

修士論文

J-PARC T98 実験の
DAQ システムの設計・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

5323A008 石川皓貴

2025 年 2 月 28 日

概要

GRAMS 実験は、液体アルゴン TPC (LArTPC) を利用した気球・衛星実験であり、宇宙線反粒子検出による暗黒物質間接探索を目的の一つとしている。核子当りの運動量が $1\text{GeV}/n$ 以下では、暗黒物質滅由来のフラックスが二次生成に対して 2 桁以上高いと考えられているため、この領域の探索を目指している。GRAMS 検出器は LArTPC を 2 層の ToF プラスチックシンチレータで覆う構成であり、ToF・飛跡長・ dE/dX から粒子種を特定する。また、LAr 内の原子核捕獲・崩壊事象を検出することで反粒子を特定する。LAr と反粒子の反応を実証するために、J-PARC ハドロンホール K1.8BR にて T98 実験を進めている。K1.8BR は反重陽子ビームが未確立なため、2023 年 6 月に反重陽子生成量評価試験として Phase-1 を実施したが、LArTPC 試験に十分な反重陽子は供給されないという結果であった。そのため、Phase-2 では、既に確立されている反陽子ビームを用いた LArTPC への照射試験を行う予定であり、 10^5 以上の反陽子事象の取得を目標としている。LArTPC の構造や電子読み出し基板から、正常なデータ取得が可能なレートが制限される。本研究では、この制限内で統計目標を達成するための DAQ システムの設計・確立・実証を行った。目標であった 100Hz でイベント同期が可能な LArTPC DAQ システムを作成し、宇宙線ミュオン実験で正常に動作することを確認した。この DAQ システムを K1.8BR に組み込み、2025 年 2 月末に予定されている Phase-2 へ臨む。

目次

1	暗黒物質	8
1.1	暗黒物質の存在予測	8
1.2	暗黒物質探索	9
1.3	暗黒物質間接探索	10
1.3.1	一次起源反重陽子	11
1.3.2	二次起源反重陽子	11
1.3.3	宇宙線反粒子探索実験	12
2	GRAMS 実験	16
2.1	物理目標	16
2.2	GRAMS 検出器	16
2.2.1	Ar の性質	16
2.2.2	LArTPC	18
2.2.3	GRAMS 検出器	19
2.3	本研究の目的	20
3	J-PARC 加速器実験施設	21
3.1	J-PARC 概要	21
3.1.1	ハドロン実験施設	21
3.1.2	K1.8BR ビームライン	22
4	T98 Phase-1	26
4.1	T98 実験の目的	26
4.2	K1.8BR における反重陽子 like な事象の観測	26
4.3	T98 実験概要	27
4.4	実験セットアップ	27
4.5	結果	28
4.6	解析	30
4.6.1	電荷・時間情報の較正	30
4.6.2	T98 Range の応答	31
4.6.3	反陽子レート測定	33
4.6.4	反重陽子レート測定	33
4.7	Phase-1 の結果から要請される Phase-2 の条件	40
5	Phase-2 に向けた LArTPC 動作試験	42
5.1	試験概要	42
5.2	実験セットアップ	42
5.2.1	LAr テストスタンド	42
5.2.2	LArTPC	43
5.2.3	光検出器	44

5.2.4	200 L 容器内配置	45
5.3	DAQ 概要	46
5.3.1	電荷信号	47
5.3.2	光信号	51
5.3.3	電子信号と光信号の同期	51
5.3.4	データフロー	52
5.4	結果	53
5.4.1	観測信号	53
5.4.2	ノイズの大きさ	58
5.4.3	DAQ レート	61
6	K1.8BR との統合	63
6.1	実験セットアップ	63
6.2	DAQ の構成	63
7	考察	64
8	まとめと今後の展望	65
付録 A	ハドロンホールにおける反重陽子観測	66
付録 B	E73 実験概要	67
付録 C	T98 Phase-2	68
C.1	DAQ	68
C.2	結果	68
謝辞	72

図目次

1.1	宇宙の構成要素	8
1.2	NGC6503 銀河の回転曲線の観測結果	9
1.3	暗黒物質探索手法	10
1.4	暗黒物質対消滅による反重陽子フラックス	11
1.5	二次起源反重陽子のスペクトラム [6]	12
1.6	AMS 検出器 [11]	13
1.7	AMS-02 実験で測定された反陽子エネルギースペクトル [10]	13
1.8	BESS 検出器構成図 [12]	14
1.9	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 [13]	14
1.10	GAPS 検出器構成図 [14]	15
1.11	GAPS 予測感度図 [14]	15
2.1	宇宙線フラックスと GRAMS 実験物理目標	16
2.2	LArTPC の概略図	18
2.3	LAr 純度と電子寿命の関係 (左) 電場と電子ドリフト速度の関係 (右)[9]	18
2.4	GRAMS 検出器の全体図 (左), 断面図 (右)	19
2.5	重陽子・反重陽子の停止点からの距離とエネルギー損失の関係 [22]	19
3.1	J-PARC 概要	21
3.2	ハドロン実験施設	22
3.3	K1.8BR ビームライン	23
3.4	静電分離機 ESS と電磁石 CM による粒子選択の図	23
3.5	1 GeV/c 反陽子ビームの CM Scan 結果	23
4.1	K1.8BR における反重陽子レート測定結果 [19]	26
4.2	Phase-1 時の K1.8BR ビームライン	28
4.3	Phase-1 の検出器群	28
4.4	反重陽子レート測定の時間と取得イベント数の関係	30
4.5	Run762 における T1 のエネルギー分布	31
4.6	Run762 における ToF BHT-T1 の分布	31
4.7	T98 Range における層ごとのエネルギー分布 (左:補正前, 右:補正後)	32
4.8	BPC 通過位置分布	32
4.9	左:各検出器ごとのヒット数, 右:E73 ターゲット容器	32
4.10	反陽子レートとスリットの関係	33
4.11	重陽子・反重陽子 Run における BHT ヒット数	34
4.12	重陽子・反重陽子 Run の 1 イベントに対するクラスタリングの様子	34
4.13	重陽子・反重陽子 Run のクラスタリング前後の ToF 分布	35
4.14	Run832 における T0 のイベントスリップの様子	36
4.15	事前選択後の BHT-T1 の ToF 分布	37
4.16	事前選択後の T0・T1 のエネルギー分布	37
4.17	事前選択後の DEF の TOF とエネルギーの関係	37
4.18	事前選択後の T1 応答時間差と BPC 通過位置の関係	38
4.19	事前選択後の BHT-T1 の ToF と BHT TOT の分布	38

4.20	カット後の BHT-T1 の ToF と BHT TOT の分布	39
4.21	Phase-2 スケジュール案	40
4.22	Geant4 シミュレーションによる LArTPC700 MeV/c 陽子捕獲地点分布 [23]	41
5.1	2024 年度の LAr 試験のスケジュール	42
5.2	早稲田大学における LAr テストスタンドの写真と概略図	43
5.3	K1.8BR における LAr テストスタンドの写真と概略図	43
5.4	Anode 基板	44
5.5	PMT および MPPC の写真	45
5.6	200 L 容器内配置図	46
5.7	TIGAr Board	48
5.8	TIGAr Board から PC へ送信されるデータの形式	49
5.9	TIGAr Board1 枚の DAQ レート測定結果	50
5.10	ZLE 機能の概念図	51
5.11	早稲田大学における DAQ 構成図	52
5.12	取得データ処理の流れ	53
5.13	Run24.3 で観測された宇宙線信号	54
5.14	[110,112] us の XZ(左)・YZ 平面(右)における電荷信号分布	54
5.15	[110,112]us の基板ごとの電荷信号分布	55
5.16	XZ 平面 ch20 の電荷信号	55
5.17	Run24.3 の開始時と終了時の電荷信号の比較	56
5.18	PreRun2 で観測された LArTPC 信号	56
5.19	50Hz ノイズ除去前後の波形	57
5.20	50Hz ノイズ除去前後の波形	57
5.21	PreRun2 の最初と最後の電荷信号の比較	57
5.22	Run24.3 における ch 毎の RMS 分布	58
5.23	TIGAr Board 単体の RMS 分布	59
5.24	TIGAr Board の静電容量と ENC の関係	59
5.25	K1.8BR における ch64 の RMS 分布(左), ch64 の RMS ごとのイベント時間差分布(右)	60
5.26	PreRun2 で観測された LArTPC の ch 毎の RMS 分布	60
5.27	グラウンド強化後の LArTPC の ch 毎の RMS 分布	61
5.28	XZ 平面 ch20 の電荷信号	61
6.1	Phase2 検出器構成案	63
付録 A.1	K1.8 における 2021 年 1 月の反重陽子レート測定結果 [19]	66
付録 A.2	K1.8 における 2021 年 1 月の反重陽子レート測定結果 [25]	66
付録 B.1	E73 セットアップ図 [27]	67
付録 C.10	7 GeV/c 反陽子イベント	69
付録 C.21	0 GeV/c 反陽子イベント	70
付録 C.30	7 GeV/c 陽子イベント	70
付録 C.41	0 GeV/c 重陽子イベント	71
付録 C.51	0 GeV/c K^- 中間子イベント	71

表目次

2.1	Ar の特性 [26]	17
4.1	150 MeV/n の反重陽子に対する背景事象数	26
4.2	Phase-1 における電磁石および静電分離機の設定	29
4.3	Phase-1 にて取得した較正用データ	29
4.4	Phase-1 のレート測定	30
4.5	反陽子レート測定時のスリットの状態	33
4.6	イベントスリップ	36
4.7	事前選択条件とそれを満たすイベント数の関係	36
4.8	粒子選択条件とそれを満たすイベント数の関係	39
4.9	プロポーザル時点での要求ビームタイム	40
5.1	LTARS2018_k06A 基本仕様一覧	47
5.2	TIGAr Board の性質	47
5.3	TIGAr Board によるデータ取得設定	49
5.4	レジスタのアドレスとその内容	49
5.5	レジスタ 0x1B の詳細	50
5.6	FADC の性能	51
5.7	図 5.28 の Run の条件詳細	62
6.1	DAQ 統合前後の LArTPC データ保存場所	63
	付録 C.1Phase-2 における電磁石および静電分離機の設定	68
	付録 C.2Phase-1 にて取得した較正用データ	69
	付録 C.3Phase-2 のスリットとトリガーレート	69

1 暗黒物質

1.1 暗黒物質の存在予測

planck 衛星による宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の観測結果から推定される宇宙の構成図を以下の図 1.1 に示す。標準模型に属する粒子は 5% 程度であり, 68% が暗黒エネルギー, 残りの 27% が暗黒物質 [2] とされている。暗黒物質の発見は標準理論の拡張に繋がるため, 宇宙の理解を進めるために重要である。

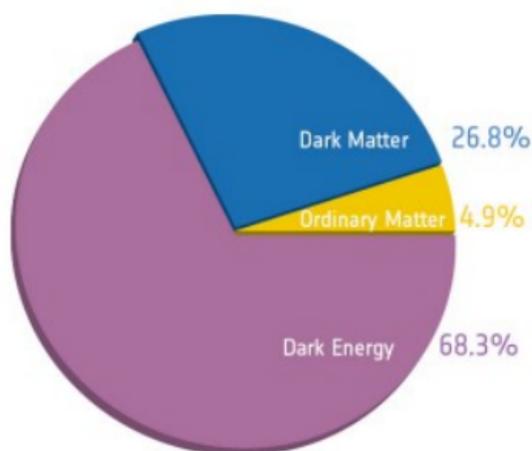


図 1.1 宇宙の構成要素

暗黒物質は, F.Twicky によるかみのけ座の観測によって, 1933 年に示唆された。Virial の定理によって求められる力学的質量の値が, 光学的に観測された質量のおよそ 500 倍という結果から, 暗黒物質の存在が予測された [1]。

暗黒物質の存在は, 渦巻銀河の回転曲線速度からも予測される。万有引力定数を G , 銀河中心からの距離を r , 距離 r の回転速度を $v(r)$, 距離 r 内の銀河の質量を $M(r)$ とすると, 運動方程式は以下の式で表される。

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

$$(1.2)$$

したがって, 速度 $v(r)$ は以下の式にて記述される。

$$v(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}} \quad (1.3)$$

式 1.3 より, 回転速度 $v(r)$ は, 質量 $M(r)$ の値が等しい場合, 距離 r が大きいほど減少すると考えられる。ここで, NGC6503 銀河の回転曲線の観測結果を以下に示す [3]。

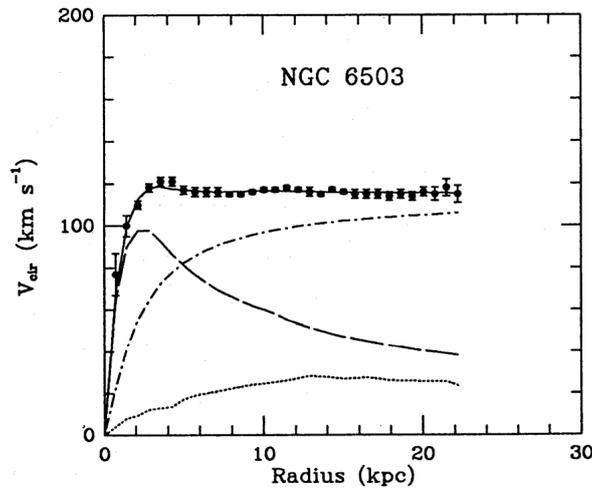


図 1.2 NGC6503 銀河の回転曲線の観測結果

図 1.2 の横軸は銀河中心からの距離、縦軸が回転速度である。黒点が観測結果、実線が観測結果に対する Fit 結果である。また、破線 (Luminous) は銀河円盤、点線 (Gas) はガス成分であり、一点鎖線 (Dark Matter) は観測結果から破線と点線を差し引いたものであり、横軸の値が 4kpc 程度から速度は一定となっている。この結果は、光学的に観測されない暗黒物質の存在を示唆している。

1.2 暗黒物質探索

観測結果から、暗黒物質は以下の性質を持つと考えられている。

- 電磁相互作用を行わない。
- 強い相互作用を行わない。
- 質量を持ち、宇宙全体の 27 % を占める。
- 長寿命である。

これらの性質を持つ粒子は標準模型の粒子では説明できないので、以下の粒子などが候補として考えられている。

- WIMP (Weakly Interactive Massive Particle) WIMP は、電磁相互作用や強い相互作用をほとんど行わず、弱い相互作用と重力相互作用を行う粒子である。宇宙初期の熱的平衡状態から存在する粒子であり、GeV から TeV のオーダーな質量を持つと考えられている。超対称性理論 (Supersymmetry theory: SUSY) にて予測されるニュートラリーノは電荷を持たない中性のフェルミオンであり、WIMP の候補の一つとして期待されている。
- アクシオンは、CP 対称性の問題を説明するために予測された、電荷を持たない非常に軽いスカラー粒子である。アクシオンが強磁場中で 2 個の光子へと変換されるブリュワー効果 [4] を検出することで観測を目指す。アクシオン探索を行っている実験として、ADMX 実験や CAST 実験が挙げられる。

暗黒物質探索手法は、直接探索 (Direct search)、間接探索 (Indirect search)、加速器実験探索 (Collider search) の 3 種類に分類される。

- 直接探索

暗黒物質と標準模型の粒子の弾性散乱事象の検出による暗黒物質の観測を目指す方法。他の手法と比較して有効な質量探索範囲が広い反面、反応断面積が小さい。そのため、低バックグラウンドな環境を構築する必要があり、主に地下で行われる。代表的な実験として、XENON 実験や Darkside 実験が挙げられる。

- 間接探索

暗黒物質の対消滅や崩壊により生成した標準模型の粒子を検出することで暗黒物質の観測を目指す方法。大気や地磁気の影響を避けるために、気球や衛星に検出器を搭載して実験が行われる。2次宇宙線が背景事象となる。検出する事象は標準模型の範囲内であるため、理解しやすい。代表的な実験として、AMS 実験や BESS 実験が挙げられる。また、GRAMS 実験は暗黒物質間接探索実験である。

- 加速器実験

加速器を用いて標準模型の荷電粒子同士を衝突させることで、暗黒物質の観測を目指す方法。探索可能な質量範囲は加速器の重心エネルギーによって制限されるが、発見できれば、反応断面積や質量などの性質の精密な測定が可能である。代表的な加速器施設として、LHC や Super-KEKB が挙げられる。

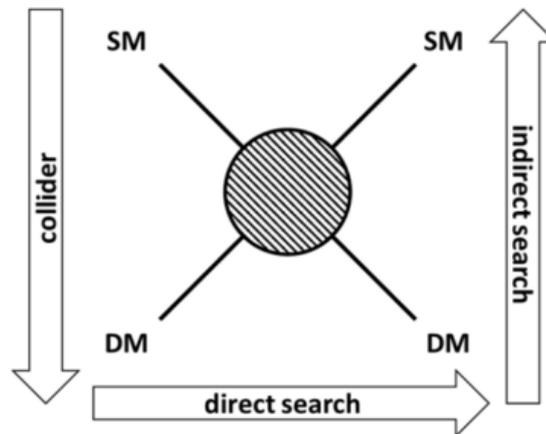


図 1.3 暗黒物質探索手法

1.3 暗黒物質間接探索

暗黒物質間接探索では、陽電子・反陽子・反重陽子などの反粒子が、通常の粒子よりも数が少ないため観測対象とされる。反粒子の生成過程は、暗黒物質の対消滅や崩壊による一次起源と、一次起源の宇宙線と星間物質の相互作用によって生成された二次起源に分けられる。陽電子・反陽子は AMS-02 実験や BESS 実験などによって高精度で測定されており、二次起源が支配的である。それに対して、反重陽子は観測されておらず、BESS 実験によってフラックスに上限値が与えられている。反重陽子は、核子当りの運動量が数 GeV/n 以下の低エネルギー側で一次起源が支配的と考えられている。そのため、この領域で反重陽子が観測されれば、それは暗黒物質起源であると説明される。

1.3.1 一次起源反重陽子

一次起源の反重陽子は、暗黒物質の対消滅や崩壊、超新星爆発、原始ブラックホール ((Primordial Black Hole) により生成すると考えられている。ここで、暗黒物質の対消滅・崩壊による反重陽子の生成数はそれぞれ以下の式 1.4・1.5 で表される。

$$Q_{\bar{d}}(T, \vec{r}) = \frac{1}{2} \frac{\rho_{DM}^2(\vec{r})}{m_{DM}^2} \sum_f \langle \sigma_v \rangle_f \frac{dN_{\bar{d}}^f}{dT} \quad (\text{annihilation}) \quad (1.4)$$

$$Q_{\bar{d}}(T, \vec{r}) = \frac{\rho_{DM}(\vec{r})}{m_{DM}} \sum_f \Gamma_f \frac{dN_{\bar{d}}^f}{dT} \quad (\text{decay}) \quad (1.5)$$

ここで、 m_{DM} は暗黒物質の質量、 $\rho_{DM}(\vec{r})$ は銀河中心からの距離 \vec{r} の暗黒物質密度、 f は対消滅・崩壊のチャンネル、 $dN_{\bar{d}}^f/dT$ は各チャンネル f における対消滅・崩壊によって生成される反重陽子のエネルギースペクトラム、 $\langle \sigma_v \rangle \cdot \Gamma$ はそれぞれ対消滅の断面積・崩壊率を表している。

反重陽子の運動エネルギーあたりの生成数は以下の式で表される。

$$\frac{dN_{\bar{d}}}{dT_{\bar{d}}} = \frac{p_0^3}{6} \frac{m_{\bar{d}}}{m_{\bar{p}} m_{\bar{n}}} \frac{1}{\sqrt{T_{\bar{d}}^2 + 2m_{\bar{d}} T_{\bar{d}}}} \frac{dN_{\bar{p}}}{dT_{\bar{p}}} \frac{dN_{\bar{n}}}{dT_{\bar{n}}} \quad (1.6)$$

ここで、 $m_{\bar{p}} \cdot m_{\bar{n}}$ はそれぞれ反陽子・反中性子の質量である。反重陽子の生成は、反陽子と反中性子の運動量の和が閾値 p_0 より低いときに束縛状態となることで発生する。したがって、反陽子・反中性子の運動エネルギーが小さい、すなわち暗黒物質の質量が小さいほど反重陽子生成量が大きいことが期待される。

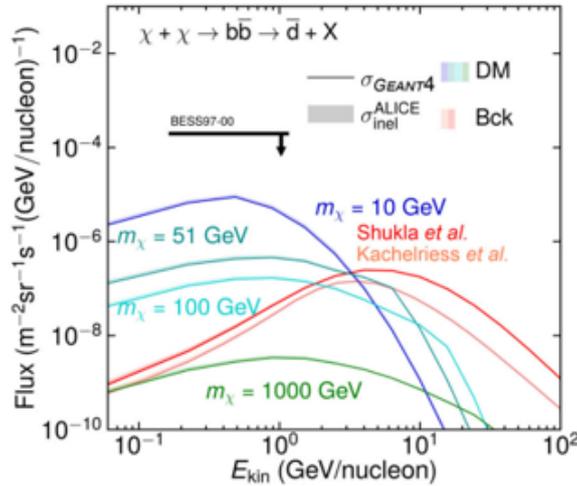


図 1.4 暗黒物質対消滅による反重陽子フラックス

1.3.2 二次起源反重陽子

二次起源の反重陽子は、一次起源の陽子などの宇宙線と星間物質の相互作用によって生じる。銀河中心からの距離 \vec{r} における、核子あたりの運動エネルギー $T_{\bar{d}}$ に対応した反重陽子生成数 $Q_{\bar{d}}^{sec}$ は以下の式で表される。

$$Q_{\bar{d}}^{sec}(\vec{r}, T_{\bar{d}}) = \sum_{i \in (p, He, \bar{p})} \sum_{j \in (p, He)} 4\pi n_j(\vec{r}) \int_{T_{min}^{(i,j)}}^{\infty} dT_i \frac{d\sigma_{i,j}(T_i, T_{\bar{d}})}{dT_{\bar{d}}} \Phi_i(T_i, \vec{r}) \quad (1.7)$$

\vec{r} : 銀河中心からの距離

- i : 宇宙線 (陽子・He・反陽子)
 $\Phi_i(\vec{r}, E_i)$: 各宇宙線 E_i, \vec{r} の Flux
 j : 星間物質 (陽子・He・反陽子)
 $d\sigma_{i,j}(T_i, T_{\bar{d}})$: 運動エネルギー $T_{\bar{d}}$ な反重陽子の微分断面積

以下の図 1.5 は, $pp, pHe, Hep, \bar{p}p, \bar{p}He$ チャンネルおよびそれらの合計による反重陽子生成スペクトラムを表している。どの生成過程も, \bar{d} 生成に必要な運動エネルギーの閾値付近で抑制されている。

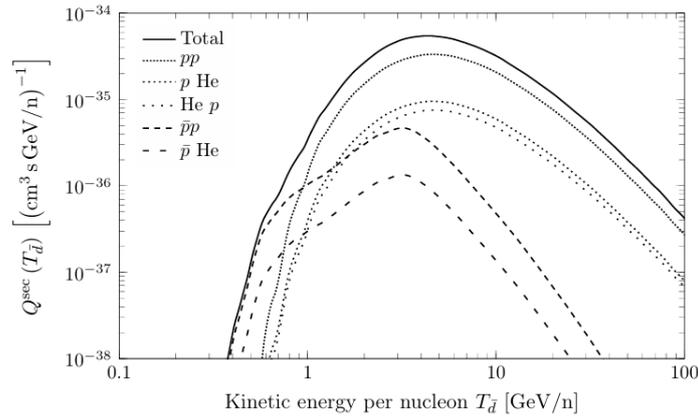


図 1.5 二次起源反重陽子のスペクトラム [6]

1.3.3 宇宙線反粒子探索実験

宇宙線反粒子実験の例を以下に挙げる。粒子反粒子の識別について, AMS-02 実験・BESS 実験は飛跡の曲率を用いるが, GAPS 実験は捕獲事象を用いる。

- AMS-02 実験 AMS-02 実験 (Alpha Magnetic Spectrometer-02) は, 国際宇宙ステーション ISS に搭載した検出器を利用して 2011 年から宇宙線測定を行っている実験であり, 現在もデータ取得を続けている。検出器の構成図を以下の図 1.6 に示す。荷電粒子の電荷量・質量・速度・エネルギー損失・飛跡やチェレンコフ光を測定することによって, 入射粒子の特定を行う検出器である。AMS-02 実験で測定された反陽子フラックスを図 1.7 に示す。赤点が観測結果であり, 青線が観測結果から予測される 2 次生成起因の反陽子フラックス, 橙線が質量 47 GeV/c と仮定した際の暗黒物質起因と予測されるフラックスである。エネルギー 10 GeV 程度の領域で超過があるように見られるが, 背景事象が支配的であるため, 暗黒物質起因であると示すには大統計を貯める必要がある。

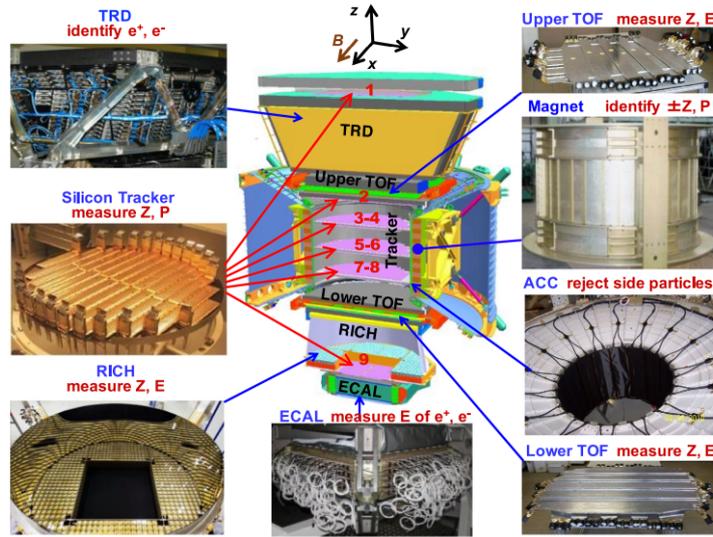


図 1.6 AMS 検出器 [11]

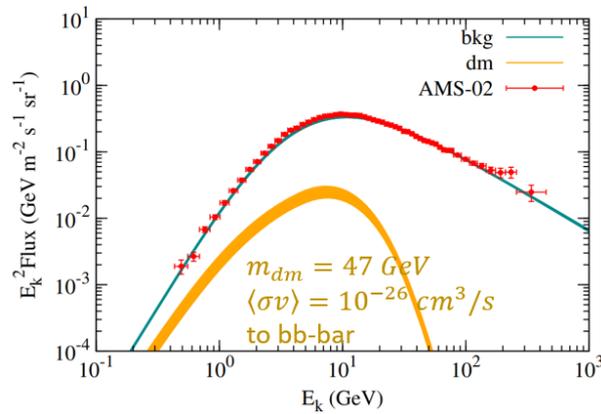


図 1.7 AMS-02 実験で測定された反陽子エネルギースペクトル [10]

- BESS 実験 BESS 実験 (Balloon-borne Experiment with Superconducting Spectrometer) 実験は、2004 年と 2007 年に南極上空での飛行を成功させている、宇宙線測定を行う気球実験である。特に、2007-08 年の BESS-PollarII 実験では 30 日間の飛行を実現している。検出器構成図を以下の図 1.8 に示す。ソレノイドコイルに囲われた飛跡検出器の上下に TOF が設置された構造をしている。速度・エネルギー損失・飛跡やチェレンコフ光を測定することによって粒子の特定を行う。

