

修士論文

J-PARC T98 実験の
LArTPC 検出器の設計・構築と実証

早稲田大学 先進理工学研究科 物理学及応用物理学専攻

寄田浩平研究室

5323A010-7 内海和伸

Monday 3rd March, 2025

概要

GRAMS(Gamma-Ray and AntiMatter Survey) 実験は、宇宙線反粒子観測による暗黒物質の間接探索を物理目標の 1 つとする、液体アルゴンタイムプロジェクトチャンバー (LArTPC) を用いた日米共同の気球・衛星実験である。反粒子は一次宇宙線と星間ガスの衝突による二次的な生成の他に暗黒物質の対消滅や崩壊によっても生成されうと考えられている。反粒子の二次的な生成は衝突の運動学的制限により低エネルギー領域で制限を受ける一方、暗黒物質起因の生成は制限を受けないため、両者を区別可能である。特に反重陽子は暗黒物質起因の予測 Flux が二次的な生成起因の Flux に対し、 $O(100)$ 大きいため、反重陽子を 1 事象でも観測することができれば新物理の強力な示唆となる。GRAMS 実験の R&D 要素の 1 つとして LAr と反粒子の反応の理解がある。GRAMS 実験では原子核捕獲事象後に生じるハドロン生成の有無によって粒子反粒子識別を行う。しかしながら反重陽子の原子核捕獲事象は未実証である。加えて反重陽子 1 事象の識別のためには反陽子、陽子、重陽子といった背景事象との区別も必須である。特に主要な背景事象である反陽子捕獲事象に関しては、Flux 比から 10^4 以上の識別能力が要求される。そこで我々は J-PARC K1.8BR にて LArTPC 検出器への反陽子ビーム照射によって十分量 (10^5 以上) の反陽子捕獲事象を収集する T98 実験を計画した。T98 実験は合計 24 時間のビームタイムで 2025 年 2 月に実施予定となっている。本論文では、この T98 実験のための LArTPC 検出器セットアップの設計・構築を行い、早稲田大学と J-PARC K1.8BR にて実施した宇宙線 μ による実証試験を行った結果について報告する。

T98 実験ではビームタイムは 12 時間 $\times$ 2 回の計 24 時間となっているが、加速器ビームは不安定であることを考慮し、数日間レベルで検出器を安定運用可能なセットアップを構築した。LArTPC 検出器自体は、すでに 2022 年から運用されていて宇宙線 μ による飛跡観測実績のある 30 cm 角 LArTPC (GRAMS40) 検出器をベースに用いた。T98 実験に向けた改良としては Anode を従来の 1 cm から 0.5 cm ピッチへと変更し、飛跡の分解能を向上させた。またトリガーとなる光検出器には PMT1 個に加えて MPPC 検出器を 4 個使用した。

LArTPC 検出器運用に関しては、ビームエリアでの検出器へのアクセスや安全面等を鑑みて、循環系を用いずに自然蒸発させるシンプルな方式を採用した。そのため LAr を検出器容器へ充填した直後から容器への自然熱流入によって LAr 量は減少し、生成した GAr によって容器内圧は上昇する。この気化した GAr を絶対圧弁を用いて常時排気することにより、LAr を安定かつ自動的に運用することができる。なお、LAr は極低温物質でありその沸点も -186°C 程度と極めて低い。さらに気化した際に体積が約 800 倍となるため、LAr 運用時には低温、酸欠等に必要な注意がある。加えて T98 実験をおこなう k1.8BR は地下施設であるため、実験時に生成される GAr は厳密に取り扱われる必要がある。そこで J-PARC での実証試験時には実験系において GAr の通りうる経路全てを 1 つの配管に集約し、それを $10\text{ m}^3/\text{min}$ と十分な排気能力を有する施設側排気ラインに接続するという対策をとった。加えて LAr 使用時に実験エリアに立ち入り制限を設けること、検出器容器内圧、酸素濃度をトリガーとするアラートシステムを導入するなどの対策を講じた。

結果として早稲田大学、J-PARC K1.8BR いずれの試験においても LArTPC 検出器による宇宙線 μ 信号を確認することに成功した。また液フィルターを用いて LAr の初期純度を担保し、実験実施前に容器を 2 週間以上真空引きすることによってアウトガスを減らしたことにより、30 cm の検出器をフルで突き抜けるような事象を数日間確認することができたため、1 ppb 程度の LAr 純度が維持できており、本セットアップを使用した場合に数日レベルでの急激な純度の悪化が生じないということも確認できた。また LAr の運用に関しても早稲田大学、J-PARC K1.8BR いずれの試験に関しても安定に行うことができた。連続 Data 取得可能時間は約 80 時間程度確保され、また絶対圧弁によって LAr 容器内圧は数日間の検出器 Data 取得期間中において 1.1-1.2 atm の範囲内で安定に維持され、実験系付近の酸素濃度に関しても安定に維持できたため、今回設計した T98 実験セットアップによって数日間の安定データ取得が可能であることを実証できた。

目次

1 暗黒物質	8
1.1 暗黒物質	8
1.2 暗黒物質の存在証拠	8
1.3 宇宙反粒子による暗黒物質間接探索	9
1.3.1 宇宙反粒子の重要性	10
1.3.2 宇宙反重陽子 Flux	10
1.3.3 宇宙反粒子探索実験	12
2 GRAMS 実験	16
2.1 物理目標	16
2.1.1 MeV- γ 線観測	16
2.1.2 宇宙反粒子探索	17
2.2 GRAMS 検出器	17
2.2.1 LAr の性質	18
2.2.2 LArTPC 検出器	20
2.2.3 GRAMS 検出器	21
2.2.4 粒子識別手法	22
2.3 早稲田大学における近年の GRAMS 実験マイルストーン	23
2.3.1 LArTPC 検出器の開発	23
2.3.2 気球上での LArTPC 検出器の運用	24
2.3.3 LAr と反粒子の反応の理解	24
2.4 本研究の内容	25
3 J-PARC T98 実験	26
3.1 J-PARC K1.8BR ビームライン	26
3.2 T98 実験	28
3.2.1 反重陽子生成量評価試験 (Phase-1)	28
3.2.2 LArTPC への反粒子ビーム照射試験 (Phase-2)	29
4 T98 実験 LArTPC 検出器の設計・構築	31
4.1 GRAMS40 検出器	31
4.2 T98 実験 LArTPC 検出器セットアップの設計・構築	33
4.2.1 光検出器	33
4.2.2 LArTPC 検出器	33
4.2.3 LArTPC 検出器運用システム	33
5 宇宙線 μ による LArTPC 検出器性能実証	48
5.1 宇宙線 μ 試験概要	48
5.2 宇宙線 μ 試験セットアップ	48
5.2.1 LAr テストスタンドと LAr 運用	49
5.2.2 光検出器	50
5.2.3 LArTPC 検出器	52
5.2.4 検出器の設置	54
5.2.5 早稲田大学での検出器運用および実験スケジュール	55

5.3	宇宙線試験結果	56
5.3.1	LAr 運用	56
5.3.2	LArTPC 検出器信号	59
5.4	本章のまとめと考察	64
5.4.1	本章のまとめ	64
5.4.2	LAr の運用	64
5.4.3	LArTPC 信号	67
6	J-PARC K1.8BR における LArTPC 検出器運用試験	68
6.1	J-PARC への実験セットアップの輸送	68
6.2	K1.8BR での LArTPC 検出器動作確認試験	69
6.2.1	LArTPC 検出器セットアップ	69
6.2.2	運用結果	73
6.3	本章のまとめと考察	77
7	まとめと今後の展望	79
7.1	各章のまとめ	79
7.2	今後の展望	79
	参考文献	80
	謝辞	82
A	真空断熱容器図面	83
B	B23-06 実験における LAr 運用	86
B.1	B23-06 実験容器	86
B.2	LAr 運用手法	88
B.2.1	充填口	90
B.2.2	ガス放出口	91
B.2.3	安全ポート	92
B.2.4	液排出口	92
B.3	フライト中の LAr 運用結果	92
C	T98 実験 Phase-2 における LArTPC 検出器運用結果	95
C.1	T98 実験 Phase-2 スケジュール	95
C.2	T98 実験 LArTPC 検出器運用結果	96
D	LAr 純度に関する考察	100
D.1	初期純度の達成	100
D.2	高純度の維持	101
D.3	まとめ	102

図目次

1.1	渦巻銀河 NGC3198 の回転曲線 [2]	9
1.2	暗黒物質の探索手法	9
1.3	二次起源宇宙反重陽子のスペクトラム [3]	11
1.4	暗黒物質起因および二次生成起因の反重陽子 Flux[4]	12
1.5	BESS-Polar 検出器概略図 [5]	13
1.6	BESS-Polar II で測定された反陽子 Flux および反重陽子 Flux の上限値 [6]	13
1.7	AMS-02 検出器概略図 [7]	14
1.8	AMS-02 実験で測定された反陽子 Flux[8]	14
1.9	GAPS 検出器 [11]	15
1.10	GAPS 実験コンセプト [12]	15
2.1	γ 線の観測の現状と GRAMS 実験の予測到達感度 [13]	16
2.2	AntiDeuteron のフラックスと GRAMS Target	17
2.3	Ar の相図	18
2.4	LAr の反応の概略図 [19]	18
2.5	LAr 純度と電子寿命	19
2.6	LArTPC 概略図	20
2.7	電場の大きさと LAr 中の電子のドリフト速度の関係 [21]	20
2.8	GRAMS 検出器	21
2.9	GRAMS 実験における PID 手法概略図 [13]	22
2.10	Geant4 シミュレーションによる対消滅後の荷電 π 粒子数 [14]	22
2.11	GRAMS 実験計画 [15]	23
2.12	μ の捕獲および崩壊事象のイベント例	24
2.13	2024 年度 LAr 試験スケジュール	25
3.1	LAr 中における反陽子および反重陽子の停止距離 [14]	26
3.2	ハドロン実験施設	27
3.3	K1.8BR ビームライン [23]	27
3.4	K1.8BR 拡大図 [23]	27
3.5	質量による粒子選択概略図	27
3.6	粒子選択 Cut 適用後の重陽子 Run 事象分布 [24]	28
3.7	粒子選択 Cut 適用後の反重陽子 Run 事象分布 [24]	28
3.8	左: 700 MeV/c 反陽子の捕獲地点分布 (上面から) 中央: 700 MeV/c 反陽子の捕獲地点分布 (側面から) 右: 運動量毎の捕獲位置の変化 [24]	29
4.1	GRAMS40 検出器分解図 (3D CAD)	31
4.2	GRAMS40 検出器断面図 (3D CAD)	31
4.3	TPC 内壁と TPB 蒸着後の ESR	32
4.4	(a)Anode の KiCAD による設計図 (b)Anode 実物写真 (裏面) (c)Anode 読み出し構造の模式図 [16]	32
4.5	Run22.1 セットアップ概略図	35
4.6	B23-06 実験セットアップ概略図 [25]	36
4.7	地上での LArTPC 信号と各純度における予想信号 [25]	36
4.8	上空での LArTPC 信号と各純度における予想信号 [25]	36
4.9	T98 実験セットアップ概略図	37
4.10	到達圧力と真空性能 [26]	38

4.11	200 L 容器の液面推移予測	39
4.12	Φ 50 cm 容器耐圧試験	41
4.13	容器フレーム, 架台の CAD 図および実物写真	41
4.14	架台フレームボルトおよびプレートの実物写真	42
4.15	液体フィルター	42
4.16	LAr 純度 (フィルター有)	43
4.17	LAr 純度 (フィルター無)	43
4.18	T98 実験における実際の液体フィルター位置および充填ライン	43
4.19	左: 絶対圧弁性能試験セットアップ 右: 流量と容器内圧	44
4.20	B23-06 実験の容器内圧の推移 [25]	45
4.21	電磁弁, 差圧弁, 破裂弁	45
4.22	排気配管接続概略図	46
4.23	K1.8BR エリア排気ライン	47
4.24	T98 実験実施位置と 2025 年 1 月現在の検出器位置	47
5.1	検出器全体概略図	48
5.2	LArTPC 検出器模式図	48
5.3	早稲田テストスタンド	49
5.4	セットアップ概略図	49
5.5	環境モニターシステム図	49
5.6	PMT 検出器: R6041-06	50
5.7	MPPC 検出器: S13361-6050AE-04 [28]	51
5.8	MPPC 検出器 QE (25 °C) [28]	51
5.9	MPPC 検出器 Gain (25 °C) [28]	51
5.10	PMT 板と光検出器配置	52
5.11	TPC 内壁と TPB 蒸着後の ESR (接着剤使用)	53
5.12	TPC 内壁と TPB 蒸着後の ESR (接着剤不使用)	53
5.13	Anode PAD 実物 (左)・CAD 図 (中央)・概略図 (右)	53
5.14	DAQ の流れ	54
5.15	検出器の容器内配置	54
5.16	Run24.2 実験スケジュール	55
5.17	Run24.3 実験スケジュール	56
5.18	Run24.2 環境データ	57
5.19	Run24.3 環境データ	58
5.20	[54.0,54.5] 時間の内圧変動およびガス層温度変化	58
5.21	Run24.2 取得信号例	59
5.22	10/21 17 時の LArTPC 信号	60
5.23	10/21 21 時の LArTPC 信号	60
5.24	Run24.2 再充填後の LArTPC 信号	61
5.25	Run24.2 再充填から 4 時間経過後の LArTPC 信号	62
5.26	Run24.3 における Event 例	62
5.27	Run24.3 における突き抜け事象 (上段: 11/18 18 時 中段: 11/19 18 時 下段: 11/20 18 時)	63
5.28	Run24.2 追充填後および Run24.3 充填後の液面推移の比較	64
5.29	2 時間の時間幅での液面 fit 例	65
5.30	Run24.3 実験時の液面高さに対する液面変化速度	66

5.31 液面推移予測の比較	66
5.32 上段：Run22.1 における突き抜け事象 [16] 下段：Run24.3 における突き抜け事象	67
6.1 早稲田大学からの搬出の様子	68
6.2 ハドロンホールへの搬入の様子	68
6.3 T98 実験セットアップ概略図	69
6.4 酸欠警戒区域	71
6.5 ハドロンホール内の張り紙とパトランプ一覧	72
6.6 コンクリートブロック状の環境モニター計器類	73
6.7 PreRun2 における環境 Data	74
6.8 PreRun2 における環境 Data (200 L 容器内温度)	74
6.9 PreRun2 における典型的なイベント例	75
6.10 PreRun2 における突き抜け事象 (上段：1/8 19 時 中段：1/9 7 時 下段：1/9 18 時)	76
6.11 PreRun2 における容器内圧とガス層の温度	77
6.12 PreRun2 における液面推移と Run24.2 および Run24.3 との比較	77
A.1 Φ 50 cm 容器図面	83
A.2 Φ 50 cm 容器トップフランジ図面	84
A.3 Φ 50 cm 容器用フレーム図面	85
B.1 B23-06 実験容器：容器部	87
B.2 B23-06 実験容器：トップフランジ部	87
B.3 地上での LAr 充填時の液量減少	88
B.4 気球容器耐圧試験	88
B.5 フライト前日 (2023/7/26) タイムライン	88
B.6 フライト当日 (2023/7/27) タイムライン	88
B.7 気球容器トップフランジ	89
B.8 気球容器トップフランジ (実物)	89
B.9 気球容器内部の位置関係	90
B.10 フライト前日からの液量推移	90
B.11 外圧が変化した場合の絶対圧弁の性能	91
B.12 作成した排液管	92
B.13 左：フライト中の容器内圧 右：フライト中の LAr 温度推移	93
B.14 排液時の容器内圧と外気圧	93
B.15 固体 Ar 生成試験セットアップ	94
B.16 容器内の温度および圧力推移	94
B.17 固体 Ar 生成の様子 左：減圧前 右：減圧後	94
C.1 T98 実験 Phase-2 の実際のスケジュール	95
C.2 Phase-2 の実験セットアップ写真 左：エリア外モニタースペース 中央：セットアップ概観 右：セットアップ近影	95
C.3 T98 実験 Phase-2 における環境 Data	96
C.4 T98 実験 Phase-2 における環境 Data (200 L 容器内温度)	97
C.5 0.7 GeV/c 反陽子イベント	97
C.6 1.0 GeV/c 反陽子イベント	98
C.7 0.7 GeV/c 陽子イベント	98
C.8 1.0 GeV/c 重陽子イベント	99
C.9 1.0 GeV/c K^- 中間子イベント	99
D.1 T98 実験終了後の 50 V/cm における宇宙線の突き抜け事象	101

表 目 次

2.1	Ar の基本的な性質 [18]	18
2.2	式 2.12 におけるパラメータの値 [22]	21
2.3	150 MeV/n の反重陽子に対する背景事象数	25
3.1	T98 実験 Phase-2 におけるビームタイム	29
4.1	Run22.1 および B23-06 の比較	36
4.2	200 L 容器耐圧性能	39
4.3	耐圧計算に使用する値一覧	40
4.4	T98 実験で用いる安全対策バルブ	44
4.5	T98 実験（通常運用時）における GAr 流量	46
5.1	MPPC 検出器のスペック [28]	51
5.2	TIGAr board のスペック	53
6.1	T98 実験セットアップバルブ一覧	70

1 暗黒物質

本章では GRAMS 実験グループの物理目標の 1 つである暗黒物質に関して、現在の探索状況等を簡単に述べる。

1.1 暗黒物質

暗黒物質は 1933 年に Fritz Zwicky によって提唱された。F.Zwicky は銀河団にビリアルの定理を適用し、光学観測により見積もられる質量よりも大きな質量が存在することから、光学的に観測されない重力源として、暗黒物質の存在を主張した。現在では、宇宙観測による暗黒物質の間接的な存在証拠が多く示されており、次節にて簡単に概要を述べる。

宇宙全体のエネルギー密度のうち暗黒物質が占める割合は、Planck 衛星による宇宙背景放射 (CMB) の観測結果から予想されており、2018 年の結果では暗黒物質の占める割合はおよそ 23 % という結果になっている [1]。

暗黒物質の存在は CMB の観測をはじめとする宇宙線観測結果から強く支持されているが、通常の物質との反応確率が極めて低いために直接観測は未だなされておらず、その種類や性質といった情報は不明のままとなっているが、観測事実から以下の性質が要求されている。

- 電荷を持たない：電磁相互作用をしない
- 質量を持つ：重力相互作用をする
- 安定である：寿命が宇宙年齢以上

素粒子標準模型内の素粒子で上記を満たすものとしてニュートリノがある。しかしながらニュートリノは質量が軽いため、これだけで暗黒物質の質量を説明することはできない。また、その軽さのために光速に近い速度で運動しており、重力相互作用によって集合できないため、宇宙大規模構造の形成を説明することができない。そのため、ニュートリノは宇宙暗黒物質の主成分足りえない。

暗黒物質は素粒子標準模型に含まれない新しい素粒子であることが示唆されている。したがって、その正体を解明することは新物理において重要な意味を持ち、現代物理学の最重要課題の 1 つとなっている。

1.2 暗黒物質の存在証拠

前節で述べたように暗黒物質自身は未だ見つかってはいないものの、その存在を裏付ける観測事実はいくつも存在する。本節では銀河の回転曲線に関して簡単に紹介する。

ケプラーの法則とニュートン力学を用いると、銀河の回転速度は次の式で記述できる。

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

ここで万有引力定数を G 、銀河中心からの距離を r 、銀河の回転速度を $v(r)$ 、半径 r 内の銀河質量を $m(r)$ としている。したがって回転速度 v は、銀河の外側領域に行くにつれ減少することが予想される。図 1.1 に渦巻銀河 NBC3198 の回転曲線の観測結果を示す。これを見ると銀河中心からの距離の増加による回転速度の減少は確認できない。この観測結果により、光学的に観測することができない未知の質量が銀河中心に存在していることがわかるため、銀河の回転曲線は暗黒物質の存在を示唆する証拠となっている。

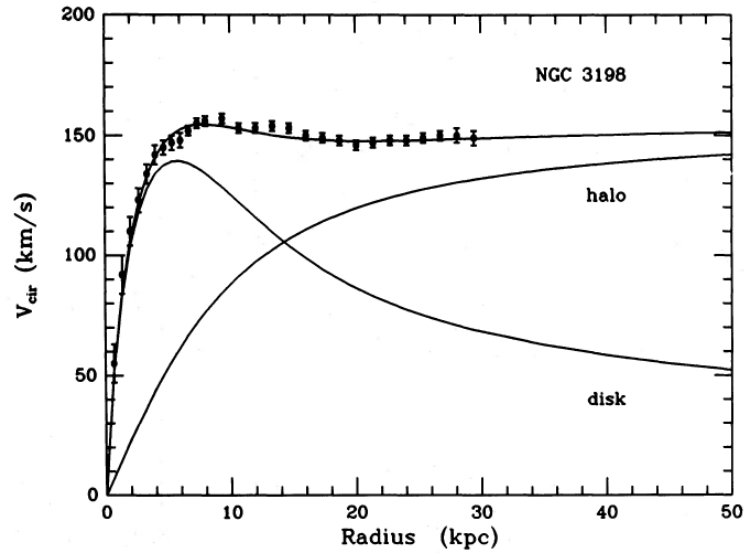


図 1.1: 渦巻銀河 NGC3198 の回転曲線 [2]

1.3 宇宙反粒子による暗黒物質間接探索

暗黒物質の候補は様々あり, それぞれの候補の対象領域に感度を有する検出器を用いた暗黒物質探索が現在世界中で行われている。探索手法は直接探索 (Direct search), 間接探索 (Indirect search), 加速器探索 (Collider search) の 3 つに大別される。この 3 つの探索手法はいずれも独立でなく, 図 1.2 に示すように 1 つのファインマンダイアグラムにおける方向の違いに過ぎない。したがって, 新物理の兆候が見えた場合には相補的であるこれらの手法それぞれで検証を行うことにより, 暗黒物質の検証や性質の解明を行うことができると期待される。

本節では加速器探索, 直接探索について概要を述べた後に GRAMS 実験が行っている宇宙反粒子による暗黒物質間接探索について述べる。

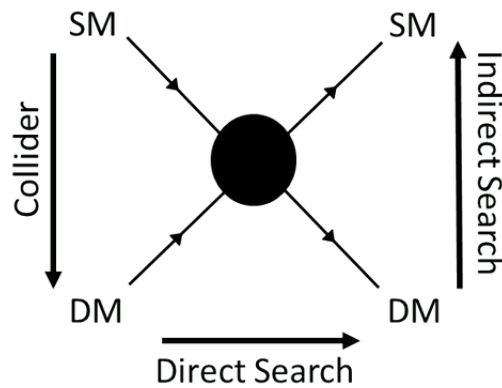


図 1.2: 暗黒物質の探索手法

加速器実験は, Large Hadron Collider (LHC) 等の高エネルギー加速器で標準模型の粒子同士を衝突させ, 生成粒子の中から暗黒物質を探す手法である。この手法では, 探索可能な質量領域は加速器の性能によって制限を受ける。そのため探索領域を高質量側に広げることは困難である一方で, 発見時には質量や断面積といった性質を精密に測定することができるという利点がある。

直接探索は、標準模型の粒子と暗黒物質が相互作用した際に生じる光、電離電子、熱等を観測することにより暗黒物質を検出する手法である。暗黒物質の質量が小さい場合には散乱エネルギーが小さく検出が困難になるが、散乱をみるため探索可能な質量領域に上限値は存在しない。そのため直接探索は加速器探索と質量領域の面で相補的である。

間接探索は、暗黒物質の崩壊や対消滅によって生じる標準模型粒子を観測することによって探索を行う手法である。この手法では暗黒物質の質量を決定することはこんなんであるものの、観測対象が標準模型内粒子であるため、検出器と観測標的との反応は理解できる。また、Flux が正確に測定できた場合に暗黒物質のモデルに制限を加えることも出来ると考えられている。GRAMS 実験も暗黒物質起因の宇宙反粒子を用いた間接探索実験であり、本節でこれについて述べる。

1.3.1 宇宙反粒子の重要性

宇宙から降り注ぐ粒子の中には反陽子、陽電子等の反粒子が含まれている。これらの反粒子は一次宇宙線が銀河内を伝搬する際に星間ガスと相互作用することにより二次的に生成され则认为されている。生成された宇宙線反粒子は、銀河系や太陽圏を伝播して地球に到達するまでに様々な物理現象の影響を受ける。したがって、宇宙線のフラックスを測定することは、宇宙線の伝播モデルや太陽変調を理解する上で非常に重要である。

また、暗黒物質の対消滅や崩壊によって反粒子が生成される可能性も示唆されている。二次的な反粒子は衝突の運動学によって低エネルギーでの生成が制限されるが、暗黒物質起因である一次的な反粒子はこの運動学的制限を受けないため、二次的な反粒子との区別ができる可能性がある。陽電子や反陽子は AMS, BESS 実験等ですでに観測されており Flux の測定が行われている。しかしながら、二次生成の Flux が暗黒物質起因の予測 Flux よりも大きいため、これらを識別することは難しい。一方で反重陽子に対しては、二次生成 Flux が暗黒物質起因の予測 Flux よりも小さいため、現在反重陽子探索による暗黒物質の間接探索が注目されている。次節では反重陽子の Flux について述べる。

1.3.2 宇宙反重陽子 Flux

先述のように反重陽子は新物理探索の良いプローブとなる。本節では、一次宇宙線と星間物質の相互作用に起因する二次生成反重陽子の Flux、および暗黒物質起因の反重陽子予測 Flux について述べる。

- 二次起源

天の川銀河中心からの位置 $\vec{r}$ における、単位体積、単位時間、核子あたりの運動エネルギーあたりに生成される二次起源の反重陽子の生成数 Q^{sec} は以下の式で表される [3]。

$$Q^{sec}(T_d, \mathbf{r}) = \sum_{i \in \{p, He, \bar{p}\}} \sum_{j \in \{H, He\}} 4\pi n_j(\mathbf{r}) \int_{T_{min}^{(i,j)}}^{\infty} dT_i \frac{d\sigma_{i,j}(T_i, T_d)}{dT_d} \Phi_i(\mathbf{r}, T_i) \quad (1.2)$$

ここで $\Phi_i(\mathbf{r}, T_i)$ は各宇宙線粒子種 i の Flux に対応しており、この値はかなり高い精度で求められている。また、 j は星間物質 (InterStellar Medium) の成分を表しており、星間物質に関しては中心から半径 20 kpc、厚さ 100 pc の銀河円盤上に一様に分布しているとする仮定が入っている。また $\frac{d\sigma_{i,j}(T_i, T_d)}{dT_d}$ は、核子あたりの運動エネルギー T_i を持つ宇宙線粒子 i と ISM 成分 j が衝突し、核子あたりの運動エネルギーが T_d である反重陽子を生成する微分断面積を示している。上記の式で定義される二次反重陽子源スペクトル $Q^{sec}(T_d)$ について、 (p, p) , (p, He) , (He, p) , $(\bar{p}, p)$, $(\bar{p}, He)$ の 5 つの生成チャンネルの総和を個々の割合とともに以下の図 1.3 に示す。

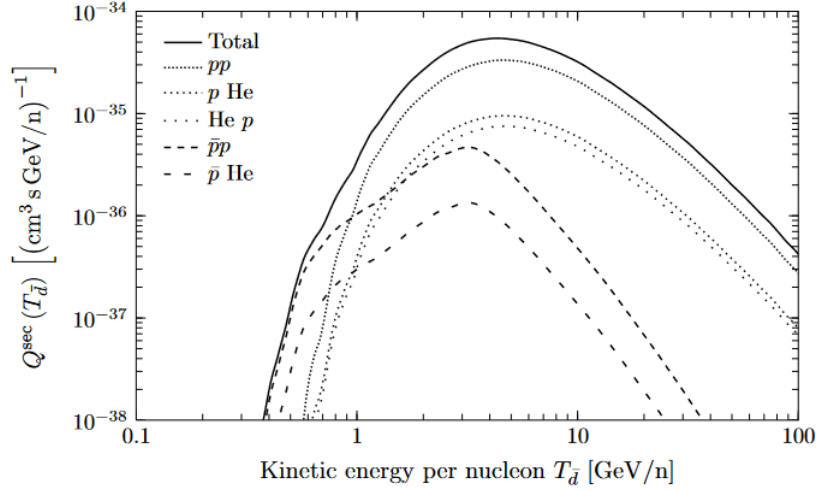


図 1.3: 二次起源宇宙反重陽子のスペクトラム [3]

$T_{\bar{d}} \geq 1 \text{ GeV/n}$ 領域において、最も寄与が大きいのは pp 衝突における反重陽子生成である一方で、 $T_{\bar{d}} \leq 1 \text{ GeV/n}$ 領域においては反陽子を含む生成チャンネルが支配的となっている。これは入射陽子が反重陽子を生成する（バリオン数保存の観点から $pp \rightarrow pppn\bar{p}n$ 反応をおこす）ために必要なエネルギーが $T_{\bar{p}}^{\text{thres}} = 16m_p$ と大きい値である一方で、反陽子と ISM との相互作用によって反重陽子を生成する場合には、最終的に 2 つのバリオンが追加されるだけであり、生成の閾値が $T_{\bar{p}}^{\text{thres}} = 6m_p$ と低い値となるためである。

- 一次起源

一次的に生成される反重陽子の起源として、超新星爆発, primordial black hole(PBH), 暗黒物質の対消滅や崩壊などが提唱されている。ここでは暗黒物質起因の反重陽子 Flux について述べる。

暗黒物質対消滅起因の反重陽子の生成数を以下に示す。

$$Q_{\bar{d}}^{DM,ann}(\mathbf{r}, E_{kin}^{\bar{d}}) = \frac{1}{2} \left(\frac{\rho(\mathbf{r})}{m_{DM}} \right)^2 \langle \sigma \mu \rangle_f \frac{dN_f^{\bar{d}}}{dE_{kin}^{\bar{d}}} \quad (1.3)$$

ここで $\rho(\mathbf{r})$ は位置 $\vec{r}$ における暗黒物質密度, m_{DM} は暗黒物質質量, f は $\chi\chi \rightarrow b\bar{b}$ or W^-W^+ 等の対消滅のチャンネル, $\langle \sigma \mu \rangle_f$ はチャンネル f における速度平均された対消滅断面積に対応しており, $\frac{dN_f^{\bar{d}}}{dE_{kin}^{\bar{d}}}$ は対消滅事象における反重陽子の多重度に相当する。

上記の式から得られる反重陽子のスペクトラムに対して、伝搬過程を考慮することによって一次起因, 二次起因の反重陽子 Flux を求めることができる。宇宙線の伝搬過程は Fokker-Planck 方程式によって以下のように記述される [4]。

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = Q(\mathbf{r}, p) + \nabla \cdot (D_{XX} \nabla \psi - \mathbf{V} \psi) + \frac{\partial}{\partial p} p^2 D_{pp} \frac{\partial \psi}{\partial p} - \frac{\partial}{\partial p} \left[\psi \frac{dp}{dt} - \frac{p}{3} (\nabla \mathbf{V}) \psi \right] - \frac{\psi}{\tau} \quad (1.4)$$

ここで, $\psi(\mathbf{r}, p, t)$ は位置 $\mathbf{r}$ における粒子の総運動量あたりの宇宙線密度であり、一次もしくは二次宇宙線の発生源項は $Q(\mathbf{r}, p)$ として表される。また, D_{XX} , $\mathbf{V}$, D_{pp} は伝搬パラメータである。最後の項 $\frac{\psi}{\tau}$ は、崩壊によって失われる粒子を考慮した値となる。先述の発生源項を使用することで、反重

陽子のフラックスを計算することができ、これは図 1.4 に示されている。図 1.4 の左右のプロットは、暗黒物質が対消滅し $b\bar{b}$ と W^-W^+ となる場合の反重陽子 Flux を示している。暗黒物質の質量が増加するにつれて、ピークが右にシフトし、Flux が減少することが確認できる。さらに、低エネルギー領域において、暗黒物質対消滅による反重陽子 Flux が背景事象となる二次起因の反重陽子 Flux よりも 1 桁または 2 桁ほど大きいことがわかる。

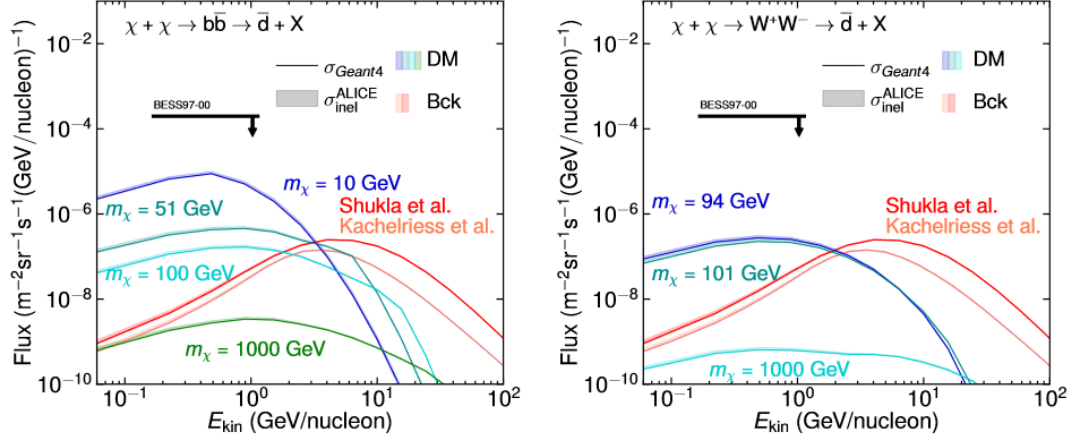


図 1.4: 暗黒物質起因および二次生成起因の反重陽子 Flux[4]

1.3.3 宇宙反粒子探索実験

宇宙反粒子の Flux は極めて小さく、また地表面に到達する前に大気と相互作用してしまう。さらに低エネルギー粒子の場合は地磁気からめとられてしまい地上での観測が困難である。そのため、宇宙反粒子探索においては大きなアクセプタンスを持つ検出器を高高度で長期間運用する必要がある。本節では気球・衛星を用いた宇宙反粒子探索実験について、BESS-Polar 実験、AMS-02 実験、GAPS 実験の 3 つを紹介する。

• BESS-Polar 実験

BESS-Polar 実験は、超伝導スペクトロメータによる反陽子スペクトルの精密測定、宇宙線反ヘリウムおよび反重陽子の探索、各種一次宇宙線および大気宇宙線の観測を目的とした気球実験である。前身の BESS 実験 (Balloon-borne Experiment with a Superconducting Spectrometer) はカナダ北部およびアメリカにて合計 10 回の飛翔実績があり、2002 年以降は南極周回長時間飛翔用に検出器を改良し、2004 年 12 月 (BESS-Polar I) に約 8.5 日、2007 年から 2008 年 (BESS-Polar II) にかけて約 24.5 日 (太陽活動極小期) と計 30 日以上南極フライトを行った。

検出器は、超伝導ソレノイドマグネット、内部飛跡検出器 (JET/IDC)、TOF カウンター (TOF)、エアロジェルチェレンコフカウンター (ACC) から構成されており、以下に示す概略図 1.5 のようになっている。

BESS-Polar 検出器は、薄肉超伝導ソレノイドの中に同心軸上に大型飛跡検出器を配置することによって、大面積立体角、薄型で宇宙線に対する透過性、優れた運動量分解能、複数の粒子識別能力等の特徴を持つ検出器となっている。BESS-Polar 測定器では粒子の質量を同定することにより粒子の識別を行っている。上下の TOF シンチレータで粒子の速度 β を測定し、上下の TOF シンチレータおよび JET チェンバーを用いて dE/dx の測定を行う。さらに、薄肉

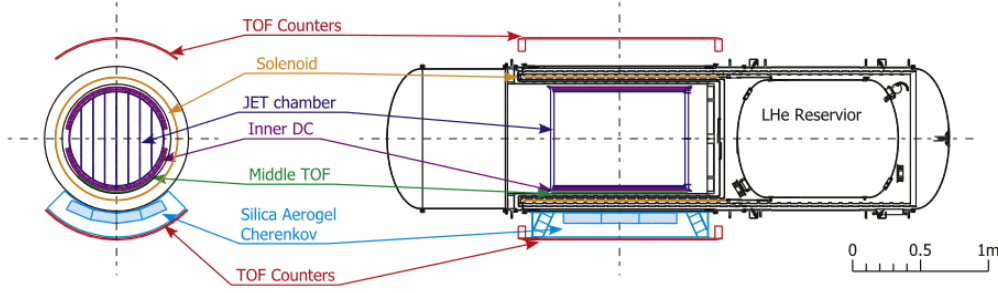


図 1.5: BESS-Polar 検出器概略図 [5]

超伝導ソレノイドに囲まれた内部飛跡検出器からわかる曲率半径によって Rigidity を測定し、粒子質量を求めることで粒子識別が可能となる。また粒子・反粒子識別は飛跡の湾曲方向により同定可能である。

$$p = 0.3ZeBr \quad (1.5)$$

$$R = \frac{pc}{Ze} = 0.3Br \quad (1.6)$$

$$m^2 = R^2 e^2 Z^2 \left(\frac{1}{\beta^2} - 1 \right) \quad (1.7)$$

ここで一様磁場を B , 曲率半径を r , 電荷 Ze , 粒子質量を m , 光相対速度を β , Rigidity を R としている。

先述の通り BESS-Polar 実験では約 30 日間の観測を成功させており、反陽子の Flux 測定および反重陽子 Flux の上限値を与えている。以下の図 1.6 に BESS, BESS-Polar 実験で測定した反陽子 Flux および BESS-Polar II 実験が与える反重陽子の上限値を示す。BESS-Polar II 実験では反重陽子候補は検出されなかったものの、0.163-1.100 GeV/n の領域において、 $6.7 \times 10^{-5} (\text{m}^2 \text{sr s GeV/n})^{-1}$ の上限値を与えている。

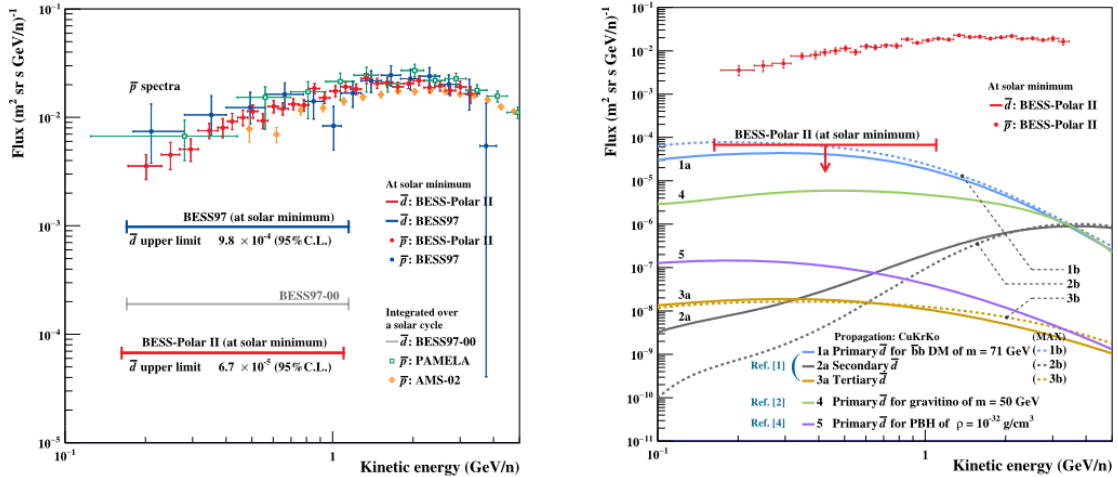


図 1.6: BESS-Polar II で測定された反陽子 Flux および反重陽子 Flux の上限値 [6]

● AMS-02 実験

AMS-02 実験 (The Alpha Magnetic Spectrometer) は、GeV から数 TeV の領域において荷電粒子宇宙線を、高精度で長時間観測し、初期宇宙起源の反物質や、暗黒物質の対消滅シグナルの存在を探ることを目的とした衛星実験である。図 1.7 に概略を示す AMS-02 検出器は国際宇

宙ステーション（ISS）に設置されており、2011 年から運用されている。AMS-02 検出器は、永久磁石、TRD、ToF、シリコン検出器、RICH、ACC、ECAL によって構成されており、 β , dE/dx , Rigidity, 電荷等の入射粒子の物理情報を測定し、粒子識別を行うことが可能である完璧な粒子検出器である。

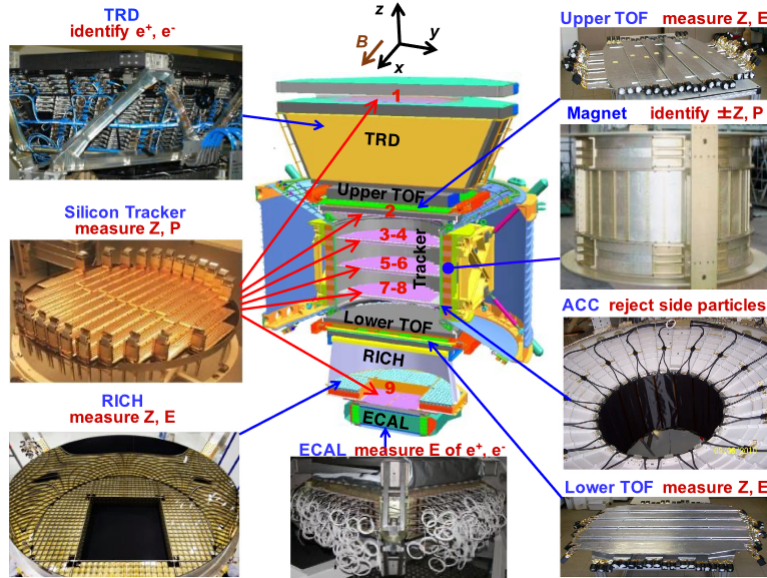


図 1.7: AMS-02 検出器概略図 [7]

この検出器は現在もデータ取得を継続中であり、反陽子観測においては二次起源の予測される Flux を考慮した上で、暗黒物質起因の反陽子の観測の可能性を示唆する結果を出している。図 1.8 に AMS-02 実験で測定された反陽子 Flux を示す。

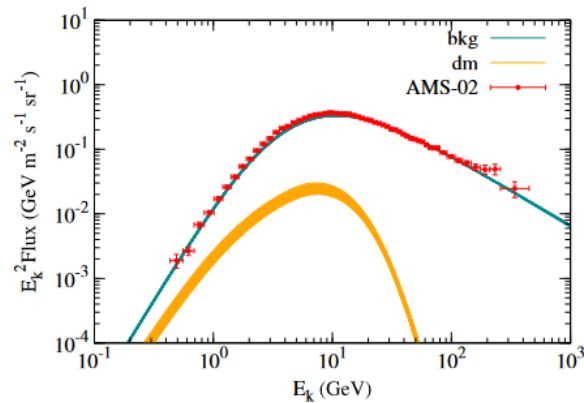


図 1.8: AMS-02 実験で測定された反陽子 Flux[8]

赤で示されているものが反陽子フラックスの測定値、緑線で示されているものが一次宇宙線と ISM の衝突起因の背景事象 Flux、橙色のバンドが暗黒物質質量 47 GeV、断面積 $10^{-26} \text{ (cm}^2 \text{ s}^{-1}\text{)}$ 、対消滅チャンネルに $b\bar{b}$ を仮定した際の予想 Flux となっている。ここで低エネルギー領域において、測定値と背景事象成分に差があるように見えるが、背景事象 Flux が予測 Flux よりも 1 から 2 桁大きいので、これを暗黒物質起因で説明するためには高精度かつ大統計を貯める必要がある。

- GAPS 実験

GAPS (General Antiparticle Spectrometer) 実験は、宇宙線反粒子の高感度観測による暗黒物質探索を目的とした気球実験である。GAPS 実験は、AMS-02 や BESS 実験とは異なり粒子の識別に磁石を使用しない。検出器は図 1.9 に概略を示すように、ToF システムが Si(Li) トラッカーを取り囲む構造になっている。磁石を使用しないため、粒子の識別は ToFs からの速度情報、Si トラッカーからの dE/dx 、および次章で説明する原子核捕獲事象後のハドロン生成の有無によって行われる。入射粒子が負電荷をもつ場合、粒子は Si 原子核に捕獲後、Si 原子核とエキゾチック原子を形成する。その後粒子は脱励起を受けながら X 線を放出し、最終的に原子核と消滅して検出可能な複数のハドロンが生成される。この反応を観測することにより磁場を用いない粒子反粒子識別を可能としている。この粒子反粒子識別手法は、検出器材料として窒素ガスを用いた反陽子ビーム試験で検証されており [9]、またプロトタイプ検出器を用いた気球実験 (pGAPS) が 2012 年 6 月に北海道で成功している [10]。

