験設備での長期 Run そのものや、試験の準備期間中の作業の簡易化・効率化に向けて必要である。

もう 1 つの意義としてはアルゴンの純化の効率の向上が期待されるからである。以前のシステムでは 200L 容器内気相で液化を行っていたため、ガス循環の前比較的純度が悪いアルゴンとガス循環後の高純度のアルゴンの両方が液化されていた*3と考えられる。液化機の導入によりフィルター通過後に液化を行い、容器内に液が返るようになるため、純化されたガスアルゴンのみを液化して充填できる。

液化機の導入前後の ANKOK 実験の概念図の変化を図 4.20 と図 4.21 に示す。

4.7.2 液化機の仕様

今回製作した液化機の大まかな構造は以下の図 4.22 の様になっている。旧テストスタンドで使用していた 75L 容器を改造して製作した*4。75L 容器内にステンレス製の容器を設置し、液体アルゴンを溜められるようになっている。液体アルゴンに浸かったコイル内をガスアルゴンが通過する際に冷却され、液化される仕組みである。

4.7.3 液化機の運用試験 (液化 Run)

図 4.21 のような配管を構成し、試作した液化機の性能を見積もることを目的に試験 (液化 Run) を行った。ただし検出器は 200L 容器内には入れていない状態である。また配管として液体フィルター

*3 できるだけ循環後のアルゴンが液化されるよう、循環後のアルゴンガスを冷凍機ヘッドに当てるように容器内の配管を組んでいた。

*4 旧容器の改造により、開発～試験の期間の短縮を可能にした。

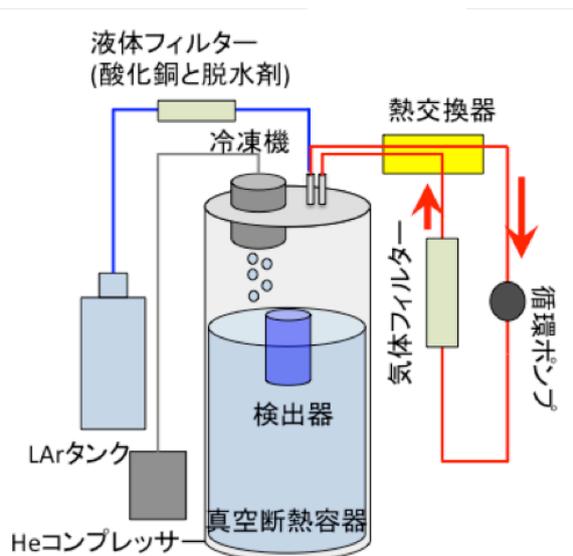


図 4.20 液化機を導入する前の実験概念図

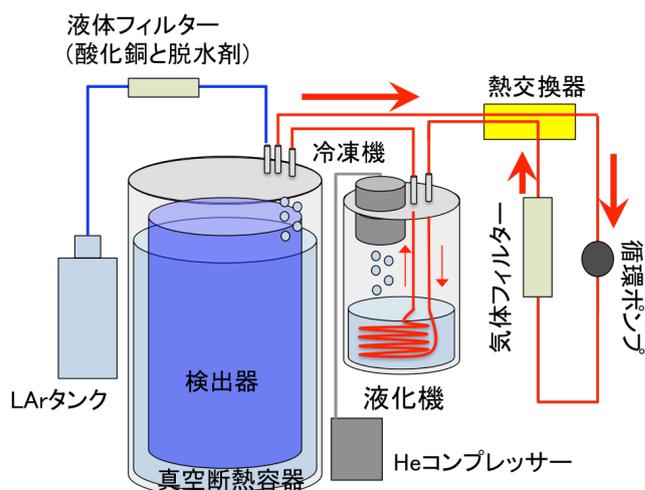


図 4.21 液化機を導入した実験概念図

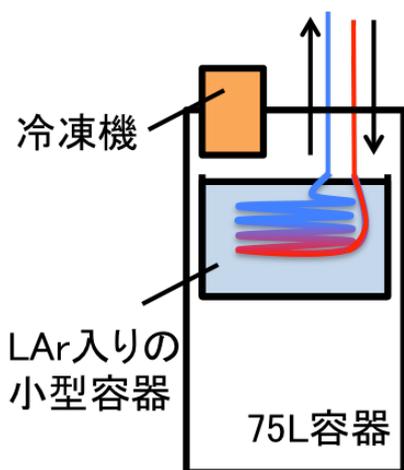


図 4.22 液化機の概念図



図 4.23 製作した液化機の写真 (容器は開いた状態)

は組み込まれているが、液化 Run では高純度の必要がなかったために運用時はフィルターを通さずにバイパスを通している。

実際に検出器を入れて行う Run に導入出来るかといった点を評価したが、特に注目した点は以下である。

- 製作した構造でそもそも 200L 容器内に液が入るのか (液化されるのか)。
- 系全体の温度や圧力のコントロールが可能か。

4.7.4 試験結果まとめ・課題

液入れに関しては、循環量を調節することで200L容器内に液体アルゴンが入ることが確認出来た。容器内の様子は内部にウェブカメラ(詳細は付録Aを参照)を入れて観測した。図4.24に200L容器内の様子を示す。左上にあるSUS管から液が出ていることが確認出来る(SUS管が白くなっているのは液化Run時には高純度の要請がなかったために真空引き期間が短かったことやフィルターを通していないために水が容器内に混入し結露しているためと考えられる)。図4.25に液化機内の様子を示す。ステンレス容器内に定規を設置し、ウェブカメラでモニターしている。液面が波立っているのはコイル内のガスアルゴンと熱交換を行っており沸騰しているためである。



図 4.24 200L 容器内に液体アルゴンが入る様子



図 4.25 液化機内の様子

また以下の図4.26に試験中のスロープロットを示す。結果としてガス循環量の他、バルブの開閉具合を調節することで200L容器内への液入れを確認できた。液入れやスローの安定性からRunに必要な最低限のスペックはクリアできていると評価したが、以下の課題が明らかとなった。

- 既存の冷凍機の冷却能力の限界

2.1.8節で述べたように、実験中は冷凍機ヘッドの温度を読み取り、PID制御によって冷却能力を調節している。その他に容器内には抵抗(120Ω)と銅板から構成される「底ヒーター」が入っており、電圧印加することによって10~100W程度の熱を流入させる事が可能になっている。今回は冷凍機の冷却能力を200W全てを使用した状態で底ヒーターの出力を変化させ、圧力・温度等が安定するように調節した。底ヒーターによる熱流入が少ないほど冷凍機の能力に余裕がある事を表すが、結果としてその余裕分は10W程度であった。これはその後の試験における配管の変更等によっては冷却能力が足りなくなる可能性を示しており、対策が必要となった。

- ガス循環量の制限

これまでのRun中のガス循環量は40L/min~50L/minとしていたが、今回の液化Runではその循環量ではアルゴンを液化出来なかった。液化容器内のコイルを十分な時間をかけて通らないため、冷却が不十分になってしまうからである。ガス循環量を~10L/minまで絞り、

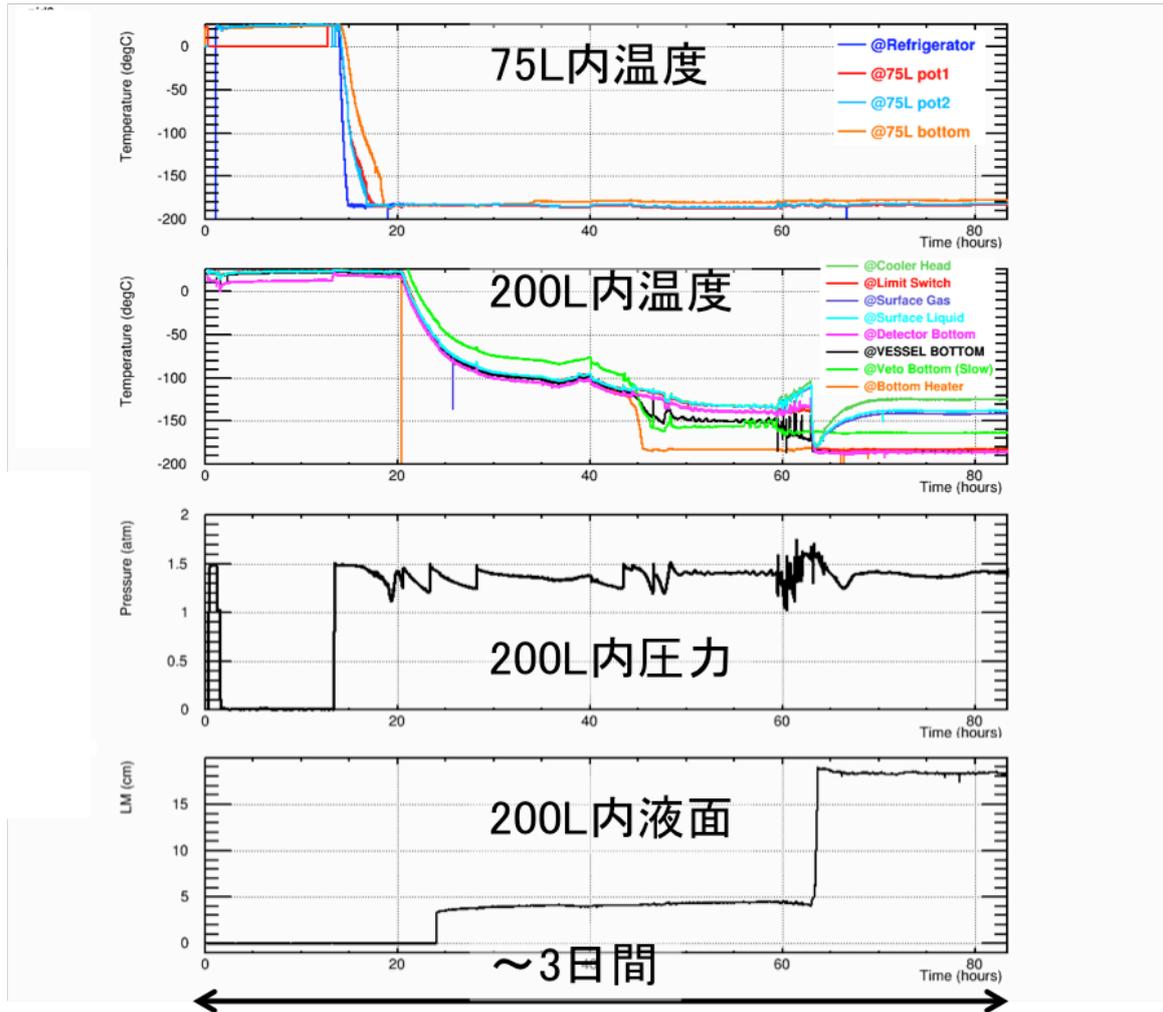


図 4.26 液化 Run スロープロット

さらに 200L 容器手前に存在するバルブを絞り循環量を $\sim 5\text{L}/\text{min}$ にすることで、より多くの液体アルゴンが 200L 容器内に入ることが確認された。

循環量が大きく減ったことによる純度の悪化も予想されるが、フィルター後の純化されたアルゴンのみを液化していることもあり、検出器による光量の評価を行わないことには評価できない。

- スローコントロールの難化

液体アルゴンが充填された真空断熱容器が 2 つになり、お互いの温度・圧力の変化に相関があることから以前よりもコントロールが難化した傾向がある。特に圧力に関しては既存のデジタル圧力計 (GC-61) では atm を単位とした時、少数第二位までしか読み取れないため、長い時間をかけた圧力変化に対して、それが上昇傾向なのか下降傾向にあるのかの判断が難しくあった。これを踏まえ、その後は高分解能でありデジタイズを行わずに電流値を出力するモデル (KP-15) を導入することにした。

また先に述べた様に、循環量の調節によってアルゴンの液化の最適化を測った。流量の調節を目的としていないバルブを使用していたため、数 L/min の調節は困難であった。これに

対しては既存のバルブに微調整の機能を加えたモデルを設計・制作することで対応を進めている。

このように幾つかの問題点はあるが、今回の試験結果により、Run への導入は可能であると判断した。余剰の熱の少なさに対しては、特に 200L 容器と液化容器間の配管断熱方法の改善を施すことで早急の対策とした*5。改善の方法としては以下がある。

- 断熱材の増強

断熱材はエアロフレックスを主に使用している。エアロフレックスは多層孔構造により断熱を行うため、単純に巻く厚さを厚くすることで断熱能力は強化できると期待される。

- 真空断熱配管の実装

真空断熱容器の様に、真空層とスーパーインシュレータを用いて断熱を行う配管を用意する。

基本的には比較的安価で十分な量を確保しやすい(納期が早い)ことや、これまでも使用している実績があることから断熱材をより厚く配管に巻くことで対応し、真空断熱配管の設計・製作を並行して進めることとした。

4.8 実験室の移転

2016年9月～10月にかけて実験室の移転を行った。本章では実験室の移転に伴う ANKOK 実験における利点や実験環境の整備の作業について述べる。これまでは早稲田大学西早稲田キャンパス 51号館 51-801室を実験室としていたが、同キャンパス 65号館 109室へと移転した。床面積は両方共 $6\text{m} \times 7.5\text{m}$ 程度と変わりはないが、天井までの高さがこれまで 3m 程度であったのが 6m 程度まで高くなった。これにより後の実験においてケーブル類の取り回しが行いやすくなった。