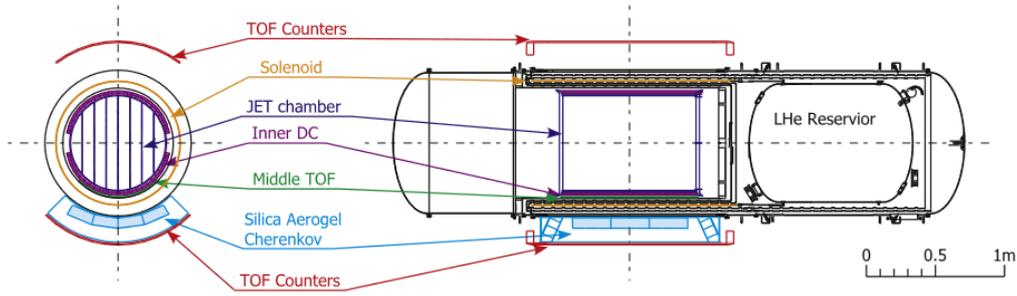


図 1.8 BESS 検出器構成図 [12]

以下の図 1.9 に BESS 実験で測定された反陽子フラックスを示す。特に赤線は BESS-Polar II 実験より求めた反重陽子フラックスの上限値を表しており、 $[0.163, 1.100]$ GeV/n の領域で $6.7 \times 10^{-5} (\text{m}^2 \text{sr s GeV/n})^{-1}$ である。

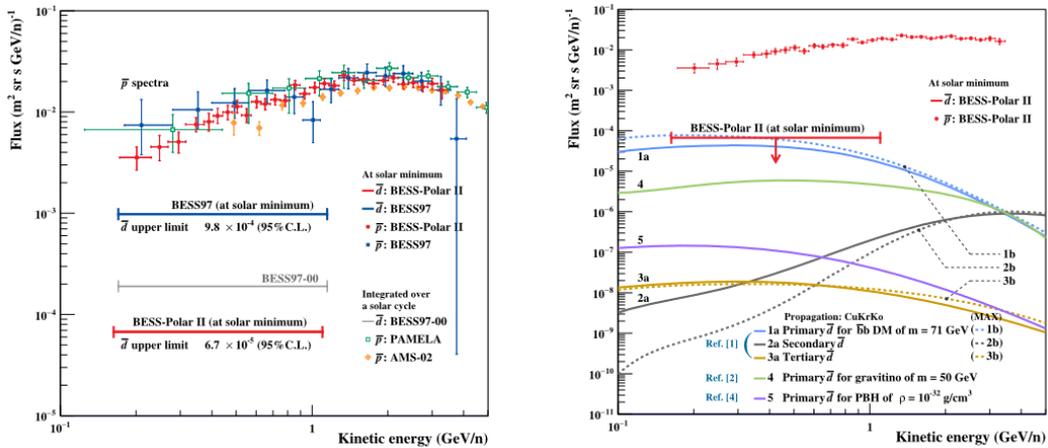


図 1.9 BESS-Polar II で測定された反陽子 Flux および反重陽子 Flux の上限値 [13]

- GAPS 実験 GAPS 実験 (General Antiparticle Spectrometer) は、南極集会輝度の飛行による低エネルギー領域の宇宙線観測を目的とする気球実験であり、GRAMS 実験の先行研究である。検出器構成図を以下の図 1.10 に示す。TOF が Si(Li) 半導体検出器を囲む形状である。速度・エネルギー損失・飛跡を計測して粒子質量を特定する。負電荷の粒子は、Si 原子核による捕獲・崩壊事象によって生じる荷電粒子や X 線を検出することによって特定する。この検出手法は反陽子ビームによって実証されている [16]。気球運用に関しても 2012 年 6 月にプロトタイプ検出器での実績があり [17]、本年度 1 月には南極飛行が試みられた。GAPS 実験の予測感度を以下の図 1.11 に示す。

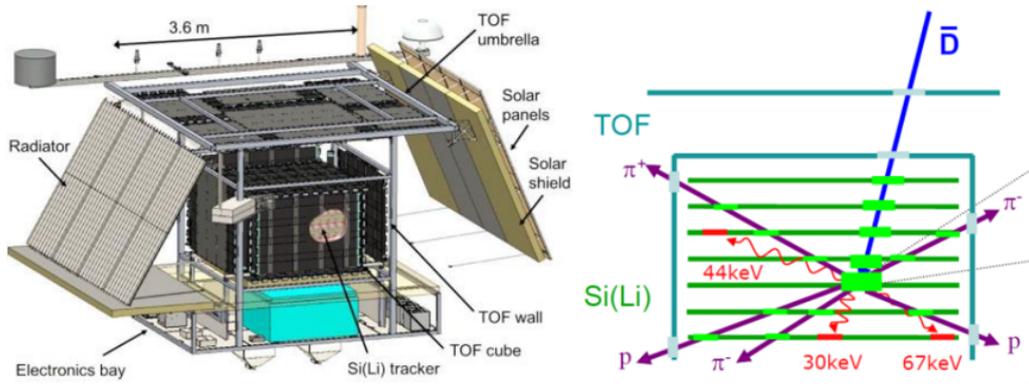


図 1.10 GAPS 検出器構成図 [14]

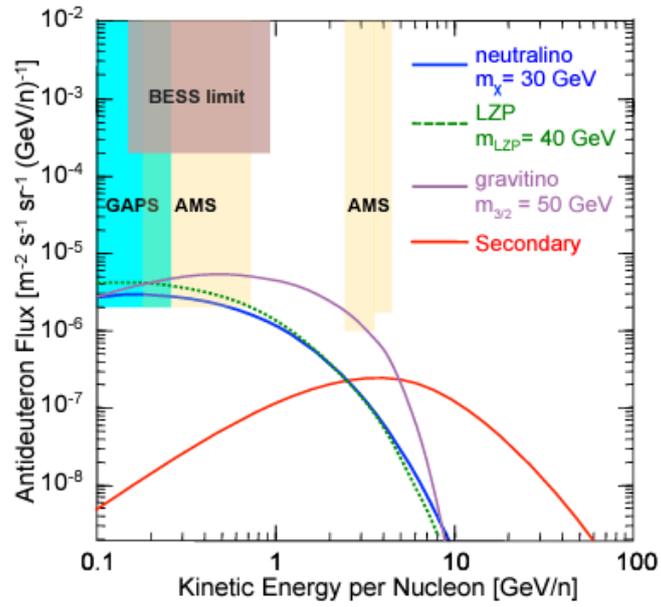


図 1.11 GAPS 予測感度図 [14]

2 GRAMS 実験

GRAMS 実験 (Gamma-Ray And AntiMatter Survey) は、気球搭載型の LArTPC を用いた、暗黒物質間接探索および MeV ガンマ線の観測を目的とした実験である。南極上空高度 30 km で 30 日間のフライトを計画しており、将来的には衛星実験を目指している。日米共同で行われており、22 の研究機関、73 名のコラボレーター（2024 年 9 月時点）が参加している。早稲田大学が注力しているのは粒子間接探索である。

2.1 物理目標

先述したように、気球・衛星によって、陽子や反陽子のフラックスは測定されている。図 2.1 は宇宙線フラックスと GRAMS 実験の物理目標を表しており、横軸が核子 1 個当たりの運動量、縦軸が宇宙線フラックスである。黒色が反陽子で青色が陽子である。丸印が BESS 実験、三角印が AMS-02 実験の結果である。また、黒横線は BESS 実験によって与えられた反重陽子フラックスの上限である。緑線は、質量 30 GeV な暗黒物質の対消滅で $b\bar{b}$ チャンネルを仮定したときの、一次起源の反重陽子フラックスを表している。赤線は、二次起源の反重陽子フラックスを表している。ここで $[0.1, 1]$ GeV/n の領域に注目すると、一次起源の緑線が二次起源の赤線よりも 2 桁以上高い。したがって、この領域ではバックグラウンドフリーな探索が可能である。GRAMS 実験はこの領域をターゲットとしている。

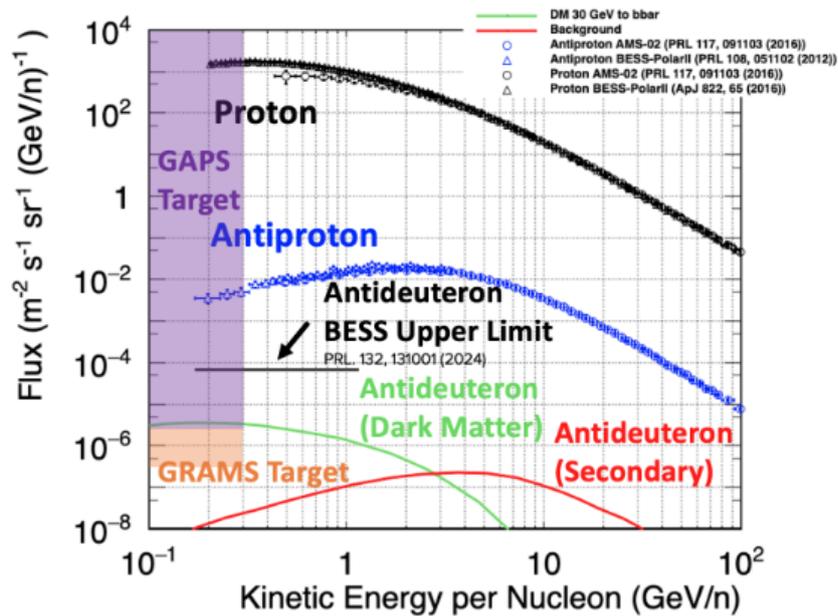


図 2.1 宇宙線フラックスと GRAMS 実験物理目標

2.2 GRAMS 検出器

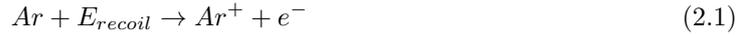
2.2.1 Ar の性質

液体 Ar の性質を以下の表 2.1 に示す。

表 2.1 Ar の特性 [26]

項目	値
原子番号	18
質量数	39.95
融点 [K]	84.0
沸点 [K]	87.4
密度 (気体) [g/cm^3]	5.77
密度 (液体) [g/cm^3]	1395.4
電離 W 値 (液体) [eV]	23.0
蛍光 W 値 (液体) [eV]	19.5
発光波長 [nm]	128
放射長 [cm]	14

LAr にガンマ線や核子が衝突すると、電離・励起・発熱が生じる。LAr の電離は以下の式 2.1 で表される。



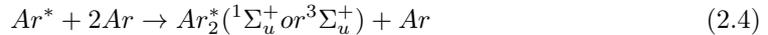
電離電子が再結合しない確率 R は次の式 2.2 で表される [8]。ここで、 Q_0 は電離電子総数、 Q は電離して再結合しなかった電子数、 E は電離電子ドリフト電場、 dE/dx はエネルギー損失、 ρ は LAr 密度、 $A \cdot k$ はフィットパラメーター ($A = 0.800 \pm 0.003 \cdot k = 0.0486 \pm 0.0006$ [$kV \times g/cm^3/MeV$]) である。

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

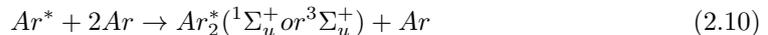
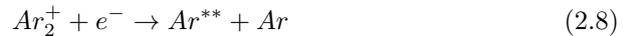
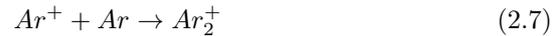
また、電離電子は水や酸素などの不純物にも吸収されて減少する。

励起および電離電子再結合による蛍光は以下のように表される。

- 励起による蛍光



- 電離電子再結合による蛍光



蛍光波長は 128nm である。時定数は二量体のスピン状態で異なり、 $^1\Sigma_u^+$ は 6 ns、 $^3\Sigma_u^+$ は 1.5 μs である。Ar の利点は、最外殻が閉殻のため電離電子を吸収しにくいことと、大気中に大量に存在するため安価なことが挙げられる。

2.2.2 LArTPC

LArTPC(Liquid Argon Time Projection Chamber) は、荷電粒子と LAr の相互作用で発生する電離電子とシンチレーション光を検出することで、エネルギー損失の測定や飛跡再構成を行う検出器である。検出原理の概略図を以下の図 2.2 に示す。前節の通り、LAr に荷電粒子が入射すると電離電子とシンチレーション光が発生する。シンチレーション光は PMT や MPPC で測定される。電離電子は、電場に従ってドリフトし、アノードで読み出されるが、一部はドリフト中に吸収される。電子信号の読み出しには数百 μs 必要だが、光信号の読み出しにかかる時間は数 ns と短く速いため、光信号がトリガーとして使用される。図 2.3 の左側に LAr 純度と電種寿命の関係を、右側に電場とドリフト速度の関係を示す。電荷信号の減衰を抑制するためには、高純度かつ高電場な環境下での運用が要求される。Anode を二次元構造にすることで、ドリフト時間と合わせて三次元飛跡再構成が可能となる。

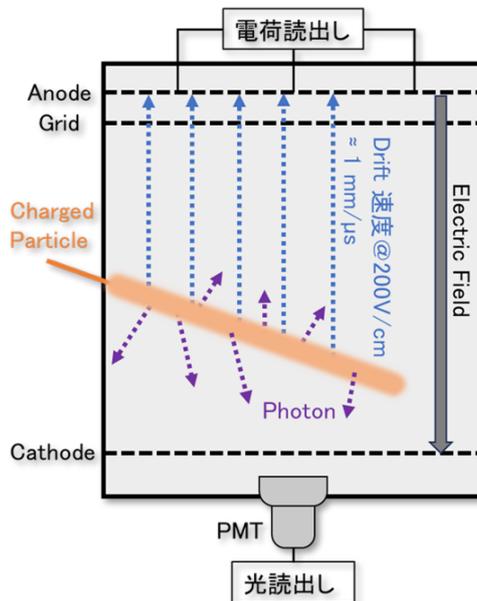


図 2.2 LArTPC の概略図

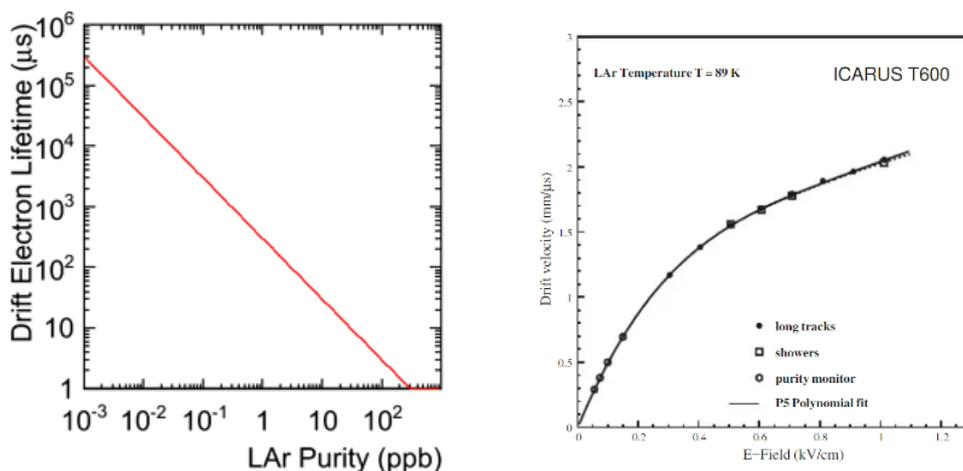


図 2.3 LAr 純度と電子寿命の関係(左) 電場と電子ドリフト速度の関係(右)[9]

2.2.3 GRAMS 検出器

GRAMS 検出器は、図 2.4 に示すように、LArTPC を 2 重の ToF プラスチックシンチレータが囲った構成の予定である。内側の LArTPC の体積は $50\text{ cm} \times 150\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ 、その外周を囲うプラスチックシンチレータは $3\text{ m} \times 3\text{ m} \times 2\text{ m}$ 程度を想定している。GRAMS 検出器に荷電粒子が入射する際、速度は 2 層のプラスチックシンチレータで測定される。また入射時間は、シンチレーション光を PMT や SiPM 等の光検出器で読み出すことで特定される。エネルギー損失は、電場によってドリフトされた電離電子をワイヤーまたは 2D Pad で読み出すことで測定される。電子信号が読み出された位置とその時間を合わせることで、三次元飛跡再構成がなされる。

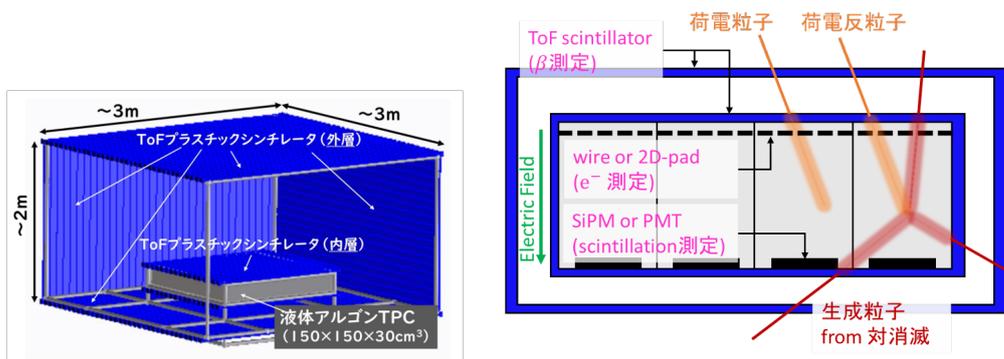


図 2.4 GRAMS 検出器の全体図 (左), 断面図 (右)

入射粒子の質量識別は、速度・エネルギー損失・飛跡長から行う。エネルギー損失はベータプロットの式で表され、質量と電荷量と速度から求まる。したがって、速度・エネルギー損失・飛跡長から質量が決定される。以下の図 2.5 に、Geant4 Simulation による、核子当りの運動量が 150 MeV ($\beta=0.5$) の反陽子・反重陽子を LAr に入射させた際の、停止点からの距離とエネルギー損失の関係を示す。

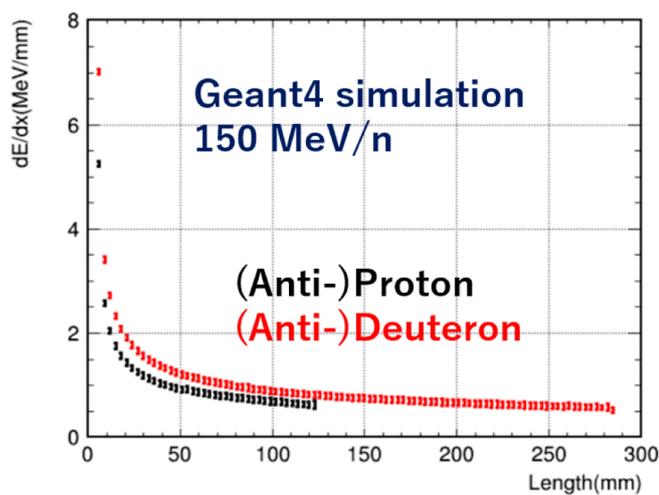


図 2.5 重陽子・反重陽子の停止点からの距離とエネルギー損失の関係 [22]

入射粒子の電荷識別は、原子核捕獲事象の観測によって行う。負電荷粒子が LAr 中で停止した際、Ar 原子の最外殻に捕獲されエキゾチック原子を形成する。エキゾチック原子は特性 X 線を放出しながら脱励起し、最終的に原子核と反応して多数のハドロンを発生させる。この過程で生じる特性 X 線やハドロ

ンを観測することで、入射粒子が負電荷なことを特定する。放出される特性 X 線のエネルギー E_γ は以下の式 2.12 で表され、標的粒子及び入射粒子の電荷と質量に依存する。

$$E_\gamma = (zZ)^2 \frac{M^*}{m_e^*} R_H \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (2.12)$$

式 2.12 について、 z は電子電荷、 Z は原子核電荷、 M^* は捕獲粒子と原子核の換算質量、 m_e^* は軌道電子と原子核の換算質量、 R_H はリュードベリ定数 (13.6 eV)、 n_f 、 n_i は準位数である。

また、捕獲後の崩壊事象にて生じる Pi 粒子の数 $\langle M_{\pi^\pm,0}^p \rangle$ は以下の式 2.13 で示される [15]。

$$\langle M_{\pi^\pm,0}^p \rangle = 2.65 + \ln \sqrt{s} \quad (2.13)$$

ここで \sqrt{s} は重心系エネルギーである。荷電 Pi 粒子の期待値は反陽子・反重陽子それぞれで $3.1 \cdot 5.1$ 個である。

反粒子観測実績のある AMS-02 実験や BESS 実験の検出器との相違点として、電磁石を用いないため有効立体角の制限が無いことが挙げられる。

2.3 本研究の目的

早稲田大学では、2022 年度に 30 cm 角 LArTPC による宇宙線ミュオン試験が行われ、粒子反粒子識別能力が検証された。2023 年度から、捕獲・崩壊事象の観測による LArTPC で観測の粒子識別能力を確かめるため、J-PARC K1.8BR ビームラインで行われる LArTPC への反粒子照射試験 T98 実験が進められている。2023 年 6 月に T98 Phase-1 として K1.8BR の反重陽子供給レート測定が行われ、12 月に LArTPC への反陽子照射試験 Phase-2 が承認された。2024 年度の LAr 試験を通して運用方式を確立し、2025 年 2 月実施予定の Phase-2 に臨む。本研究の目的は、T98 Phase-2 のための DAQ システムの設計・構築及び実証である。3 章では J-PARC について、4 章では T98 Phase-1 について述べる。5 章では T98 Phase-2 に向けた LArTPC 動作試験について、6 章では K1.8BR DAQ システムとの統合について述べる。

3 J-PARC 加速器実験施設

3.1 J-PARC 概要

J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex) は、陽子加速器およびその周辺の施設の総称である。実験施設は、物質・生命実験施設 (MLF)、ニュートリノ実験施設、ハドロン実験施設に分類される。陽子加速器は、線形加速器 LINAC, 3 GeV 陽子シンクロトロン RCS, そして直径 500 m の 50 GeV 陽子シンクロトロン MR から構成される。LINAC にて、水素ガスから発生した負水素イオンを 400 MeV まで加速する。RCS へ入射する際に薄い炭素膜で負水素イオンから電子が分離され陽子ビームとなり、3 GeV まで加速される。その後、大部分は MLF に送られ、残りは MR の加速空洞にて 50 GeV まで加速されて各実験施設へ輸送される。MR からのビームは取り出しは、Fastextracted mode(FX) と Slow extracted mode(SX) の二種類に分けられる。FX は、2.48 秒周期で一気に陽子を取り出すモードであり、ニュートリノ実験施設に送られる。SX は、5.2 秒周期で 2 秒程度かけて陽子を取り出すモードであり、ハドロン実験施設に送られる。



図 3.1 J-PARC 概要

3.1.1 ハドロン実験施設

ハドロン実験施設俯瞰図を以下の図 3.2 に示す。

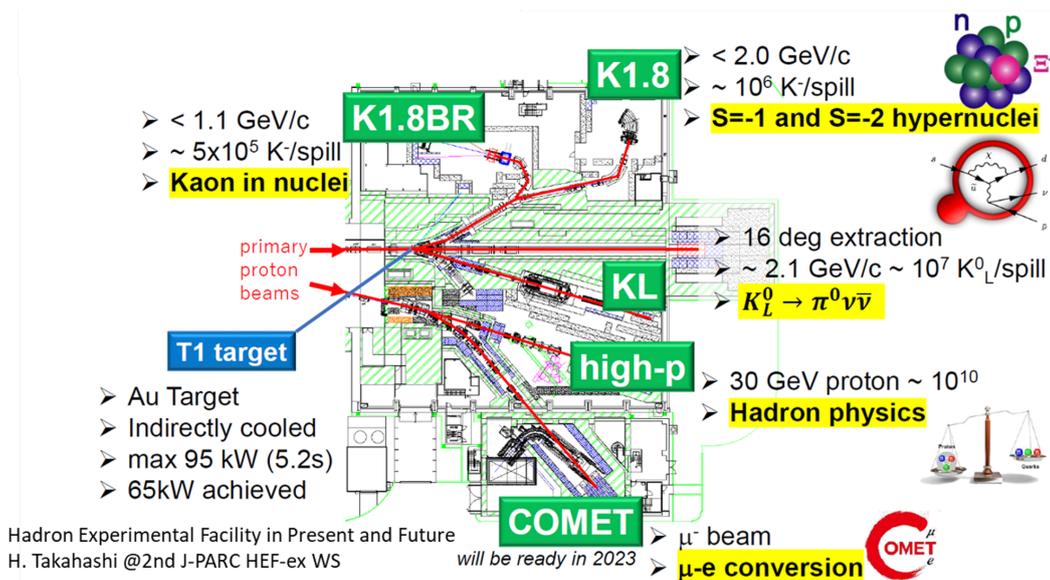


図 3.2 ハドロン実験施設

ハドロン実験施設内のビームラインは A ライン・B ライン・C ラインの 3 種類に分類されている。A ラインは、MR から供給された一次陽子ビームを金標的に衝突させることで生成したハドロンを利用する。基本的に、K1.8・K1.8BR では運動量 $1.8 \cdot 1.0$ GeV/c 実験の K 中間子を用いた実験が行われる。KL では CP 対称性の破れの解明のために長寿命な K_L^0 中間子の崩壊の観測実験 (KOTO 実験) が行われている。B ラインに位置する High-p では一次陽子ビームを用いた実験が行われる。C ラインでは COMET 実験が行われている。

3.1.2 K1.8BR ビームライン

K1.8BR に供給される粒子は、30 GeV 陽子と金標的 T1 の衝突で生成される 2 次粒子である。最高運動量は 1.1 GeV/c であるが、通常は 1.0 GeV/c で運転される。 K^- 中間子については 100000/spill のオーダーで供給される。反陽子についても同等の供給レートであることが実証されているが、反重陽子については未実証であった。金標的 T1 から K1.8BR 最終焦点までのビームライン構成を図 3.3 に示す。軌道制御は電磁石、粒子選別やレート調整は Slit や静電分離機 ESS (Electrostatic Separator) を用いて行われる。図 3.4 に静電分離機 ESS と電磁石 CM (Correction Magnet) による粒子選択の図を示す。電磁石 CM1 に入射した 2 次粒子は、磁場によって運動量ごとに軌道を分けられる。そして、静電分離機 ESS 内の電場によって、速度すなわち質量ごとに軌道を分けられる。その後、電磁石 CM2 の磁場によって軌道は補正され、余計な粒子は MS (Mass Slit) によって吸収される。したがって、静電分離機 ESS と電磁石 CM を調整することで、目的の運動量・質量を持つ粒子を選択的に抽出することが可能である。ここで、静電分離機 ESS へは 100 kV 程度の大きな電圧を印加するため調整に要する時間が長い。従って、主に電磁石 CM の電流値を調整することで粒子選択を行う。電流値の決定は、過去の測定結果をスケールリングして今回の実験条件に最適な値を計算してその値周辺で実測し、最も収量の良かった値とする。2023 年 6 月 20 日に行われた、1 GeV/c 反陽子ビームに対する CM Scan の結果を図 3.5 に示す。使用した過去の値は、1 GeV/c K^- 中間子ビームに対して静電分離機 ESS200 kV・電磁石 CM333 A、1 GeV/c 反陽子ビームに対して静電分離機 ESS200 kV・電磁石 CM409 A である。このとき計算値は 211A であり、CM Scan 結果から実験に使用された値は 207A であった。