GAPS プロジェクトは現在 2024 年度に計画されている南極での長期飛行に向けて準備を進めている最中であり、2024 年 11 月に先発隊が南極に降り立った。しかしながら残念なことに未だ飛翔機会に恵まれていない。この南極フライトで予測される反重陽子 Flux を図 2.2 に示した。

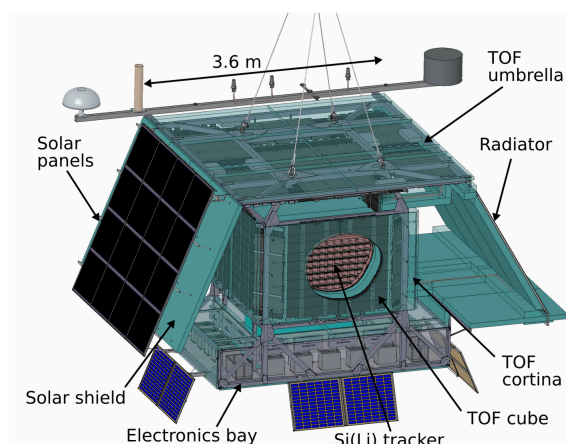


図 1.9: GAPS 検出器 [11]

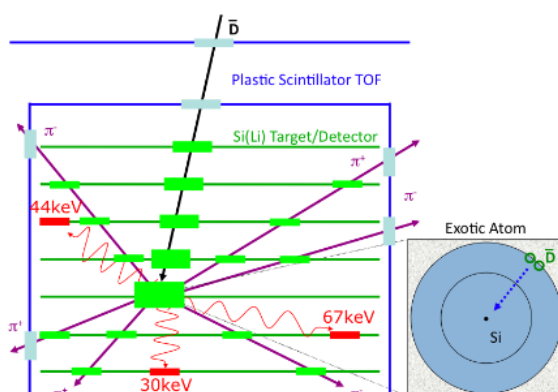


図 1.10: GAPS 実験コンセプト [12]

2 GRAMS 実験

GRAMS 実験 (Gamma-Ray And AntiMatter Survey) は、気球搭載型 LArTPC を用いた宇宙反粒子および MeV- γ 線の観測実験である。2020 年代後半に南極上空約 40 km にて、長期周回気球を用いた 1 か月ほどのフライトを計画しており、将来的 (2030 年代) には衛星での実験を目指している。GRAMS 実験は日米のコラボレーション実験であり、22 の研究機関、73 名のコラボレーター (2024 年 9 月時点) からなる。この実験は反粒子探索と MeV- γ 線の観測という 2 つの柱を持っているが、早稲田大学では特に宇宙反粒子を用いた暗黒物質の間接探索に重点を置いて研究開発を進めている。この章では、GRAMS 実験の物理目標、検出器、実験のマイルストーンについて簡単に述べる。

2.1 物理目標

GRAMS 実験の物理目標は MeV- γ 線の観測および宇宙線反粒子による暗黒物質の間接探索の 2 つである。それぞれの概要と GRAMS 実験における物理目標について以下で述べる。

2.1.1 MeV- γ 線観測

近年の天体物理学的観測では、フェルミガンマ線宇宙望遠鏡 (Fermi-LAT) の大面積望遠鏡と核分光望遠鏡アレイ (NuSTAR) が、それぞれ硬 X 線 (80keV まで) と高エネルギー γ 線 (20MeV 以上) のエネルギー領域の感度を向上させ、物理を解明してきた一方で MeV エネルギー領域の γ 線についてはまだ十分に解明されておらず、MeV gap が存在する。しかし、MeV エネルギー領域の γ 線天文学は、核生成過程や様々な天体物理現象を理解する上で重要な役割を果たす。

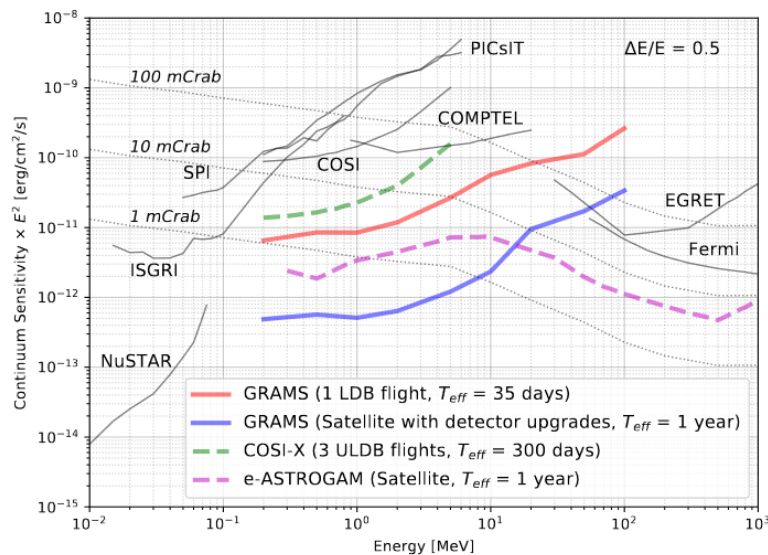


図 2.1: γ 線の観測の現状と GRAMS 実験の予測到達感度 [13]

図 2.1 に示すように、現在、MeV 領域で最高の感度を与えている実験はイメージング COMPTON TELESCOPE (COMPTEL) であるが、この実験で検出された天体はわずか 30 個に過ぎない [17]。MeV 領域探索が困難であるのは、MeV- γ 線の相互作用においてコンプトン散乱が支配的であり事象の再構成が複雑であること、検出器内外からの膨大なバックグラウンド等による。そのため、この領域の感度を向上させるためには、バックグラウンドの除去能力、 γ 線到来方向の分解能、有効面積といった

要素を向上させたコンプトンカメラの開発が必要である。従来のコンプトンカメラは散乱体と吸収体から構成されており、散乱体で散乱した光子を吸収体で止めることによって到来方向を決定し、エネルギー再構成を行う。一方で GRAMS 実験では LArTPC をコンプトンカメラとして使用する。この場合、散乱体・吸収体の役割は LAr がともに担い、入射 γ 線が複数回コンプトン散乱をするようなイベントの再構成を行う。そのため散乱ガンマ線が全吸収される必要がなく、検出器のほとんどで γ 線の検出が可能となるため視野角が広いという特徴がある。 γ 線の複数回散乱事象の再構成アルゴリズムの実機検証は未だなされておらず、現在大阪大学を中心に開発 (nanoGRAMS) を進めている。

2.1.2 宇宙反粒子探索

宇宙反粒子探索は暗黒物質間接探索や宇宙起源の解明に重要な役割を果たす。宇宙線の観測は前章でも述べたように、AMS 実験、BESS 実験といった様々な気球・衛星実験によって Flux の測定が行われている。反陽子、陽子に関しては、統計的な制限やモデルの不定性は残るものの、1 次宇宙線と星間物質の相互作用により生じる 2 次生成の宇宙線としてある程度理解されている。一方で、宇宙線中において反重陽子、反ヘリウムは未観測であり、GRAMS 実験が特にターゲットとしている反重陽子に関しては BESS 実験が上限値を与えているのみである。

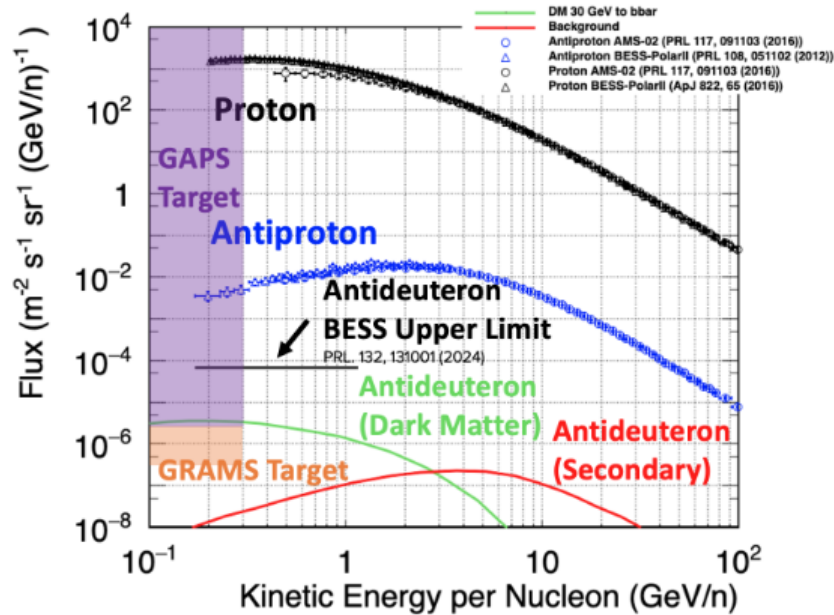


図 2.2: AntiDeuteron のフラックスと GRAMS Target

図 2.2 に、AMS-02 実験で示唆された 30 GeV の暗黒物質が $b\bar{b}$ に対消滅する際に予測される反重陽子 Flux を示している。これをみると 2 次生成で予想される反重陽子の Flux に対して 100-300 MeV の領域で $O(100)$ 倍異なっている。故に低エネルギー領域において、反重陽子イベントを 1 つでも検出することができれば、それは新物理の強い示唆となる。

2.2 GRAMS 検出器

GRAMS 実験では検出器として液体アルゴンタイムプロジェクションチェンバー (以降 LArTPC) を用いる。LAr は粒子の入射によってシンチレーション光 (40 photon/keV) と電離電子 (1 fc/mm) が発生するため、これを信号として読み出すことが可能である。LArTPC は素粒子物理学実験、特に

直接検出やニュートリノ実験等で使用されている。本節では LAr の性質と LArTPC 検出器の原理について説明し、GRAMS 検出器の概要についても述べる。

2.2.1 LAr の性質

Ar は大気中に 1 % 程度含まれており、これは 3 番目に多い成分となっている。そのため、Ar は希ガスの中で生成が比較的容易かつ安価であるという特徴をもっている。故に検出器の大型化が容易であり、R&D も行いやすいという利点がある。LAr の基本特性を以下の表 2.1 に、Ar の相図を以下の図 2.3 に示す。

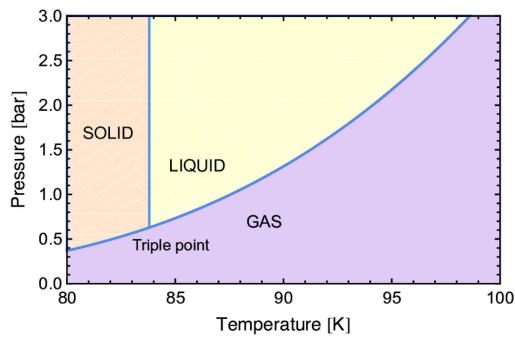


図 2.3: Ar の相図

Property	Value
Atomic Number	18
Atomic Weight	39.9
Boiling Point (1atm)	87.3 K
Melting Point (1atm)	83.8 K
Density (Liquid)	1.395 g/cm ³
W-Value (Ionization)	23.6 eV
W-Value (Scintillation)	19.5 eV
Scintillation Wavelength	128 nm

表 2.1: Ar の基本的な性質 [18]

図 2.3 に示すように、0.7 atm 以下では液相は存在せず、1 atm において液相は数 K の範囲内しか存在しない。したがって、検出器容器内で LAr を維持する場合、圧力と温度を制御することが極めて重要となる。

粒子が LAr との相互作用によって落とすエネルギーは、Ionization（電離）および Excitation（励起）の 2 種類の反応に用いられる。図 2.4 にこれらの反応の概略図を示す。電離電子は電場を印加することによって、最外殻が閉殻の希ガス原子である Ar 原子に捕獲されることなく読み出すことが可能である。また、励起によって発生するシンチレーション光を信号として読み出すことも可能となっており、Ar は検出器媒質として信号、値段等を鑑みても優秀であるといえる。

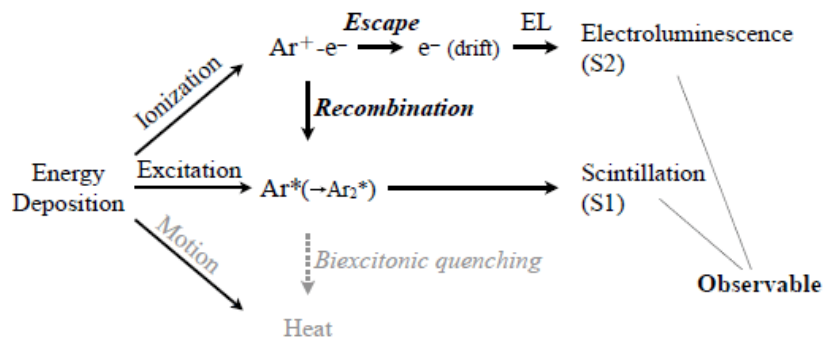


図 2.4: LAr の反応の概略図 [19]

電離の反応は以下の式で記述される。



印加された電場の下で、電離電子の大半は電子信号として読み出すことが可能になるが、一部は励起状態の Ar と再結合して、 Ar_2^* となりシンチレーション光を発生させる。再結合割合 R は荷電粒子のエネルギー、電場の大きさ、エネルギー損失により定まり、以下の式で表せる [20]。

$$R = \frac{Q_{rec}}{Q_0} = \frac{A}{1 + \frac{E}{k} \cdot \frac{dE}{dx} \cdot \frac{1}{p}} \quad (2.2)$$

上式において、 Q_0 は電離電子数、 Q_{rec} が再結合後の電離電子数、 E が電場、 ρ が LAr の密度に対応している。また、 A, k はフィットパラメーター ($A = 0.800 \pm 0.003, k = 0.0486 \pm 0.0006$) である。

また電離電子は、LAr 中に混入しうる酸素や水といった電気陰性不純物に捕獲される。図 2.5 に LAr 純度と電子寿命を示す。横軸の単位は parts per billion (ppb) であり、1 ppb は全体量に対して 10 億分の 1 の量の不純物が含まれていることを示している。この図 2.5 からわかるように、純度が 10 倍悪化すると電子寿命はおよそ 10 分の 1 となってしまう。ゆえに正しい信号量を得るにあたって、LAr の初期純度および純度の維持は極めて重要な項目となる。

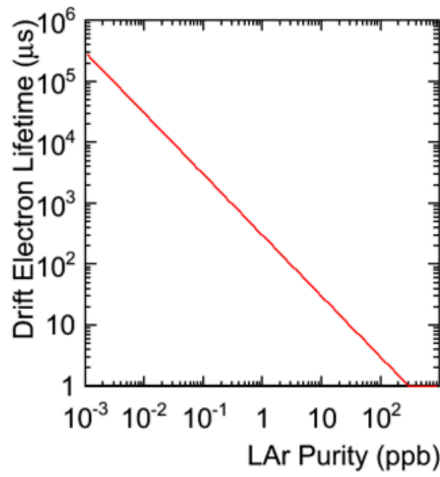
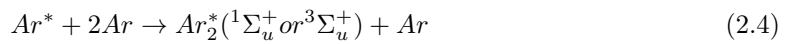


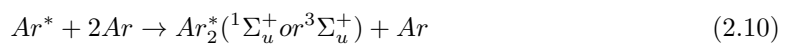
図 2.5: LAr 純度と電子寿命

発光反応は図 2.4 に示すように、入射粒子による発光と電離電子の再結合による発光の 2 種類が存在する。以下にそれぞれの発光過程を示す。

- Ar の励起起因の蛍光



- 電離電子の再結合起因の蛍光



LAr 原子が脱励起する際に発する光は, 128 nm をピークにもつ真空紫外光である。この光の時定数は二量体のスピン状態によって異なり, $^1\Sigma_u^+$ では 6 nsec(fast 成分), $^3\Sigma_u^+$ では 1.5 μ sec(slow 成分)となっている。

Ar 原子と入射粒子との反応は原子核反跳事象と電子反跳事象に分類される。前者は主に中性子等に対して生じ, 後者は γ 線や β 線に対して生じる。原子核反跳事象ではエネルギーの大半が発熱に使用され観測できないエネルギーが大きい一方で, 電子反跳事象においてはほとんどのエネルギーが励起および電離に使用されるため, LArTPC 検出器によって光信号もしくは電離電子信号として読み出しが可能となる。

2.2.2 LArTPC 検出器

LArTPC 検出器は 3 次元の飛跡再構成が可能であり, また入射粒子のエネルギー損失 (dE/dx) 測定を行うことができる検出器である。LArTPC 検出器の概略を以下の図 2.6 に示す。前節で述べたように, 粒子が LAr 中にエネルギーを落とすと電離電子とシンチレーション光が発生する。陰極 (Cathode) と陽極 (Anode) に電圧を印加し電場を形成することにより, 電離電子をドリフトさせて Anode 電極で読み出すことができる。この際に Anode に二次元構造を持たせることによって, 電離電子の Anode 平面に置ける二次元位置情報を得ることができる。また, シンチレーション光は極低温下で動作する PMT や MPPC といった光検出器を用いて検出される。光信号は電離電子信号と比較してナノ秒程度とはやい信号であるため, 光検出器で検知した時間と電離電子信号の到達時間の差分, および電離電子のドリフト速度情報から, 検出器高さ方向位置を決定することが可能となっている。なお, LAr 中における電離電子のドリフト速度は電場依存性をもつ。電場と LAr 中での電離電子のドリフト速度の関係を図 2.7 に示す。ドリフト速度は電場の大きさ $|E|$ と温度 T に依存して以下の式 2.12 のように表される。ここで各パラメーターの値は ICARUS 実験によって求められている。

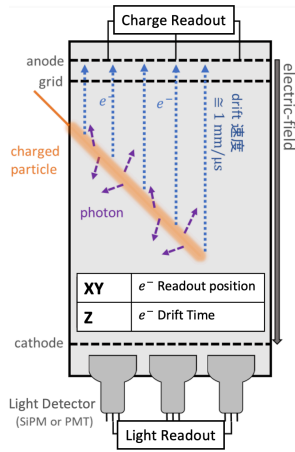


図 2.6: LArTPC 概略図

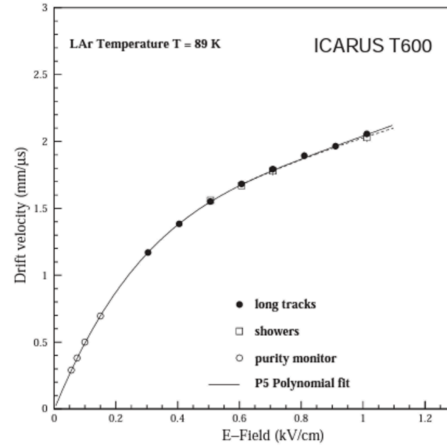


図 2.7: 電場の大きさと LAr 中の電子のドリフト速度の関係 [21]

$$v_d(T, |E|) = (P_1(T - T_0 + 0) + 1) \left(P_3 |E| \ln \left(1 + \frac{P_4}{|E|} \right) + P_5 |E|^{P_6} \right) + P_2(T - T_0) \quad (2.12)$$

表 2.2: 式 2.12 におけるパラメータの値 [22]

Property	Value
P_1	$-0.01481 \pm 0.00095 \text{ K}^{-1}$
P_2	$-0.0075 \pm 0.0028 \text{ K}^{-1}$
P_3	$0.141 \pm 0.023 \left(\frac{\text{keV}}{\text{cm}}\right)^{-1}$
P_4	$12.4 \pm 2.7 \left(\frac{\text{keV}}{\text{cm}}\right)$
P_5	$1.627 \pm 0.078 \left(\frac{\text{keV}}{\text{cm}}\right)^{-P_6}$
P_6	0.317 ± 0.021
T_0	90.371 K

2.2.3 GRAMS 検出器

前節で示したように, Kinetic Energy per nucleon 100-300 MeV/n の領域において暗黒物質由来の Flux が二次生成起源の Flux に対して $O(100)$ 大きい値を示すため, 反重陽子が GRAMS 実験のターゲットとなっている。すでに反粒子探索としてフライトが実施されている BESS-Polar 実験, AMS-02 実験では先述のように磁場を用いた粒子識別手法を採用している。これは強力な識別能力を有する一方で, Magnet の質量によって低エネルギー側への感度が影響を受ける点, 検出器の大型化が困難である点, 入射粒子を検出可能な立体角に制限が生まれてしまうといった欠点が存在する。

これに対し GAPS 実験は磁場ではなく原子核捕獲後のハドロン生成を用いることによって粒子反粒子識別を行うことによる反粒子探索を目指している。GAPS 実験は内部飛跡検出器として多層の半導体検出器を採用しており, 高いエネルギー分解能を実現できる一方で費用の面で大容量化は難しい。

GRAMS 実験は GAPS 実験の次世代実験であり, 同じ粒子反粒子同定手法による反重陽子検出を目的の 1 つとしている。GAPS 実験との違いは飛跡検出器にあり, GRAMS 実験では LArTPC を用いる。LArTPC は Ar が低コストであるため大容量化が容易であり, 高感度の実現が期待される。

以下に検出器の現時点での構想を図 2.8 に示す。GRAMS 検出器は 2 層のプラスチックシンチレータと LArTPC からなる。2 層のプラスチックシンチレータによって入射粒子の速度 β を測定する。また, LArTPC はカロリメーター, 3 次元の飛跡検出器, γ 線コンプトンカメラとして用いられる。シンチレーション光を光検出器で読み出し, 電離電子信号を 2 次元構造をもった Anode によって読み出すことによって完全な 3 次元飛跡再構成を可能にしている。

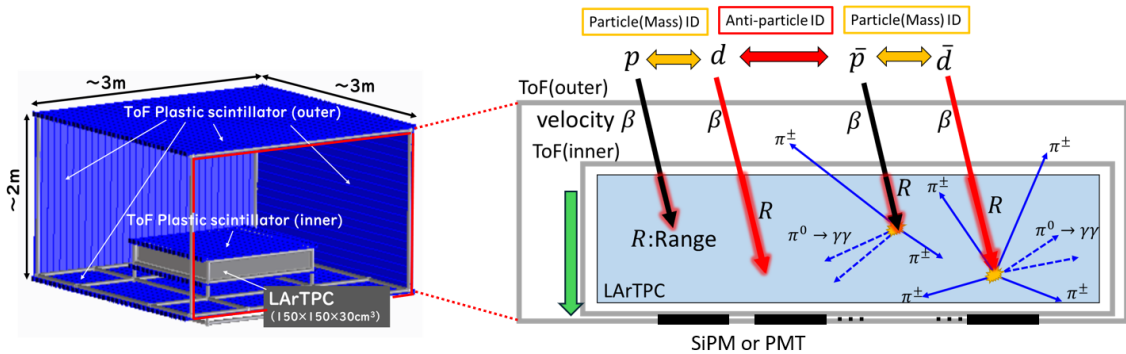


図 2.8: GRAMS 検出器

2.2.4 粒子識別手法

図 2.2 に示すように, GRAMS 実験のターゲットである反重陽子事象を 1 event 検出するためには, 10^4 の反陽子事象, 10^9 の陽子事象といった他の粒子との識別を行う必要がある。したがって反重陽子探索検出器においては上記を区別するレベルのバックグラウンド除去能力が要求される。

粒子識別は, 粒子反粒子識別と質量識別の 2 種類に大別される。本節では LArTPC によるそれぞれの識別に関して概要を述べる。

- 粒子反粒子識別

GRAMS 実験では粒子反粒子を原子核捕獲事象後のハドロン生成の有無によって識別する。負電荷粒子が LAr 中に入射し, 相互作用によってエネルギーをおとし停止すると, Ar 原子核に捕獲され, 励起したエキゾチック原子核を形成する原子核捕獲事象が起きる。生成されたエキゾチック原子は, 図 2.9 に示すように特性 X 線を放出しながら脱励起し, 最終的に負電荷粒子は原子核内で LAr 原子核と対消滅する。この対消滅の後に複数のハドロンが放出されるため, この反応の有無を見ることにより, 粒子反粒子の識別が可能となる。また, 対消滅後のハドロン生成数は反応する負電荷粒子の質量に依存するため, 反陽子よりも反重陽子の方が生成されるハドロン数が多く, 飛跡の本数によっても粒子種を識別可能である。

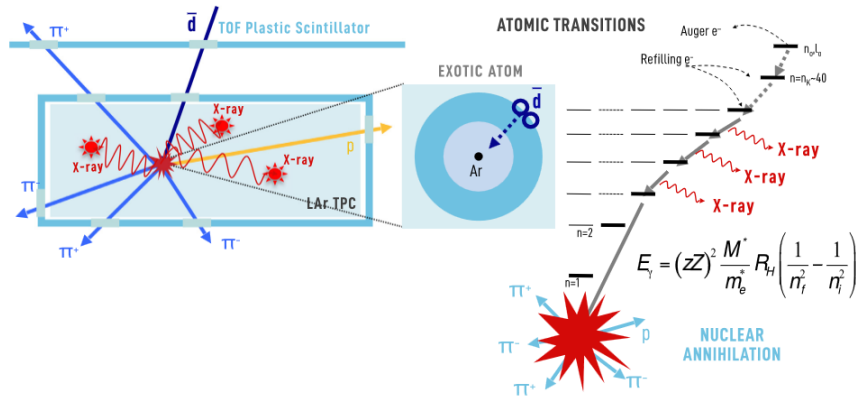


図 2.9: GRAMS 実験における PID 手法概略図 [13]

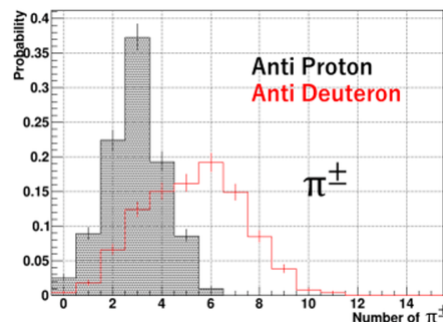


図 2.10: Geant4 シミュレーションによる対消滅後の荷電 π 粒子数 [14]

しかしながら LArTPC 中での反重陽子の原子核捕獲事象は未確認であるため実験的な検証が必要である。加えて十分量の背景事象粒子と Ar との反応の理解も必須である。

- 質量識別

GRAMS 実験の粒子識別には, 2 層のプラスチックシンチレータから求められる粒子速度 β

および LArTPC から得られる dE/dx , 飛跡長といった情報を用いる。質量が異なれば同じ β でも運動量が異なるため LAr 中を進む距離が変わる。同じ Kinetic Energy per nucleon = 150 MeV/n ($\beta=0.5$) の反陽子, 反重陽子を比較すると dE/dx にわずかな差があり, 質量が 2 倍違うため, 停止までの距離が変わる。したがって, 同じ β の粒子質量識別に関しても dE/dx , 飛跡長から区別可能である。

2.3 早稲田大学における近年の GRAMS 実験マイルストーン

GRAMS 実験グループは, 2020 年代後半に南極で気球実験を実施し, 2030 年代に衛星ミッションを実施するという計画を立てている。このスケジュールを実現させ, 反重陽子観測による暗黒物質の間接探索という物理目標を達成するためには, LArTPC 検出器の開発, 飛翔体上での LArTPC 検出器運用手法の確立, LAr と反粒子反応の理解という 3 つのマイルストーンを達成する必要がある。本節では各項目に関して早稲田大学における現状を述べる。

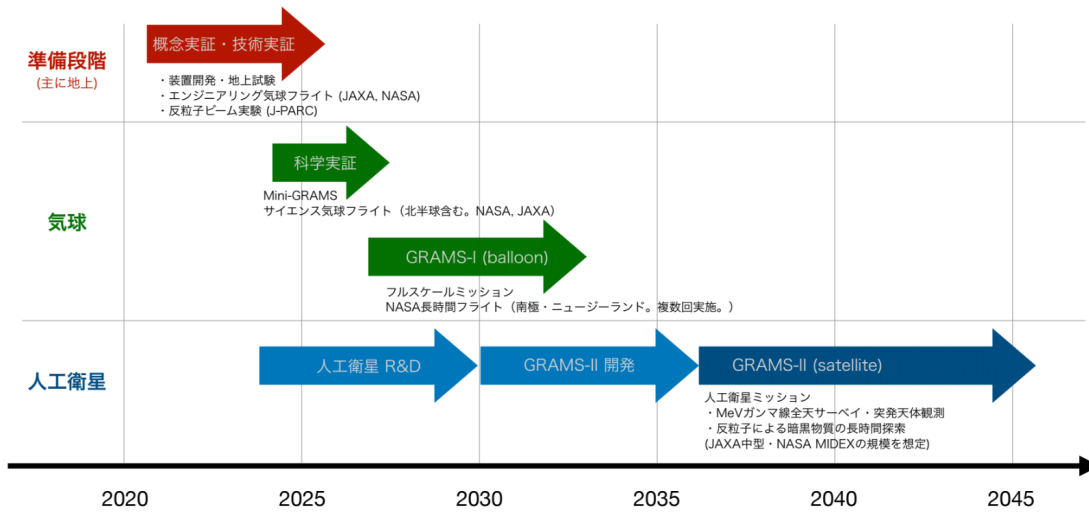


図 2.11: GRAMS 実験計画 [15]

2.3.1 LArTPC 検出器の開発

GRAMS 実験では原子核捕獲事象後のハドロン生成の有無によって粒子反粒子識別を行うが, LArTPC を用いた識別能力の検証は行われていないため原理検証が必要な段階である。そのため早稲田大学では最初に実験室レベルで可能な LArTPC 粒子識別試験として宇宙線 μ^-/μ^+ 粒子識別試験を 2022 年に 30 cm 角の LArTPC 検出器 (GRAMS40) を用いて行った [16]。

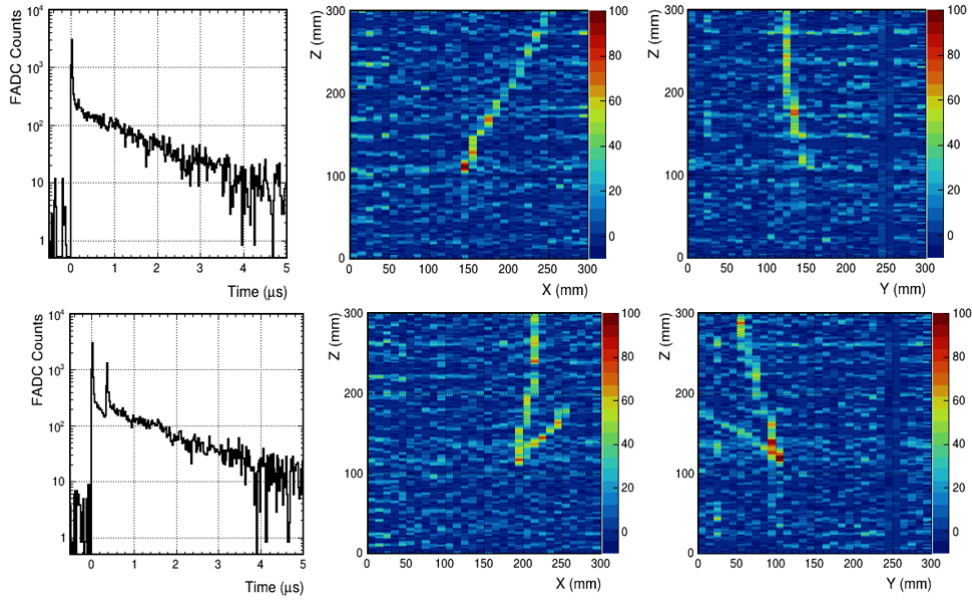
宇宙線 μ が LArTPC に入射すると, 突き抜け, 崩壊, 捕獲事象のいずれかをおこす。

$$\mu^+ \rightarrow \nu_e + \bar{\nu}_\mu + \text{Michel } e^+ \quad (2.13)$$

$$\mu^- \rightarrow \bar{\nu}_e + \nu_\mu + \text{Michel } e^- \quad (2.14)$$

$$\mu^- + p \rightarrow n + \nu_\mu \quad (2.15)$$

捕獲事象は μ^- に対してのみ起こるため, 飛跡の Michel electron の有無を見ることで識別が可能となる。以下に実際に取得した各事象の飛跡を示す。なお GRAMS40 検出器の詳細に関しては第 4 章にて詳細を述べるため, 本節では割愛する。

図 2.12: μ の捕獲および崩壊事象のイベント例

GRAMS40 は 1 cm ピッチの Anode PAD を用いた X, Y 各 30 ch の検出器であるが, その分解能で図 2.12 に示すように Michel electron の有無が識別できることがわかる。

2.3.2 気球上での LArTPC 検出器の運用

GRAMS 実験は気球・衛星での実験を計画しているが, LArTPC を飛翔体に搭載し上空で運用させた事例は, 我々 GRAMS 実験グループが 2023 年 7 月に実施するまで世界に例がなかったため, この手法を確立する必要があった。そこで早稲田大学含む GRAMS 実験日本グループは, 2023 年 7 月 27 日, プロトタイプの LArTPC (3ch) を用いたエンジニアリングフライト (B23-06 実験) を実施した [25]。このフライトの主な目的は, 上昇中および水平飛行中の LAr 容器の温度・圧力条件を維持し, LArTPC を安定的に動作させること, 宇宙線データを取得することの 2 点であった。また, B23-06 実験は GRAMS 実験グループにとって初めての気球実験であったため, より大型の LArTPC や複雑なシステムを用いた今後の気球飛行のために開発課題を洗い出すということが重要であった。

フライトは 2023 年 7 月 27 日に成功し, 気球は最高高度 28.9km, 44 分間の水平飛行を達成した。また, 飛行中, LAr は安定的に制御され, LArTPC による宇宙線データの取得にも成功した。

また, GRAMS 実験グループは現在 pGRAMS 実験 (NASA APRA 採択済み) を準備中であり, 2025 年度内にアリゾナにて気球実験を実施する予定となっている。

2.3.3 LAr と反粒子の反応の理解

GRAMS 実験における粒子識別手法は原子核捕獲事象によるハドロン生成によって行われるが, 現時点で LAr 中での反重陽子の原子核捕獲事象を観測した事例はない。したがってこの事象の実験的検証が必要である。加えて 1 event の反重陽子を識別するためには以下の表 2.3 に示す数の背景事象との識別を行う必要があり, 背景事象となる粒子と LAr との反応を理解することが不可欠である。この理解のためには表 2.3 に示す背景事象数よりも 1 桁以上高いオーダーの統計数を貯めなければならず, 加速器ビームによる試験が必要となる。

表 2.3: 150 MeV/n の反重陽子に対する背景事象数

粒子	Flux [$m^2/s/(GeV/n)/sr$]	背景事象数
陽子	10^3	10^9
反陽子	10^{-2}	10^4
反重陽子	10^{-6}	1

2.4 本研究の内容

本研究は GRAMS 実験におけるマイルストーンの内の LAr と反粒子の反応に焦点を当てた研究である。早稲田大学では、反陽子ビームラインにて LArTPC 検出器を用いて十分量の反陽子捕獲事象の統計を貯め、GRAMS 実験のターゲットである反重陽子に対する主要な背景事象となる反陽子捕獲事象の理解を目指す J-PARC T98 実験を計画している。T98 実験はすでに 2023 年 12 月の PAC にて承認済みであり、2023 年 6 月に Phase-1 が完了し、2025 年 2 月に LArTPC 検出器へのビーム照射試験を実施予定である。

T98 実験に向けて、ビーム試験用の LArTPC 検出器の設計およびビームラインにおける検出器安定運用手法を開発し、その性能を実証する必要がある。以下に LArTPC 検出器および運用手法の設計、構築、実証試験のタイムラインを示す。

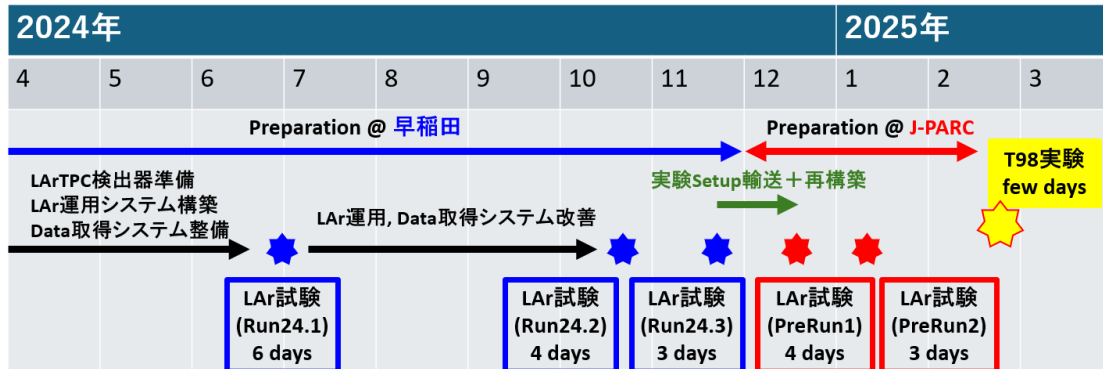


図 2.13: 2024 年度 LAr 試験スケジュール

まず初めに、2023 年 12 月頃から 2024 年の 6 月にかけて、すでに構築され運用実績のある LArTPC 検出器の改良および検出器安定運用システムの構築を行い、2024 年 7 月から 10 月にかけて運用手法の改善を行った。LArTPC 検出器は 2022 年に構築済みの GRAMS40 検出器をベースに用い、信号読み出し部分をビーム試験用に新しく製作した。第 4 章前半部にて GRAMS40 検出器および信号読み出し部である Anode に関して述べる。また、第 4 章後半部にて LArTPC 検出器安定運用システムの概要を、第 6 章にて実際に構築したセットアップの詳細を報告する。

次に設計した LArTPC 検出器及び運用手法が機能することを実証するべく LAr 試験を行った。LAr 試験は早稲田大学にて 3 回、J-PARC K1.8BR にて 2 回実施した。実施場所によって主に安全周りの運用手法が一部異なるものの、運用コンセプトおよび検出器自体は共通となっている。第 5 章にて早稲田大学における LAr 試験（主に Run24.2, Run24.3）について、第 6 章にて J-PARC K1.8BR における LAr 試験（PreRun2）について報告する。

3 J-PARC T98 実験

前章までで述べたように GRAMS 実験では Kinetic Energy per nucleon 100-300 MeV/n の反重陽子をターゲットとしており、これを反陽子などのバックグラウンド事象から識別する必要がある。最も主要な背景事象は反陽子と Ar 原子との反応であり、これを識別するためには 10^4 以上の反陽子捕獲事象の統計を貯めてこの反応を理解する必要がある。T98 実験は 10^5 以上の反陽子捕獲事象を LArTPC 検出器を用いて観測、収集することを主目的とした加速器実験である。本節では使用するビームラインである J-PARC K1.8BR および 2 つの Phase からなる T98 実験について述べる。

3.1 J-PARC K1.8BR ビームライン

図 3.1 に Φ 100 cm, 高さ 70 cm の円筒型 LAr に反陽子および反重陽子を打ち込んだ際の飛跡長の Geant4 シミュレーション結果を示す。ここで 150 MeV/n の β が 0.5 である反陽子, 反重陽子の運動量はそれぞれ 600 MeV/c, 1100 MeV/c に相当し, その際の停止距離を点線で図中に示している。

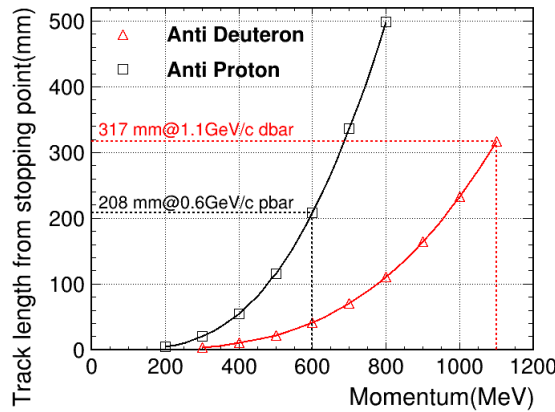


図 3.1: LAr 中における反陽子および反重陽子の停止距離 [14]

この結果より, GRAMS のターゲット領域に含まれる 150 MeV/n の反重陽子, 反陽子の LAr 中での捕獲事象を検証および収集するにあたり, 最大 1.1 GeV/c 程度のビーム運動量があれば最適であることがわかる。これに対し J-PARC K1.8BR ビームラインは 1.1 GeV/c までの負電荷粒子を提供しており, 我々の目的に最適なビームラインとなっている。以降では J-PARC K1.8BR ビームラインに関して述べる。

J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex) は茨城県東海村にある国内最大級の大強度陽子加速器施設である。J-PARC は 400 MeV 直線形加速器 (LINAC), 3 GeV シンクロトロン (RCS), および 30 GeV シンクロトロン (MR) によって構成されており, 陽子 1 個と電子 2 個からなる負水素イオンを 400 MeV まで LINAC にて加速させ, RCS に入射させる際に炭素膜を通過させることによってこれを陽子のみのビームにする。RCS にて電磁石と加速空洞によって 3 GeV まで加速させた陽子は, MR にて 30 GeV まで加速される。

30 GeV まで加速された陽子ビームは図 3.2 に示すハドロン実験施設へ供給される。ハドロン実験施設内には K1.8BR, K1.8, KL, high-p, COMET の 5 つのビームラインがある。これらは A ライン, B ライン, C ラインの 3 つに大別され, 我々が実験をおこなう K1.8BR は A ラインに属する。A ラインには加速された陽子ビームを T1 にて金製の固定標的に衝突させることによって生じる 2 次粒子が供給され, 主に K 中間子を用いた実験が実施されている。

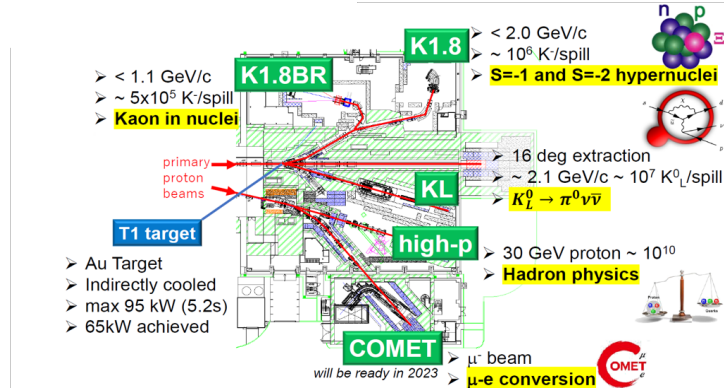


図 3.2: ハドロン実験施設

K1.8BR には負電荷の二次粒子が供給されており、その最高運動量は $1.1 \text{ GeV}/c$ となっている。供給される粒子種は $K^\pm$ 、陽子、反陽子、重陽子に関しては $O(10^5) \text{ Hz}$ のレートで確立されている一方で、反重陽子に関しては未確立の状態であり、そのレートも未検証であった。

K1.8BR ビームラインには、T1 への衝突で生成された 2 次粒子のビーム方向を調整する電磁石 (D1-D5, Q1-Q8, O1) や質量を選別する静電セプタム (ES1)、Correction Magnet (CM)、ビームレートを調節するスリット (MS) 等が設置されており、ほしいビームに応じてこれらを調整しビームを最適化している。以下の図 3.5 に質量による粒子選択の概略図を示す。CM1 で粒子を曲げ、ES の電場によって質量によって飛跡を分離させ、再度 CM2 で磁場をかけることによって取得したい粒子の軌道を直線に戻す仕組みとなっている。

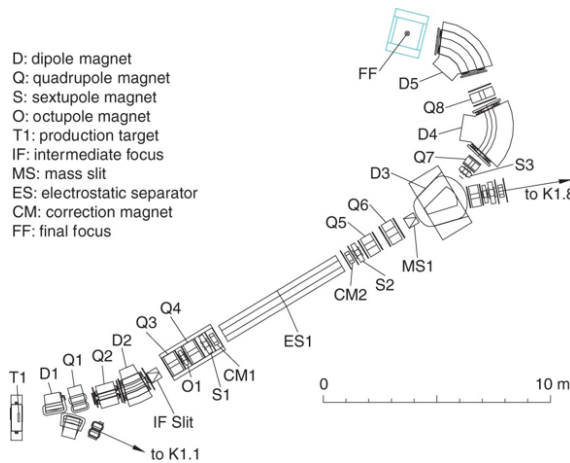


図 3.3: K1.8BR ビームライン [23]

