

修士学位論文

T2K 実験・前置ニュートリノ検出器
WAGASCI / Baby MIND の改良
およびデータの収集

指導教員 角野秀一 教授

2025年 1月 10日 提出

東京都立大学大学院

理学研究科 物理学専攻

学修番号 23844416

氏名 関矢 拓郎

概要

T2K 実験は長基線加速器ニュートリノ振動実験である。茨城県東海村にある J-PARC から岐阜県飛騨市神岡町に位置する後置検出器であるスーパーカミオカンデへニュートリノビームを打ち込む。この際、J-PARC 側の前置検出器群で振動前のニュートリノを、スーパーカミオカンデで振動後のニュートリノを観測している。T2K 実験の更なる精度の向上には、統計量の増加と系統誤差の削減が課題である。

T2K 実験の前置ニュートリノ検出器 ND280 は大角度に散乱された粒子に対する検出効率が低いという弱点がある。これに対し、水をニュートリノ標的として、シンチレータを格子状に組むことで全方向に高い検出効率でニュートリノ反応を検出するニュートリノ検出器である WAGASCI と、大角度に散乱した荷電粒子の飛跡、運動量の観測を目的としたミューオン飛程検出器である Wall MRD、BabyMIND が開発された。これらの検出器でニュートリノと水標的の反応を全方向に高い検出効率で測定することで、ニュートリノ反応による系統誤差を削減することが WAGASCI 検出器群の目的である。WAGASCI はニュートリノと水標的の反応断面積を測定することを目的とした検出器で T2K 実験ニュートリノ振動解析における系統誤差の削減を目指している。

本研究では、2023 年 11 月から行われた T2K 実験 run13 および 2024 年 11 月から行われた run14 に向けて、WAGASCI 検出器群の準備を行い、ニュートリノビームデータを取得した。

ビーム準備では、安定したデータ取得を目指すために WAGASCI の上部構造体の改良を行った。これは下流 WAGASCI の上部構造体に設置された読み出しエレクトロニクスにてデータ取得ができなくなるという問題に対処するための改良である。これにより、WAGASCI のデータ取得の運用状況が改善を実現させた。

また、取得したデータのうち、run13 の 11 月期と 2 月期ではニュートリノビーム由来の 8 バンチ構造を確認することができた。しかし、run13 の 6 月期と run14 では WAGASCI と Wall-MRD において 8 バンチ構造を確認できなかった。これに対して、timing plot の出力を通して WAGASCI のデータ収集システムの評価を行った。これにより、CCC に問題があると考え、新しい CCC に交換した。しかし、run14 にて 8 バンチ構造は確認できなかった。問題はまだ解決していないが、2024 年 6 月以降の 8 バンチ構造を確認出来ないデータについて、物理解析に利用可能であるか評価を行った。

目次

1	序論	9
1.1	ニュートリノについて	9
1.2	ニュートリノ振動について	10
2	T2K 実験	12
2.1	T2K 実験の概要	12
2.2	ニュートリノ生成部	12
2.2.1	陽子加速器群	13
2.2.2	ニュートリノビームライン	14
2.2.3	ビームのバンチ構造と GPS	15
2.3	Off-axis 法	15
2.4	前置検出器群	18
2.4.1	ND280 実験ホール	18
2.4.2	INGRID	19
2.4.3	ND280	20
2.4.4	WAGASCI 検出器群	22
2.5	スーパーカミオカンデ	23
3	WAGASCI 検出器群	25
3.1	目的	25
3.2	WAGASCI 検出器群	25
3.2.1	WAGASCI (WATER Grid And SCIntillator)	26
3.2.2	Proton Module	27
3.2.3	Wall MRD (Muon Range Detector)	28
3.2.4	Baby MIND (Magnet Iron Neutrino Detector)	29
4	エレクトロニクス	32
4.1	MPPC(Multi-Pixel Photon Counter)	32
4.1.1	構造	32
4.1.2	動作原理	33
4.1.3	基本動作	35
4.1.4	特性	36
4.2	WAGASCI、Wall-MRD のエレクトロニクス	38
4.2.1	フロントエレクトロニクス	38
4.2.2	エレクトロニクスの配置	42
4.2.3	各種情報の記録	42
4.3	BabyMIND のエレクトロニクス	44
4.3.1	フロントエレクトロニクス	44

4.3.2	エレクトロニクスの配置	46
5	ビームデータの取得状況	47
5.1	run13 に向けての準備作業	47
5.1.1	WAGASCI WallMRD	47
5.1.2	Baby MIND	48
5.2	run13 の取得データの評価	50
5.3	run14 に向けての準備作業	51
5.3.1	WAGASCI WallMRD	51
5.3.2	Baby MIND	52
5.4	run14 の取得データの評価	52
5.5	まとめ	53
6	WAGASCI の上部構造体の改良	54
6.1	目的	54
6.2	データ取得停止の原因推定	55
6.3	DWG 上部構造体への新規構造物の追加	57
6.3.1	DWG Top の設置方法	57
6.3.2	新規構造物のデザイン	58
6.3.3	新規構造物の設計、および製図	59
6.3.4	DWG Top への設置	62
6.3.5	データ取得と評価	63
6.4	内部ケーブルの交換	64
6.4.1	ケーブル交換の作業	65
6.4.2	データ取得状況の確認	65
6.4.3	データ取得と評価	67
6.5	まとめ	68
7	WAGASCI / Wall-MRD における時間情報システムの評価	69
7.1	目的	69
7.2	timing plot の出力による原因推定	71
7.2.1	timing plot の出力	72
7.2.2	データの評価	74
7.2.3	原因推定	80
7.3	run14 に向けて実施した対処とその成果	80
7.3.1	CCC の交換	80
7.3.2	交換後のデータ取得と評価	81
7.3.3	FPGA の書き換えによるデータ取得と評価	83
7.4	物理解析用データとしての有用性評価	85
7.4.1	ADC 分布図の比較	85
7.4.2	時間情報の有無による解析の影響	85
7.5	まとめ	87

目次

1.1	標準模型の一覧 [1]	9
2.1	T2K 実験の概要図 [3]	12
2.2	J-PARC と加速器の概要図 [4]	13
2.3	RCS と MR への陽子ビーム入射の概要図 [4]	14
2.4	(a) ビームのバンチ構造 (b) 観測されたビーム由来のデータの一例	15
2.5	異なる off-axis angle での荷電 π 中間子の運動量 p_π と生じるニュートリノのエネルギー E_ν を示す。0° は on-axis であり、それ以外が off-axis である。	16
2.6	(a) $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ と (b) $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の振動確率のエネルギー依存性と、(c) 異なる OA (off-axis angle) でのニュートリノフラックス	17
2.7	ND280 実験ホールと各前置検出器の位置	18
2.8	INGRID の概要図	19
2.9	ND280 の概要図	20
2.10	FGD の XY モジュールのイメージ図	21
2.11	SK の外観 [9]	23
2.12	SK のイベントディスプレイ [10]	24
3.1	WAGASCI 検出器群の概略図	25
3.2	WAGASCI モジュールの外観	26
3.3	パラレルシンチレータ (上) とグリッドシンチレータ (下) の構造	27
3.4	WAGASCI モジュールの構造	27
3.5	Proton Module	28
3.6	Wall MRD	28
3.7	Baby MIND の外観	29
3.8	Magnet Module の外観 [11]	30
3.9	Magnet Module のコイルの巻き方の概要図 [11]	30
3.10	鉄の前面から見た磁場分布 [11]	31
3.11	X 層、Y 層のシンチレータに埋め込まれたファイバーと MPPC(黄色い部分)[11]	31
4.1	(a)Array 型 MPPC (b)Single 型 MPPC	32
4.2	MPPC の構造	33
4.3	空乏層	34
4.4	電子-正孔対の生成	34
4.5	APD の内部構造	35
4.6	データ収集システムの概略図	38
4.7	ASU	38
4.8	IF	39
4.9	DIF	40
4.10	GDCC および CCC	41
4.11	Single MPPC Card	41

4.12	WAGASCI、 Wall-MRD の各エレキの配置図 [8]	42
4.13	時間情報記録システムの概要図	43
4.14	FEB	44
4.15	MCR	45
4.16	BabyMIND のデータ取得システムの概要図 [11]	46
5.1	(a)Wall-MRD north top、 (b)WAGASCI upstream top の ADC 分布図	48
5.2	カメラの設置位置	48
5.3	設置した 2 台のカメラから見える画像	49
5.4	channel ごとの検出光子の様子を示した波高分布の例	49
5.5	11 月期 (2023/12/1) における (a)Wall-MRD north top、 (b)WAGASCI upstream top の BCID 分布図	50
5.6	2 月期 (2024/2/13) における (a)Wall-MRD north top、 (b)WAGASCI upstream top の BCID 分布図	50
5.7	6 月期 (2024/6/12) における (a)Wall-MRD north top、 (b)WAGASCI upstream top の BCID 分布図	50
5.8	(a)11 月期 (2023/12/1)、 (b)2 月期 (2024/2/13)、 (c)6 月期 (2024/6/12) における BabyMIND の timing plot	51
5.9	2024/11/28 における、 (a)Wall-MRD north top、 (b)WAGASCI upstream top の BCID 分布図	52
5.10	2024/11/28 の BabyMIND の timing plot	53
6.1	DWG Top を示す CAD モデル	54
6.2	データ取得の失敗例	54
6.3	開閉途中の DWG の上部構造体とカバー	55
6.4	装置内部の写真	56
6.5	DWG Top の構造物の CAD モデル	57
6.6	BAR の各ねじ穴の用途	58
6.7	装置内部の写真	58
6.8	新規構造物の概要図	59
6.9	新規構造物の CAD モデル	59
6.10	新規構造物を設置後の DWG Top のモデル図	60
6.11	LONG BAR の設計図	61
6.12	SHORT BAR の設計図	61
6.13	新規構造物を設置した DWG Top	62
6.14	元の構造物と新規構造物との間を遮光した様子	62
6.15	11/27 に取得した DWG Top のデータ	63
6.16	2023/12/13 に発生した DWG Top のデータ取得が突然停止している様子	64
6.17	ケーブル交換の実施の様子 (左：実施前、 右：実施後)	65
6.18	電圧の印加を示す画面	65
6.19	データ取得状況を示す画面	66
6.20	2/16 に取得した DWG Top のデータ	67
6.21	下流 WAGASCI を含むデータ伝送速度の一例	67

7.1	2024/6/12 の BCID 分布図、(a)Wall-MRD North top、(b)Wall-MRD North bottom、 (c)Wall-MRD South top、(d)Wall-MRD South bottom	69
7.2	2024/6/12 の BCID 分布図、(a)UWG Up、(b) UWG Side、(c) DWG Top、(d) DWG Side	70
7.3	9 つのピークに番号を振った BCID 分布図	71
7.4	BabyMIND で取得した 2024/6/12 の timing plot	72
7.5	時間情報の記録の様子	73
7.6	TDC ramp の不感時間 (灰色の箇所)	73
7.7	2023/12/1 の BCID 分布図と timing plot、(a)Wall-MRD North top、(b)Wall-MRD North bottom、(c)Wall-MRD South top、(d)Wall-MRD South bottom	74
7.8	2023/12/1 の BCID 分布図と timing plot、(a)UWG Up、(b) UWG Side、(c) DWG Top、(d) DWG Side	75
7.9	2024/2/13 の BCID 分布図と timing plot、(a)Wall-MRD North top、(b)Wall-MRD North bottom、(c)Wall-MRD South top、(d)Wall-MRD South bottom	76
7.10	2024/2/13 の BCID 分布図と timing plot、(a)UWG Up、(b) UWG Side、(c) DWG Top、(d) DWG Side	77
7.11	2024/6/12 の BCID 分布図と timing plot、(a)Wall-MRD North top、(b)Wall-MRD North bottom、(c)Wall-MRD South top、(d)Wall-MRD South bottom	78
7.12	2024/6/12 の BCID 分布図と timing plot、(a)UWG Up、(b) UWG Side、(c) DWG Top、(d) DWG Side	79
7.13	WAGASCI と Wall-MRD のデータ取得システムの概要図	80
7.14	2024/11/28 の BCID 分布図と timing plot、(a)Wall-MRD North top、(b)Wall-MRD North bottom、(c)Wall-MRD South top、(d)Wall-MRD South bottom	81
7.15	2024/11/28 の BCID 分布図と timing plot、(a)UWG Up、(b) UWG Side、(c) DWG Top、(d) DWG Side	82
7.16	2024/12/5 の BCID 分布図と timing plot、(a)Wall-MRD North top、(b)Wall-MRD North bottom、(c)Wall-MRD South top、(d)Wall-MRD South bottom	83
7.17	2024/12/5 の BCID 分布図と timing plot、(a)UWG Up、(b) UWG Side、(c) DWG Top、(d) DWG Side	84
7.18	(a)2023/12/1、(b)2024/6/12 の UWG Top の ADC 分布図	85
7.19	飛跡の様子を示す概略図	86

第 1 章 序論

1.1 ニュートリノについて

ニュートリノは電荷を持たないレプトンであり、スピン 1/2 のフェルミオンである。素粒子物理学の標準模型において、ニュートリノは電子ニュートリノ (ν_e)、ミューニュートリノ (ν_μ)、タウニュートリノ (ν_τ) の 3 種類のフレーバーを持つ。

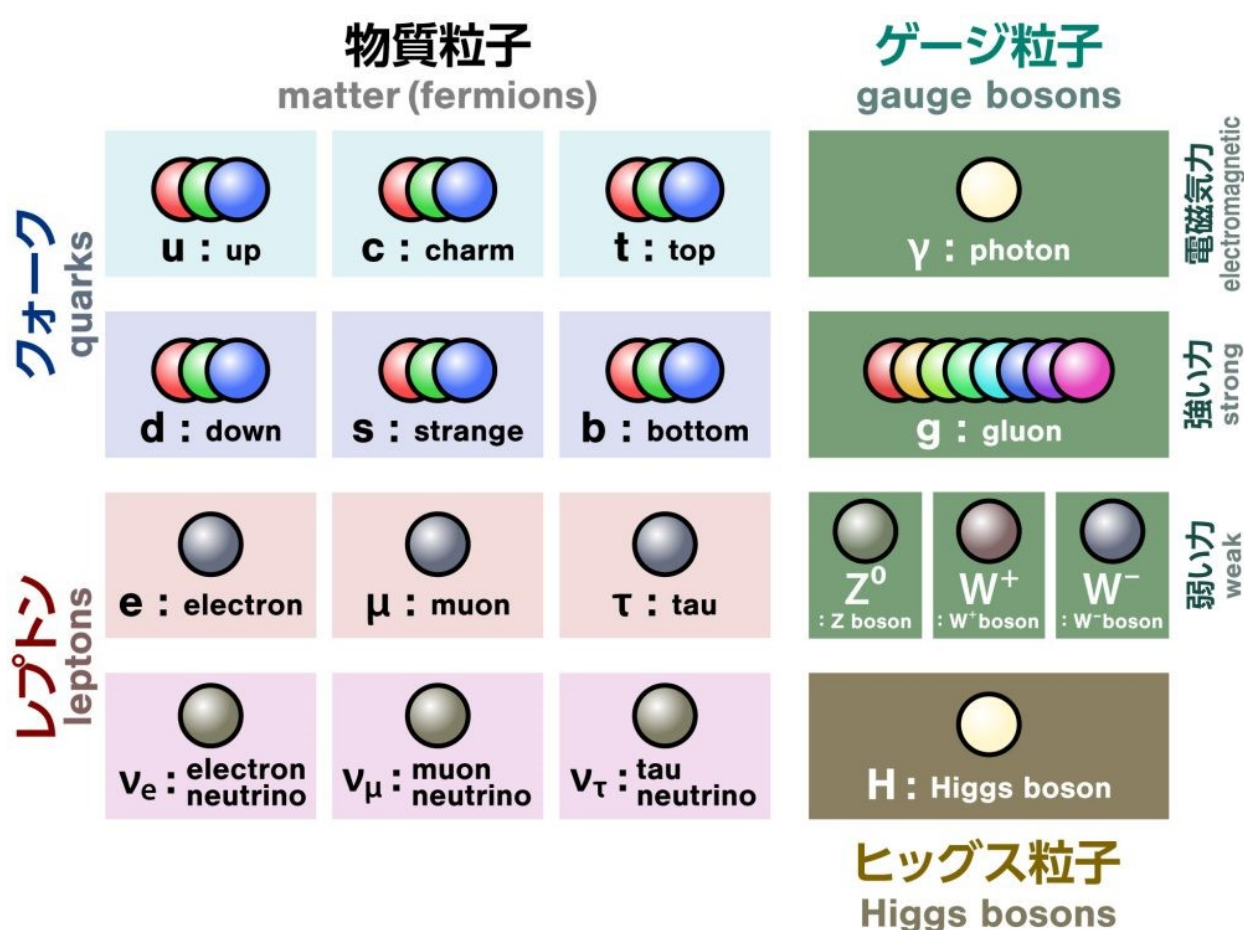


図 1.1 標準模型の一覧 [1]