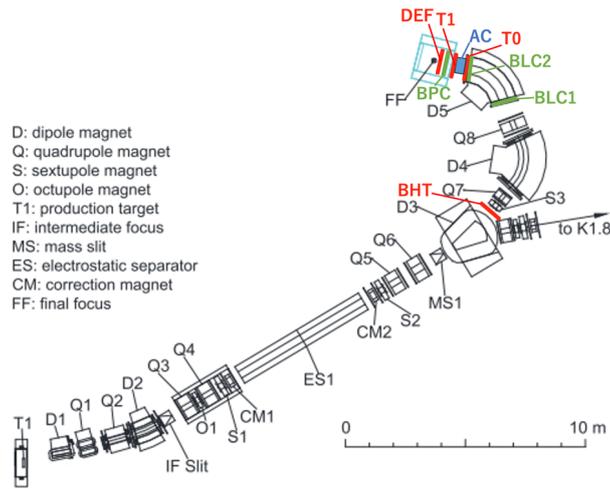


図 3.3 K1.8BR ビームライン

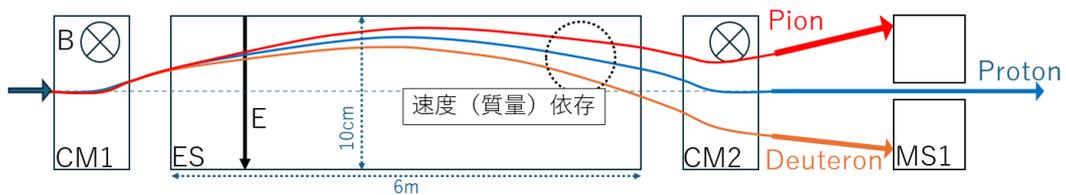


図 3.4 静電分離機 ESS と電磁石 CM による粒子選択の図

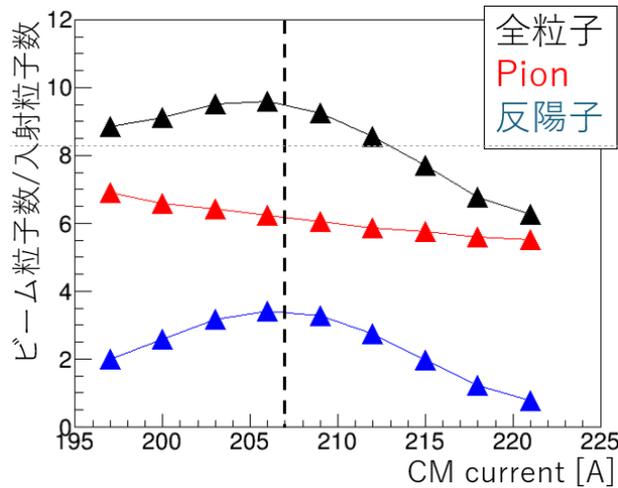


図 3.5 1 GeV/c 反陽子ビームの CM Scan 結果

K1.8BR の検出器について以下にまとめる。

- BHT

BHT は電磁石 D3 と D4 の間に位置するプラスチックシンチレータで、K1.8BR で最上流の検出器である。全部で 63 層 であり、1 層あたりの体積は水平 0.75 cm× 垂直 16 cm× 奥行 0.3 cm で

ある。読み出しは、上下端に設置された mppc によって行われる。データ取得の際、T1 との ToF や他検出器とのコインシデンスをトリガーとすることがある。

- T0

T0 は電磁石 D5 と CDS の間に位置するプラスチックシンチレータで、有効面積は 256 cm^2 ($16 \text{ cm} \times 16 \text{ cm}$, 45 度傾いて設置), 奥行は 1 cm である。全部で 5 層 であり, 1 層あたりの体積は $16 \text{ cm} \times 3.2 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ である。読み出しに使用される PMT は H6612 であり, 各層の両端に設置されている。T1 とのコインシデンスをトリガーとしてデータ取得を行うことがある。

- T1

T1 は T0 下流 10cm ほどに位置するプラスチックシンチレータで, 水平 $18 \text{ cm} \times$ 垂直 $10 \text{ cm} \times$ 奥行 1 cm である。1 層の検出器であり, 左右両端に設置された PMT である H6410 によって読み出しが行われる。データを取得するとき, BHT や T0 とのコインシデンスや BHT との ToF をトリガーとして行われる場合がある。

- DEF

DEF は Definition Counter の略であり, 電磁石 CDS の内部に設置されている。複数層な検出器であり, Phase-1 実施時は 5 層であった。1 層あたりの体積は水平 $2 \text{ cm} \times$ 垂直 $10 \text{ cm} \times$ 奥行 3 mm である。電磁石内部に設置されているため, 読み出しは両端に設置された MPPC で行われる。

- AC

AC は Aerogel Cherenkov の略であり, T0 と T1 の間に設置されている。大きさは水平 $18 \text{ cm} \times$ 垂直 $10 \text{ cm} \times$ 奥行 10 cm である。内部の Aerogel の屈折率は 1.05 である。Pion の通過によって発生するチェレンコフ光を上下に 2 個ずつ設置された 4 個の PMT を用いて検出することで, Pi 粒子と他粒子を識別する。

- BLC

BLC(Beam Line Chamber) はドリフトチャンバーであり, 電磁石 D5 の前後に 2 台ずつ (BLC1a・1b と 2a・2b) 設置されている。1 台につき 8 層構成であり, 1 層につきドリフト長 4 mm (BLC2 は 2.5 mm) のセンスワイヤーが 32 本配線されている。配線について, センスワイヤーとポテンシャルワイヤーの位置は一層間隔で互い違いになっており, 配線方向は 2 層間隔で 90 度傾いている。各層の有効面積は $256 \text{ mm} \times 256 \text{ mm}$ である。測定された位置情報と D5 磁場から, ビーム粒子の運動量を計算できる。

- BPC

BPC (Beam Profile Chamber) はドリフトチャンバーであり, 電磁石 CDS の内部に設置されている。BLC と同様に 8 層構成で, 1 層につきドリフト長 3.6 mm のセンスワイヤーが 15 本配線されている。センスワイヤーとポテンシャルワイヤーの位置は一層間隔で互い違いになっており, 配線方向は 2 層ずつ 90 度傾いている。Φ 168 mm , 高さ 89.7 mm の円筒形で, 有効面積は Φ 111.6 mm である。

- CVC

CVC (Charge Veto Counter) は T0 下流約 15 m 地点に位置する水平 34 層なプラスチックシンチレータで, 1 層あたりの体積は水平 $10 \text{ cm} \times$ 垂直 $150 \text{ cm} \times$ 奥行 3 cm である。上下端に設置された PMT は H6410 によって読み出しが行われる。

トリガーの作成・調整はカウンタールームにて行われる。K1.8BR 検出器の信号を, ファストケーブル経由でカウンタールームまで転送し, NIM LOGIC でトリガーを作成したのちに各検出器へと配分する。トリガーの調整は, カウンタールーム内でオシロスコープを用いて目視で決定される。主なトリガーを以

下にまとめる。

- Beam Trigger : ビームが来たことを定義するトリガー。検出器のコインシデンス (主に BHT, T0, T1, DEF のうち 2 個以上が使用される) で作成され, 取得したいデータに応じて変化させる。
- Pion Trigger : AC に取り付けられた 4 個の PMT 信号の合計値が閾値を超えた際に有効となるトリガー。このトリガーが有効ということはチェレンコフ光が発生したということなので, Pion の識別に使用される。
- Kaon Trigger : Beam Trigger が有効かつ Pion Trigger が無効の際に有効となるトリガーで, Pion 以外の粒子が来たことを定義する。Kaon とは限らないが, K1.8BR は基本的に Kaon Beam を用いるため Kaon Trigger と命名されている。
- ToF Trigger : BHT と T1 の ToF が各粒子の ToF と一致した際に有効となるトリガーで, それぞれの粒子が来たときと定義される。ビーム運動量が $1.0\text{GeV}/c$ の時, Pion・Kaon・(反)陽子・(反)重陽子はそれぞれ約 28・約 30・約 36・約 57 ns である。主に (反)陽子・(反)重陽子の識別に使用される。

上述したトリガーはプレスケールして使用する場合もある。データ取得について, 電荷情報は QDC, 時間情報は TDC で行われる。QDC はカウンタールーム内に設置され, TDC はカウンタールーム内や K1.8BR ビームライン脇に設置されている。QDC として使用されているのは Caen V792 であり, VME モジュールである XVB602 で操作される。TDC について, ドリフトチェンバーの読み出しには時間分解能は粗いが Time Window の広い TKO 32 ch Drift Chamber TDC (DR.T) を, シンチレータや AC の読み出しには Time Window は狭いが時間分解能が細かい TKO 16/64ch 高分解能 TDC(HR-TDC) を使用している。

イベント同期のための情報はビームラインから送られる。Master Trigger Module(MTM) は, ビームラインからトリガーを受け取り, Spill Number・Event Number をそれぞれ 8bit・12bit でデシリアライズして, CAT-5E cable を介して VME システムへ送信する。この MTM からの情報は, Receiver Module(RM) で受信され, QDC 情報と共に VME システムで処理される。これらの情報はサーバーマシンに集約された後に 1 イベントとして構築される。

4 T98 Phase-1

4.1 T98 実験の目的

T98 実験の目的は、GRAMS 検出器の動作原理の検証である。Ar 原子の反粒子捕獲事象を利用した反粒子識別が可能であるかを実証する。

表 4.1 に、GRAMS 実験の観測対象である 150 MeV/n について、陽子、反陽子および反重陽子の数をまとめる。陽子と重陽子は、核子当りの運動量が等しい場合、エネルギー損失の差が小さい。また、反陽子と反重陽子は、LAr との反応が捕獲・非弾性散乱と共通している。表 4.1 より、反重陽子 1 事象に対して、陽子は 10^9 個、反陽子は 10^4 個の背景事象の存在が考えられ、これらを区別できるだけの能力が必要とされる。

表 4.1 150 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

4.2 K1.8BR における反重陽子 like な事象の観測

K1.8BR にて反重陽子 like な事象が観測されたことは、2017 年の LoI で報告されている。2013 年に MR6.6 kW、ビーム運動量 1 GeV/c で数時間データ取得された際の結果を以下に示す。図 4.1 は、BHT の前身である BHT と T0 の ToF 分布を表している。0ns に Pion, 赤く塗りつぶされた部分に K 中間子, 8ns に反陽子のピークが確認された。20ns 付近の構造は、後述する図 4.6 と同様な背景事象の Pion である。29ns 付近にもピークが観測されているが、これが 1 GeV/c 反重陽子と一致しているため、およそ 1event/spill で反重陽子が供給されている可能性が示唆された。従って、K1.8BR で反重陽子供給レート測定 T98 Phase-1 が実施された。詳細は本章末にて後述するが、この 29ns 付近のピークは、K1.8BR ビームライン上で事故的に発生してしまった低速陽子の可能性が高い。

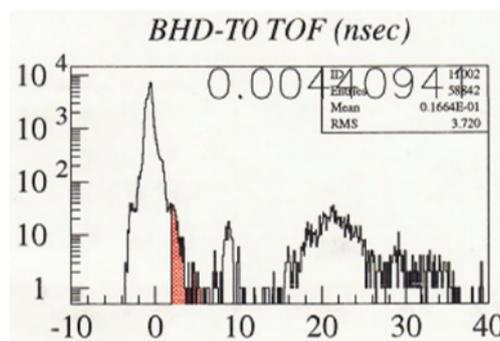


図 4.1 K1.8BR における反重陽子レート測定結果 [19]

4.3 T98 実験概要

T98 実験は以下の Phase-1,2 の 2 段階に分かれている。

- Phase-1

Phase-1 の目的は、1.0 GeV/c 反重陽子供給レートの測定である。前述の通り、K 中間子、反陽子の供給レートは $10^5/\text{spill}$ のオーダーであることが確立されているが、反重陽子は確立されていないため、レート測定を行った。

- Phase-2

Phase-2 の目的は、反粒子捕獲事象の観測を通して、LArTPC の粒子・反粒子識別能力を実証することである。Phase-1 の結果から、反陽子に集中して実験を行う。

T98 Phase-1 は、2023 年 6 月に実施された。2 時間の反重陽子レート測定を行い、合計約 10^7 の反重陽子トリガーなイベントを取得した。解析の結果、K1.8BR における 1.0 GeV/c の反重陽子レートは $0.9 \times 10^{-3}/\text{spill}$ であり、反重陽子実験を行うには不十分と判断された。そのため、Phase-2 は反陽子に焦点を当てる。

4.4 実験セットアップ

前述した検出器群に追加して、Phase-1 で使用した検出器を以下に記す。

- Veto

E73 実験の検出器であり、CDS 下流に設置してある。有効面積は 1600 cm^2 (水平 40 cm × 垂直 40 cm)、奥行は 1 cm であり、体積 40 cm × 20 cm × 1 cm のプラスチックシンチレータを上下に重ねた構成をしている。読み出しに使用される PMT は H6410 であり、水平方向の両端に取り付けられたライトガイドの先に設置してある。

- Calorimeter

E73 実験の検出器である。レール上に設置してあるためビームラインに対して遠隔操作による左右移動が可能であり、Phase-1 レート測定時にはビームライン上から外れた位置に移動されたため未使用である。

- BTC

E73 実験の検出器であり、Calorimeter の下流に設置してある。構造は Veto と同様である。

- T98 Range

反重陽子捕獲事象が観測されることを期待して BTC 下流に設置した、早稲田大学から持ち込んだ検出器である。Belle 実験で使用されていた長さ 2.5 m のプラスチックシンチレータを加工して作成した。水平 40 cm、垂直 6 cm、厚さ 4 cm のプラスチックシンチレータを上下に 2 個重ねたものが 8 層並んだ構成となっている。上下のプラスチックシンチレータの間にはオプティカルグリスが塗ってあり、水平方向の両端には PMT の H6410 が取り付けられている。

実験セットアップを図 4.2 に表す。赤枠がプラスチックシンチレータ、黄枠がドリフトチェンバーである。

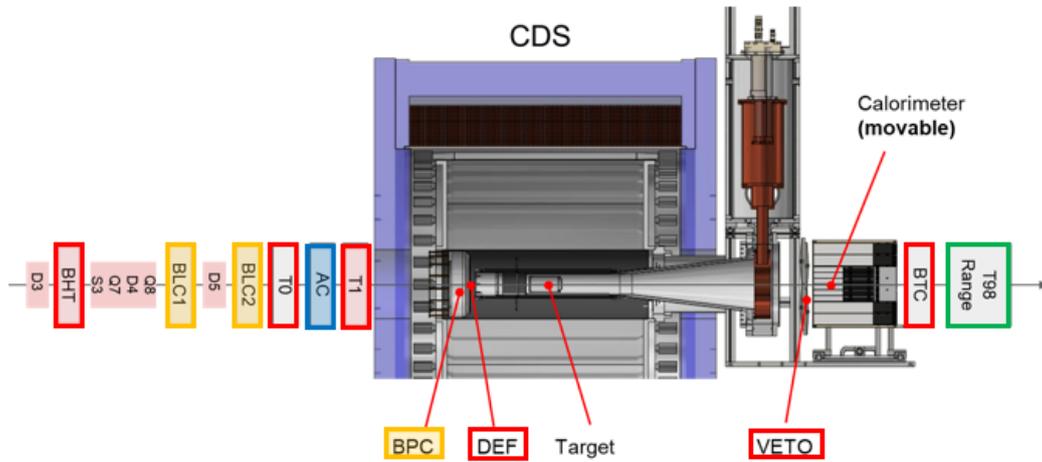


図 4.2 Phase-1 時の K1.8BR ビームライン

各検出器の写真は図 4.3 に示す。

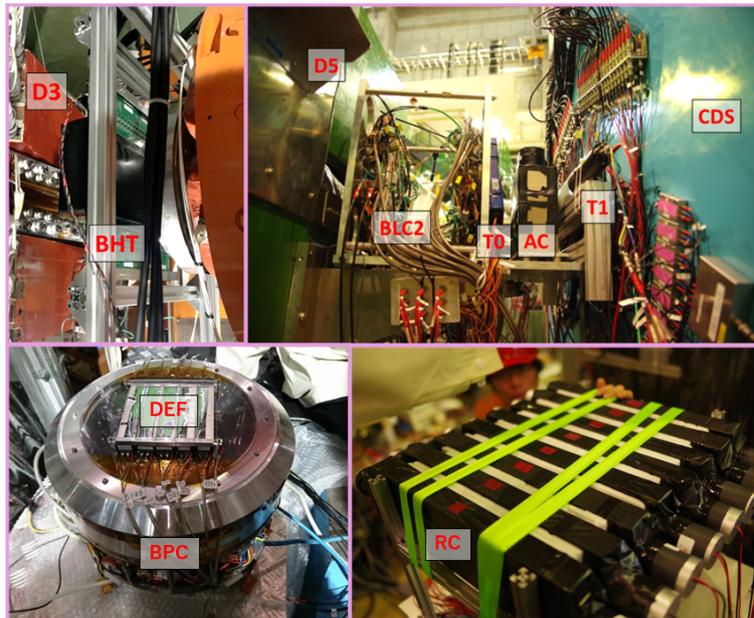


図 4.3 Phase-1 の検出器群

4.5 結果

初めに、Phase-1 のタイムラインを記す。

- 2023 年 6 月 19 日 17:00~20:00
30 kW・1.0 GeV/c のワンショットビームを用いて、検出器の校正や DAQ・トリガーの調整が行われた。
- 2023 年 6 月 20 日 17:00~27:00
50 kW・1.0 GeV/c の不安定な K^- 中間子ビームを用いて、ビームの再現性確認を行った。こ

これは、K1.8BR の運転が 2 年ぶりであったためである。ES 印加電圧を ± 100 kV(印加電場 20 kV/cm) に固定した状態で、電磁石やスリットの調整を行い、BPC 地点でビームが中心に集中するように設定が行われた。

- 2023 年 6 月 21 日 15:50~22:20

50 kW \cdot 1 GeV/c の連続ビームを用いて、正電荷 (K^+ 中間子, 陽子, 重陽子) のデータ取得および反陽子 \cdot 反重陽子のレート測定を行った。反粒子レート測定は 18:00 過ぎから行われ, うち 20 時過ぎから 30 分ほどは反陽子レート測定に費やされた。

各電磁石の設定および静電分離機 ESS 印加電圧を以下の表にまとめる。電磁石の電流値は、過去に使用した値を基準に、供給ビーム位置が中心になるようにドリフトチェンバーで確認しながら決定された。ESS 印加電場について、K 中間子データ取得時は 40 kV/cm だが、この設定では (反) 重陽子は曲がりすぎてしまうため、(反) 重陽子データ取得時は 20 kV/cm とした。また、反重陽子は供給量が少ないため、 K^- 中間子と反陽子で使用した値をスケールした結果を CM Scan せずに使用した。

標的粒子	K1.8D1 (A)	D2 (A)	CM1 (A)	ESS (kV/cm)	CM2 (A)	D3 (A)	D4 (A)	D5 (A)
K^- 中間子	-369	-668	333	40	333	205	-1943	-1621
K^+ 中間子	369	698	322	40	322	-207	1946	1633
陽子	369	698	398	40	398	-207	1946	1633
陽子	369	698	196	20	196	-207	1946	1633
反陽子	-369	-698	207	20	207	205	-1943	-1621
重陽子	369	698	306	20	306	-207	1946	1613
反重陽子	-369	-698	316	20	316	205	-1943	-1606

表 4.2 Phase-1 における電磁石および静電分離機の設定

Phase-1 にて取得されたデータを較正用とレート測定に分けて、以下に表で示す。レート測定時の Beam Trigger は、T0 と T1 のコインシデンスであった。Beam/5000 は、ビームトリガーを 1/5000 倍にプレスケールしたものを意味する。

表 4.3 Phase-1 にて取得した較正用データ

標的粒子	日付	時間	トリガー	取得イベント数	ESS [kV/cm]
K^- 中間子	6/20	18:00~23:00	トリガー調整中	2.5M	40
反陽子	6/21	1:00~3:00	Proton	320k	40
K^+ 中間子	6/21	15:50~16:50	Kaon	240k	40
陽子	6/21	16:50~17:00	Beam	670k	40
陽子	6/21	17:00~17:20	Beam	67k	20
重陽子	6/21	17:20~17:45	Beam	1.1M	20
反陽子	6/21	17:50~18:10	Beam	1.3M	20

表 4.4 Phase-1 のレート測定

標的粒子	日付	時間	トリガー	取得イベント数	ESS [kV/cm]
反陽子	6/21	20:10~20:30	Beam	1.5M	20
反重陽子	6/21	18:10~20:10 20:30~22:20	Beam/5000 or Deuteron	11M	20

反重陽子レート測定、時間変移と Deuteron Trigger を満たしたイベント数の関係を以下の図 4.4 の赤線で示す。黒線は赤線の傾きを表している。結果的に、合計 2 時間の反重陽子レート測定で、 10^7 程の Deuteron Trigger を満たすイベントが取得された。

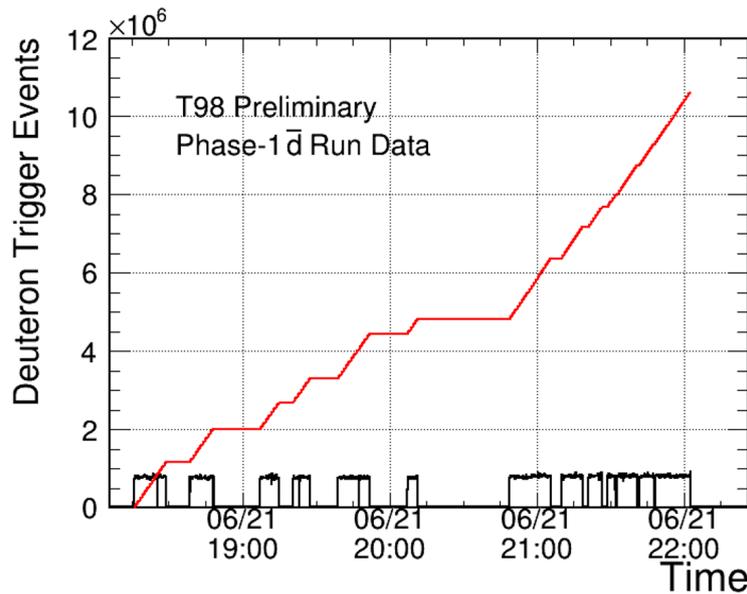


図 4.4 反重陽子レート測定のと時間と取得イベント数の関係

4.6 解析

4.6.1 電荷・時間情報の較正

取得された時間・電荷情報のキャリブレーションについて述べる。値の較正は、6/20 に取得した Run762 (K-ビーム) を基準として行われた。

初めに電荷情報について記す。前述の通り、QDC には Caen V792 が用いられており、Time Window 内の電荷量の積分値が記録される。補正は以下の式 4.1 で表される。 $Q1 \cdot Q2$ はそれぞれ両端の PMT・MPPC の値に対応している。 $G1$ はペDESTAL の値が 0 となるように、 $G2$ は Pion のピークが 2 MeV/cm となるように、各検出器に対して決定され線形に補正した。

$$q = ((Q1 - G1_{Q1}) \times G2_{Q1} + (Q2 - G1_{Q2}) \times G2_{Q2}) \times 0.5 \quad (4.1)$$

Run762 における T1 のエネルギー分布を以下に示す。左図の黒・赤はそれぞれ T1 の上下の QDC の値 $Q1 \cdot Q2$ に対応しており、右図は補正後の値 q の分布である。

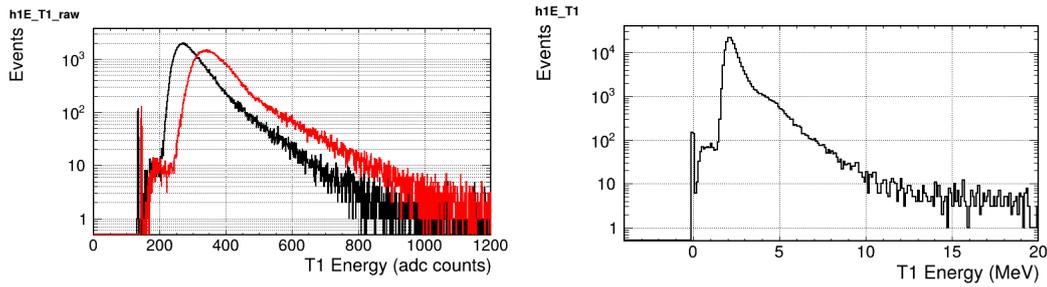


図 4.5 Run762 における T1 のエネルギー分布

次に時間情報について述べる [20]。HR-TDC で得られた値は、以下の式 4.2 によって時間 (ns) へと線形に変換される。DR.T は、Time Window が広いため、さらに T の 2 次項で補正される。 $T1 \cdot T2$ はそれぞれ PMT・MPPC の両端に対応している。

$$t = ((T1 - G1_{t1}) \times G2_{t1} + (T2 - G1_{t2}) \times G2_{t2}) \times 0.5 \quad (4.2)$$

ここで、 $G1$ は Pion のピークが 0 になるような値であり、 $G2$ は時間較正器 ORTEC 462 によって決定される。周期的なノイズが確認されるが、これは 47.5 MHz の RF 構造である。補正後の BHT-T1 の ToF 分布を以下に示す。

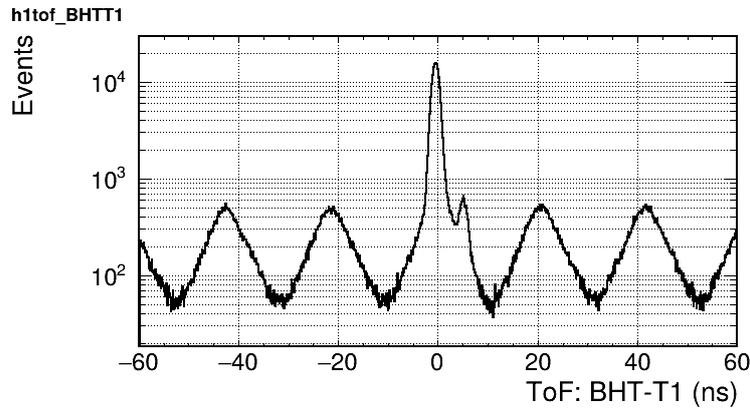


図 4.6 Run762 における ToF BHT-T1 の分布

4.6.2 T98 Range の応答

T98 Range について、重陽子 Run で得られたエネルギー分布を図 4.7 に示す。左側はペDESTAL位置のみ補正した分布 $((Q1 - G1_{Q1} + Q2 - G1_{Q2}) \times 0.5)$ であり、1・2 層目ではピークに二股構造が確認される。これは T98 Range が 2 本のプラスチックシンチレータを重ね合わせた構造のためである。これを補正するため、T98 Range 直前の検出器である BTC を用いて、BTC 上側でヒットのあったイベント・BTC 下側でヒットのあったイベント・どちらにもヒットが無いイベントの 3 組に分類した。そして 3 組に対して、前述した内容と同様に、Pion Trigger を満たしたイベントを用いてピークが 8 MeV となるような補正を独立にかけた。図 4.7 の右側が補正後の分布である。Pion のピークが 8 MeV に存在することに対して、重陽子のピークは 20 MeV 以上の領域である。また、5 層目以降に重陽子のピークが確認されないことから、4 層目で停止事象が観測されたといえる。

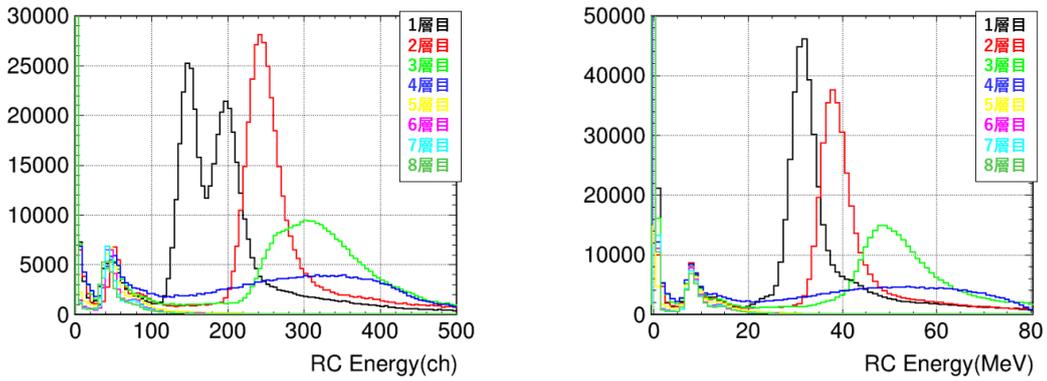


図 4.7 T98 Range における層ごとのエネルギー分布 (左:補正前, 右:補正後)