また実験室の移転により大きく変わった点のひとつとして、床の耐荷重性が挙げられる。これまでの実験室は建物の8階にあり、床に対する荷重制限がかけられていた ($300\text{kg}/\text{m}^2$)。移転先の実験室は最下階に存在するため、十分な耐荷重性がある。これにより環境 γ 線や中性子線遮蔽のためのシールドの設置が現実的となった。シールドの構築に関しては第5章にて述べる。実験室の移転に伴い、



図 4.27 早稲田大学西早稲田キャンパス

*5 より冷却能力のある冷凍機を実装する手もあるが、時間・納期等を考え、素早く対応できる策をとった。

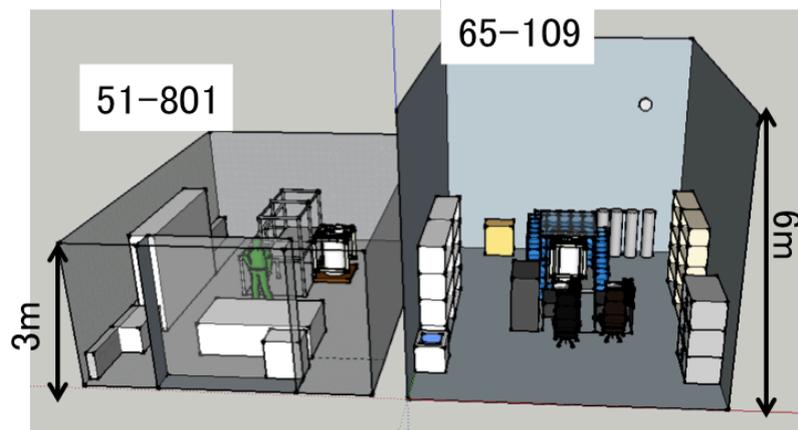


図 4.28 実験室サイズ比較

機材の搬入の他にも ANKOK 実験を行うために以下の設備の整備を行った。

- 電源設備

ポンプや各センサー機器といったものや DAQ 関連の PC・エレキ類など、100V 電源を使用する機器は数多くある。これらの機器の配置を検討し、電源の設置箇所 (4 箇所) を決定した。Run 中は様々な機器が稼働するため使用電力を管理した他、4 箇所毎にブレーカーを用意し、ある箇所で電力過多になったとしても液体アルゴンの保持の要であるポンプ類やスロー機器に影響がでないようにした。

また、冷凍機稼働において使用する He コンプレッサー用の 200V 電源も新たに用意した。

- 水冷設備

He コンプレッサーの運転には冷却用の水を 8L/min 以上の量で常に供給し続ける必要がある。移転先の実験室において昼夜問わず、20°C を程度の水道水が供給し続けられるかどうかも試験を行い、十分であることを確認した。

- 排気環境

希ガスを用いる実験において最も重要となるのが、排気環境を整備し酸欠などの事故を防ぐことである。この整備や事前の試験を行い、十分アルゴン試験が可能であることを確認した。

4.9 液化機を導入した新テストスタンドの運用実験・評価 (RunX)

新実験室への移転・整備が完了し、その環境化において ANKOK 実験が行えるかを確認するためにアルゴン試験 (RunX) を行った (詳しい配管図は付録付録 C を参照)。

4.9.1 実験の概要

期間：2016 年 10 月 18 日～10 月 24 日

RunX の目的は以下である。

- 新実験室におけるアルゴンの純化・保持能力検証

- 液化機導入後のシステムにおける検出器の安定運用
- 構築した鉛シールドによる環境 γ 線の遮蔽効果検証
- 高さ 30cm 検出器による 30cmCW 回路の運用

以下の図 4.29 に RunX のジオメトリを示す。

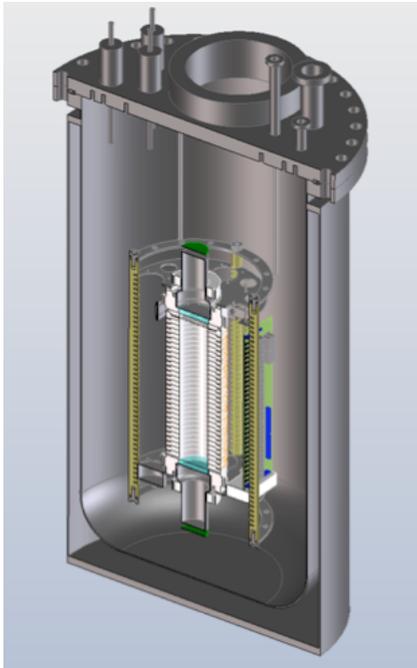


図 4.29 200L 容器と RunIX 検出器

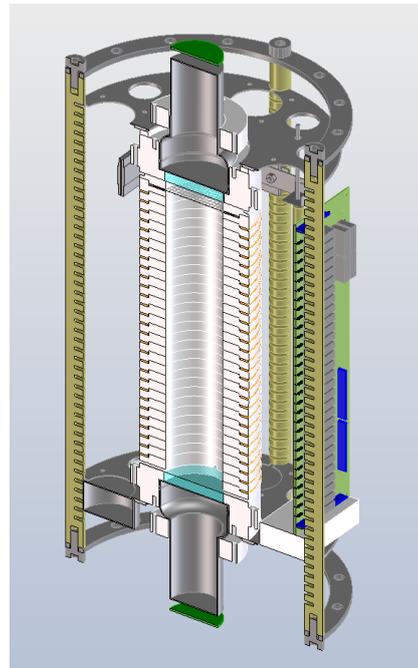


図 4.30 RunX 検出器断面図

RunX 検出器は本検出器と同等の高さの 30cm で製作した。今回の目的の一つとして 30cm の電子のドリフトを可能にする CW 回路の製作とその性能試験があったが本論文では割愛する。

4.9.2 充填の問題

RunX の実行中に明らかになった問題として充填速度に対する問題が挙げられる。これまでの試験では充填時間には約 12 時間をかけていた。今回の試験では液体の充填開始直後からその速度が遅くなっていることが確認された。原因の一つとして、液体フィルターが十分に冷却されないことが挙げられる。これは液化 Run の際にはバイパスを通して充填を行っていたためにここで明らかとなった。他にも製作した液化機による液化システムによるガス循環量の制限なども挙げられる。

検出器が 10cm 程浸かったところで一度充填を中止し、データ取得 (~1 日) を行いつつ、断熱材を追加で巻くなどの早急の対策を行ったが大きな改善は見られなかった。

充填時間を長く取ることで解決も可能ではあったが、用意した液体アルゴンの量や、実験期間を鑑みて RunX ではバイパスを通して充填を行うこととした。これにより、従来ほどの高純度のアルゴンによるデータ取得は断念した。

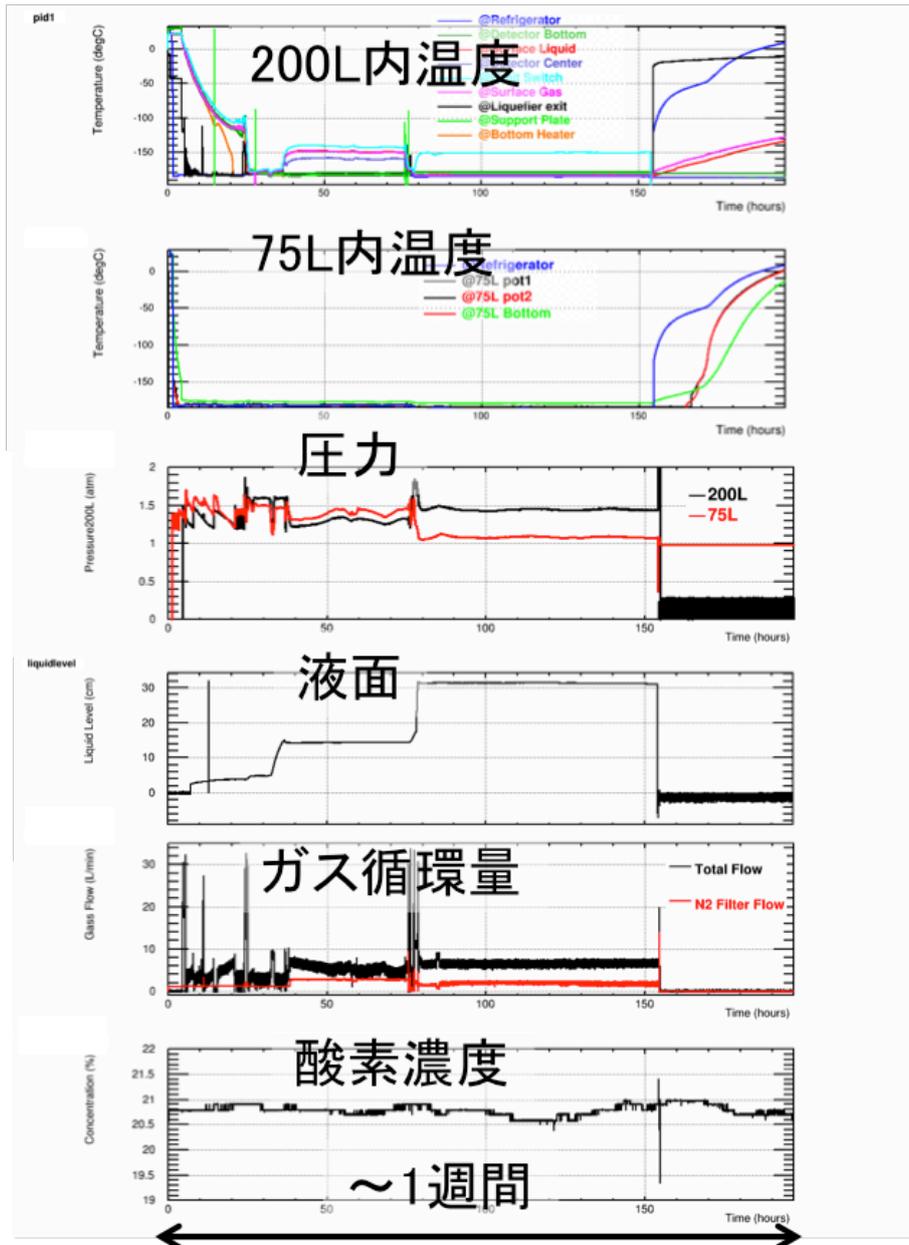


図 4.31 RunX スロープロット

4.9.3 スロー系の安定性

図 4.31 に RunX のスロープロットを示す。充填を一度停止している期間や、バイパスを通しての充填の期間は十分に安定運用出来ている。流量やバルブの開閉具合を液化 Run の状態と同様にすることで、液体アルゴンを 1 週間程度保持出来た。今回の安定性からも 1 週間以上の長期に渡る試験においても安定して運用可能と評価される。

4.9.4 まとめ・課題

今回、液化機を導入したシステムによる液体アルゴン保持は達成され、新実験室でも十分に検出器を安定運用出来ることは確認された。しかしいくつかの課題も残った。以下に明らかとなった問題とその対策を述べる。

- 充填時間の長時間化

これまでの Run では約 12 時間かければアルゴンの充填は完了していたが、前述した様に原因は液体フィルターが冷え切らない点と配管による熱流入だと考えられる。液体フィルターが冷え切らない理由は液体フィルターの内部でフィルター材が詰りを起こしていることも考えられる。RunX 後からこの問題の解決に向け、液体フィルターにフィルター材を詰め直すことや、真空断熱配管を製作し液化機～200L 容器間に実装し循環ラインの配管からの熱流入を減らすよう改善を進めている。

- CW 回路の放電によるスロー機器破損

Run 最終日に行った CW への印加試験時に放電現象が発生し、スロー項目の幾つかが読み出し不可となった。白金抵抗は複数導入していたため読み出し可能なものもあったが、200L 容器内圧力をモニターするデジタル圧力計が読み出し不可になった。ブルドン管により内圧の確認はできる状態で合ったが安全性を考慮し実験を終了した。放電先が 200L 容器であったためにトップフランジに取り付けた機器が不調になったと思われる*6。CW 回路放電対策とスロー系の復旧・改善を RunX 後から進めている。

これら充填とスローの問題を解決し、高純度アルゴンのデータ取得を目標とする RunX-II を 2017 年 2 月～3 月にかけて行う予定である。

また RunX の大きな目的の 1 つに鉛シールドの構築による ^{39}Ar 信号の観測があった。これに関しては次の第 5 章にて詳しく述べる。

*6 放電の恐れが少なくなるように CW 回路やケーブル等の配置を行ってはいたが結果的に不十分であった。

第5章 シールドの構築による環境 γ 線の低減と ^{39}Ar の観測

本章では RunX で構築したシールドによる ^{39}Ar 信号に関して述べる。はじめに ANKOK 実験において ^{39}Ar 信号を地上にて観測することの意義を述べる。その後シミュレーションを中心としたシールドの設計について記述し、実際に RunX に実装したシールド性能を実験データとシミュレーションの両方から評価する。

5.1 ANKOK 実験における背景事象とそれに対する取り組み

ANKOK 実験のような稀事象観測実験において、背景事象の量やその起因を理解することは必須である。背景事象はその起因から大きく 2 つの種類に分けられる。一つは検出器 (真空断熱容器) 外部の物質に起因する外部背景事象である。宇宙線や環境 γ 線・中性子線がこれに該当する。もう一つは検出器を構成する物質に起因する内部背景事象である。