ニュートリノの歴史について以下、簡単に述べる。

1930 年、オーストリアの物理学者 Pauli が β 線のエネルギー分布の研究をしている際に、エネルギーが保存されないことを発見した。エネルギーを持ち去ってしまう粒子が存在するのではないか、という観点からニュートリノが考えられ、1933 年にイタリアの物理学者 Fermi によって、「ニュートラル」（中性、つまり電気を帯びていないという意）と「イノ」（小さいという意）からニュートリノと名付けられた [2]。

その後、1956 年にアメリカの物理学者 Reines、Cowan らが原子炉から生まれるニュートリノを捕らえることに成功した。これがニュートリノを観測した初めての出来事である。

1970 年代には太陽内の核反応で生成されるニュートリノ、太陽ニュートリノが Homestake 実験で観測されるが、これが理論値の 1/3 程度しか観測されずに問題とされた。この問題は 1.2 節で述べる

ニュートリノ振動が実証されたことで解決に至った。

1987年には、後述のスーパーカミオカンデの前身の検出器であるカミオカンデが超新星爆発で発生したニュートリノの観測に成功し、ニュートリノ天文学という新たな学問の誕生、発展に至った。1998年、ニュートリノ振動がスーパーカミオカンデ実験にて観測され、ニュートリノに質量があることが発見された。

1.2 ニュートリノ振動について

ニュートリノ振動とは、ニュートリノが空中を伝搬する際に、別のフレーバーに変化する現象である。ニュートリノのフレーバーが3種類るときニュートリノの質量固有状態とフレーバー固有状態の関係は、

$$\begin{pmatrix} |\nu_1\rangle \\ |\nu_2\rangle \\ |\nu_3\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{\mu 1} & U_{\tau 1} \\ U_{e2} & U_{\mu 2} & U_{\tau 2} \\ U_{e3} & U_{\mu 3} & U_{\tau 3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |\nu_e\rangle \\ |\nu_\mu\rangle \\ |\nu_\tau\rangle \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

ここで、 $|\nu_1\rangle, |\nu_2\rangle, |\nu_3\rangle$ は質量固有状態、 $|\nu_e\rangle, |\nu_\mu\rangle, |\nu_\tau\rangle$ はフレーバー固有状態を表す。行列 U はユニタリー行列であり、提唱者の名前をとって、ポンテコルボ-牧-中川-坂田行列 (PMNS 行列) と呼ばれる。PMNS 行列は、3つの混合角 $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$ と CP 位相 δ で次のようにパラメータ化される。

$$\begin{aligned} U_{\text{PMNS}} &\equiv \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{\mu 1} & U_{\tau 1} \\ U_{e2} & U_{\mu 2} & U_{\tau 2} \\ U_{e3} & U_{\mu 3} & U_{\tau 3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \quad (1.2) \end{aligned}$$

ここで、 $s_{ij} \equiv \sin \theta_{ij}$, $c_{ij} \equiv \cos \theta_{ij}$ である。ニュートリノ振動について簡単のため、 ν_e と ν_μ の2世代の振動を考える。2つのフレーバーの固有状態は混合角 θ を用いて以下のように表せる。

$$|\nu_e\rangle = \cos \theta |\nu_1\rangle + \sin \theta |\nu_2\rangle \quad (1.3)$$

$$|\nu_\mu\rangle = -\sin \theta |\nu_1\rangle + \cos \theta |\nu_2\rangle \quad (1.4)$$

また、ニュートリノが運動量 p を持つとするとニュートリノの質量は十分に小さいため、

$$E_i = \sqrt{p^2 + m_i^2} \simeq p + \frac{m_i^2}{2p} \quad (1.5)$$

と表される。このとき、それぞれの波動関数の発生してからの時間 t における時間発展は、単位系をプランク単位系とすると、

$$|\nu_e\rangle = \cos \theta |\nu_1(0)\rangle \exp(-iE_1 t) + \sin \theta |\nu_2(0)\rangle \exp(-iE_2 t) \quad (1.6)$$

$$|\nu_\mu\rangle = -\sin\theta|\nu_1(0)\rangle \exp(-iE_1t) + \cos\theta|\nu_2(0)\rangle \exp(-iE_2t) \quad (1.7)$$

となる。よって、時刻 $t=0$ で発生した電子ニュートリノ ν_e が時刻 t でミューニュートリノ ν_μ に変化する確率 $P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu)$ は、

$$\begin{aligned} P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) &= |\langle \nu_\mu | \nu_e(t) \rangle|^2 \\ &= \frac{1}{2} \sin^2 2\theta \{1 - \cos((E_1 - E_2)t)\} \\ &= \frac{1}{2} \sin^2 2\theta \left\{ 1 - \cos\left(\frac{|m_1^2 - m_2^2|}{2E}t\right) \right\} \\ &= \frac{1}{2} \sin^2 2\theta \left\{ 1 - \cos\left(\frac{\Delta m^2}{2E}t\right) \right\}, \end{aligned} \quad (1.8)$$

となる。また、 ν_e がそのままである確率 $P(\nu_e \rightarrow \nu_e)$ は、

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e) = 1 - P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \frac{1}{2} \sin^2 2\theta \left\{ 1 - \cos\left(\frac{\Delta m^2}{2E}t\right) \right\} \quad (1.9)$$

となる。質量固有状態に混合があるためには複数の質量固有状態が必要である。そのため、式 (1.8)、(1.9) より、ニュートリノのフレーバー固有状態と質量固有状態があり、異なる質量固有状態間に混合が存在する場合、すなわち、 $\theta \neq 0$ 、 $\Delta m^2 \neq 0$ のとき、 $P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) \neq 0$ 、 $P(\nu_e \rightarrow \nu_e) \neq 1$ となり、ニュートリノ振動が起こる。

第 2 章 T2K 実験

2.1 T2K 実験の概要

T2K(Tokai-to-Kamioka) 実験は長基線加速器ニュートリノ振動実験である。図 2.1 に T2K 実験の概略図を示す。茨城県東海村に位置する J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex : 大強度陽子加速器施設) でニュートリノビームを生成し、280 m 下流の前置検出器で振動前のニュートリノを、295 km 離れた岐阜県飛騨市に位置する後置検出器スーパーカミオカンデ (SK) によって振動後のニュートリノを観測している。T2K 実験の主な目的は、ニュートリノ振動パラメータの高い精度での決定と未発見のレプトンセクターにおける CP 対称性の破れの検証である。



図 2.1 T2K 実験の概要図 [3]

2.2 ニュートリノ生成部

T2K 実験では、J-PARC の陽子加速器で 30 GeV まで加速した陽子を炭素ターゲットに衝突させることによって生じた荷電 π 中間子の崩壊によって生成されたニュートリノを使用する。J-PARC の陽子加速器は 3 段で構成されており、本節では 3 段の加速器群とニュートリノビームラインについて述べる。

2.2.1 陽子加速器群

ニュートリノの生成に用いる陽子加速器群は上流から LINAC、RCS、MR の 3 段の加速器で構成される。図 2.2 は J-PARC と加速器の概要図である。



図 2.2 J-PARC と加速器の概要図 [4]

以下 3 段の加速器群について述べたものである。

- LINAC(LINear ACcelerator)

LINAC は陽子 1 個と電子 2 個からなる負水素イオンを加速させる線形加速器である。LINAC は全長約 300m であり、最終的な負水素イオンの運動エネルギーは 400MeV である。

- RCS(Rapid-Cycling Synchrotron)

RCS は周長 348.333m のシンクロトロン加速器である。LINAC で加速された負水素イオンは、RCS への入射部で炭素の薄膜を通過後、電子が剥ぎ取られ陽子ビームとなる。陽子ビームは 3GeV まで加速される。加速される陽子は陽子の束 (バンチ) として存在しており、RCS では 1 サイクルに 2 バンチが存在する。RCS で加速された陽子ビームは物質・生命科学実験施設のミュオンおよび中性子ビームラインに送られる。また RCS で加速された陽子の一部はニュートリノ実験、ハドロン実験で用いられるために後述の MR へ送られる。

- MR(Main Ring)

MR は RCS から受け取った陽子ビームを 30GeV まで加速させるシンクロトロン加速器である。MR は RCS から受け取った陽子ビームを 1.4 秒間で 30GeV まで加速させて大強度陽子

ビームを生成する。図 2.3 は RCS から MR への陽子ビーム入射の概略図である。MR には加速した陽子を一挙に取り出す速い取り出し (FX) と 2 秒間で少しずつビームを取り出す遅い取り出し (SX) の 2 つの運転モードがあり、速い取り出しではニュートリノビームラインへ、遅い取り出しではハドロンビームラインへそれぞれ陽子ビームが射出される。現在のニュートリノビームラインの速い取り出しでの陽子ビームを取り出してから次の陽子ビームを取り出すまでの周期は 2.48 秒である。

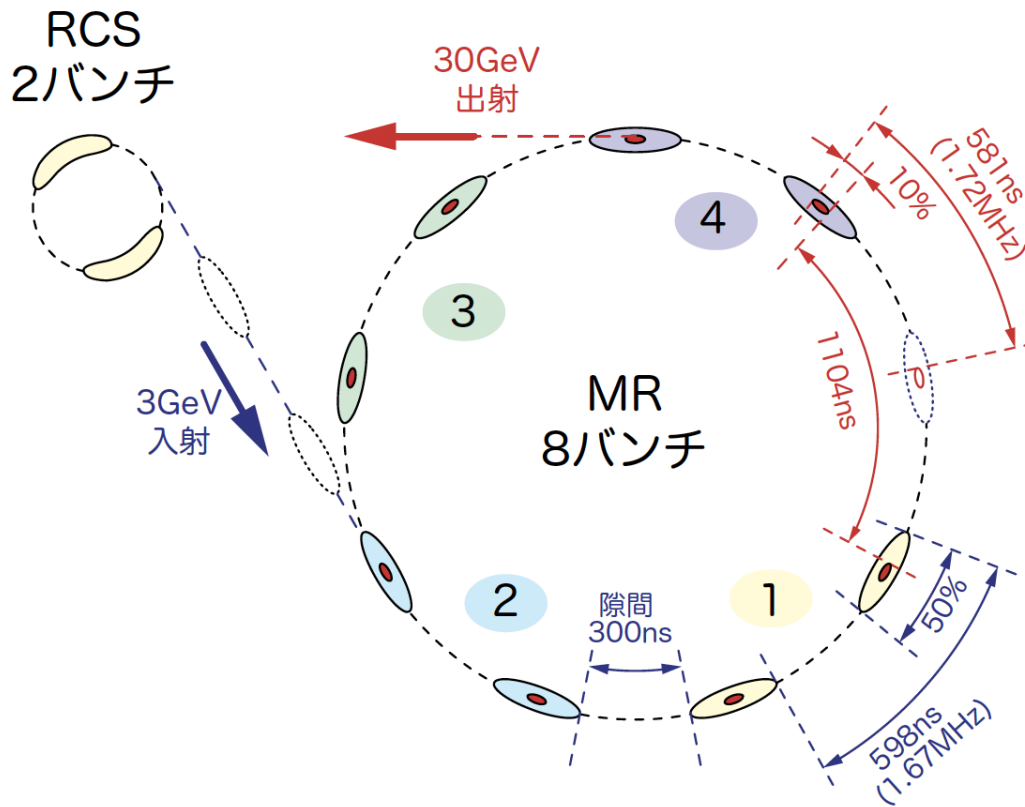


図 2.3 RCS と MR への陽子ビーム入射の概要図 [4]

2.2.2 ニュートリノビームライン

MR で加速された陽子ビームは、ニュートリノビームラインを通して炭素標的に衝突し、そこで生じた荷電 π 中間子の崩壊によりニュートリノを生成する。このニュートリノビームラインは 1 次ビームラインと、2 次ビームラインの 2 つで構成される。

1 次ビームラインでは、MR から蹴り出された陽子ビームが通り、多数の超伝導電磁石やビームの強度・位置・形状を監視するビームモニターを軌道上に配列されている。陽子ビームは 1 次ビームラインを通過して西向きに曲げられる。

2 次ビームラインは、上流側からターゲットステーション、ディケイボリューム、ビームダンプが並んでおり、1 次ビームラインを通過した陽子ビームが入射する。ターゲットステーションは陽子ビームを衝突させる炭素標的と電磁ホーンで構成され、陽子ビームが炭素標的に衝突して生じた荷電 π 中間子は電磁ホーンにより前方へ収束される。生成された荷電 π 中間子はディケイボリュームと呼ばれる全長約 100m のトンネルを飛行中に式 (2.1)、(2.2) のように崩壊する。

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (2.1)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (2.2)$$

電磁ホーンに流す電流の向きを変更することで、ビーム軸方向に収束させる荷電 π 中間子の電荷を選択することができ、 ν_μ ビームを生成するモードと $\bar{\nu}_\mu$ ビームを生成するモードを選択することが可能である。炭素標的と反応せずに通過した陽子や崩壊しなかった荷電 π 中間子は、炭素と鉄で構成されているビームダンプで吸収される。

2.2.3 ビームのバンチ構造と GPS

T2K 実験では、MR から約 2.5 秒ごとに陽子を取り出して、神岡に向けて生成したニュートリノを発射している。そのビームは、約 40 ナノ秒幅のバンチと呼ばれるかたまりが約 600 ナノ秒間隔で 8 バンチ並ぶ時間構造をしている [5]。図 2.4 の (a) はビームのバンチ構造を示したものである。それぞれのバンチは約 3×10^{13} 個もの陽子を含む。この時間構造は、スーパーカミオカンデで観測されたニュートリノ事象でも観測することができ、確かにビームに由来するニュートリノであることが確認できる。図 2.4 の (b) は観測されたビーム由来のニュートリノ事象のデータの一例である。このように 8 つのピークが立っていることを確認することで、J-PARC からのニュートリノデータを正しく取得できているかについて判断することができる。

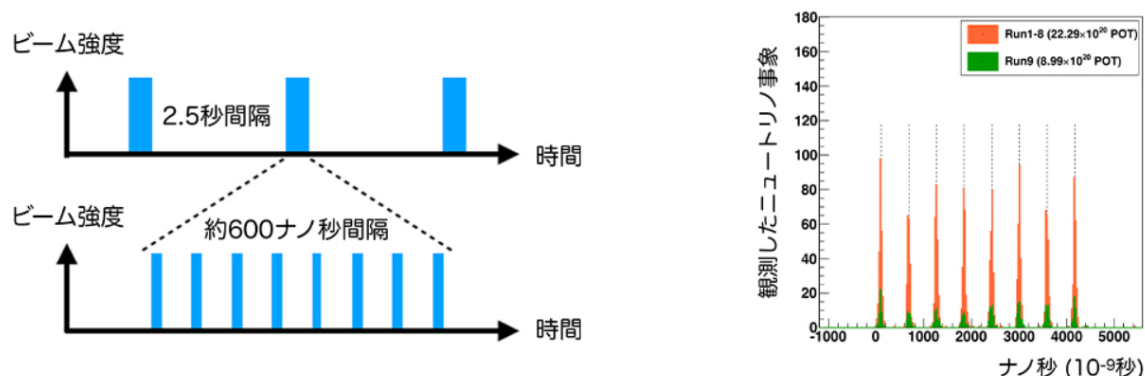


図 2.4 (a) ビームのバンチ構造 (b) 観測されたビーム由来のデータの一例

また、ビームの発射時間と観測時間の時間合わせには GPS が使われている。これにより、約 300 km 離れた地点の時刻を正確に同期させている。

2.3 Off-axis 法

T2K 実験では、後述の SK から 2.5° 離れたところを中心としてニュートリノビームを照射している。ずれたところに設置されている。検出器がビーム中心軸上にある場合を on-axis、軸上でない場合を off-axis、その角度を off-axis angle(OA) と呼ぶ [6]。軸からずれた場所に設置することで、軸上に設置するよりも飛来するニュートリノのエネルギー分布の幅を狭くすることができる。図 2.5 は異なる off-axis angle での荷電 π 中間子の運動量と生じるニュートリノのエネルギーを表したグラフである。角度が大きい場合は、運動量の高い荷電 π 中間子であったとしても、生じるニュートリノのエネルギーが低く抑えられている。また、図 2.6(a)、(b) は $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ と $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の振動確率、(c) は異なる off-axis

angle でのニュートリノのフラックスのエネルギー依存性を示したものである。図 2.6(c) から 2.5° で 600 MeV 付近にピークを持つことがわかる。また図 2.6(a)、(b) からわかるように、600 MeV 付近に細いピークを持つニュートリノを使用することで、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ 消失事象と $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 出現事象を観測しやすいようになっている。

また、ニュートリノのエネルギーを低く抑えることで、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 出現事象のバックグラウンドとなる中性カレントの単一パイオン ($\pi_0 \rightarrow \gamma\gamma$) 生成反応を充分抑制することができる。 2.5° はこれらの理由から最適化された角度であり、T2K 実験は世界で初めて off-axis 法を採用した長基線加速器ニュートリノ振動実験である。

式 (2.1)、(2.2) のようにニュートリノビームは π 中間子の 2 体崩壊を用いて生成しているので、ニュートリノのエネルギー E_ν は式 (2.3) のように表される。

$$E_\nu = \frac{m_\pi^2 - m_\mu^2}{2(E_\pi - p_\pi \cos \theta_\nu)} \quad (2.3)$$