T98 Range の衝突した粒子に対する識別能力は示されたが、そもそも衝突するイベントが少ないという問題が生じた。図 4.7 では、ペDESTALにピークが確認される。これについて、Phase-1 実施時には CDS 内に図 4.9 右側に示すステンレス製のターゲット容器が存在していたため、一部の重陽子が衝突して停止してしまった可能性がある。重陽子 Run の BPC 通過位置分布を以下の図 4.8 に示す。ここで、最も左は全イベント、左から 2 番目は DEF に ToF 信号があったイベント、3 番目は DEF と BTC に ToF 信号があったイベント、4 番目は DEF と BTC と RC に ToF 信号があったイベントである。また、トリガー及び各検出器に ToF 信号が存在したイベントの分布を図 4.9 に示す。ただし、ToF 信号は [-50,50] ns の領域としている。BTC 以降の検出器で明らかなイベント数の減少が確認される。T98 Range は、エネルギー損失を用いた粒子識別は強力だが重陽子の衝突割合が低い (約 4 割) という結果であったため、後述する反重陽子解析のカットには使用していない。

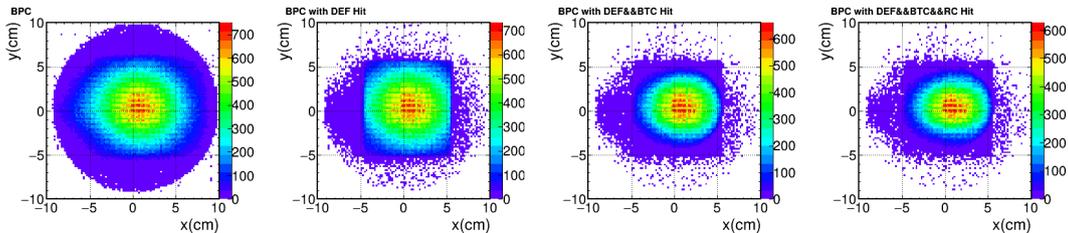


図 4.8 BPC 通過位置分布

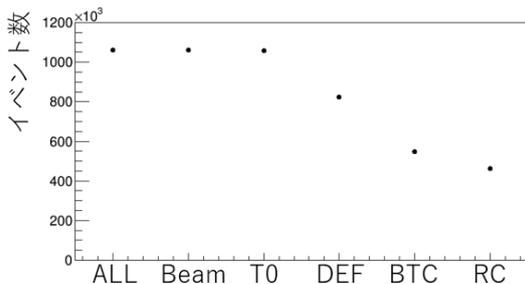


図 4.9 左:各検出器ごとのヒット数, 右:E73 ターゲット容器

4.6.3 反陽子レート測定

反陽子レート測定結果を以下の図 4.10 に示す。左図について、黒点は Beam Trigger, 赤点は Proton ToF Trigger が 1 spill あたりに鳴った回数を表しており、右図は Proton ToF Trigger を信号とした際の S/N 比を表している。図 4.10 の横軸はスリットの状態に対応しており、表 4.5 の通りである。図 4.10 より、スリットを操作することで、ビーム運動量 1.0 GeV/c において、レートが $O(10^3 \text{ Hz})$, S/N 比が約 1 な反陽子ビームを実現できている。ビーム運動量 700 MeV/c では、経験的により低レートかつ良 S/N 比な反陽子ビームが期待される。

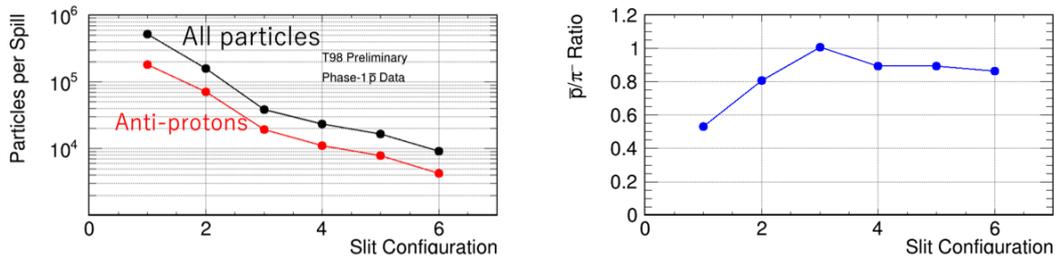


図 4.10 反陽子レートとスリットの関係

表 4.5 反陽子レート測定時のスリットの状態

No.	IF-Y [mm,mm]	IF-X [mm,mm]	MS1 [mm,mm]
1	[1.81, -2.18]	[-109.9, 109.8]	[2.35, -2.36]
2	[0.82, -1.18]	[-109.9, 109.8]	[1.17, -1.18]
3	[0.31, -0.69]	[-109.9, 109.8]	[0.59, -0/60]
4	[0.06, -0.46]	[-109.9, 109.8]	[0.50, -0.53]
5	closing	[-109.9, 109.8]	[0.50, -0.53]
6	[0.06, -0.46]	[-40.0, 40.5]	[0.50, -0.53]

4.6.4 反重陽子レート測定

反重陽子の評価は $\text{TOF} \cdot dE/dX$ を用いて行う。しかし、ビーム粒子には大量の Pion が含まれているため、適切なバックグラウンド除去が必要となる。このバックグラウンド除去として、初めに BHT-T1 間の ToF のクラスタリングを行った。BHT は D4 上流に位置しており、D5 下流にある T1 との ToF を使用することで強い粒子識別能力を得られる。しかし、大量の粒子が通過するためバックグラウンドが多い。以下の図 4.11 に、重量子 Run(Run807) と反重陽子 Run(Run832) における、1 イベントの [-50,50] ns の範囲における BHT ヒット数分布を示す。

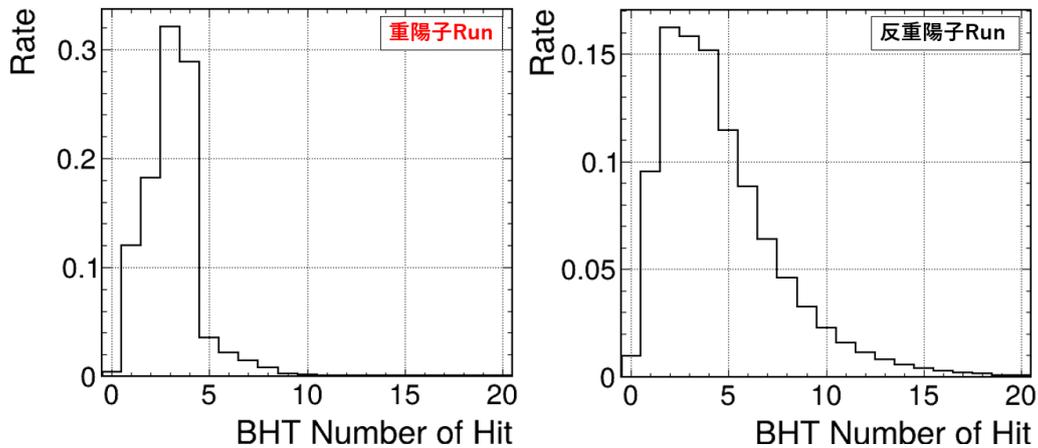


図 4.11 重陽子・反重陽子 Run における BHT ヒット数

BHT は 2 個のセグメントが一部ビーム軸方向に重複した並びになっているため、1 粒子の hit 回数は 2 回までとなる。それに対して、重陽子 Run では 4 hit にカットオフが確認される。これはクロストークにより隣のチャンネルが反応したためと考えられる。そのため、hit をクラスタリングすることで fake を落とした。クラスタリング手順を以下にまとめる。

1. 下位のセグメントから $[-50, 50]$ ns の範囲に含まれるヒット（以降 seed ヒットと呼称）を探す。
2. seed ヒットの存在したセグメントの次で、ToF の値が $\text{seed} \pm 12$ ns を満たすヒットを探す。
3. ヒットが見つからない場合終了する。
4. ヒットが見つかった場合は 2 に戻り、クラスターとする（最大クラスターサイズは 4）。
5. クラスター内で最小値の ToF となるヒットを基準として $+2$ ns 以内のヒットを True ヒット、それ以外のものを Fake ヒットとみなして、True ヒットの平均値が ToF とヒット位置であると決定する。（反）重陽子 Run のある 1 イベントに対するクラスタリング結果を図 4.12 に、クラスタリング前後の ToF 分布変化を図 4.13 に示す。

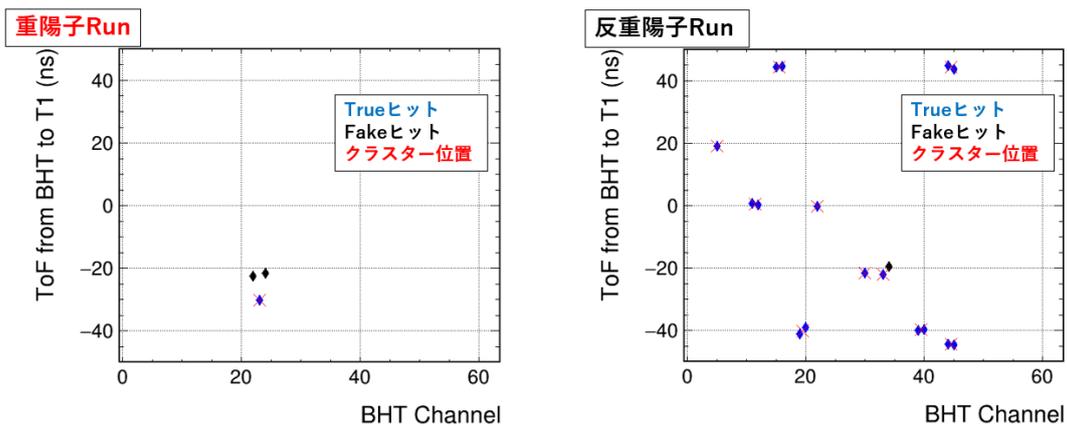


図 4.12 重陽子・反重陽子 Run の 1 イベントに対するクラスタリングの様子

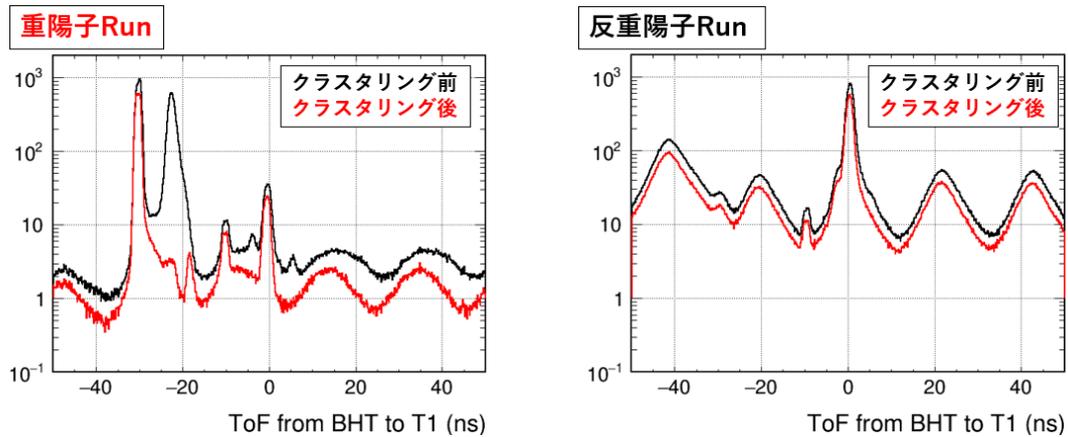


図 4.13 重陽子・反重陽子 Run のクラスタリング前後の ToF 分布

反重陽子レート測定の解析手順を以下に記す。

1. 事前選択カットをかけて、解析すべきイベントを選択する。
2. 反重陽子の信号領域と信号周辺領域を重陽子のデータで決定。
3. 反重陽子データの信号領域を隠す。
4. 重陽子データの信号領域と反重陽子データの信号周辺領域における ToF・dE/dX を用いて事象選択を行う。
5. 反重陽子の Signal 領域を露にして結果を確認。

事前選択に使用したのは以下の 4 要素である。

- イベントスリップが発生していない。
- Deuteron ToF Trigger を満たす。
- BPC 飛跡が 1 個に定まり、その飛跡から計算されたビーム運動量が 0.9 GeV/c から 1.1 GeV/c の範囲内である。
- BPC 通過位置が DEF の存在範囲と等しい、すなわち水平垂直共に -5 cm から 5 cm の範囲内であり、粒子の通過位置がビーム軸中心から大きく外れていない。

初めにイベントスリップについて述べる。イベントスリップは、あるイベント以降に、時間情報が別のイベントの情報としてずれて保存されてしまう現象を表す。イベントスリップは高レートでデータ収集を行うと発生することがあり、Phase-1 では反重陽子レート測定でのみ確認され、ch 数が 16 と最も多い T98 Range で頻繁に発生した。イベントスリップの特定は、時間情報が存在したイベントに対して、横軸をイベント数、縦軸をエネルギーとした図を確認することで行った。図 4.14 に、Run832 の T0 に対する結果を示す。550000 イベント以降から Pion に対応する 2 MeV のピークが薄くなっていることより、そこからイベントスリップが発生したと評価した。以下に、反重陽子レート測定における、総取得データ数と検出器ごとのイベントスリップしていないイベント数をまとめる。解析には、T98 Range の時間情報は使用せず、BHT/T0/DEF でイベントスリップが発生していないものを使用した。

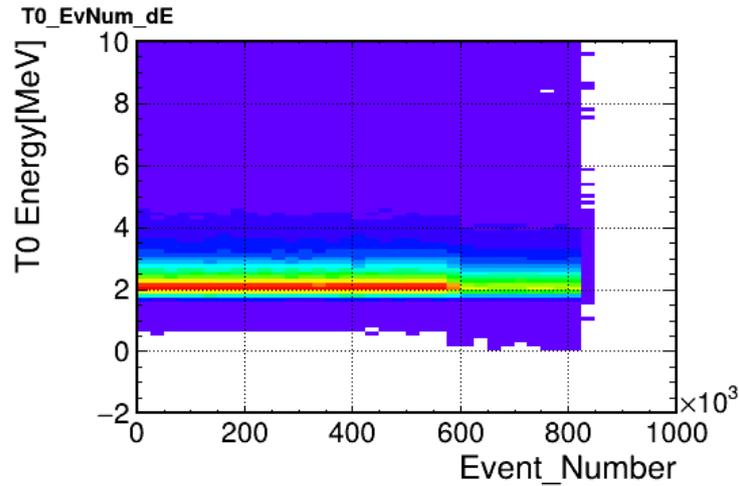


図 4.14 Run832 における T0 のイベントスリップの様子

表 4.6 イベントスリップ

総取得イベント数	BHT/T0/DEF	RC	BHT/T0/DEF/RC
10.85M	8.75M	3.52M	3.47M

先述した事前選択とイベント数の関係を以下の表にまとめる。

事前選択条件	重陽子 Run	反重陽子 Run
全イベント	1079673 (100%)	10854672 (100%)
イベントスリップ無し	1079673 (100%)	8745914 (80.6%)
Deuteron ToF Trigger	1016104 (94.1%)	6121114 (56.4%)
ビーム運動量 (0.9-1.1 GeV/c)	947296 (87.7%)	4166053 (38.4%)
BPC 通過位置 [-5,5] cm	710281 (65.8%)	2180813 (20.1%)

表 4.7 事前選択条件とそれを満たすイベント数の関係

事前選択を突破したイベントに対して、T1 と BHT の情報を用いて、重陽子データから信号領域及び信号周辺を決定した。そして、反重陽子データの信号領域を隠した状態で、反陽子データの信号領域と反重陽子データの信号周辺領域を確認しながらカットをかけた。具体的なカット条件を以下に記す。

1. BHT と T1 の TOF について、Pion・陽子に対応する $[-2,2]$ ns ・ $[-11,-8]$ ns の領域にクラスターが存在しないこと。
2. T0 のエネルギー領域が $[5,9]$ MeV の範囲内であること
3. T1 のエネルギー領域が $[7,12]$ MeV の範囲内であること。
4. T1 において、BPC 飛跡から計算される通過位置と左右 PMT の応答時間差が一致していること
4. DEF のエネルギー領域が $[1.7,3.6]$ MeV の範囲内であること。
5. BHT と DEF の TOF が $[1.2,3.0]$ ns の範囲内であること。

それぞれの Cut 条件に対応する重陽子データと反重陽子データの図を図 4.16 から図 4.18 に、カット前後の T1 と BHT の分布を図 4.19 と図 4.20 に表す。また、カット条件とイベント数の関係を以下の表 4.8 にまとめる。

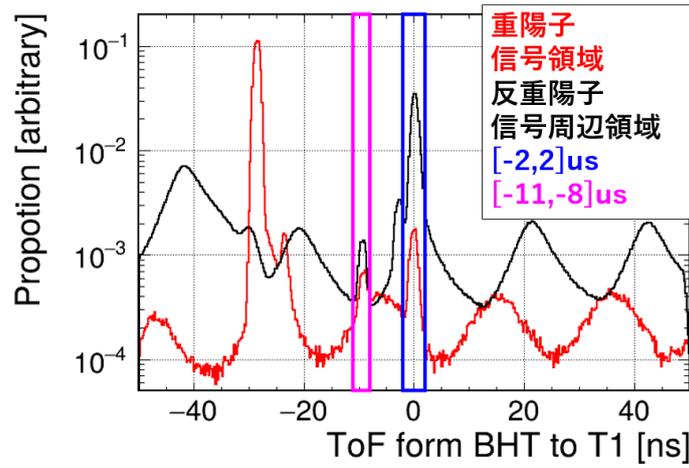


図 4.15 事前選択後の BHT-T1 の ToF 分布

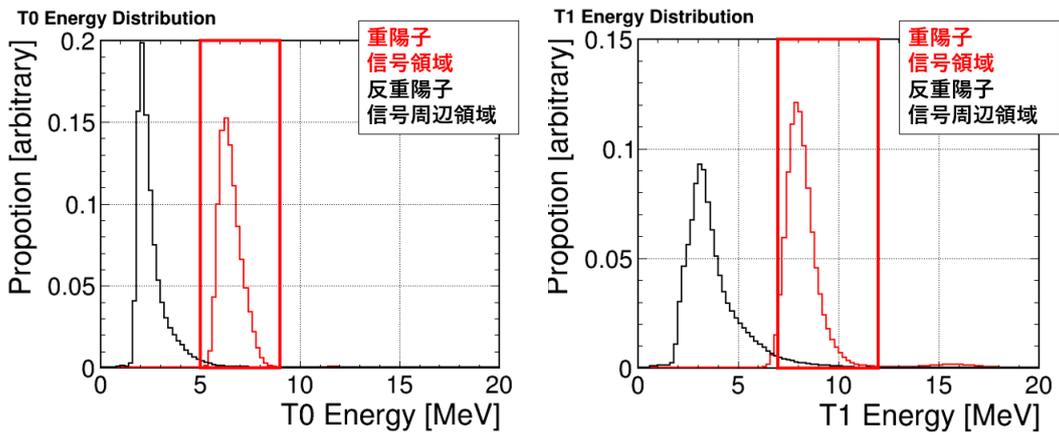


図 4.16 事前選択後の T0・T1 のエネルギー分布

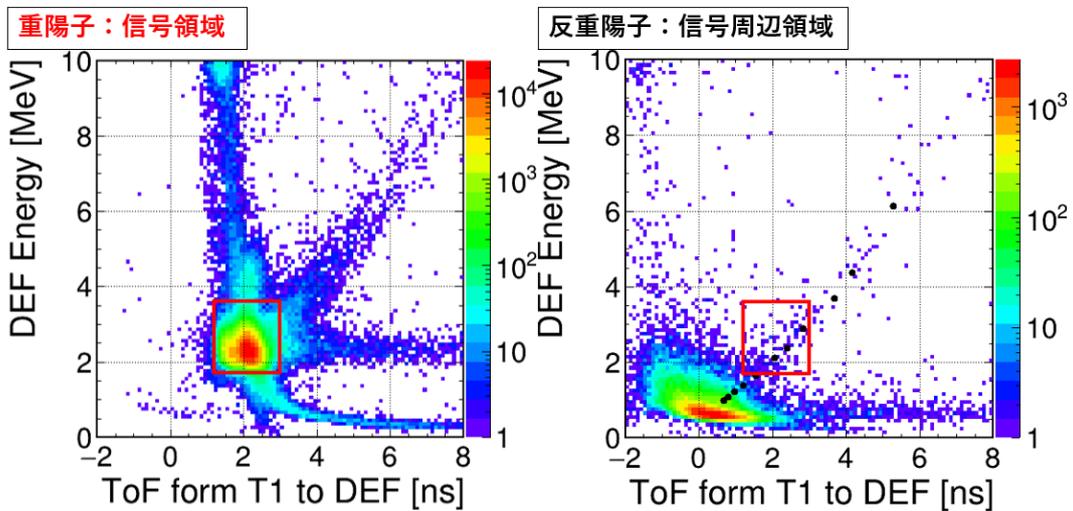


図 4.17 事前選択後の DEF の TOF とエネルギーの関係

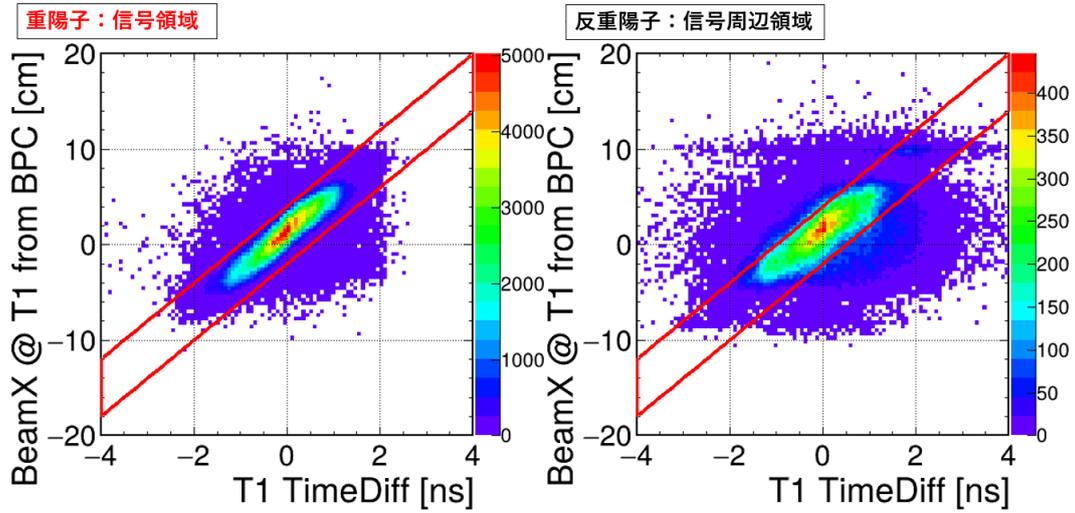


図 4.18 事前選択後の T1 応答時間差と BPC 通過位置の関係

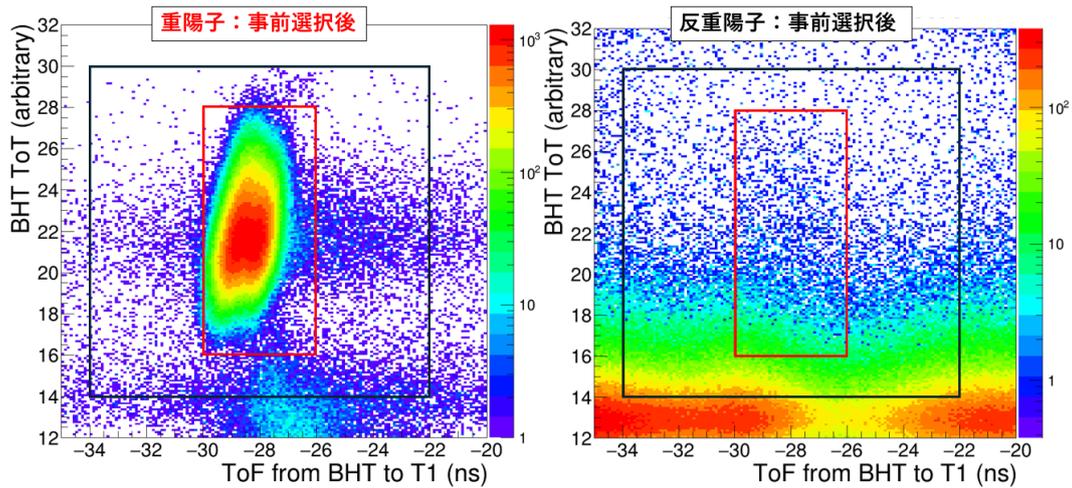


図 4.19 事前選択後の BHT-T1 の ToF と BHT TOT の分布

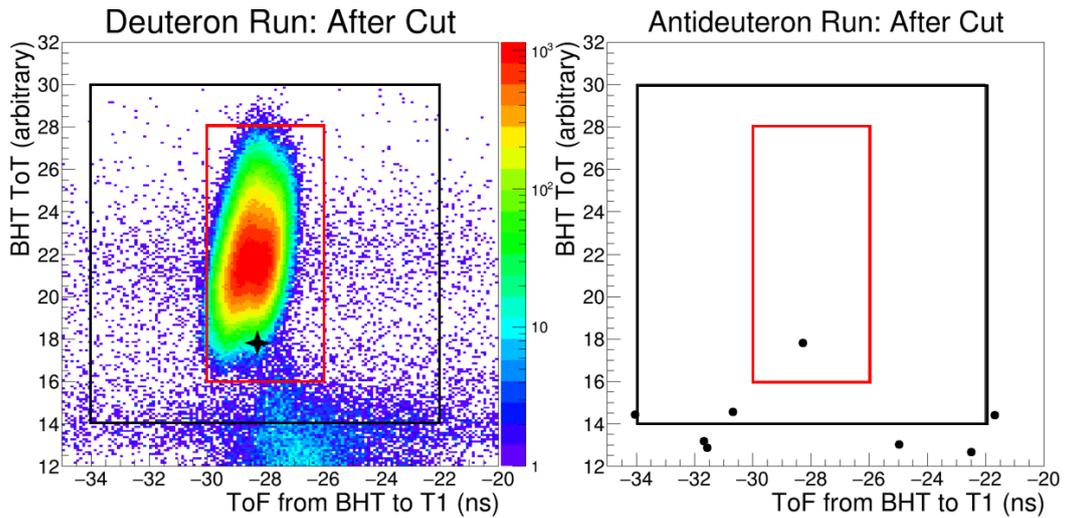


図 4.20 カット後の BHT-T1 の ToF と BHT TOT の分布

カット条件	反陽子 Run	反重陽子 Run	
	信号領域	信号領域	信号周辺領域
事前選択後	687026 (100%)	10644 (100%)	135973 (100%)
No ToF in [-2,2], [-11,-8] ns	681046 (99.1%)	1362 (12.8%)	17233 (12.7%)
T0 Energy (5-9 MeV)	667886 (97.2%)	23 (0.22%)	311 (0.229%)
T1 Energy (7-12 MeV)	634498 (92.4%)	6 (0.06%)	58 (0.042%)
T1 and BPC consistency	629154 (91.6%)	5 (0.05%)	26 (0.019%)
DEF Energy (1.7-3.6 MeV)	603880 (87.9%)	2 (0.02%)	9 (0.007%)
DEF ToF [1.2,3.0] ns	603413 (87.8%)	1 (0.01%)	1 (0.001%)