- 宇宙線

宇宙線は容器外にシンチレータを設置することでトリガーし除くことが可能である他、地下実験施設 (神岡など) の地上よりも少ない環境下で実験を行うことが対策として挙げられる。ANKOK 実験は過去に容器外にシンチレータを設置し、宇宙線 Veto を行った実績がある (詳しくは川村修論 [7] の 4.2 節を参照)。

- 環境 γ 線

環境 γ 線は岩盤やコンクリート起因であるため、地上と地下ではその量は対して変わらない。また岩盤の組成によってエネルギースペクトラムの違いも考えられるため、実験環境毎にその量やエネルギースペクトラムを理解することが重要である。ANKOK 実験ではアルゴン検出器と比べて持ち運びしやすく、運用が簡単な NaI シンチレータを用いて環境 γ 線の測定と flux の算出を行っている (詳しくは木村修論 [8] を参照)。

- 中性子線

中性子は WIMP と同じく原子核反跳事象を起こすため、主要な背景事象となる。ANKOK 実験では地上や地下において液体シンチレータを用いた中性子測定と flux の算出に関する研究を行っている (詳しくは川村修論 [7] や鈴木修論 [9] を参照)。

- 内部背景事象

検出器を構成する部材に含まれる放射性不純物 (ウラン系列, ラドン系列, トリウム系列) から生じるものが主となる。特に数 MeV の高いエネルギーを持つ α 線による事象であっても、部材中で減速した後に検出器有感領域に入ってくる事象は判別が難しい背景事象となる。ANKOK 実験では側面に光検出器 (MPPC) を配置して検出器壁付近で発生する事象を検出し、解析的に除去する方法に関して研究しており、将来的には本検出器に実装する予定である (詳しくは中卒論 [10] や鷲見修論 [6] の 2.24 節を参照)。また本検出器の設計において各部材に対して網羅的に質量分析を行うことで放射性不純物の量の把握に取り組んでいる。この他にも ^{39}Ar がアルゴンをシンチレータと用いる検出器において主要な内部背景事象となる。

5.1.1 ^{39}Ar に関して

アルゴンの安定同位体は ^{36}Ar 、 ^{38}Ar 、 ^{40}Ar であり、 ^{40}Ar の量が最も多く、天然存在比は 99.6 % である。地表の大気中には 0.93 % の割合で含まれる。 ^{40}Ar は主に岩石中に含まれる ^{40}K の電子捕獲反応によって生成される。



アルゴンの同位体として ^{39}Ar がある。これは宇宙線との反応により ^{40}Ar と共に生成され、 β 崩壊を $1.01 \pm 0.08 \text{Bq/kg}$ [11] の割合で起こし、 ^{39}K となる。 ^{39}Ar の半減期は 269 年であり、その低減は容易ではない。 ^{39}Ar を生成する宇宙線が少ない環境下で液体 Ar を精製することで、 ^{39}Ar 量が地表の大気から精製された液体 Ar よりも少なくすることも出来る [12] が、その量が 0 になるわけではなく、暗黒物質探索実験において WIMP 事象と分離するためには解析的な手法で除くしかない。 ^{39}Ar の β 崩壊によるエネルギースペクトラムを図 5.1 に示す ([13])。以下からはこの truth のエネルギースペクトラムを用いてシミュレーションやデータとの比較を行う。

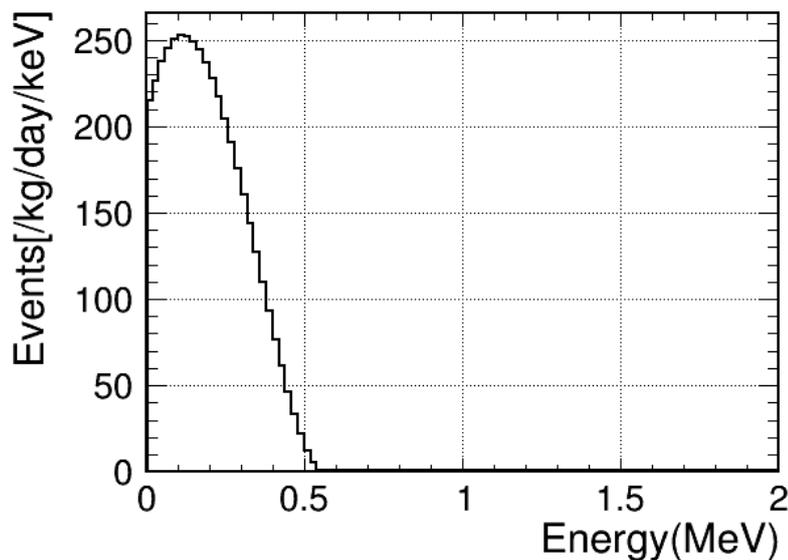


図 5.1 ^{39}Ar スペクトラム

5.2 シールド設置の意義

このように ^{39}Ar はアルゴンをシンチレータとした検出器による暗黒物質探索実験において主要な背景事象となり、その観測と事象量の理解は重要な研究課題である。ANKOK 実験においてもそれは変わらず重要である。しかし環境 γ 線による事象数の方が約 100 倍と圧倒的に多く (5.2)、 ^{39}Ar による事象は通常では観測出来ない。鉛や水といったシールドを検出器の周囲に設置し、環境 γ 線

量を低減する必要がある。75L 容器を用いた旧テストスタンドにおける試験においても真空断熱容器の周囲に鉛や水によるシールド積むことは何度か行ったが、当時の実験室の床荷重制限により十分なシールドは構築できておらず、 ^{39}Ar 事象の観測には至っていなかった。

今回のタイミングで ^{39}Ar の観測に向けてシールドの設置を行ったことには以下の様な理由がある。

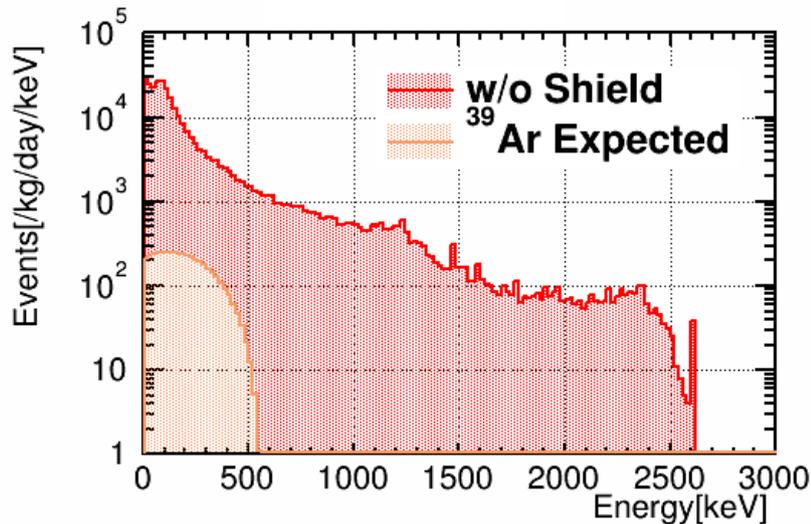


図 5.2 環境 γ 線と ^{39}Ar の信号量の違い (シミュレーション)

- シミュレーションへのフィードバックの目的

ANKOK 実験では現在、Geant4[14] をベースとし、Ar 応答を再現するシミュレーションの構築を進めている (ANKOK Detector Simulation:以下からのシミュレーションはこれを指す)。実験データの定量的な理解には必須のツールであり、探索実験を行う大型検出器のデザインにも用いられる。環境 γ 線は NaI シンチレータによる測定を行った。算出した flux 値をシミュレーションへと実装し、Ar 応答の再現を進めている (詳細は木村修論)。また中性子に関する理解も地上と地下の両方で進めている (詳しくは鈴木修論)。 ^{39}Ar を含めた内部背景事象もシミュレーションへと組み込む必要があるが、前述したように環境 γ 線事象に埋もれてしまい観測出来ない。シールドの構築により ^{39}Ar が観測できるレベルまで環境 γ 線を低減することが第一に必要である。

- 耐荷重制限の問題のクリア

4.8 節で述べたように、2016 年 9 月に実験室の移転を行った。移転後の実験室は最下階に存在するため、これまでの様な厳しい床耐荷重の制限はなく、強固なシールドの設置を行うことの現実性が高まった。

- 地上における探索感度評価実験に向けたテストスタンド構築の目処

4.6 節で述べたように、200L 容器を用いた新テストスタンドの構築には大方の目処が付き、その液体アルゴンの保持や純度保持の性能は旧テストスタンドと同様に地上探索感度評価実験には十分であると評価された。この結果により、環境 γ 線 (将来的には中性子線) に対するシールドの設計や新テストスタンドへの実装へと進むことが出来た。

5.3 シールド構築

本節では RunX に向けて行ったシールドの設計・構築に関して述べる。基本的な設計は DetSim を元に行った。前提として鉛や水のシールドは多く積むほど環境 γ 線を遮蔽出来る。しかし実装する際にはシールドと他実験機器・配管・バルブ操作等との干渉も考慮しなくてはならない(将来的にはシールドの大きさ等も考慮した上で各機器や配管設備等の配置を行う必要がある)。また調達できる鉛の量にも金額的・時間的な制限があった。本研究室では鉛を十分に保有しておらず、精々 3mm 厚のシールドを側面に設置できる程度であった。他研究室からブロック状の鉛を $\sim 2.5\text{t}$ 借用することや、シート状の鉛(3mm 厚, 1m \times 2m)を $\sim 0.83\text{t}$ 分購入することで RunX 時には最終的に $\sim 3.5\text{t}$ の鉛によるシールドの構築を行った。

5.3.1 シミュレーションによる設計

図 5.3 に 200L 容器と RunX 検出器を再現した図を載せる。前述した NaI シンチレータ測定により DetSim へ実装された環境 γ 線を等方的に入射し、検出器 fiducial 領域に落としたエネルギー量を算出し、シールドの効果の確認や設計の判断材料とした。

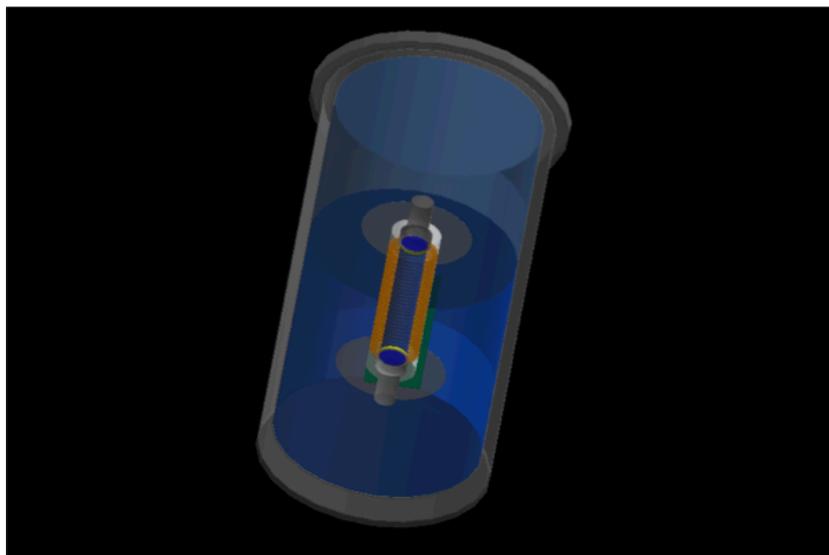


図 5.3 RunX ジオメトリの再現 (Geant4)

今回は側面に配置する鉛シールドの厚みを 5cm \sim 10cm 程度と想定してシミュレーションを行い、その効果を見積もった。図 5.4 と図 5.5 に側面に配置した円筒状の鉛シールドの厚さをそれぞれ 5cm と 10cm にした場合のエネルギースペクトラムと γ 線の到来方向の分布図を載せる。この時上下面は厚さ 5cm の 1m²の板状の鉛を設置してある。このシミュレーション結果により、側面に 5cm の鉛シールドを用意することで環境 γ 線量を 1/10 の量まで低減可能であり、10cm であれば 1/100 の量まで低減できると示される。しかしこのシミュレーション通りのシールドを実際に組み上げることは容易ではない。理由は 2 つあり、一つ目は 200 容器上部にはトップフランジがあり、W チェンバー・バルブ等といった物があるため、一枚板状の鉛を側面に配置したシールドと隙間なく設置する

ことが現状では難しいという点である。もう一つは側面に円筒状の鉛シールドを構築することの難しさである。シート状の鉛を5cm厚まで容器に巻きつけることは技術的に難しく、ブロック状の鉛を側面に塀のように積み上げるの方が現実的である。しかし容器を囲う塀の様に積み上げるには用意できた鉛の量では足りないため、図5.6の様にブロックを容器側面に密接させて積む必要がある。こういった積み方により鉛ブロック同士に隙間が生まれ、図5.5ほどの効果を発揮できないことも十分に考えられた。しかし図5.4での鉛を実装するには $\sim 1.8\text{t}$ の鉛が必要であり、図5.5の場合では $\sim 3.1\text{t}$ である。今回用意した鉛は総量 $\sim 3.5\text{t}$ であったため量は十分であり、図5.4と図5.5の間に収まるような性能のシールドは構築出来ると評価し、実装を行った。