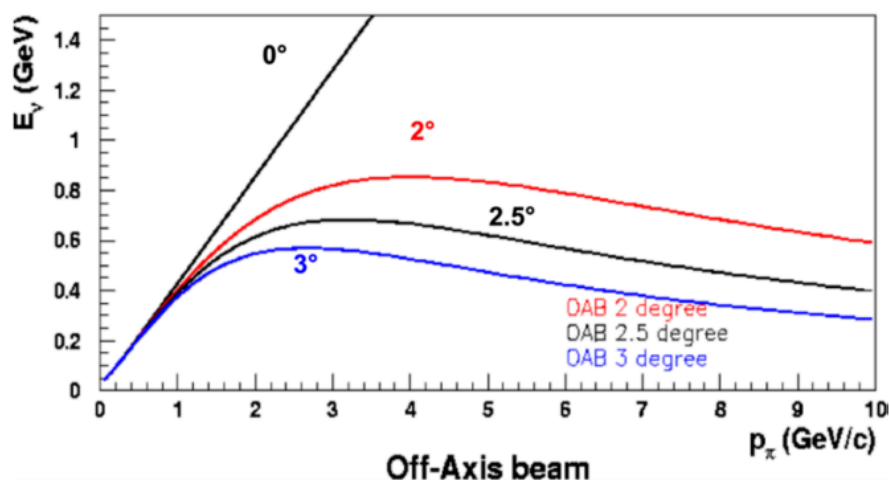


図 2.5 異なる off-axis angle での荷電 π 中間子の運動量 p_π と生じるニュートリノのエネルギー E_ν を示す。 0° は on-axis であり、それ以外が off-axis である。

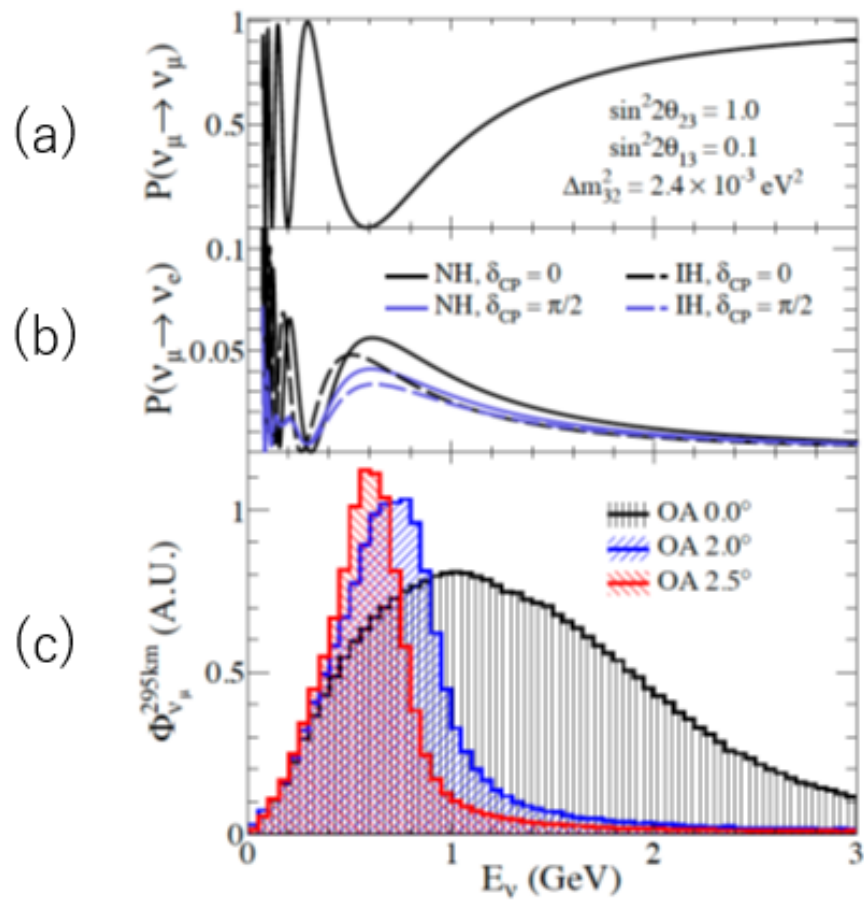


図 2.6 (a) $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ と (b) $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の振動確率のエネルギー依存性と、(c) 異なる OA (off-axis angle) でのニュートリノフラックス

2.4 前置検出器群

前置検出器群は炭素標的から 280 m 下流に設置されており、振動前のニュートリノを観測し、ニュートリノビームのスペクトル測定やニュートリノと原子核の反応測定から系統誤差を削減することが設置の主な目的である。on-axis 検出器である INGRID、 2.5° の off-axis angle を持つ検出器である ND280、 1.5° の off-axis angle を持つ検出器である WAGASCI-BabyMind に分けられる。本節ではこの3つの前置検出器について述べる。

2.4.1 ND280 実験ホール

前置検出器は、J-PARC 構内の NM(Neutrino Monitor) 塔内にある ND280 実験ホールに設置されている。設置の様子を図 2.7 に示す。図 2.7 のように、ND280 実験ホールは地上階、B1 階、SS 階、B2 階に分けられており、本論文に關係する WAGASCI 検出器群は B2 階に設置されている。

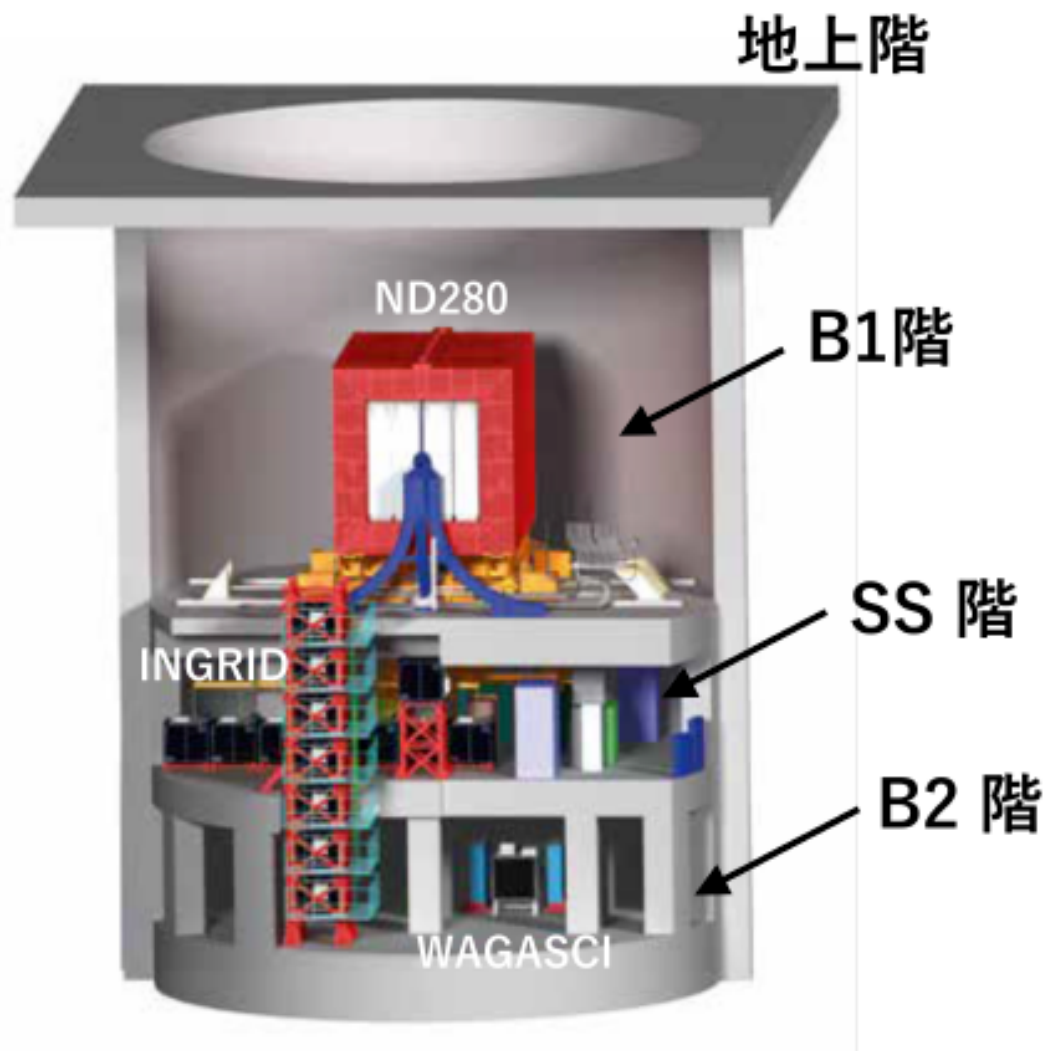


図 2.7 ND280 実験ホールと各前置検出器の位置

2.4.2 INGRID

INGRID (Interactive Neutrino GRID) は T2K 実験における前置検出器の 1 つで、約 $10\text{m} \times 10\text{m}$ の on-axis 検出器である。14 個のモジュールから構成されており、十字型に配置されている。それぞれのモジュールはニュートリノの標的となる 9 枚の鉄製プレートと 11 層のシンチレータのサンドイッチ構造をしている。図 2.8 が INGRID の概略図である。INGRID の主な目的は、鉄とニュートリノの反応によって生成された荷電粒子をシンチレータで検出することで、ニュートリノビームの強度と方向を測定することである。

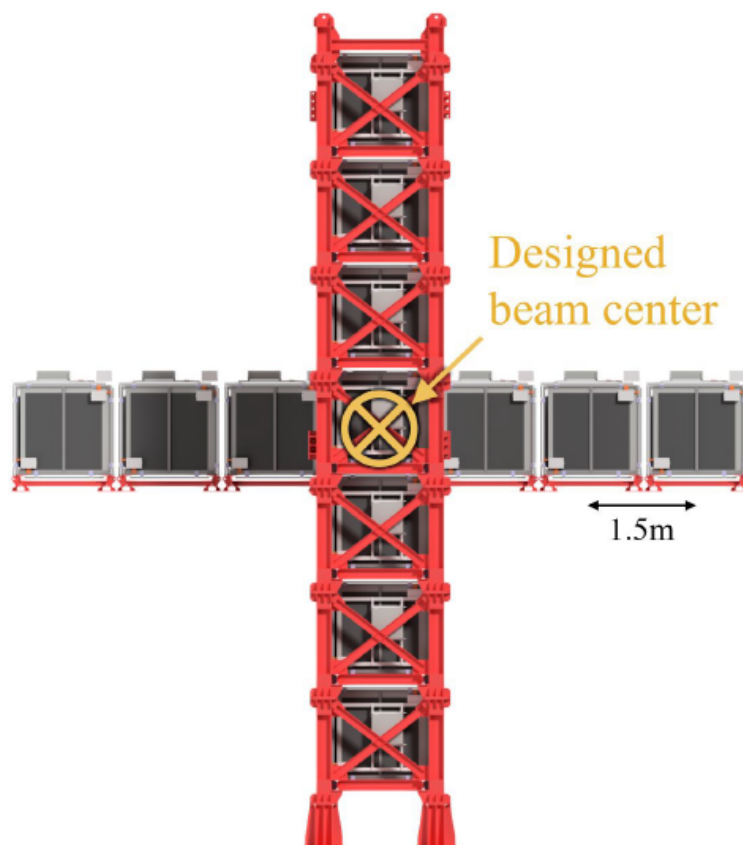


図 2.8 INGRID の概要図

2.4.3 ND280

ND280 (Near Detector 280) は、炭素標的から 280m 下流、ニュートリノビームの中心軸から 2.5° ずれた角度に設置された off-axis 検出器である。振動前のニュートリノのフラックスや、ニュートリノと原子核の反応の測定を通して、SK での系統誤差を抑制することが主な目的である。図 2.9 は ND280 の概略図である。ND280 は下記のように複数のモジュールにより構成されている。

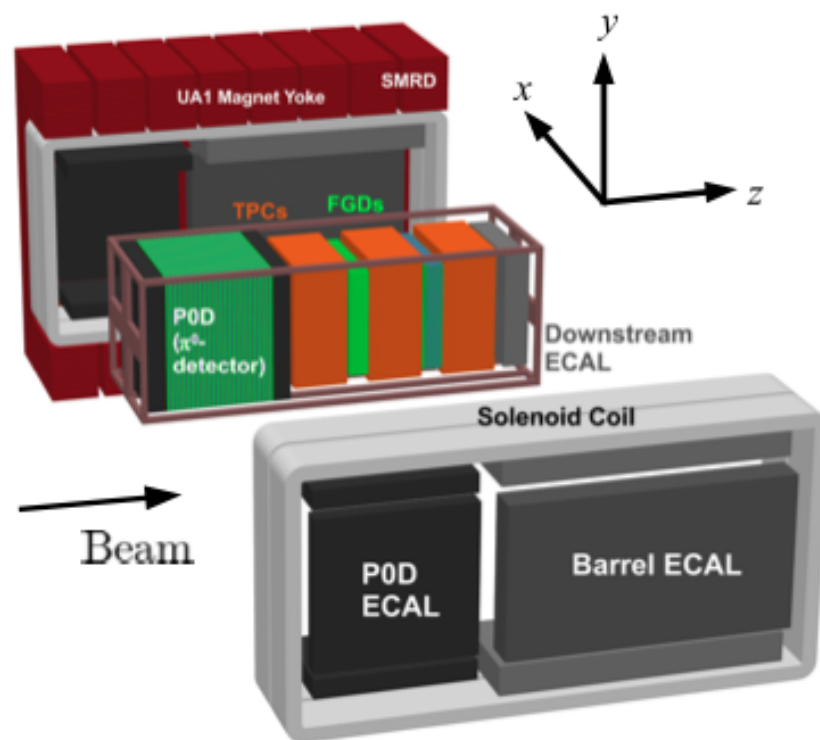


図 2.9 ND280 の概要図

- UA1 Magnet

検出器の全体を囲うようにして設置されている大型電磁石である。荷電粒子の飛跡を 0.2 T の磁場をかけて曲げることにより、各粒子の運動量および電荷の正負の測定を行う。

- P0D (π^0 Detector)

ND280 の最も上流側に位置する検出器であり、鉛の薄膜、シンチレータ、水ターゲットのサンドイッチ構造である。主な目的は、SK に到達するビームと同じフラックスのビームを用いて、水標的によるニュートリノの中性カレント反応から生じる π^0 の測定を行うことである。

- FGD (Fine Grained Detector)[7]

FGD は後述の TPC に挟まれるように配置されるニュートリノの標的かつ飛跡検出器である。FGD では図 2.10 に示すように、棒状のプラスチックシンチレータをビーム軸に垂直な X、Y 方向に 192 本ずつ並べた XY モジュールが用いられている。それぞれのシンチレータのサイズは $9.61 \text{ mm} \times 9.61 \text{ mm} \times 1864.3 \text{ mm}$ である。FGD は上流側と下流側にそれぞれ 1 つずつの計 2 つ設置されている。上流側の FGD(FGD1) はシンチレータのみで XY モジュールが 15 個、下流側の FGD(FGD2) は XY モジュール 7 個と水標的の層 6 層が配置されている。シン

チレータバーの表面は反射層で覆われていて、中心には穴が空けられ、波長変換ファイバーが通されている。波長変換ファイバーの一端には半導体光検出器である MPPC が取り付けられており、もう一端には MPPC 較正用の LED が設置されている。