表 4.8 粒子選択条件とそれを満たすイベント数の関係

図 4.17 について、反重陽子信号周辺領域について、右上方向に延びる成分が確認される。これは、Pion の衝突によって途中で生成した低速陽子である可能性が高い。図中の黒点は、ベータプロットの式に従って計算した陽子に対応する計算値であり、右上成分と一致している。この成分は BHT では Pion のように振舞い T0 では確認されず T1・DEF で観測されたため、発生場所は T0 から T1 より前すなわち T0 や AC 容器であると考えられる。反重陽子 Run について、トリガーレートが 8 kHz、ビーム粒子レートが 1.5 MHz、2 時間のデータ取得に対して、全 Cut を突破したのは 1 イベントであった。この 1 イベントについて、図 4.19 の左図の星印に対応しており、以下の理由からバックグラウンドの可能性が高い。

1. BHT TOT の値が重陽子事象のピークと比較して小さい。
2. 軌道がビーム中心からずれている。BPC1 通過位置が (-2.3 cm, 6.6 cm), BPC2 が (6.0 cm, 1.1 cm), BPC が (-2.3 cm, 4.3 cm) であり、T98 Range でヒットが確認されなかった。

仮に真の信号だと仮定した場合、解析に利用したデータ量が 1093 spill 分なため、反重陽子レートは 0.9×10^3 /spill となる。

4.7 Phase-1 の結果から要請される Phase-2 の条件

Phase-2 は LArTPC への反粒子照射実験である。したがって、LArTPC の電荷信号が $O(100 \text{ us})$ であることおよび使用予定の電子信号読み出し基板の性能を考慮すると、パイルアップ防止のためにビーム粒子のレートは 10 kHz 程度に、DAQ レートは 100 Hz 程度に制限される。ここで、Phase-1 の結果を Phase-2 の条件にスケールすると、反重陽子イベントを 1 回観測するために期待される時間は約 200 時間となる。これは実験期間として非現実的な長さのため、Phase-2 では既に確立された反陽子ビームを要求する。

Phase-2 の要求ビーム案を表 4.9 に、スケジュール案を図 4.21 に示す。ビーム運動量は、LArTPC 中心での停止が期待される $700 \text{ MeV}/c$ を主に要求する。図 4.22 は、Phase-1 と同様のセットアップで T98 Range の位置に LArTPC を設置した際の、Geant4 シミュレーションによる $700 \text{ MeV}/c$ 陽子捕獲地点分布であり、LArTPC の中心における捕獲・崩壊事象の観測が期待される。また、ビーム再現性や運動量・電荷・質量が変化した際の反応を確認するため、他の条件のビームも要求する。DAQ レートを 100 Hz 、ビーム時間を 12 時間、S/N 比およびスピル効率を 0.5 とすると、観測される反陽子事象総数は約 1.1×10^6 となる。LArTPC 内捕獲事象の確率を 0.43 とすると、観測される捕獲事象は約 4.6×10^5 となり、目標の 10^5 を上回る。

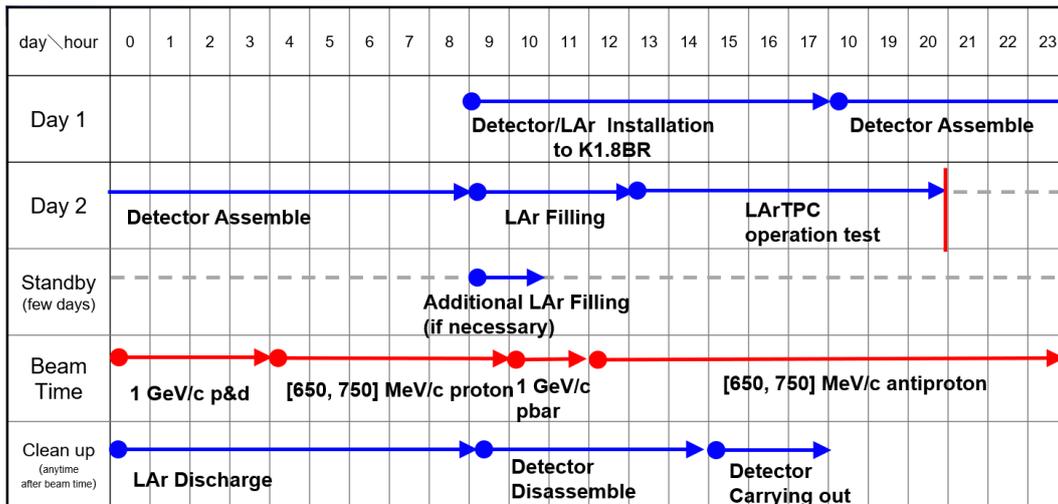


図 4.21 Phase-2 スケジュール案

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 4.9 プロポーザル時点での要求ビームタイム

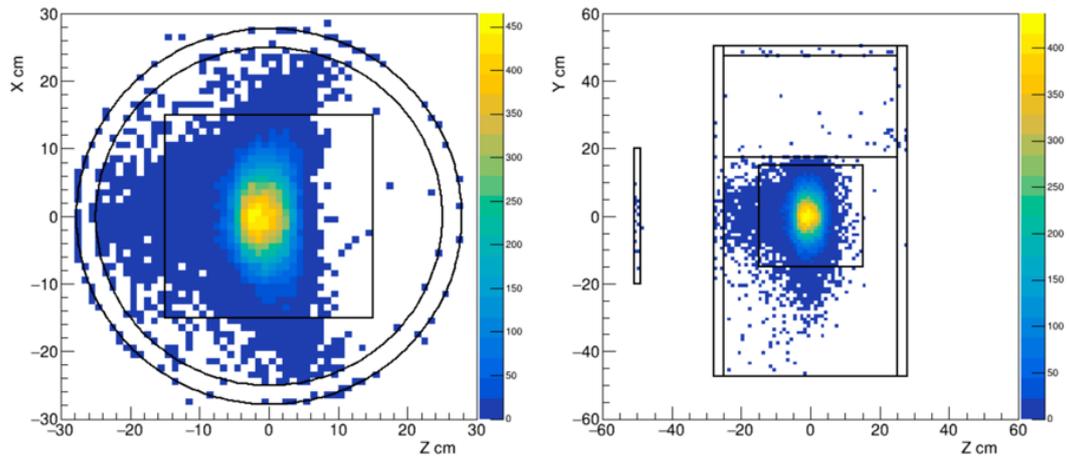


図 4.22 Geant4 シミュレーションによる LArTPC700 MeV/c 陽子捕獲地点分布 [23]

5 Phase-2 に向けた LArTPC 動作試験

5.1 試験概要

T98 Phase-2 に向けた検出器全体の動作確認として、宇宙線ミュオンを用いた地上試験が行われた。これらの LAr 試験のスケジュールを以下の図 5.1 に示す。Run24.1・24.2・24.3 は早稲田大学西早稲田キャンパス 65 号館 1 階の実験室で、PreRun1・2 は K1.8BR にて行われた。それぞれの Run のより詳しい目的について、Run24.1 は追充填前後における LAr 純度変化の確認、Run24.2 および Run24.3 は前回 Run からの修正点の確認、T98 PreRun は早稲田大学におけるセットアップを K1.8BR にて再現することである。



図 5.1 2024 年度の LAr 試験のスケジュール

5.2 実験セットアップ

5.2.1 LAr テストスタンド

早稲田大学における LAr テストスタンドの写真及び概略図を以下の図 5.2 に示す。TPC は $\Phi 50$ cm な 200 L 真空断熱容器内部に設置されている。200 L 容器への LAr の充填は、水や酸素を除去するための液フィルターを通じて行われる。アウトガスを減少させるため、200 L 容器は実験開始前に 1 週間以上真空引きされる。また、真空引き中にトップフランジに巻き付けたシリコンヒーターを熱して容器内を空焚きすることで、さらなるアウトガスの減少を図る。Run24.3 では約 10 日間の真空引きが行われ、実験開始直線の内槽真空度およびアウトガスレートは、それぞれ $O(10^{-4})$ Pa・ $O(10^{-1})$ Pa/hour であった。充填後の LAr は熱流入により気化するが、絶対圧弁からの自動排気により容器内圧は一定に保たれる。Phase-2 実施時には 200 L 容器はビームライン上に設置されるが、ビーム出力中は人が入れないため、直接的な操作が必要ない仕組みが構成された。容器内の LAr 量が減少した場合は追充填で補う。

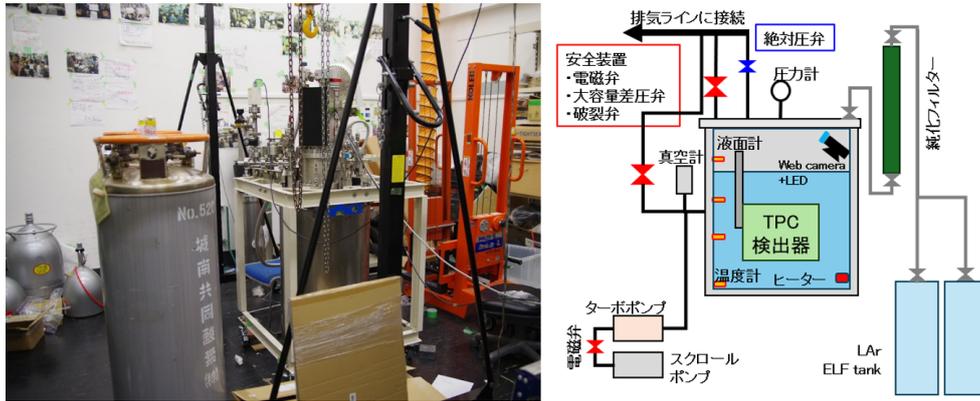


図 5.2 早稲田大学における LAr テストスタンドの写真と概略図

PreRun における LAr テストスタンドの写真及び概略図を図 5.3 に示す。設置場所は K1.8BR の CVC 直前である。基本的なセットアップは早稲田大学と同様だが、ビームライン高さが床から 2 m なので、200 L 容器は体積 2 m×1 m×1 m の併設されたコンクリブロック上に設置された架台上に固定される。以下で解説する 200 L 容器内部や DAQ の構成は、早稲田大学におけるセットアップと等しい。

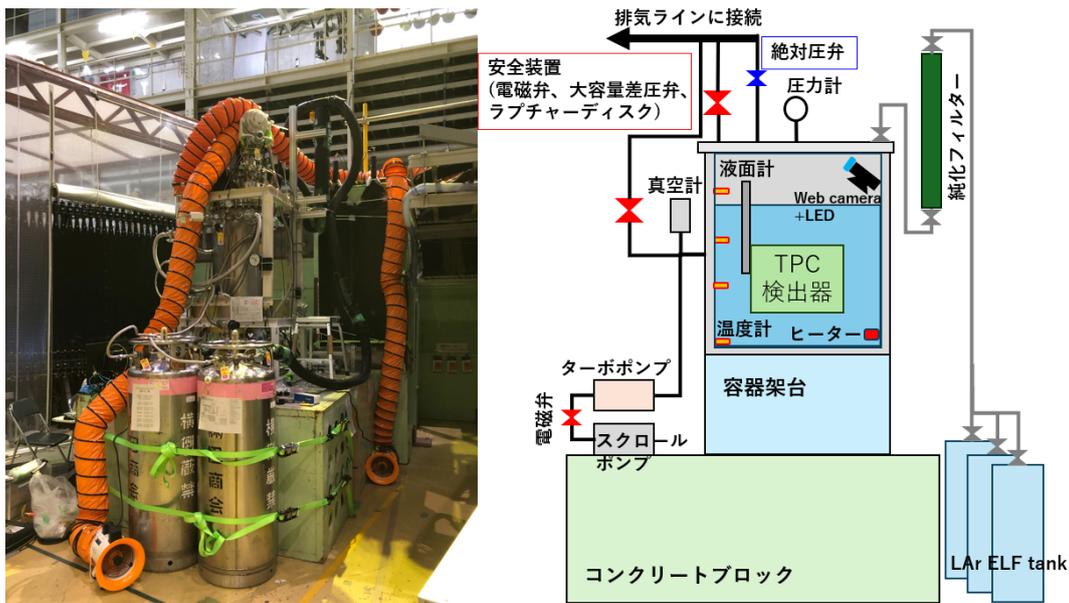


図 5.3 K1.8BR における LAr テストスタンドの写真と概略図

5.2.2 LArTPC

先述の通り LArTPC は $\Phi 50$ cm な 200 L 真空断熱容器内に設置されて運用される。LArTPC の構造は全 Run で共通である。体積はおおよそ $300\text{mm} \times 300\text{mm} \times 300\text{mm}$ であり、上からアノード、アノードグリッド、サイドプレート、カソードという設計である。アノードグリッド及びカソードは、 $\Phi 100 \mu\text{m}$ のステンレスワイヤーが $5 \cdot 10$ mm 間隔で 2 次元的に張り合わされた構造をしている。カソード中央には GAr 試験用の α 線源が取り付けられている。サイドプレートには 8 mm 幅の電極が 2 mm 間隔で存在しており、隣り合う電極の間に位置する $100 \text{M}\Omega$ の抵抗によって均一な電場が作成される。また、サイドプレート内面には波長変換材として TPB 蒸着 ESR が取り付けられている。アノードの構造を以下の

図 5.4 に示す。縦横 64ch ずつ並んだ $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ の直角三角形のパッドの列によって、二次元読み出しがなされる。

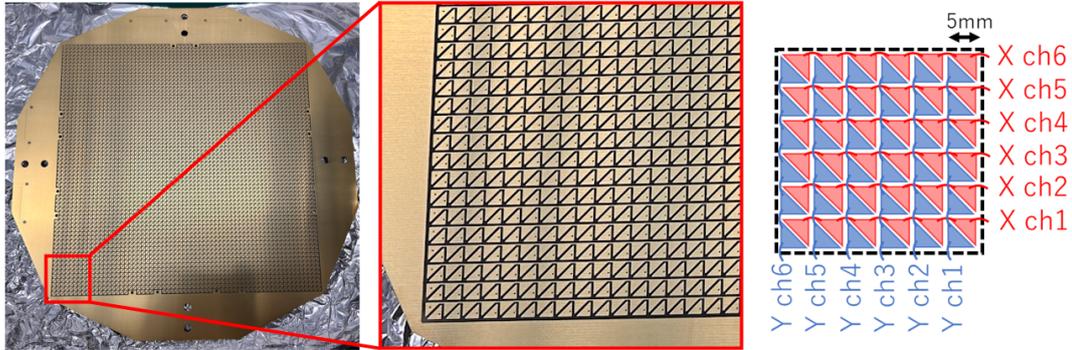


図 5.4 Anode 基板

LArTPC 内に電場を作成するには、アノードグリッドとカソードに電圧を印加する。アノードは浮き電極となっており、電子信号読み出しケーブルでグラウンドと導通している。アノードグリッドは、端をクリップで挟むことで電圧供給ケーブルと接続しており、そのクリップはカプトンテープで固定されている。カソードには電源供給ケーブルが直接はんだ付けされている。アノードの電圧源には ISEG 社の EDSF130m を使用した。カソードの電圧源には、最大-30 kV という高電圧の印加が可能な MATSUSADA PRECISION の HJPQ-30N1 を使用した。放電対策として、フィードスルーには耐電圧 30kV な COSMOTEC 社の C230K3ASS1UT1 を、ケーブルには耐電圧 10 kV でカプトン膜に覆われた COSMOTEC 社の V10K3AK1000/XX を使用した。そして、フィードスルー周辺部のケーブルはエポック社のエポキシ樹脂 E-01-005 で固定した。電場の大きさについて、基本的には、アノードグリッド印加電圧を-1.5 kV に固定して、カソード印加電圧を操作することで、 $200 \cdot 300 \cdot 400 \text{ V/cm}$ の電場を印加した状態で運用した。

5.2.3 光検出器

光検出器として PMT (R6041-506) と MPPC (S13361-6050AE-04) を使用した。R6041-506 について、窓面は $\Phi 50 \text{ mm}$ 、有感領域は 160 から 650 nm、印加電圧 700 V におけるゲインは 2×10^5 である。S13361-6050AE-04 について、大阪大学で設計された基板上に取り付けられており、MPPC4 個からなる直列接続が 4 列併設されており、信号は 1ch で読み出される。この基板は容器内に 4 枚設置されている。窓面は $6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 16$ 、有感領域は 320 から 900 nm、印加電圧 $56 \times 4 \text{ V}$ におけるゲインは 1.7×10^6 である。どちらも LAr 蛍光波長 128 nm に感度を持たないため、TPC 側面内壁の TPB 蒸着 ESR によって波長変換して読み出す。PMT・4 枚の MPPC 基板ともに TPC 下部に設置されたアルミ板に固定されて設置されている。トリガーとして使用するのは PMT であり、MPPC は予備として組み込まれている。PMT および MPPC の写真を以下の図 5.5 に示す。

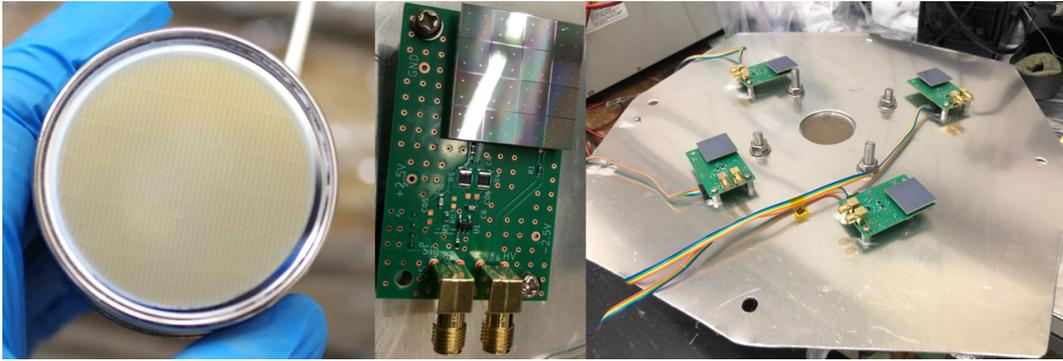


図 5.5 PMT および MPPC の写真

使用した電圧源について、PMT には ISEG 社の EDSF130p を、MPPC にはアノードグリッドと同じ ISEG 社の EDSF130n である。基本的に、PMT には 600 V、MPPC 基板にはそれぞれ 170 V の電圧を印加して運用した。

5.2.4 200 L 容器内配置

LArTPC は 200 L 容器のトップフランジに吊るされている。LAr 量の維持時間が長くなるように、低い場所に設置された。電子読み出しケーブルについて、Run24.1 時はビニル製だったが、Run24.2 以降はアウトガスを抑えるためにフッ素樹脂製に変更された。この電子読み出しケーブルは、Run24.2 実施時に一部外れてしまったため、Run24.3 開始前に Anode 側および feedthrough 側両方のコネクタ接続部がアラルダイトで接着固定された。また、Run24.1 では LAr 充填時に電子読み出し基板 feedthrough が結露したため、Run24.2 以降は I 字ポートが挿入された。熱流入を抑えるため、Run24.2 以降はトップフランジから 40、90mm の位置に 2 枚のアルミバッフル板が設置された。これにより熱流入量が約 60 W から約 30 W 程度まで減少し、実験に必要な LAr 量を維持できる時間が約 2 日から約 4 日に延長された。Run24.3 における 200 L 容器内の配置を以下の図 5.6 に表す。200 L 容器内の状態を監視するために、白金温度計や液面計などが設置されており、データロガー GL840 によって 68pin フィードスルーを介した自動記録を行っている。図 5.6 中の Ch は温度計の設置場所と対応するデータロガーの Ch を示している。データロガーは温度計や液面計だけではなく、真空計や酸素濃度系、カソード電圧源などの値も自動記録している。容器内の LAr 液面位置は、白金温度計や液面計、web カメラによって行う。安全に実験を遂行するため、これらの計器は 24 時間体制で監視される。

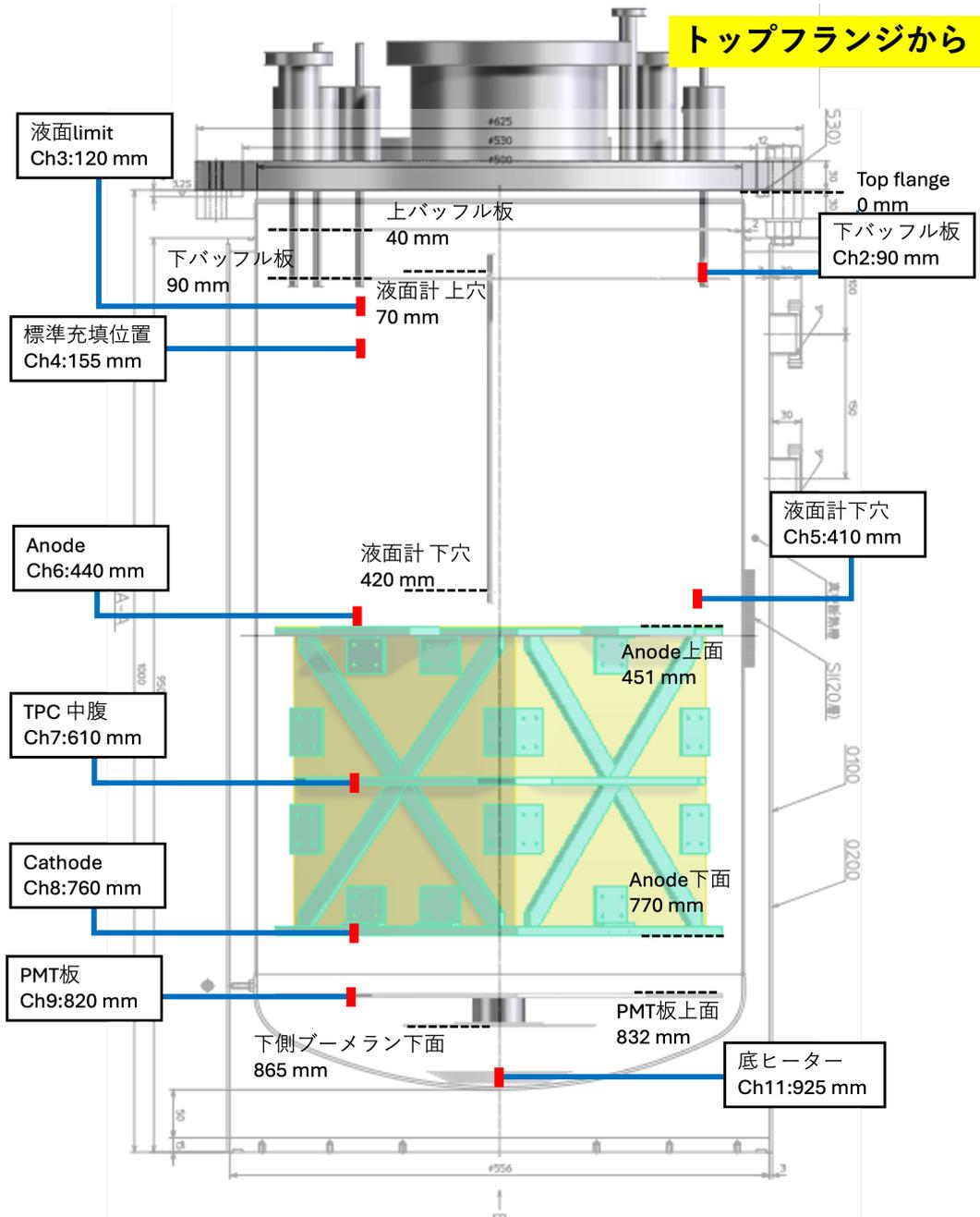


図 5.6 200 L 容器内配置図

5.3 DAQ 概要

先述の通り、Phase-2 は 10^5 の反陽子捕獲事象の観測を目指している。そのため、DAQ としては 100 Hz 以上でデータ取得が可能なおこと、検出器同士のイベント同期が可能なおことの 2 点が要求される。初めに、これらの要求を早稲田大学のセットアップに対して満たす DAQ システムを作成する。次に、K1.8BR 上で同様な DAQ システムを運用して動作を確認する。その後、K1.8BR DAQ システムに組み込んで運用させる。

5.3.1 電荷信号

電荷信号の取得には TIGAr(TPC electronics for Ionized signal in Gas and liquid Argon) Board を使用した。詳細は清水論文 [24] にまとめられている。TIGAr Board は Open-it プロジェクトとして早稲田大学・KEK・神戸大学によって共同開発された電子読み出し基板で、LTARS(Low Temperature Analog Readout System) という ASIC が使用されている。LTARS は KEK のニュートリノグループや Open-it によって開発が進められており、TIGAr Board に搭載されているのは LTARS2018_K06A である。LTARS2018_K06A の詳細は中村修論 [7] にまとめられており、LTARS2018_K06A の基礎特性を以下の表 5.1 に記す。

表 5.1 LTARS2018_k06A 基本仕様一覧

項目	数値
ダイナミックレンジ	120 fC
コンバージョンゲイン (HG)	10 mV/fC
コンバージョンゲイン (LG)	0.5 mV/fC
ENC	<4,000 electron
ピーキングタイム	fast:3 us(slow:7 us)
チャンネル数	16 ch
電源電圧	±0.9 V
チップサイズ	2.5 mm×5 mm

TIGAr Board の性質を表 5.2 に、写真を図 5.7 に示す。入力 ch 数は 32 だが、使用するアノードは 128 ch なので、4 枚同時読み出しを行う。LArTPC で発生した電離電子は電場によってアノードに集められ、読み出しケーブルとフィードスルーを介して TIGAr Board に入力される。入力信号は、保護回路を経て LTARS にて増幅・整形された後、差動信号に変換されて ADC へ転送される。LTARS は入力 1 ch につき HG(High Gain) と LG(Low Gain) の 2 ch 出力を行うが、LArTPC で宇宙線信号を観測する際は HG のみを用いた。ADC で電荷信号から変換された電圧信号は、FPGA にて処理され、SFP コネクタから LAN ケーブルを介して PC へと送信される。また、NIM 規格の入力コネクタ 4 個と出力コネクタ 2 個が取り付けられている。

表 5.2 TIGAr Board の性質

項目	パラメータ/型番
面積	幅：136 mm × 長さ：215 mm
ASIC	LTARS2018_K06A
ADC	AD9637BCPZ-40
FPGA	Xilinx Artix-7 XC7A200T-2FFG1156C
電源	+5.0 V (単電源)
入力コネクタ	HIROSE FX2-68S-1.27DS
入力チャンネル数	32 ch/board