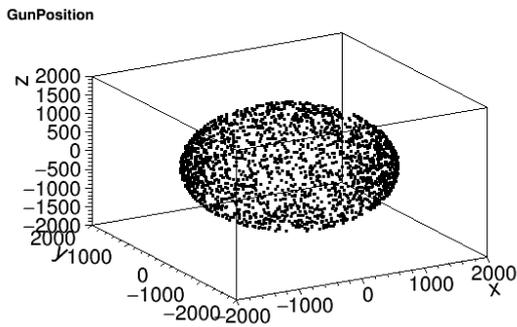
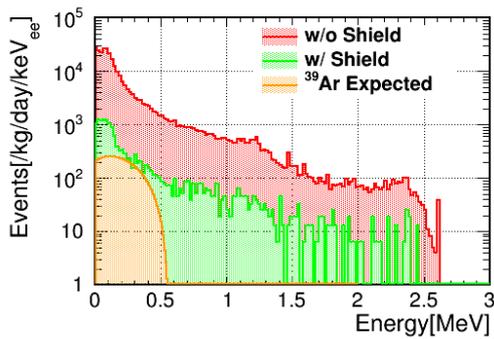


図 5.4 側面 5cm 厚, 上下 5cm 厚の場合

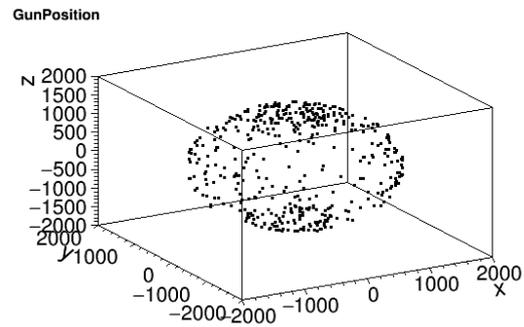
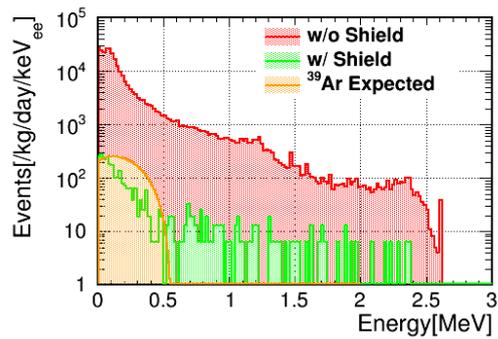


図 5.5 側面 10cm 厚, 上下 5cm 厚の場合

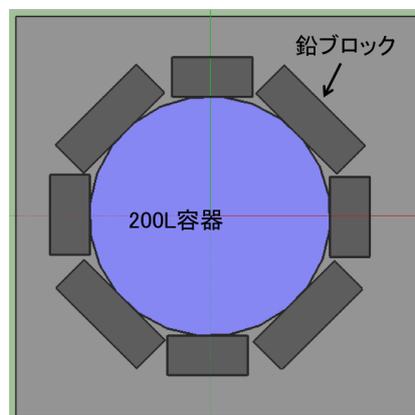


図 5.6 側面への鉛ブロックの配置

5.3.2 実装

RunX 時に構築したシールドは以下の様になる。

- 側面

ブロック状の鉛を組み合わせて構築した。全 18 段の構成になっている。各段は基本的に図 5.6 の様に上から見て八角形になっているが、段ごとに上下段とはずらして積むことにより崩れにくい強固な構造にした。19 段目、20 段目も実装する予定ではあったが、節で述べたように、充填時の問題に対して 19 段目と 20 段目に相当する箇所には断熱材を巻いていたために断念した。また RunX 中に鉛ブロック間の隙間を埋めるための対処法として図 5.12 のようなパーツを鉛シートを切って丸めることで作成した (以降このパーツはクサビ鉛と呼称する)。クサビ鉛は計 80 個程作成し、検出器と同等の高さである 7~15 段目に存在する隙間を埋めるように設置した。

また検出器特性の理解のために各種線源による γ 線や中性子線を容器側面から内部の検出器に入射する必要がある。そのため、側面の一部を他の鉛ブロックを崩さずに当てる構造を取り入れた (5.9)。

- 下面

シート状の鉛 (3mm 厚, 1m \times 2m) を 1m \times 1m に切断したものを 16 枚重ねて 48mm 厚の板を構成し、その上に 200L 容器を置いている。

- 上面

トップフランジには充填・循環ラインに繋がる配管類や各スロー機器が存在する。今回はトップフランジ架台 (4.3 参照) 上部や、配管の隙間に可能な限り鉛を設置し、5cm 厚のシールドを構成した。特に W チェンバーの部分には穴があることになる。



図 5.7 シールド構築前

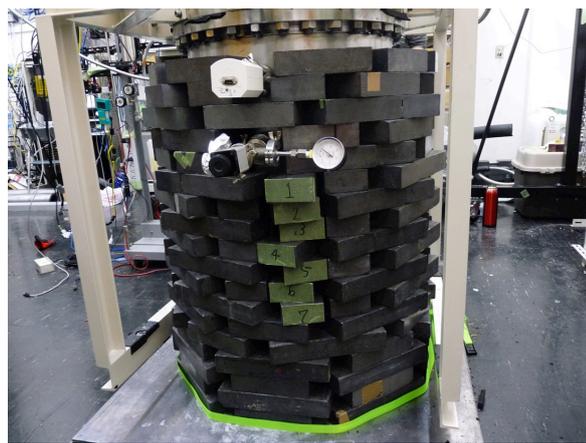


図 5.8 実装した RunX シールド

以上により上下面 5cm 厚、側面~10cm 厚のシールドを構築した。次節でその効果は詳しく論ずるが、RunX 開始の初期段階からオンラインでの解析によりエネルギースペクトラムに ^{39}Ar 事象の兆候は見えていた。それを踏まえ RunX の期間中も側面を埋める為のクサビ鉛の実装や、 ^{60}Co 線源を

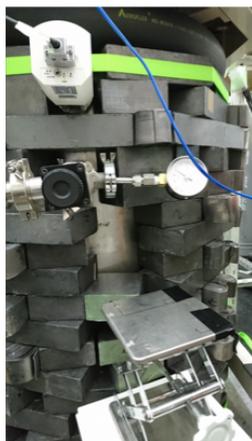


図 5.9 線源を当てるために鉛の一部を外した様子

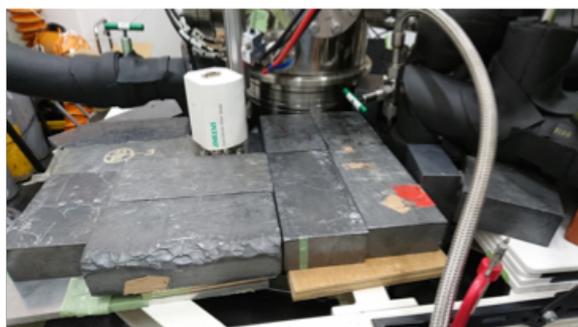


図 5.10 上面への鉛の実装



図 5.11 クサビ鉛を側面の隙間に入れた様子

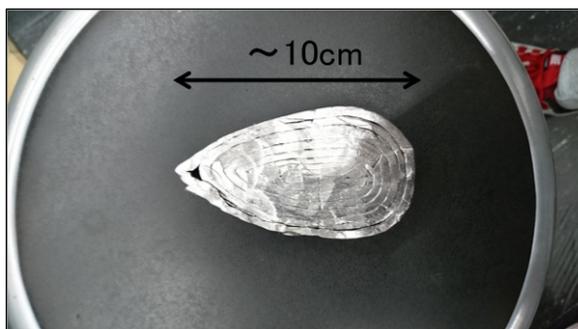


図 5.12 クサビ鉛

用いたシールドの弱い部分を探し、改善を施した。

5.4 シールド効果の評価

RunX によって取得したデータから、実装したシールドの効果を評価する。 ^{39}Ar によるエネルギースペクトラムが見えたかどうか重要な議題である。

5.4.1 エネルギー較正方法

エネルギー較正は ^{137}Cs 線源からの γ 線 (662keV) を用いて行った。図 5.13 に示すように全吸収ピーク値を Gaussian と Exponential を加算した関数で fit して求めた。 63.75 ± 0.65 [FADC counts/keV] と求められる。

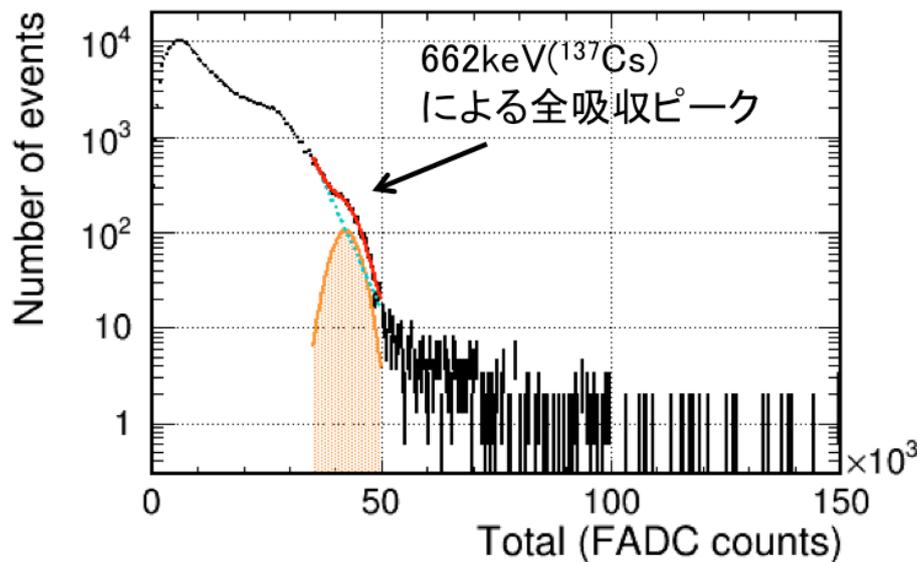


図 5.13 ^{137}Cs 線源による全吸収ピーク (662keV)

5.4.2 Background run でのエネルギー・スペクトラム

10月23日 1:56~同日 5:50 の約4時間取得を行った Background run のデータ解析を行った。

得られたエネルギー・スペクトラムに対して Veto Cut をかけている。検出器外側と容器内面の間の空間のことを Veto 空間と呼称し、粒子が入射しその領域で光子を発生させ、Veto 空間に設置した PMT(Veto PMT) で検出されたイベントを除くことを Veto Cut と呼ぶ。特に宇宙線のような高エネルギーの粒子は容器の外部から入射しそのまま検出器内部を突き抜けるため、Veto 空間でも検出器内部でもシンチレーション光を発生する。こういったイベントを Veto Cut により除いている。図 5.14 に横軸 S1 光量 (単位は FADC counts) 縦軸に S1 の Slow/Total をとった分布を Veto Cut 前後で示す。これを見ると Veto Cut により、S1 光量が高いイベントが除かれ、宇宙線を十分に落とせているといえる。この時の Cut efficiency(Cut により残る事象数の割合) は 0.52 であった。S1 Slow/Total $\simeq 0.7$ にクラスタしているイベントが環境 γ 線による電子反跳事象と考えられるが、S1 Slow/Total が高い事象が幾つか残っている。ノイズ等の影響が考えられるが、S1 Slow/Total の値を 0.5~0.85 に要請する Cut を Veto Cut 後にかけたとしてもその Cut efficiency は ~ 0.9 であり大きくは変わらないため、Veto Cut 後のエネルギー・スペクトラムを ^{39}Ar 事象の期待値と比較する。

結果は図 5.15 の様になる。200~500keV $_{ee}$ の領域において ^{39}Ar 事象に特徴的なカーブが見て取れる。しかし図 5.5 ほど有意に環境 γ 線を低減することは出来ていない。これは 5.3.2 節で述べたように、シールド出来ていない隙間が主な原因だと考えられる。また図 5.15 では RunIX 時のスペクトラムとの比較を行っている。RunX では時間的な制限からシールドなしでの Background run データは取得していないため RunIX 時のものと比較した。これをみると環境 γ 線量を 1/10 程度まで削減出来ていることが分かる。この結果と図 5.4 や図 5.5 の結果を比較すると、今回積んだシールドの量と得られたスペクトラムの結果は予想の範囲内であったと言える。

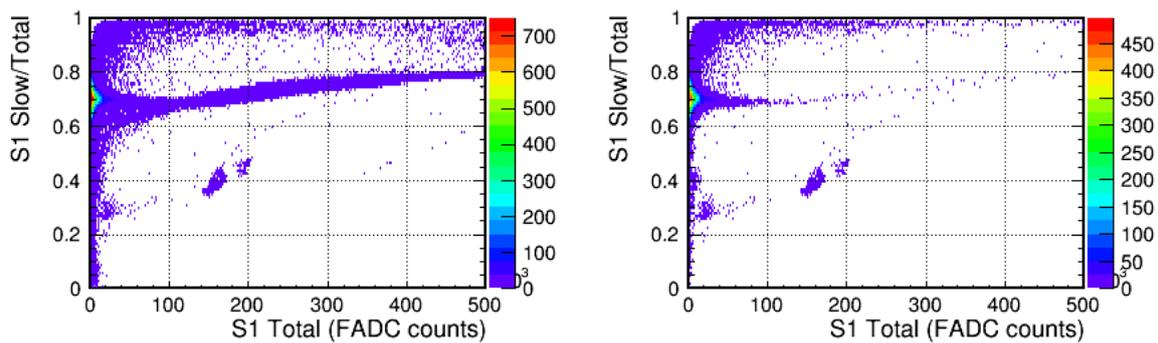


図 5.14 PSD 分布図 (左:Cut 前。右:Cut 後)