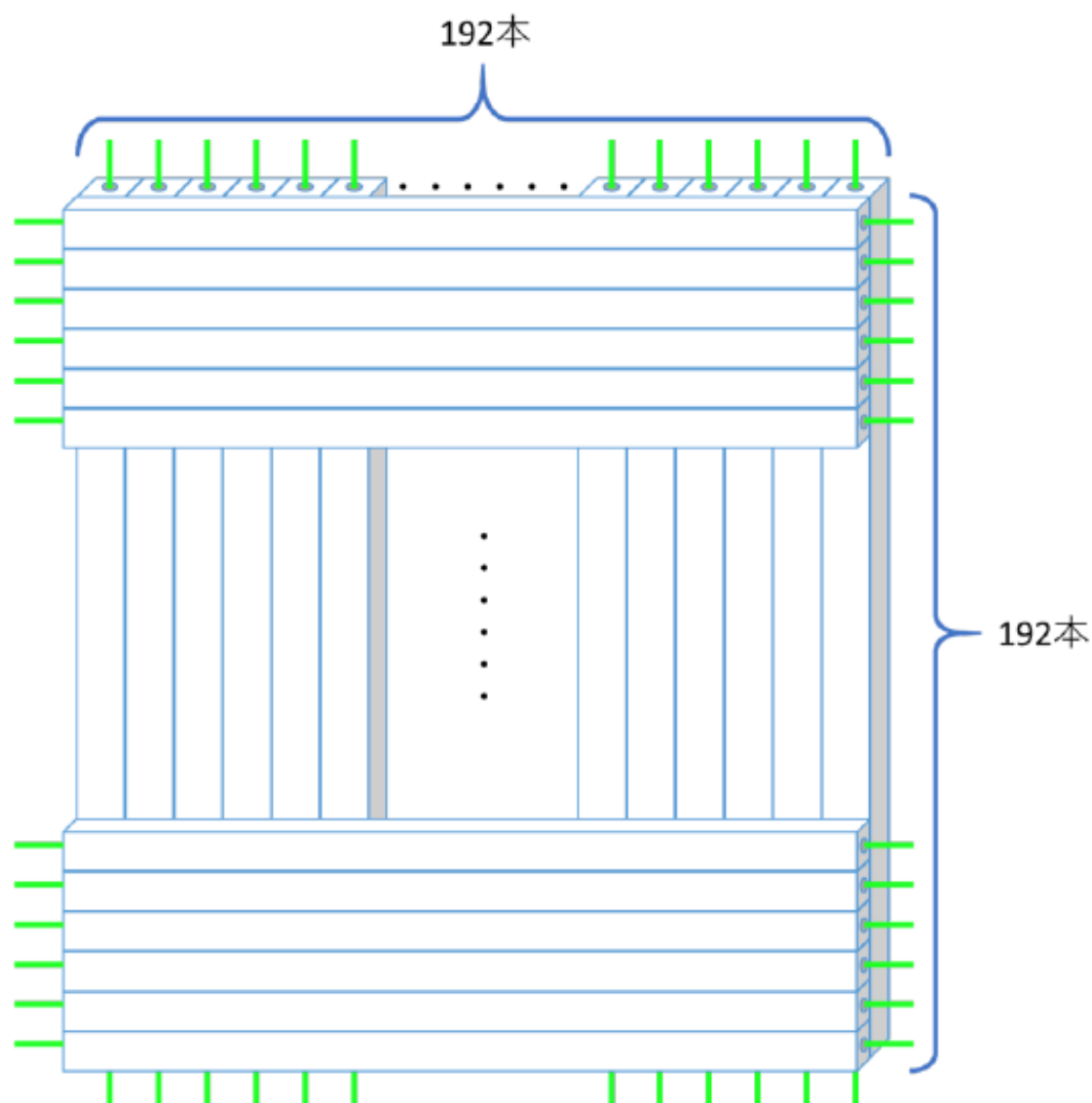


図 2.10 FGD の XY モジュールのイメージ図

FGD 内部のシンチレータや水標的とニュートリノが反応することで荷電粒子が生じる。この荷電粒子がシンチレータを通過することでシンチレーション光が発生する。発生したシンチレーション光は波長変換ファイバーで吸収・再発光され、端面にて MPPC で読み取られる。このようにしてニュートリノの反応点や反応で生じた荷電粒子の種類、荷電粒子の飛跡を検出することができる。

- TPC (Time Projection Chamber)

POD の後方に 3 基設置されており、前述の FGD と共にサンドイッチ構造をなす飛跡検出器である。TPC を荷電粒子が通過することによって内部のガスがイオン化され、生じた電子は印加電圧によって読み出し面へ曲げられる。その検出位置や時間情報から荷電粒子の飛跡の 3 次元イメージングが得られる。また荷電粒子の磁場により曲げられた飛跡を検出することから荷電粒子の電荷や運動量の測定がされ、エネルギー損失からは粒子の識別を行う。

- ECAL (Electromagnetic CALorimeter)

ニュートリノ反応によって生成した電子および γ 線の電磁シャワーをとらえ、そのエネルギーを測定する。UA1 Magnet 内側の最外層に設置されており、鉛とシンチレータのサンドイッチ構造になっている。

- SMRD (Side Muon Range Detector)

UA1 Magnet の隙間に設置されている検出器である。大角度で散乱されて TPC に入射しなかった荷電粒子の飛跡を測定し、エネルギーを再構成する。

2.4.4 WAGASCI 検出器群

WAGASCI 検出器群は off-axis 1.5° の位置に設置されているニュートリノ、ミューオン飛程検出器群である。ニュートリノと標的が反応することで生成された荷電粒子を、シンチレータを介して半導体型光検出器 MPPC で検出することで観測している [8]。WAGASCI 検出器群の詳細は次章にて記述する。

2.5 スーパーカミオカンデ

スーパーカミオカンデ (Super-Kamiokande: SK) は核子崩壊、太陽 ν 、大気 ν などの観測を目的とした大型検出器である。この SK を T2K 実験における後置検出器として使用している。高さ 41.4m、直径約 39.3m の円筒型のタンクであり、J-PARC から 295 km 離れた岐阜県飛騨市神岡鉱山に設置されている。また、ニュートリノの観測の際にバックグラウンドとなる、宇宙線由来の μ 粒子などを遮るために地下 1,000m に設置されている。SK は陽子崩壊の探索やニュートリノ検出に用いられており、T2K 実験では振動後のニュートリノを観測することで ν_μ 消失事象や ν_e 出現事象の探索を行っている。図 2.11 は SK の外観図である。

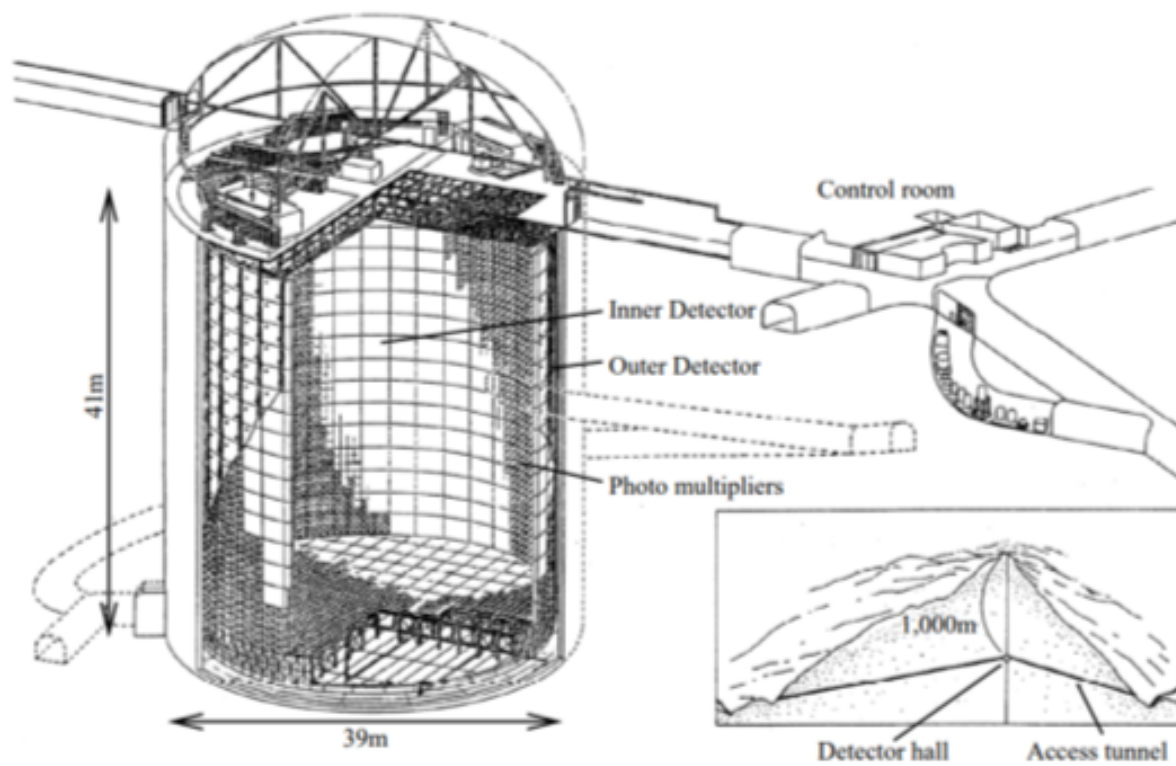


図 2.11 SK の外観 [9]

SK の内部は約 50 キロトンの水で満たされており、内側検出器 (Inner Detector: ID) と外側検出器 (Outer Detector: OD) に分かれています。

ID はニュートリノ測定に用いられ、内壁に沿って直径 50cm の光電子増倍管 (PhotoMultiplier Tube: PMT) が 11,129 本設置されている。

また OD は宇宙線ミュオンや SK 外部の地中でのニュートリノ反応由来のミュオンなどを測定し、バックグラウンド事象を排除 (veto) することが目的であり、OD には 1,885 本の PMT が設置されている。

SK ではニュートリノと水の荷電カレント反応で生じた荷電粒子が水中で光速を超えることで発生するリング状のチェレンコフ光を、PMT を用いて検出することで荷電粒子の識別を行っている。すなわち、 ν_{μ} であればミュオン、 ν_e であれば電子によるチェレンコフ光を検出する。図 2.12 は SK での ν_e -like、 ν_{μ} -like のイベントディスプレイである。生じた荷電粒子が電子の場合は電磁シャワーによってリングイメージがぼやけるのに対し、ミュオンであれば電磁シャワーを起こさないためリングイメージがくっきり見える。

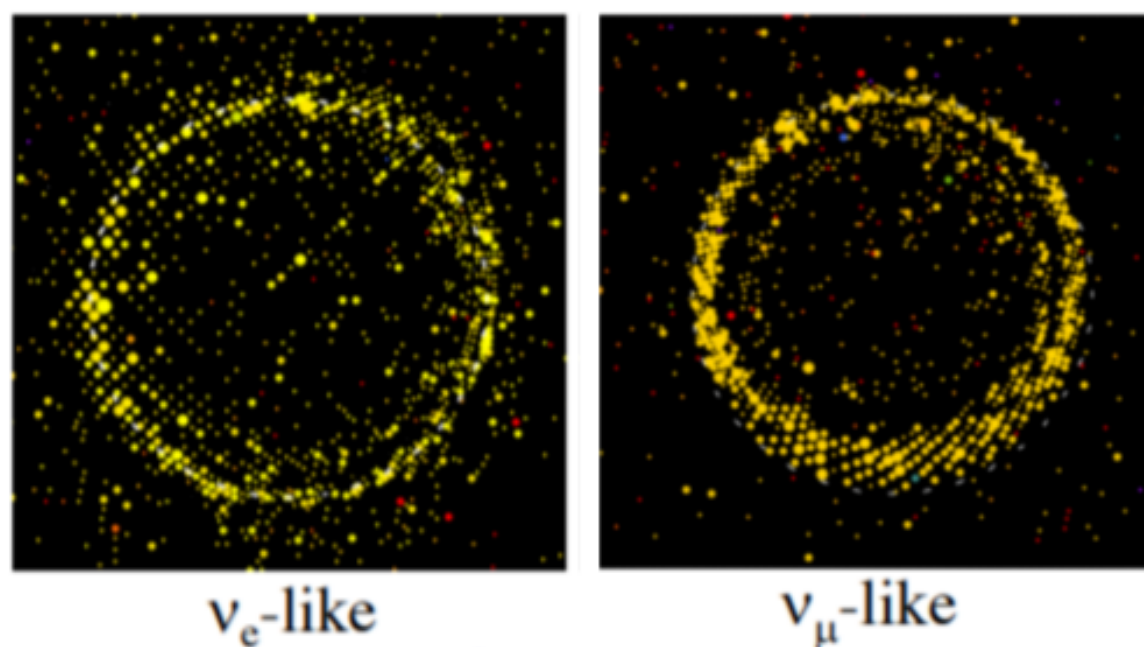


図 2.12 SK のイベントディスプレイ [10]

第 3 章 WAGASCI 検出器群

3.1 目的

現在、T2K 実験で使用されている前置検出器 ND280 では構造上、ニュートリノ反応によって生成された荷電粒子を検出できる方向が、ビーム下流方向への小角度散乱に限られており、大角度方向に散乱された荷電粒子の検出効率が低いという短所がある。また、ND280 検出器はプラスチックシンチレータ (炭化水素 (CH)) を標的としていることに対し、後置検出器 (スーパーカミオカンデ) は水標的であり、この標的の違いによる系統誤差が測定の精度を下げていることも問題として挙げられていた。これらの問題を改善するために、シンチレータを格子状に組み込む水標的ニュートリノ検出器 WAGASCI により、全方向に高い検出効率で荷電粒子を観測し、また測定の精度の向上を目指している。

3.2 WAGASCI 検出器群

WAGASCI 検出器群は ND280 実験ホール B2 階の off-axis 1.5° の位置に設置されており、WAGASCI、Proton Module、Wall MRD、Baby MIND の 4 種類により構成されている。WAGASCI 検出器群の概略図を図 3.1 に示す。WAGASCI はビーム上流と下流にそれぞれ設置されており、その間に CH 標的検出器の Proton Module が設置されている。また、これらの両側面にはミューオン飛程検出器 Wall MRD が設置されている。Baby MIND はこれらよりさらにビーム下流側に設置されており、磁場を印加することにより、荷電粒子の電荷の識別を行っている。

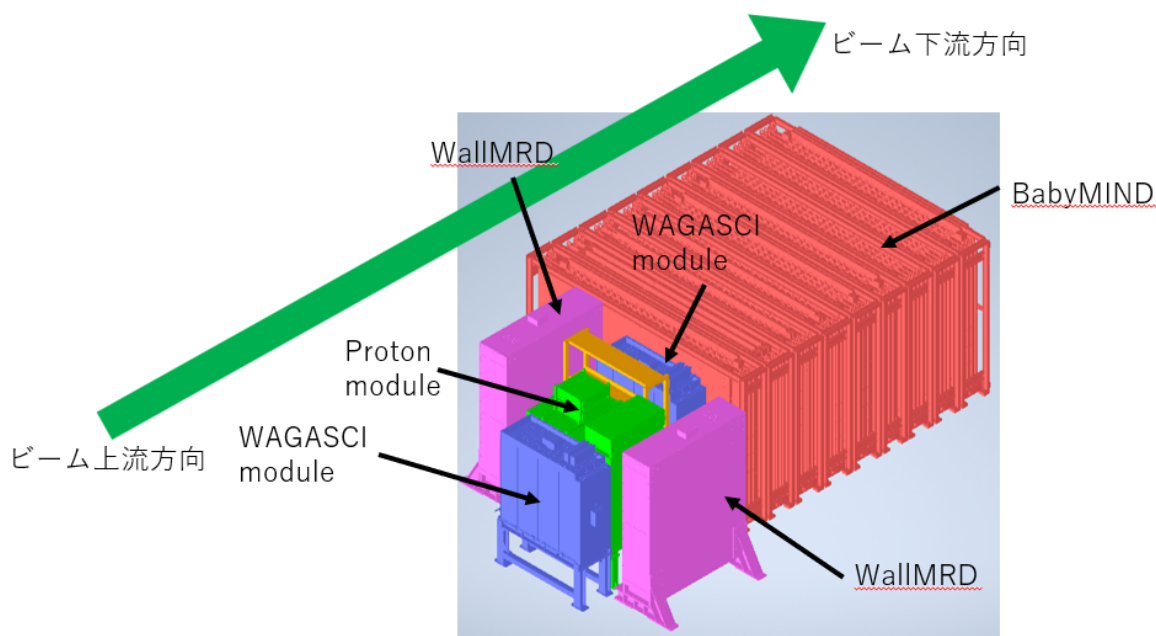


図 3.1 WAGASCI 検出器群の概略図

3.2.1 WAGASCI (WATER Grid And SCIntillator)

WAGASCIは水を標的としたニュートリノ検出器であり、ビーム上流側および下流側で計2台設置されている。主に水を標的とし、プラスチックシンチレーターを3次元格子状に並べてあり、水とニュートリノが反応した際に放出する荷電粒子を全方向に高い検出効率で検出する。