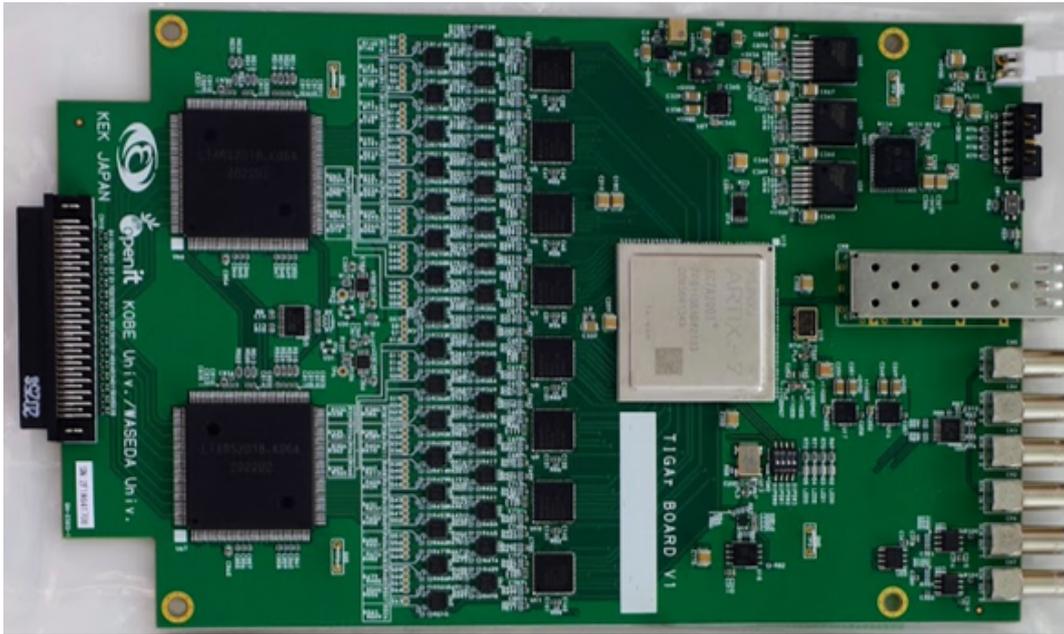


図 5.7 TIGAr Board

基板中心に搭載された FPGA のファームウェアを変更することで、動作設定を変化させられる。ファームウェアはハードウェア記述言語 Verilog HDL で表現され、開発環境は Xilinx 社の Vivado 2023 である。ファームウェアの読み込みは、bit ファイルの FPGA への直接的なダウンロードまたは EEPROM(MT25QL128ABA1ESE-0SIT) へ書き込まれた mcs ファイルのダウンロードによって行われる。特に EEPROM に書き込んだ場合は、電源を落としてもファームウェアが保存されたままなため、起動時に自動で読み込まれる。初期及び運用時のデータ取得設定を以下の表 5.3 にまとめる。NIM 信号がトリガーとして入力されると、図 5.8 に示す形式に従って、TCP 通信によって PC へデータが送信される。電離電子が 30 cm 角 LArTPC 内のフルドリフトに費やす時間は 300 us 程度なので、データ量削減のためにサンプル数 1000(400 us)、トリガータイミング 125(50 us) として運用した。これらの設定値は、PC から UDP 通信によってレジスタに値を書き込むことで、ファームウェアを操作することなく変更可能である。レジスタアドレスとその内容を以下の表 5.4 に、レジスタ 0x1B の詳細を表 5.5 にまとめる。また光信号との同期のために、出力される NIM 信号を、50 MHz の矩形波から 32 bit のイベントカウントに変更して運用した。

表 5.3 TIGAr Board によるデータ取得設定

項目	初期設定	運用時設定
サンプリング周波数	2.5 MHz (400 ns/bin)	2.5 MHz (400 ns/bin)
サンプル数	4000 (1.6 ms)	1000 (400 us)
トリガータイミング	1000 (400 us)	125(50 us)
電圧範囲	±2V	±2V
bit 数	12 bit	12 bit
ヘッダー長	32Byte	32Byte
ヘッダー情報	固定値・固定値・データ長 イベントカウント	固定値・内部クロックカウント データ長・イベントカウント
トリガー	NIM 入力	NIM 入力
NIM 出力	50 MHz 矩形波	32 bit イベントカウント
IP アドレス	192.168.10.16	基板ごとに変更

4Byte	3Byte	2Byte	1Byte
0xFF	0xFF	0x55	0x55
初期設定: 固定値・運用時設定内部クロックカウント			
データ長			
イベントカウント			
Ch0 HG		Ch0 LG	
⋮		⋮	
Ch31 HG		Ch31 LG	
Ch0 HG		Ch0LG	
⋮		⋮	

ヘッダー

ADC

図 5.8 TIGAr Board から PC へ送信されるデータの形式

表 5.4 レジスタのアドレスとその内容

アドレス	内容	初期設定	運用時設定
0x06,07	サンプル数	4000(1600 us)	1000(400 us)
0x08,09	トリガータイミング	1000(400 us)	125(50 us)
0x0A,0B,0C	ヘッダー情報の 6,7,8 Byte の値 (初期設定)	12345	0
0x0D	ADC 間引き間隔	8	8
0x1B	1ch 単位の設定変更	0	0
0x1C	レジスタ 0x1B で設定変更する ch の指定	0	0
0x1D	レジスタ 0x1B による設定変更の有効化	0	0
0x1E	内部クロックトリガー有効化	0	0

表 5.5 レジスタ 0x1B の詳細

bit 桁数	内容
0,1,2	オフセット調整 ([0,100] mV)
3	オフセット極性
4	未使用
5	テストパルス入力
6	ゲインブースト

以下の図 5.9 に、TIGAr Board1 枚でのイベントレートとデータ取得率を最初に測定した結果を表す。横軸がトリガーレート、縦軸が TIGAr Board の DAQ レートである。ファンクションジェネレータからの信号をトリガーとして、データ取得にかかる時間を計測して DAQ レートを求めた。100 Hz 未満は 1000 event, 100 Hz 以上は 10000 event に対して測定した。サンプル数は LArTPC 運用時と等しい 1000 bin(=400 us) とした。

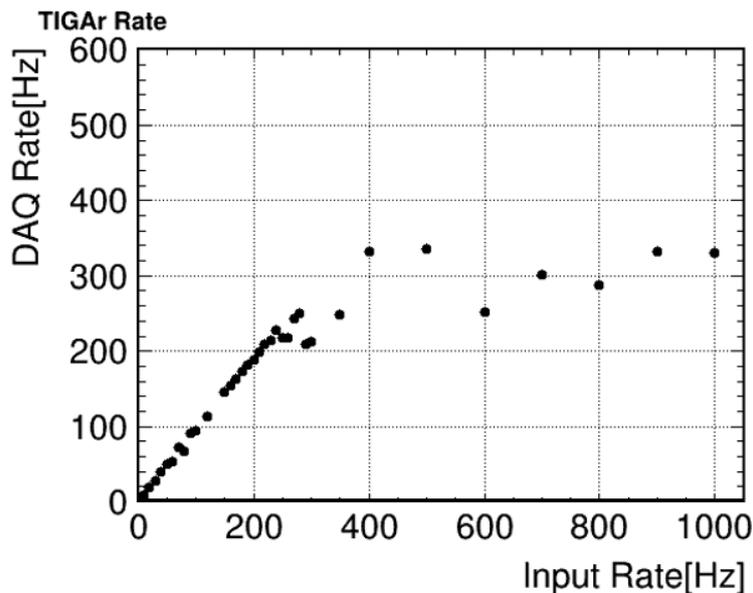


図 5.9 TIGAr Board1 枚の DAQ レート測定結果

PC との通信は CAT5e cable を介して行っているため、通信速度は 1 Gbps で制限されることを考慮すると、理論上は 780 Hz までデータ取得可能といえる。読み出しレートを上昇させるため、Run24.2 以降に PC の読み出しバッファを最大化して再度測定を行ったところ、700 Hz まで安定したデータ取得を達成した。

先述した通り、LArTPC の読み出しには 4 枚用いる。一つの LAN ポートからハブを介して複数の TIGAr Board と接続した場合、以下の問題が発生した。

1. PC から TIGAr Board へ送信する際、通信先の基板を切り替えるたびに数秒のタイムアウトが発生する。
2. 複数枚の TIGAr Board から同時に PC へデータを送信する際、数枚の送信レートが低下する。
3. 複数枚の TIGAr Board から同時に PC へデータを送信する際、全ての基板について、1 枚ずつ数分に 1 回の頻度で数秒間データ送信が停止する。

これらの問題点を解決するため、4 個の LAN ポートが 4 つ存在する PCI board を PC に刺すことで、4 つの独立した SITPC 通信を確立した。ファンクションジェネレータからの信号を用いて、250 Hz で遅れることなく 4 枚同時読み出しが可能なことを確認した。

5.3.2 光信号

光信号の取得には Run24.1・Run24.2 では SIS 社の Flash ADC である SIS3316, Run24.3 以降は Caen 社の Flash ADC である Caen V1724 を使用した。それぞれの性能を以下の表 5.6 にまとめる。どちらも VME バスで通信を行う。Phase-2 では、後述する通信速度の問題から Caen V1724 を使用予定である。

表 5.6 FADC の性能

名称	SIS3316	Caen V1724
サンプリング周波数	250 Msps (4 ns/bin)	100 Msps (10 ns/bin)
ch 数	16	8
電圧範囲	2 V	2.25 V
bit 数	14 bit	14 bit
最大 BLT データ量	1 MByte	4 kByte
ZLE 機能	無	有

TIGAr Board と同じ Time Window 400 us の時間幅で、Phase-2 の目標である 100 Hz でデータ取得する場合、データ通信量は SIS3316 でおよそ 120 MByte/s, Caen V1724 でおよそ 48 MByte/s となる。これに対して、VME バスの最大通信量は 40 MByte/s で制限されるので、Phase-2 の目標を達成できない。そのため、ZLE(Zero Length Encording) 機能を有効化した。ZLE 機能の図を図 5.10 に示す。橙線が入力信号、緑線が閾値、青矢印の区間が Time Window, 赤矢印の区間が保存される領域を表している。通常は Time Window 内の全データが保存されるが、ZLE 機能を有効化することで閾値を超えた前後の領域のみが保存される。PMT・MPPC どちらも閾値を超える前 1 us・後 9 us の領域を保存した。

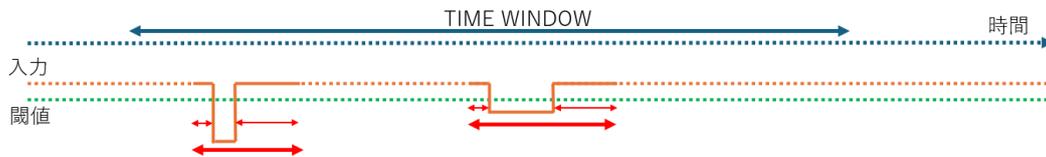


図 5.10 ZLE 機能の概念図

FADC の操作には、VME モジュール XVB602 を使用する。前述の通り、XVB602 は K1.8BR で QDC や RM の読み出しに用いられており、1 枚拝借して早稲田大学の DAQ システムに組み込んだ。

5.3.3 電子信号と光信号の同期

早稲田大学における DAQ 構成図を以下の図 5.11 に示す。荷電粒子が LAr に入射すると、シンチレーション光と電離電子が生じる。光信号は電子信号と比較して速いため、PMT・MPPC で測定されて FADC へ送られる。PMT 信号を FADC のセルフトリガーとして、FADC および TIGAr Board へ NIM 規格のトリガーを入力することでデータ取得を開始する。ここで、デッドタイムを考慮して、トリガー信号に対して 2 ms 幅の Veto 信号を入力している。電子信号を取得する TIGAr Board と光信号読み出

しをする FADC はそれぞれ独立して動作するため、イベント同期を行う必要がある。そのため、TIGAr Board から先述したイベントカウントを出力させ、それを FADC で読み出すことでイベントを一致させて再構成を行った。DAQ には 3 台の PC, DAQ3 と DAQ4 と XVB602 を使用した。DAQ4 は TIGAr との通信を、XVB602 は FADC との通信を、DAQ3 はそれぞれの PC が受け取ったデータの処理を行う。

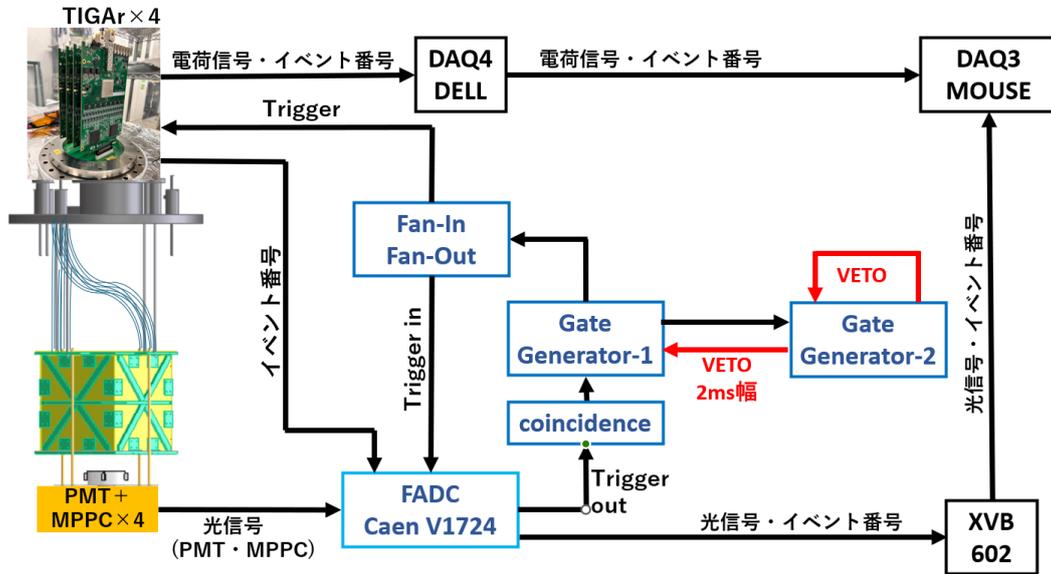


図 5.11 早稲田大学における DAQ 構成図

5.3.4 データフロー

取得したデータ処理の流れを図 5.12 に示す。上側は TIGAr, 下側は FADC で取得したデータの流を表しており、最終的に圧縮ファイルと解析用のファイルが保存される。先述した通り、TIGAr の操作は DAQ4 から SITCP 通信で行い、レジスタ書き換えによる初期条件の設定や 1 イベント単位な取得データの書き出しを行う。その後、DAQ3 によって生データの圧縮や解析しやすい形式への変換が行われ、DAQ3 にマウントされた ssd に保存される。FADC は XVB602 から VME バスを経て操作され、データ取得条件定義やデータ書き出しが行われる。FADC から XVB602 へのデータ取得は 1 イベント単位で行われる。書き出されたデータは 1 ファイル単位で DAQ3 へと転送され、生データの圧縮や解析しやすい形式への変換がなされる。TIGAr と FADC のデータの統合は、形式変換後のデータを DAQ3 で合成することによって行われる。

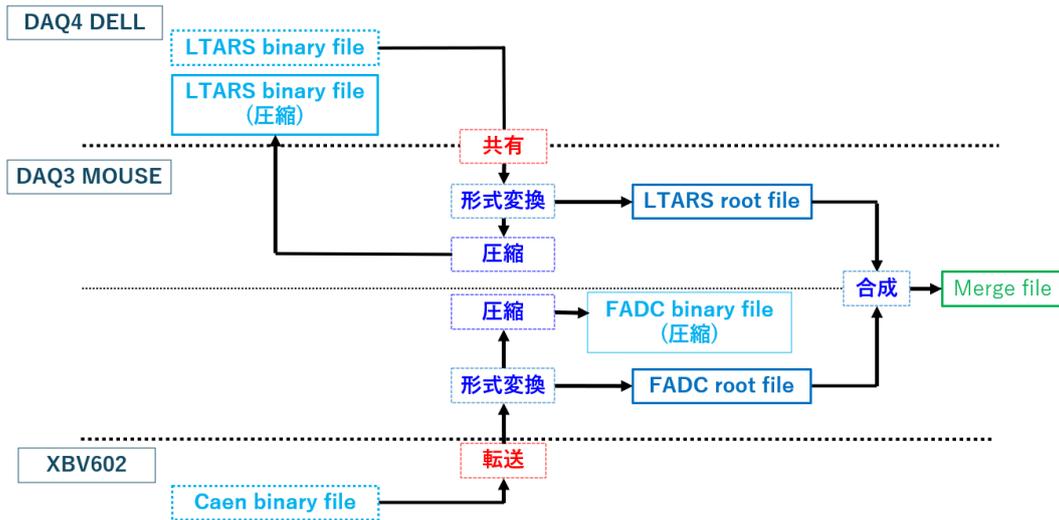


図 5.12 取得データ処理の流れ

5.4 結果

5.4.1 観測信号

実際に Run24.3 で観測された 1 イベントの信号を図 5.13 に示す。左側は FADC で、右側は TIGAr Board で取得した信号である。左側について、左上は TIGAr から FADC へ入力されるイベントカウンタ、右上は PMT 信号、下の 4 個は MPPC 信号である。MPPC 信号の -1.5 us 未満及び 10 us 以降など、値が全て 0 の領域は ZLE 機能によるものである。左上の図より、TIGAr Board からのイベント番号の取得に成功しているため、イベント同期が達成されたといえる。図 5.13 の右側は電荷信号の HG を XZ・YZ 平面へ射影したものであり、上側が生波形、下側が解析的にノイズを除去した後である。横軸がアノードの ch を、縦軸は高さを示しており、0 mm がアノードに、-300 mm がカソードに対応している。色の濃さは ADC Count を意味する。生波形について、X の 47 ch 及び Y の 19・27 ch は信号波形が他の ch と明らかに違うが、これは TIGAr Board の ASIC が故障しているためである。これらの ch は、ノイズ除去後の波形では 0 を詰めている。電荷信号の生波形には、各基板の配線表裏ごとに共通した時間依存のノイズ（以降コモンノイズと呼称）が確認された。コモンノイズの除去手順を以下に記す。

1. 時間幅を 5 bin すなわち 2 us ごとに切り分けて、各基板の配線表裏に従って全 ch を 8 グループに分類してヒストグラムを作成する。
2. 1 の操作で得られたヒストグラムに対して、平均値と RMS から範囲を決定してガウシアン関数でフィットを行う。
3. 2 の操作で得られたガウシアン関数のピークの値をコモンノイズの波形とする。
4. 生波形を 2 us ごとに、3 の操作で得られたコモンノイズの波形を差し引く。

図 5.13 のイベントの [110,112] us について、ch 毎の電荷量を重ね描いたものが図 5.14、8 グループ毎の電荷量分布と fit 結果が図 5.15 である。また、XZ 平面 ch20 の波形を図 5.16 に示す。黒線が生波形、赤線がコモンノイズの波形、緑線がコモンノイズ除去後の波形である。

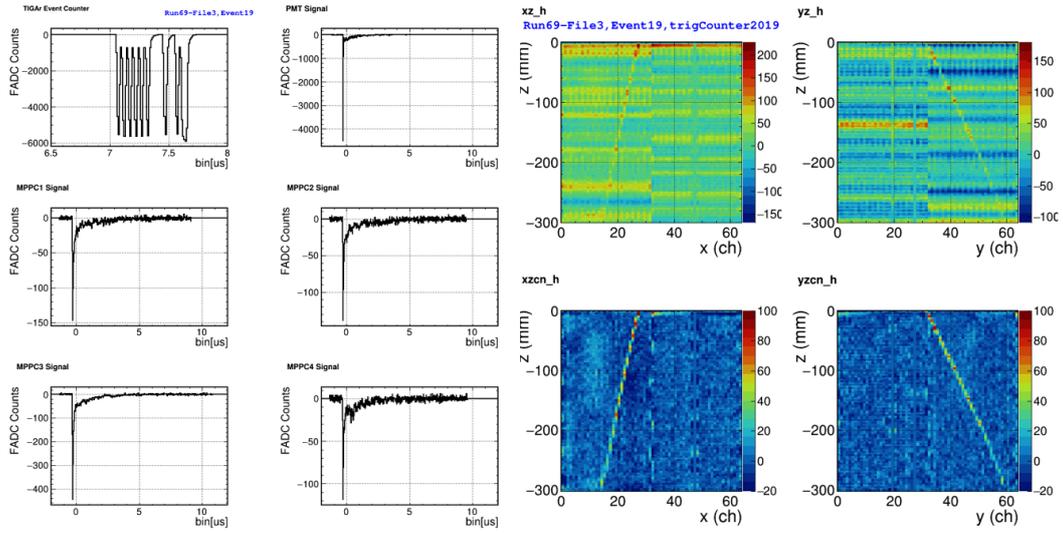


図 5.13 Run24.3 で観測された宇宙線信号

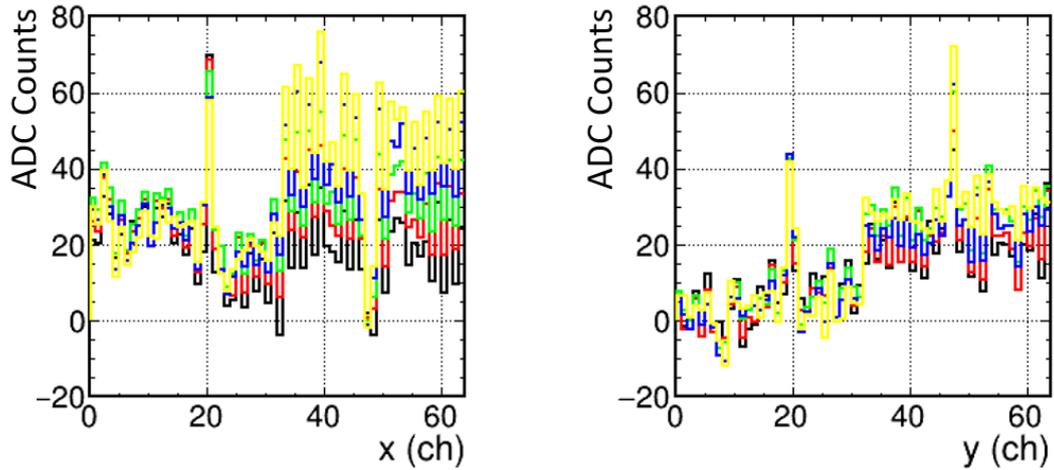


図 5.14 [110,112] us の XZ(左)・YZ 平面 (右) における電荷信号分布

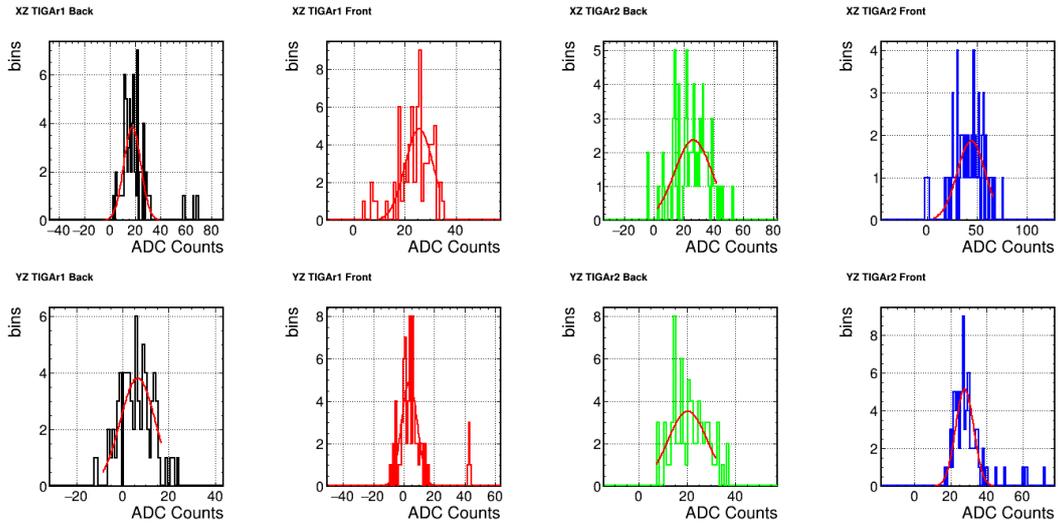
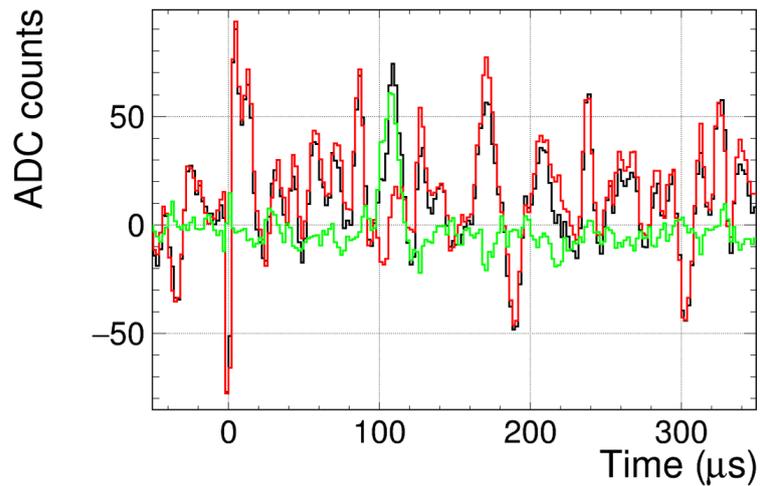
図 5.15 [110,112] μ s の基板ごとの電荷信号分布

図 5.16 XZ 平面 ch20 の電荷信号

Run24.3 の電荷信号の遷移について、図 5.17 の左側はデータ取得開始直後である 11/18 の 17 時に取得された信号で、右側はデータ取得終了直前である 11/20 の 19 時に取得されたものである。左右で信号の概要がほとんど変化していないことから、早稲田大学における運用では、少なくとも 50 時間は信号取得可能な純度が維持されたといえる。

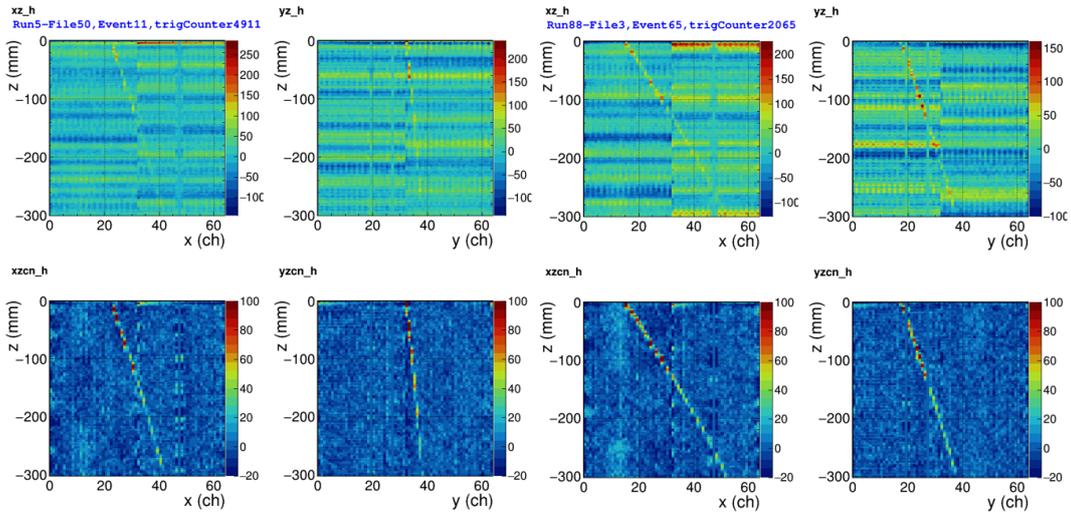


図 5.17 Run24.3 の開始時と終了時の電荷信号の比較

図 5.18 は, PreRun2 にて観測された LArTPC 信号である。それぞれの図は図 5.13 と対応している。電荷信号について, アノードと TIGAr Board の対応が早稲田大学で運用した時と異なっているため, 故障している ch の場所は X の 51・59 ch, Y の 15 ch となっている。ここで, YZ 平面について, 早稲田大学では観測されなかったノイズが存在している。このノイズの詳細は後述するが, 50 Hz な周期で観測されたため, 以降 50 Hz ノイズと呼称する。50 Hz ノイズの除去手段を以下に示す。

1. コモンノイズ除去後の波形に対して, 各時間ごとに, 横軸 ch・縦軸 ADC Count なヒストグラムを YZ 平面に対して作成する。
2. 1 で作成したヒストグラムに対して, ch14 までに指数関数で fit を行い, 得られた fit 成分を差し引く。50 Hz ノイズ除去前後における YZ 平面の波形を図 5.19 に示す。図 5.20 について, 左側は ch136 の信号波形であり, 黒がコモンノイズ除去後, 赤が 50 Hz ノイズ, 緑が 50 Hz ノイズ除去後の波形である。右側は高さ Z=-100 mm におけるコモンノイズ除去後の電荷分布であり, 赤線がそれに対する fit 成分である。