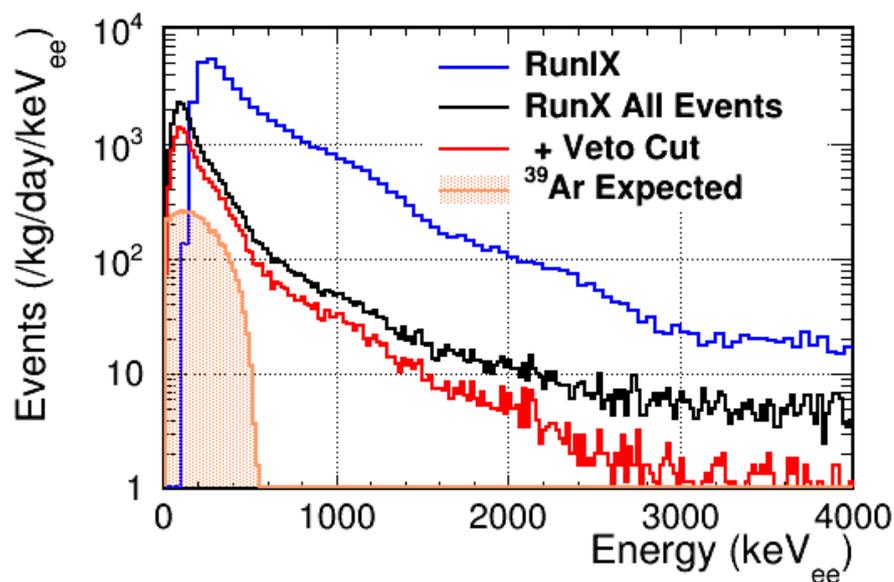


図 5.15 Background run におけるエネルギースペクトラム

5.4.3 Drift Time Cut による解析

Background run により得られたエネルギースペクトラムから、これまでの Run では見られなかった ^{39}Ar 事象の片鱗が見られたが、環境 γ 線の低減が不十分であり、図 5.1 のようなはっきりとした β 崩壊によるエネルギースペクトラムは見えていない。これに対し、Drift Time の Cut を行った。1.4.1 節で述べたように、Drift Time とは S1 光がトリガーされた時刻と S2 光がトリガーされた時刻の差をさし、検出器にかけられている電場によるドリフト電子の速度と合わせることで S1 の発光位置を知る事ができる。RunX にて構築したシールドは側面の 19,20 段目を除いたことや、上面における配管類との干渉から、下側よりも上側から検出器まで入射してくる環境 γ 線が多いと考えられる。検出器下側での事象を Drift Time Cut により取り出すことで、より ^{39}Ar 事象が顕著なエネルギースペクトラムを見られると期待される。

図 5.16 に Drift Time の分布図を示す。Veto cut 後の事象に Drift Time $30\mu\text{s}$ 以上と $50\mu\text{s}$ 以上

を要請しており、これは検出器の位置を表すと 5.17 のようになる。その時のそれぞれのエネルギー・スペクトラムを図 5.18 に示す。Drift Time の Cut をかけることにより、 ^{39}Ar 事象が顕著なエネルギー・スペクトラムの形が顕著に現れていることが分かり、特に 500keV 付近の下がり方が非常に期待される形になっている。図 5.18 に載せた ^{39}Ar 事象の期待量は Drift Time 50 μs 以上を要請した事象に対する量であるが、データの方が少なく、期待量の 70 % 程度である。これは RunX のデータは充填時の問題からアルゴンの高純度化を断念しており、S2 光が発生しないイベントがほとんどであるために Drift Time の要請では十分な Cut efficiency を得られないことが大きな原因だと考えられる(解析上 S2 光がない事象は Drift Time = 0 となっている)。

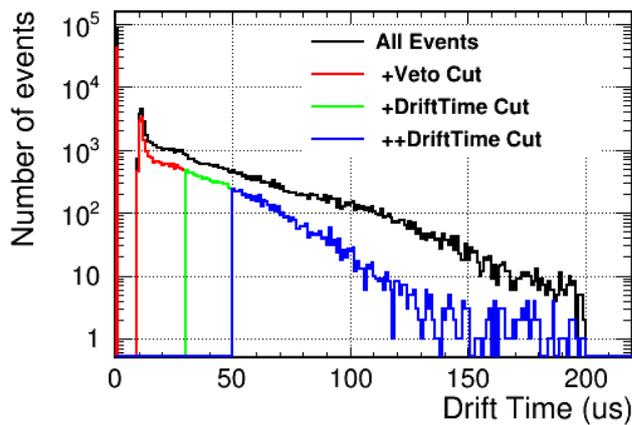


図 5.16 Drift Time の分布図

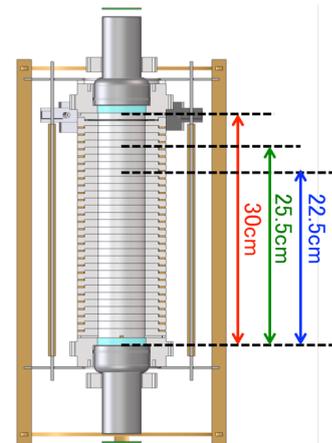


図 5.17 Drift Time Cut と検出器高さの関係

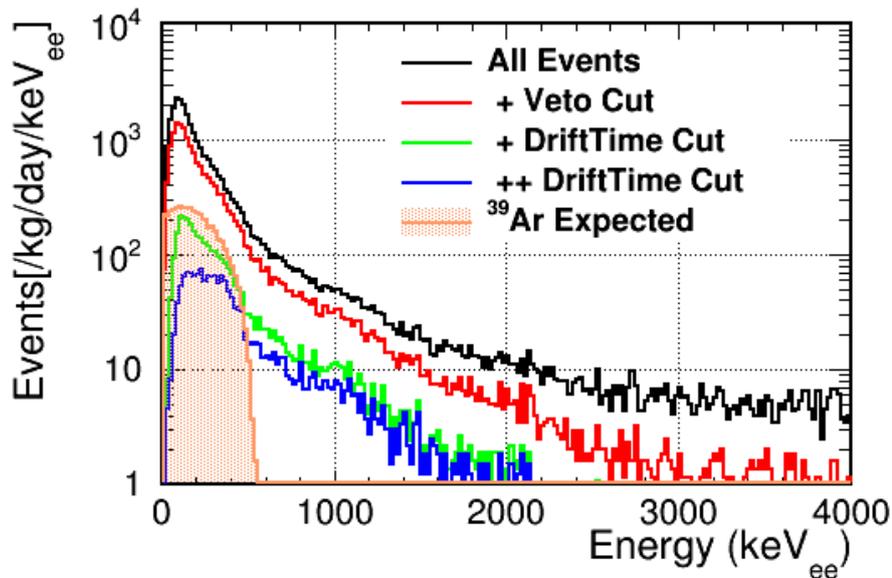


図 5.18 Drift Time Cut 後のエネルギー・スペクトラム

5.4.4 Top Bottom Ratio Cut による解析

RunX はアルゴン純度の悪いデータであったために Drift Time Cut では検出器 Z 方向の Cut efficiency が良くない。それを踏まえて S1 の Top Bottom Ratio による検出器下側事象の取り出しを行った。S1 の Top Bottom Ratio とは検出器上下面に配置されている PMT で検出された波形の S1 光量の比を以下の式 5.3 のように定義したものである。(この時上面 PMT で検出された S1 光量を”Top”, 同じく下面 PMT は”Bottom”とする。) この S1 Top Bottom Ratio(以下 TBR) が大きい値ほど検出器上側で S1 が発生した事象であり、TBR の値が小さいと検出器下側の事象であったことを表す。

$$TBR = \frac{Top - Bottom}{Top + Bottom} \quad (5.3)$$

この TBR と Drift Time の関係を示すのが図 5.19 である (Veto Cut 後)。これを元に $TBR = -0.2$ を検出器の Z 方向の中心であると見積もる事ができる。Veto Cut 後のイベントに対して TBR が -0.2 と比べての大小を判断する Cut をかけ、エネルギースペクトラムを見ると図 5.21 のようになる。検出器下側の事象 ($TBR < -0.2$) のスペクトラムを見ると ^{39}Ar 事象が顕著に現れている。

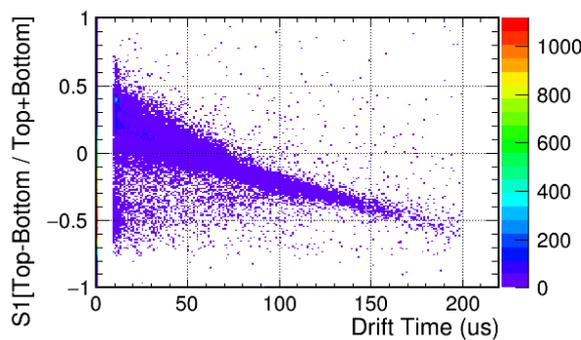


図 5.19 Drift Time と TBR の関係図 (1)

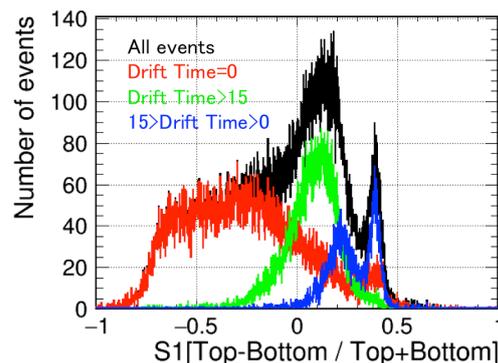


図 5.20 Drift Time と TBR の関係図 (2)

5.4.5 シミュレーションと合わせた評価

RunX データに Veto Cut をかけた時に 400keV_{ee} 付近に見られた ^{39}Ar 事象の兆候は、Drift Time Cut や Top Bottom Ratio Cut により検出器下側の事象選択を行うことで ^{39}Ar 事象であると示された。これにより実装したシールドは「 ^{39}Ar 事象を観測する」という目標を達成する性能であったといえる。本節では観測されている ^{39}Ar 事象の定量的な評価を試みる。

まずは RunX 時に構築したシールドを Geant4 により再現し、シールド設計時と同じシミュレーションを行う。図 5.22 が容器側面と下面に設置したシールドを再現した図である。上面に関しては現状のシミュレーションにはトップフランジの詳細な構造を実装していない (厚さ 3cm のステンレス板として実装している)。今回は簡易的な再現として上面に積んだ鉛と同じ重量になるような板状の鉛を実装している。シミュレーション結果が図 5.23 であり、これによって得られた環境 γ 線によ

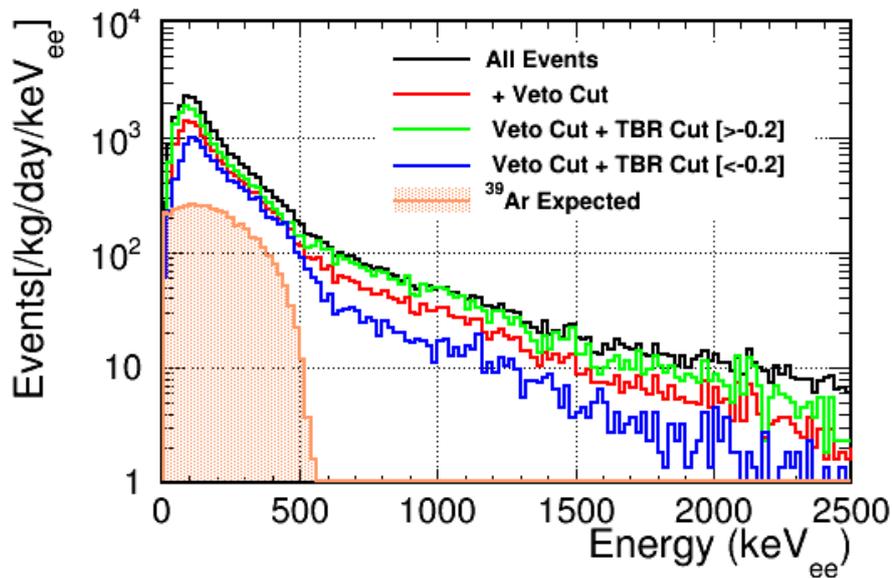


図 5.21 Top Bottom Ratio Cut 後のエネルギースペクトラム (0~2.5MeV_{ee})

る成分 (環境 γ 線テンプレート) と期待される ^{39}Ar のスペクトラム (^{39}Ar テンプレート) の2成分でデータをフィットする。またスケール前を図 5.25 に示す。