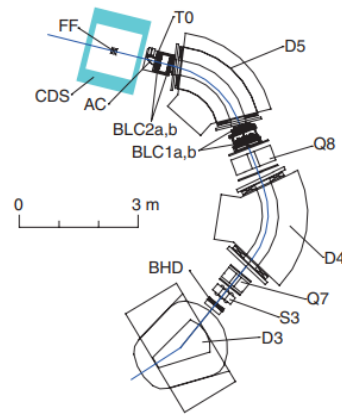


図 3.4: K1.8BR 拡大図 [23]

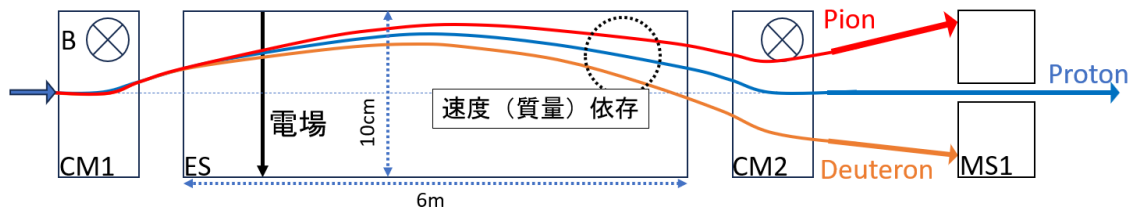


図 3.5: 質量による粒子選択概略図

3.2 T98 実験

第2章でも述べたように, GRAMS 実験は原理検証の段階にあり, 特に重要なマイルストーンとして反粒子と LAr の反応の理解がある。2025 年 1 月現在, GRAMS 実験のターゲットである反重陽子の LAr 中での原子核捕獲事象は未実証である。また 100-300 MeV/n の反重陽子に対する背景事象除去能力を向上させる必要もある。先述のように反重陽子捕獲事象に対する主要な背景事象は反陽子捕獲事象であり, これを識別するためには 10^4 以上の識別能力が要求される。J-PARC T98 実験は J-PARC ハドロンホールの K1.8BR ビームラインを用いて GRAMS 実験における主要背景事象である反陽子捕獲事象の統計を 10^5 以上貯めることを目的とした加速器ビーム試験である。この実験を実施して, 最低限必要な背景事象除去能力よりも 1 桁以上統計を貯めることによって GRAMS 実験の背景事象を理解し, 世界初の宇宙線反重陽子観測につなげる。

T98 実験は 2022 年 12 月の J-PARC PAC にて提案され承認された。この実験は Phase-1 (反重陽子生成量評価試験) と Phase-2 (LArTPC 検出器への反粒子ビーム照射試験) の二段階に分けられ, Phase-1 は 2023 年 6 月に実施された。LArTPC 検出器へのビーム照射である Phase-2 は 2025 年 2 月中旬以降に実施予定である。以降では各 Phase に関して述べる。

3.2.1 反重陽子生成量評価試験 (Phase-1)

J-PARC K1.8BR において確立されているビームは K 中間子, 反陽子, 陽子, 重陽子のみであり, 反重陽子に関しては確立されていない。T98 実験の主目的は先に述べたように反陽子捕獲事象の収集であるが, これに加えて可能であれば反重陽子捕獲事象の観測も目的としていた。そのため, LArTPC 検出器への反粒子ビーム照射試験の前に, LArTPC 検出器を用いない反重陽子生成量を評価する試験を 2023/6/19-6/21 に実施した。[24]

結果として, 反重陽子候補事象は 2 時間のデータ取得時間 (1093 spills @ 49.7 kW) 中に 1 事象であった。これを実際に LArTPC 検出器を用いて検出しようとする場合, 1 事象の観測に $O(100)$ 時間を要求することに相当する。このスケールは LArTPC 検出器のイベントパイルアップから要求される。30 cm 角のサイズである GRAMS40 検出器のフルドリフトは $O(100)$ usec であるため, イベントパイルアップを防ぐために Rate を数 kHz 以下に抑える必要がある。Phase-1 の際の Rate は 1.5 MHz であったため, 約 100 倍程度のスケールが必要となる。

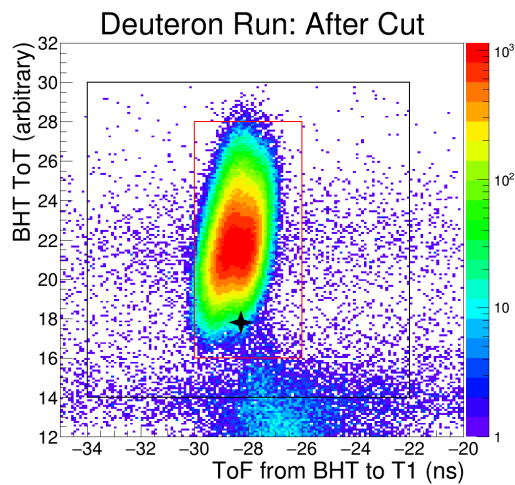


図 3.6: 粒子選択 Cut 適用後の重陽子 Run 事象分布 [24]

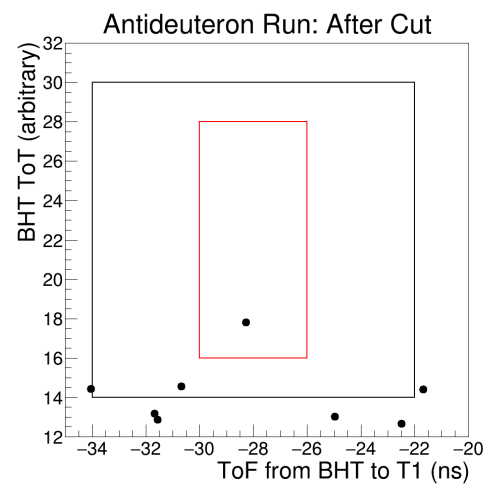


図 3.7: 粒子選択 Cut 適用後の反重陽子 Run 事象分布 [24]

この結果を受け、加速器ビームの不安定性、pGRAMS もあり 2024 年度中に T98 実験を完遂したいこと、T98 実験の主目的は反陽子捕獲事象の収集であることを加味して、O(100) 時間のビームタイムは非現実的であることから、Phase-2 では反重陽子捕獲事象の観測は目指さずに反陽子収集にフォーカスすることとした。

3.2.2 LArTPC への反粒子ビーム照射試験 (Phase-2)

Phase-2 は LArTPC 検出器への反粒子照射試験である。図 3.8 に Geant4(v.4.10.2.p03) を用いた 30 cm LArTPC 検出器に対する反陽子と Ar の反応を示す。なお本シミュレーションにおいては早稲田大学にて運用実績のある GRAMS40 検出器および Φ 50 cm 真空断熱容器を仮定している。左に示すのが運動量 700 MeV/c の反陽子 10^5 事象に対する Φ 50 cm 真空断熱容器内の捕獲地点の分布を真上から見た図であり、中央の図がこれを側面から見た図に対応する。両図において赤枠で示されている領域が 30 cm LArTPC 検出器に相当する。また、これらの図においてビーム中心は $X=Y=0$ であり、ビーム方向は図中のビーム軸と同様である。これらの図から 700 MeV/c の反陽子ビームを用いると捕獲事象分布のピークが検出器中心あたりに来ることが予想される。図 3.8 の右図は 650, 700, 750 MeV/c の反陽子ビームに対する捕獲地点の分布を示している。各運動量に対して LArTPC の内部で捕獲事象が生じる割合は 48, 43, 37 %となっている。

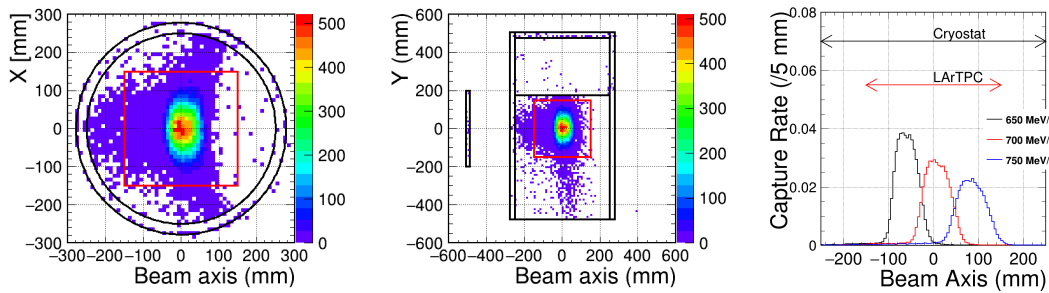


図 3.8: 左：700 MeV/c 反陽子の捕獲地点分布（上面から） 中央：700 MeV/c 反陽子の捕獲地点分布（側面から） 右：運動量毎の捕獲位置の変化 [24]

上記のシミュレーション結果を受けて Phase-2 における計 24 時間のビームタイムの要求を以下の表 3.1 のようにした。

Particle	Momentum (GeV/c)	Beam time (hour)
Proton	+1.0	2
Deuteron	+1.0	2
Proton	[+0.65, +0.75]	6
Antiproton	-1.0	2
Antiproton	[-0.65, -0.75]	12
Total		24

表 3.1: T98 実験 Phase-2 におけるビームタイム

Phase-2 の目的は 10^5 程度の高統計反陽子捕獲事象の収集であり、それを実現するために [650,750] MeV/c 反陽子ビームを 12 時間要求している。700 MeV/c の反陽子ビームを 6 時間受けることによって、最大 DAQ rate 100 Hz, ビーム効率 50 %, LArTPC 内部での捕獲事象割合 43 % の仮定から 2×10^5 程度の反陽子捕獲事象の収集が期待される。なお 650-750 MeV/c の運動量は Kinetic Energy per

nucleon にして約 200 MeV/n に相当しており, GRAMS のターゲット領域内の値となっている。また 650, 750 MeV/c といった異なる運動量でもビームを受けることによってシミュレーションの精度を上げることも期待される。また陽子, 重陽子といった背景事象に関してもビームを受けることで統計を収集する。

2025 年 2 月 7 日現在 T98 実験の前に K1.8BR にて加速器ビームを受ける E73 実験がいまだ進行中であり, T98 実験は E73 実験終了後の 2 月中旬以降に実施する予定となっている。なお, ビームタイムについては 24 時間連続で行うのではなく 12 時間のビームタイムの後, 1 日程度があき残りの 12 時間ビームが来る予定となっている。加速器ビームには不定性があり, いつビームが出なくなるかわからないという側面があるため, まず始めの 12 時間で十分量の反陽子事象を取得する予定としている。

4 T98 実験 LArTPC 検出器の設計・構築

LArTPC はシンチレーション光をトリガーとして電離電子を読み出し飛跡再構成を行う検出器である。そのため、高純度の LAr を Data 取得期間中保持し続ける必要がある。また LAr は -186°C 程度の極低温であるため、その取り扱いには注意が必要であり、検出器には極低温耐性が求められる。加えて T98 実験は加速器ビーム試験であるため、検出器へのアクセスが困難な環境下で実験を遂行する必要がある。

2025 年 2 月に実施予定の T98 実験のために上記の制約を満たす LArTPC 検出器およびセットアップの設計・構築を行った。本章では LArTPC 検出器を含む T98 実験検出器セットアップに関して述べる。

4.1 GRAMS40 検出器

早稲田大学では第 2 章で述べたように 30 cm 角の LArTPC 検出器 (GRAMS40 検出器) をすでに構築し、宇宙線 μ 識別試験にて運用した実績があり、T98 実験の LArTPC 検出器にはこの GRAMS40 検出器をベースとして用いる。本節では 2022 年の宇宙線 μ 識別試験の際の GRAMS40 検出器に関して概要を述べる。

GRAMS40 検出器は、30 cm 角の LArTPC であり、その有効容量は約 40 kg である。GRAMS 実験で想定している LArTPC のサイズは $150\text{ cm} \times 150\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ であるので、GRAMS40 検出器は 1 ユニット程度の大きさに相当する。GRAMS40 は以下の図 4.1 に示すように Cathode, Side Plate, Anode Grid, Anode および補強パーツによって構成されており、これらは電場形成用パーツおよび信号読み出し用パーツに大別される。

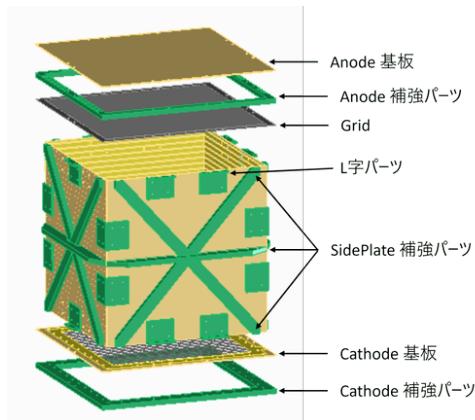


図 4.1: GRAMS40 検出器分解図 (3D CAD)

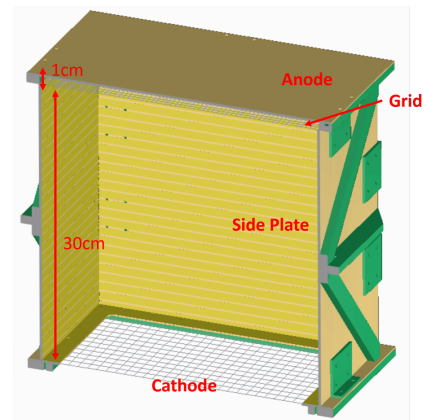


図 4.2: GRAMS40 検出器断面図 (3D CAD)

- 一様電場形成

LArTPC 内部の電場は、電離電子を直上にドリフトさせるために一様である必要がある。GRAMS40 検出器では、Cathode および Anode Grid に電圧を印加し、Side Plate に取り付けられた抵抗によって一様な電場を形成している。

Cathode は TPC 下部に設置される光検出器にシンチレーション光を到達させる必要がある。したがって面の中央部分をくりぬいたドーナツ型 PCB 基板に $\Phi 100\text{ }\mu\text{m}$ のステンレスワイヤーを 1 mm ピッチで 2 次元にはんだ付けした構造となっている。また Side plate 4 枚の内 1 枚は $100\text{ M}\Omega$ の抵抗チップ (HVC4020, $0.5 \times 0.2\text{ inch}$) 30 個によって抵抗分割されている。

また, Side Plate の内側には波長変換材である TPB を蒸着した ESR が取り付けられている。これにより Ar のシンチレーション光波長 128 nm を第 5 章にて述べる光検出器の感度領域内である 420 nm に変換している。なお, ESR は 1 辺 15 cm の ESR を接着剤によって貼り合わせることで、TPC 内壁に対して十分な面積を持つ正方形にしている。

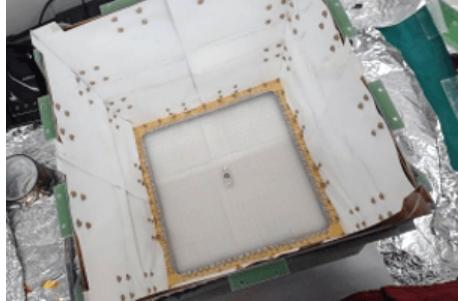


図 4.3: TPC 内壁と TPB 蒸着後の ESR

Anode Grid は電離電子のドリフトを阻害しないよう, Anode Pad にかぶらない構造にする必要がある。GRAMS40 では厚さ 0.1 mm のステンレスメッシュを用いており, Cathode と同様に 5 mm 間隔, 2 次元でメッシュ状の構造としている。これにより後述の Anode Pad の区画と干渉することなく電離電子をドリフト可能にしている。

- 信号読み出し

電離電子信号の読み出しは Anode によって行われる。読み出しエレクトロニクスには LTARS2014 を用いており, このチャンネル数が最大 64 ch であるため, Anode PAD は X 方向 30 ch, Y 方向 30 ch の計 60 ch としている。以下の図 4.4 に Anode PAD の KiCAD 図および実物写真, PAD 構造の概略図を示す。Anode PAD は 1 辺 5 mm のパッドが規則的に並んだ構造となっており, これに対し千鳥読みだしを行うため, パッドサイズは一辺 5 mm であるが, 実質的に 1 cm ピッチの Anode となっている。

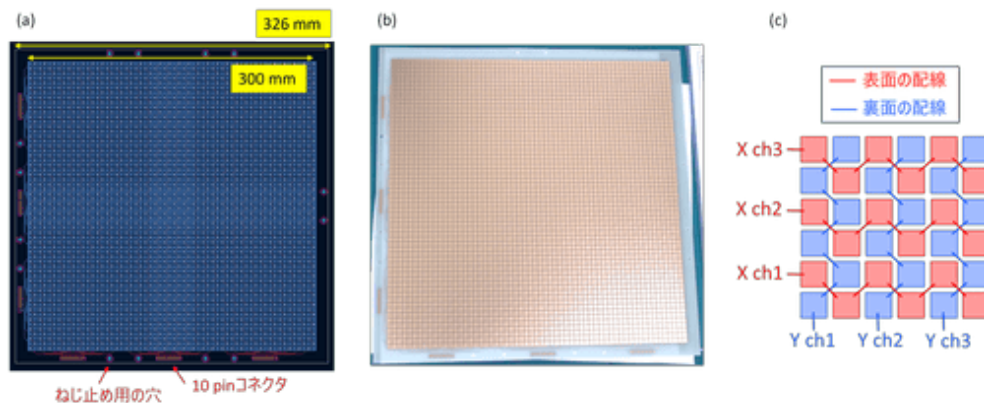


図 4.4: (a)Anode の KiCAD による設計図 (b)Anode 実物写真 (裏面) (c)Anode 読み出し構造の模式図 [16]

4.2 T98 実験 LArTPC 検出器セットアップの設計・構築

本節では T98 実験における光検出器および LArTPC 検出器への要求, および LArTPC 検出器運用システムの設計に関して述べる。

4.2.1 光検出器

T98 実験において, 光検出器に課される要求は以下の 3 点である。

- 極低温 (LAr 温度: 約 87 K) 環境下での安定動作

光検出器は LArTPC 検出器のトリガーとして使用するため, LAr 中に設置される。そのため極低温環境下であっても安定動作する検出器である必要がある。

- LAr 波長変換光 (420 nm) に対する感度

LAr のシンチレーション光波長は 128 nm であるが, 実験時には TPB を蒸着した ESR での反射によって 420 nm の光となる。したがって光検出器はこの波長変換光に対して感度のピークを持つことが好ましい。

- 検出器の大きさ

4.2.3 にて述べるように T98 実験セットアップでは循環系非搭載であるため, 自然熱流入により LAr 量は減少するのみである。したがって, LArTPC 検出器を 200 L 容器の可能な限り下側に配置することは, 検出器の連続データ取得可能期間を延ばすことと同義であり, 不定性のあるビームタイムに対応する上で重要な要素となる。ゆえに LArTPC 検出器よりも鉛直下側に置かれる光検出器のサイズは可能な限り小さいことが求められる。

上記の条件を鑑みて, T98 実験では PMT および MPPC 光検出器を LArTPC 検出器のトリガーとして用いることとした。なお, トリガーは主に PMT で行い, MPPC はバックアップとして 4 個設置している。第 5 章にて実際に使用する光検出器の詳細に関して述べる。

4.2.2 LArTPC 検出器

LArTPC 検出器はすでに構築済みであり, 運用実績のある GRAMS40 検出器をベースに用いる。T98 実験の目的は反陽子捕獲事象の統計を貯めることであり, GRAMS 実験の Background Reduction 能力向上のためには鮮明な飛跡を記録することが不可欠である。一方で, 鮮明な飛跡を得るためにピッチを細分化すると 1 ch 毎に得られる信号量は減少してしまう。これを受けて T98 実験では信号読み出しの Anode ピッチを 2022 年の宇宙線 μ 試験時 (10 mm) の半分である 5 mm とした。新 Anode の詳細は第 5 章にて述べる。

4.2.3 LArTPC 検出器運用システム

T98 実験における LArTPC 検出器運用方法を設計するにあたり考慮しなければならない条件は以下の 4 つに大別される。以下に各条件と, それを与える要因を記載する。

- 安全の確保

安全の確保は最も重要な要素である。第 2 章でも述べたように, LAr を扱う際には極低温, 高圧, 酸欠に特に注意する必要がある。LAr は極低温の液化ガスであり, 扱いを誤ると凍傷の危険がある。液充填時や実験時には配管, 容器内に LAr があるため直接の露出はないものの配管

等が低温となるため注意を払う必要がある。また LAr は気化すると体積が約 800 倍に膨張するため、急激な熱流入や何らかの外的要因によって LAr の塊が気化した場合に容器、配管の破裂、酸欠の恐れがある。したがって K1.8BR という、GRAMS 実験グループ以外の人員が出入りする可能性のある環境、およびビームが出ている期間は容易に検出器に近づくことができないという制約の下で、実験系の安全を確実に担保することが実験系の設計において最も強い条件となる。

- シンプルな LAr の温度・LAr 容器内圧の維持手法

ビームが出ている期間中は、当然ながらハドロンホール内の K1.8BR ビームラインエリアに設置される T98 実験系に触れることはできない。そのため Ar の液相の維持および LArTPC 検出器容器の内圧の維持といった LAr 自体の制御方法を、常に周りに人が待機し適宜チューニングしなければならないような繊細かつ複雑なシステムにすることは非現実的である。したがって、LAr 運用は可能な限り簡易的に安定状態を確保できる手法によってなされる必要がある。

- データ取得可能な LAr 量の保持

先述のように LArTPC 検出器では Cathode および Anode Grid のそれぞれに高電圧を印加することによって検出器内に電場を形成し、電離電子信号をドリフトさせる。したがって放電による検出器および LAr 純度の破壊を防ぐために、LArTPC 検出器は完全に LAr 中にある必要があり、この期間がデータ取得可能期間となる。第 3 章で述べたように T98 実験 Phase-2 では、十分量 ($> 10^5$) の反陽子捕獲事象を取得するために合計 24 時間のビームタイムを要求している。実際には 12 時間のビームタイム→1 日程度の空き時間→12 時間のビームタイムとなる見込みであり、加速器ビームタイムの不確実性、不安定性を考慮するとビームが 12 時間連続で安定して出る可能性は低い。したがって LArTPC 検出器の連続データ取得可能期間、すなわち Anode 部分が LAr 液面よりも鉛直下方向にある状態は、可能な限り長く維持することが理想的であり、現実的には数日程度保たれる必要がある。

- LAr 純度の維持

第 2 章で述べたように LAr 中に N_2 , O_2 , H_2O といった不純物が存在する場合、シンチレーション光および電離電子がその影響を受け、得られる信号量が減少する。特に電子寿命に関しては O_2 , H_2O の混入によって 300 $\mu\text{sec/ppb}$ となることが知られており、T98 実験において使用される後述の GRAMS40 検出器のサイズから、LAr は Subppb 程度の純度が要求される。したがって T98 実験における LAr 運用セットアップではこの純度を満たす必要がある。

上記の 4 条件を満たす T98 実験用の LArTPC 検出器の安定運用手法を設計するにあたり、これまで GRAMS 実験日本グループが行ってきた LArTPC 検出器運用方法に関して、その特徴および利点、不利点を整理する。我々の実験グループが実績のある LArTPC 運用手法は地上用（宇宙線 μ 識別試験：Run22.1）、上空用（気球工学試験：B23-06）の 2 種類に大別される。表 4.1 にこれらの実験の概要をまとめる。

- 宇宙線 μ 識別試験：Run22.1

Run22.1 は GRAMS40 検出器を用いた μ 粒子の崩壊事象と捕獲事象の観測と、飛跡を用いた LArTPC 検出器識別能力の検証を目的とした実験である。図 4.5 に実験セットアップの概略図を示す。Run22.1 のセットアップでは、初期純度を向上させるための充填系および長期間純度維持のための循環系を搭載している。検出器容器として Φ 50 cm の 200 L 真空断熱容器を用いている。充填系および 200 L 容器の性能に関しては本節で後述する。

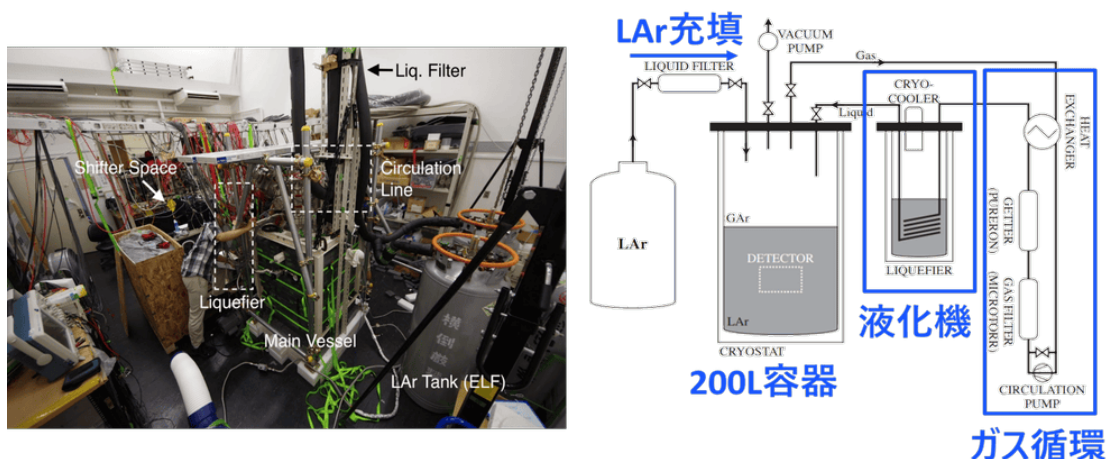


図 4.5: Run22.1 セットアップ概略図

Run22.1 セットアップの特徴は循環系である。循環系は、200 L 容器への自然熱流入によって気化した GAr をガスフィルターを通して純化した後に、液化器を用いて LAr の状態で検出器容器に戻す役割を果たしており、始めに充填した LAr 量を数か月レベルで維持することを可能にしている。循環系には水や酸素を除去する MICROTORR(SAES Pure Gas 社) および窒素を取り除く窒素フィルター (PUREXON 社) が含まれており、LAr 純度を初期純度から大きく損なわせることなく維持することを可能にしている。

このセットアップでは長期間の液量維持, Subppb レベルでの純度維持が可能という利点があるものの、安定制御が困難という欠点もある。このセットアップでは、緊急時のパージバルブは用意しているものの、通常運用時にはセットアップが閉鎖系となる。そのため 200 L 容器および液化器容器の内圧, 温度の制御の精度が安全に直結している。熱流入による GAr 生成による内圧上昇と、ガス循環の流速, 液化器の温度設定等の複数のつり合いを維持しなければ、LAr 量の維持および各容器の内圧, 温度を維持することができない。そのため PID 制御はもちろん行うが、それに加えて LAr が検出器容器内にある期間中は、即座に変化を感知、対応し安全な状態を保つために、実験系のそばに人が常駐する必要がある。

● B23-06 実験

先にも述べたように、B23-06 実験は LArTPC を飛行体に搭載し気球高度で運用した世界初の実験である。B23-06 実験セットアップは、図 4.6 に示すように、フライト系と Run22.1 と同様の充填系（地上系）からなる。このセットアップは数時間の実験時間に必要な最低限の機能のみという非常にシンプルなものとなっている。B23-06 実験は気球実験であるため、放球時の衝撃、振動への耐性、重量・電力の制限、外気圧・外気温の変化、機器の遠隔操作、安全回収といった地上試験にはない要素をクリアする必要があった。そのため、このセットアップにおいては循環系を搭載しないこととした。したがって LAr は気球実験用に筆者が 2022 年に設計した Φ 25 cm 検出器容器への自然熱流入（約 15 W）によって減少するのみである。また、気化により生成する GAr による内圧の変化は、BESS 実験グループよりお借りした絶対圧弁を用いることによって対処した。絶対圧弁はその名の通り弁 2 次側の圧力に基本的には依存せずに 1 次側の内圧を維持するという弁であり、B23-06 実験時も高度の上昇によって変化する外気圧の影響を受けずに 1.2 atm 程度に維持されていた。また数時間のフライト中に明確な純度の悪化がないことも確認されている [25]。なお B23-06 実験における LAr 運用手法の詳細は補遺 B に記載している。

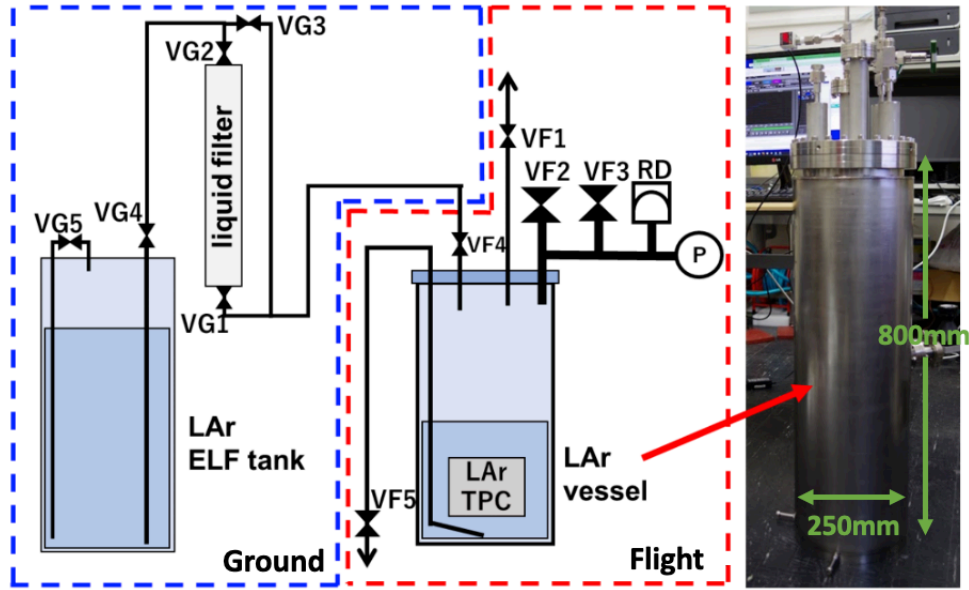


図 4.6: B23-06 実験セットアップ概略図 [25]

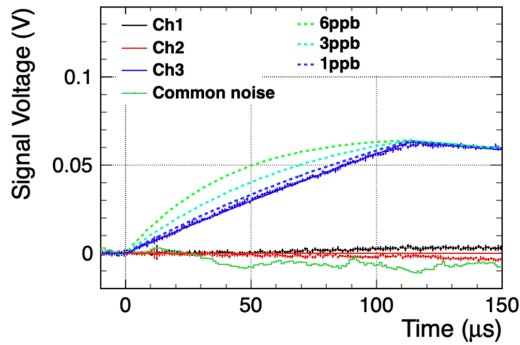


図 4.7: 地上での LArTPC 信号と各純度における予想信号 [25]

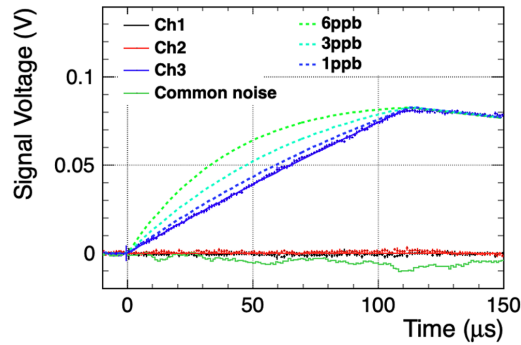


図 4.8: 上空での LArTPC 信号と各純度における予想信号 [25]

このように、B23-06 実験セットアップにおける LAr 運用方法は絶対圧弁による常時自動排気を行うため、閉鎖系ではなく開放系となっている。故に、安全のための監視はもちろん行う必要がある一方で、基本的には液充填完了以後に LAr に対する操作を一切必要としないという利点がある。一方で自然蒸発による液量の減少があるため、容器の断熱性能によって連続データ取得可能時間が大きく左右されるという特徴がある。

表 4.1: Run22.1 および B23-06 の比較

	Rn22.1	B23-06
目的	宇宙線ミュオンの観測	LArTPC の上空運用実証
LAr 容器容量	200 L	20 L
液化器・冷凍機	使用	不使用
循環系	使用	不使用
データ取得期間	1 week	Few hours
LAr 維持可能期間	Few months	1day

以上のように, Run22.1 および B23-06 実験セットアップは, 初期純度を担保する充填系 (液体フィルター) という共通点はあるが, LArTPC 検出器の定常運用時に要求される操作の複雑さが大きく異なり, その結果としてデータ取得時間の長さが大きく異なるという違いがある。

これらの実験の経験および先述の 4 条件を踏まえて, T98 実験用に以下の図 4.9 に概略を示すような実験セットアップを設計した。

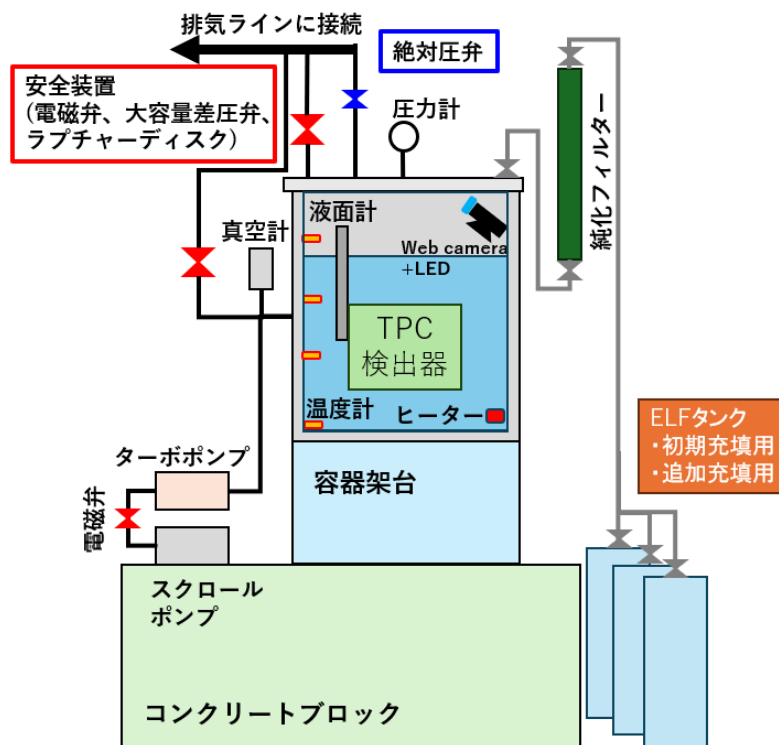


図 4.9: T98 実験セットアップ概略図

T98 実験セットアップは, LAr 運用手法の簡易性, 高圧ガス保安法の観点から, 冷凍機を含む循環系を用いずに, LAr を自然蒸発させる B23-06 方式を採用し, ビーム待機時間の長さに応じて必要な場合には追充填をすることとした。以降では T98 実験セットアップに関して要素ごとに記載する。

検出器容器

T98 実験で使用する検出器容器は, GRAMS40 検出器を収めることの可能な $\Phi 50$ cm 容器 (以降 200 L 容器と呼称する) である。200 L 容器は蓋つきオープンバス型 2 層真空断熱容器であり, 厚さ 2 mm の内槽, 真空断熱層, 厚さ 3 mm の外槽で構成されており, 容器の高さは 100 cm, 容積は約 175 L (鏡板部分の容積が約 15 L) である。T98 実験では本容器に 150 L の LAr を充填する。この 200 L 容器は蓋となるトップフランジとセットであり, トップフランジに溶接された ICF, VCR 規格の複数のポートを LAr, GAr, エレキ類の導入, 排出口として活用することができる。200 L 容器およびトップフランジの図面を補遺 A に記載した。

200 L 容器は真空断熱層部分を真空状態にすることで, 内槽部分への外部からの熱流入を抑制している。この際, 図 4.10 に示すように真空槽の圧力は $O(10^{-2})$ Pa 以下となっていなければ断熱性能としては不十分である。また, 真空断熱層部分にはスーパーインシュレーターが 20 層巻き付けられている。これはマイラーシートにアルミが蒸着されたものとなっており, 輻射による熱流入を軽減する役割を果たしている。

検出器容器の性能として, 特に重要な要素は熱流入量と耐圧性能の 2 点である。まず 200 L 容器の

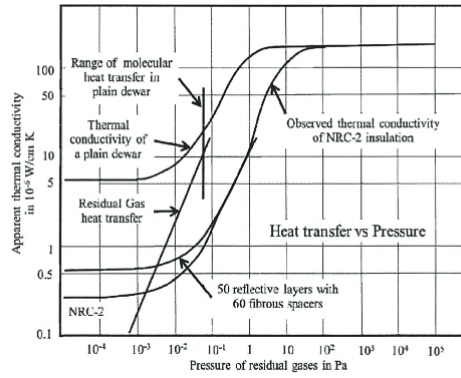


図 4.10: 到達圧力と真空性能 [26]

熱流入量に関して述べる。容器への熱流入は、内槽壁を通じた LAr 液面への熱伝導、GAr 層を通じた液面への熱伝導、熱輻射の 3 種類に大別される。

- 熱伝導：内槽壁

内槽容器を円筒近似し、その断面積を S [m²]、液面までの距離を L [cm]、容器上面と液面の温度差を ΔT [K]、 λ を SUS304 の熱伝導率とおけば内槽壁による熱伝導は以下の式で記述される。

$$Q_{inner} = \int \lambda(T) \frac{S dT}{L} \quad (4.1)$$

T98 実験時には LAr を 150 L 充填する。これはトップフランジから 15 cm の距離に液面が到達することに相当する。したがって、SUS304 の熱伝導率積分値として 27.43 [W/cm] を用いれば、内径 50 cm 容器の内槽壁による熱流入は、充填完了時に約 58 W となる。

- 熱伝導：ガス層

ガス層を円柱近似し、その断面積を S_{gas} [m²]、 λ_{gas} をガスの熱伝導率とおけば、内槽壁同様に熱流入量が求められる。

$$Q_{gas} = \lambda_{gas} \frac{S_{gas} \Delta T}{L} \quad (4.2)$$

したがって、GAr の熱伝導率として 1.6×10^{-2} [W/m・K]、温度差分を 200 [K]、GAr 領域を高さ 15 cm の円柱と仮定すれば、ガス層による熱流入は約 4 W となる。

- 熱輻射

熱輻射はステファンボルツマン定数 σ 、受熱側面積 A_L [m²]、放射側温度 T_H [K]、受熱側温度 T_L [K]、放射側放射率 ϵ_H 、スーパーインシュレーター放射率 ϵ_S 、スーパーインシュレーターの層数 n を用いて以下の式で記述されるが、

$$Q_R = \sigma A_L \frac{T_H^4 - T_L^4}{\frac{1}{\epsilon_S} + \frac{1}{\epsilon_H} - 1 + (\frac{2}{\epsilon_S} - 1)n} \quad (4.3)$$

本容器においては 20 層のスーパーインシュレーターおよび真空断熱層によってこれは十分に抑制されると仮定する。

上記の計算結果から 200 L 容器の熱流入量を 60 W と仮定し、ステップシミュレーションによって 200 L 容器内の液面推移を描いたグラフが以下の図 4.11 である。

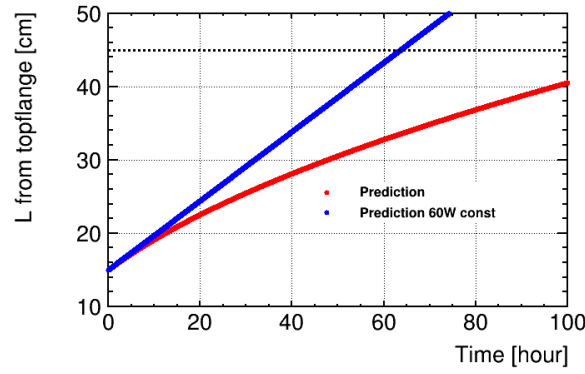


図 4.11: 200 L 容器の液面推移予測

縦軸に LAr 液面のトップフランジからの距離, 横軸に 150 L の充填完了後 ($L=15$ cm) からの経過時間を示している。青線は液面の位置に依らず 60 W の熱流入があると仮定した場合の液面予測であり, 赤線はトップフランジからの距離 L に逆比例して熱流入が減少するという仮定に基づいた液面予測となっている。 $L=45$ cm の線は後述の LArTPC 検出器の Anode 位置に相当する。したがって, 液面が 45 cm ラインに到達した時点で Anode が LAr 液面から出ることとなる。したがって 200 L 容器を用いる場合, 最低でも 60 時間程度は連続でデータ取得可能であると考えられ, 断熱性能としては T98 実験を実施するにあたって問題はないことがわかる。なお, 200 L 容器の熱流入量の実測値は第 5 章で後述するように 60 W 以下であり, 連続データ取得可能時間は約 80 時間であった。

次に耐圧性能に関して述べる。T98 実験において, 200 L 容器内圧は後述の圧力運用システムによって 3.0 atm を上回ることはない。そのため, 200 L 容器は 3.0 atm 以上の耐圧性能を要していれば十分である。JIS B8265「圧力容器の構造—一般事項」に基づき計算した, 200 L 容器の耐圧性能を以下の表 4.2 に示す。なお, LAr が容器内にある場合内槽と外槽の間の空間は真空状態であるため, 表 4.2 には以下の計算式から得られる最高許容圧力-0.1 MPa とした値を記載している。また, 計算式内の各値は以下の表 4.3 に記載の値を用いており, 容器内槽の鏡板形状は 10 % さら形としている。

表 4.2: 200 L 容器耐圧性能

内槽円筒部 [MPa]	内槽鏡板部 [MPa]	トップフランジ部 [MPa]
0.50	0.49	> 1.0

- 円筒胴の最高許容圧力: P_a [MPa]

$$P_a = \frac{200\sigma_a\eta(t_a - \alpha)}{D_i + 1.2(t_a - \alpha)} \quad (4.4)$$

- 10 % さら形鏡板の最高許容圧力: P_a [MPa]

$$P_a = \frac{200\sigma_a\eta(t_a - \alpha)}{RW + 0.2(t_a - \alpha)} \quad (4.5)$$

$$W = \frac{1}{4} \left(3 + \sqrt{\frac{R}{r}} \right) \quad (4.6)$$

- トップフランジの最高許容圧力: P_a [MPa]

トップフランジと容器部分は U タイトシール (臼井国際産業製: CS20080A10V530, 内径

表 4.3: 耐圧計算に使用する値一覧

表記	名称	代入値
σ_a	材料の許容引張応力 [kgf/mm ²]	13.1 (SUS304, -196 °C)
η	溶接継手効率	0.7 (B-1 相当)
t_a	板の実際厚さ [mm]	2
α	腐れ代 [mm]	0
D_i	腐れ後の円筒胴内径 [mm]	500
R	腐れ後のさら形鏡板の中央部内面の半径 [mm]	500
r	さら形鏡板のすみの丸みの腐れ後の内半径 [mm]	50
W	さら形の形状に依存する値	1.54
F_F	ハイドロスタチック推力 [N]	圧力依存
F_ρ	シールからの反作用 [N]	圧力依存
F_m	気密保持のためにシールにかける力 [N]	0.5×10^5
F_S	気密保持のためにシールにかける力 [N]	4.8×10^5
D_j	U タイトシールの平均直径 [mm]	535
W_1	最小締付力 [N/mm]	30
g	溝深さ [mm]	6.5
ρ	静水力学的効率	0.40
d	M20 ボルト呼び径 [m]	0.02
T	ボルトのトルク [N・m]	60