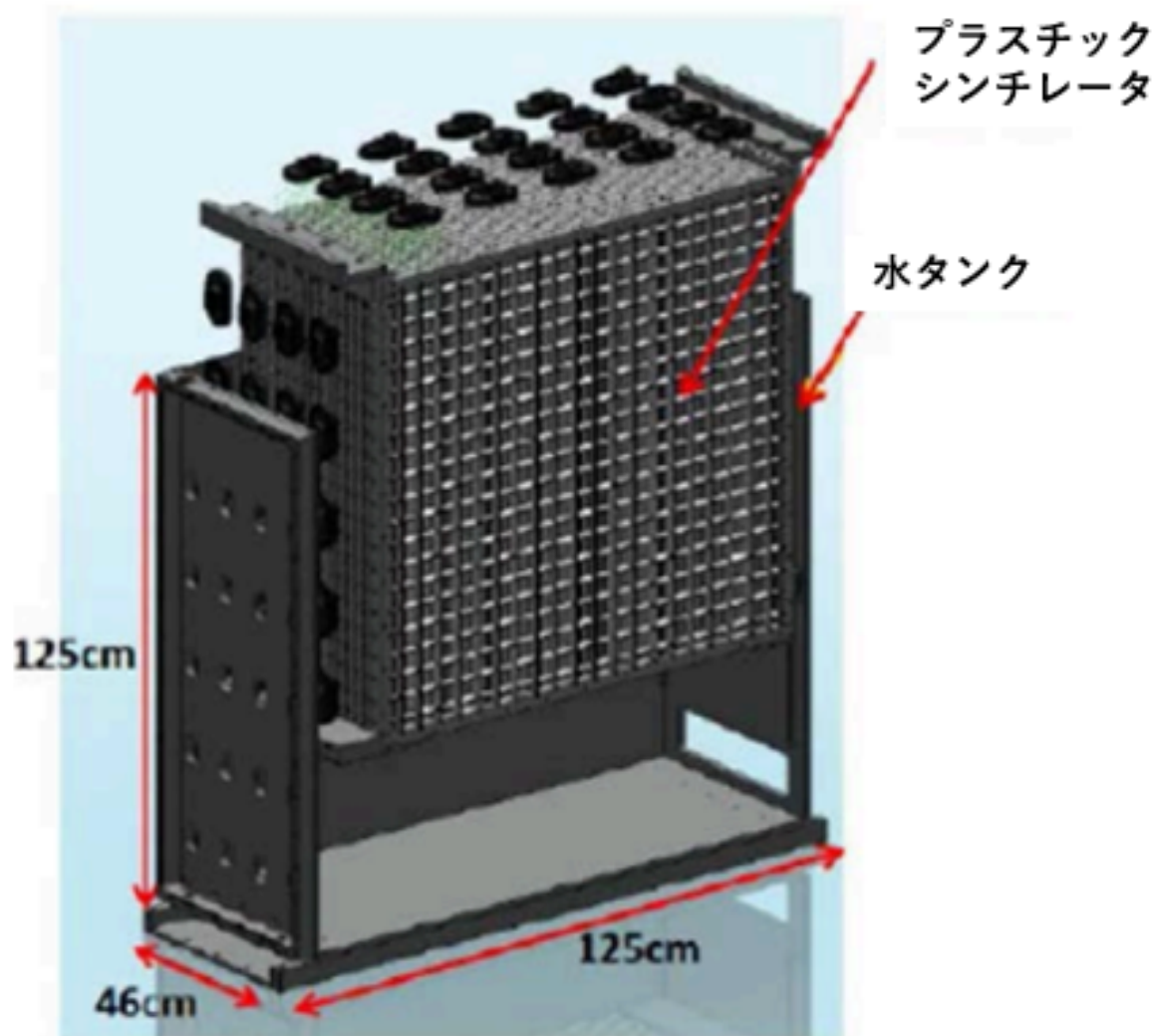


図 3.2 WAGASCI モジュールの外観

図 3.2 は WAGASCI モジュールの外観を表している。WAGASCI モジュールは 1020 mm × 25 mm のシンチレータを X または Y 方向に並べた平行シンチレータ層と、格子構造を持つグリッドシンチレータ層の 2 種類を交互に重ねることによってどの角度に飛んだ粒子に対しても高い検出効率であるような構造をしている。図 3.3 に 2 種類のシンチレータを示す。色の濃くなっている部分に波長変換ファイバー (Kuraray Y-11) を通す。これらの平行シンチレータとグリッドシンチレータを図 3.4 に示すように組み上げていく。WAGASCI モジュールはこの平行シンチレータモジュールを X 方向、Y 方向にそれぞれ 8 層、グリッドシンチレータ層を 16 層持ち合計で 1280 チャンネルを持つ。また、シンチレータの間に水を 500 kg 程度含むことができ、水とプラスチックの体積比は、およそ 4:1 である [11]。

シンチレータの光は波長変換ファイバーを通じて、半導体型光検出器 MPPC によって検出される。

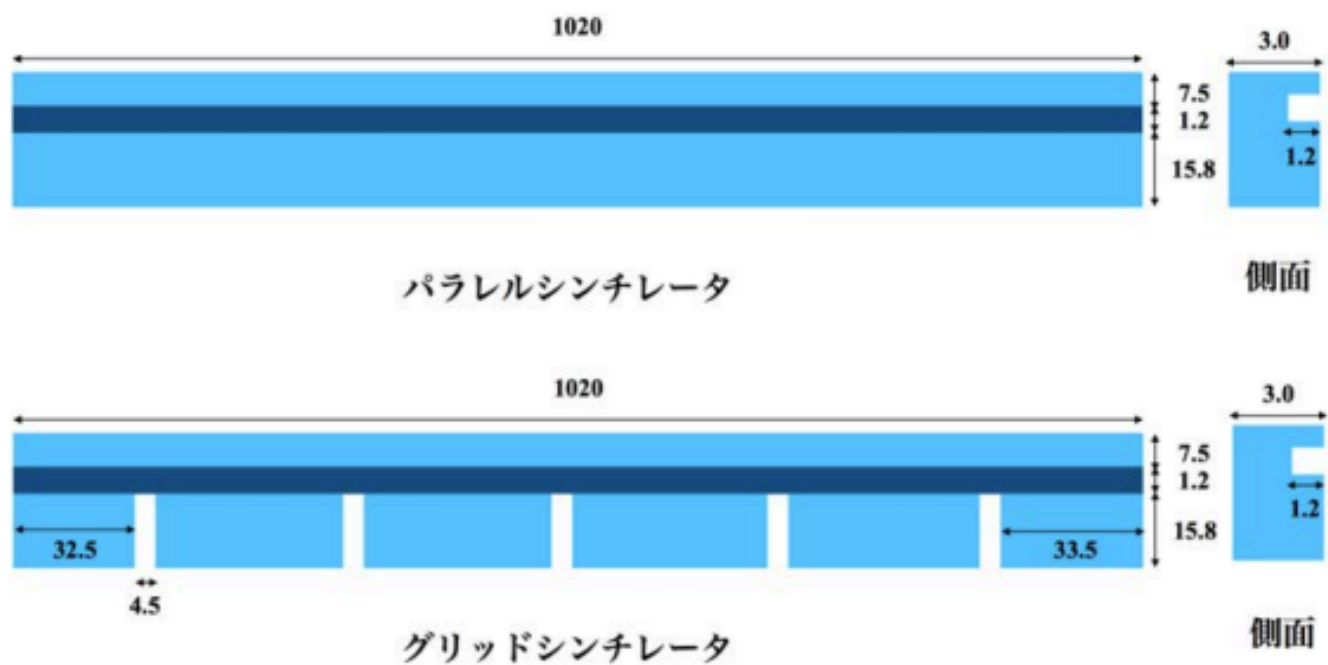


図 3.3 パラレルシンチレータ (上) とグリッドシンチレータ (下) の構造

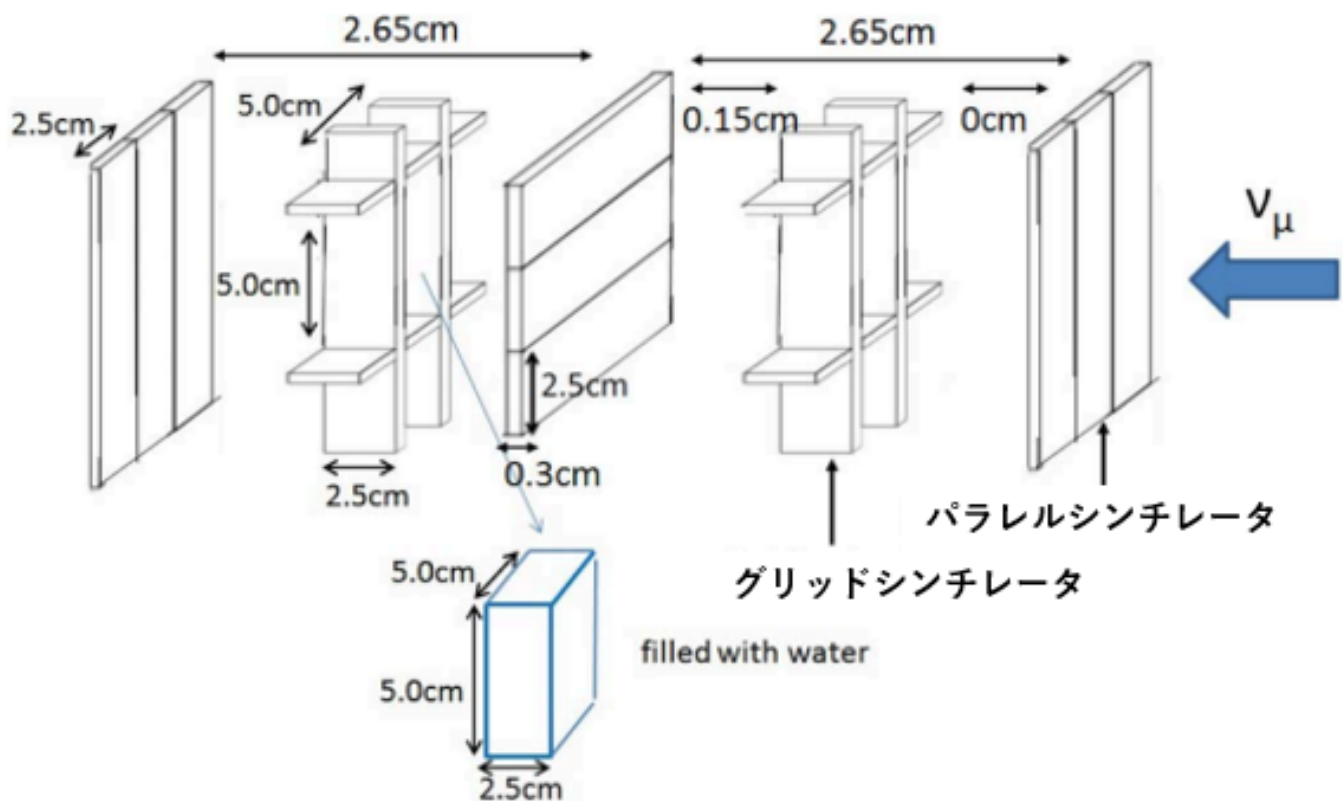


図 3.4 WAGASCI モジュールの構造

3.2.2 Proton Module

図 3.5 は Proton Module の構造を示す。Proton Module は 2 台の WAGASCI の間に設置されている CH 標的ニュートリノ検出器であり、検出器群の中央部分に設置されている。2 種類のシンチレータバーで構成された tracking plane で囲まれた構造をしており、内側領域の 16 本は 25mm × 13mm × 1200 mm のシンチレータ、外側領域の 16 本は 50mm × 10mm × 1200mm のシンチレータである。

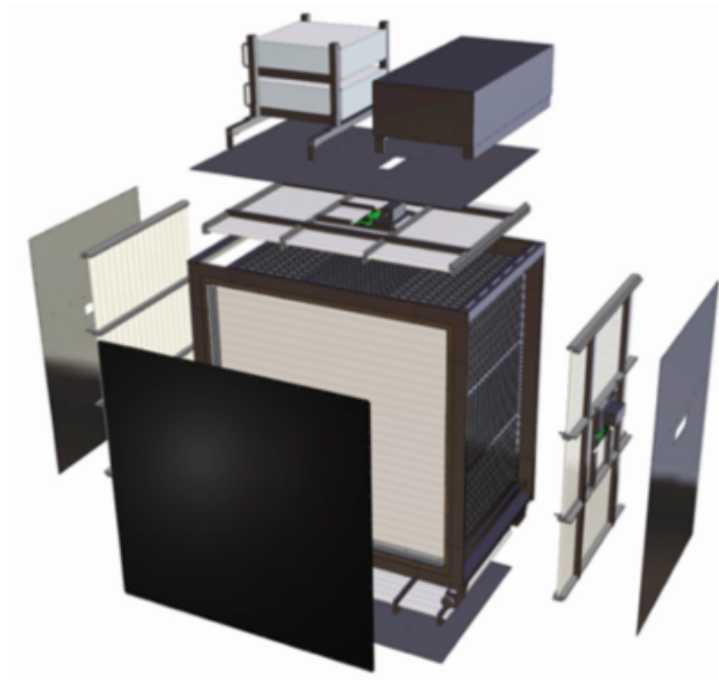


図 3.5 Proton Module

3.2.3 Wall MRD (Muon Range Detector)

Wall MRD は WAGASCI、Proton Module の両サイドに 2 台設置されているミュオン飛程検出器である。図 3.6 の左のように、 $1.8\text{m} \times 1.6\text{m} \times 30\text{mm}$ の鉄と $1.8\text{m} \times 0.2\text{m} \times 7\text{mm}$ のシンチレータをそれぞれ 11 層、10 層交互に挟んだ構造をとっており、主に大角度に散乱したミュオンの飛跡や運動量を観測している。Wall-MRD で使用されているシンチレータバーを図 3.6 の右に示す。シンチレータには波長変換ファイバーが図のように埋め込まれており、両端から MPPC によって読み出しを行っている。

また、Wall MRD は WAGASCI より 50cm 離れた場所に設置されており、それぞれの検出器のヒットタイミングの時間差より、荷電粒子の運動方向、また、壁や床、Wall-MRD 自身において反応したバックグラウンドのイベントを排除することが可能である。

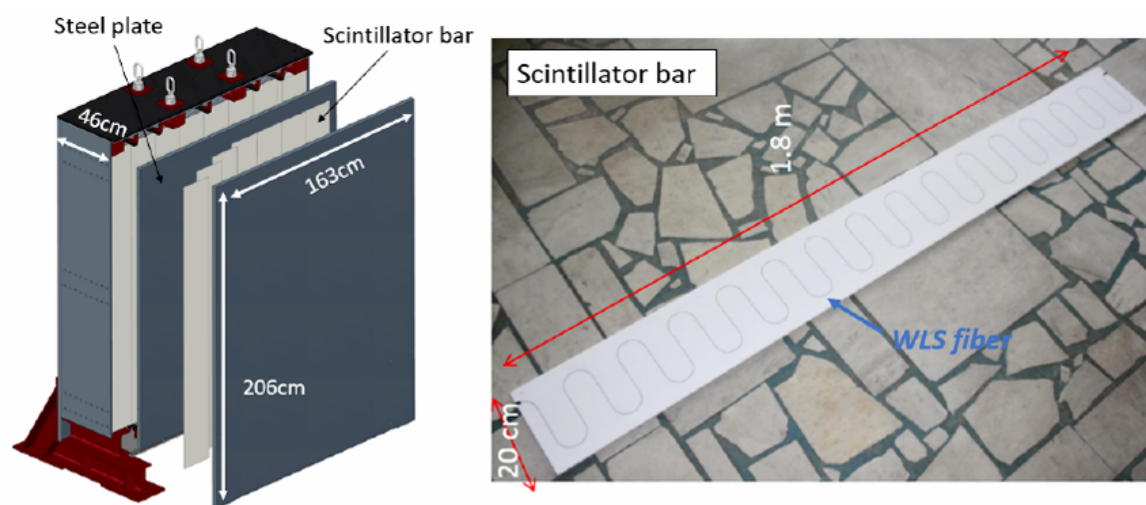


図 3.6 Wall MRD

3.2.4 Baby MIND (Magnet Iron Neutrino Detector)

Baby MIND はビーム下流側に設置されているミュオン飛程検出器である。33 層の Magnet Module と 18 層の Detector Module から構成されている。WAGASCI においてニュートリノが反応することによって生成されたミュオンを 1.5 T の磁場によって曲げることで、電荷の識別 (μ^+ と μ^-)、及び運動量の測定を行っている。図 3.7 が Baby MIND の外観である。

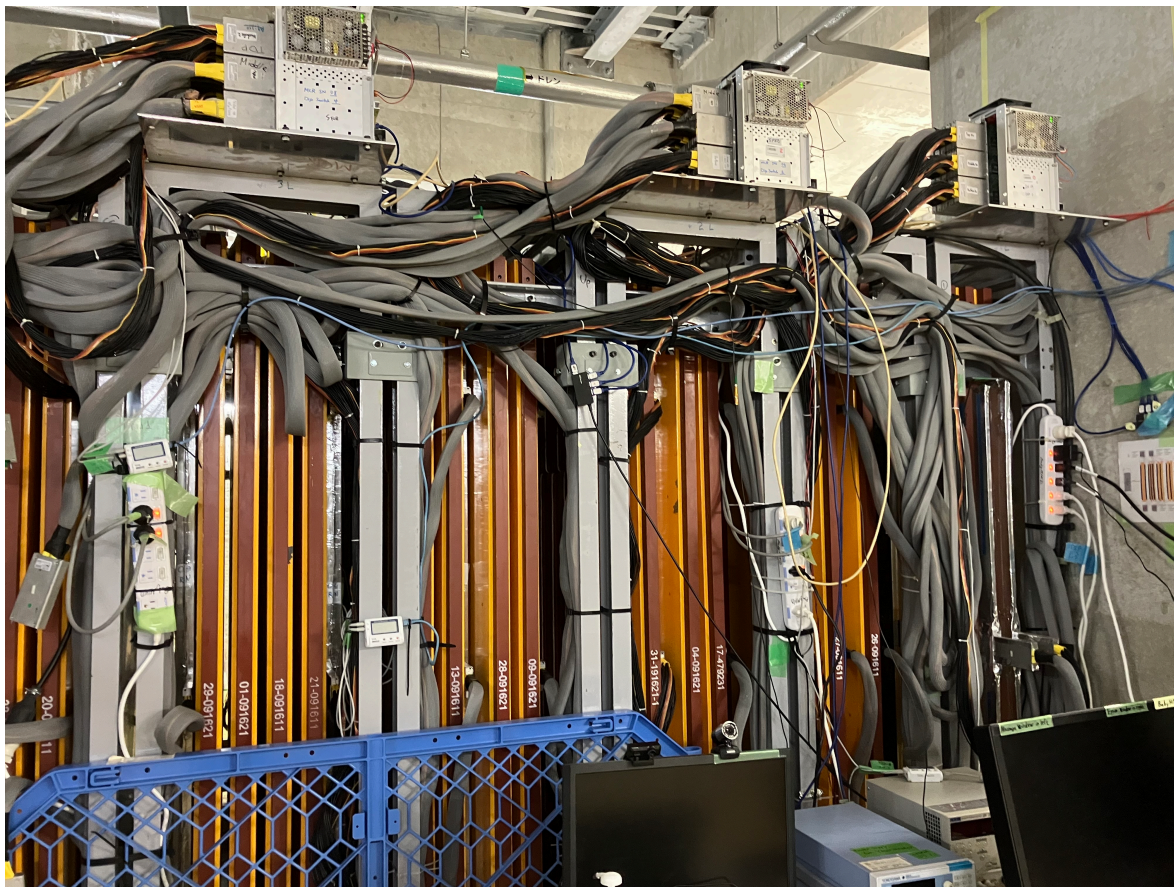


図 3.7 Baby MIND の外観

以下、Magnet Module と Detector Module について述べる。

- Magnet Module

Magnet Module は鉄の板にコイルを巻きつけた構造をしている。図 3.8 に外観を示す。BabyMIND の電磁石は一様な磁場を作り、その磁場が外部に漏れないようにされている。鉄板には二箇所にスリットが空いている。また、図 3.9 にスリットを含めた Magnet Module のコイルの巻き方の概要図を示す。一枚のアルミニウムストリップを編みこむように上から下にスリットを通して巻いている。上から見たコイルの様子では、左上のアルミニウムリボンが電源の + につないだ時の電流の流れを表す。