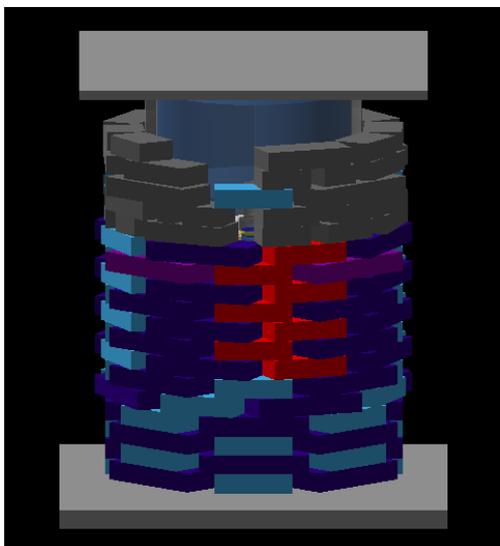


図 5.22 Geant4 での RunX シールド再現

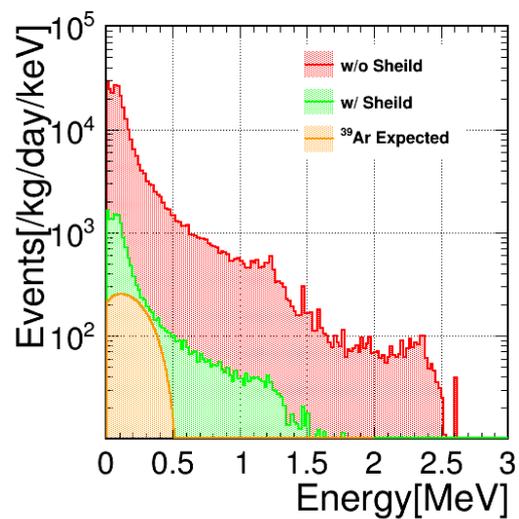


図 5.23 再現した RunX シールドの効果

フィットの評価は以下のように行った。

1. 環境 γ 線テンプレート x 倍にスケールする。
2. 200keV~1000keV の範囲でデータとシミュレーションのイベント数が一致するように ^{39}Ar テンプレートをスケールする。
3. 200keV~1000keV の範囲で各ビン (20keV/bin) で χ^2 を計算し足し上げていく。

4. 足し上げた χ^2 を自由度で割る。
5. この環境 γ 線に対するスケールファクター x を 0.01~1.0 の間で変化させ、 χ^2/ndf が最小となるスケールファクター (x_{\min}) を算出する。

χ^2/ndf 分布は図 5.24 のようになり、スケールファクター x_{\min} のときのフィット結果を図 5.26 に示す。この時の γ 線スペクトラムの Scale 値は 0.75 であり、 ^{39}Ar のスペクトラムの Scale 値は~1.3 である。フィット過程の (1) と (2) における範囲を変化させることで、 ^{39}Ar のスペクトラムの Scale 値が 1.2~1.6 程度 (仮) で変化する。テンプレートとして 1Bq/kg のレートを仮定していることからこのスケール値より、観測した ^{39}Ar のレートが 1.2~1.6Bq/kg であると示される。期待されるレートはオーダーは合っているものの $1.01\pm 0.08\text{Bq/kg}$ [11] よりも大きな値になっている他、解析のパラメータ設定による値自体の揺れが大きい。この結果に対して考察を次の節で行う。

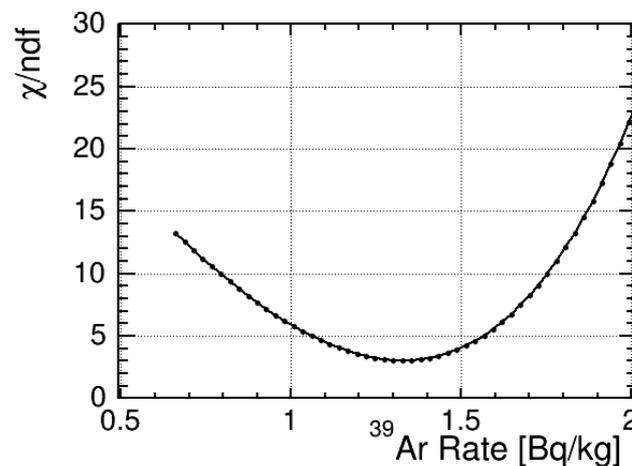


図 5.24 スケール値と χ^2/ndf の関係

5.5 環境 γ 線スケール値に関する考察

図 5.25 の 500keV 以降の環境 γ 線事象が主となる領域からも分かるように、シミュレーションによる環境 γ 線の見積もりが多いということになるが、理由は幾つか考えられる。

5.5.1 Veto Cut による環境 γ 線イベントの取りこぼし

データに対して Veto Cut により宇宙線起因の事象をカットしている。環境 γ 線による事象でも一度 Veto 空間で散乱し、検出器内でも反応している事象であった場合はカットしてしまっていることになる。この現象の詳細な理解にはシミュレーションに Veto PMT を実装し、光学的な過程を含め再現する必要がある。

5.5.2 旧実験室と新実験室の環境 γ 線 flux 値の違い

現状のシミュレーションには旧実験室での NaI データから算出した環境 γ 線 flux を実装している。新実験室での flux 値を実装する必要がある。しかし新実験室においても NaI によるデータの取得は

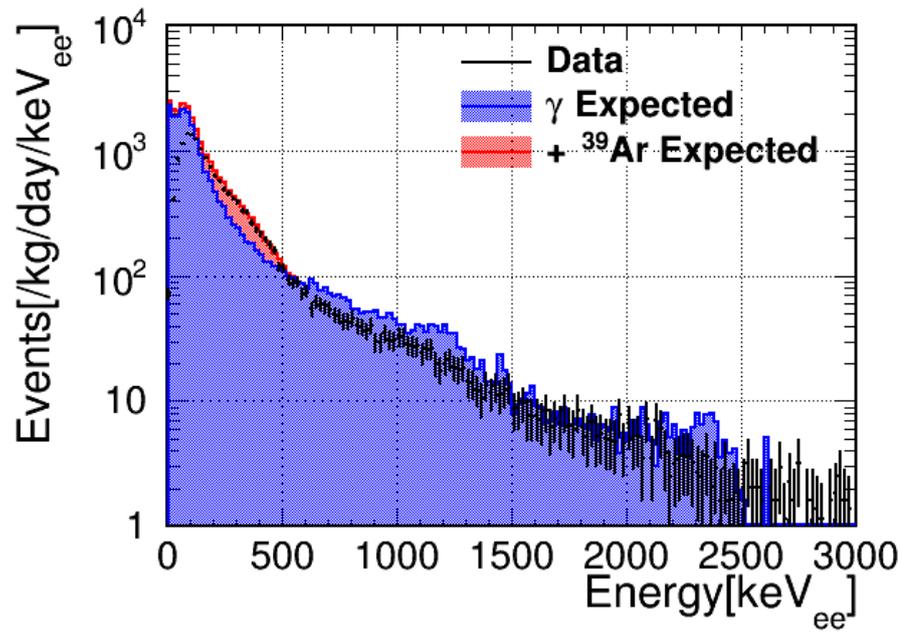


図 5.25 スケール前のエネルギースペクトラム

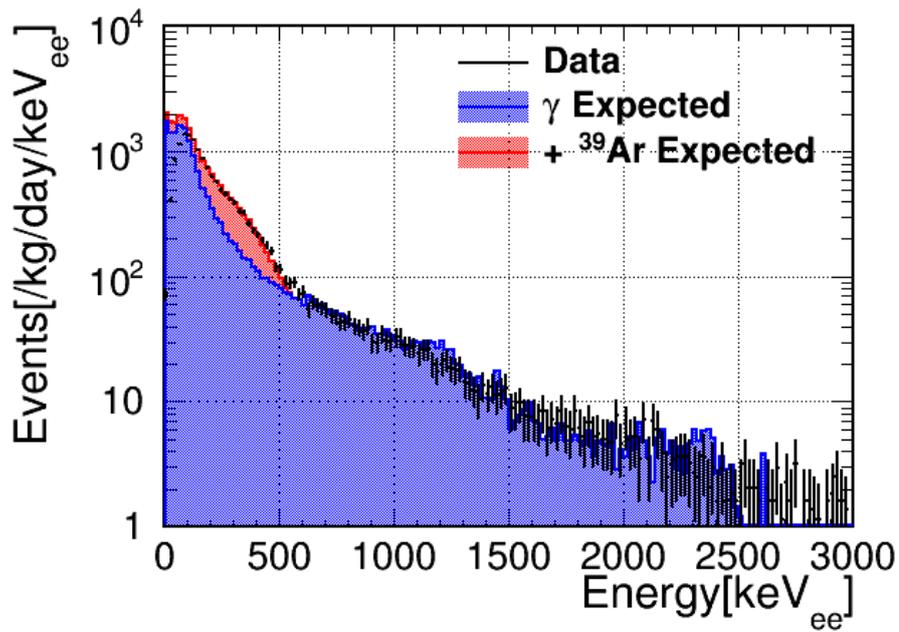


図 5.26 スケール後のエネルギースペクトラム

行っており、レートのみを見ると図 5.28 のようになる。1MeV 以下の領域においては旧実験室の 9 割程度と考えられる。

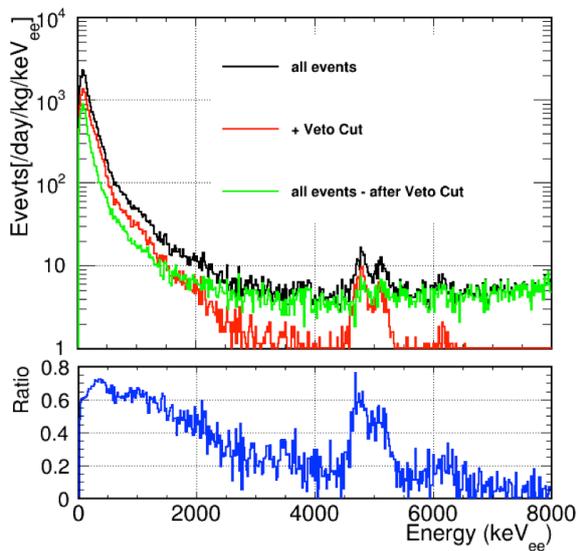


図 5.27 Veto Cut 前後の比較

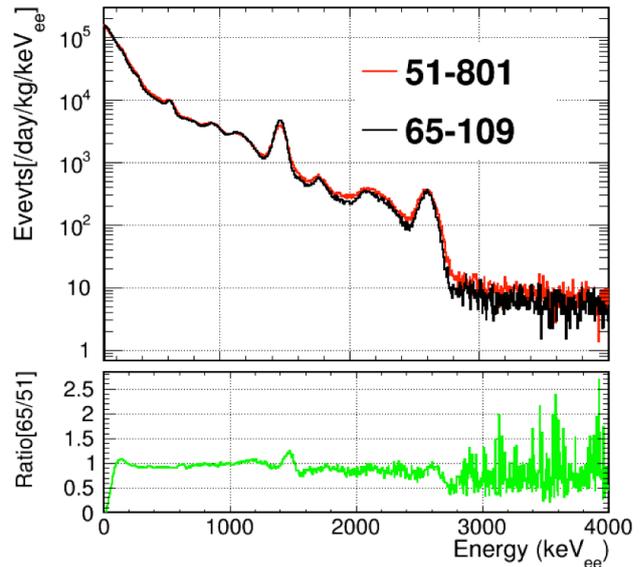


図 5.28 新旧実験室のレート

5.5.3 シミュレーションへのクサビ鉛の未実装

図 5.22 にあるように現状のシミュレーションにはクサビ鉛を実装していない。基本の形は図 5.12 であるが、RunX 時に作成した約 80 個のクサビ鉛は大きさや形の個体差が大きい。正確な再現は容易ではないが簡単な見積もりとして、クサビ鉛を挿入した部分は円筒形のシールドが構成されているとして近似したシミュレーションを行った。結果を図 5.29 と図 5.30 に示す。実際にクサビ鉛を挿入したのは 7~15 段目であるが、シミュレーション上で円筒に近似することは 7~13 段目と 7~16 段目の 2 パターンで行った。実際は 14~16 段目は外槽真空引きラインと繋がる ICF フランジがあり、それを避けるような形でブロックは積んだ。円筒近似でこの部分が埋められることで実際よりも高い遮蔽能力となってしまうため、7~13 段目のパターンでもシミュレーションを行った。結果としてクサビ鉛を実装することで 10 % 程事象が減ると予想される。

5.5.4 その他の要因

これまでに挙げた他にもデータとシミュレーションに差がある原因としては、トップフランジ構造を再現していないことや、環境 γ 線を等方的に打ち込むモデルにしている(部屋の構造を再現していない)ことなどが挙げられる。今後はこれら詳細な要素を実装し、その効果を把握する必要がある。

5.6 ^{39}Ar の見積もり $\sim 1.3\text{Bq/kg}$ (仮)の検証・考察

観測された ^{39}Ar のレートは $\sim 1.3\text{Bq/kg}$ であった。先行研究では $1.01 \pm 0.08\text{Bq/kg}$ [11]とされており、オーダーは一致しているが 5.5 節で述べた様ようなことが原因でシミュレーションの不定性が