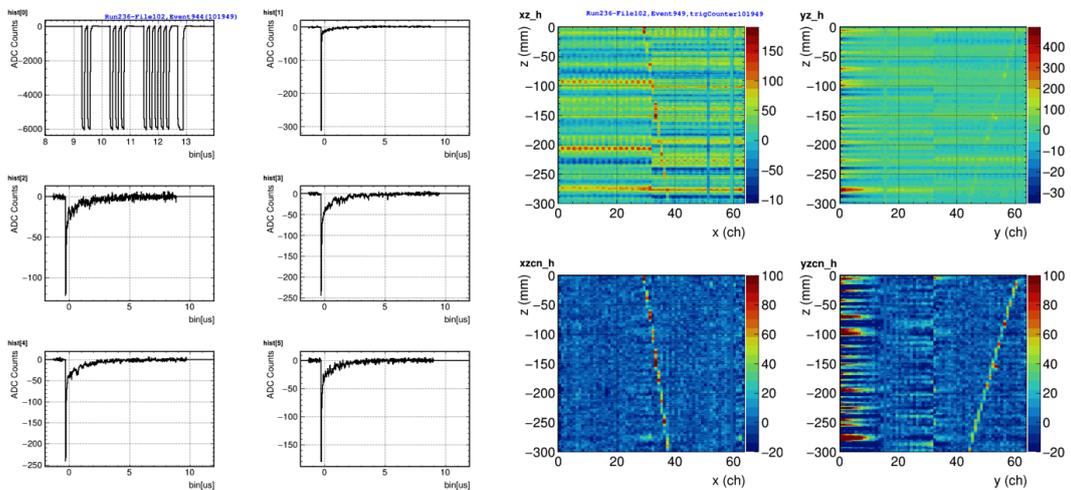


図 5.18 PreRun2 で観測された LArTPC 信号

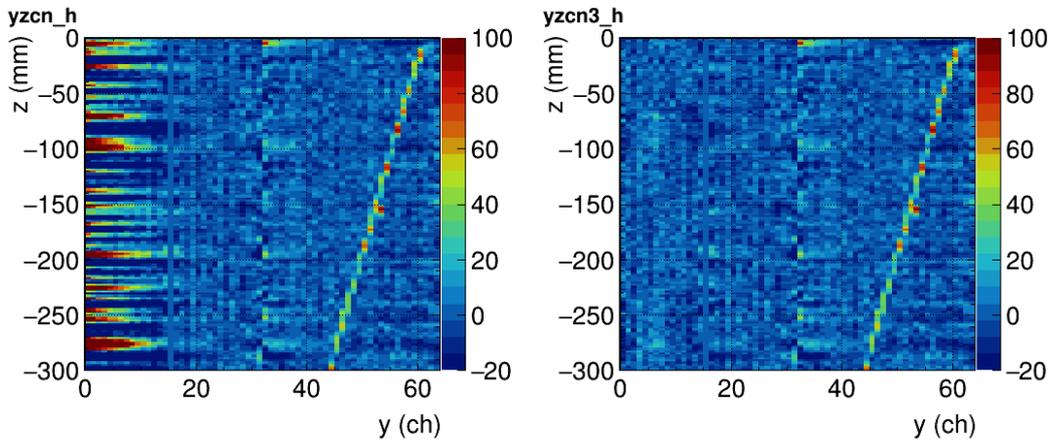


図 5.19 50Hz ノイズ除去前後の波形

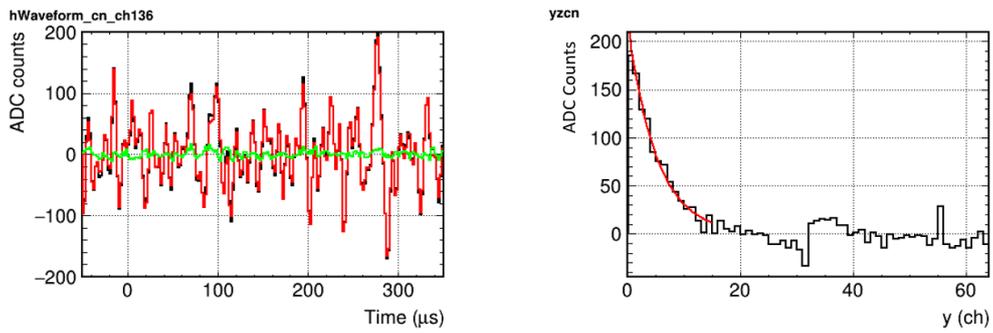


図 5.20 50Hz ノイズ除去前後の波形

図 5.21 の左側はデータ取得開始直後である 1/8 の 19:00 時に取得された信号で、右側はデータ取得終了直前である 1/9 の 18 時 30 分に取得されたものである。明確な飛跡の濃淡差が両者の間に確認されないことから、K1.8BR 上の運用で 24 時間の純度維持に成功したといえる。

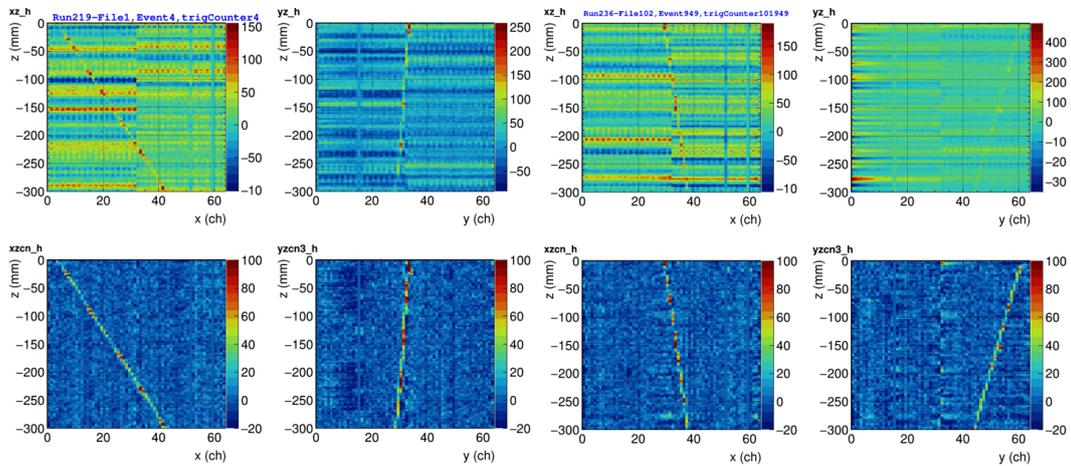


図 5.21 PreRun2 の最初と最後の電荷信号の比較

5.4.2 ノイズの大きさ

LArTPC で得られた電荷信号のノイズの大きさを, ch ごとの RMS によって評価した。RMS は, トリガー入力時間を 0 us として, [-50,-10] us の範囲を用いて導出した。初めに, Run24.3 の電荷信号に対する評価を行う。図 5.22 は 1000 event の RMS 分布を表している。左図は生波形, 右図はノイズ除去後に対する分布である。横軸について, [0,63] が X, [64,128] が Y の ch を表しており, 故障した ch は描画していない。各基板の端の ch の RMS が他と比較して大きな値だが, 全体的に生波形の RMS は 30 程度, コモンノイズ除去後は 5 程度に抑えられている。これらの値を用いると ENC は式 5.1 より以下の値となる。

$$\frac{5(30)[ADCCounts]}{2048[ADCCounts/V] \times 10[mV/fC] \times 1.6 \times 10^{-19}[C]} = 1525(9155)[e^-] \quad (5.1)$$

ここで, TIGAr Board1 をアルミ箱で遮蔽した状態で 1000 event 取得した際の ch ごとの RMS 分布を以下の図 5.23 に示す。図 5.23 より, TIGAr Board 単体の RMS は 2.5(表配線 18・裏配線 9), すなわち ENC は 750(表配線 5500・裏配線 2750) electron 程度であるといえる。LTARS2018_K06A の設計値が 4000 electron であるため, 表配線は ASIC の性能と比較して劣っている。図 5.24 は, 入力にキャパシタンスを設置した際の, 裏配線な ch2・表配線な ch3 の RMS を表している。本実験に用いた LArTPC の静電容量を LCR メータを用いて測定した結果が 100 pF 程度であることを考慮すると, LArTPC に接続した際のノイズレベルは 2000(12000) electron と想定される。以上の結果や先行研究 [7] との比較より, TIGAr Board は ASIC の性能を十分に発揮できていないが, 検出器に接続した際の S/N 比の悪化は期待通りであり, 解析的にコモンノイズを除去することによって性能と同等の S/N 比を実現可能といえる。

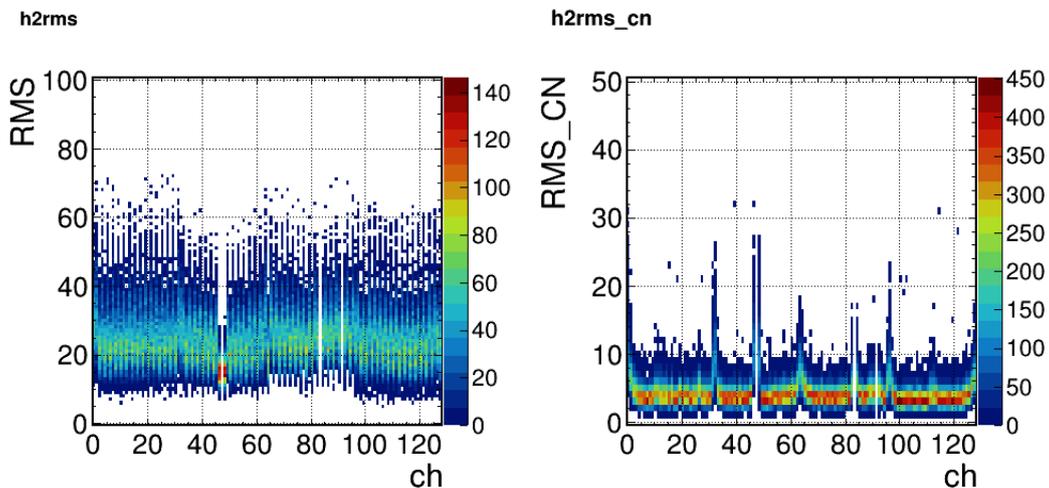


図 5.22 Run24.3 における ch 毎の RMS 分布

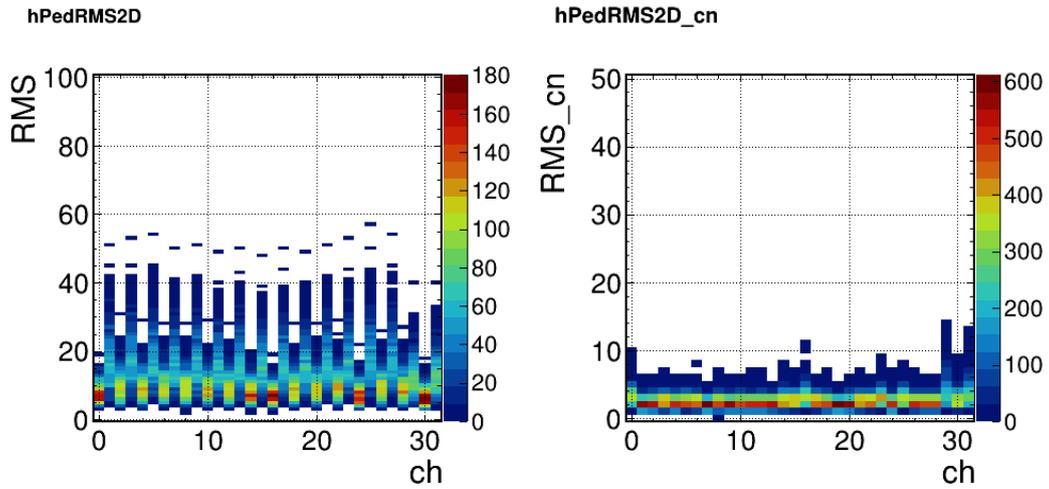


図 5.23 TIGAr Board 単体の RMS 分布

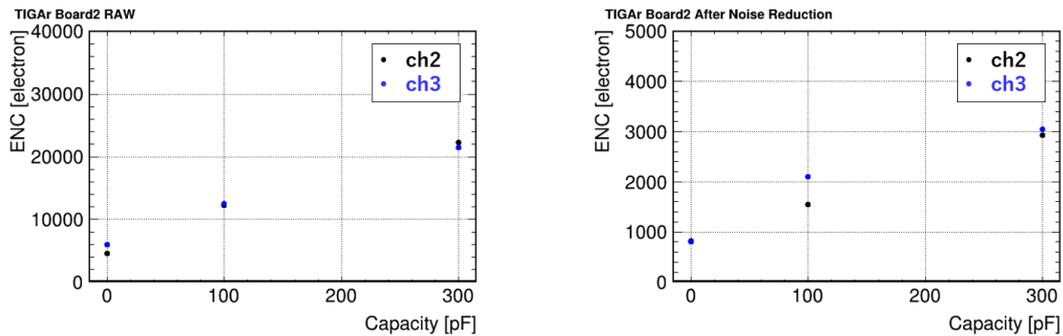


図 5.24 TIGAr Board の静電容量と ENC の関係

次に PreRun2 について、図 5.25 の左側に 10000 event に対する ch64 の RMS 分布を、右側に直前のイベントとの時間差の分布を示す。RMS 分布より、全イベントの RMS は $[0,10)$ 、 $[10,80)$ 、80 以上の 3 組に分布される。図 5.25 の右側について、黒は全イベント、赤は $[0,10)$ 、緑は $[10,80)$ 、青は 80 以上なイベントに対する時間間隔分布である。赤・緑・青の分布全てが 20 ms 間隔なピーク構造を持つことから、このノイズは 50 Hz 間隔で乗っているといえる。特に $RMS \in [0,10)$ な ch について、そのイベントでは図 5.21 の左側の ch64 のように信号は正常に読みだされなかった。

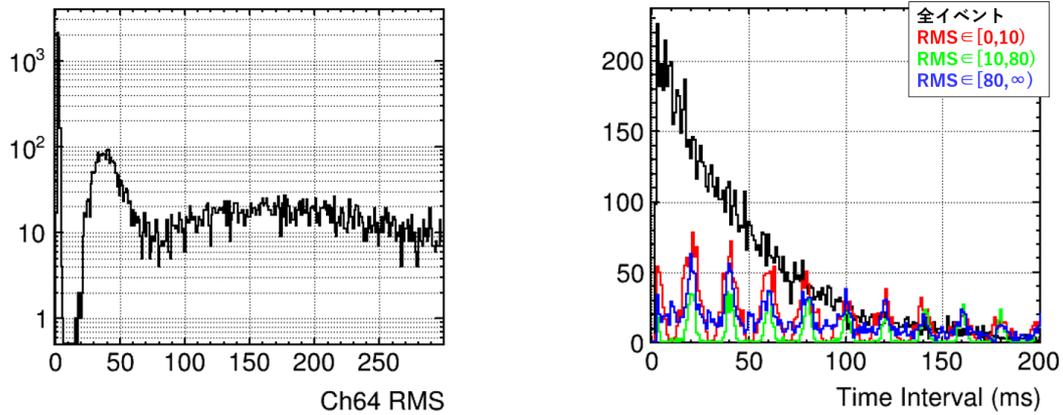


図 5.25 K1.8BR における ch64 の RMS 分布 (左), ch64 の RMS ごとのイベント時間差分布 (右)

図 5.26 は 1000 event に対する RMS 分布である。左は生波形, 中央は共通ノイズ除去後, 右は ch64 から ch78 に対して 50 Hz ノイズを除去した後の波形である。ここで, 中央及び右について, 生波形の RMS が 10 を下回る場合は除外している。このようなイベントは ch64 から 68 でのみ観測された。50 Hz ノイズは, 図 5.21 の右側のように, 主に YZ 平面の ch 番号が小さい側で観測された。50 Hz ノイズはその周波数から商用電源が関係している可能性が高い。なお, K1.8BR のドリフトチェンバーでは, 商用電源由来のノイズを落とすためにノイズカットトランスを導入している。

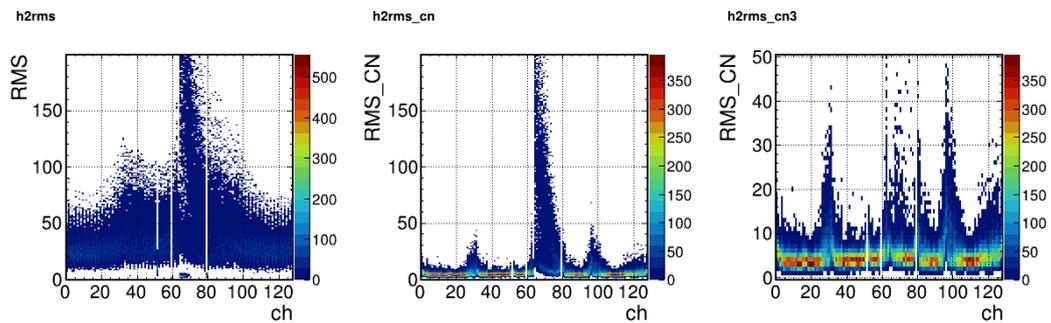


図 5.26 PreRun2 で観測された LArTPC の ch 毎の RMS 分布

PreRun2 実施後, TIGAr Board のグラウンド接続部の固定を強化して, 内部クロックトリガーを用いたデータ取得を行った。RMS 分布を図 5.27 に示す。それぞれの図は図 5.21 と同様である。50 Hz ノイズは大幅に軽減され, RMS $\in [0,10)$ なイベントは観測されなかった。Phase-2 実施時は K1.8BR 電磁石の動作などにより環境が変化するため, ノイズは悪化し得る。今後もノイズ落としの努力を続ける必要がある。

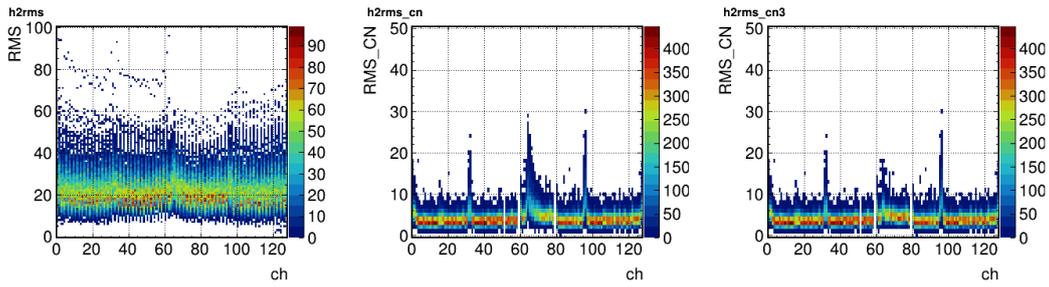


図 5.27 グラウンド強化後の LArTPC の ch 毎の RMS 分布

5.4.3 DAQ レート

宇宙線 LAr 試験では、信号レートがおおよそ 15Hz 程度となる条件を定常状態として安定したデータ取得を行った。Run24.3 では、定常状態だけではなく、FADC の閾値変化や線源使用など、複数の条件下でデータ取得を行った。FADC と TIGAr Board の DAQ レートの関係を図 5.28 に示す。図中の点の色は、1 イベント当りの FADC の平均 BLT 回数を表している。表 5.7 は、図 5.28 に使用されたそれぞれの Run の詳細を表している。ここで、PMT 閾値の単位は ADC Count であり、ペDESTAL の値は安定して 8665 ± 2 の範囲内に収まっていた。FADC、TIGAr Board、どちらも Phase-2 の目標である 100 Hz で、30 分以上の安定したデータ取得を達成した。

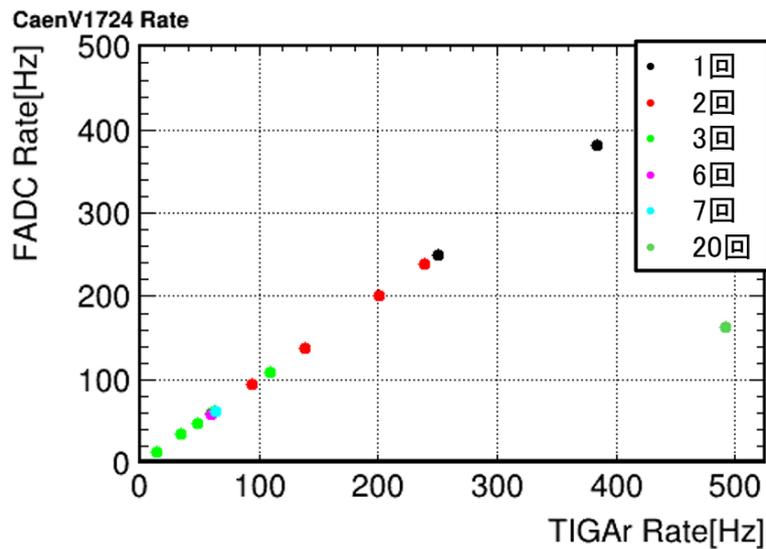


図 5.28 XZ 平面 ch20 の電荷信号

表 5.7 図 5.28 の Run の条件詳細

TIGAr Board DAQ レート	データ取得時間	平均 BLT 回数	PMT 印加電圧	PMT 閾値	使用線源
14 Hz	80 分	3 回	8630	600V	無し
34 Hz	4 分	3 回	8640	600V	無し
48 Hz	124 分	3 回	8630	750 V	NaI
60 Hz	4 分	3 回	8650	600 V	無し
60 Hz	6 分	6 回	8650	600 V	無し
63 Hz	5 分	3 回	8655	600 V	無し
64 Hz	4 分	7 回	8650	600 V	無し
64 Hz	5 分	6 回	8655	600 V	無し
94 Hz	3 分	2 回	8661	600 V	無し
109 Hz	38 分	3 回	8660	600 V	無し
138 Hz	4 分	2 回	8660	600 V	無し
201 Hz	14 分	2 回	8661	600 V	無し
239 Hz	9 分	2 回	8661	600 V	無し
250 Hz	3 分	1 回	8630	700 V	無し
381 Hz	27 分	1 回	8630	700 V	Co
492 Hz	4 分	20 回	8665	600 V	無し

6 K1.8BR との統合

前節にて構築した LArTPC の DAQ システムを K1.8BR に組み込み, Phase-2 を実現可能な DAQ システムを構成する。100Hz でイベント同期が可能な LArTPC DAQ システムを確立し, K1.8BR 上で正常な動作を確認したことを前節で述べた。本節では, この DAQ システムを K1.8BR に統合することについて述べる。

6.1 実験セットアップ

Phase-2 の検出器構成案を以下の図 6.1 に示す。E73 実験終了直後に実施するため, LHe Target やカロリメータなど撤去されるが, 他の検出器は引き続き使用される。BPC は Phase-1 実施時と違い 2 台使用されている。LArTPC は, LHe Target 移動後に, CVC 手前から CDS 下流直下に移動される。また, GRAMS 検出器を模倣して, ToF として BTC を LArTPC のフレームに固定して設置する。

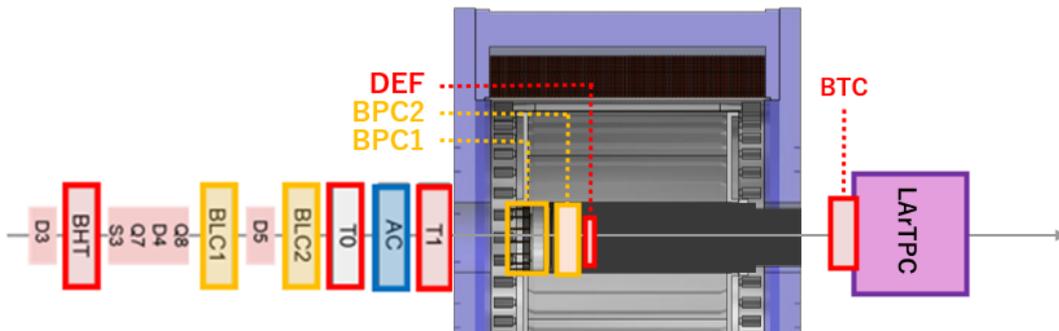


図 6.1 Phase2 検出器構成案

6.2 DAQ の構成

FADC を K1.8BR の VME システムに組み込み, TIGAr Board からのイベントカウントと LArTPC 光信号を QDC と同様に扱って K1.8BR サーバー上に保存することでイベント同期を行う。表 6.1 に DAQ 統合前後の LArTPC データ保存場所をまとめる。表 5.8 に示すように, 電荷信号のヘッダー情報にイベントカウントが含まれているため, 同期が可能である。トリガーには, K1.8BR トリガーと LArTPC トリガー (PMT) の論理積を用いる。

表 6.1 DAQ 統合前後の LArTPC データ保存場所

内容	統合前	統合後
電荷信号	T98	T98
光信号	T98	K1.8BR
イベントカウント	T98	T98, K1.8BR

現状の進捗は, FADC Caen V1724 を K1.8BR DAQ システムで認識できることを確認した段階である。取得データや DAQ レートの調整は今後の課題である。

7 考察

T98 実験は反粒子ビームを用いた LArTPC による反粒子識別手法検証実験であり, J-PARC K1.8BR にて行われている。1.0 GeV/c 反重陽子供給レート測定として 2023 年 6 月に Phase-1 が行われたが, 事象選択の結果, 候補は 1 event であった。この候補は BHT TOT の値が小さいことなどから背景事象と考えられる。仮に真に反重陽子と仮定した場合, 反重陽子供給レートは 1/1093 spill である。LArTPC のパイルアップを防ぐためにビームレートが 100Hz 程度に制限されるため, Phase-2 で反重陽子信号を観測するには O(100) 時間必要である。そのため, Phase-2 では反陽子ビームに集中し, 12 時間の [650,750] MeV/c 反陽子ビームを要求している。Phase-2 の目的は, 高統計 (10^5 以上) な反陽子捕獲事象を観測して, 反重陽子事象との明確な区別手法を確立することである。この目的を達成するためには, 100 Hz 以上で動作するイベント同期可能な DAQ システムが必要である。仮に 700 MeV/c 反陽子ビームのデータ取得を 12 時間・100 Hz で行うことに成功した場合, 観測される捕獲事象数は 4.6×10^5 程度と期待されており, これは目標を上回る。

本研究では, Phase-2 に向けた DAQ システムの設計・構築及び実証を行った。初めに, 早稲田大学の LArTPC セットアップに対して DAQ システムを構築し, LAr 試験にて動作検証を行った。結果として, 光信号と電荷信号の同期が可能, かつ 100 Hz で 30 分以上安定動作することを確認した。従って, この DAQ システムを組み込むことで, Phase-2 の要求は満たされると考える。先述の通り, 12 時間・100Hz のデータ取得で目標値以上の捕獲事象の観測が期待される。長時間の安定したビームが K1.8BR に供給される確率は極めて低いため, 目標以上のデータ数を取得可能な環境を事前に整えることの有用性は高い。

取得された電荷信号について, Run24.3 では充填直後と充填 50 時間後で, 明瞭な飛跡の濃度悪化が確認されなかったことから, 少なくとも 50 時間の純度維持が可能であると示された。ノイズの大きさについて, 生波形にはコモンノイズや 50 Hz ノイズが確認されたが, 解析的にノイズを除去することにより, 期待通りのノイズレベル (~ 10 ADC Counts) に低減されることが示された。特に, PreRun2 で顕著に観測された 50 Hz ノイズは, TIGAr Board のグラウンドを強化することで大幅に低減された。Phase-2 実施時は, ハドロンホールにビームが供給され PreRun2 と状況が変化するので, ノイズの特徴が変化し可能性がある。質の良いデータを取得するために, 構造的なノイズ落としの継続が求められる。