図 3.8 Magnet Module の外観 [11]

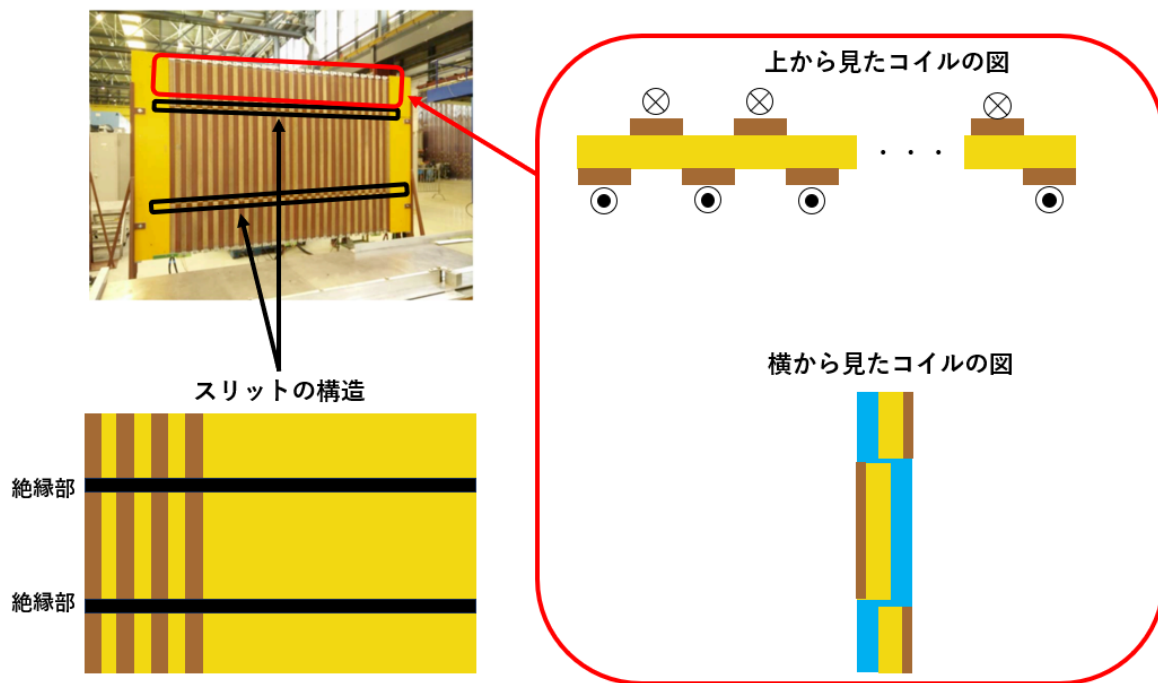


図 3.9 Magnet Module のコイルの巻き方の概要図 [11]

Magnet Module は上中下の領域内で 1.5 T の磁場を生み出しており、図 3.10 はその磁場分布である。

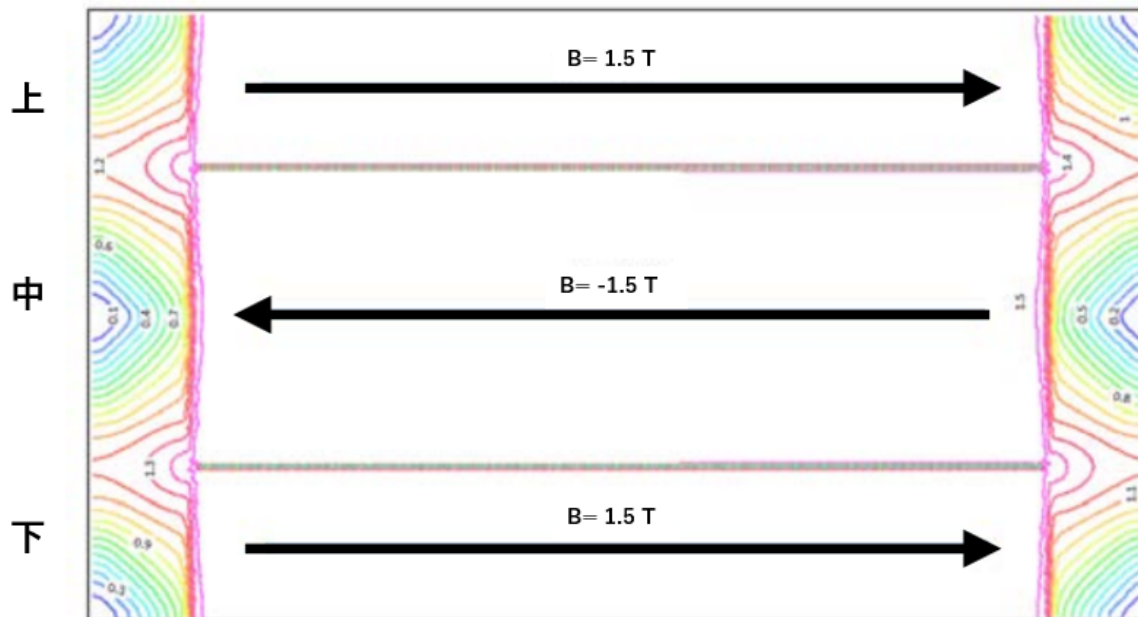


図 3.10 鉄の前面から見た磁場分布 [11]

- Detector Module

一つの Detector Module は X 層、Y 層の 2 種類から成る。X 層はシンチレータを、ビーム軸を横切るように水平方向に並べた層である。Y 層はシンチレータを鉛直方向に並べた層である。X 層のシンチレータは 210mm × 1950mm × 7.5mm × 16 枚であり、Y 層のシンチレータは 3000mm × 31mm × 7.5mm × 95 枚である。BabyMIND の磁石の中で荷電粒子は鉛直方向に曲がるため、Y 層のシンチレータをより細かいセグメンテーションにすることで電荷識別能力を向上させている。シンチレーション光は波長変換ファイバーを通して後述の MPPC に伝達される。図 3.11 に X 層、Y 層のシンチレータに埋め込まれたファイバーと MPPC の概要図を示す。

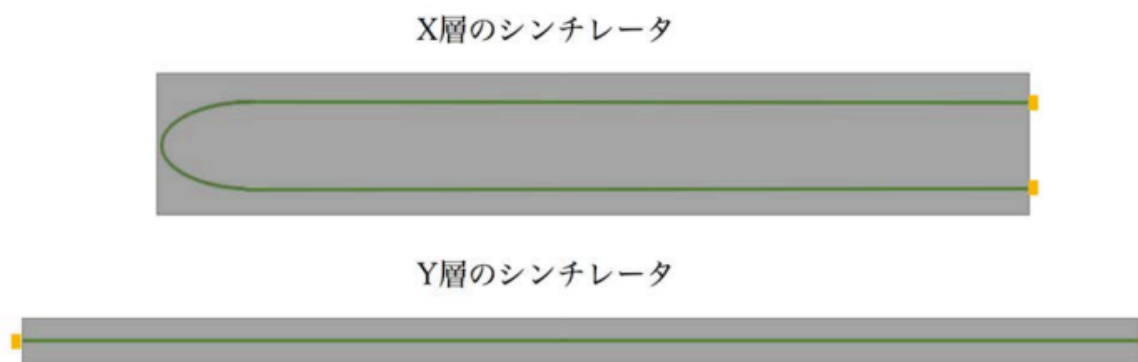


図 3.11 X 層、Y 層のシンチレータに埋め込まれたファイバーと MPPC(黄色い部分)[11]

第 4 章 エレクトロニクス

4.1 MPPC(Multi-Pixel Photon Counter)

MPPC は半導体型光検出器の一種であり、入射した光子の数に応じた大きさのパルス信号を出力する。MPPC は低電圧で動作し、高い増倍率、高い検出効率、優れた時間分解能、高速応答、広い感度波長範囲、磁場の影響を受けない、衝撃に強いといった特徴がある。WAGASCI 検出器群ではシンチレータの光を、波長変換ファイバーを通して観測するために用いられている。WAGASCI では図 4.1 の (a) の 32 ch の MPPC を配列した Array 型 MPPC が、Wall MRD では図 4.1 の (b) の単素子の Single 型 MPPC がそれぞれ用いられている。

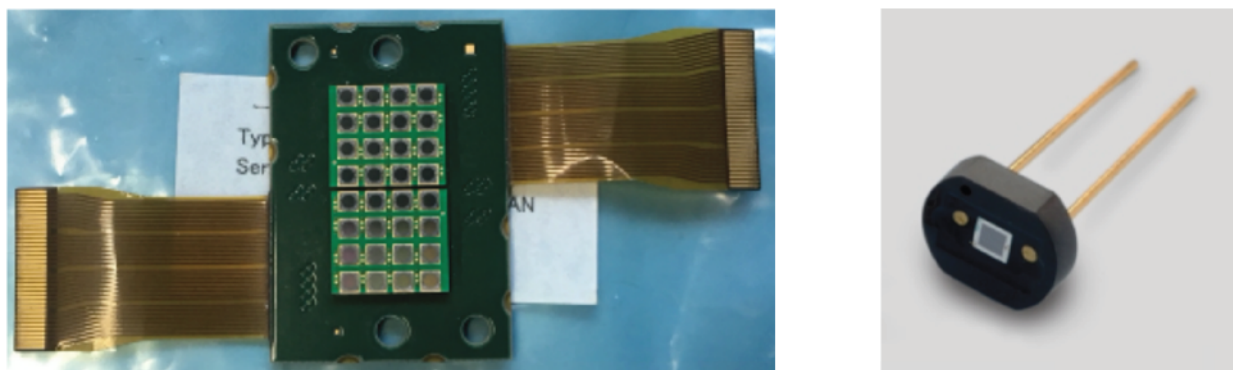


図 4.1 (a)Array 型 MPPC (b)Single 型 MPPC

4.1.1 構造

MPPC はクエンチング抵抗とガイガーモードの APD を合わせて基本単位 (1 ピクセル) として、多数のピクセルを並列接続した構造を持ち合わせている。図 4.2 に MPPC の構造を示す。

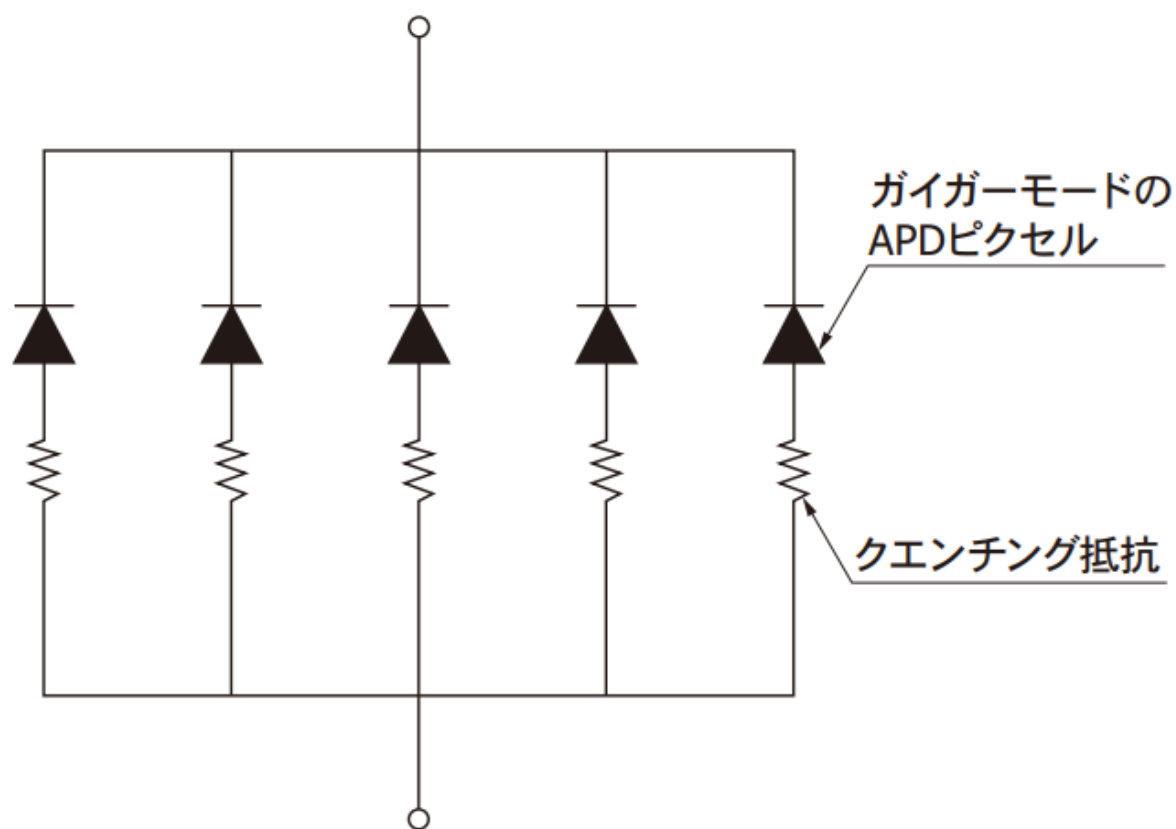


図 4.2 MPPC の構造

4.1.2 動作原理

- APD

APD (Avalanche Photodiode) は、アバランシェ増幅と呼ばれる現象を利用したフォトダイオードである。これは、通常フォトダイオードに比べて出力が大きく、単光子検出が可能である特徴がある。フォトダイオードは、一般的なダイオードと同様に P 型半導体と N 型半導体を合わせた PN 接合で構成される光検出器である。N 層側が P 層側より高い電位になるように電圧を印加すると、PN 接合付近では、N 型半導体内の電子の一部が P 型半導体に移動し、正孔と結合して電荷を打ち消し合い、空乏層と呼ばれる領域が発生する図 4.3。空乏層の N 型半導体では電子がなくなるのでプラスに、P 型半導体では正孔がなくなるのでマイナスに帯電して内部電場が発生する。

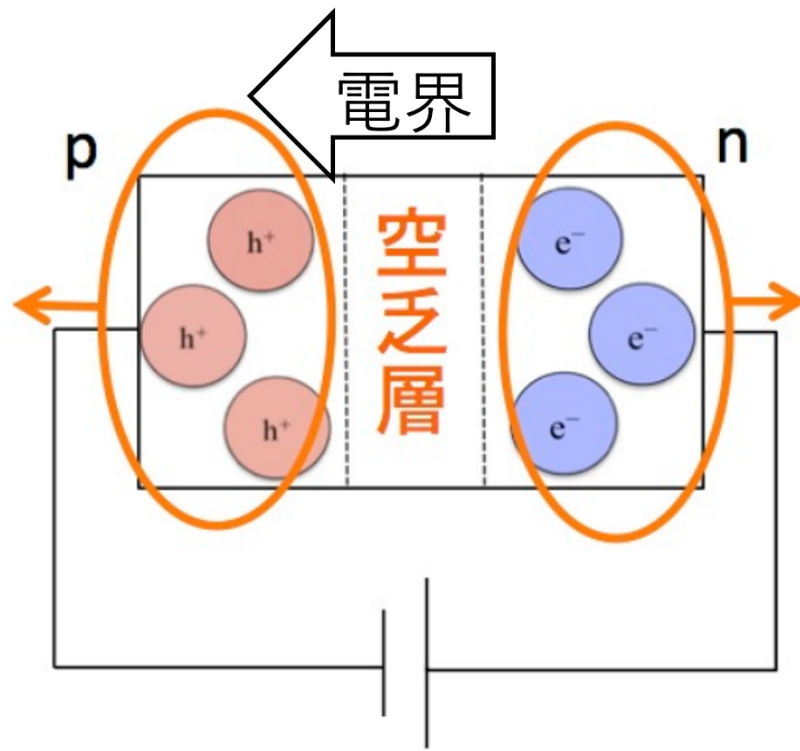


図 4.3 空乏層

光がこの空乏層に照射されると電子-正孔対が生成し、内部電界によって電子は N 型半導体側へ、正孔は P 型半導体側へ移動し、光の照射中は電流が流れる (図 4.4)。