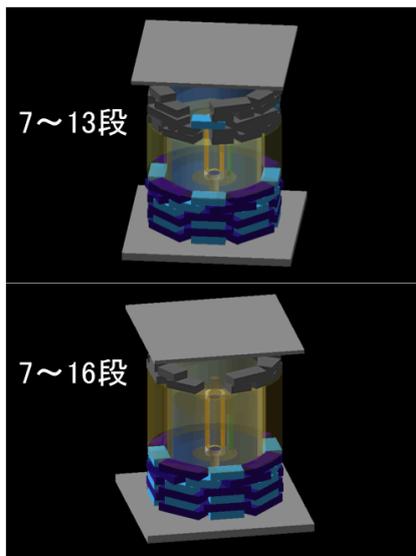


図 5.29 クサビ鉛挿入後を円筒形に近似

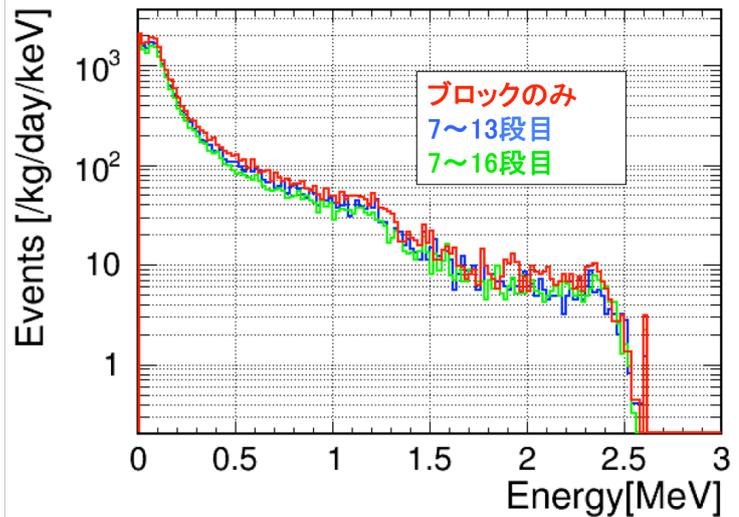


図 5.30 円筒形に近似したエネルギースペクトラム

あるために定量的な評価 (絶対値の算出) が現状難しい。 ^{39}Ar 事象が見えているという確証を高めるために以下の解析を行った。

5.6.1 検出器を上下に分けての解析

^{39}Ar 事象は検出器 Fiducial 内において、ある箇所に偏って分布することは考えにくい。ここでは検出器の上下半分ずつにおけエネルギースペクトラムを評価した。

5.4.4 節で示したように Top Bottom Ratio により検出器 Z 軸方向におけるカットが可能である。これをもとに検出器の上下半分でのそれぞれのエネルギースペクトラムから ^{39}Ar のレートを解析する。その結果が図 5.32 と図 5.33 である。環境 γ 線テンプレートのスケール値は Fiducial 全域で求めた 0.75 と固定すると上側の、 ^{39}Ar レートは $\sim 1.19\text{Bq/kg}$ であった。下側における ^{39}Ar レートは $\sim 1.62\text{Bq/kg}$ であった。

検出器下側の方が液体アルゴンによる自己遮蔽の効果で環境 γ 線事象が少なく、 ^{39}Ar 信号のスペクトラムがよく見えているが、fit 結果は上側ほど上手くはいっていない (この時の χ^2/ndf は上側 3.0、下側 11.7 であった)。これは現状の ^{39}Ar テンプレートは β 崩壊による truth のエネルギースペクトラムを用いていることが原因として考えられる。実際はこのスペクトラムは検出器の分解能の影響で”横になめる”形になる。これにより特に $500\text{keV}_{\text{ee}}$ におけるカーブが見えている検出器下側において、実験データとのズレが大きくなっていると考えられる。

結果として検出器の上下半分共に ^{39}Ar は観測出来ており、そのレートはオーダーはあっている。しかしやはりシミュレーションの不定性から、レートの絶対値は上下で 60% 近い差がある。特に環境 γ 事象が少ない下側の方がフィットが上手く出来ていない。これは 5.5 節で述べたようなシミュレーションの改善を図ることが今後の課題となる。また今回は叶わなかった高純度アルゴンによるデータ取得を行い、より細かく検出器を Z 軸方向に区切って ^{39}Ar のレート解析を行うことで、定量的な評価が進むと期待される。

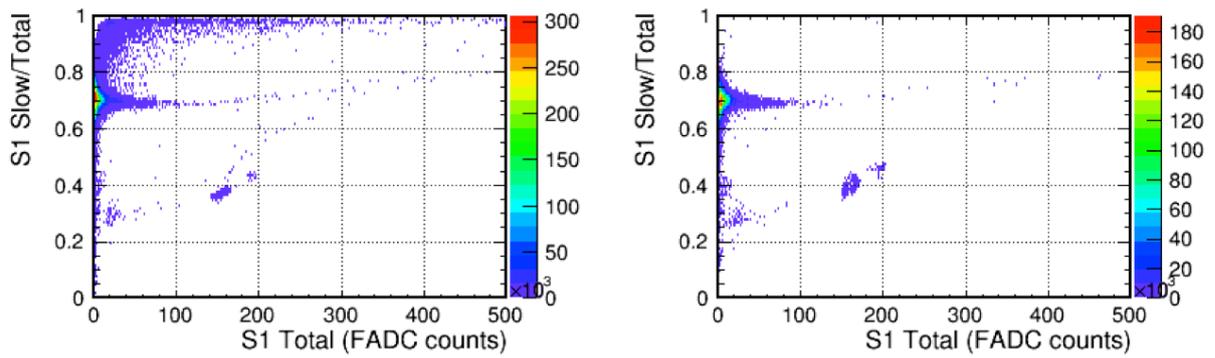


図 5.31 PSD 分布図 (左:検出器上側。右:検出器下側)

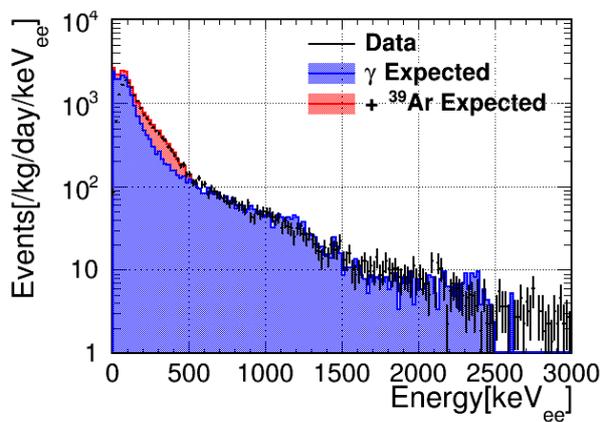


図 5.32 検出器上側

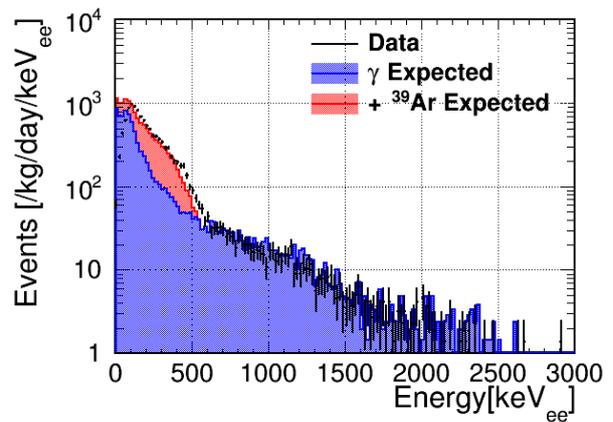


図 5.33 検出器下側

5.7 まとめ

^{39}Ar は ANKOK 実験において主要な背景事象であり、検出器内部から除去することは容易ではなく WIMP 探索において最後まで残ることが考えられる。そのため ^{39}Ar を観測しその詳細を理解する必要がある。しかし、従来までは環境 γ 線事象に埋もれ観測は不可能であった。 $\sim 3.5\text{t}$ の鉛シールドを容器周りに設置すること環境 γ 線を低減し、そのエネルギースペクトラムの評価により ^{39}Ar を初観測出来たと示された。

第6章 まとめと今後の展望

6.1 本研究により達成された事項

200L 容器の製作から始まり、トップフランジの製作、アルゴン循環システムの構築により地上における物理感度実験のためのテストスタンドの基盤は完成された。RunIX においては 200L 容器を中心とした新テストスタンドの運用試験を行い、1 週間の検出器安定運用やアルゴン内の不純物を目標値以下まで抑えることを達成した。液化機を導入したテストスタンドでの試験 (RunX) ではアルゴンの高純度化は達成出来なかったが、1 週間の検出器安定運用は達成した。また環境 γ 線を $\sim 1/10$ に低減するシールドの構築を行った結果として ^{39}Ar 信号の初観測をした。これにより ANKOK 実験は十分地下での実験が可能なテストスタンドを構築し、背景事象 (特に環境 γ 線) の理解と低減が行えていると示された。

以下に地上実験と地下実験における現状の課題を幾つか述べる。

6.2 地上における探索感度評価実験に向けた課題

- テストスタンドの構築

まずは RunX 時に明らかになった液体アルゴン充填の問題とスロー系の破損の問題を修復し、アルゴンの高純度を達成する Run を行うことが最優先である。また本検出器実装の際には PMT の本数が増える他、将来的には MPPC を約 100ch 気相側面に設置することを予定している。これに対応して HV 線や Sinal 線などのエレキ導入口を増強する必要がある他、これら多数の光検出器の安定性 (HV, Gain 等) をモニターする環境を整備することが今後の課題となる。

- シールド構築・ ^{39}Ar 解析

RunX-II において高純度のデータを取得することで、Fiducial 領域に対する Cut の効果が上がると考えられる。また Veto 空間に反射材を実装することで、Veto の効果をあげることも期待されている。これらのデータに対して今回 RunX にデータに対して行ったのと同様の解析をすることで、consistency のチェックを行う。

シミュレーションに対しては詳細部分を実装し、現実の実験環境を再現することで不定性を抑えることが課題である。実験データをよく再現するシミュレーションの構築後は、本検出器による実験においても環境 γ 線を十分に低減するシールドの設計を行う。

データとシミュレーションの双方が改善されることで、 ^{39}Ar レートをより定量的に評価出来ると考えられる。

6.3 地下における探索実験に向けた課題

今回の研究で本検出器を長期に渡って運用する基盤は整った。また 4.8 節で行ったように実験室の移転も十分可能である。地上実験からテストスタンドに変更がない状態で地下実験へと移行するのが

科学的に望ましいが、現状のテストスタンドでは地下の実験設備で実験を遂行するには不十分と考えられる点が幾つかある。特にスロー環境は地下実験に向けて、リモート操作にも対応させることが必須となる。現状はシフトを組み、24時間体制で現場で監視しているが、地下の実験施設によっては入構する時間帯が限られている場合もある。緊急時においてもリモート（もしくは自動的に）対応する仕組みを整える必要がある。

付録 A 低温用ウェブカメラの製作

容器内のモニターにはウェブカメラを用いている (図 4.24 や図 4.25)。液体アルゴン温度でも稼働することが必要であり、先行研究の結果 [15] をもとに Microsoft 社製のウェブカメラ [HD-5000 7ND-00006] を使用している。図 A.1 の様に、ケースを取り外し、フィードスルーを介して通信を行っている。

フィードスルーは pin フィードスルーを介している。USB の配線は 4 本であり、2 本は電源線、2 本は信号線となっている。これに対して容器内外の GND を一致させるためにもう 1pin を使用し、5 線使用することで安定した通信を行っている。以前は電源線と信号線の 2 本のみで PC との通信行っていたが、非常に通信が不安定でありケース分解後に液アルゴン (もしくは液体窒素) に浸けて PC との通信を行う試験をクリアしたとしても、Run 中に通信が途絶えることが多々あった。その都度ケーブルの改善を行ったが最終的には上で述べたように 5 線使う方法で安定している。

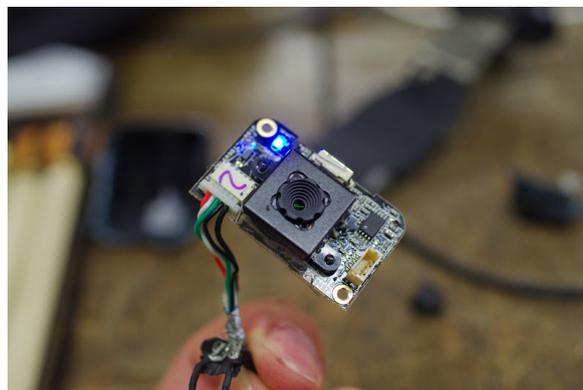


図 A.1 ケースを取り外したウェブカメラ HD-5000

図 A.1 では青色の LED が基盤に取り付けられているが、これも外す。液体アルゴンの充填中や蒸発中において容器内の温度は常温～液体アルゴン温度 (-185°C) まで変化する。同じ電圧を LED にかけても低温下になると輝度が下がるため、光源としての LED は別に用意し、印加電圧を調節可能な電源に繋ぎ使う。