531.0 mm, 断面径 8.0 mm, AL 被膜) によってシールされ, 最高許容圧力時には以下のつり合いが成立する。なお, トップフランジは 200 L 容器に対して M20 ボルト 32 本で固定されている。

$$F_s = F_F + F_\rho + F_m \quad (4.7)$$

$$F_s = \frac{32T}{0.2d} \quad (4.8)$$

$$F_F = \frac{\pi D_j^2}{4} P_a \quad (4.9)$$

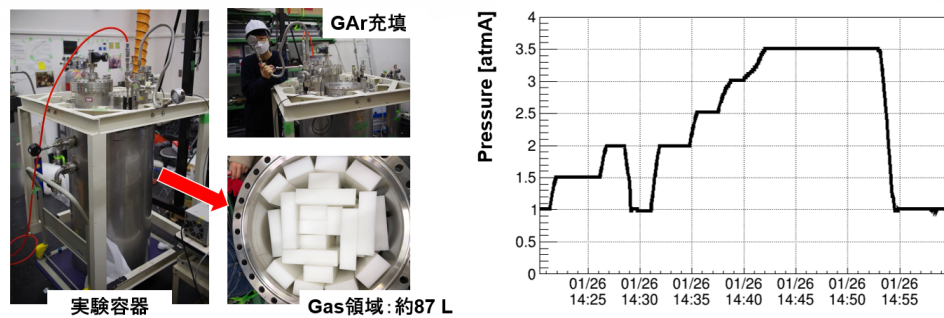
$$F_\rho = \pi D_j \rho g P_a \quad (4.10)$$

$$F_m = \pi D_j W_1 \quad (4.11)$$

これらのつり合いの式を満たす P_a は 1.87 [MPa] となり, トップフランジの最高許容圧力は容器部分と比較し 3 倍以上高い値となる。

上記に示すように 200 L 容器およびトップフランジは設計上 3.0 atm に十分対応可能となっているが, 実際に容器を加圧し, 問題がないことも確かめた。耐圧試験は 200 L 容器に GAr を段階的に充填することによって内圧を上昇させ, 最終的に 0.25 MPaG の状態で 10 分間維持させた。なお, この際に内槽外槽間は真空引きされた状態で, 内槽にはポリエチブロックを敷き詰めており, GAr 領域は約 87 L であった。以下の図 4.12 に試験時の様子及び内圧の推移を示す。耐圧試験中および試験後にリークや変形等の異常は観測されなかった。

以上から 200 L 容器およびトップフランジは断熱性能, 耐圧性能の両面において T98 実験に問題なく使用できる性能を有していることが確かめられた。

図 4.12: Φ 50 cm 容器耐圧試験

検出器容器フレーム, 検出器架台

200 L 容器はトップフランジ付きオープンバス型であるため、検出器の出し入れが容易な構造となっている。容器内部に検出器やセンサーを設置するにはトップフランジを持ち上げる、もしくは高所に設置した容器自身を持ち上げる必要があり、我々は前者の方法を用いている。実際に使用している検出器容器フレームの図面を Appendix に記載した。容器フレームはトップフランジにねじ止めで固定されており、門型クレーンを用いて容器フレーム毎トップフランジを持ち上げることによって、図 4.13 の中央に示すように容器の開閉を行っている。

K1.8BR ビームラインにおいて、ビーム中心の床からの高さは 2 m となっている。したがって検出器容器を床から 1 m 程度の位置に設置しなければ LArTPC 検出器の中心部分にビーム中心を合わせることができない。そのため、T98 実験では高さ 1 m のコンクリブロックの上に T98 実験用に新しく製作した架台を設置し、その架台と容器フレームを固定することによって高さを調整する手法を取っている。架台は中空の直方体状のフレーム（以降架台フレームと呼称）と 3 枚のプレートからなる。200 L 容器フレームは、架台フレームとボルトによって固定されている。それに加えて横揺れ防止としてビーム到来方向を除いた 3 面にプレートを固定することによって 200 L 容器の横揺れを防止しており、設計上震度 7 にも耐えうる強度となっている。プレートには縦長の穴が切られており、その穴のどの高さでボルトを固定するかによって 15 cm ほどの高さ調整が可能となっている。また架台フレームはターンバックルを用いてコンクリートブロックに固定される。

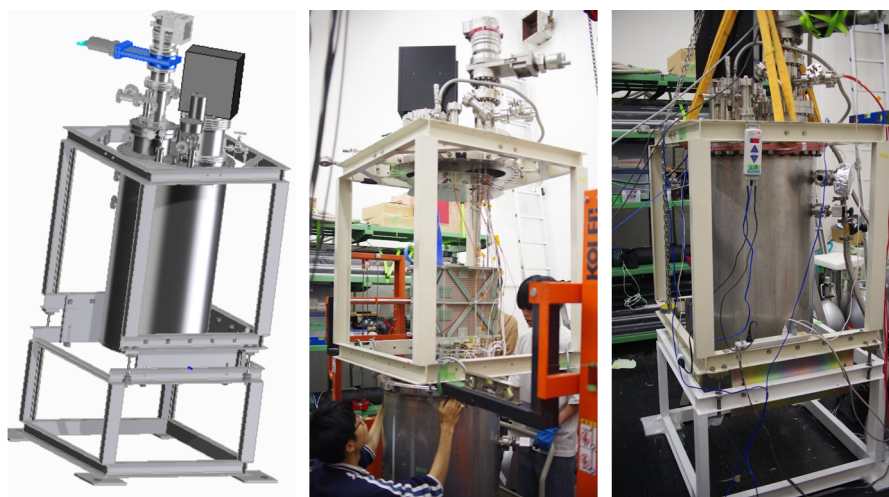


図 4.13: 容器フレーム, 架台の CAD 図および実物写真

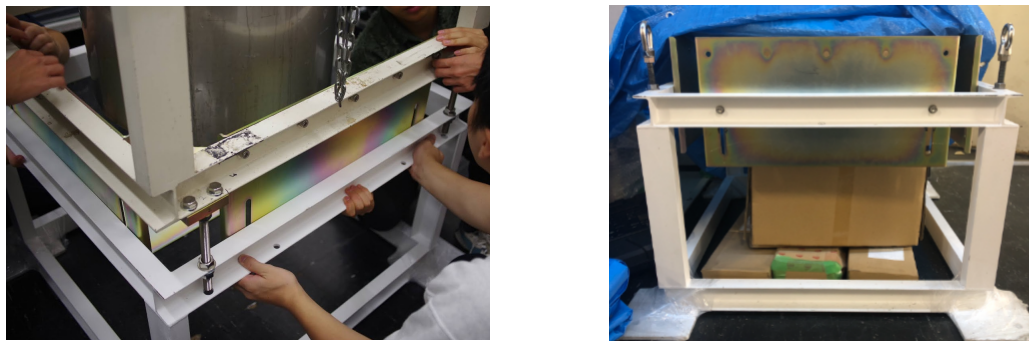


図 4.14: 架台フレームボルトおよびプレートの実物写真

充填系

先にも述べたように, LArTPC 検出器では LAr 純度が非常に重要である。LAr 中の不純物の量は信号量に直結するため, T98 実験の目的である反陽子捕獲事象の収集に影響を与えうる要素となる。T98 実験の純度において達成しなければならない項目は, 先に述べたように Subppb レベルの初期純度の担保および初期純度の維持である。T98 実験で用いる GRAMS40 検出器は高さが 30 cm であり, これに対し印加する電場は $O(100)$ V/cm であるため, 突き抜け事象でのドリフト時間は図 2.7 に示すように約 $300 \mu\text{sec}$ となる。したがって必要な純度は 1 ppb 程度 (図 2.5 参照) であり, 初期充填時にはまずこれを達成する必要がある。また液充填完了以降, 容器内壁や容器内の検出器部材からのアウトガスによって LAr 純度は時間経過とともに悪化していくため, 数日間のデータ取得期間全てにおいて電離電子信号を取得するためにはこれを低減する必要がある。

早稲田大学では自作の液フィルターを用いて初期純度を担保している。液フィルターは全長 63.5 cm の円筒状ステンレス容器内に 2 種類のフィルター剤が詰められたものであり, 容器両端に取り付けたバルブによって中身が密閉されている。フィルター剤には脱水性モレキュラーシーブ (4A XH-5 8x12) および還元済みの酸化銅触媒 (R3-11, R3-11G) を用いている。前者によって H_2O の除去, 後者によって O_2 が除去される。

脱水済みモレキュラーシーブ(4A)+還元済み酸化銅触媒(R3-11G)

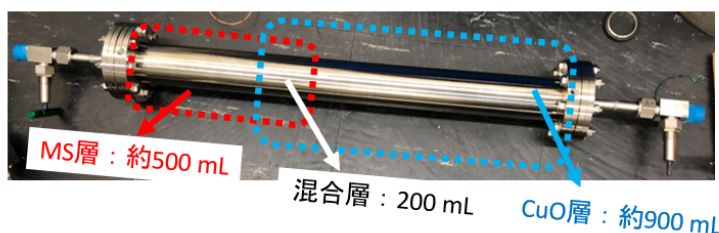


図 4.15: 液体フィルター

本フィルターは, 図 4.15 に示すフィルター本体とバイパスラインからなる。なお, バイパスラインは充填系を LAr ELF タンク及び検出器容器液充填口に接続する際に, 充填配管中の空気の 200 L 容器への混入を防ぐための GAr の経路として用いられる。

B23-06 で用いた 10 cm 角の 3 ch LArTPC 検出器を用いた本フィルターの性能確認の結果を以下の図 4.16 および図 4.17 に示す。本フィルターを用いて液充填を行い, 1 ch にのみ信号がある LrTPC 検出器を突き抜ける事象を用いて, 特定の時定数の場合の予想値 [27] と比較することによって信号の時定数を見積もった。

$$V_{out}(t) = \frac{Q \times Gain \times \tau_{amp} \times \tau_{pur}}{(t_1 - t_0)} \left(e^{-\frac{t-t_0}{\tau_{pur}}} - e^{-\frac{t-t_0}{\tau_{amp}}} \right) \quad (4.12)$$

ここで, t_0 は信号の立ち上がりの時間であり, t_1 は信号が最大値となる時間である。結果として, 時定数は 200 μsec 程度, すなわち初期純度にしておよそ 1 ppb となっており, Run22.1 でも実績があることからわかってはいた結果ではあるが, 本フィルターを使用することで Subppb レベルの初期純度を達成可能であることが確かめられた。なおバイパスラインを用いた液充填によって ELF タンク内の LAr の純度に関しても見積もったところ, 数 ppb という結果となった。

なお液充填後のアウトガスによる純度悪化に対しては, 液充填前に 2 週間以上の 200 L 容器内槽の真空引きの実施およびシリコンヒーターによるベーキングを行うことにより対策している。

また, 液充填フィルターと 200 L 容器トップフランジの液入れ口は充填効率やフィルターから液充填口までの配管中からの不純物のしみ出しを鑑みて近いことが好ましい。そのため, T98 実験セットアップにおいては, 容器フレームに MISUMI 製のアルミフレームを用いて支柱を取り付け, その支柱に液フィルターを固定することによって取り付け高さを確保することによって距離を最短化している。なお, 液体フィルターはコンクリブロック状の容器フレームに固定され, コンクリートブロック脇に置かれる LAr ELF タンクからは距離があるため ELF タンクから液体フィルターまでの距離は 4 m 程度となっている。

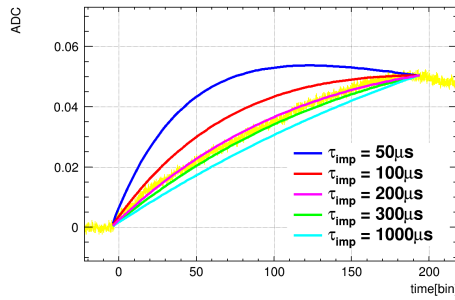


図 4.16: LAr 純度 (フィルター有)

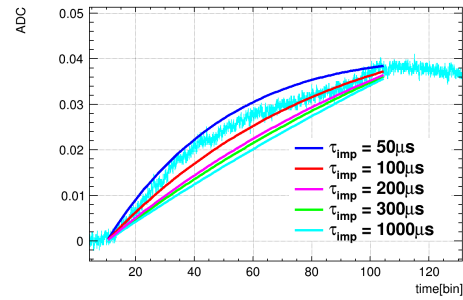


図 4.17: LAr 純度 (フィルター無)

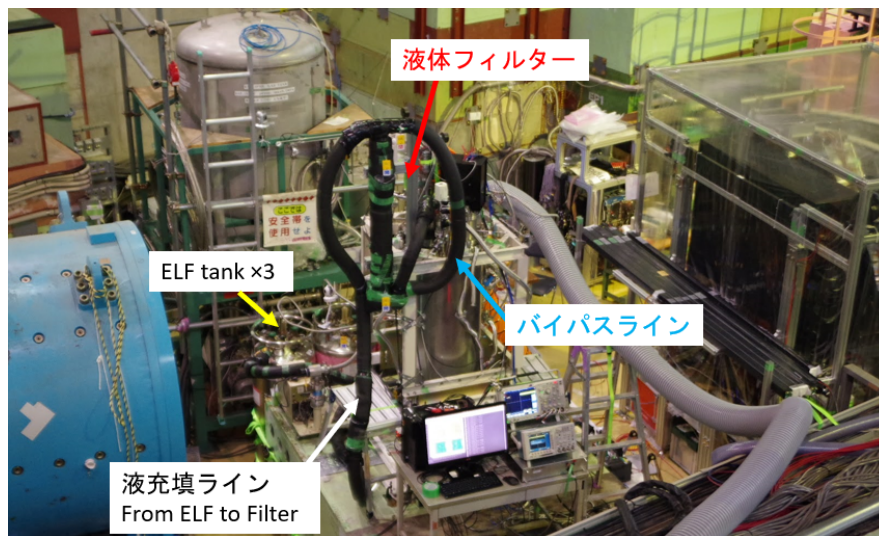


図 4.18: T98 実験における実際の液体フィルター位置および充填ライン

安全系：200 L 容器内圧維持手法

概要でも述べたように、T98 実験セットアップでは循環系が非搭載であり LAr 量は自然熱流入によって減少するのみである。そのため、200 L 容器内の圧力、LAr 温度を安全に維持するためには液充填完了直後から恒常的に GAr を排出する必要がある。その際に容器の内圧は不純物の混入を抑制するために常に陽圧である必要がある。この時検出器容器内圧が高压であると安全上のリスク等があるため、 $O(10^{-1})$ atm 程度の差圧が望ましい。

T98 実験では、200 L 容器内圧を絶対圧弁によって 1.1-1.2 atm 程度に維持する。それに加えて緊急時用の対策として電磁弁、差圧弁、破裂弁の 3 つの安全策も用意している。各弁の設定値は以下の表 4.4 に示すとおりである。

表 4.4: T98 実験で用いる安全対策バルブ		
弁の種類	設定圧力	流量
絶対圧弁	1.12-1.25 atmA	$O(10)$ L/min
電磁弁	通電時開	
差圧弁	0.15 MPaG	600 L/min
破裂弁	0.19 MPaG	

本実験で使用する絶対圧弁は BESS 実験グループからお借りした TAVCO 社製の物であり、 17.5 ± 1.0 psi、すなわち 1.1-1.2 atm 程度に圧力を維持するため、B23-06 方式に適した仕様となっている。お借りした 17.5 ± 1.0 psi 設定の絶対圧弁は 3 つ (Serial Number : 59,61,62) あり、各絶対圧弁に対して流量に対する安定圧力値を確認することによって、T98 実験本番で用いる弁の選定を行った。そのセットアップおよび結果を以下の図 4.19 に示す。容器にはブルドン管、圧力計、流量計が取り付けられており、容器内圧および容器に流す GAr の流量をモニターできるようになっている。まず絶対圧弁に 10 L/min で 1 分、その後 50 L/min で 1 分ガスを流し刺激を与え、その後 3 L/min、5 L/min、10 L/min、20 L/min、30 L/min、50 L/min でそれぞれ 2 分程度ガスを流し、容器内圧をモニターした。結果として、3 つの絶対圧弁はいずれも安定圧力は流量に依存するものの、 $O(10)$ L/min の流量に対しては一定の圧力値で維持できることが確認された。

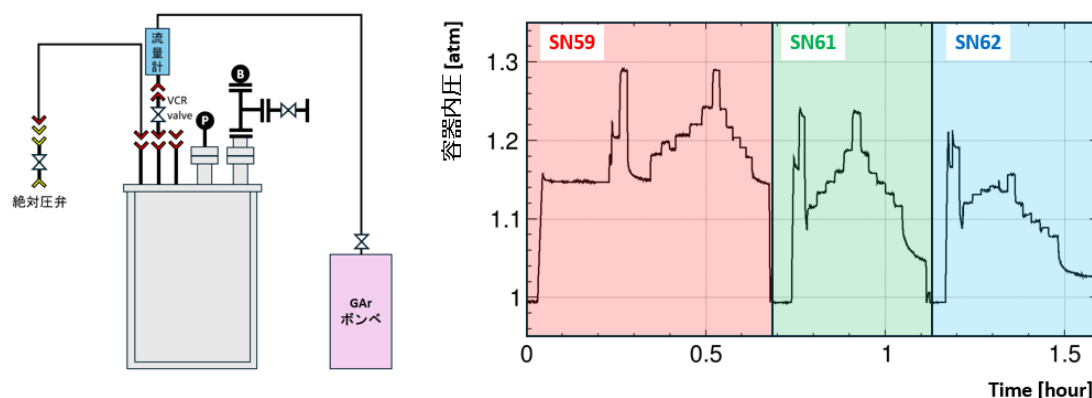


図 4.19: 左：絶対圧弁性能試験セットアップ 右：流量と容器内圧

なお、流量の変化に対する内圧変化が最も小さい個体は SN62 であったが、この弁は B23-06 実験フライトに用いたものであり海水等を浴びているため、T98 実験用セットアップでは SN61 の絶対圧弁を採用することとした。

また、この絶対圧弁の動作の信頼性は図 4.20 に示す B23-06 実験時の結果からも高いことがわかつ

ている。気球放球時の衝撃や、外圧、外気温の変化といった環境の変化の影響を受ける条件下においても 1.1-1.2 atm の範囲内で検出器容器内圧を維持できており、LAr 温度も圧力の変化による 1 K 未満の変動はあるものの安定している。なお B23-06 実験容器の熱流入量は実測で約 15 W であり、これは 3 L/min の GAr 生成に相当する。

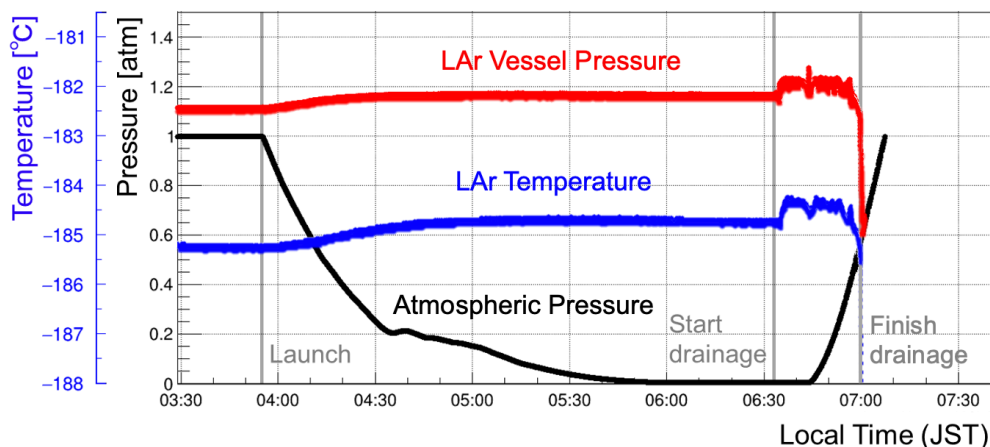


図 4.20: B23-06 実験の容器内圧の推移 [25]

このように、200 L 容器への熱流入（約 60 W）による 10 L/min 程度の GAr 生成による内圧上昇は、絶対圧弁によって十分対処可能であり、通常運用時には T98 実験時の内圧は 1.1-1.2 atm に安定に維持される。

T98 実験中に生じる GAr 量は、これまで述べたように安定な状態では絶対圧弁のみで対応可能な 10 L/min 程度である。しかし、絶対圧弁の動作不良もしくは容器の断熱性能の低下等のなんらかの要因により容器内圧が上昇する可能性も安全な実験の遂行のためには考える必要がある。本セットアップでは電磁弁、差圧弁、破裂弁の 3 つの安全策によって容器の安全を担保する。

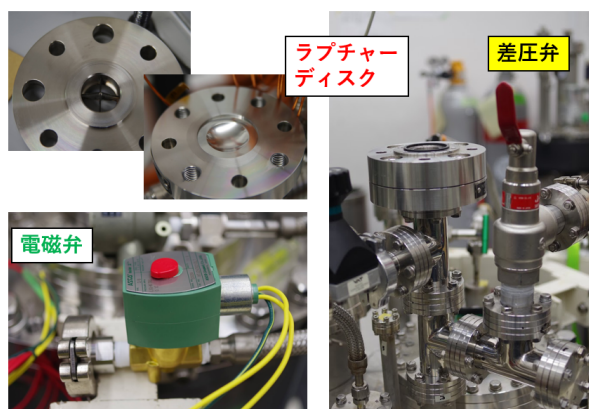


図 4.21: 電磁弁, 差圧弁, 破裂弁

電磁弁（J263G210LT）は常時閉で、DC24 V 印加時のみ開く仕様となっており、何らかの異常で絶対圧弁が動作せずに容器内圧が上昇する場合にはまずこれを開くことにより容器の内圧上昇を抑える。また、差圧弁（ふく太郎 SL39）は弁の 1 次側圧力が 2 次側圧力よりも 0.15 MPa 高くなった場合に開く仕様となっている大流量の弁であり、600 L/min ほどの流量をもつ。絶対圧弁および電磁弁で対応できないほどの GAr が生成された場合にはこの大流量弁が作動することにより容器の安全

を担保する。なお、差圧弁はレバーを開くことで常時開の状態にすることができ、GAr を多量に排出する必要のある液充填時および液蒸発時にはこのレバーを開状態にして運用する。破裂弁は、弁の1次側圧力が2次側圧力よりも0.19 MPa 高くなった場合に破れる仕様となっている不可逆な大流量弁である。破裂弁はナイフ付きのカバーとディスクからなり、一定値以上の圧力を受けるとディスクがナイフに押し当てられ破れる構造となっている。

このように T98 実験セットアップにおいては、通常運用時は絶対圧弁を用いた安定的な内圧維持を行い、万が一真空槽の破れや容器の破損等によって大量の GAr が生成され容器内圧を 1.2 atm 以下に抑えられない場合、電磁弁、差圧弁、破裂弁を作動させることによって、容器内圧を 1.9 atmG 以下に維持する設計となっている。

排気系：GAr 排気ライン

T98 実験セットアップでは先述のように常に GAr を吹かせ続けるシステムを採用している。したがって実験系付近の換気が安全上不可欠である。特に K1.8BR ビームエリアは地下であること、また付近の別のエリアで他の実験グループが作業を行うこともあるため、200 L 容器から排出される GAr は厳密に取り扱う必要がある。したがって本セットアップでは 200 L 容器および LAr ELF タンクの GAr が放出されうる経路を1つの配管（以降排気配管と呼称）に集約し、施設側排気ラインに接続するという対策を取った。排気配管は ICF114 の I 字配管に CF70 ポートが6個、ICF114 ポートが2個ついている配管であり、これに 200 L 容器から絶対圧弁、差圧弁、内槽破裂弁、外槽破裂弁を、ELF tank からはタンクのガス放出口を図 4.22 の概略図に示すような形で接続する。

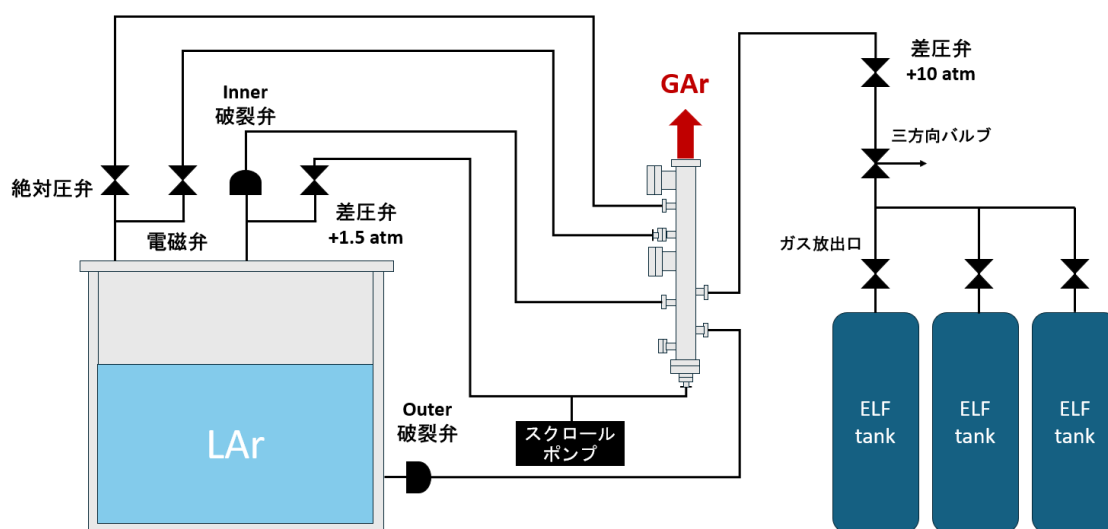


図 4.22: 排気配管接続概略図

液充填時を含め実験中に生じる GAr 流量は以下の表 4.5 に示すとおりである。

表 4.5: T98 実験（通常運用時）における GAr 流量	
	流量
液充填時	0.5 m ³ /min
データ取得時	0.01 m ³ /min
液蒸発時	印加電圧によって調整可能
ELF タンクからのガス放出	バルブの絞りにによって調整可能

K1.8BR ビームラインの有する排気能力は 10 m³/min であり、表 4.5 に示す通常運用時に生じる

GAr 量を処理するのに十分な能力となっている。そのため、T98 実験時には図 4.23 に示すように排気配管の出口を施設側排気ラインに接続することによって安全を担保する。図中の青線で囲まれた箇所には絶対圧弁が固定されている。

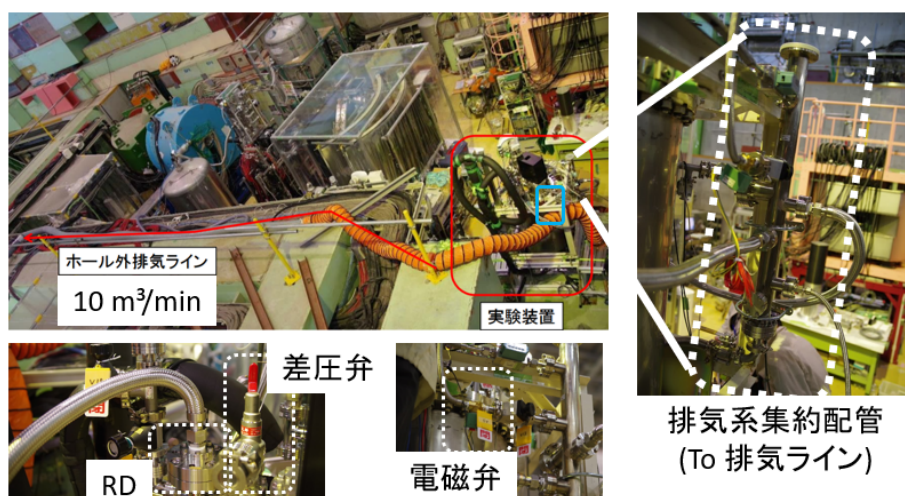


図 4.23: K1.8BR エリア排気ライン

なお、LArTPC 検出器セットアップは 2024 年 12 月に J-PARC K1.8BR に輸送、設置済みであるが、2025 年 1 月時点では T98 実験の前にビーム試験を行っている E73 実験がビームポジションにあるため、我々の検出器は図 4.24 に示すように本番用のビームを受けられる位置には設置されていない。

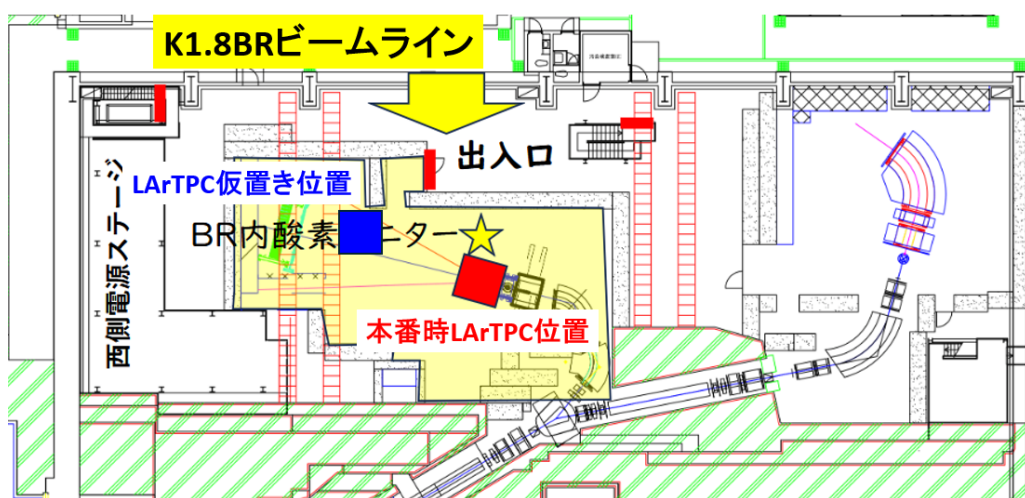


図 4.24: T98 実験実施位置と 2025 年 1 月現在の検出器位置

したがって図 4.23 は準備エリアにおける排気ラインの接続の写真となっており、施設側排気ラインと排気配管との距離が T98 実験本番時とは異なるがセットアップのコンセプトは同じである。

何らかの異常が生じて 200 L 容器内に充填した最大 150 L の LAr が一気に全量蒸発した場合、瞬間的に 120 m³ の GAr が発生することとなる。約 20 m × 8 m の K1.8BR エリア内の高さ 1 m の空間までこれが拡散したと仮定した場合、エリア内の酸素濃度は 11.9 % まで減少し、酸欠による身体異常を生じる。そのため、この最悪想定への対策として、LAr 使用時のハドロンホール立ち入り制限、酸素濃度および 200 L 容器内圧に紐づけたアラートシステムの導入、ハドロンホール内への GAr の拡散という 3 つの対策を用意している。これらの詳細に関しては第 6 章にて記述する。

5 宇宙線 μ による LArTPC 検出器性能実証

T98 実験用に設計した LArTPC 検出器セットアップの性能実証のため、早稲田大学および J-PARC K1.8BR ビームエリアにて宇宙線 μ 試験を実施した。本章では早稲田大学における宇宙線粒子反粒子識別試験のセットアップおよび観測したデータについて述べ、次章にて J-PARC での試験について述べる。

5.1 宇宙線 μ 試験概要

T98 実験 LArTPC 検出器を用いた宇宙線 μ 観測試験を、3 回 (Run24.1: 2024/6/26-7/1, Run24.2: 2024/10/22-10/25, Run24.3: 2024/11/18-11/20) にわたって早稲田大学西早稲田キャンパス 65 号館 1 階の実験室にて実施した。

本試験の目的は、数日レベルでの LArTPC 検出器の安定運用手法の検証、試験中の純度推移の検証、追充填後の純度変化の検証の 3 点である。以下の図 5.1 および図 5.2 に宇宙線 μ 試験における検出器全体の概略図と LArTPC 検出器の概略図を示す。



図 5.1: 検出器全体概略図

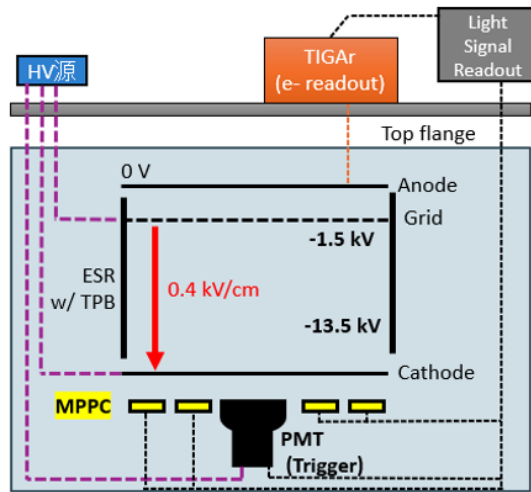


図 5.2: LArTPC 検出器模式図

光信号検出のために、PMT1 本および MPPC を 4 個、電子信号読み出しのために GRAMS40 検出器を使用する。荷電粒子が液体アルゴンに入射した際に発生するシンチレーション光を LArTPC の下に設置した PMT および MPPC で、電離電子を Anode で読み取ることによって検出器に入射した粒子の飛跡を取得する。

5.2 宇宙線 μ 試験セットアップ

本試験において、基本的な検出器構成は T98 実験のセットアップと同様であるが、排気配管や安全確保の立ち入り制限等、J-PARC 用のセットアップと比較して簡略化している点がある。本節では早稲田大学での試験時の検出器および運用セットアップに関して述べる。

5.2.1 LAr テストスタンドと LAr 運用

以下に宇宙線 μ 試験全体のセットアップの写真とセットアップ概略図を示す。

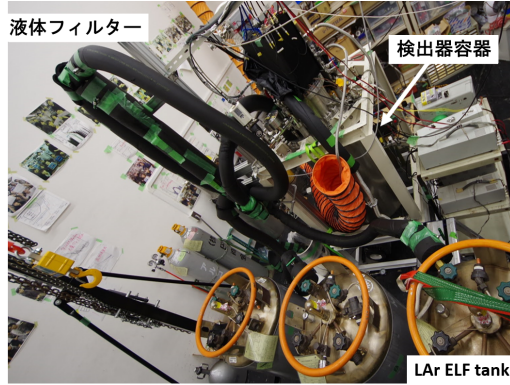


図 5.3: 早稲田テストスタンド

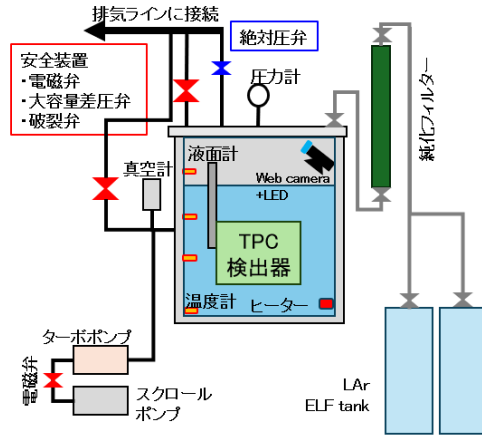


図 5.4: セットアップ概略図

LAr は先述の 200 L 容器に保持し実験を行う。また LAr に関しては, 巴商会株式会社より購入する商業用の一般的な LAr であるため, 先述のように充填をする際は先述の自作のフィルターを通すことにより Subppb 程度の初期純度を担保している。なお, 200 L 容器は実験開始日の 2 週間以上前から内槽を真空引きすることによって, 液充填後の純度悪化要因となるアウトガスを低減させている。LAr 充填開始直前の内槽真空度およびアウトガスレートは, Run24.2, Run24.3 いずれも $O(10^{-4})$ Pa, $O(10^{-1})$ Pa/hour であった。

200 L 容器内には白金抵抗温度計や液面計, 真空計, 圧力計など実験系の安定性を確認するためのセンサーを設置している。また, 200 L 容器外部では室温や実験室の酸素濃度などを確認している。これらは, 実験を安全に遂行する上で最も重要な要素であるため, DataLogger (GRAPHTEC GL840) でデータを自動取得し, 圧力や酸素濃度といった各値について設定した基準値を上回った場合にはアラームが鳴る設定にしている。以下の図 5.5 に DataLogger の ch に対応する環境モニターの概略図を示す。

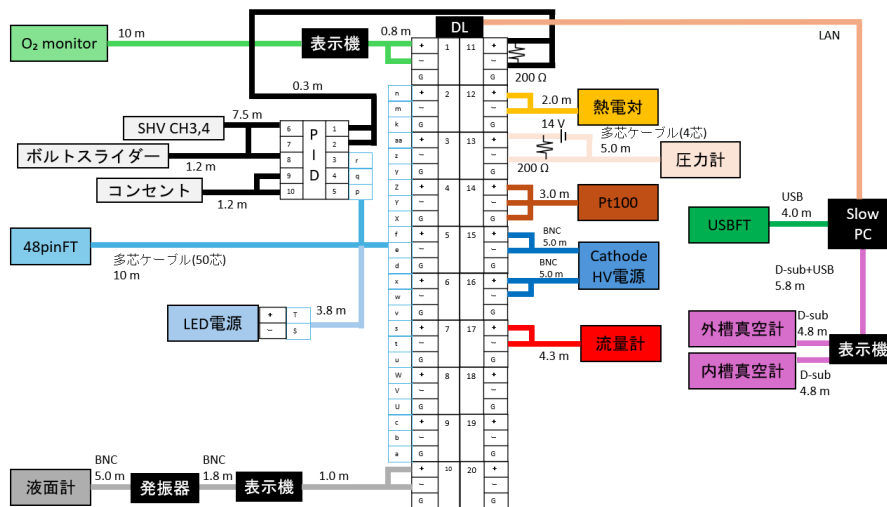


図 5.5: 環境モニターシステム図

また、実験期間中は Run shift をくみ、24 時間体制で常に実験室内に 2 人のシフターを配置し、200 L 容器の外槽真空度や、内圧、温度といった各種機器の値を確認しており、異常があった場合に即座に対応できる体制を整えている。

5.2.2 光検出器

T98 実験用セットアップにおいて、光検出器に課される要求は先に述べたように以下の 3 点である。

- 極低温（LAr 温度：約 87 K）環境下での安定動作
- LAr 波長変換光（420 nm）に対する感度
- 検出器の大きさ

本実験では PMT 検出器 1 個および MPPC 光検出器 4 個を光検出器として用いており、PMT 検出器により Trigger をかけている。以降では使用した PMT および MPPC 検出器の詳細を述べる。なお、光検出器に関しては早稲田大学での実験時と T98 実験時で違いはなく、同一の検出器を用いる。

- PMT 検出器：R6041-506

T98 実験で使用する PMT 検出器は浜松ホトニクス社製の R6041-506 である。本検出器の Gain は 700 V で 2×10^5 、有感波長領域は 160-650 nm、420 nm に対する QE は 25 % である。また検出器の合成石英窓面サイズは 2 インチ、検出器高さは 35 mm となっており、小型の検出器となっている。また、本検出器は LXe を用いる MEG 実験や、B23-06 実験でも使用実績があるため、極低温環境下での安定動作に関しても問題がなく、先述の 3 条件をすべて満たす光検出器となっている。

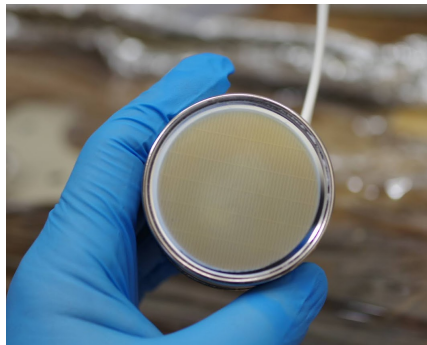


図 5.6: PMT 検出器：R6041-06

- MPPC 検出器

T98 実験で使用する MPPC 検出器は浜松ホトニクス社製の S13361-6050AE-04 である。早稲田大学では GRAMS 実験以前に実施していた ANKOK 実験において本 MPPC の使用実績があり、LAr 温度での安定動作に問題がないことを確認している。以下に MPPC のスペックを示す。

表 5.1: MPPC 検出器のスペック [28]

Parameter	value
Number of channels	16 (4×4)
Effective photosensitive area/channel	$6 \times 6 \text{ mm}^2$
Spectral response range	320-900 nm
Peak sensitivity wavelength	450 nm
Photon detection efficiency	40 %
Gain	1.7×10^6
Breakdown voltage	$53 \pm 3 \text{ V}$

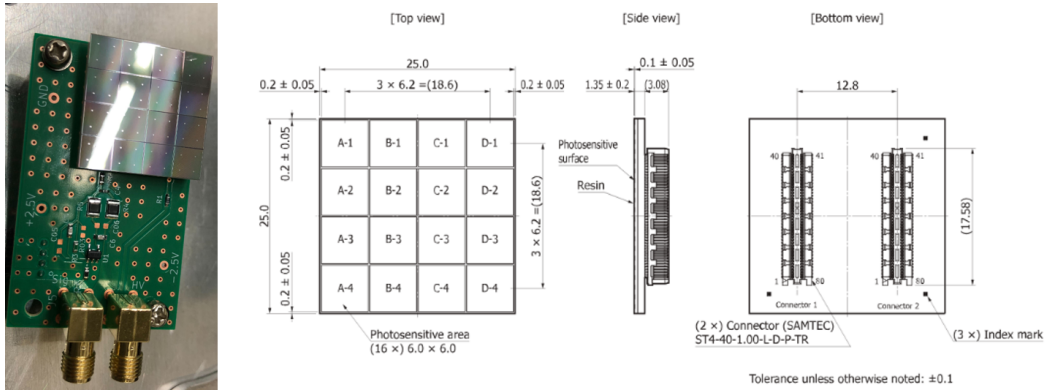


図 5.7: MPPC 検出器 : S13361-6050AE-04 [28]

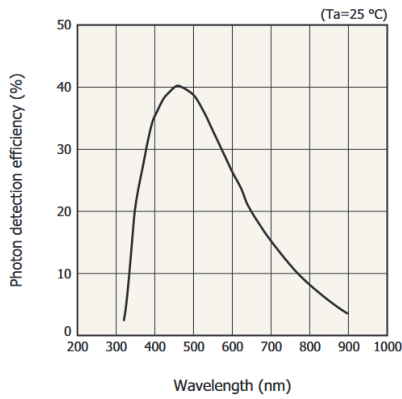


図 5.8: MPPC 検出器 QE (25 °C) [28]

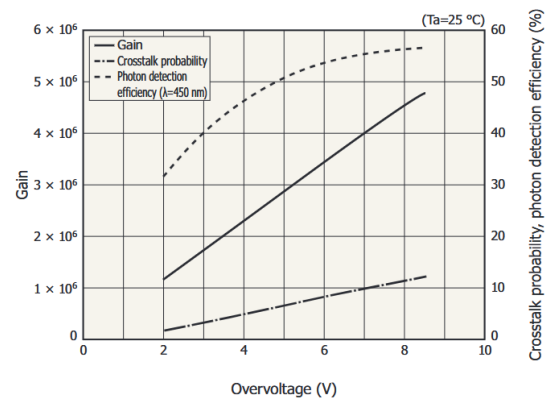


図 5.9: MPPC 検出器 Gain (25 °C) [28]

T98 実験において、光信号はあくまで Trigger としてのみ使用するため数 mm レベルの分解能を必要としないこと、またトップフランジに取り付ける Feedthrough で使用可能な ch 数に制限があることを鑑みて、Array タイプの MPPC を 1 ch で読み出すこととした。MPPC 信号読み出し基板は GRAMS コラボレータである大阪大学で開発されたものを使用している。本基板はトランスインピーダンスアンプ ($\pm 2.5 \text{ V}$ 印加) を用いて光信号を電圧信号として読み出す。また、アンプのフィードバック抵抗値は $3.2 \text{ k}\Omega$ となっており、16 ch MPPC を 4 直列 4 並列接続し 1 ch で読み出す構造となっている。なお、本基板は LAr 温度での使用実績があるため、極低温環境下での動作にも問題がない。

上記の検出器が 200 L 容器内のバッフル板 (PMT 板) 上に, 以下の図 5.10 に示す位置に配置されている。PMT 板中央には PMT 検出器が固定され, MPPC 検出器は TPC 検出器底面を 4 等分した際の各区分の中央に MPPC がある位置で固定されている。なお, 本 PMT 板は TPC 検出器底面を完全に覆う形状となっているため, 後述の液蒸発時に発生する気泡が TPC 内部に侵入することを防ぐ構造となっている。

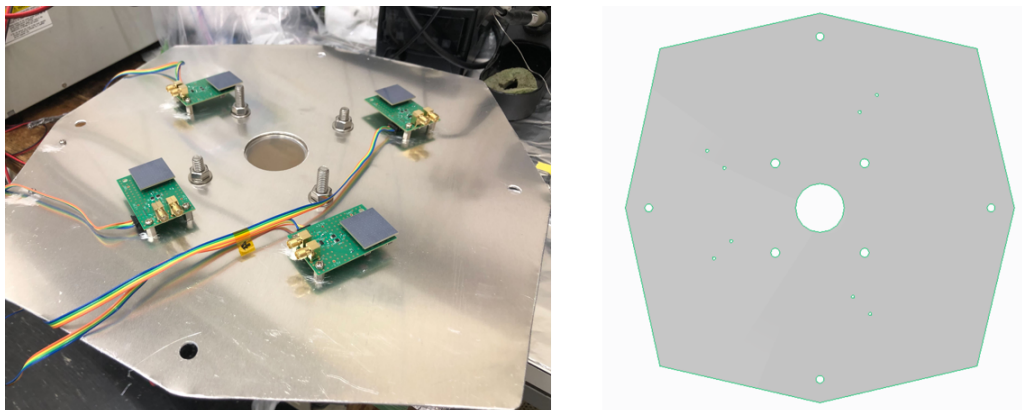


図 5.10: PMT 板と光検出器配置

5.2.3 LArTPC 検出器

先述のように, T98 実験で使用する LArTPC のベースは 2022 年に設計・構築した GRAMS40 検出器である。本節では GRAMS40 検出器の T98 実験に向けた 2022 年の宇宙線 μ 識別試験時からの変更点および Data 取得 Flow を記述する。