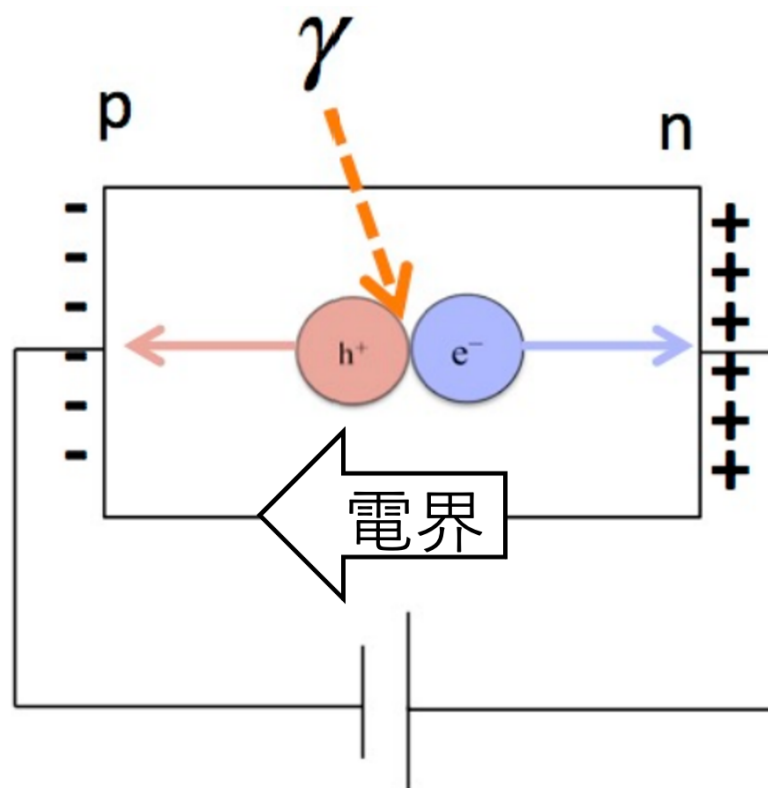


図 4.4 電子-正孔対の生成

APD は、通常の写真ダイオードと基本的な構造は同じであるが、P 型半導体の層が P 層、P+ 層、P- 層の 3 層に分かれている (図 4.5)。P+ 層は正孔の濃度が高い。P- 層は正孔の濃度が低く、光を吸収して電子、正孔を生成する。N 層に最も近い P 層では内部電界が通常のフォ

トダイオードに比べ大きいため、生成された電子が加速する。加速された後、大きなエネルギーを持った電子が半導体の結晶格子に衝突することで、新たな電子-正孔対が生成される。生成された電子がさらに加速、衝突して電子-正孔対の生成を繰り返す。このようにして電子-正孔対が雪崩のように発生する様子から、この現象をアバランシェ増幅と呼ぶ。APD は 1 つの電子を指数関数的に増加させるため、微弱光、例えばシングルフォトンであったとしても検出が可能となる。また、APD はある一定の大きさ以上の逆電圧を印加することで動作し、アバランシェ増幅が開始される電圧を降伏電圧と呼ぶ。また、このような動作状態をガイガーモードと呼び、ガイガーモードで電流を放出することをガイガー放電と呼ぶ。

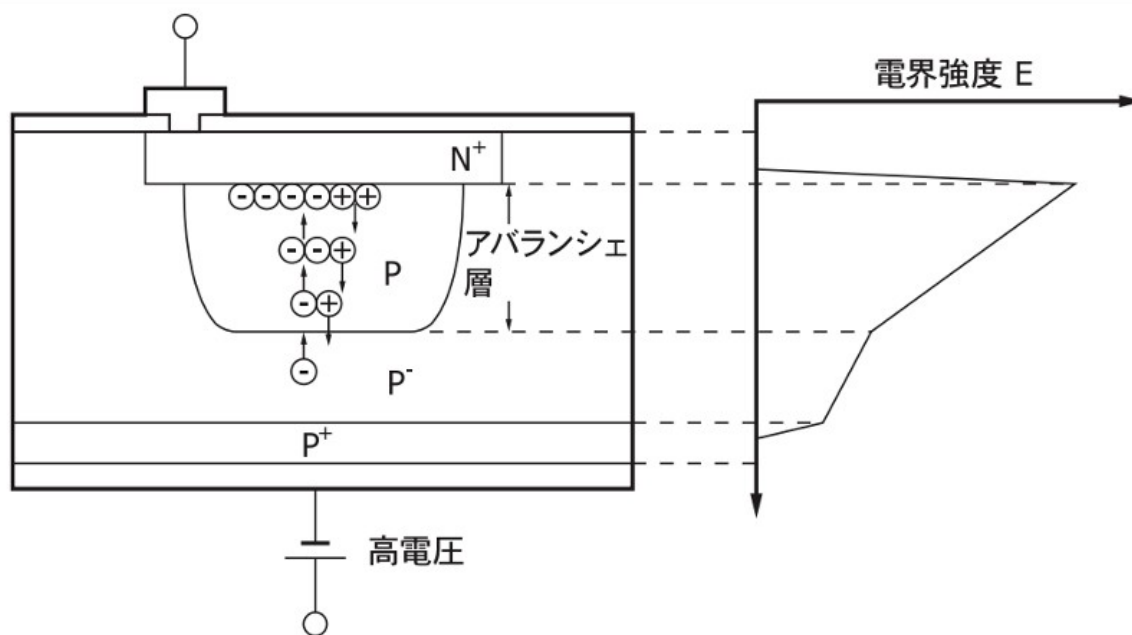


図 4.5 APD の内部構造

- クエンチング抵抗

いったん光子が入射すると APD は、内部電界が保たれる間はガイガー放電を続けるため、次の光子を検出するために APD の動作電圧を下げる必要がある。そこで、クエンチング抵抗を APD に直列に接続する。これにより、ガイガー放電による出力電流がクエンチング抵抗を流れる際に電圧降下を起こし、直列に接続された APD の動作電圧を下げて、放電を停止することができる。

4.1.3 基本動作

MPPC のピクセルは、それぞれが光子の検出時に同じパルスを出力する。複数のピクセルにて発生したパルスは重ね合わされて出力される。また、各ピクセルからの出力パルス数は 1 つであり、入射光子数によって変化しない。1 ピクセルに光子が 1 個入った場合、または光子が 2 個同時に入った場合でも出力パルスは 1 つだけである。よって、MPPC から出力されるパルスは入射した光子の数に比例する。これより、パルスの電荷量を積分することから、入射した光子の数を測定することが可能になる。

4.1.4 特性

MPPCに関する諸特性 [12] を以下に示す。

- ゲイン

ゲインとは信号の増幅率を表すものである。MPPCの増倍率 (M) は、1 ピクセルが光子 1 個を検出して出力されるパルスの電荷量 (Q) を、電気素量 $e = 1.602 \times 10^{-19}$ C で割った値である。

$$M = \frac{Q}{e} \quad (4.1)$$

また、 Q は印加電圧 V_R と降伏電圧 V_{BR} に依存する。1 ピクセルの容量を C とすると、 Q は式 (4.2) のように表される。

$$Q = C \times (V_R - V_{BR}) \quad (4.2)$$

式 (4.1)、(4.2) より、MPPC のピクセル容量が大きいほど、また降伏電圧と印加電圧の差（オーバー電圧 V_{over} ）が大きいほど、増倍率が高くなることがわかる。また、増倍率には温度特性がある。印加電圧の大きさが同じ場合は、温度が上昇すると増倍率は低下する。これは温度が上昇すると半導体結晶中の格子振動が激しくなり、APD 内部で生成された電子が十分に加速されないうちに結晶と衝突する確率が高くなることで、アバランシェ増幅が起こりにくくなり、降伏電圧が高くなるからである。

増幅率を一定にするには、これらを踏まえ、用途に応じて逆電圧を設定する必要がある。

また、1 光電子による信号 1 p.e. とする。

- ダークカウントレート

MPPC やガイガーモードで使用する APD において、熱的に発生した暗電流のキャリアが増倍されてパルスが発生する。この熱的に発生した電子も入射光子によって生成された電子と同様な信号（1 光電子による信号 1 p.e.）に増倍される。入射光子によるパルスと熱的に発生した電子によるパルスはパルス形状からは区別がつかない。この暗状態において 0.5 p.e. の閾値を超えるパルスがダークパルスであり、検出誤差の原因となる。ダークパルスの 1 秒当たりの数をダークカウントと定義し、 $N_{0.5\text{p.e.}}$ [単位: cps (カウント毎秒)] と表す。

また、熱的に発生する電子によってダークパルスが発生することから、ダークカウントレートには温度特性がある。絶対温度を T [K]、任意定数を A 、バンドギャップエネルギーを E_g [eV]、ボルツマン定数を k [eV/K] とすると、式 (4.3) のように表される。

$$N_{(0.5\text{p.e.})}(T) \approx AT^{3/2} \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right) \quad (4.3)$$

これより、逆電圧を高くすると検出効率が上がるがその分ダークカウントも大きくなることがわかる。また、ダークカウントは温度が低いほど値は小さくなることがわかる。

- クロストーク

MPPC のピクセルはガイガー放電が起こった際に赤外波長の 2 次的な光子を放出することがある。これが他のピクセルに入射することで、あたかも光子が入射してきたようなふるまいを取ってしまう。つまり、この場合、1 ピクセルに光子が入射したとき 2 p.e. 以上のパルスが観測されている。このような現象をクロストークと呼び、実際の光子数よりも大きなパルスを出力してしまっている。

- アフターパルス

MPPC のピクセルでガイガー放電が起こった際に、半導体結晶内に存在する結晶欠陥に電子がトラップされ、一定時間後にその電子が放出されることがある。放出された電子は光子が入射したときと同様に半導体結晶内で増幅され、パルスが生成される。このような過程で光子が入射した後に一定時間後に放出されるパルスをアフターパルスと呼ぶ。アフターパルスは実際に光子が入射した際に放出されるパルスと区別することが出来ないため、誤検出の原因となりうる。

- 時間分解能

MPPC の各ピクセルにおいて光子の入射から信号が出力されるまでの時間には配線の長さ等によるばらつきが生じる。このばらつきを TTS(Transit Time Spread) と呼ぶ。MPPC に印加する逆電圧が大きくなると TTS は小さくなる。

4.2 WAGASCI、Wall-MRD のエレクトロニクス

4.2.1 フロントエレクトロニクス

WAGASCI、および Wall-MRD で用いられるデータ収集システムの概略図を図 4.6 に示す。WAGASCI、および Wall-MRD は VME モジュールで規格されている。

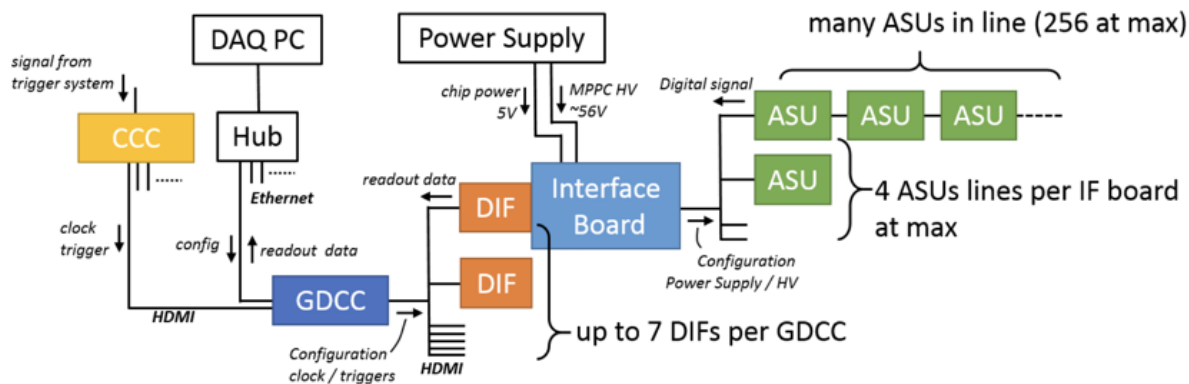


図 4.6 データ収集システムの概略図

これらのデータ収集システムはフランスの Laboratories Leprince Ringuet (LLR) で設計され、日本で製作された。

以下、装置を構成するモジュールについて述べる。

- Active Sensor Unit (ASU)

ASU はフランスの OMEGA 社によって開発された信号読み出し専用チップ (ASIC) である後述の SPIROC2D を搭載したフロントエンドボードである。MPPC のアナログ信号をデジタル信号へ変換して送信する役割を担っている。ASU と後述の InterFace、及び ASU 同士は Samtec 社の 50 pin のフラットケーブルを介して接続されている。また、ASU は WAGASCI の側面と上面にそれぞれ 20 枚、また Wall-MRD の上面と底面にそれぞれ 3 枚ずつ設置されている。図 4.7 に ASU の写真の写真を示す。

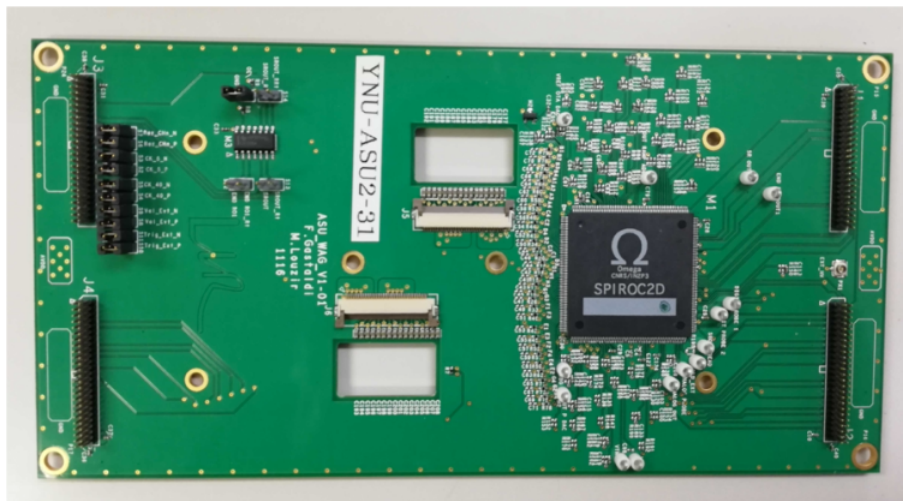


図 4.7 ASU

- SPIROC2D

SPIROC(Silicon Photomultiplier Integrated Read Out Chip) は前述のとおりフランスの OMEGA 社によって開発された MPPC 信号読み出し専用チップ (ASIC) である。ASU 上に搭載されており、図 4.7 の右側に搭載されている正方形の黒いチップが SPIROC2D である。SPIROC2D は MPPC から電荷信号のデジタル値への変換や、MPPC へ印加するバイアス電圧の微調整、信号のゲインの変更、ある閾値を超える信号をヒット信号として取り出すディスクリミネーターといった役割を担う。

- InterFace(IF)

IF は ASU と後述の DIF の間の信号のやり取りを担っている。このほかに、Low Voltage 電源を通じて DIF 上の FPGA チップや ASU 上の SPIROC2D への電源供給、また、High Voltage 電源を通じて MPPC へのバイアス電圧供給も担っている。IF は WAGASCI、Wall-MRD とともに各面に 1 枚ずつ、計 2 枚設置されている。また、IF 上から後述する時間情報の記録で用いられている Start acq 信号を取り出す役割も担っている。図 4.8 が IF の写真である。

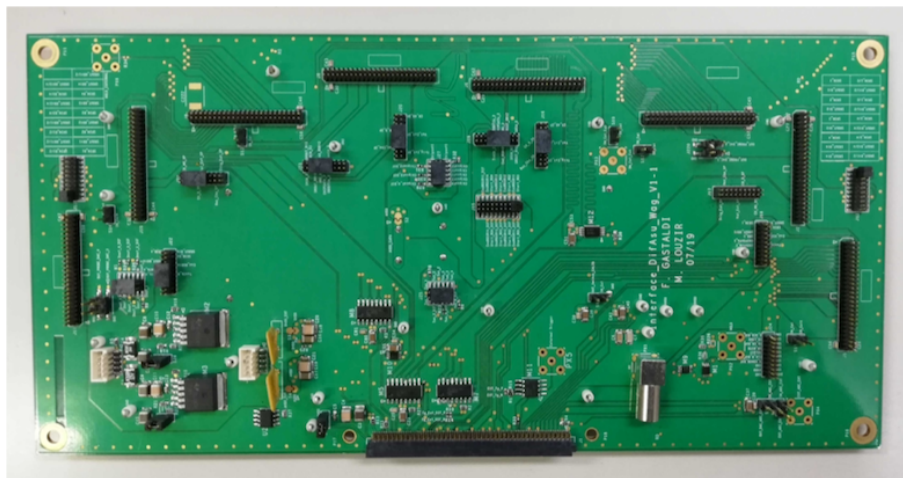


図 4.8 IF

- Detector InterFace(DIF)