付録 B 図面

B.1 200L 容器図面

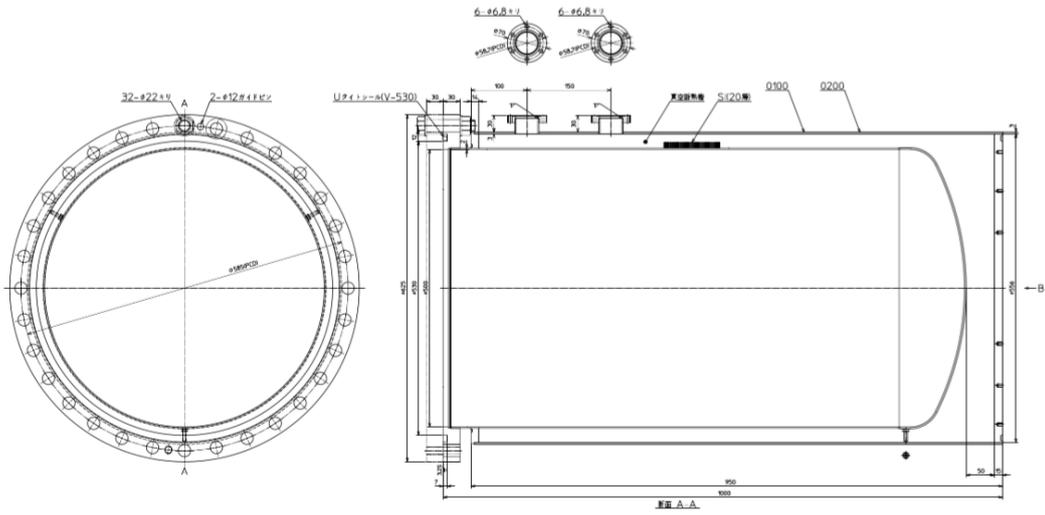


図 B.1 200L 容器図面 1

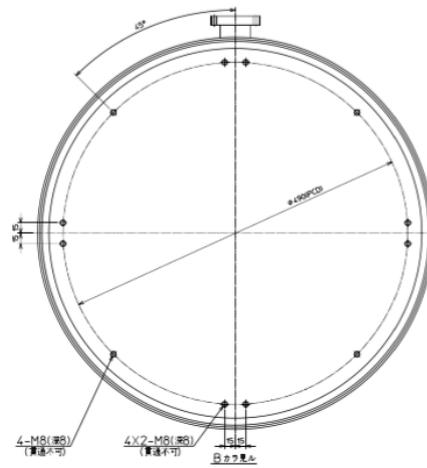


図 B.2 200L 容器図面 2

B.2 トップフランジ図面

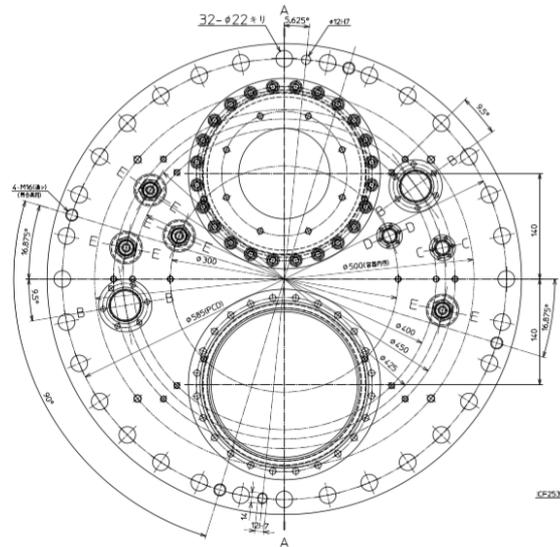


図 B.3 トップフランジ図面 1

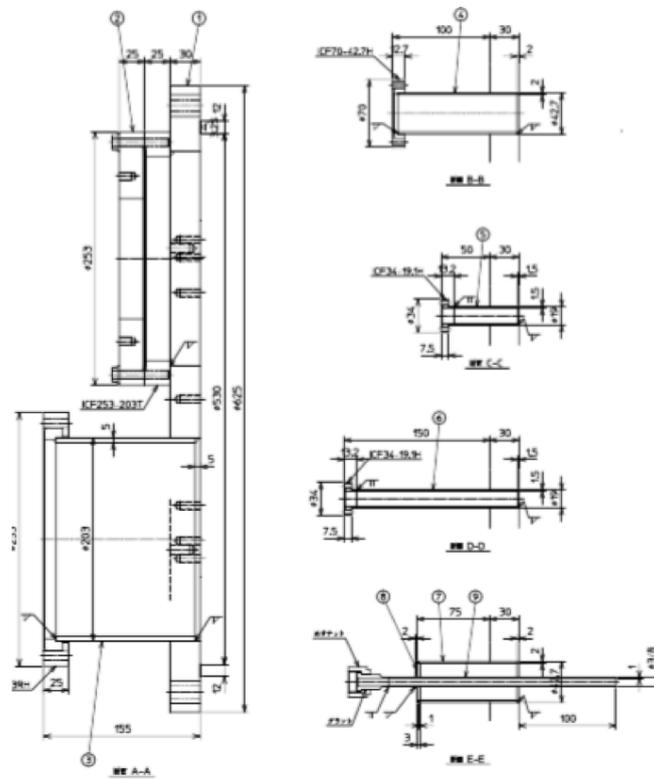


図 B.4 トップフランジ図面 2

B.3 トップフランジ架台図面

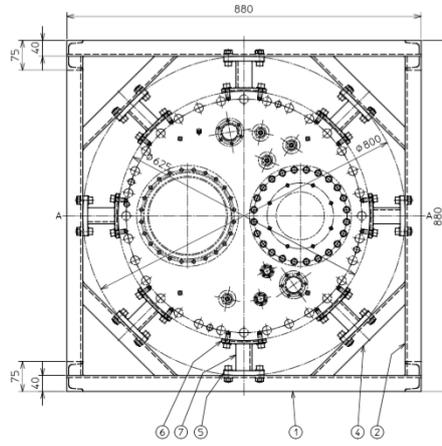


図 B.5 トップフランジ架台図面 1

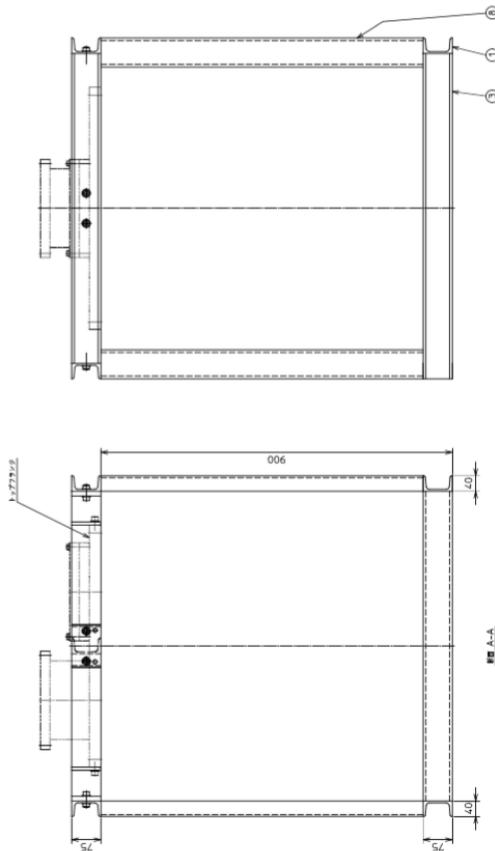


図 B.6 トップフランジ架台図面 2

C.3 RunX 配管図

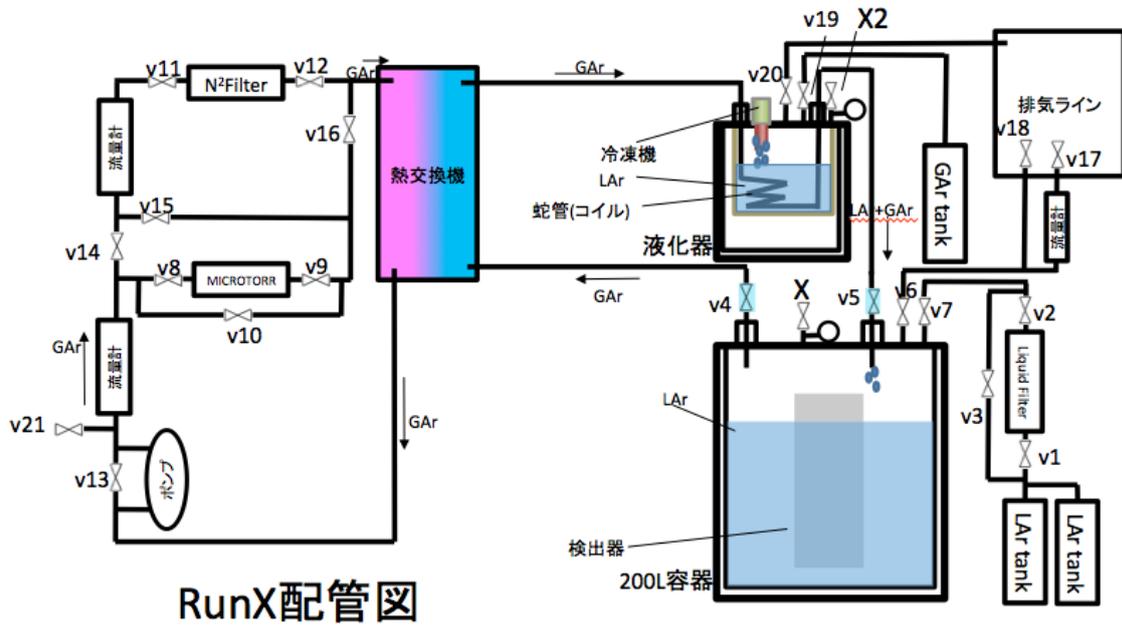


図 C.3 RunX 配管図

謝辞

本研究を行うにあたり、研究の機会を与えてくださった寄田浩平教授には深く感謝しています。次席研究員である田中雅士氏も毎日のように研究に関して相談に乗って下さいました。両名には研究の他にも様々な物事を進めていくための心構え、信念を貫いて努力することの大切さなど、色々なことを厳しく指導していただきました。お二人の指導があつてこそここまで成長出来たのだと実感しています。本当にありがとうございました。招聘研究員の蛭名幸二氏も気軽に話しかけて下さいましたし、サーバーやPC機器の管理に関する基礎的な事柄を教えて頂きました。秘書の坂本敦子さんにもとてもお世話になりました。特に修士1年時のテストスタンド関連の物品購入などが幾度も有りましたが、スムーズに進められたのも坂本さんのおかげであつたと感謝しています。

同じ ANKOK 実験のメンバーも良い人間に出会えました。鷺見貴生さんは質問に快く応じて下さったり、スライド構成や発表の仕方でいくつもアドバイスを下さいました。同期の木村真人君、鈴木優飛君と一緒に研究できたことは誇りに思います。優秀な二人と肩を並べようと奮闘した3年間は何事にも代えがたい充実した期間であつたと思っています。横山寛治君も途中で退学してしまいましたが、時々早稲田に来たときに会い、話せた時は元気そうな姿を見て安心しました。後輩の菊地崇矩君、竹村祐輝君、矢口徹磨君も M1 生として成長して行く姿を間近で見ると刺激をもらいました。B4 生の飯島耕太郎君、高橋智栄君、水江陽太君も各自の課題に悩みつつ頑張る姿は B4 時の自分を見ているようで応援する気持ちでいっぱいでした。

ATLAS メンバー実験のメンバーとも良く食事に行ったり、合宿などでの研究発表を通してお互いの研究内容に関して議論し合ったりする時間は楽しかったです。特に同期の猪飼孝君、川口佳将君、新田龍海君、亘龍太郎君らと切磋琢磨した時間は忘れません。

最後に常に生活面、精神面で支えてくれた両親に感謝します。

参考文献

- [1] 二間瀬 敏史 池内 了 千葉 柁司, [宇宙論 II 宇宙の進化 シリーズ現代の天文学 第3巻], 日本評論社, (1971).
- [2] Valentin Kozlov “Low-mass Dark Matter search with EDELWEISS: latest results and outlook” , TeVPA 2016
- [3] 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]
- [4] R.Acciarri et al., ”Effects of Nitrogen contamination in liquid Argon”, JINST 5 (2010),[DOI:10.1088/1748-0221/5/06/P06003]
- [5] ナガセテクノエンジニアリング株式会社 77KGM 冷凍機 CH-110 製品 HP [<http://www.nagase-nte.co.jp/product/cold/cold-CH-110.html>]
- [6] 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)
- [7] 川村将城, 「ANKOK 実験のための地上環境中性子束の測定と評価」, 修士論文 (2014 年度, 早稲田大学)
- [8] 木村真人, 「暗黒物質直接探索実験 ANKOK における液体 Ar 応答と電子反跳背景事象の理解」, 修士論文 (2016 年度, 早稲田大学)
- [9] 鈴木優飛, 「神岡地下実験室における液体シンチレータを用いた環境中性子測定」, 修士論文 (2016 年度, 早稲田大学)
- [10] 中新平, 「暗黒物質探索のための MPPC を用いた発光位置同定手法の基礎研究」, 卒業論文 (2014 年度, 早稲田大学)
- [11] P.Benetti, et al., ”Measurement of the specific activity of ^{39}Ar in natural argon”, Nucl. Inst. Meth. A 574 (2007) 83.
- [12] P.Agnes, et al. ”Results from the first use of low radioactivity argon in a dark matter search”, [arXiv:1510.00702]
- [13] β 線スペクトル計算ソフト ”Beta SPCLBeta-SPCTL” (Beta-ray Spectrum) , <http://www.fujita-hu.ac.jp/hid-kato/freesoft.html>
- [14] S. Agostinelli et al (GEANT4 Collaboration), Nucl. Inst. Meth. A 506, 250 (2003)
- [15] K.Mavrokoridis, F.Ball, J.Carroll, M.Lazos, K.J.McCormick, N.A.Smith, C.Touramanis, J.Walker, ”Optical Readout of a Two Phase Liquid Argon TPC using CCD Camera and THGEMs”, [arXiv:1401.0525]