GRAMS40 は図 4.1 に示したように Cathode, Side Plate, Anode Grid, Anode および補強パーツによって構成されており, 2022 年からの変更点は信号読み出しおよび Side plate 内側の ESR である。

- 検出器内部の ESR

宇宙線 μ 識別試験時には宇宙線 μ 識別試験時には ESR を接着剤を用いて貼り合わせて一辺 30 cm 程度の ESR を作成, 使用していた。Run24.1 では同一の ESR を用いて試験を実施したが, Run24.1 終了後に一部剥がれていることを確認した。また接着剤は LAr 中に不純物を染み出す要因にもなりうるため, Run24.2 以降では 熱による溶着と針なしホットキスを用いて 1 辺 27 cm の正方形を作成した。

- 信号読み出し

電離電離信号を読み出す Anode に関しては PAD 構造および読み出しエレクトロニクスを変更した。読み出しエレクトロニクスは LTARS2014 ではなく, より性能の良い TIGAr (TPC electronics for Ionized signal in Gas and liquid Argon) Board を用いる。TIGAr Board のスペックに関しては以下の表 5.2 に記載した。



図 5.11: TPC 内壁と TPB 蒸着後の ESR (接着剤使用)

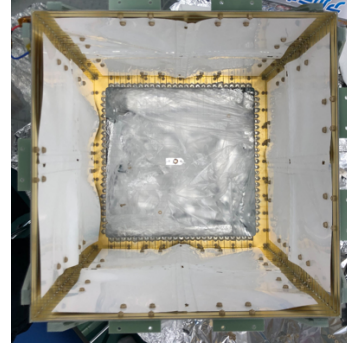


図 5.12: TPC 内壁と TPB 蒸着後の ESR (接着剤不使用)

parameter	value
ASIC version	LTARS2018K06A
ADC	AD9637BCPZ-40
FPGA	Artix-7 XC7A200T
Number of channels	32 ch/board
Sampling rate	2.5 Ms/s
Maximum readout rate	~100Hz
ENC	$\leq 4000e^-$ @300pF
Resolution	0-2V, 12bit
Dynamic Range	$\pm 120fC$

表 5.2: TIGAr board のスペック

また, Anode PAD に関しては粒子飛跡の分解能を向上させるため, 10 mm ピッチから 5 mm ピッチに変更した。それに伴い ch 数は X 方向 60 ch, Y 方向 60 ch の計 120 ch となり, 32 ch/枚である TIGAr Board 4 枚でこれらの信号を読み出す。

以下の図 5.13 に Anode PAD の KiCAD 図および実物写真, PAD 構造の概略図を示す。Anode PAD は 1 辺 5 mm の三角形パッドが規則的に並んだ構造となっており, Anode Grid の 5 mm $\times$ 5 mm の構造の内側に X, Y に対応する三角形パッドが 1 つずつ入る。

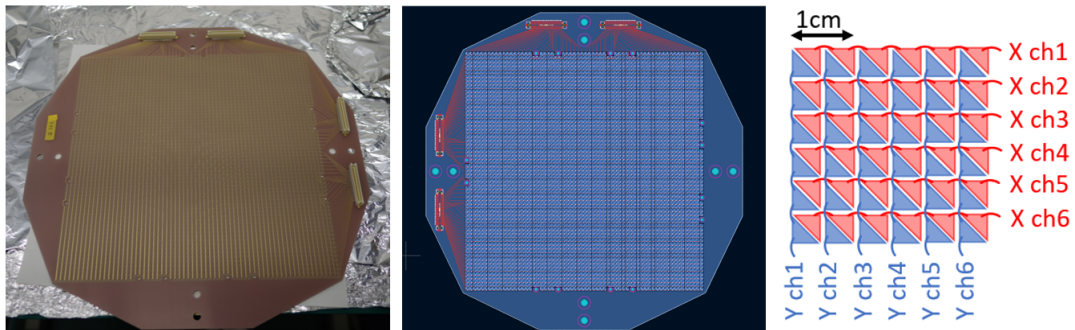


図 5.13: Anode PAD 実物 (左)・CAD 図 (中央)・概略図 (右)

LArTPC および光検出器の Data 取得 Flow の概略を図 5.14 に示す。LArTPC 検出器の電離電子

信号は先述の TIGAr ボードによって取得され、光信号は Run24.2 までは SIS3316 によって、Run24.3 以降は caen V1724 によって取得した。

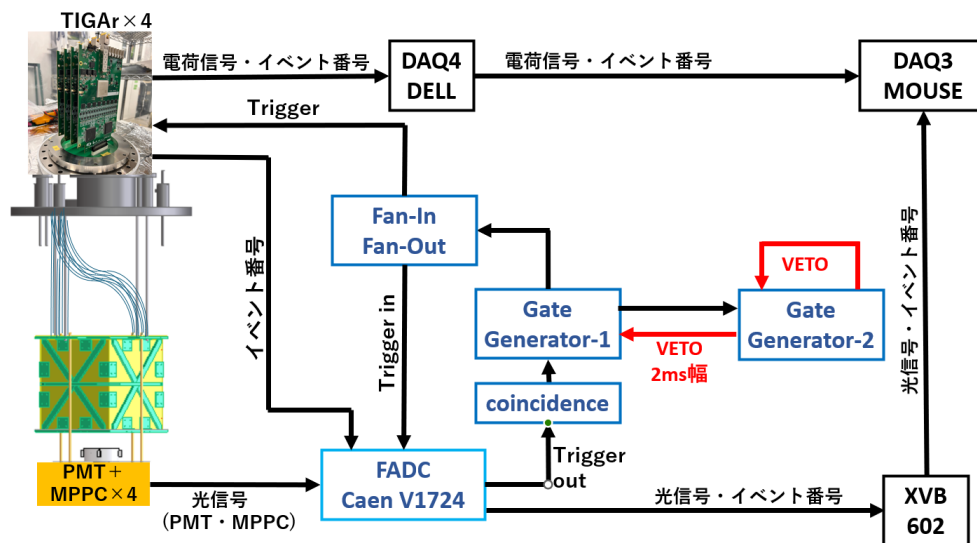


図 5.14: DAQ の流れ

5.2.4 検出器の設置

検出器の位置と実際に LArTPC 検出器をトップフランジからつるした後の写真を以下の図 5.15 に示す。

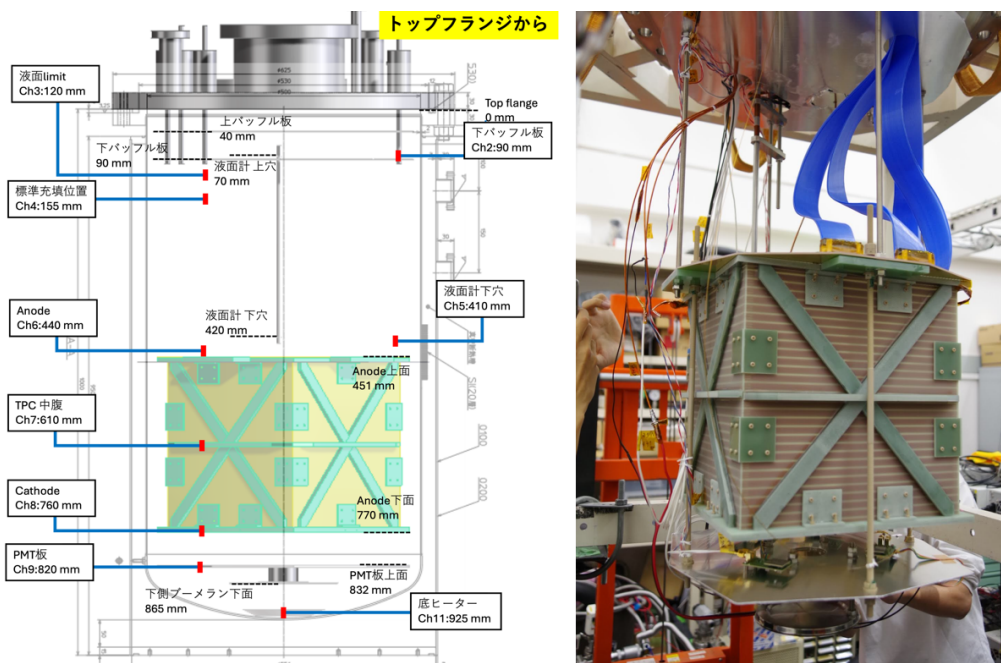


図 5.15: 検出器の容器内配置

LArTPC は 200 L 容器トップフランジから降りてくるボルトによってつるされて固定されており、光検出器は LArTPC からつるされるボルトに固定された PMT 板に固定されている。LArTPC は

Data 取得可能な液面維持期間を最大化するために可能な限り下部に設置しており、容器底に配置している液蒸発用ヒーターが検出器位置に制約を与えている。このヒーターは市販の T-Fal 製品を分解し取り出したもので 100 V, 1250 W と高出力であるため、実験終了後にこれを用いることで LAr を半日程度で蒸発させることが可能となっている。

液充填時はトップフランジから 15 cm の位置 (150 L に相当) まで LAr を充填し、液面と Anode の間の距離を約 30 cm 確保する。Anode PAD から Feedthrough までの電子信号読み出しケーブルにはアウトガスの少ないフッ素樹脂製のフラットケーブルを用いている。この読み出しケーブルは Run24.2 において 4 個中 1 個が Anode コネクタから外れるという事象が起きたため、Run24.3 実施前にアララダイトを用いて Anode コネクタごと固める処置を施している。

200 L 容器内にはモニター用に Pt100 温度計が 9 個、液面計 1 本、Web camera 1 個、LED 1 個を取り付けている。また 200 L 容器内にはバッフル板を 4 枚入れており、内 2 枚はトップフランジから 40 mm, 90 mm と近い位置にある。これらは各種ケーブルや Web camera の固定に用いられることに加えて、トップフランジを通じた熱流入を抑制するためにとりつけている。

5.2.5 早稲田大学での検出器運用および実験スケジュール

早稲田大学での T98 実験用 LArTPC 検出器の性能実証試験における実験セットアップは図 5.2 に示すとおりであり、T98 実験本番時とはいくつかの点で異なる。T98 実験本番時の運用との違いとして、架台フレーム・コンクリートブロックの有無と、排気ラインの取り扱いの 2 点があげられる。まず前者に関して、コンクリートブロックは K1.8BR にあるものをお借りするため、Run24.1, Run24.2, Run24.3 すべてにおいてコンクリートブロックは使用しておらず、また架台フレームを使用して T98 実験本番に近い高さで運用を行ったのは Run24.2 のみである。

次に排気ラインの取り扱いに関して、K1.8BR は地下施設であること、また T98 実験グループ以外の人々がエリアに立ちいる可能性があることから T98 実験本番時には先述のように絶対圧弁、差圧弁、内槽破裂弁、外槽破裂弁、ELF tank ガス放出口といった GAr が流れる可能性のある経路全てを排気配管につなげ、施設側排気ラインに接続する。一方で早稲田大学での実験では実験室への立ち入りは GRAMS 実験グループの人員以外に居ないこと、実験室に十分な換気能力があるため、内槽・外槽破裂弁および ELF tank ガス放出口は排気配管および実験室内排気用ジェットファンに接続していない。

以下に Run24.2, Run24.3 の実験スケジュールを示す。

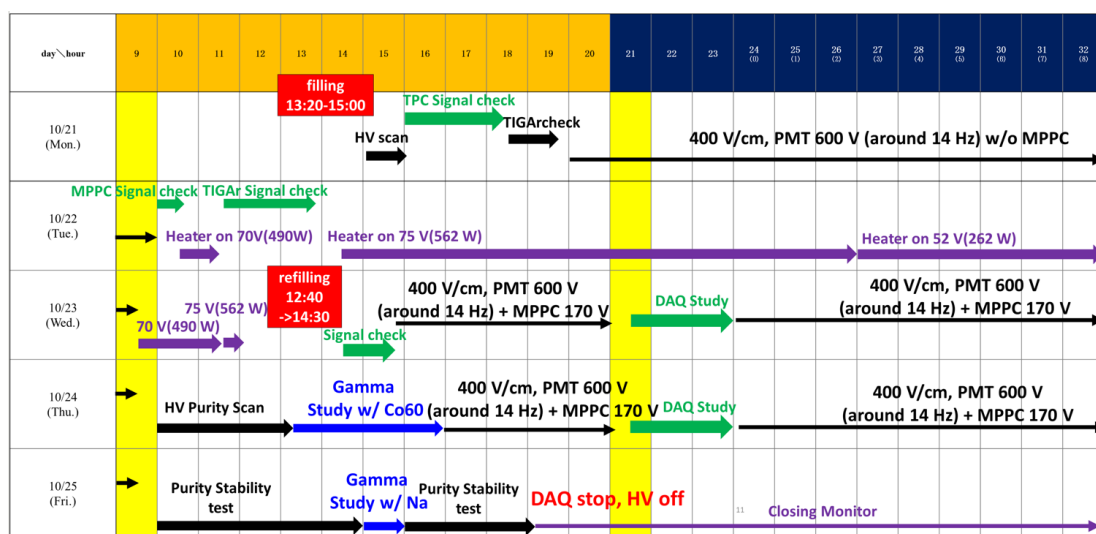


図 5.16: Run24.2 実験スケジュール

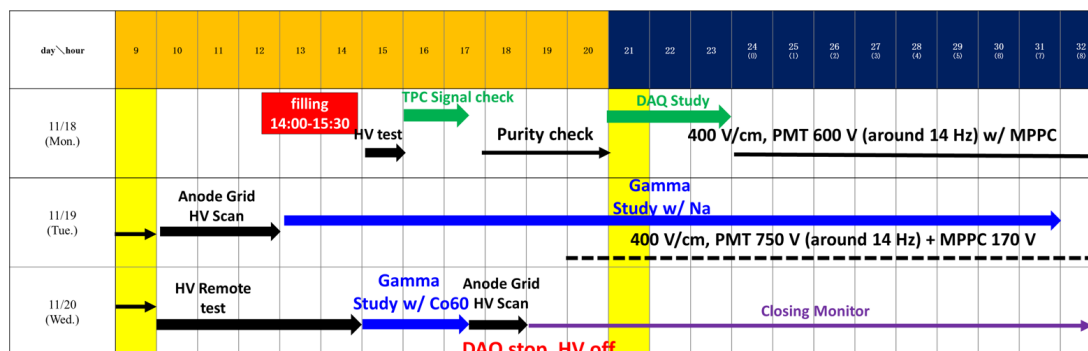


図 5.17: Run24.3 実験スケジュール

5.3 宇宙線試験結果

本章では取得した環境データおよび LArTPC 検出器データを, T98 実験用セットアップとしての設計が固まった後の LAr 試験である Run24.2, Run24.3 を中心に示す。

ここで各 Run の実施目的を簡単に振り返ると, Run24.2 は早稲田大学における T98 実験セットアップの性能実証試験であり, LArTPC 検出器の数日レベルでの安定運用の確認, 試験中の純度推移の確認, 追充填前後での純度変化の確認を目的としていた。結論から述べると, Run24.2 において LAr の安定運用は実証できたが, TIGAr Board1 枚分 (32 ch) の LArTPC 信号が Anode 部分のケーブルが外れてしまったことにより全く見えず, さらに充填直後の数時間で急激に LAr 純度が悪化するという事象が発生した。純度悪化に関しては後で詳しく述べるが運用ミスによる大気の影響が要因であり, LAr の全量蒸発および再充填によって純度が回復することが Run24.2 実施中に確認された。

これを受けて LArTPC 検出器の全 ch の信号読み出しの確認を目的として, Run24.3 を実施した。なお, Run24.3 においては Run24.2 ですでに追充填後に十分な純度がでていることが確認されたため, 追充填を行わない数日間の実験となっている。

5.3.1 LAr 運用

Run24.2

以下に Run24.2 における充填, 液蒸発時間および取得した環境データの推移を示す。

- LAr 充填
2024/10/21 13:20-14:57 (98 min)
充填量: 約 150 L (液面計: 29.0 cm)
使用した LAr 量: 約 290 kg (約 210 L に相当)
- 追充填
2024/10/23 13:00-14:24 (84 min)
充填量: 約 130 L (液面計: 28.4 cm)
使用した LAr 量: 約 230 kg (約 160 L に相当)

環境データにおいて最も重要な項目は容器内圧, および酸素濃度である。これらは第 6 章で後述するが, K1.8BR にセットアップを輸送後に現地の警報システムと接続し, 緊急時退避用アラートシステムへ基準値を与える項目であるため安全上非常に重要な項目となっている。図 5.18 をみると, 容器内圧に関して, 充填時および追充填時, 20 から 50 時間および 160 時間以降のヒーター使用時を除いた, LArTPC 検出器 Data 取得期間において, 容器内圧は基本的に使用した絶対圧弁の設定範囲内

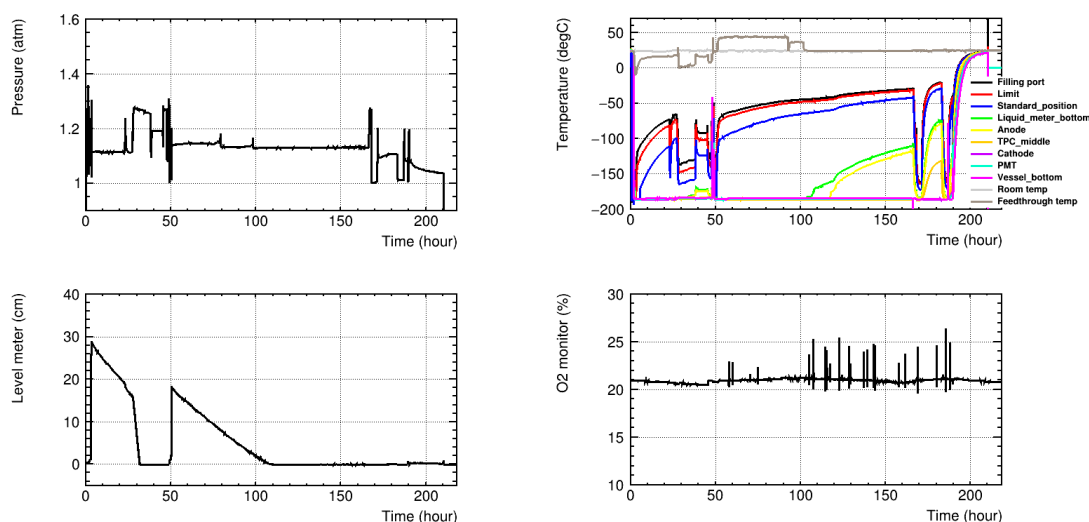


図 5.18: Run24.2 環境データ

である 1.1-1.2 atm に収まっており、安定していることがわかる。一方で 80 時間および 100 時間の 2 回で急激な内圧プロットにスパイクが生じ、圧力の安定ラインから瞬間的に変化して見える。この現象は Run24.3 でも複数回起きており、詳細は Run24.3 の結果の節にて後述するが実際の圧力変化ではなく、信号ケーブルの固定の問題であった。

また、酸素濃度に関してもベースラインは 21 %程度で安定している。こちらに関しても試験中スパイクが見受けられるが、DataLogger へ接続するケーブルの固定の問題であると考えている。第 6 章にて詳細は後述するが、実際に J-PARC にて環境モニター計器類を L 字フレームを用いて固定した後では圧力および酸素濃度の大きなスパイクは生じなくなっている。また液充填時やヒーター昇圧による液蒸発時など、通常運用時よりも GAr が 10 倍以上絶対圧弁から流れ出すような作業を行っている際にも、作業者が身につけている携帯用酸素濃度計は異常値を示さなかった。

Run24.3

以下に Run24.3 における充填、液蒸発時間および取得した環境データの推移を示す。Run24.2 実験時と LAr 運用手法としての違いはないが、Run24.3 では追充填を行っておらず短期間の実験となっており、65 時間以降は蒸発作業に入り LArTPC 検出器データを取得していない。

- LAr 充填
2024/11/18 13:58-15:31 (93 min)
充填量：約 150 L (液面計：29.0 cm)
使用した LAr 量：約 283 kg (約 200 L に相当)
- 追充填: 未実施

Run24.3 における容器内圧は、基本的に絶対圧弁の設定圧力範囲内で安定していたものの、Run24.2 よりもベースラインの瞬間的な変化が多く見られた。その例を図 5.20 に示す。図 5.20 をみると、1.15 atm 程度で安定している圧力が瞬間的に 1.17 atm 程度まで上がり 3 分程度この値を保持し、また急激に圧力が上昇を始め、1.3 atm まで到達し、瞬間的に 1.14 atm 程度まで落ちるという挙動を示している。これが実際の容器内圧の変動ではないことを確かめるために 54.3 hour の時点で絶対圧弁と 200 L 容器間に設置したバルブを封じ切り内圧変化をみた。その結果容器内圧の上昇は瞬間的ではな

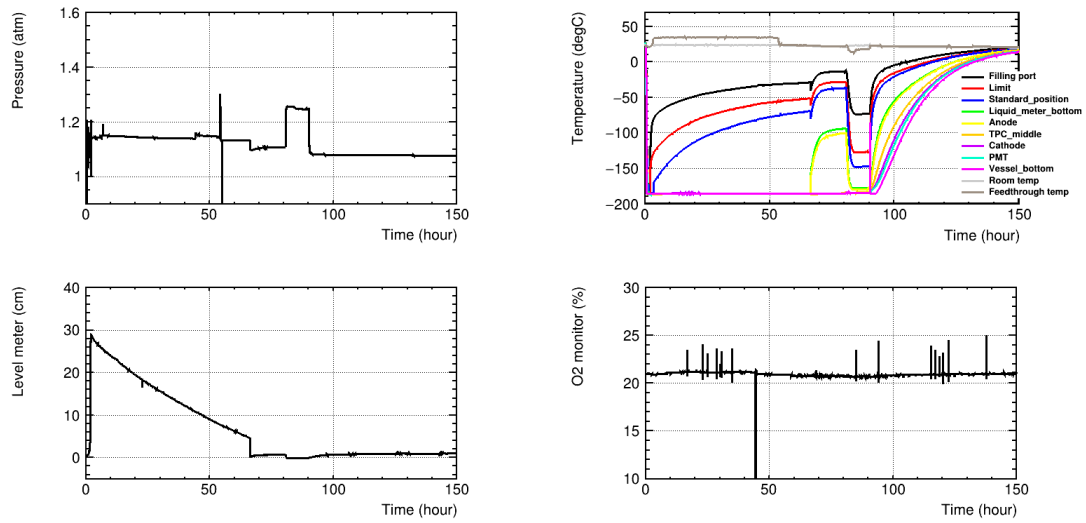


図 5.19: Run24.3 環境データ

いことが確認できた。加えてガス層の温度は圧力変化に対して敏感であるため、トップフランジから距離 15.5 cm 位置に設置した白金抵抗温度を見ることによっても内圧変動が実際に生じたかどうかを確認できる。

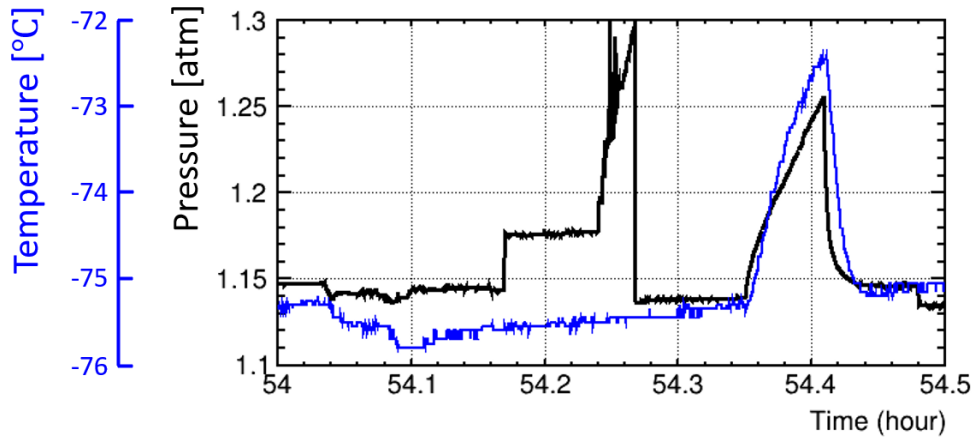


図 5.20: [54.0, 54.5] 時間の内圧変動およびガス層温度変化

図 5.20 の青線が白金抵抗温度に相当している。これを見ると、絶対圧弁を封じ切った際には明確な温度上昇があることがわかるが、一方で 54.1-54.3 時間に生じている瞬間的な温度変化に対しては温度上昇がみられない。したがって瞬間的な内圧変動は実際に内圧が変化しているわけではないと考えられる。この疑似的な内圧変動の要因は使用している圧力計（長野計器製：KP15）の読み出しケーブルと DataLogger の接続不良による可能性が最も高かったため、Run24.3 終了後に環境モニターケーブルおよび接続端子部分を作り直し、ケーブルの固定を強化することによって対応した。

5.3.2 LArTPC 検出器信号

本節では LArTPC 検出器の信号について述べる。前節同様に Run24.2 の検出器信号に関して述べたのちに、早稲田大学での最終試験である Run24.3 の検出器信号に関して述べる。なお、Run24.2 は当初の予定において早稲田大学での最終 LAr 試験となる予定であったが、先述のように 2 つの理由から検出器の改良を行う必要が生じた。

Run24.2

以下に Run24.2 で取得された宇宙線 μ 信号の例を示し、Run24.2 で生じた 2 つの問題点に関して述べる。

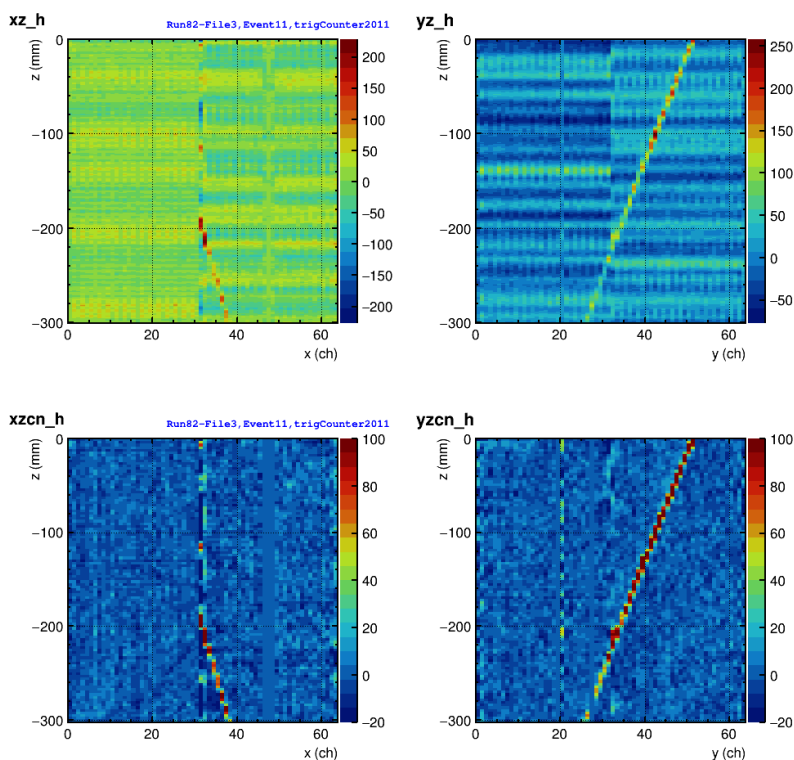


図 5.21: Run24.2 取得信号例

図 5.21 の左側の列は X 方向 ch に、右側の列が Y 方向 ch に相当する。また上段が生波形であり、下段が各 ch 毎に時間周期的なノイズを除去した後の信号である。なお以降では LArTPC 検出器信号としてノイズ除去後のプロットのみを記載する。図 5.21 において z 軸は鉛直上向きに対応しており、 -300 mm が Cathode に相当する。これをみると明らかであるように X 方向の ch に関して前半部分の ch に飛跡が全く見えておらず、飛跡が不自然に途切れている。この現象は Run24.2 を通じて起きている。結果として X ch 前半に相当する TIGAr 信号ケーブルが Anode のコネクタ部分から浮いていたことが原因であり、先に述べたように Run24.2 終了後にコネクタ部分をアラルダイトで固定することによりこれに対応した。

次に Run24.2 での充填直後の 17 時の検出器信号および 21 時の典型的な飛跡を以下に示す。

図 5.22 に示すように充填完了後に検出器を立ち上げた直後は検出器を突き抜けるフルドリフト飛跡が見えている。しかしながら、4 時間程度経過した 21 時頃の典型的な飛跡である図 5.23 を見ると Z の値が最低で -150 mm 程度の飛跡となっており、 $Z=-300$ mm まで到達するフルドリフトが見えなくなっている。これは 1 ppb 程度であった LAr 純度が悪化していることを示している。充填完了後の

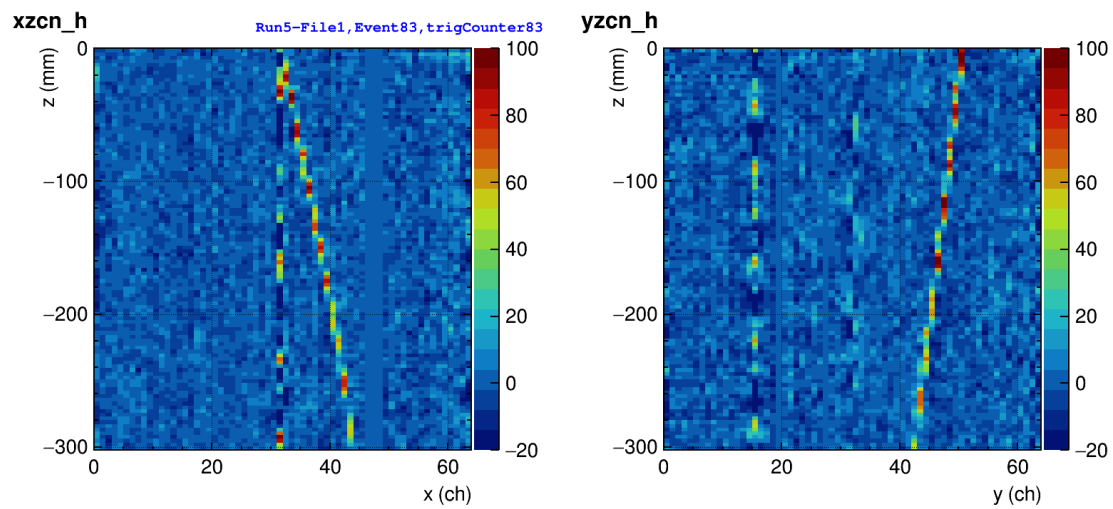


図 5.22: 10/21 17 時の LArTPC 信号

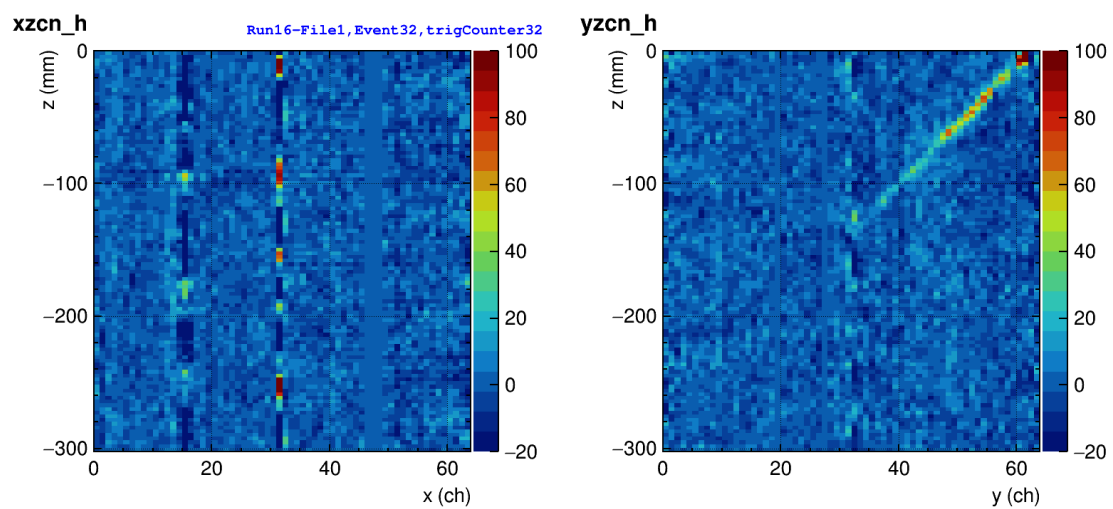


図 5.23: 10/21 21 時の LArTPC 信号

初期飛跡において、検出器をフルに突き抜ける事象が確認されているため、初期純度の問題ではなく、何らかの運用ミスによって大気が容器内に混入し純度が急激に悪化したと推測される。仮に 200 L 容器内の LAr 150 L 中に O_2 が混入し、純度を 1 から 10 ppb まで悪化させたと仮定して混入した O_2 の量を試算すると、以下の式から O(1) mL の混入があったと考えられる。なお、 O_2 のみが混入することは非現実的であるので実際には $<O(10)$ mL 程度の大気が混入したと考える方が現実的である。

$$\left(\frac{150 \times 1.4 \times 10^3 \times 10 \times 10^{-9} [\text{g}]}{32 [\text{g/mol}]} \right) \times 22.4 [\text{L/mol}] \approx 1 \times 10^{-3} [\text{L}] \quad (5.1)$$

結果として、この純度悪化は差圧弁部分からの大気の逆流であった可能性が高いと考えられる。第 4 章でも述べたように、液充填時には大量の GAr が生成するため差圧弁を全開にするという操作を行っている。そのため充填完了直後には差圧弁本体および、差圧弁から実験室換気用のジェットファンまでの配管は低温となっている。Run24.2 においては充填完了直後に、まだ霜がついて冷えている状態の差圧弁 2 次側配管をブランクフランジで封じ切った。その後数時間経過して配管が温まった結果、膨張した空気が差圧弁から逆流を起こしたと考えられる。なお、差圧弁が 1 次側よりも 2 次側が高圧の場合に逆流をおこすことは真空引き時にすでに判明済みであり、実際の運用では実験前の真空引き時は 2 次側をブランクで封じ切ることによってこれに対処していた。

これを受けて、10 ppb 程度となった容器内 LAr をヒーターを用いて全量蒸発させ、ELF tankに残っていた LAr を再充填した。再充填完了後は差圧弁 2 次側配管をスクロールポンプを用いて真空引きすることによって差圧弁からの大気の逆流を防ぎ、充填後数時間での純度の急激な悪化が起こらないことを確かめることとした。結果として図 5.24 および図 5.25 に示すように、全量蒸発後の再充填によって再びフルドリフトである -300 mm 程度までの飛跡がみられる 1 ppb 程度まで純度が回復し、差圧弁部分からの大気逆流の対策をしたことによって 4 時間経過後も 1 ppb 程度の純度を維持できていることが確認された。

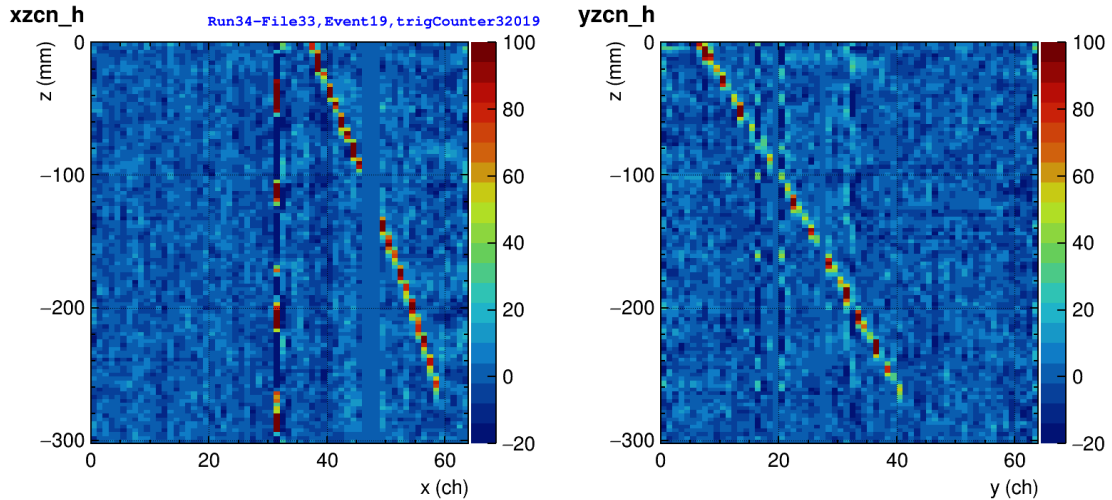


図 5.24: Run24.2 再充填後の LArTPC 信号

以上から Run24.2 によって LAr の安定運用に関して T98 実験セットアップで問題がないことは確認された。一方で LArTPC 検出器信号においては、運用ミスによる純度悪化があった。また図 5.25 を見てもわかるように、X の 0-32 ch に対応する Anode ケーブルがコネクタから浮いてしまい、全く信号が見えないという問題があったため、これらを改善し数日間の検出器信号の安定取得が可能であることを実証するために Run24.3 を実施した。

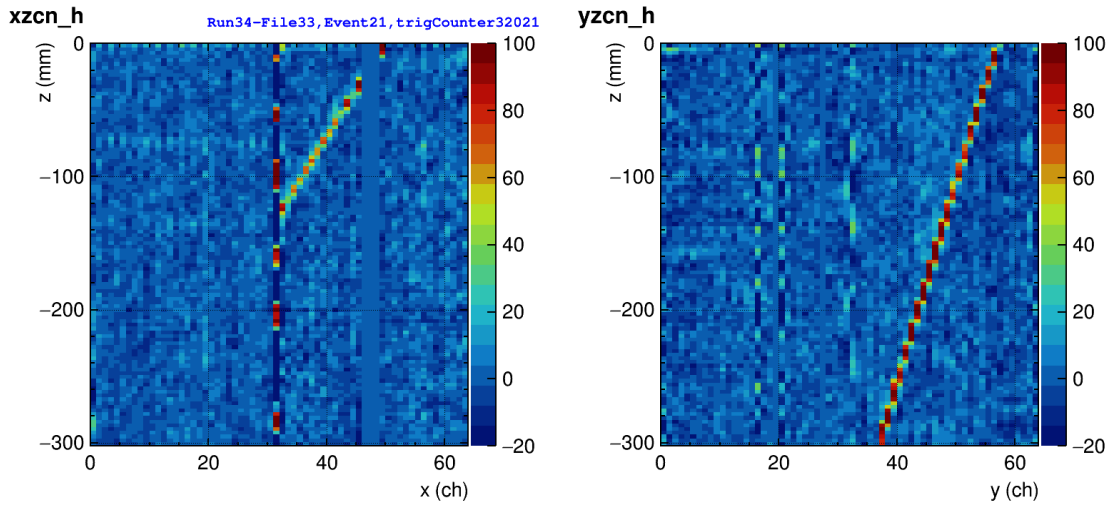


図 5.25: Run24.2 再充填から 4 時間経過後の LArTPC 信号

Run24.3

Run24.3 における典型的な事象を以下の図に示す。

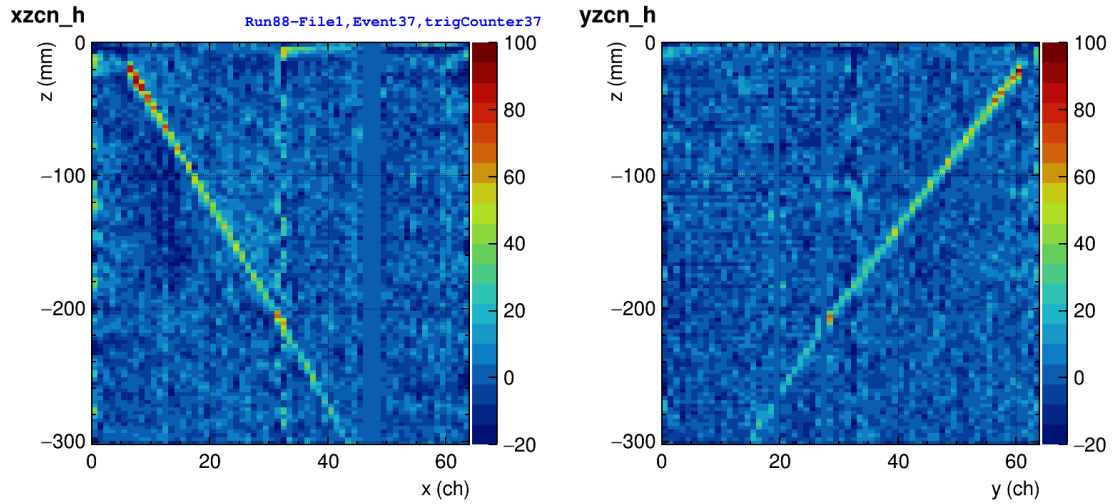


図 5.26: Run24.3 における Event 例

Anode と TIGAr 信号ケーブルをアラルダイトで固めたことによりケーブルの浮きが防止され、図 5.26 に示すように 4 枚の TIGAr いずれでも信号が確認された。

次に Run24.3 の LArTPC 検出器の典型飛跡の推移を示す。なお、Run24.3 においても液充填完了直後から差圧弁 2 次側を真空引きしている。図 5.27 に示すように、液充填完了から丸 2 日経過しても変わらず LArTPC を突き抜けるフルドリフト事象が観測された。したがって 300 mm をドリフトする約 200 μsec 程度では飛跡が見えなくなるほどの電離電子の減衰はないことがわかる。

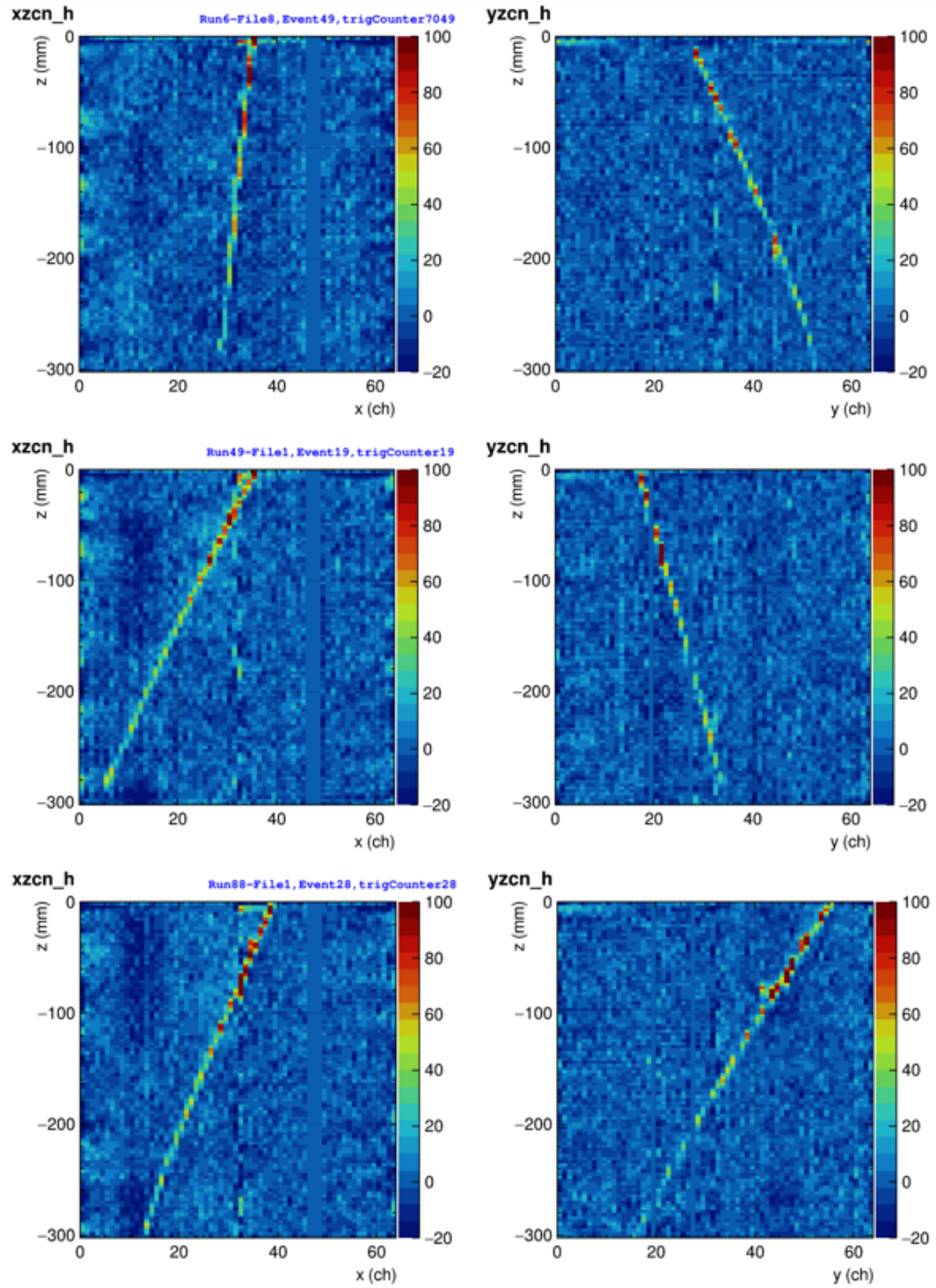


図 5.27: Run24.3 における突き抜け事象（上段：11/18 18 時 中段：11/19 18 時 下段：11/20 18 時）

5.4 本章のまとめと考察

5.4.1 本章のまとめ

本章では T98 実験用 LArTPC 検出器およびセットアップ, それを用いた早稲田大学における宇宙線 μ 試験に関して述べた。Run24.2, Run24.3 の結果から, 安全に最も重要である 200 L 容器内圧および酸素濃度が安定して維持できていたことがわかる。また, Run24.3 の結果から充填完了後から数日間 LArTPC 検出器を突き抜ける信号を確認できた。また, Run24.2 の結果から再充填を行うことによって悪化した LAr 純度が 1 ppb 程度まで改善した。