8 まとめと今後の展望

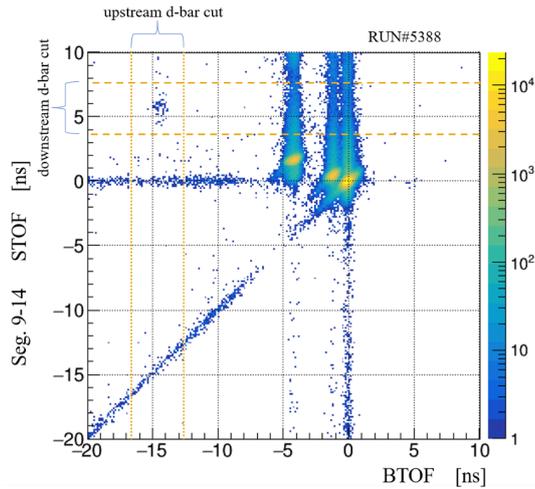
GRAMS 実験は宇宙線反粒子観測による暗黒物質間接探索を目的の一つとした気球・衛星実験である。早稲田大学では反重陽子に注目しており、1次生成が支配的と考えられている、核子当りの運動量が $O(100 \text{ MeV}/c)$ の領域にて探索を行う。主要な背景事象として反陽子が挙げられ、反重陽子のフラックスは反陽子と比較して約 $1/10^4$ 倍なフラックスだと予測されている。GRAMS 検出器には LArTPC が搭載されており、原子核捕獲・崩壊事象を検出することで、入射粒子の電荷識別を行う。この手法の有用性を実証するために、J-PARC ハドロンホール K1.8BR にて、LArTPC への反粒子ビーム照射試験 T98 実験が進められている。2023年6月に Phase-1 が行われ、反重陽子供給レートが測定されたが、LArTPC 試験を行うには不十分だと結論付けられた。従って、Phase-2 では確立済みの反陽子ビームを中心に要求している。

本研究は、Phase-2 に向けた DAQ システムの設計・構築及び実証を行った。Phase-2 の目的は、高統計 ($\sim 10^5$) な反陽子事象を観測して反重陽子事象との分離方法を確立することである。この目的を達成するために、100 Hz で動作するイベント同期可能な DAQ システムを作成した。LArTPC による宇宙線ミュオン観測試験を早稲田大学及び K1.8BR 上で行い、DAQ システムを含めた LArTPC 全体が 50 時間以上連続で正常に動作することを確認した。この DAQ システムを K1.8BR に組み込み、2025年2月末に実施予定の Phase-2 に臨む。

将来的には、2025年度にアメリカのアリゾナにて実施予定な気球実験 pGRAMS を経て、南極気球実験を目指す。

付録 A ハドロンホールにおける反重陽子観測

K1.8 における反重陽子供給レート測定は、2021 年 1 月及び 2024 年 5 月に行われている。2021 年では、MR64 kW、ビーム運動量 1.8 GeV/c で 30 分ほどデータ取得が行われ、 $0.30 \pm 0.04/\text{spill}$ の反重陽子 like な事象が観測された。このときの反陽子供給レートがおおよそ 0.3M/spill であったことから、反重陽子/反陽子比は約 10^{-6} という結果が得られた。結果を以下の図付録 A.1 に示す。



図付録 A.1 K1.8 における 2021 年 1 月の反重陽子レート測定結果 [19]

2021 年の測定では ESS1 のみ使用されたが、2024 年の測定では ESS2 も使用された。その結果、反陽子レートは 0.3M/spill から 1.6M/spill であったが、反重陽子レートはどちらも 0.3/spill 程度であった。このことから、測定条件を最適化することで、反陽子レート 1.6M/spill に対して反重陽子レートを 1.6/spill 程度に増加できることが期待されている。詳細な反重陽子供給レートは未測定であり、現在研究が進められている。

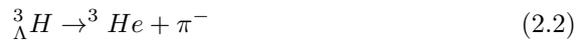
ハドロンホールにおける反重陽子供給レート測定結果の現状を以下の図付録 A.2 にまとめる。

Beam line	Momentum (GeV/c)	MR intensity /spill	\bar{d}/spill	\bar{p}/spill	\bar{d}/\bar{p} ratio	Slit opening IFV/MS1/MS2	Date
K1.8	1.8	70T	~ 0.30	300k	$\sim 10^{-6}$	2.2/5.0/5.0	June 2021
K1.8	1.8	72T	~ 0.34	1.5M	$\sim 0.2 \times 10^{-6}$	2.2/5.0/5.0	May 2024
K1.8BR	1.0	54T	$< 10^{-3}$	200k	$< 10^{-9}$	4.0/4.7/N.A.	June 2023

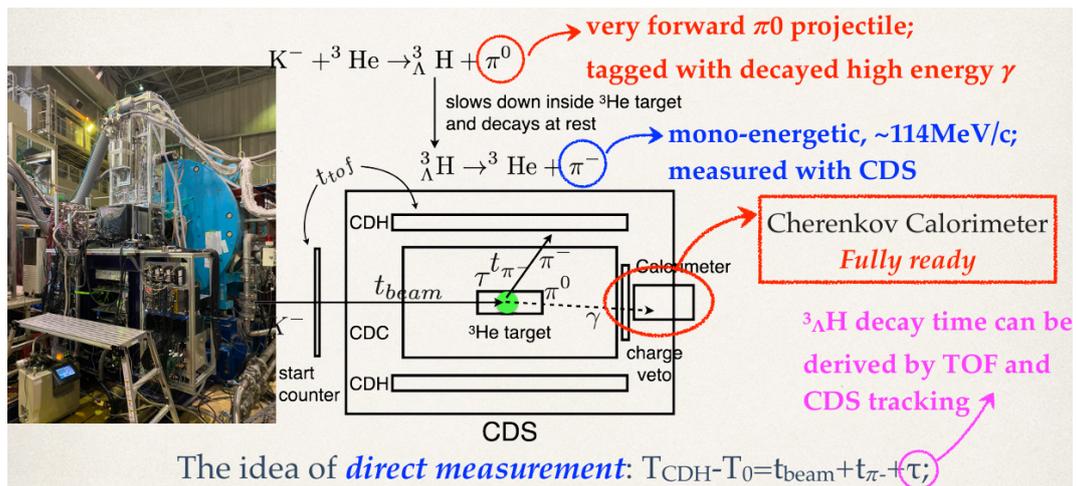
図付録 A.2 K1.8 における 2021 年 1 月の反重陽子レート測定結果 [25]

付録 B E73 実験概要

E73 実験の目的はハイパー核 ${}^3_{\Lambda}H$ の寿命測定である。ハイパー核は Λ ・中性子・陽子で構成された原子核であり、 Λ と同程度の寿命 (~ 263 ps) と考えられてきたが、HypHI 実験 (2013 年度) や ALICE 実験 (2016 年度) にて 180 ps 程度 [29][30], STAR 実験 (2018 年度) にて 140 ps 程度という結果が得られたことを受けて [28], 2018 年にプロポーザルが提出された。E73 実験は 2021 年に開始し, 2025 年 2 月中旬に終了した。CDS 内の He ターゲットに K^- 中間子ビームを入射して, 以下の反応の観測を目指す。



π^0 は崩壊後の 2γ を CDS 後方の Calorimeter で検出される。荷電粒子の通過の有無を確認するために, 前後に Veto 及び BTC が設置されている。 π^- は CDS を覆う形で配置された 36 層のプラスチックシンチレータ CDH で検出する。E73 実験セットアップ図を以下の図付録 B.1 に示す。



図付録 B.1 E73 セットアップ図 [27]

トリガーとして, E73 実験では以下も使用される。

- CDHn : CDH 全層のうち, n 層以上に hit があった際に有効となるトリガー
- Gamma : PbF2 にヒットがあり, かつ VETO にヒットが無い場合に有効となる, E73 の信号事象である $\pi_0 \rightarrow 2\gamma$ 反応を検出するためのトリガー
- Off-spill : ビーム粒子が来ない spill の後半側で入れている較正用のトリガーで, 2024 年春に行われた E73 実験ではクロック及び CDH と PbF2 の宇宙線トリガーの論理和で構成された
- spill start : スピルの始まりを表すトリガー
- spill end : スピルの終わりを表すトリガー

付録 C T98 Phase-2

2025年2月19日から21日にかけて、Phase-2が実施された。

C.1 DAQ

LArTPCの電荷信号は、TIGAr Boardで取得する。光信号の読み出しについて、K1.8BR DAQとの同期のためにFADC CaenV1724をK1.8BRのDAQに組み込む予定であったが、安定動作の実証が間に合わなかったため統合せずに取得した。そのため、イベントの同期にはTIGAr Boardの内部クロックカウントとK1.8BR スケーラーのクロック情報を用いて行う予定である。また、LArTPCのPMT信号はFADCへの入力の前段でDividerで分割しており、QDC・TDCに入力、及びトリガーとして使用した。

C.2 結果

Phase-2のタイムラインを示す。

- 2025年2月19日 22:00~34:00
静電分離機ESSやスリットの操作による供給ビームレート調整の後、83.5 kW・0.7 GeV/cな反陽子ビームを用いたLArTPCへの照射実験が行われた。E73実験終了直後に行われたため、ビームタイム中の検出器較正は行っていない。
- 2025年2月21日 12:00~24:00
83.5 kWの安定したビームが供給された。5時間の0.7 GeV/c反陽子データを取得した後、0.7 GeV/c陽子・1 GeV/c重陽子・1 GeV/c反陽子のデータを取得した。そして、最後の1時間で1 GeV/c K^- 中間子の測定を行った。

各電磁石の電流値および静電分離機ESS印加電圧を以下の表付録C.1にまとめる。0.7 GeV/c反陽子に条件を合わせるために、ESS印加電場は20 kV/cmに固定した。基本的には過去に使用した値をそのまま使用したが、0.7 GeV/c陽子だけはPhase-1で取得した値（運動量1.0 GeV/c, ESS電場20 kV/cm, CM電流196 A）をスケールリングして使用した。

標的粒子	K1.8D1(A)	D2(A)	CM1(A)	ESS(kV/cm)	CM2(A)	D3(A)	D4(A)	D5(A)
0.7 GeV/c 反陽子	-258	-488	246	20	246	146	-1325	-1164
0.7 GeV/c 陽子	258	488	243	20	243	-146	1305	1164
1 GeV/c 重陽子	369	698	306	20	306	-207	1946	1613
1 GeV/c 反陽子	-369	-698	207	20	207	205	-1948	-1651
1 GeV/c K^- 中間子	-369	-668	332	20	332	205	-1945	1651

表付録 C.1 Phase-2における電磁石および静電分離機の設定

データ取得日時及びトリガーを以下の表付録C.2まとめる。ここで、BeamはT0・T1・DEFのコインシデンスであり、Off-spillはLArTPCのPMTである。

表付録 C.2 Phase-1 にて取得した較正用データ

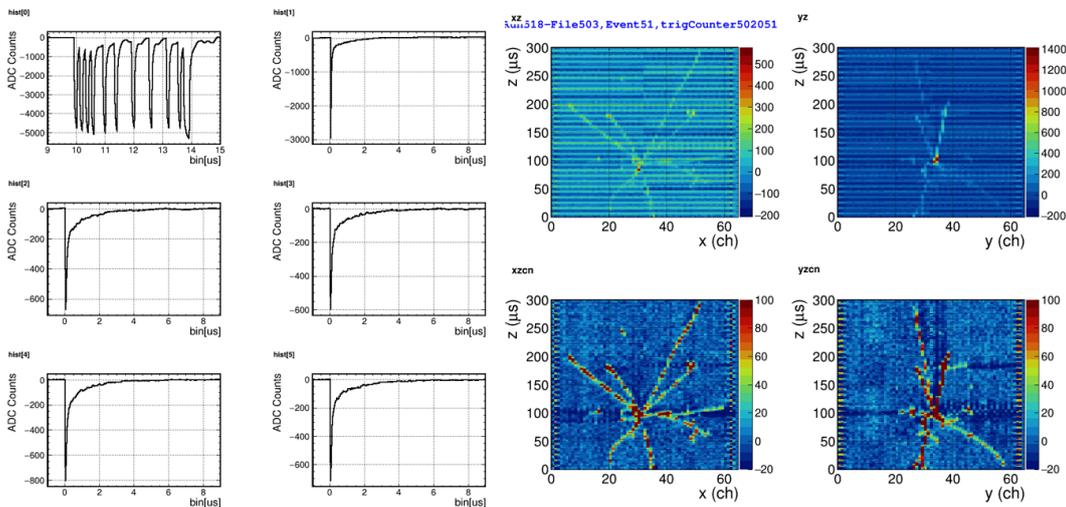
標的粒子	日付	時間	トリガー	取得イベント数
0.7GeV/c 反陽子	2/19	21:00~23:00	Kaon, Pion/40, Off-spill	2.6M
0.7GeV/c 反陽子	2/21	12:00~17:00	Kaon, Pion/40, Off-spill	1M
0.7GeV/c 陽子	2/21	17:00~18:00	Kaon, Off-spill	160k
1 GeV/c 重陽子	2/21	18:00~19:00	Kaon, Off-spill	160k
1 GeV/c 反陽子	2/21	19:50~23:00	Kaon, Pion/25, Off-spill	660k
1 GeV/c K^- 中間子	2/21	23:00~24:00	Kaon, Pion/25, Off-spill	160k

スリットの状態及びトリガーレートを表付録 C.3 に記す。ここで、トリガーレートは 1 spill あたりに鳴ったおおよその回数で表している。先述の通り, LArTPC 電荷信号のパイルアップを防ぐため, Beam のレートが 1000 強程度な状態でデータ取得を行った。

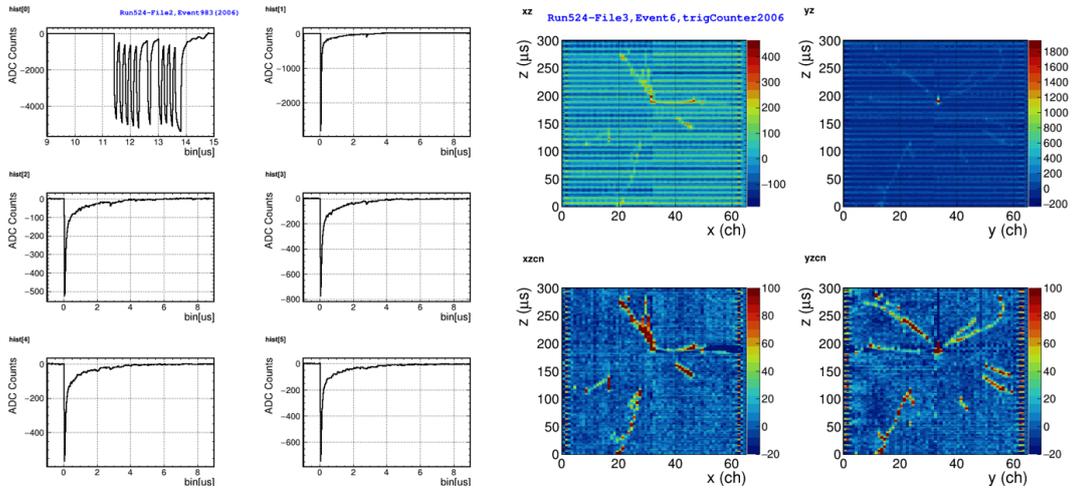
表付録 C.3 Phase-2 のスリットとトリガーレート

標的粒子	IF-Y [mm,mm]	IF-X [mm,mm]	MS1 [mm,mm]	Beam	Kaon
0.7GeV/c 反陽子 (2/19)	[-0.0346, 0.00863]	[-19.7, 19.5]	[-0.618, -0.588]	1200	300
0.7GeV/c 反陽子 (2/21)	[-0.0383, 0.00861]	[-19.8, 19.5]	[-0.619, 0.603]	1200	300
0.7GeV/c 陽子	[0.358, -0.397]	[-0.734, -0.103]	[-0.374, -0.364]	500	400
1 GeV/c 重陽子	[0.357, -0.396]	[-0.973, 0.670]	[0.374, -0.363]	500	300
1 GeV/c 反陽子	[-0.0233, -0.153]	[-4.01, 3.75]	[-0.600, -0.589]	1100	200
1 GeV/c K^- 中間子	[-0.0193, -0.153]	[-1.90, 1.65]	[-0.597, -0.584]	1000	300

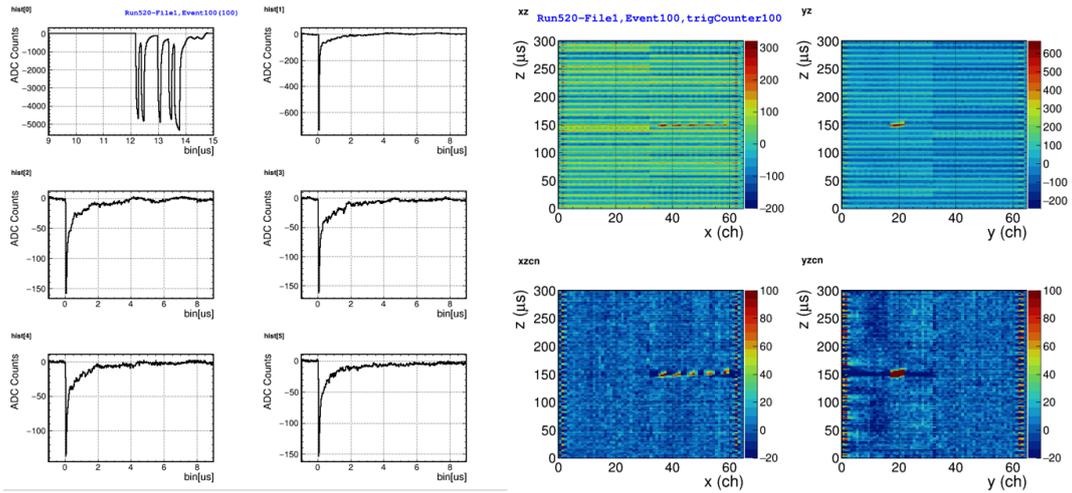
実際に観測された信号を以下に示す。ビームは, XZ 平面の ch の大きい側から入射する。先述した 50 Hz ノイズについて, 2/19 に取得した際は PreRun2 と同様なものが観測された。2/20 の昼に 200 L 容器内部からデータロガーに繋がるケーブルのトップフランジ付近の露出部分をアルミで覆ったところ, 大幅に改善した。図付録 C.1 から付録 C.5 は全て 2/21 に取得したイベントである。



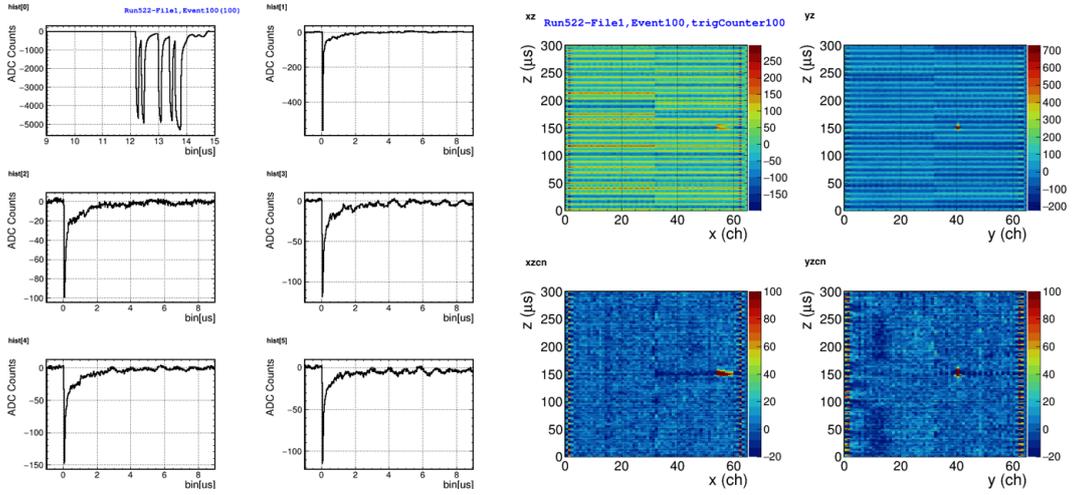
図付録 C.1 0.7 GeV/c 反陽子イベント



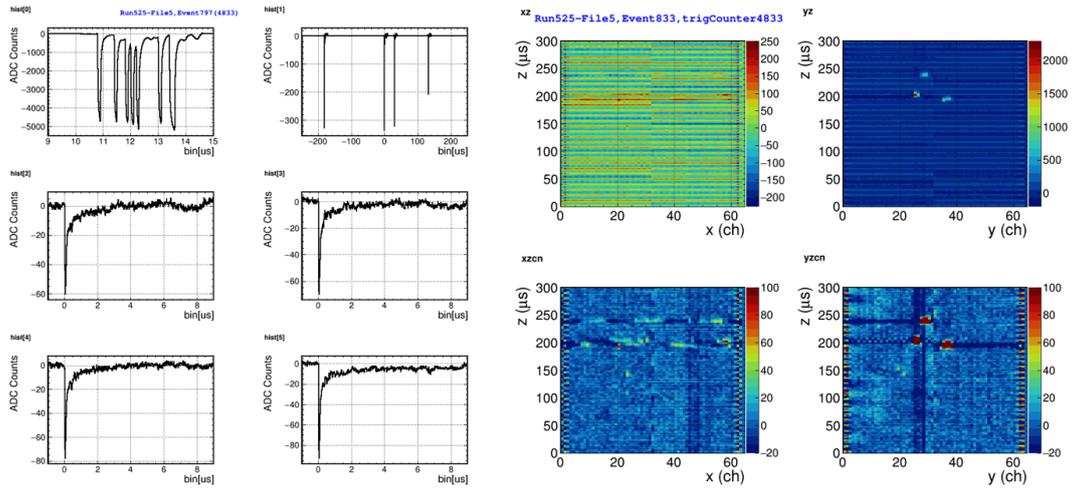
図付録 C.2 1.0 GeV/c 反陽子イベント



図付録 C.3 0.7 GeV/c 陽子イベント



図付録 C.4 1.0 GeV/c 重陽子イベント



図付録 C.5 1.0 GeV/c K^- 中間子イベント

謝辞

本研究を進めるにあたって支えてくださった皆様に感謝いたします。寄田浩平教授は、研究の機会を与えてくださり、研究に対する姿勢や考え方を教えていただきました。田中雅士さんは、ご多忙の中、研究の方針や手法を丁寧にしてくださいました。橋本さんを始めとするハドロンホールの方々や K1.8BR にいた学生の皆様には、J-PARC にて大変お世話になりました。秘書の坂本敦子さんには、出張や物品購入の手続きを行っていただきました。GRAMS グループの先輩の皆様には、実験やスライド作成で大変お世話になりました。同期の内海くん、荒川くん、小川くん、吉田くんとは、切磋琢磨しながら研究を進めることが出来ました。後輩の皆様には、様々な場面で手伝っていただきました。家族は、生活面を中心に支援をし続けてくださいました。

参考文献

- [1] F.Zwicky, *Helv. Phys. Acta*, 6 ,1933 110
- [2] First Planck results: the Universe is still weird and interesting
- [3] K. G. Begeman et al., " Extended rotation curves of spiral galaxies: dark haloes
- [4] P. Sikivie et al. *Phys. Rev. Lett.* 51 (1983) 1415
- [5] Laura Šerkšnytė et al. "Reevaluation of the cosmic antideuteron flux from cosmic-ray interactions and from exotic sources" *Rev. D* 105, 083021 – Published 27 April 2022
- [6] A. Ibarra, S. Wild, " Determination of the cosmic antideuteron flux in a monte carlo approach" ,*Physical Review D* 88 (2013)
- [7] 中村拓馬" NEWAGE 実験における陰イオン 3 次元飛跡検出器のための多チャンネル読み出し用集積回路の開発", 修士論文 2020 年, 神戸大学
- [8] S. Amoruso et al. " Study of electron recombination in liquid argon with the icarus tpc." , *Nucl.Instrum. Meth. A* 523 (2004) 275, 2004.
- [9] S. Amoruso et al., " Analysis of the liquid argon purity in the ICARUS T600 TPC" , *Nucl. Instrum. Meth. A* 516, 68–79 (2004).
- [10] M.Cui et al, "Possible Dark Matter Annihilation Signal in the AMS-02 Antiproton Data" ,*Phys. Rev. Lett.*,2017
- [11] M. Aguilar et al. ,*The Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) on the international space station: Part II— Results from the first seven years*, *Physics Reports* 894 (2021) 1–116
- [12] K. Abe et al, *MEASUREMENTS OF COSMIC-RAY PROTON AND HELIUM SPECTRA FROM THE BESS-POLAR LONG-DURATION BALLOON FLIGHTS OVER ANTARCTICA* ,2016 *ApJ* 822 65
- [13] K.Sakai et al, "Search for Antideuterons of Cosmic Origin Using the BESS-Polar II Magnetic-Rigidity Spectrometer", *Phys. Rev. Lett.*, 2024
- [14] T.Aramaki, Per Ola HanssonAdrian, G.Karagiorgi, H.Odaka, Dual MeV gamma-ray and dark matter observatory - GRAMS Project, *Astroparticle Physics*, 114, (2020), Pages 107-114
- [15] T. Aramaki et al., "Antideuteron sensitivity for the GAPS experiment", *Astroparticle Physics* Volume 74, 1 February 2016, Pages 6-13
- [16] Aramaki, T. et al. A measurement of atomic X-ray yields in exotic atoms and implications for an antideuteron-based dark matter search . *Astroparticle Physics* 49, 52– 62 (2013).
- [17] von Doetinchem, P. et al. The flight of the GAPS prototype experiment. *Astroparticle Physics* 54, 93–109 (2013).
- [18] M.Ukai et al., "Anti-deuteron beam study at J-PARC HEF K1.8 beam line", arXiv:2312.11821 (2023)
- [19] Y.Ma, F.Sakuma, "Letter of Intent for J-PARC: Study of antideuteron physics at K1.8BR beam line", *LoI*.2017-9, (2017)
- [20] T.Yamaga, "Study of a kaon bound nuclear state in the ${}^3\text{He}(\text{K}^-, \Lambda \text{p})\text{n}$ reaction at $\text{pK}^- = 1 \text{ GeV}/c$ ", 博士論文 2018 年, 大阪大学
- [21] 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, 早稲田大学
- [22] 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, 早稲田大学
- [23] 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, 早稲田大学
- [24] 清水虎冴, "J-PARC T98 実験 Phase-2 に向けた LArTPC 電子信号読み出し基板の開発と性能評価", 修士論文 2023 年, 早稲田大学
- [25] Y.Ma, "Test Experiment to Optimize \bar{d} Beam Intensity at the K1.8 Beam Line of the J-PARC Hadron Experimental Facility", 2024
- [26] Elena Aprile, Aleksey E. Bolotnikov, Alexander L. Bolozdynya, and Tadayoshi Doke., " Noble Gas Detectors" , Wiley, 2008.
- [27] Y.Ma, "E73 status report", 38th J-PARC PAC meeting, J-PARC, July 30th 2024
- [28] L. Adamczyk et al., "Measurement of the ${}^3_{\Lambda}H$ lifetime in Au+Au collisions at the BNL Relativistic Heavy Ion Collider", Phys. Rev. C, 97, 054909, (2018)
- [29] C. Rappold et al., "Hypernuclear spectroscopy of products from 6Li projectiles on a carbon target at 2AGeV", Nucl. Phys. A, 913, 170, (2013)
- [30] ALICE collaboration, " ${}^3_{\Lambda}H$ and ${}^3_{\Lambda}\bar{H}$ production in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV", Phys. Lett. B, 754, 360, (2016)

学籍番号: 5323A008-1

研究活動の不正行為 定義確認書

2025年 1月 27日

早稲田大学大学院先進理工学研究科長 殿

早稲田大学大学院先進理工学研究科

物理学及応用物理学 専攻 2年

本人氏名 石川皓貴

(自署)

私は、裏面に記載のある研究活動の不正行為に関する定義を理解し、修士論文提出において、不正行為を一切行っていないことを誓約します。

なお、当該行為を行なうと、厳重な処分（無期停学・当該学期成績無効・修士論文不合格等）を受けること、学位取得後であっても学位取消となることを十分に認識した上で、論文を執筆しました。

研究倫理教育受講確認書

2025年 1月 27日

本人氏名 石川皓貴



私は、修士論文の執筆にあたり、以下の研究倫理教育を受講しました。

	GEC 設置科目 「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。