5.4.2 LAr の運用

第 4 章でも述べたように, LAr 運用への要請として安全の担保, シンプルな運用手法, 数日間の Data 取得可能 LAr 量の維持, LAr 純度の維持があった。Run24.2, Run24.3 では絶対圧弁による内圧維持というシンプルな運用で実験を実施し, 先にも述べたように容器内圧を 1.1-1.2 atm の間で安定的に維持可能であり, シンプルな運用という条件を満たすことが確認できた。また, 低熱流量の真空断熱容器中に可能な限り検出器を低い位置に設置すること, 容器内槽上部にバッフル板を 2 枚配置してトップフランジからの熱流入を抑制することによって, LAr 保持時間を延長させた。図 5.28 に Run24.2 における追充填後の液面推移, Run24.3 の充填後の液面推移および液面の予測推移を示す。なお, 液面予測推移に関しては容器への熱流入量をトップフランジからの距離に反比例する項及び定数項の和と仮定し, 以下の式を用いてステップシミュレーションにより描画した。なお図 5.28 において A, B は 7.3, 0.1 という値を採用している。これは Run24.2 のデータに対して eye fit を行なって得られた値となっている。

$$\frac{dL}{dt} = \frac{A}{L} + B \quad (5.2)$$

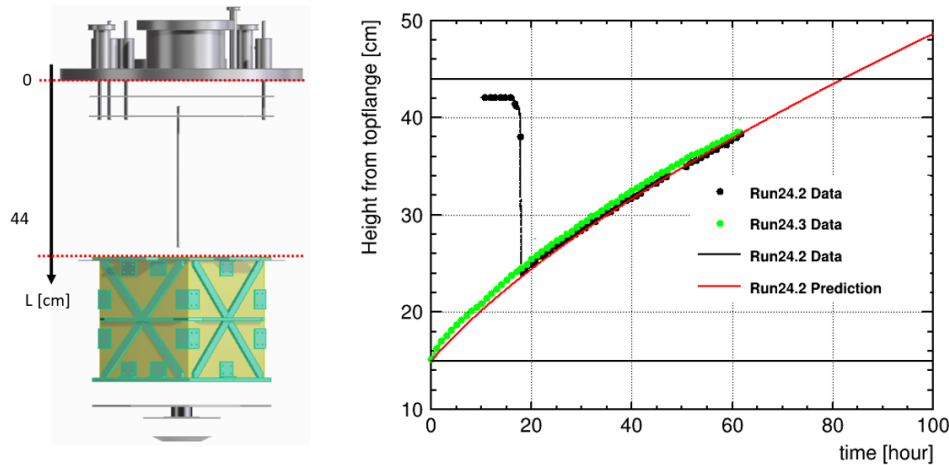


図 5.28: Run24.2 追充填後および Run24.3 充填後の液面推移の比較

LArTPC 検出器が Data 取得可能であるのは, Anode が LAr 液面に完全に浸かっている状態であり, 本セットアップにおける LAr 液面推移をみると Run24.2, Run24.3 とともに Anode に到達するまでの時間は約 80 時間である。実際には LAr 液面は完全な静止状態ではなく, 揺れが存在する。したがって Anode が完全に浸かっていると断ずるには数 cm 程度の液面の余裕が必要となるため, T98 実験セットアップにおける連続 Data 取得可能時間は約 75 時間程度であると考えられる。したがって,

現在のビームタイムの予定である 12 時間 → 24 時間 → 12 時間というスケジュール通りに実験が行われる場合、追充填の必要はなく、加速器ビームの不具合等で 3 日以上間が空いてしまう場合にのみ追充填が必要となる。

先の eye fit により決定した定数の妥当性を確かめるために、Run24.3 の液面データから得られるトップフランジからの液面までの距離 L [cm] に対して、 dL/dt を算出し、横軸 L 縦軸 dL/dt のグラフに対して Fit を行うことで A , B の値を求めた。実験中の液面の値は、図 5.29 に示すように温度変化の影響を受けて 0.5 hour 周期程度で振動している。そのため液面の傾きを求める際には時間幅を 2 hours として fit を実行し、その時間幅の中点の時刻における dL/dt であるとした。

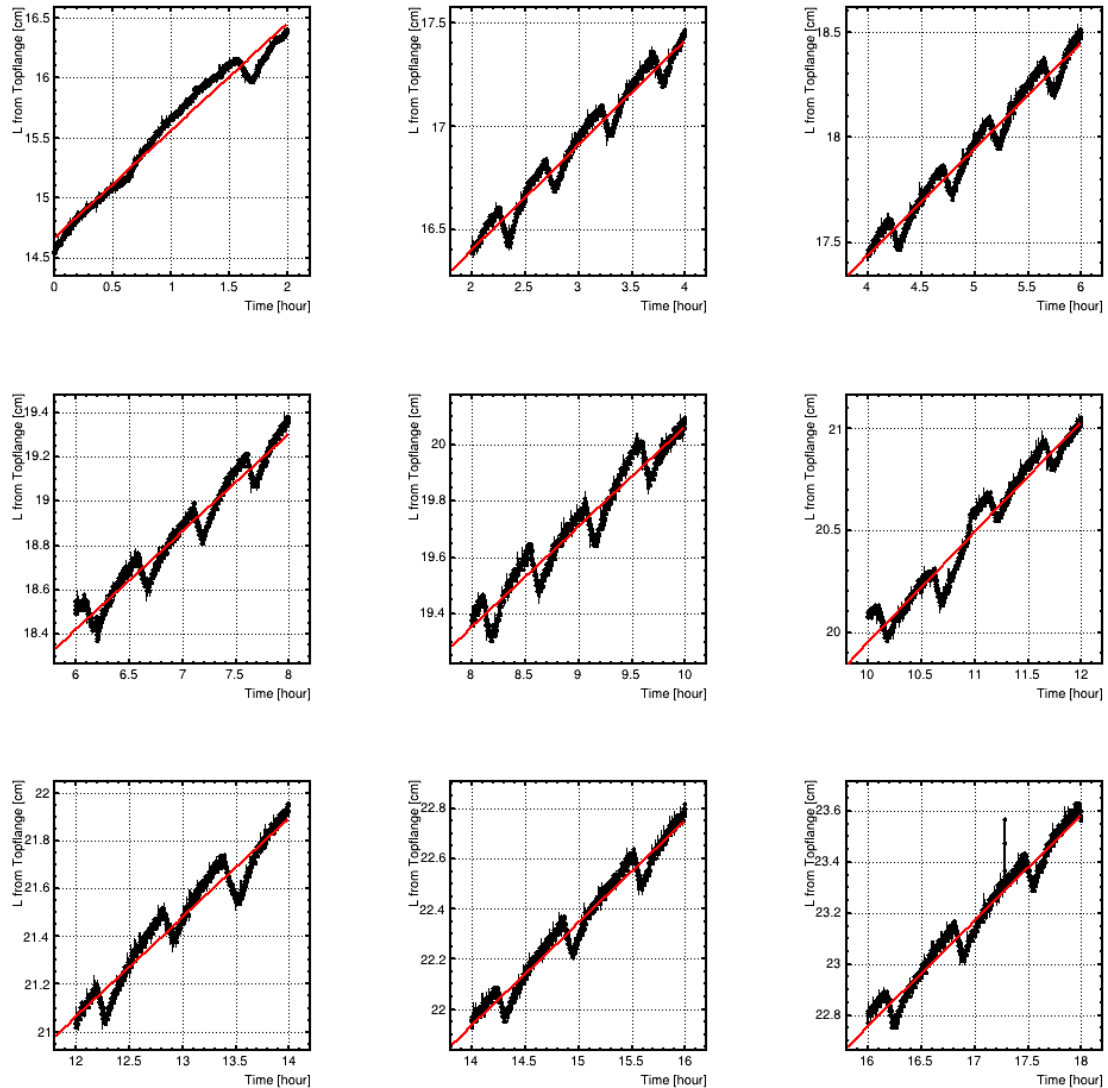


図 5.29: 2 時間の時間幅での液面 fit 例

この結果得られる dL/dt をその時刻における液面距離 L [cm] と照らし合わせ、fit して A , B を求めると図 5.30 に示すように $(A, B) = (8.45, 0.02)$ を得る。これに対し、eye fit で得られた A , B で重ね描いた結果が青線に対応している。

$(A, B) = (8.45, 0.02)$ において液面予想曲線を記載した結果が以下の図 5.31 である。結果として Eye fit で算出した A, B 値の方がより実データに沿う予想曲線となっており、 dL/dt の fit から得られる予想よりも安全側の値を示している。

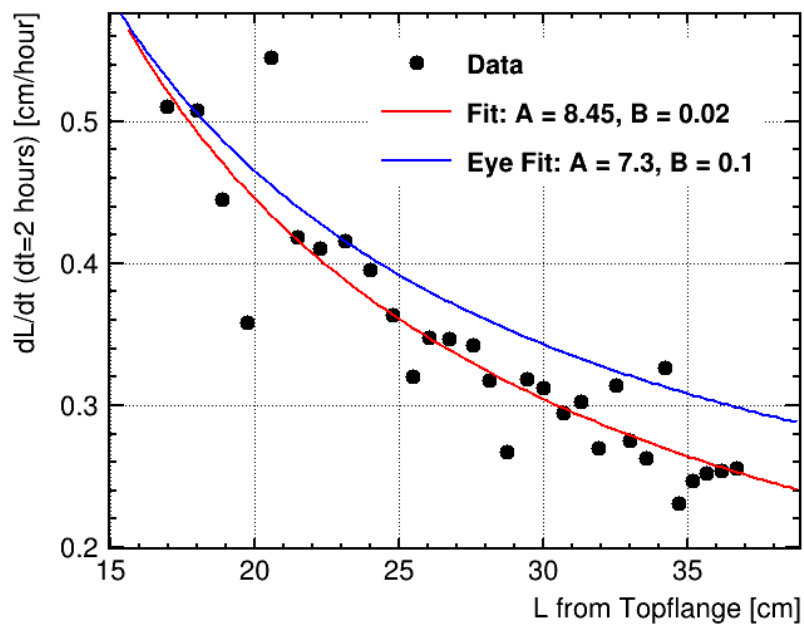


図 5.30: Run24.3 実験時の液面高さに対する液面変化速度

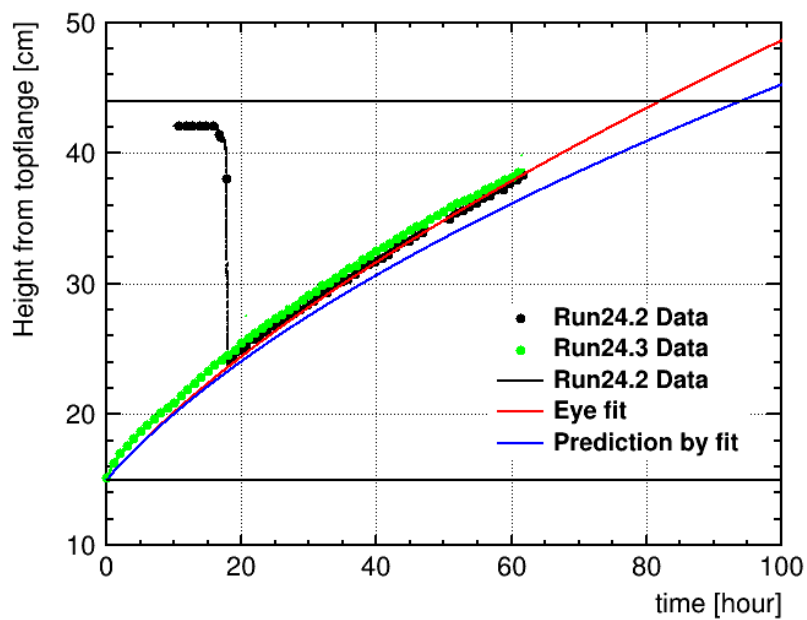


図 5.31: 液面推移予測の比較

次に LAr 純度に関して, Run24.2 において純度が悪化し突き抜け事象がみられなくなった後でも, ヒーターによる液蒸発および再充填によって再度 300 mm の突き抜け事象が観測可能となること
が示された。また, Run24.3 の結果から充填完了後から 2 日経過後も 300 mm の突き抜け事象が観測
されたため, 本セッTOPを使用した場合に数日レベルでの明確な純度の悪化はなく, 少なくとも 1
ppb 程度以下の純度を維持できていることがわかる。よって LAr の初期純度および純度の数日レ
ベルでの維持という条件も満たしている。なお安全確保に関しては GAr の取り扱いの厳密性や T98 実
験グループ以外の人
の立ち入りに関連した制限など, 早稲田大学での試験時と J-PARC での試験時で
大きく異なるため, 第 6 章にて手法の有用性, 健全性の考察を行う。

5.4.3 LArTPC 信号

T98 実験の目的は反陽子捕獲事象の収集であり, 最終的にこのデータを用いて GRAMS 実験にお
ける背景事象除去能力の向上を目指している。そのために, 2022 年の宇宙線 μ 試験から使用する読み
出しエレクトロニクスを TIGAr に変更し, Anode ピッチを半分の 5 mm とした。図 5.32 に Run22.1
および Run24.3 の典型的な突き抜け事象の飛跡図をそれぞれ示す。

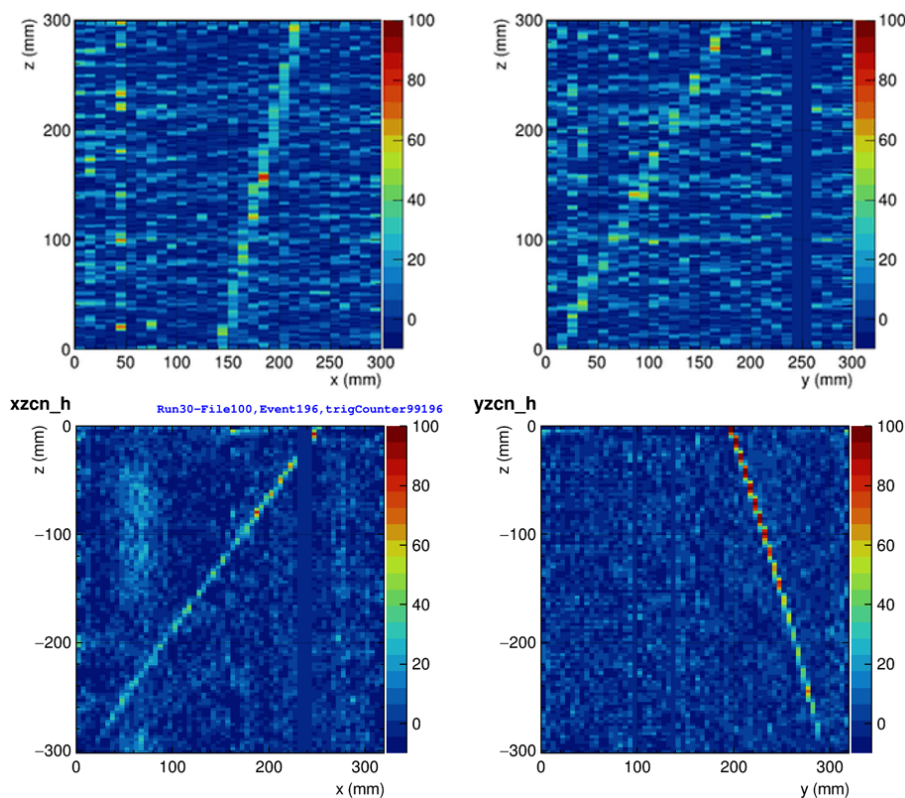


図 5.32: 上段: Run22.1 における突き抜け事象 [16] 下段: Run24.3 における突き抜け事象

図 5.32 をみると, 明確に飛跡の鮮明さが向上していることがわかり, 読み出しピッチの細分化およ
び読み出しエレクトロニクス変更による S/N の向上の効果が表れていることがわかる。

6 J-PARC K1.8BR における LArTPC 検出器運用試験

2024/11/20 に早稲田大学での最終試験である Run24.3 を終えて、2024/12/3 に LArTPC 検出器セットアップを J-PARC K1.8BR へと輸送した。本節では J-PARC への輸送および、現地での LAr 試験を含む T98 実験準備状況に関して詳細を述べる。

6.1 J-PARC への実験セットアップの輸送

T98 実験セットアップ輸送は我々の実験グループ自身で行った。Run24.2 終了後、架台フレームを取り外し、Run24.3 開始前にトップフランジフレームに 4 個のロック可能キャスターをとりつけた。そのため、Run24.3 終了後に 200 L 容器を早稲田大学から搬出できるような状態であった。12/3 に 200 L 容器（充填系、排気系は分離済み）および各種必要機材、工具を 65 号館実験室から搬出し、寄田教授が J-PARC まで運転する 2 t トラックに積み込んだ。

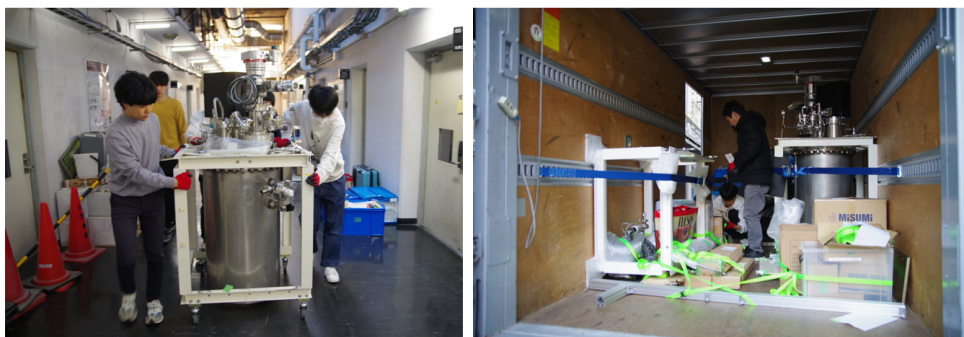


図 6.1: 早稲田大学からの搬出の様子

J-PARC に到着後、ハドロンホール南側のテントハウス内にて積み荷降ろし作業を行い (a), ハドロンホール内へと物品を搬入した (b)。その後、ホール内クレーンを使用して架台フレームおよび 200 L 容器を K1.8BR エリア内の準備エリアに置かれた $2 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$ コンクリート 2 個の上へと運んだ (c,d,e,f)。

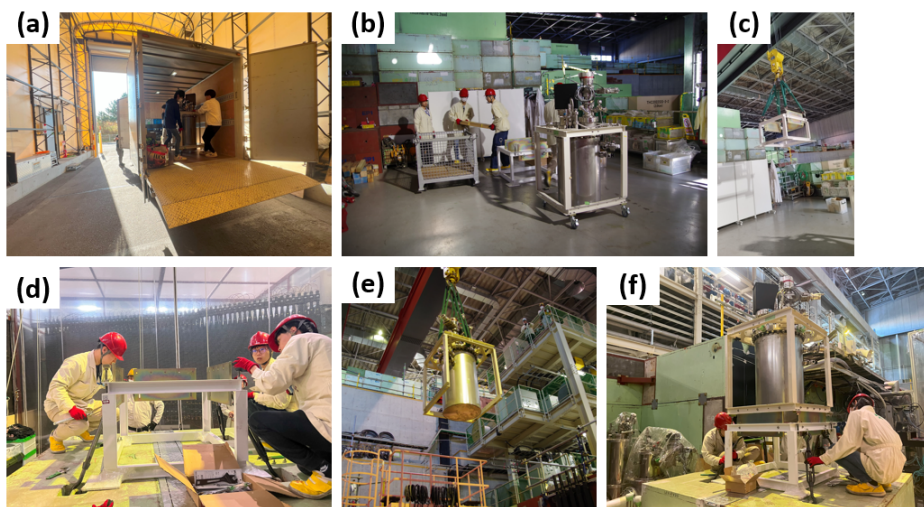


図 6.2: ハドロンホールへの搬入の様子

ここで準備エリアに置かれた2つのコンクリートブロックの間には22 cmの隙間を開けており、その間に側溝用プレートを敷くことによってコンクリートブロック状の作業スペースを拡張している。

6.2 K1.8BR での LArTPC 検出器動作確認試験

J-PARC K1.8BR での LAr 試験は 2 回 (PreRun1: 2024/12/16-12/19, PreRun2: 2025/1/8-1/10) 実施した。本試験の目的は、輸送後のセットアップの健全性の確認、K1.8BR における数日間の LArTPC 検出器の安定運用の検証である。早稲田大学での試験同様、LArTPC 検出器の信号確認は宇宙線 μ によって行った。

結論から述べると PreRun1 においては、検出器の運用自体は問題なかったが、LAr ELF タンクのガス放出口を排気配管に接続する際に大気を ELF タンク内に混入させてしまったために、LAr の初期純度が 100 ppb 程度まで悪化してしまった。そのため、Subppb レベルの純度の達成と LArTPC 検出器の信号確認を目的として PreRun2 を追加で行うこととなった。本節では PreRun2 に関して述べる。

6.2.1 LArTPC 検出器セットアップ

K1.8BR における LArTPC 検出器セットアップの概略図は第 4 章にて示したとおりであるが、本節ではより詳細なセットアップ図を以下に示す。図中における青線が LAr の経路を、赤線が GAr の通りうる経路に対応している。また、図 6.3 に記載されているバルブの詳細を表 6.1 に整理している。

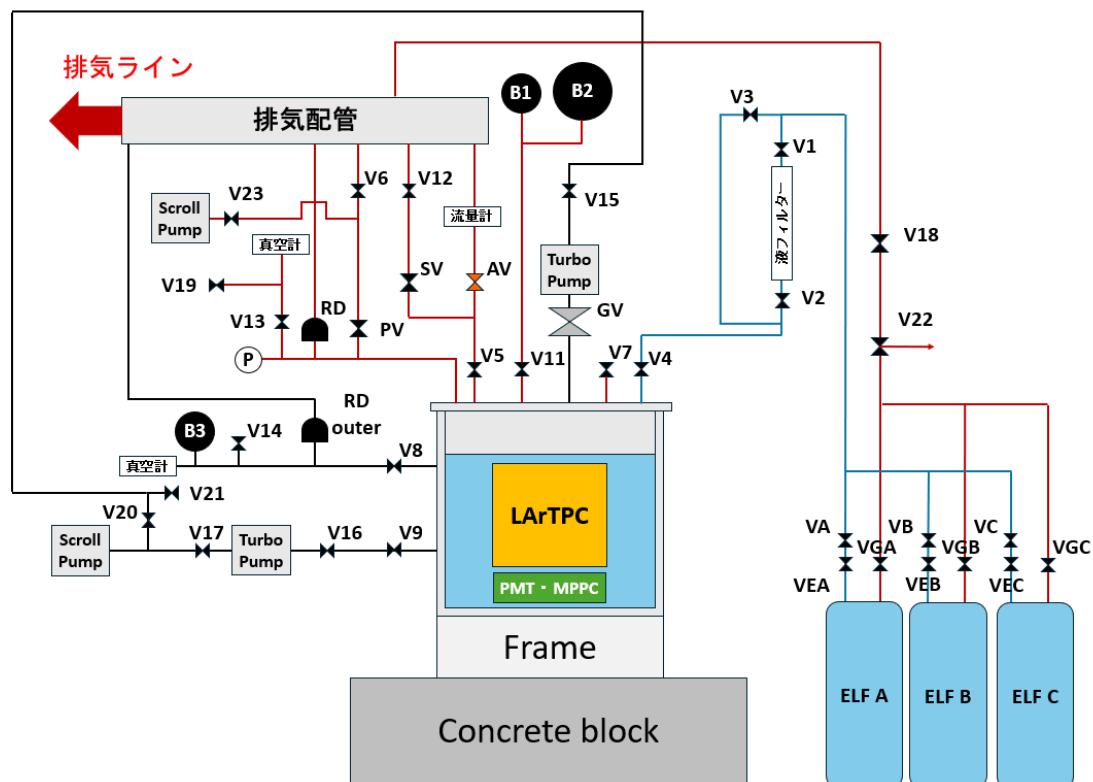


図 6.3: T98 実験セットアップ概略図

表 6.1: T98 実験セットアップバルブ一覧

valve No.	種類	役割
VA/VB/VC	ELF tank A/B/C VCR valve	LAr outlet
VEA/VEB/VEC	ELF tank A/B/C LAr outlet valve	LAr outlet
VGA/VGB/VGC	ELF tank A/B/C GAr outlet valve	GAr outlet
AV	17.5±1.0 psi Absolute valve	GAr outlet
SV	Solenoid valve (energized open)	GAr outlet
PV	Differential Pressure valve : +1.5 atm	GAr outlet
RD	Rapture Disk	GAr outlet for inner vessel
RD outer	Rapture Disk	GAr outlet for outer vessel
GV	Gate Valve	Evacuation of inner vessel
V1	VCR valve	LAr Filter inlet
V2	VCR valve	LAr Filter outlet
V3	VCR valve	LAr Filter bypass
V4	VCR valve	200 L vessel LAr inlet
V5	VCR valve	GAr outlet
V6	NW25 ball valve	GAr outlet for filling and Evacuation of Secondary side of PV
V7	VCR valve	200 L vessel GAr inlet
V8	CF70 angle valve	
V9	NW25 angle valve	Evacuation of outer vessel
V11	VCR valve	Inner Pressure Monitor
V12	NW25 angle valve	
V13	NW25 diaphragm valve	
V14	NW25 diaphragm valve	
V15	NW25 angle valve	
V16	NW40 angle valve	
V17	NW25 diaphragm valve	
V18	R1/2 purge valve (1 MPa)	ELF tank GAr outlet
V19	NW25 diaphragm valve	
V20	NW25 diaphragm valve	
V21	NW25 relief valve	
V22	R3/8 three-way valve	ELF tank GAr outlet
V23	NW25 diaphragm valve	Evacuation of Secondary side of PV

LArTPC 検出器を含む 200 L 容器内部に関しては早稲田大学での試験時と同様である。トップフランジ配管に関しては容器内圧をモニターするためのブルドン管を 1 つ追加した。早稲田大学での試験時とは異なり, J-PARC では検出器セットアップはコンクリートブロック上にある。ゆえにコンクリートブロックに上らずとも容器内圧を視認するために Φ 100 mm のブルドン管 (図中の B2) を新たに取り付けた。その他の早稲田大学での実験時との違いは主に GAr の取り扱い, 200 L 容器の固定, J-PARC 用の酸欠対策の 3 点である。

まず GAr の取り扱いに関して, J-PARC 内では GAr が流れうる経路が全て施設側排気ラインに接

続して、施設内に漏れ出る経路がないようにしなければならない。そのため、図 6.3 に示すように、早稲田大学での試験時には接続していなかった経路も含めて排気配管に接続している。加えて、何らかの異常によって 200 L 容器内の LAr が全量蒸発した場合に備えて、T98 実験セットアップ付近に空気拡散用のジェットファン（ $20 \text{ m}^3/\text{min}$ ）を 2 台設置し、ハドロンホール内全体に GAr を拡散させることによって K1.8BR エリア内の酸素濃度低下を防ぐ安全策も実施している。

次に 200 L 容器の固定に関して、K1.8BR のビーム中心が床から 2 m であるため 200 L 容器は架台フレームごと高さ 1 m のコンクリートブロックに載せられる。

最後に最も重要な酸欠対策に関して、K1.8BR 含むハドロンホールでは LAr を扱ったことのない他の実験参加者の方も作業を行う可能性がある。したがって T98 実験が LAr を使用している期間中および LAr ELF タンクの搬入を行う期間を酸欠警戒期間に設定し、ハドロンホール北側に立ち入り制限を設けて、ハドロンホール内で安全に作業および避難ができる状況を整えている。ハドロンホール北側エリア内を以下の 3 つの区域に分割し、それぞれにアクセス可能な条件を設定している。以下に 3 つの区域の詳細を述べる。

- 酸欠危険区域

酸欠危険区域は LAr を大量に取り扱い、事故の際に酸欠になる恐れのあるエリアとして定義され、4.2.3 節でも述べたように K1.8BR 実験エリアがそれに該当する。酸欠警戒期間中に本区域に入域可能となるためには、ハドロンホール施設側から提供される酸欠安全教育および T98 実験グループが実施するエキスパート講習の両方の受講を要求している。

万が一 200 L 容器内の LAr 全量が一気に蒸発した場合の対策として、T98 実験セットアップ付近に 2 つのジェットファンを用意している。このジェットファンの吸気口は K1.8BR の床に置かれており、排気口は高さ 3 m ほどの位置に固定される。そのため、酸欠警戒期間中はこのジェットファンを常時 on にしておくことにより、LAr が全量蒸発した場合でもハドロンホール全体に GAr を拡散させ、GAr 濃度を無限希釈する仕組みとなっている。

- 酸欠警戒区域

酸欠警戒区域は、酸欠危険区域に隣接していて酸欠の影響を受ける可能性のあるエリアとして定義される。具体的には図 6.4 に示すハドロンホール北側の 1 階および 2 階がこれに相当する。本区域に入域可能となるためには酸欠安全教育の受講が要求される。

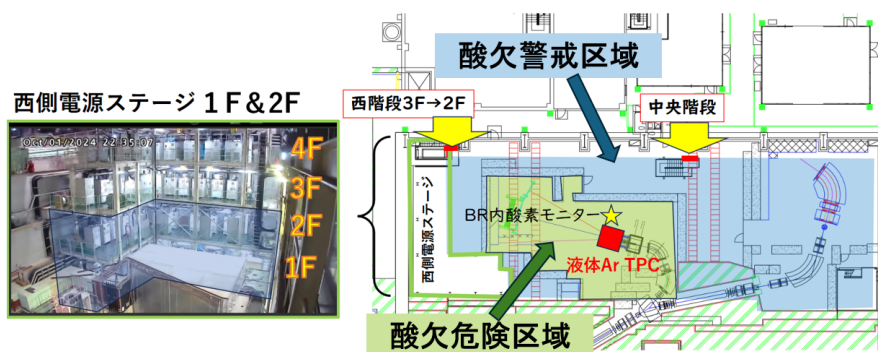


図 6.4: 酸欠警戒区域

- 非制限区域

非制限区域は LAr が全量蒸発した場合でも酸欠の恐れのないエリアとして定義され、ハドロンホール北側の 3 階以上がこれに相当する。

酸欠警戒期間では上記の立ち入り制限に加えて警報システムを用意する。アラートは酸素濃度および T98 実験セットアップにおいて異常事態に対して最も敏感に反応する容器内圧の 2 つについて設定されており、前者に対しては 18 %を下回った場合、後者に対しては絶対圧弁の正常動作範囲外となった場合に 3 か所に設置された青色回転灯が点灯し、サイレンが鳴る仕組みとなっており、これが避難の合図となる。加えて酸欠警戒区域の入り口に相当するハドロンホール西階段の 3F および中央階段、さらに酸欠危険区域の入り口に相当する K1.8BR エリア扉に、安全講習を受けなければこれより先に進めないこと、および立入禁止期間日程等を記した張り紙をしている。



図 6.5: ハドロンホール内の張り紙とパトランプ一覧

このように K1.8BR における LAr 試験時には GAr の取り扱いおよび立入制限などを入念に設けることによって、施設を利用するすべての人に対する安全を担保している。

PreRun1 および PreRun2 の実施時には、T98 実験の前にビーム実験をおこなっている E73 実験セットアップがビームエリアに置かれている状態であった。そのため、T98 実験セットアップは 4.2 節でも述べたように、T98 実験本番エリアではなく準備エリアにて実施された。

なお、T98 実験本番時には DAQ システムを K1.8BR 側の検出器と統合する必要があるが、現在すでに E73 実験検出器含め k1.8BR にて構築されている DAQ システムに影響を与える恐れがあるため、PreRun1 および preRun2 において DAQ システムは早稲田での試験時と同様の物とした。また、第 5 章でも述べたように PreRun2 で使用する環境モニター種計器類は早稲田大学での試験時と同様のものであるが、DataLogger 含めこれらを L 字フレームを組み合わせた支柱に固定することにより、Run24.2, Run24.3 で見られた酸素濃度や容器内圧といった環境データ取得の安定性を改善している。

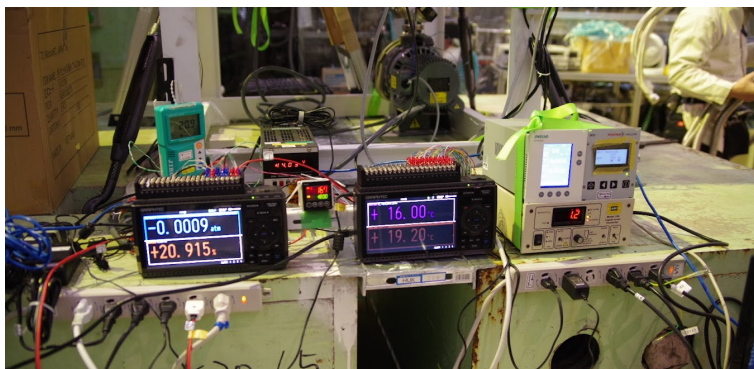


図 6.6: コンクリートブロック状の環境モニター計器類

6.2.2 運用結果

PreRun2 は 2025 年のビーム運転再開の直前の時期ということもあり, J-PARC K1.8BR エリア内での LArTPC 検出器の信号確認を目的として, 液充填から液蒸発完了までを 3 日間で終わらせる短期間の試験となった。

LAr 運用

以下に PreRun2 における充填, 液蒸発時間および取得した環境データの推移を示す。

- LAr 充填
2024/1/8 15:13-18:12 (179 min)
充填量: 約 130 L (液面計: 18.0 cm)
- ヒーター使用時間
2024/1/9 18:49-1/10 10:49
- 追充填: 未実施

図 6.7 に示すように, J-PARC に輸送した後においても早稲田大学での試験時と同様に LAr 運用セットアップは問題なく機能し, 容器内圧は充填時, ヒーター使用時を除いて 1.1 atm 程度で安定しており, また酸素濃度に関しても正常値である 21 %程度で保たれていることがわかる。

LArTPC 信号

PreRun2 における典型的なイベント例を図 6.9 に示す。

PreRun2 においても LArTPC 検出器を突き抜けるフルドリフトイベントが観測された。また, 次を示す飛跡の時間推移からもわかるように 4 枚の TIGAr ボードいずれにおいても TPC 信号を確認することができたため, 輸送によるケーブルの浮き等の不具合は見受けられなかった。また光信号に関しても PMT, MPPC の計 5 ch いずれも信号が確認できており, こちらも輸送による故障等はないものと考えられる。

以下の図 6.10 に PreRun2 における時間経過と各時間の飛跡を示す。上段に示すように充填完了直後の 1/8 19 時からフルドリフトである突き抜け事象が問題なく確認されており, 約 12 時間, 24 時間経過後の中段, 下段の信号飛跡においても突き抜け事象が問題なく確認された。したがって J-PARC

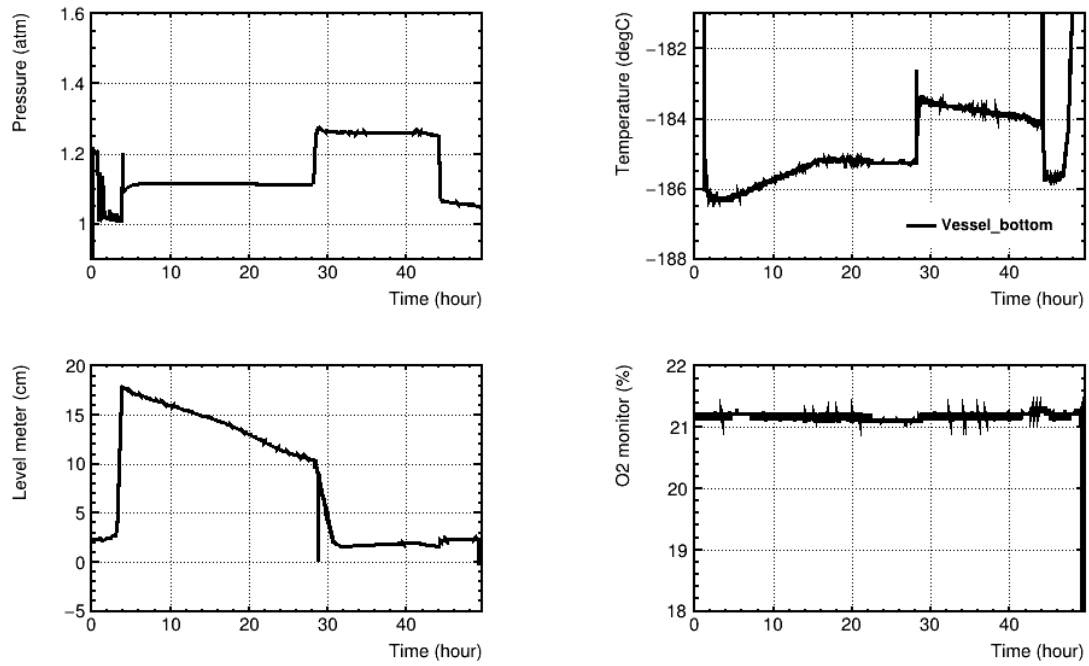


図 6.7: PreRun2 における環境 Data

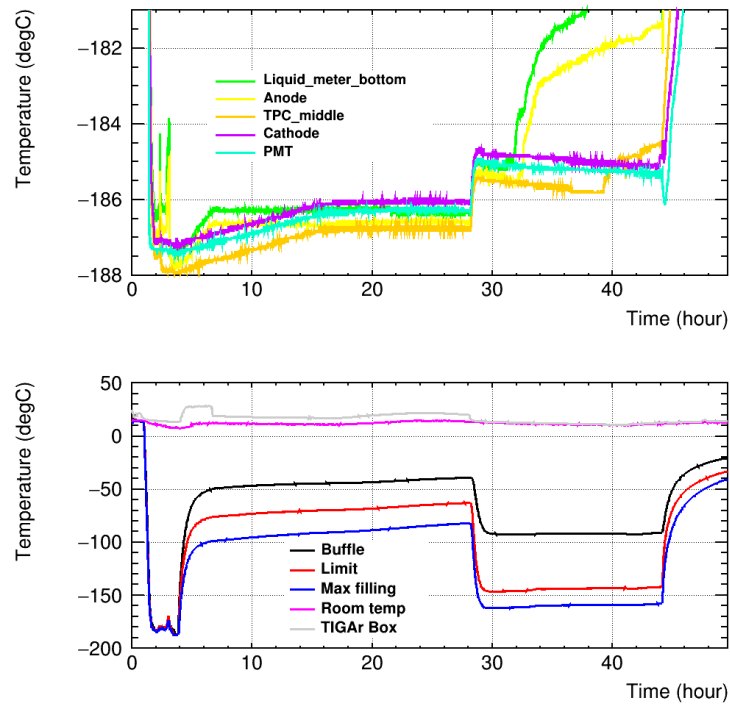


図 6.8: PreRun2 における環境 Data (200 L 容器内温度)

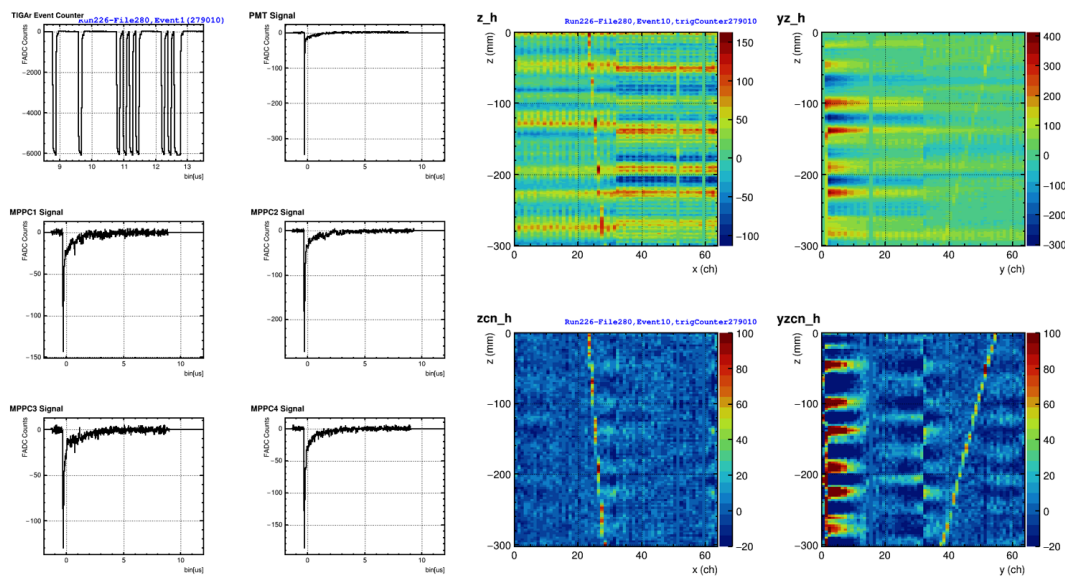


図 6.9: PreRun2 における典型的なイベント例

K1.8BR においても早稲田大学での試験時同様に少なくとも 1 ppb 程度の純度が維持されていることがわかる。なお, PreRun2 においても液充填完了直後から V6 を封じ切り V23 を開けることによって差圧弁 2 次側は真空引きされている。一方で, PreRun2 においては図 6.10 の中段のイベントに特に顕著に表れているような特徴的なノイズが新しく見えるようになった。この周期的なノイズは特に Y ch の前半部で顕著となっている。

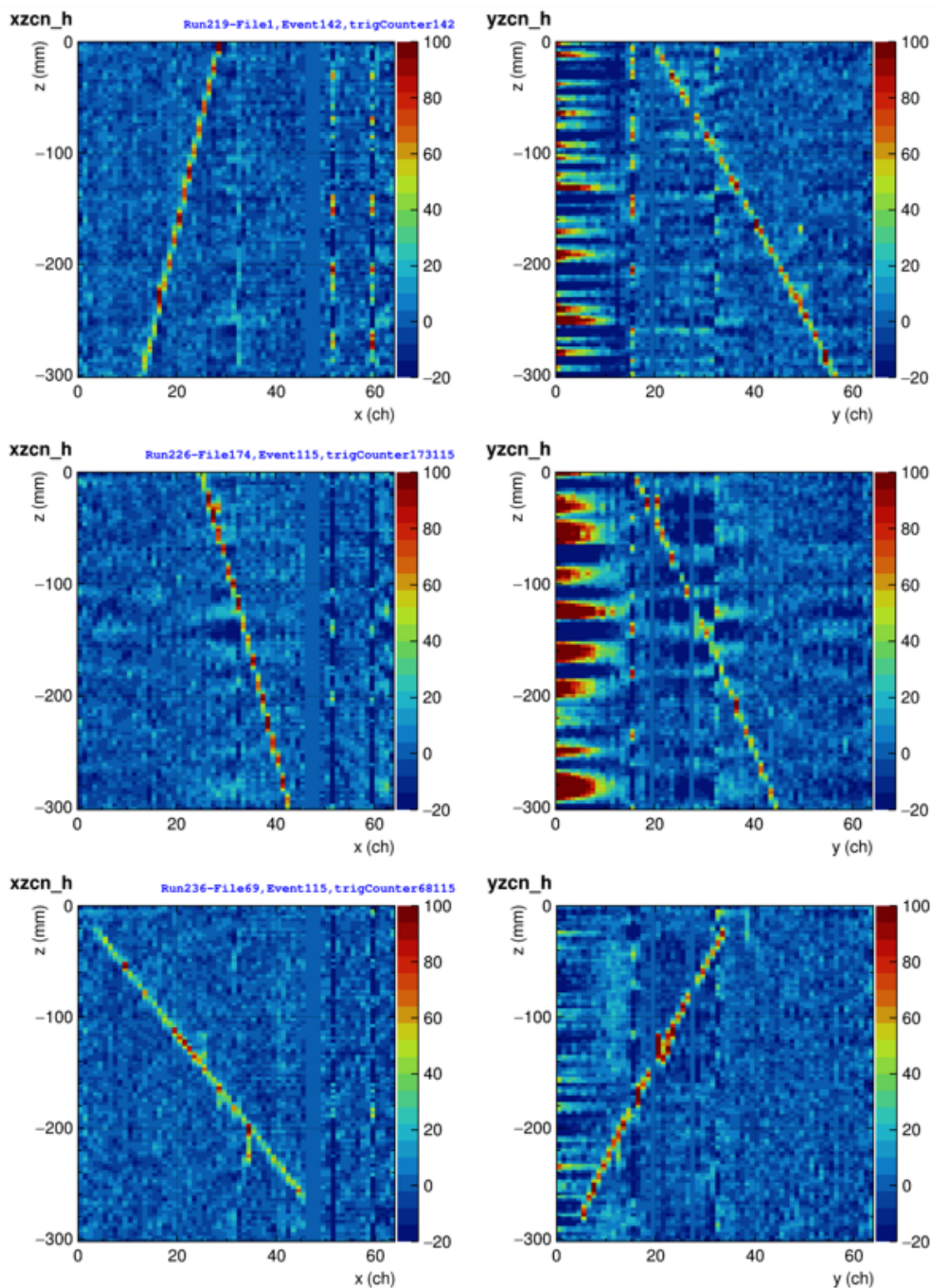


図 6.10: PreRun2 における突き抜け事象 (上段: 1/8 19 時 中段: 1/9 7 時 下段: 1/9 18 時)

6.3 本章のまとめと考察

本章では T98 実験安全システムセットアップの詳細, および J-PARC 準備エリアにおける宇宙線 μ 試験に関して述べた。第 4 章でも述べたように, LAr 運用への要請として安全の担保, シンプルな運用手法, 数日間の Data 取得可能 LAr 量の維持, LAr 純度の維持がある。J-PARC での LAr 試験である PreRun2 においても, 早稲田大学における試験同様の, 絶対圧弁を用いたシンプルな運用によって数日レベルの安定運用を実現することができた。容器内圧は信号ケーブル周りのケーブル固定を改善した結果, 充填完了後に圧力が安定した 6 時間からヒーター利用開始の 28 時間まで, 図 6.11 に示すように 1.11 atm 程度で安定しており, トップフランジから 15.5 cm に取り付けられているガス層温度計からもわかるようにスパイクやベースラインの急激な変更等の Run24.2, Run24.3 で確認された挙動もない。

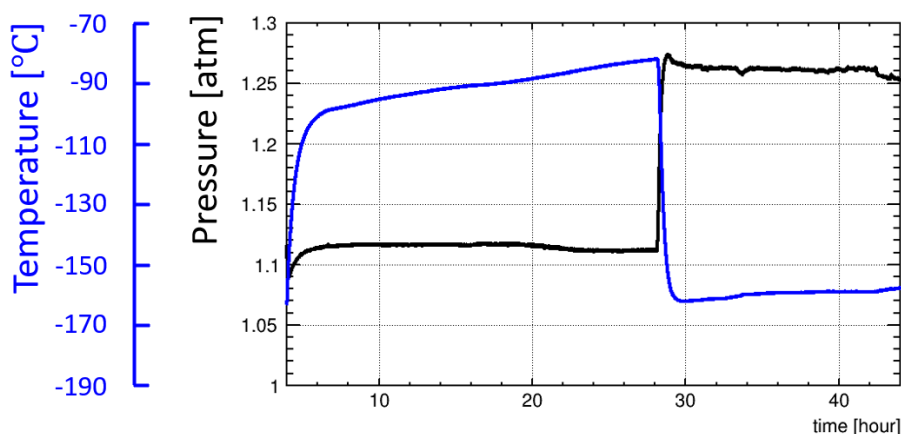


図 6.11: PreRun2 における容器内圧とガス層の温度

また, 液面の推移に関しても図 6.12 に示すように, PreRun2 での初期充填量を Run24.3 の同様の充填量に揃えてプロットした結果 O(1) cm の範囲内で一致していることがわかる。そのため早稲田大学から J-PARC K1.8BR に移動した後も検出器セットアップの断熱性能に劣化はないことがわかる。

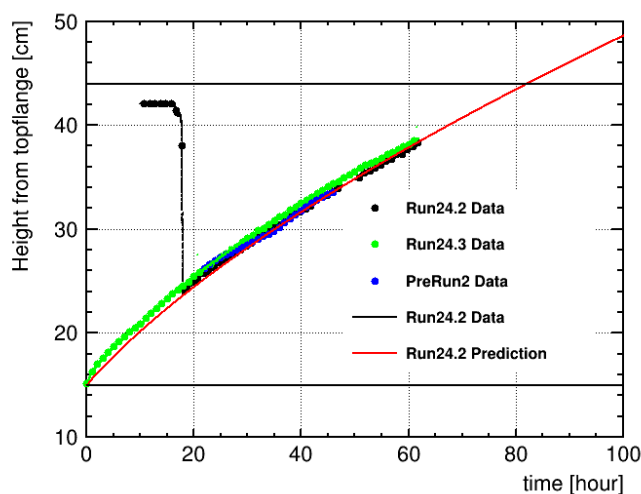


図 6.12: PreRun2 における液面推移と Run24.2 および Run24.3 との比較

安全の担保に関しては, GAr の厳密な取扱い, 立ち入り制限の実施とアラートシステムの導入, LAr 全量蒸発自体に備える無限希釈用ジェットファンの使用という早稲田大学での試験からの変更点があった。結果として実験容器内圧および酸素濃度はアラートシステムが作動する通常運用範囲内値から一度も外れることはなく, 警報およびパトランプが作動することなく宇宙線試験は無事終了した。特に酸素濃度に関しては酸素濃度モニターの計測部を, すべての GAr 経路を集約した排気配管の直下に設置していたにも関わらず 20 %を下回ることすらなかった。また液充填時において排気配管の各ポート付近にハンディ酸素濃度計を近づけたがこちらにも反応がなかったため, 本セットアップでの GAr の取り回しに異常および不備はないといえる。以上の PreRun2 の結果から T98 実験セットアップによる LArTPC 検出器の運用に関しては安全面, 機能面ともに T98 実験実施に当たって問題はないと考えられる。

また, LArTPC 検出器の信号に関しても突き抜け事象の飛跡を充填完了直後から液蒸発開始直前の丸 1 日の間確認することができ, 1 ppb 程度の純度要求は満たしている。なお, T98 実験は背景事象除去能力向上のための実験であるため, 飛跡の鮮明さが重要となるのは先に述べた通りである。早稲田大学での試験時と比較して, K1.8BR ビームエリアにセットアップを輸送後は新しく周期的なノイズが主に y ch 前半で確認されるようになった。この時点ではまだ K1.8BR のあるハドロンホールにビームは出ていない状態であったため, T98 実験本番時にはビームエリア内でさらに様々な機器が運用されることとなり, ノイズが悪化することが予想されるため, 今後はこれに対応する必要がある。

7 まとめと今後の展望

7.1 各章のまとめ

第1章では暗黒物質由来の宇宙反粒子探索に関して述べた。特に宇宙反重陽子は 100-300 MeV/n の領域において暗黒物質由来の Flux がバックグラウンド事象の Flux と比較して O(100) 大きく新物理への良いプローブとなっているが未だ観測はされておらず、BESS 実験が上限値を与えているのみである。第2章では GRAMS 実験の物理目標および検出器概要、早稲田大学におけるマイルストーンに関して述べた。GRAMS 実験では、LArTPC 検出器を用いて原子核捕獲事象後のハドロン生成を観測し、粒子反粒子識別を行うが、反重陽子の LAr 中での捕獲事象は未実証である。また、反重陽子を背景事象と区別するためには、主要な背景事象となる反陽子捕獲事象を理解する必要がある。第3章にて反陽子捕獲事象の収集を目的とした加速器ビーム実験である T98 実験に関して概要を述べた。T98 実験は 2025 年 2 月に LArTPC 検出器への反陽子ビーム照射を予定しており、本研究では T98 実験用の LArTPC 検出器セットアップの設計・構築を行った。第4章では検出器セットアップのコンセプトおよび充填系、検出器容器、排気系等の詳細をのべた。T98 実験においては、安全性の観点から循環系を採用しない自然蒸発方式をとり、ビーム待機時間が長引く場合には必要に応じて追充填を行い、ビームスタンバイ状態を維持する設計とした。第5章では T98 実験で使用する検出器の詳細を述べたのちに早稲田大学における検出器運用試験に関して述べた。フィルターを用いて真空断熱容器に LAr を充填し、絶対圧弁による恒常的な GAr 排気を行うことによって数日レベルでの LAr の安全運用に成功した。また、数日間にわたって 30 cm の LArTPC 検出器を突き抜ける事象を確認することができたため、1 ppb 程度の LAr 純度が維持できていることが分かった。第6章では J-PARC へのセットアップの輸送及び K1.8BR 準備エリアでの検出器運用試験に関して述べた。J-PARC での運用も基本的には早稲田大学で試験と同様であるが、安全の担保に関してより厳密に行う必要があり、GAr の取り回しや立ち入り制限の実施、アラートシステムの導入などを行った。LAr 運用および信号に関して、早稲田大学での試験時同様数日間安定して運用および突き抜け信号を確認することができたため、設計した T98 実験セットアップの機能に問題がないことが実証された。

7.2 今後の展望

本研究では T98 実験セットアップを構築し、早稲田大学および K1.8BR 内の準備エリアで行った宇宙線 μ によるセットアップ実証試験について述べた。今後の展望として、まず T98 実験 Phase-2 の実施がある。2025 年 1 月現在は、K1.8BR へのビーム運転が再開し、T98 実験の前にビームを利用する E73 実験が終了するのを待機している状態である。E73 実験終了後は我々のセットアップをビーム位置へ移動させ、独立させていた T98 実験 DAQ システムを K1.8BR 検出器 DAQ システムに組み込む必要がある。E73 実験の終了およびビーム位置からの E73 セットアップ移動完了日から数日で T98 実験準備を整えビームを受ける予定となっている。T98 実験が無事に終了したのちは、取得した反陽子捕獲事象を主とした GRAMS 実験において背景事象となりうる事象の解析を行い、背景事象除去能力を検証し、世界初の宇宙線反重陽子観測につなげる。

また GRAMS 実験グループは現在、アリゾナでの気球フライト実験 (pGRAMS 実験) に向けた準備を進めている。こちらはすでに NASA の APRA にて採択されており、2025 年度のフライトを予定しており、こちらも将来的な気球・衛星実験を目指す GRAMS 実験にとって重要なマイルストーンとなっている。

参考文献

- [1] Planck Collaboration., "Planck 2018 results. I. Overview and the cosmological legacy of Planck.", arXiv:1807.06205, 2018
- [2] T. S. van Aleeda et al, "DISTRIBUTION OF DARK MATTER IN THE SPIRAL GALAXY NGC 3198", Astrophysical Journal, Vol. 295, p. 305-313, 1985
- [3] A. Ibarra, S. Wild, "Determination of the cosmic antideuteron flux in a monte carlo approach", Phys. Rev. D 88, 023014, 2013
- [4] L. ˇSerk ˇsnyt'e et al, "Reevaluation of the cosmic antideuteron flux from cosmic-ray interactions and from exotic sources," Phys. Rev. D 105, 083021, 2022
- [5] K. Abe et al, "MEASUREMENTS OF COSMIC-RAY PROTON AND HELIUM SPECTRA FROM THE BESS-POLAR LONG-DURATION BALLOON FLIGHTS OVER ANTARCTICA", ApJ 822 65, 2016
- [6] K. Sakai et al, "Search for Antideuterons of Cosmic Origin Using the BESS-Polar II Magnetic-Rigidity Spectrometer", Phys. Rev. Lett. 132, 131001 – Published 25 March, 2024
- [7] M. Aguilar et al., "The Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) on the international space station: Part II — Results from the first seven years", Physics Reports, Volume 894, 2021, Pages 1-116, ISSN 0370-1573
- [8] Ming-Yang Cui et al, "Possible dark matter annihilation signal in the AMS-02 antiproton data", Phys.Rev.Lett. 118 19 191101, 2017
- [9] C. J. Hailey et al, "Accelerator testing of the general antiparticle spectrometer; a novel approach to indirect dark matter detection," Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, vol. 2006, p. 007, 2006.
- [10] P. von Doetinchem et al, "The flight of the gaps prototype experiment", Astroparticle Physics, vol. 54, pp. 93–109, 2014
- [11] N. Marcelli, Neural Networks approach to event reconstruction for the GAPS experiment, Volume 395 - 37th International Cosmic Ray Conference (ICRC2021) - CRD - Cosmic Ray Direct
- [12] T. Aramaki et al, "Antideuteron sensitivity for the gaps experiment", Astroparticle Physics 74 (2016) 6–13, 2016
- [13] T. Aramaki, et al. "Dual MeV gamma-ray and dark matter observatory- GRAMS Project", Astroparticle Physics, Vol. 114, pp. 107–114, 2020
- [14] 中曽根太地, 「GRAMS 実験のための加速器ビームを用いた 粒子・反粒子識別実証計画」, 修士論文 (2022 年度, 早稲田大学)
- [15] 小高裕和, GRAMS 実験 14: ステータス報告, 日本物理学会第 78 回年次大会, 東北大学, 2023 年 9 月
- [16] 櫻井真由, 「GRAMS 実験のための地上プロトタイプ液体 ArTPC の製作と宇宙線粒子反粒子識別能力の検証」, 修士論文 (2022 年度, 早稲田大学)

- [17] V. Schoenfelder, “The first comptel source catalogue,” *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, vol. 143, p. 145, 2000
- [18] E. Aprile, A. E. Bolotnikov, A. L. Bolozdynya, and T. Doke, *Noble Gas Detectors*. Wiley, 2008
- [19] 木村真人, 「液体アルゴン光検出器を用いたアルゴン応答の測定と地下実験室における暗黒物質直接探索」, 博士論文 (2020 年度, 早稲田大学)
- [20] S. Amoruso et al. ” Study of electron recombination in liquid argon with the icarus tpc. ” , *Nucl.Instrum. Meth. A* 523 (2004) 275, 2004
- [21] S. Amoruso et al., ” Analysis of the liquid argon purity in the ICARUS T600 TPC ” , *Nucl. Instrum. Meth. A* 516, 68–79 (2004), 2004
- [22] W. Walkowiak, “Drift velocity of free electrons in liquid argon,” *Nucl. Instrum. Meth. A*, vol. 449, pp. 288–294, 2000
- [23] Keizo Agari et al. ” The K1.8BR spectrometer system at J-PARC ” *PTEP* Volume 2012, Issue1, 2012, 02B011
- [24] 谷口日奈子, 「J-PARC T98 実験における反重陽子生成量評価と液体アルゴンへの反粒子照射試験の提案」, 修士論文 (2023 年度, 早稲田大学)
- [25] R.Nakajima et al, ”First operation of LArTPC in the stratosphere as an engineering GRAMS balloon flight (eGRAMS)”, *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, Volume 2024, Issue 12, December 2024
- [26] 上岡泰晴, 多層断熱技術 III-施工法および多層断熱用真空技術-, *低温工学*, Vol.51, No.8, (2016), 376-383
- [27] Riki Nakajima, ”Engineering Balloon Flight (JAXA TARF B23-06) for the GRAMS Experiment”, Master thesis (FY2024, Waseda Univ.)
- [28] 電子部品データベース, <https://jp.digchip.com/datasheets/parts/datasheet/2/190/S13361-6050AE-04.php>, 2025 年 1 月 26 日閲覧

謝辞

本論文の執筆にあたりまして研究室の方はもちろんのこと、大変多くの方にご協力いただきました。皆様に感謝申し上げます。

まず始めに研究の機会を与えてくださり、私を GRAMS グループへと引き入れてくださった寄田浩平教授に感謝いたします。寄田研で過ごした3年間の中で、大樹町での気球実験や T98 実験 (の準備) など、世界中でほかの誰もまだやったことがない目標を皆で共有しながら、各々がそれぞれの役割に責任を持って取り組み、やり抜くという経験をさせていただいたことは私にとって一生の財産です。先生が築きあげてこられた、周りを見れば誰かが頑張っている研究室の環境で、学士および修士課程を過ごせたことは本当に幸運だったと感じています。改めて心より感謝申し上げます。また、田中雅士主席研究員には研究の中であらゆる面で本当にお世話になりました。セットアップ設計時や構築時など私の視野の狭さや考えの浅さを指摘してくださり導いてくださいました。予想外の事態でパニックになり動けなくなる私とは全く異なり、常に冷静かつ迅速に指揮してくださり本当に心強かったです。また B23-06 実験時には GRAMS Japan コラボレーターの皆様、JAXA 大気球グループの皆様に、T98 実験準備の際には橋本さんをはじめとするハドロンホールの皆様に大変お世話になりました。研究室内に限らず色々な場所に赴き様々な方と交流しながら実験できたことは貴重な体験でした。

出張の際や普段の物品購入の際には秘書の坂本さんに大変お世話になりました。坂本さんがスムーズに対応してくださったおかげで不自由ない研究生生活を送ることができました。また研究室の先輩方にも本当にお世話になりました。特に青山一天さん、中島理幾さんとは実験準備から大樹町での共同生活など、多くの時間を一緒に過ごさせていただきました。お二人の人柄の良さはもちろんのこと、研究へ打ち込まれる姿がそばで見ていて本当にかっこよく憧れで、こういう人になりたいという理想像そのものでした。同期、特に同じ GRAMS 実験グループである石川皓貴くんにも大変お世話になりました。普段の生活の中でいつも横に居て研究に打ち込む姿は本当に刺激になり、自分も頑張ろうと思えました。後輩たちにも常に様々な面でサポートをしてもらいました。特に荒井紳太郎くん、矢野裕太郎くんとは同期さんながらに時間を過ごし、一緒に研究に取り組む中で何度も助けてもらいました。ありがとうございました。

最後に大学院まで通わせて頂き、金銭面や生活面で何不自由なく学生生活を送らせてくれた家族に感謝いたします。

A 真空断熱容器図面

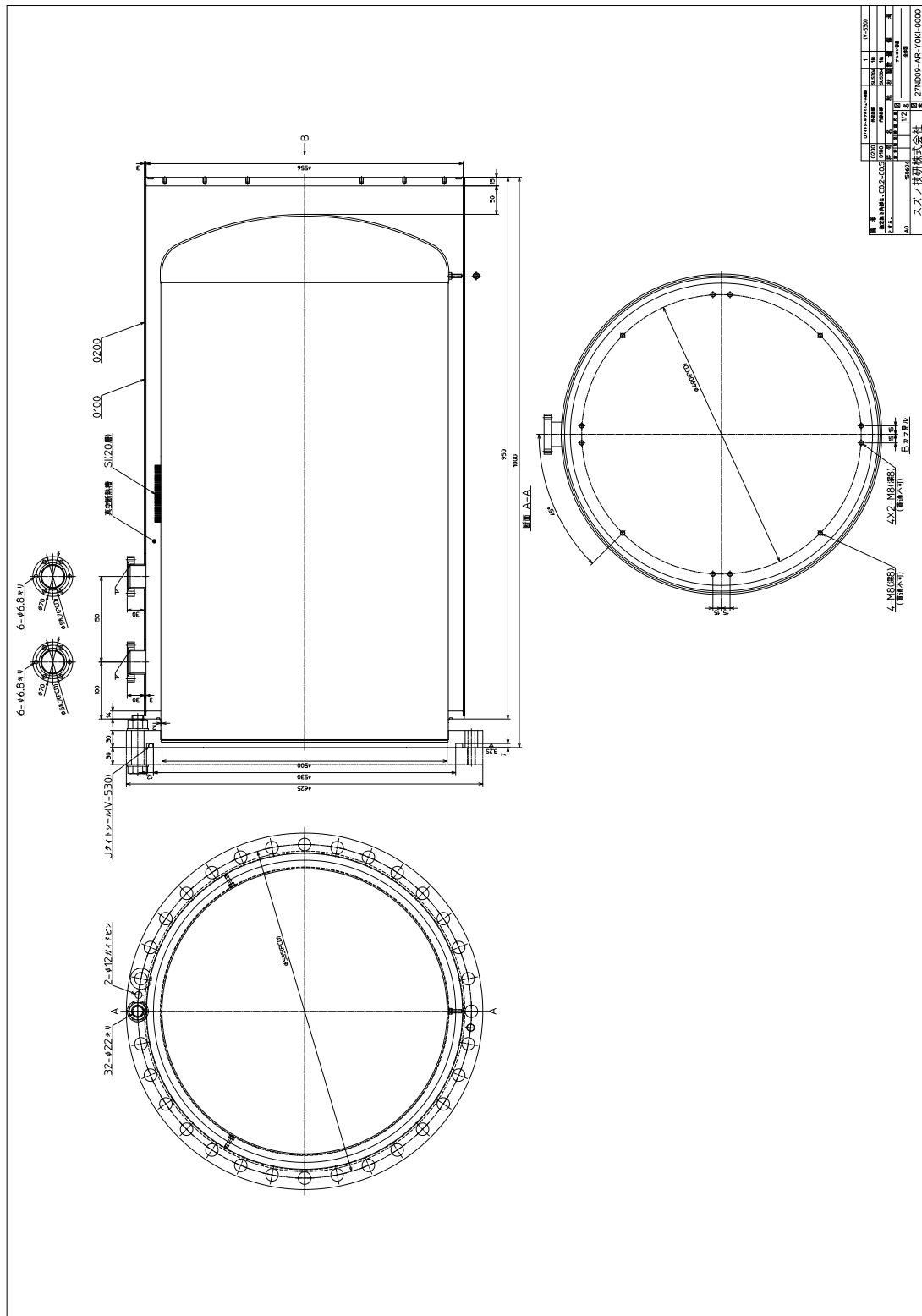


図 A.1: Φ 50 cm 容器図面

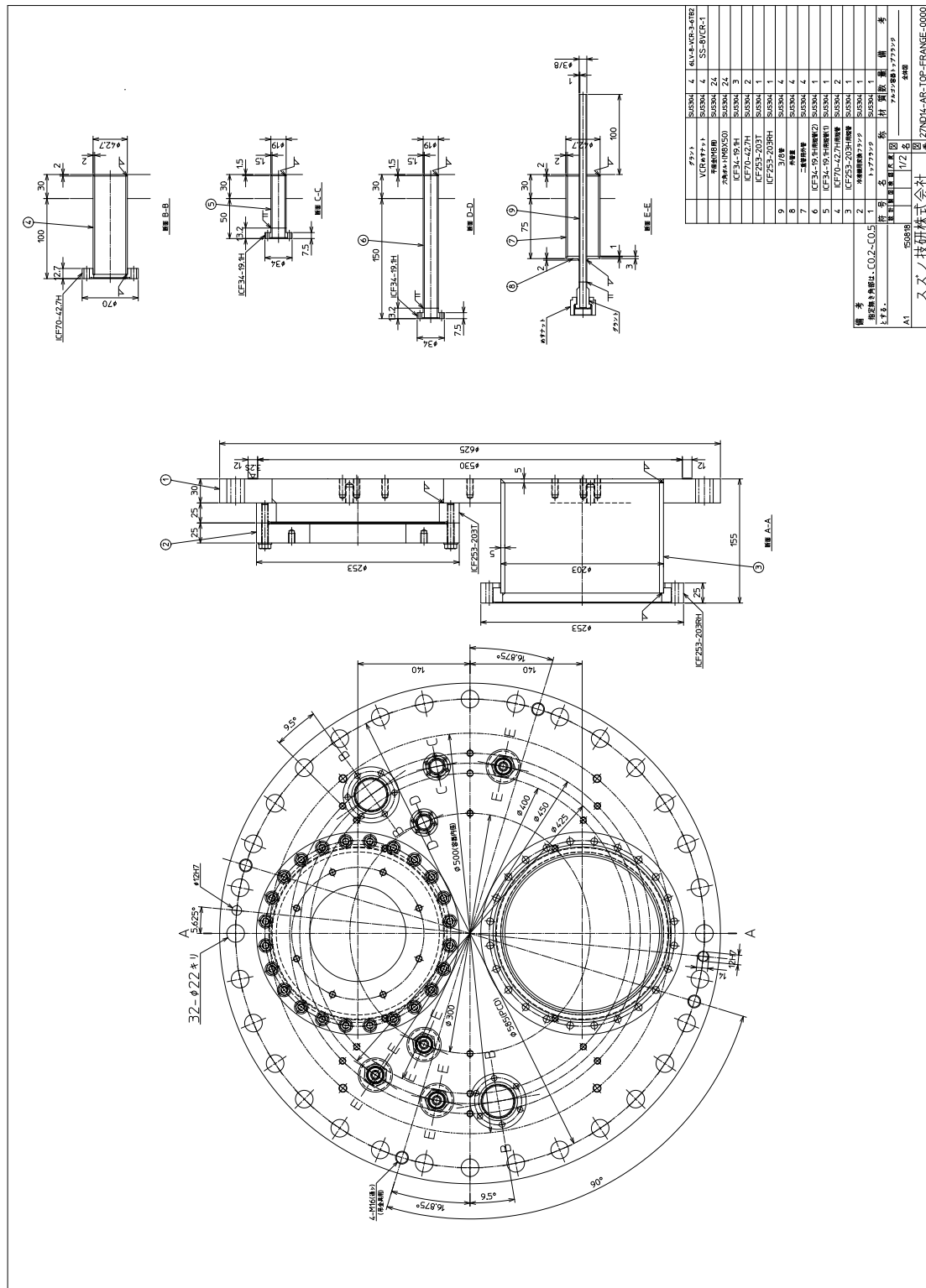


図 A.2: Φ 50 cm 容器トップフランジ図面

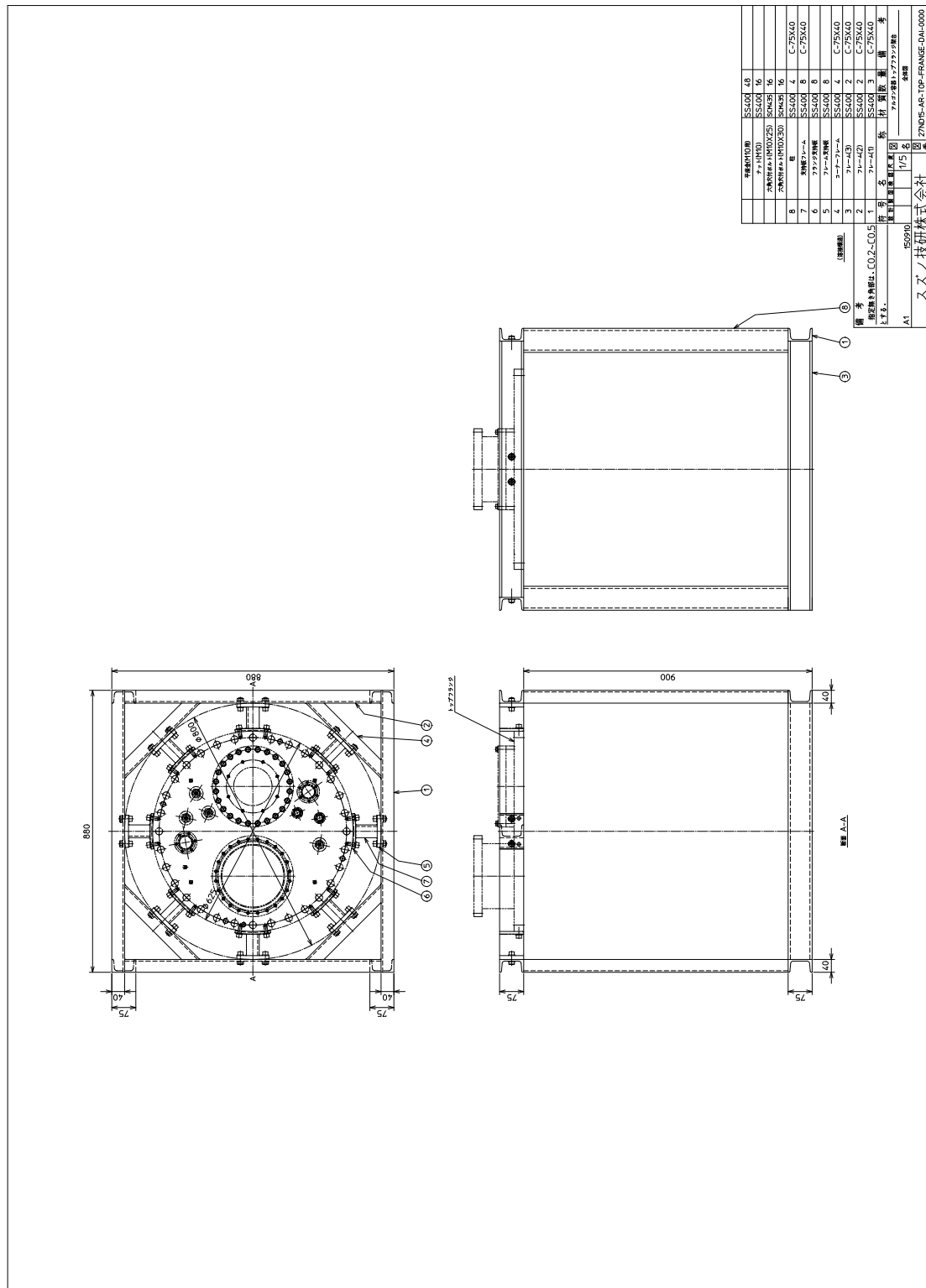


図 A.3: Φ 50 cm 容器用フレーム図面

B B23-06 実験における LAr 運用

第2章で簡単に記述したように GRAMS 実験日本グループは2023年7月に世界初の LArTPC 検出器の上空運用試験 (B23-06 実験) を実施した。筆者は其中で LAr 検出器容器の設計および気球実験における LAr 運用手法の設計、構築を担当した。この気球実験における LAr 運用は先述のように T98 実験 LAr 運用に活かされている。本章では B23-06 実験の LArTPC 検出器容器および LAr 運用に関して詳細を記述する。

気球実験の実施にあたって、LArTPC 検出器の上空運用における課題を以下に整理する。

- 重量・電力の制限

気球実験において、ゴンドラに積載可能な重量はバルーンのサイズと充填する He ガス量に依る。一般論として積載重量が重いほど放球が困難であり、放球機会も少なくなる。加えて高重量の場合は最高到達高度も小重量と比較して低くなる。また、電力に関してはバッテリー、太陽電池などを利用することになる。こちらも大電力を使用するためには大容量バッテリー等を用いる必要があり、重量と絡み合う要素となっている。

- 衝撃・振動への耐性

実験系が搭載されるゴンドラはバルーンによってつられる構造となっているため、実験中は回転および振動運動をする。さらに放球時、パラシュート展開時、着水時にはさらに数 G 程度の衝撃が加わることとなる。

- フライト中の環境変化

気球実験中は高度変化に伴い、外気圧および外気温が変化する。国際標準大気モデル (ISA) に基づけば高度 30 km に到達するまでに、気圧は数 Pa まで低下し、温度は最大で -60 °C 程度まで変化する。Ar は三重点が 0.7 atm 程度と大気圧に近い物質であり、外気圧の変化に容器内圧が影響を受けるような運用では凝固の恐れがある。また運用に用いる機器は真空かつ低温環境下で適切に動作するものである必要がある。さらに低圧下では放電が起りやすくなるため、LArTPC 検出器への電圧印加には対策が必須となる。

- 各種機器のリモート操作

LAr の運用や検出器の電圧印加は全てリモートで行われる必要がある。

- 実験系の安全な回収

パラシュートによる着水後は実験系はゴンドラ毎回収される。回収は漁船にて漁師の方々主導のもと行われる。そのため、回収時に実験系が安全な状態であるということが非常に重要となる。

上記の条件を受けて、Run22.1 で用いていた冷凍機を使用する循環系込みのセットアップの使用は重量、電力、制御の複雑さの観点から現実的ではないこと、フライト時間が数時間と短時間であることから、低熱流入容器に LAr を充填し、フライト中は自然蒸発させながら LArTPC が完全に浸かる液量を保持し続ける方式 (気球方式) を採用することとした。以降では気球実験用に新規製作した真空断熱容器および B23-06 実験における LAr 運用の詳細を記述する。

B.1 B23-06 実験容器

気球実験の実施にあたって、新規に計量かつ低熱流入の LAr 容器を設計、製作した。本容器を以降気球容器と呼称する。気球容器の設計は2022年10月から開始した。制作はスズノ技研株式会社に

依頼し 2022 年 12 月に納品された。

本容器の設計にあたっては、先述のように気球実験では循環系を搭載せず LAr を自然蒸発させるため、低熱流入である必要がある点、また LArTPC 検出器も GRAMS40 ではなく気球実験用に小型の 10 cm 角 LArTPC を構築した [25] ため、これが収まる範囲内で軽量の小型容器である点などを考慮する必要がある。これらを踏まえて、図 B.1、図 B.2 に示すような胴長構造のトップフランジ付きオープンバス型真空断熱容器を設計した。胴長構造にすることで内槽壁を通じた LAr への熱流入を低減でき、またフライト中揺れなどの外的要因によって LAr の塊がトップフランジと接触し、瞬間的に多量の LAr が気化するリスクを減らすことができる。実際の運用時には容器内部にバッフル板をいれることによって接触を防ぐ対策を取った。

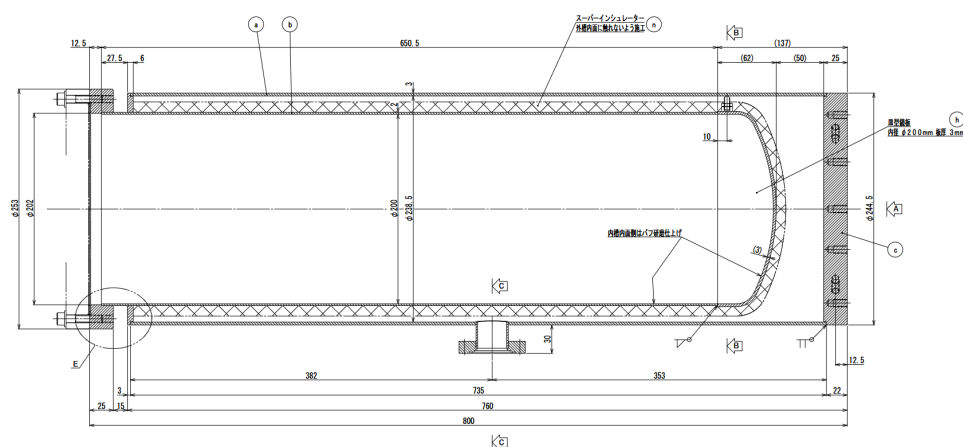


図 B.1: B23-06 実験容器：容器部

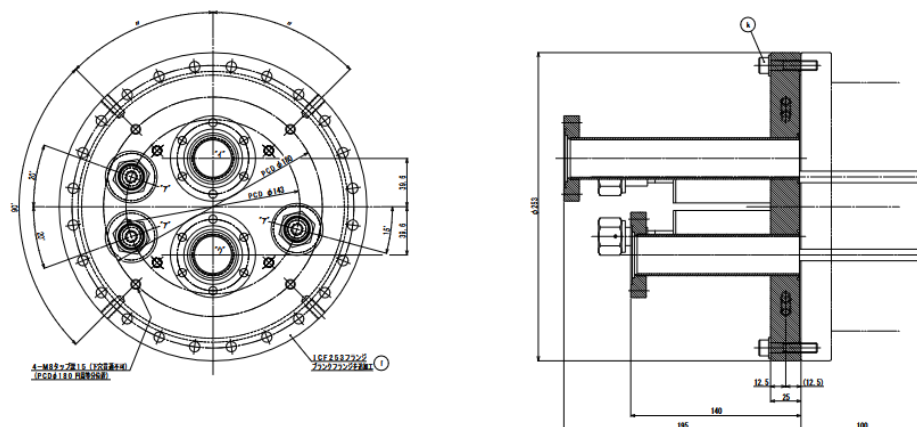


図 B.2: B23-06 実験容器：トップフランジ部

図 B.2 に示すように、トップフランジには VCR1/2 インチのポートが 3 つ、CF70 のポートが 2 つの計 5 つのポートがついている。これらは実験を遂行するにあたっての最低限のポート数となっている。次節にてそれぞれのポートの役割と搭載されている機器の詳細を記述する。

本気球容器はトップフランジ込みで重量が 46 kg、内槽容量が 22 L、高さ約 1 m となっている。本容器は真空断熱層を有し、内槽外側にスーパーインシュレーターを 20 層巻き付けることによって輻射熱を軽減する工夫がなされている。気球容器への熱流入量は、早稲田大学で実施した LAr 充填後の

液面減少実測値の 1 次関数 Fit の結果から、約 15 W であった。また気球容器の耐圧試験として、差圧 3 atm で 10 分間の耐圧試験を実施し、後述する安全装置が働いた場合の容器内圧の最大到達値である差圧 2 atm よりも 1 atm 加圧された状態であっても異常が生じないことを確かめている。

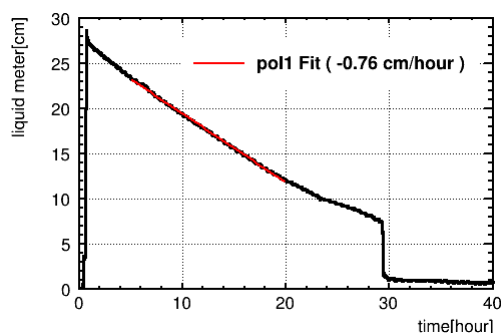


図 B.3: 地上での LAr 充填時の液量減少

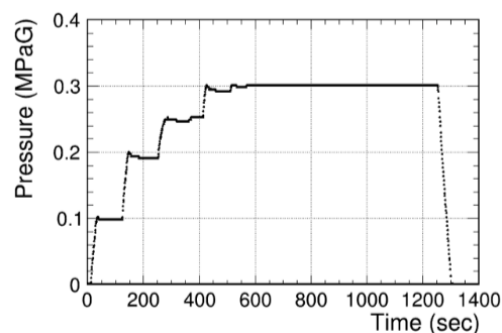


図 B.4: 気球容器耐圧試験

B.2 LAr 運用手法

B23-06 実験における LAr 運用手法は第 4 章でも述べたように、図 4.6 のようなフライト系と地上系からなるセットアップである。以下に具体的な B23-06 実験における LArTPC 検出器運用の流れを示す。



図 B.5: フライト前日（2023/7/26）タイムライン



図 B.6: フライト当日（2023/7/27）タイムライン

このフライト前日から当日までのタイムラインは、LAr 運用について 3 つの段階に大別される。

- 気球容器への LAr 充填
フライト当日は実験系の移動や気球の準備棟で液充填を行う時間がない。故に LAr 充填はフライト前日に実施する。
- 恒常的な GAr 排出（LAr の維持）
LAr 充填完了後から自然熱流入によって LAr は気化し続け、3 L/min 程度のレートで GAr

が生成される。気球容器が高圧になる事態を防ぐためにこの GAr を恒常的に排出する必要がある。

- LAr の上空排出

気球実験では実験終了後、海上着水したゴンドラを民間の漁師の方に協力していただき回収する。そのため回収時にゴンドラが安全な状態であることが要求される。LAr は極低温物質であり、低温、酸欠、海水流入に依る爆発的な酸化による容器破裂等のリスクがあるため、フライト中に LAr を上空で全量排出することによって回収時の安全を担保する。

この3つの運用を行うために、以下のようなセットアップをトップフランジに組んだ。

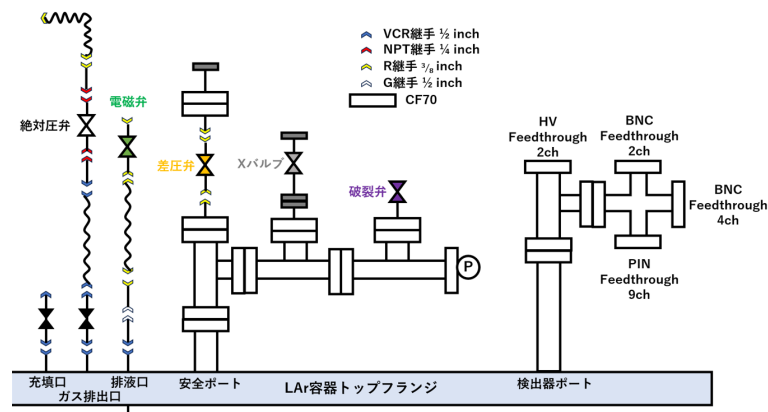


図 B.7: 気球容器トップフランジ

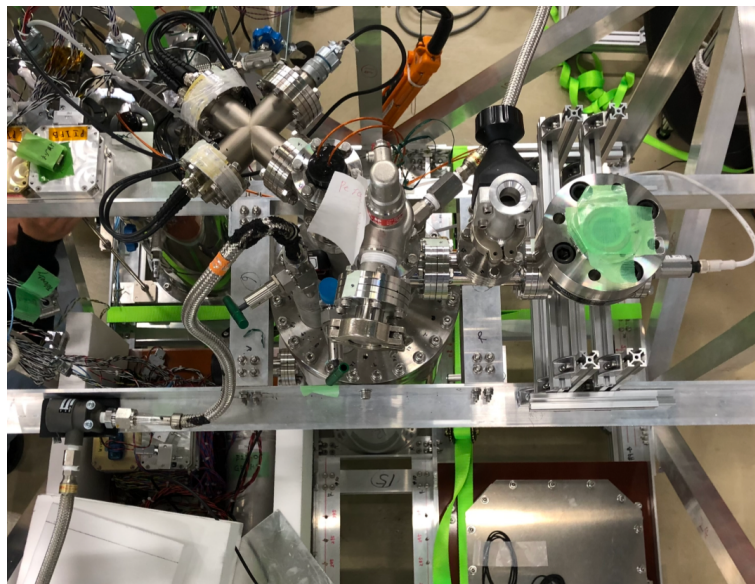


図 B.8: 気球容器トップフランジ (実物)

以降では各ポートの役割を B23-06 の実データと合わせて記述する。

B.2.1 充填口

3つある VCR ポートの内の1つは液充填口になっている。この充填口の先に Run22.1 でも用いた Subppb の初期純度の達成実績のある液フィルターを接続し、液充填を行う。気球容器内には図 B.9 に示す位置に LArTPC 検出器が設置されており、フライト中検出器が LAr に完全に浸かるだけの量を充填する必要がある。

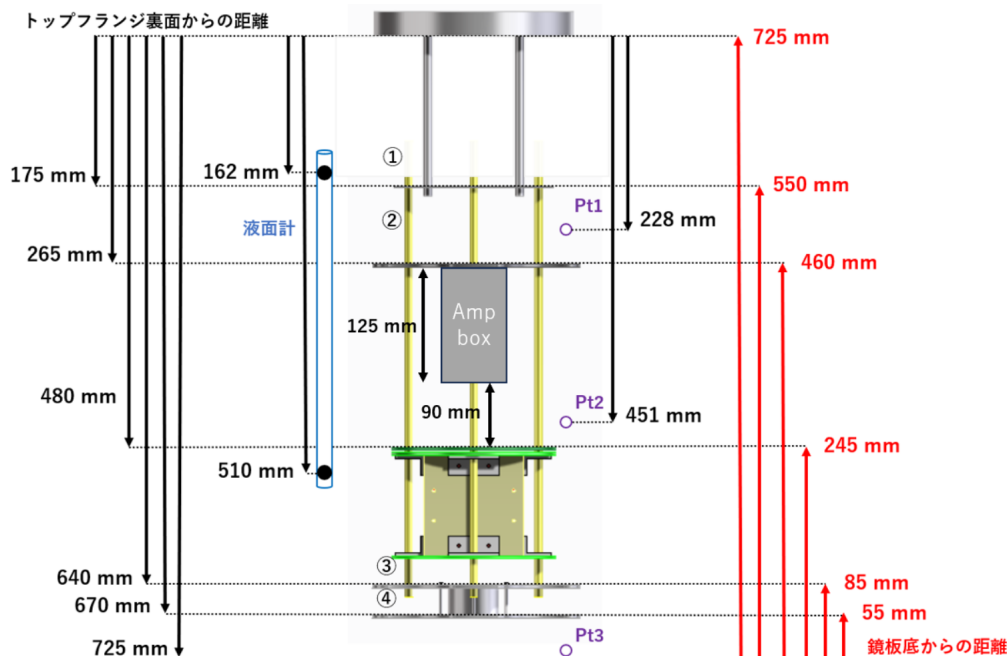


図 B.9: 気球容器内部の位置関係

先に述べたようにフライト直前には時間的余裕がないため、液充填はフライト前日に行われる。この際に液面計値で 30 cm (LArTPC Anode から + 26 cm に相当) まで充填する。気球容器の熱流入量は先述のように約 15 W であり、0.75 cm/hour の液面低下に相当するため、+26 cm まで充填することによって 24 時間経過後のフライト終了時においても TPC が浸かる液量を保持することが可能となっている。実際の B23-06 実験時の液量推移を図 B.10 に示す。

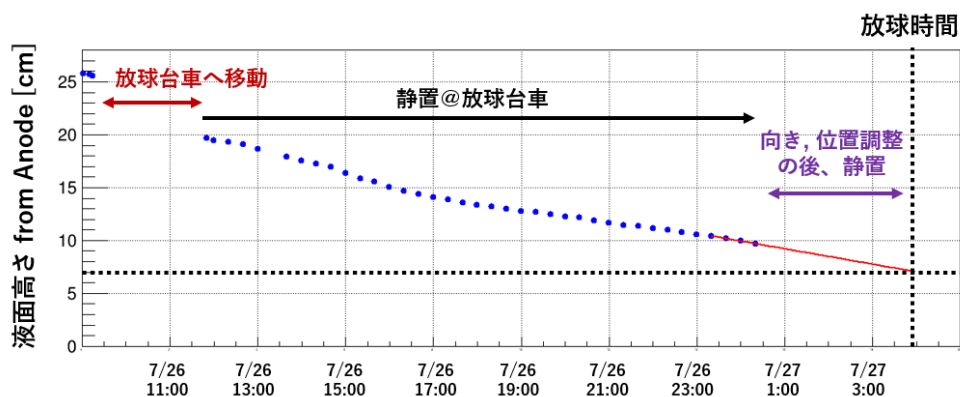


図 B.10: フライト前日からの液量推移

結果として放球時には LArTPC の Anode から + 7 cm 程度の位置に液面があり、数時間のフライトに耐える量を保持できていた。

B.2.2 ガス放出口

先述のように充填直後から LAr は容器からの熱流入によって常に気化し続ける。LAr が気化するとその体積は約 800 倍になるため、恒常的に容器内のガスを放出しなければ容器が破裂する。そのため、VCR 口の一つをガス放出口にしている。このガス放出は、容器内圧を一定に保つ範囲内で行わなければならない。そのために B23-06 実験では絶対圧弁を用いる。絶対圧弁は内部に真空部分を持ち、それと 1 次側の差圧を一定にする弁であり、今回の気球実験のように環境の圧力が時間変化する場合であっても 1 次側の圧力を一定範囲内 (1.1 ± 0.1 [atm]) に維持することができる弁である。しかしながら、この絶対圧弁を使用した BESS 実験グループ牧田氏によると、実際には絶対圧弁の圧力維持範囲は外圧の変化に応じて多少変化することだった。B23-06 実験では BESS 実験グループに絶対圧弁をお貸しいただいた。図 B.11 に絶対圧弁の性能試験 (2023/5/18 実施) の結果を示す。気球容器に LAr を充填し、絶対圧弁による内圧の維持を行った。数時間内圧を維持できることを確認したのちに、絶対圧弁の 2 次側を真空引きし LAr 容器内圧維持の変化を確認した。

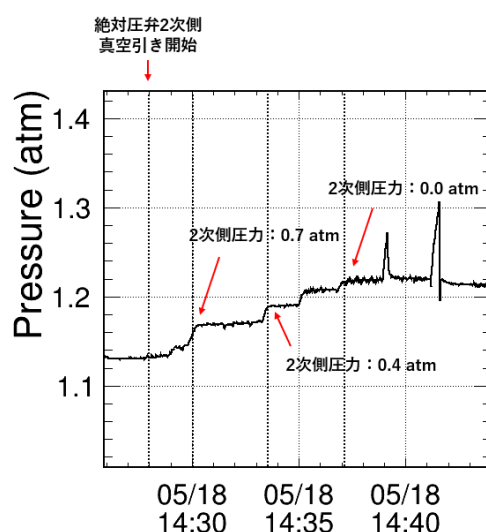


図 B.11: 外圧が変化した場合の絶対圧弁の性能

図 B.11 からわかるように、外圧が 1 atm から 0 atm から変化すると内圧は 0.1 atm ほど上昇するものの、外圧が安定すると容器内圧も安定して維持されていることがわかる。14:39 および 14:42 頃の圧力変化は絶対圧弁と液体 Ar 容器の間の VCR バルブを閉めたことによる内圧の増加によるもので、VCR バルブを再び開けた際に瞬時に安定値である 1.21 atm に戻ることが確認できた。以上からお借りした絶対圧弁が B23-06 実験において有効に作動することが確かめられた。図 B.7 に示されているように、ガス放出口には VCR バルブ、フレキホース、絶対圧弁、フレキホースが接続されている。絶対圧弁と気球容器の間の VCR バルブは内槽真空引きの際に用いられ、VCR バルブと絶対圧弁の間のフレキホースは GAr 排出の際の振動が気球容器内の LArTPC 検出器および Amp に伝導することによるノイズを低減するためについている。また、絶対圧弁 2 次側のフレキホースはゴンドラを回収後、全体を覆う断熱材をはがした際に、排気された GAr がゴンドラ内に充満し酸欠危険状態となることを防ぐために取り付けられている。2 次側フレキホースの先は断熱材を貫通する形で取り付けられている。なお、海水の逆流を防ぐために出口には防水スプレーを噴霧した綿をケーブルタイを用いて取り付けられている。

B.2.3 安全ポート

安全ポートには絶対圧弁のバックアップとしての差圧弁、破裂弁および容器内槽真空引き用の X バルブ、内圧モニター用の圧力計（長野計器：KP15）が取り付けられている。通常運用時には GAr の排出は約 3 L/min 程度であるため、絶対圧弁による排気で問題ないが、絶対圧弁が正常に動作しない場合には差圧+1.5 atm で差圧弁（ベン：SL-39）が、差圧+ 1.9 atm で破裂弁が作動する。差圧弁は液充填時に発生する多量の GAr の出口としても用いるためトップフランジから直上に取り付けられている。また、破裂弁は数 kg と重くトップフランジのポートに負荷がかかるため、MISUMI フレームを用いて支持台を作成しその支柱ごと Gondola に固定している。なお、差圧弁と破裂弁も絶対圧弁同様二次側をフレキホースで延長しており海水流入を防ぐ工夫を施してある。

B.2.4 液排出口

先述のように B23-06 実験では LAr を上空で排出し、実験系の安全を確保した状態で Gondola の回収を行う。そのため VCR 口の 1 つを液排出口として用いる。上空での液排出は差圧によって行われる。気球容器内部は常に 1.1 atm 程度に維持される一方で、気球高度においては外気圧はほぼ 0 atm である。したがって上空において、気球容器底まで伸びるように加工した 3/8 インチステンレス配管につながる電磁弁（日本アスコ：J263G210LT）を開くことにより、気圧差によって LAr が押し出され液排出を行うことができる。

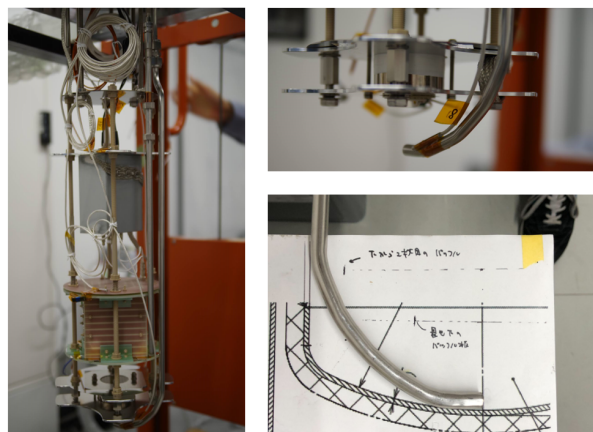


図 B.12: 作成した排液管

電磁弁も絶対圧弁同様断熱材に穴をあける形で固定される。この際サイフォンの原理を鑑みて電磁弁は Gondola 下部に設置した。

B.3 フライト中の LAr 運用結果

B23-06 試験時の気球容器内圧および LAr 温度の推移を以下の図 B.13 に示す。なお外気圧は標準大気モデルに基づき高度から計算した値となっている。

実験容器内圧は放球直後から外気圧の変化の影響から 0.1 atm 程度は変化しているものの、排液開始まで接待圧力範囲内で安定維持されていた。LAr 温度も圧力変化に応じた 1 度程度の変動はあるものの安定しており、LArTPC 検出器最上部に設置している温度計の温度も常に LAr 温度であったことから実験中に検出器が LAr 液面よりも下部にあったこともわかる。

図 B.14 に排液時について拡大した容器内圧推移および気球高度のプロットを示す。図 B.14 にお

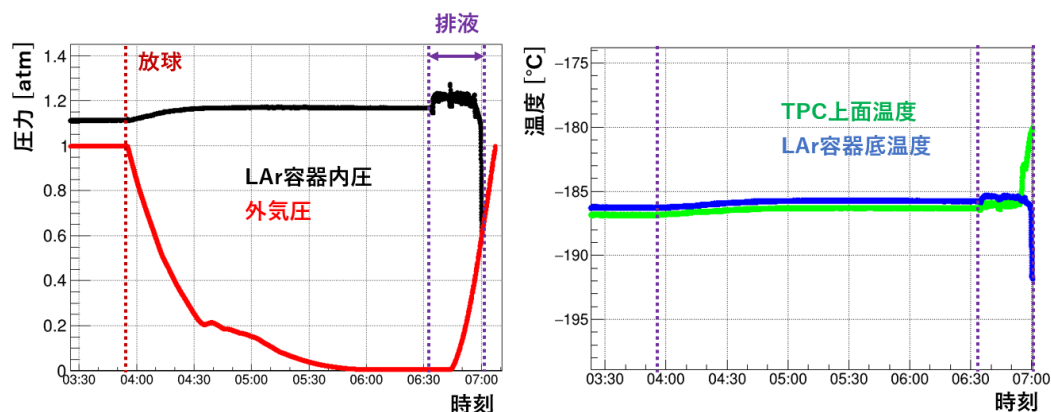


図 B.13: 左：フライト中の容器内圧 右：フライト中の LAr 温度推移

いて橙色の領域が電磁弁を開けている期間に相当する。電磁弁を開け始めた瞬間では容器内圧は下がるもののその後上昇に転じる。これは電磁弁時から排出された瞬間に 0 atm の環境に LAr が晒され固化した結果、電磁弁 2 次側を塞いだためであることが考えられる。実際の運用では電磁弁の開閉を複数回繰り返し、勢いをつけて排液することによってこのつまりを解消した。最終的に 7 時ごろ実験容器内圧が外気圧と一致し排液が完了していることがわかる。なおこの排液完了時の高度における外気圧は約 0.6 atm であり Ar の三重点の値である 0.7 atm よりも低い値であった。

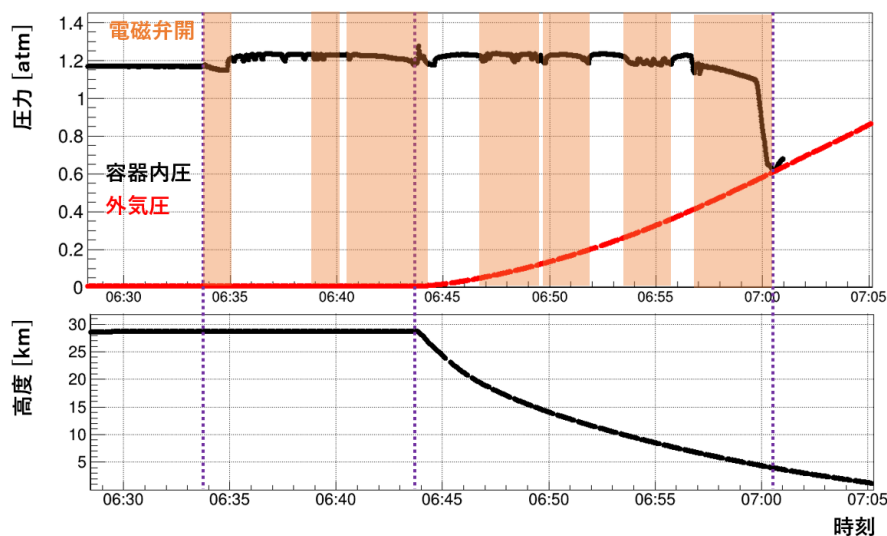


図 B.14: 排液時の容器内圧と外気圧

以上の結果から B23-06 実験フライト中の LAr の安定維持および上空での LAr 全量排出が問題なく実行されたことがわかる。

また、B23-06 実験終了後、排液時のつまりの再現性の確認のために早稲田大学にて固体 Ar の生成試験を実施した。気球高度での低圧環境下で LAr がどのような挙動を示すのかを確認すべく、Run22.1 の際に液化器として用いていた 75 L 容器に GAr を充填し LAr を少量生成し、容器内をスクロールポンプにより減圧させることによって上空の低圧環境下に LAr が晒されるといった状況を再現した。セットアップの概略図は以下の図 B.15 に示す通り。

このセットアップを用いて、容器内圧を 1.5 atm に維持しながら GAr を液化させ、LAr を容器内の鍋に 10 cm ほどの高さまでため、減圧させた際の温度および内圧の推移を以下の図 B.16 に示す。固

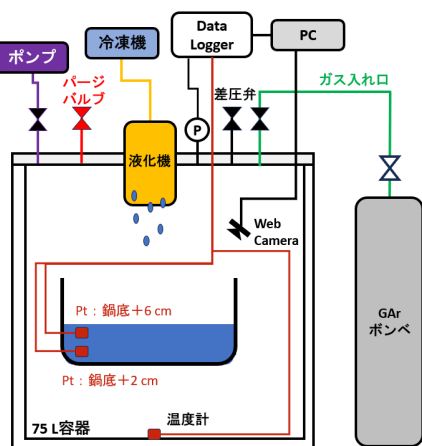


図 B.15: 固体 Ar 生成試験セットアップ

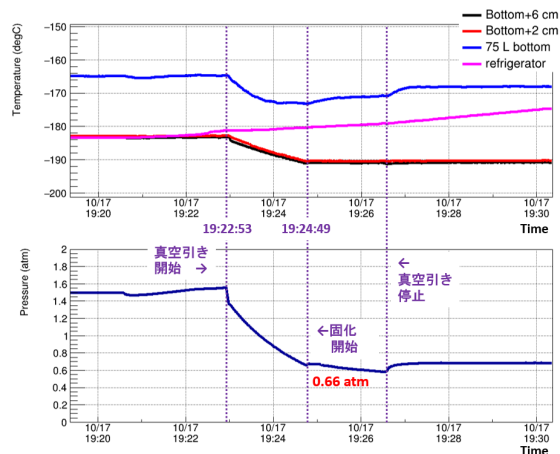


図 B.16: 容器内の温度および圧力推移

化開始は容器内圧が 0.66 atm を下回ったあたりであり、この値は Ar の三重点圧力である 0.68 atm に近い値となっている。図 B.17 に減圧開始前の容器内部の写真および全量固化完了後の写真を示す。

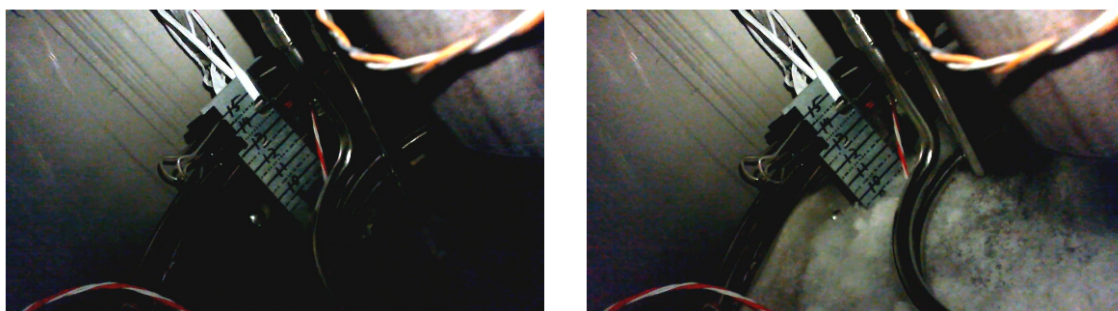


図 B.17: 固体 Ar 生成の様子 左：減圧前 右：減圧後

実際に減圧によって液体から固体へと Ar が変化する様子を確認できたため、上空での排液の際にも LAr が即座に凍り付き排液管の出口を塞いだ可能性が高いことが確かめられた。

C T98 実験 Phase-2 における LArTPC 検出器運用結果

2025 年 2 月 19 日から 2 月 21 日にかけて T98 実験 Phase-2 を実施した。本章では実験のスケジュールおよび LArTPC 検出器の運用結果および取得した事象の例を記載する。

C.1 T98 実験 Phase-2 スケジュール

2025 年 1 月の PreRun 実施以降, Phase-2 本番実施に向けて必要な作業としては主に以下の 3 点があった。

- 検出器セットアップの移動

PreRun を実施したビームライン下流脇の位置からビームライン上へのセットアップの移動が必要であり, そのために各種ケーブルや施設側排気ラインとの接続部の解体および移動後の再接続といった作業を行った。

- モニタースペースの準備

K1.8BR ビームエリアの外側にモニター用スペースを確保し, 検出器の環境データの 24 時間体制での監視および, エリア内に設置された PC で取得した LArTPC 検出器データの root ファイルへの変換等の作業を行う必要があったため, その設置および整備を行った。

- DAQ システムの改善

これらの準備及び Phase-2 を行うために, T98 実験グループは 2 月 10 日から J-PARC 入りし準備を進めてきた。以下にスケジュールを示す。



図 C.1: T98 実験 Phase-2 の実際のスケジュール

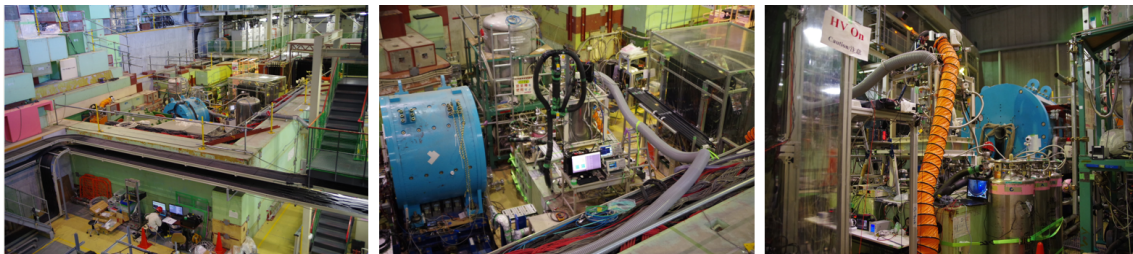


図 C.2: Phase-2 の実験セットアップ写真 左：エリア外モニタースペース 中央：セットアップ概観 右：セットアップ近影

ビームタイムとしては 2/19 22:00 - 2/20 10:00, および 2/21 12:00 - 24:00 が割り当てられていたため, セットアップの移動および再構築は 2/18 までに完了させ, 2/18 の夕方から液充填を実施した。

実際のビームタイムおよび取得した粒子種の内訳は以下に示す通り。ビーム強度は両日ともに 83.5 kW であった。

- 2 月 19 日: Phase-2 1st Beam Time (21:34-10:16)
 - 0.7 GeV Antiproton beam
- 2 月 21 日: Phase-2 2nd Beam Time (12:05-23:56)
 - 0.7 GeV Antiproton beam (5 hours)
 - 0.7 GeV Antiproton beam (1 hours)
 - 1.0 GeV Deuteron beam (1 hours)
 - 1.0 GeV Antiproton beam (4 hours)
 - 1.0 GeV K^- beam (1 hours)

C.2 T98 実験 LArTPC 検出器運用結果

Phase-2 実施期間中の環境モニター値の推移を以下に示す。実験期間中各値は安定しており、データ取得可能な LAr 量は 80 時間以上維持することができた。

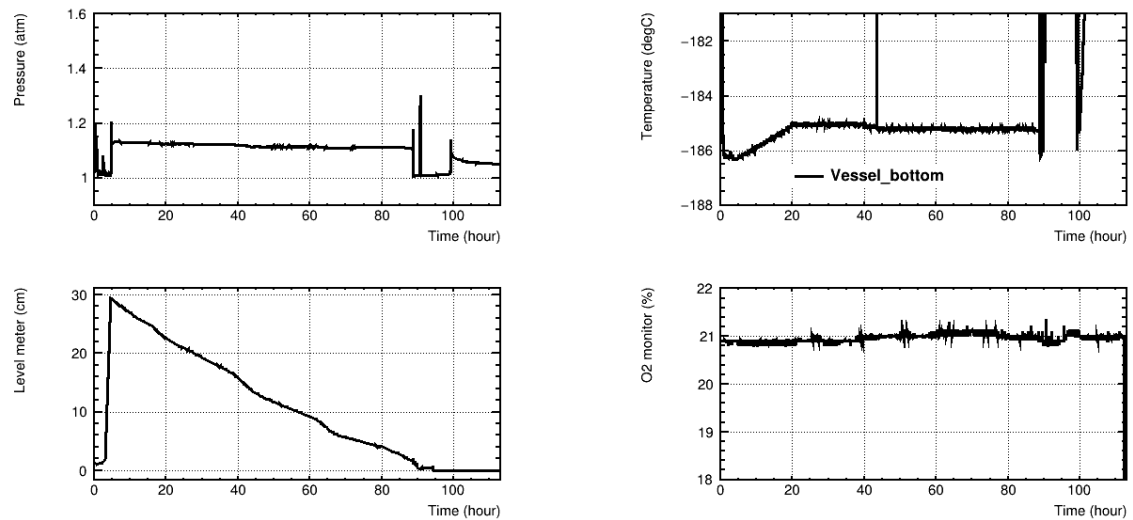


図 C.3: T98 実験 Phase-2 における環境 Data

また、電離電子信号、光信号ともに問題なく取得することができた。実際に取得した事象をいくつか示す。

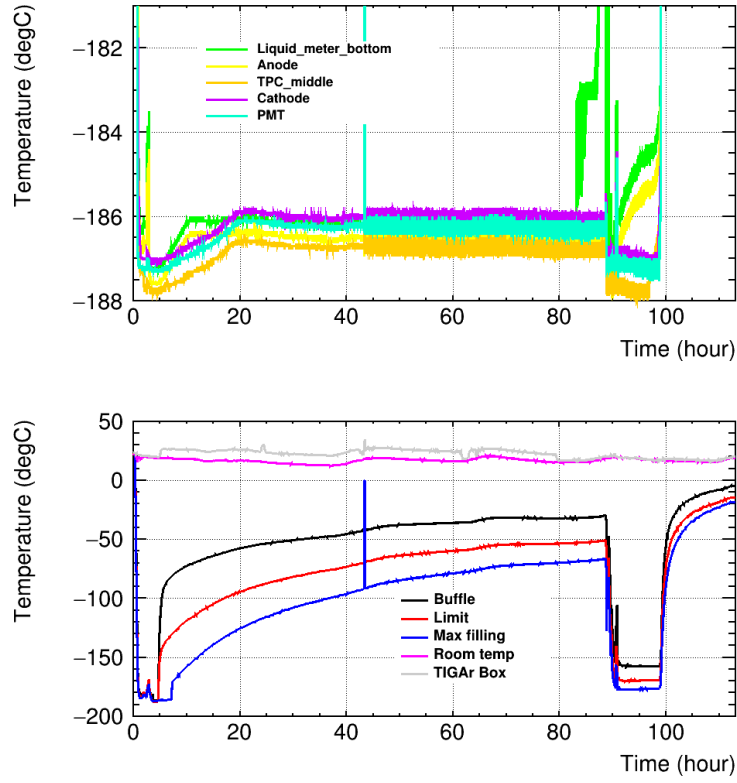


図 C.4: T98 実験 Phase-2 における環境 Data (200 L 容器内温度)

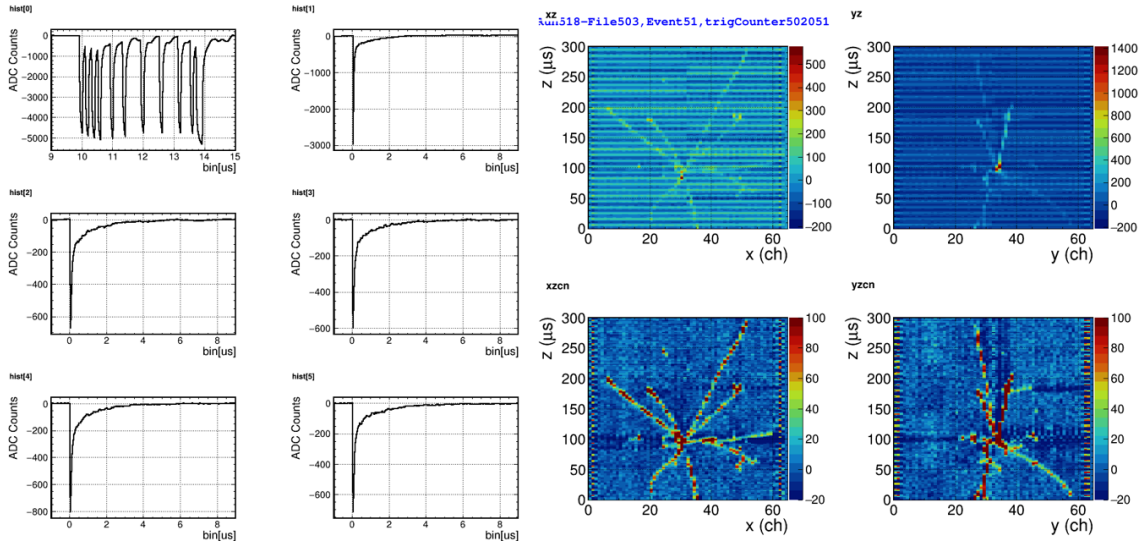


図 C.5: 0.7 GeV/c 反陽子イベント

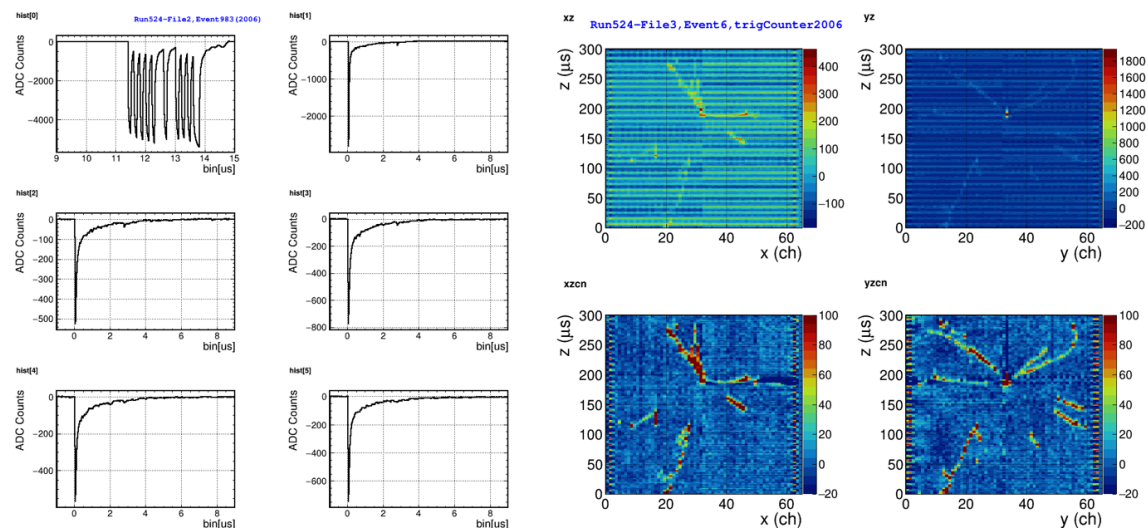


図 C.6: 1.0 GeV/c 反陽子イベント

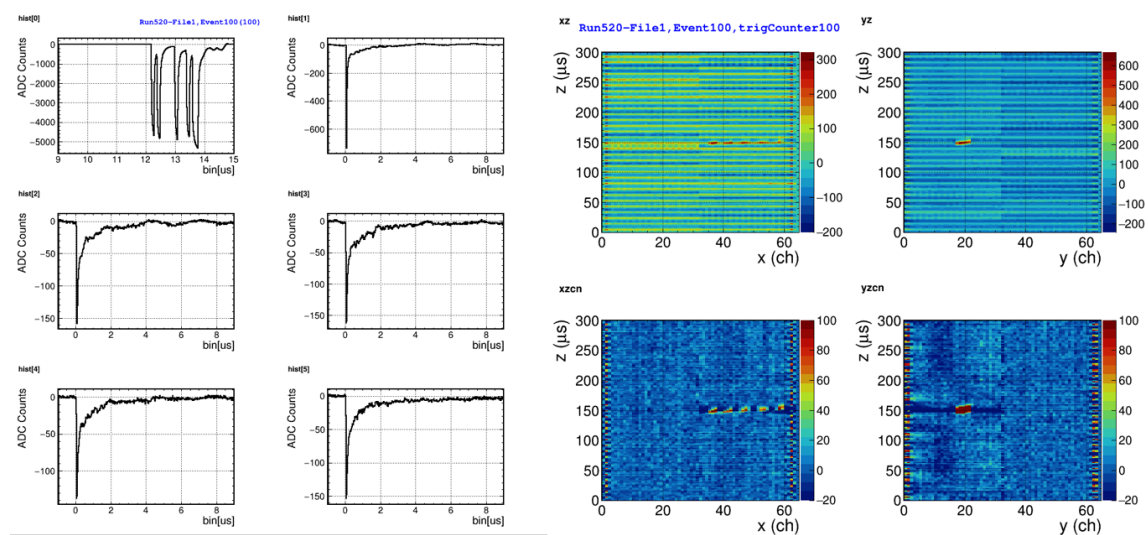


図 C.7: 0.7 GeV/c 陽子イベント

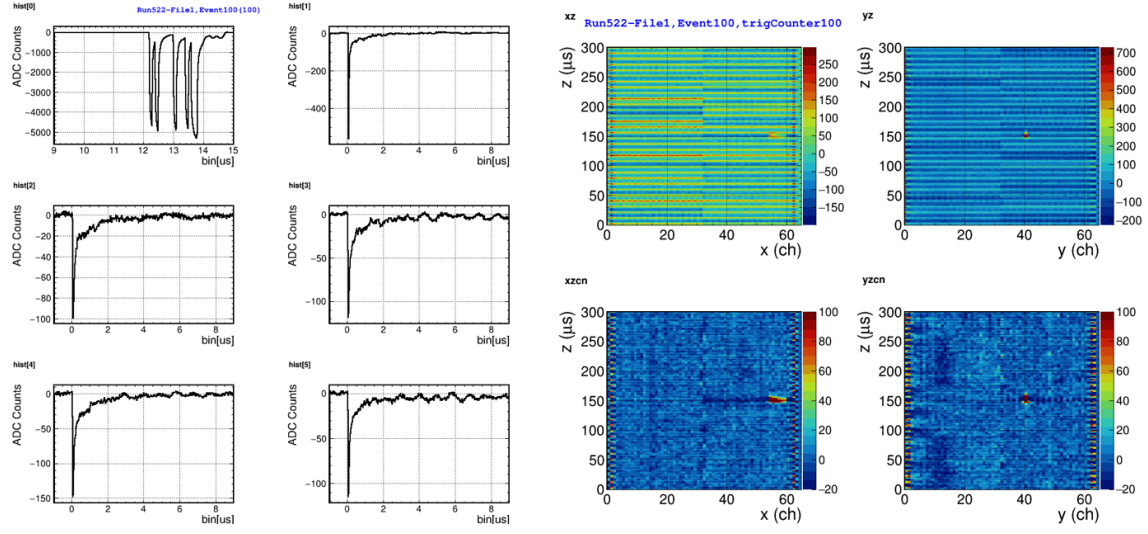


図 C.8: 1.0 GeV/c 重陽子イベント

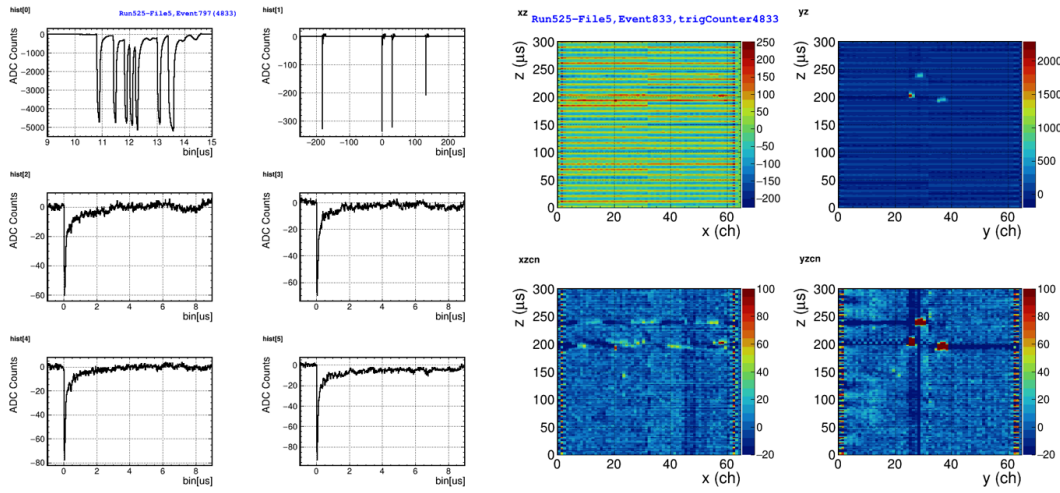


図 C.9: 1.0 GeV/c K^- 中間子イベント

D LAr 純度に関する考察

LArTPC 検出器の運用においては高純度の LAr が不可欠である。実施の運用においてはこれまでも述べてきたように、初期純度の達成と純度の維持という 2 つの項目を達成する必要がある。本章ではこの 2 項目を達成するために必要な要素をこれまでの LAr 運用実績から考察する。なお、実験実施時に求められる純度は電離電子のドリフト距離に依存するため、検出器サイズを拡大した場合には別途検証が必要だと考える。

D.1 初期純度の達成

LArTPC 検出器は LAr を十分量充填したのちに検出器に電圧を印加し信号を確認する。高電圧を印加する際には慎重に昇圧する必要があるため、その操作には約 1 時間程度を要する。したがって初期純度はこの充填完了後からある程度時間が経過したこのタイミングとなる。この時点で検出器をフルでつき抜ける程度の純度を担保するためには、主に以下の 2 点の事柄に注意する必要がある。

- 納品される LAr の純度

早稲田大学では自作液体フィルターを通じて液充填を行うものの、フィルターで取り除ける不純物には当然限界量が存在する。したがって購入した LAr の純度がそもそも悪ければ信号を確認することはできない。なおこのフィルターが実際に ELF タンク内の LAr の純度に対して指数関数的に効くのか、絶対量の除去として作用するのかは確かめられていないが、早稲田大学ではこの自作液フィルターを用いて、巴商会（大森営業所）から購入した LAr を用いることで Subppb 程度の純度達成の実績があり、また第 4 章で述べたように液フィルターを介さない充填を行った結果から数 ppb 程度の純度の LAr が納品されていることを確認済みである。一方で、大阪大学での NanoGRAMS においては早稲田同様の液フィルターを用いた LAr の充填を行っても純度が出ないという問題が生じている。もちろん運用上のミスにより大気が混入し純度が出ない可能性も否めないが、納品された LAr の純度が悪い可能性も捨てきれないため、普段とは異なる営業所から納品される際には、ELF タンクの保管状態や使用歴などに注意を払うべきであり、場合によっては小容積容器を用いた純度測定を事前に行うことが初期純度の担保のために必要となる。

- 大気の混入

LAr の純度が数 mL の大気の混入によって簡単に悪化するのには第 5 章でも述べた通りである。故に充填時には充填経路および検出器容器内部の状態に注意する必要がある。

まず容器内部の状態について、充填直後の純度のみを考える場合には継続的な純度悪化の要因となるアウトガスを気にする必要はないが、現実的には充填直後の信号確認はできず本節章冒頭でも述べたように 1 時間程度の時間が空いてしまう。故に容器内部は液充填前には真空引きしておく必要がある。また、この真空引きの過程はアウトガスの枯渇だけでなく容器配管のリーク有無を確認するという意味でも重要である。仮にリークがある場合その部分から大気が容器内に混入することとなり、純度の急激な悪化を引き起こす。

充填時にはまず容器内に GAr を充填し、1 atm まで容器内を加圧する。この操作を行う際には ELF タンクから GAr を充填するが、この際充填ライン内の大気が容器に混入しないように気を付ける必要がある。そのため早稲田大学では充填配管の容器への接続は液充填開始直前のタイミングにしておき、GAr を流しながら容器の液充填口に接続することにより大気の混入を防いでいる。なお、フィルターのバイパスラインを経由して ELF タンクの液取り出し口まで真空引きをすることも可能ではあるが、液取り出し口配管は十分なシール能力がないため、経験則的に十分であると考えている真空度 (10^{-4} Pa) を実現することができない。

充填完了後の配管の取り回しにも注意が必要である。LAr は極低温物質であるため、充填が完了した直後は容器トップフランジおよび充填配管, GAr の出口となっていた排気ラインも低温となり、霜が付くような状態となる。したがってこの排気ライン配管を低温状態で封じ切ってしまうと、時間経過により配管温度が上昇するにつれ配管内圧力は上昇し、Run24.2 でも生じたように弁からの逆流を引き起こす可能性がある。通常 LAr を使う際は安全の担保のため少なくとも 2 つ以上の排気弁をセットアップに用意している。したがってこれらの弁の逆流が起こる条件の理解も必須である。

これらの大気混入に対する対策によって初期純度の担保および突発的な純度の悪化を防ぐことができると考えられる。

D.2 高純度の維持

初期純度として得られた高純度を維持することも実験の継続には不可欠である。時間経過による継続的な純度悪化の要因となるのは検出器容器内部からのアウトガスである。アウトガスの要因は検出器部材（容器以外）と容器内壁の 2 つに大別される。これらは容器内槽の真空引きおよびベキングによって低減される。

- 検出器部材からのアウトガスの染み出し

容器以外からのアウトガスの要因としては、LArTPC 検出器部材および種々のケーブル、接着剤等がある。LArTPC 検出器はフレームやサポート、信号読み出し用フラットケーブル、高電圧用 Feedthrough の放電対策には樹脂製の素材を用いている。

- 検出器容器内壁からのアウトガスの染み出し

これらのアウトガスは経験則的に、LAr 中での使用実績のある適切な部材の選定、2 週間以上の容器内槽真空引き（到達真空度： $O(10^{-4})$ Pa, 最終的なアウトガスレート： $O(10^{-1})$ Pa/hour 以下）によって抑制されることが確認されている。筆者が関わってきた LAr 充填において最も長く真空引きを行っていた期間は PreRun2 終了後から Phase-2 開始までの約 1 か月であり、この時の到達真空度は 1×10^{-4} Pa, 最終的なアウトガスレートは 4×10^{-2} Pa/hour であった。実際に Phase-2 では 2/18 22 時ごろの充填完了以降、実験中は常に Subppb 程度の純度が保たれており、Beam Time 終了後の 2/22 0 時頃に実施した 50 V/cm（ドリフト速度：0.3 mm/usec）での Run においても以下の図 D.1 に示すような突き抜け事象を確認することができた。

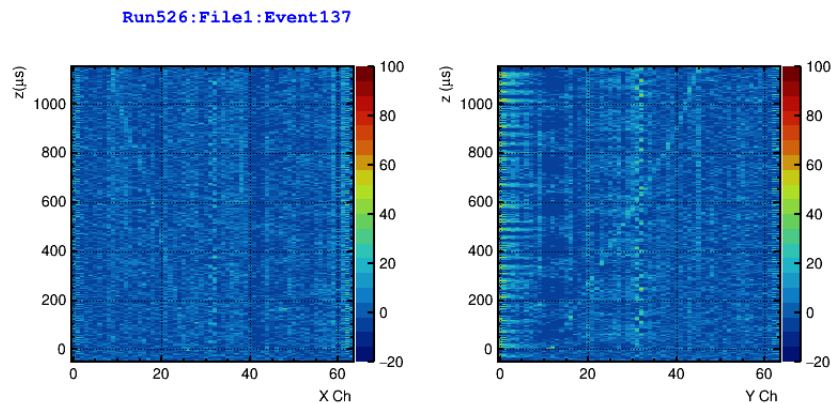


図 D.1: T98 実験終了後の 50 V/cm における宇宙線の突き抜け事象

したがって電子の Life time が少なくとも 1000 μsec 程度であると考えられるため, 0.3 ppb 以下の純度を数日間維持できたことがわかる。

D.3 まとめ

以上まとめると, これまでの GRAMS 実験日本グループの実績から, 高純度の達成および維持には, ”質の良い ppb レベルの LAr を購入し, 充填経路を大気ではなく GAr で満たした状態で, 事前に 2 週間以上真空引きされた容器に接続し, 液フィルターを通じて充填を実施し, 充填完了後は低温となっている排気弁の大気側配管を封じ切らない” という操作をおこなえば, 30 cm 角の LArTPC 検出器に対しては十分であると考えられる。

	GEC 設置科目「学術・研究公正概論（生命・理工系）」
	GEC 設置科目「研究倫理概論」
✓	専攻設置科目 科目名（サイエンスコミュニケーションと研究倫理）
	その他（） ※受講前に指導教員を通じて専攻主任の承認を受けること。 ※受講証明を添付すること。

研究活動の不正行為（捏造、改ざん、盗用、剽窃）について

修士論文を作成するに当たっては、以下の点に十分留意してください。

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

※捏造：事実でないことを事実のように仕立て上げること。でっちあげること。

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

- ◆学問の体系に新たな知見を加えるとき、その信頼性は命です。学術研究でも、そのための対応が求められます。そこでは上記に加え、資料・データ等の適切な利用と管理、情報取得に当たってのインフォームドコンセントの適用、取得した個人情報の保護等に配慮しなければなりません。

他人の著作物（書籍や論文などに加え、講演での発言やインターネットに掲載された文章・図表・データ等も含む）を活用する場合には、「盗用・剽窃」に十分配慮してください。

盗用・剽窃は、著作権法で禁止された行為です。社会人はもちろん、学生であっても当然守らなくてはならないルールです。

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

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

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

- ・論文・総説：著者、題名、掲載誌名、巻号、ページ、発表年（月）等
- ・国際会議・シンポジウム・口頭発表：著者、題目、シンポジウム等の名称、場所、年月、巻号、ページ、出版元、出版年等
- ・著書：題目、著者、ページ、出版元、出版年等
- ・インターネットのからの引用では、以下の通りとします。
著者、タイトル、URL、検索日

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