DIF は後述の GDCC と HDMI ケーブルを介して接続されている。SPIROC2D によりデジタル変換されたデータの送信、DAQ PC 側で設定したヒット閾値の送信、後述する Slow Clock 信号の同期などを行っている。また、DIF 上には FPGA チップが搭載されており、SPIROC2D の制御を行っている。図 4.9 は DIF の写真である。

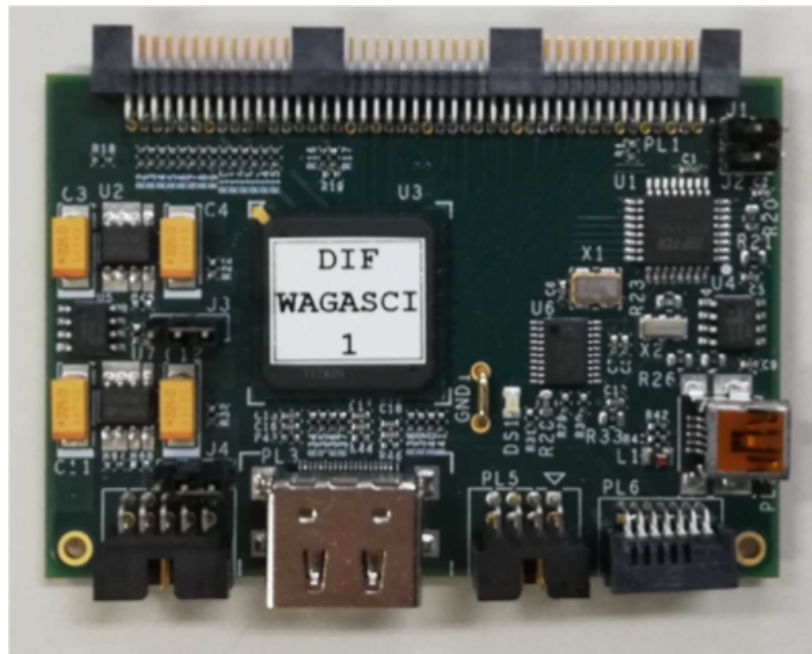


図 4.9 DIF

- Gita Data Concentrator Card (GDCC)

GDCC は DIF と DAQ PC のデータのやり取りを介する、FPGA チップが搭載されたボードである。DAQ PC とはイーサネットケーブルを通じて接続される。図 4.10 に GDCC および後述の CCC の写真を示す。

- Clock and Control Card (CCC)

CCC はスピルトリガーの制御を行っているボードである。GDCC とは HDMI ケーブル、DAQ PC とはイーサネットケーブルを通じて接続されている。GDCC とは全く同じハードウェアであり、GDCC の FPGA チップのファームウェアを書き換えることで CCC として使用することが可能になる。



図 4.10 GDCC および CCC

- Single MPPC Card

Single MPPC card は ASU と single 型 MPPC の接続を介する基板であり、最大 32 個の single 型 MPPC を接続することが出来る。これは Wall MRD に搭載されている ASU にフラットケーブルを介して接続されており、各面 3 枚の Single MPPC card に合計 80 個の single 型 MPPC が接続されている。図 4.11 に Single MPPC Card の写真を示す。

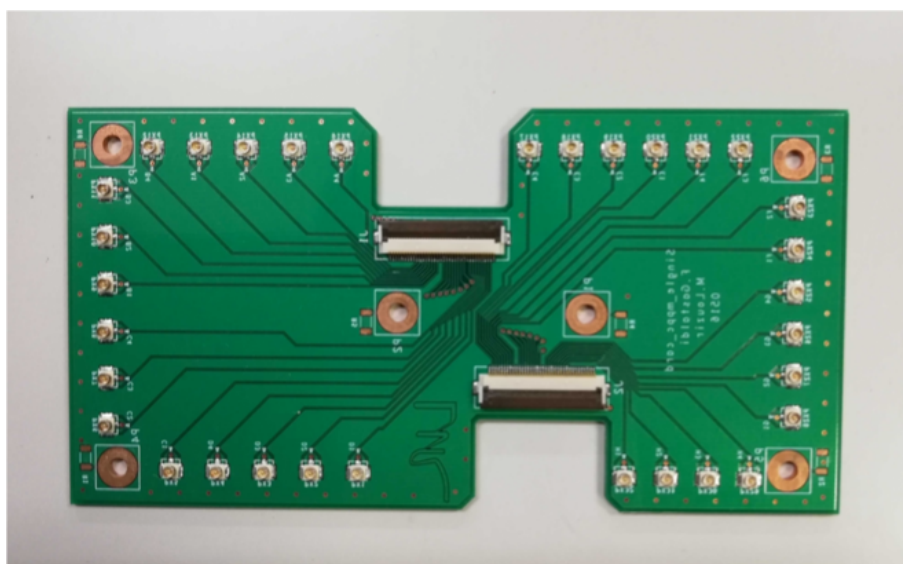


図 4.11 Single MPPC Card

4.2.2 エレクトロニクスの配置

WAGASCI では top、side にそれぞれ 1 枚の IF から 1 列 5 枚の ASU が 4 列、計 20 枚ずつ設置されている。また、Wall-MRD では top、bottom にそれぞれ 1 枚の IF から 3 枚の ASU が 1 列に設置されている。また、各検出器にはそれぞれ GDCC が設置されており、CCC は WAGASCI と Wall-MRD で共通のものを用いている。図 4.12 は WAGASCI、Wall-MRD の各エレキの配置図である。また、WAGASCI 及び Wall MRD 1 台あたりに搭載されている DIF、IF、ASU の枚数とチャンネル数を表 1 に示す。

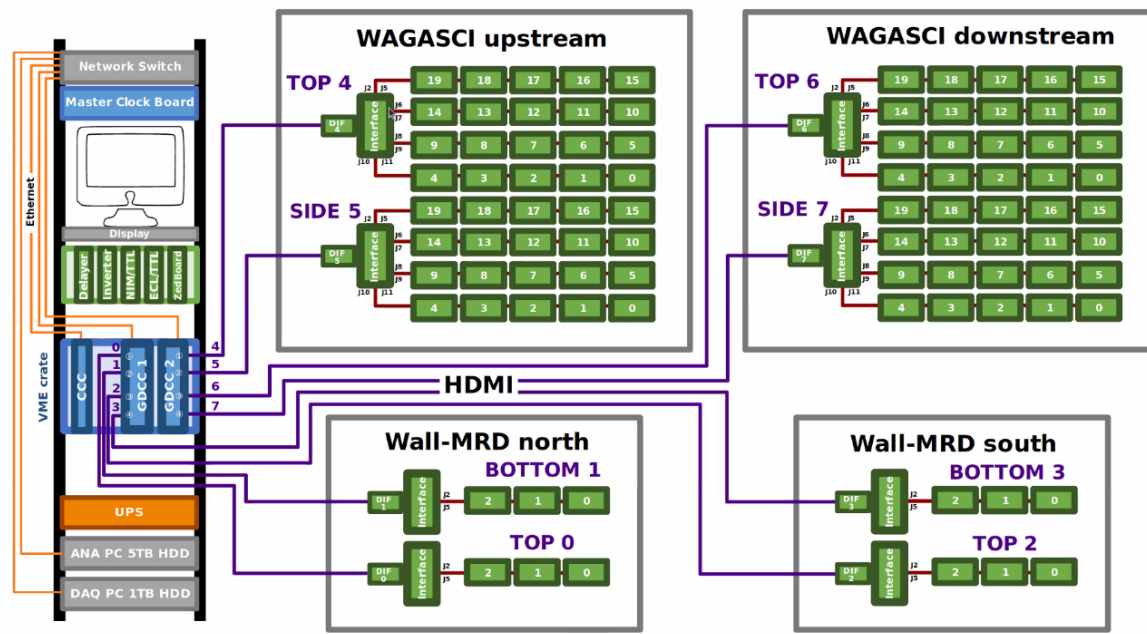


図 4.12 WAGASCI、Wall-MRD の各エレキの配置図 [8]

表 1 WAGASCI Wall-MRD の構成表

	WAGASCI	Wall-MRD
DIF、IF の枚数	2 枚 (top, side 各 1 枚)	2 枚 (top, bottom 各 1 枚)
ASU の枚数	40 枚 (top, side 各 20 枚)	6 枚 (top, bottom 各 3 枚)
MPPC のチャンネル数	1280	160

4.2.3 各種情報の記録

WAGASCI、Wall MRD では slow clock 信号、及び TDC ramp 信号を基準に検出時刻の測定を行っている。slow clock 信号は 580 ns 周期の矩形波信号であり、TDC ramp 信号は同じ周期で増減を繰り返す ramp 信号である。記録される時間情報は粗い時間情報、詳細な時間情報の 2 種類が存在する。前者は BCID、後者は TDC によって記録される。図 4.13 は時間情報記録システムの概略図である。

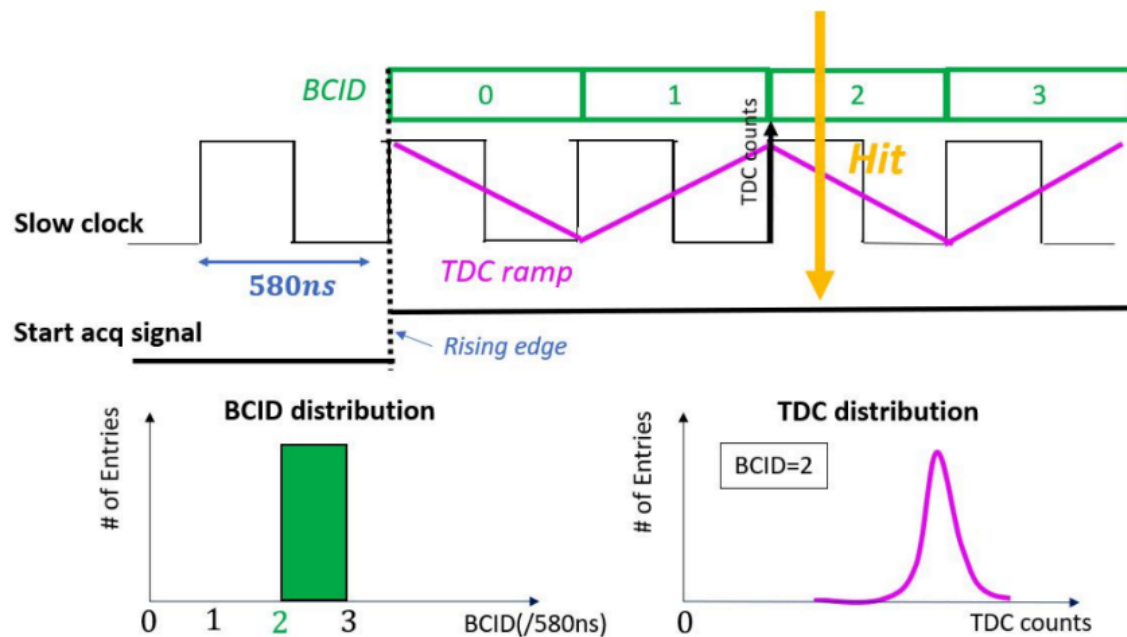


図 4.13 時間情報記録システムの概要図

以下、記録に用いられる信号や情報についてまとめたものになる。

- start acquisition (start acq) 信号
データ収集が開始される際に立ち上がる信号である。この信号が立ち上がっている間に WAGASCI および Wall-MRD のデータ収集を行う。
- slow clock 信号
580 ns 周期、duty 50% の矩形波信号である。後述の BCID や TDC の基準となる。slow clock 信号は CCC がビームトリガー信号を受信するたびに位相がリセットされる。
- BCID (Bunch Crossing ID)
BCID は粗い時間情報を記録するデジタルメモリである。BCID の値は start acq 信号が立ち上がった後の slow clock 信号の立ち上がり回数を表している。したがって、一つの BCID の幅は 580 ns となる。各 BCID はその間にヒットしたイベント数を記録している。
- TDC (Time to Digital Converter)
TDC は各イベントで記録されるアナログ値であり、ヒットした時点の TDC ramp 信号の値を記録している。1 TDC count はおよそ 0.14 ns の時間分解能となる。また、TDC ramp 信号は BCID が偶数のときは右下がり、奇数のときは右上がりの信号となる。
- Offset (TDC offset)
start acq 信号の立ち上がりと slow clock 信号の立ち上がりの間には一定の offset (TDC offset) が存在する。

4.3 BabyMIND のエレクトロニクス

4.3.1 フロントエレクトロニクス

- CITIROC

CITIROC は Weeroc 社製の MPPC 読み出し用の 32ch フロントエンド ASIC である。CITIROC からは 32 ch の信号が逐次出力され、それを ADC チップでデジタル化する。

- FEB

Front End Board(FEB) は、MPPC で読んだ信号をデジタル化する役割を果たしている。一つの FEB は 前述の CITIROC を搭載し、一枚で 32×3 個の MPPC の信号を読み出せる。図 4.14 は FEB の写真である。



図 4.14 FEB

- MCR

Mini-Crate(MCR) は、信号の読み出しを行う FEB を収納する。Back plane によりマスタークロックから送られてくるクロック信号を受け取り、FEB からの情報を USB を通してソフトウェアを動かす PC に伝送している。1 つの MCR で 6 つの FEB を収納でき、FEB は 1 枚で 96 ch まで読み出せるので 1 台の MCR で最大 580 ch を読むことが可能である。図 4.15 は MCR の写真である。赤く囲われた部分に 6 枚の FEB が収納されている。



図 4.15 MCR

4.3.2 エレクトロニクスの配置

図 4.16 にデータ取得のダイアグラムを示す。Detector の枠に入っているものが Baby MIND で使われているエレクトロニクスである。

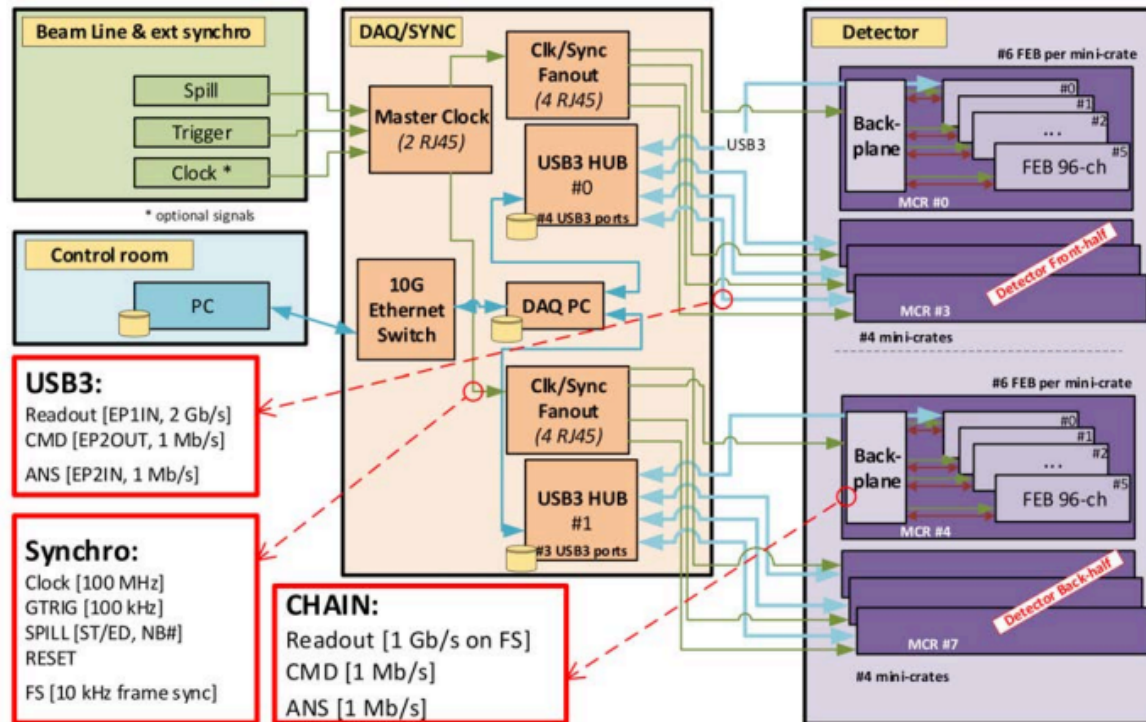


図 4.16 BabyMIND のデータ取得システムの概要図 [11]

第 5 章 ビームデータの取得状況

T2K 実験では、ニュートリノビームが出される期間が決まっており、その期間をビーム期間と呼ぶ。2023 年 11 月からのビーム期間を run13、2024 年 11 月からビーム期間を run14 としている。また、1 つの run の間でもビーム期間が分かれている。run13 では 2023 年 11 月から 12 月まで (11 月期)、2024 年 2 月 (2 月期)、2024 年 6 月から 7 月まで (6 月期) がビーム期間であり、run14 では 11 月から 12 月まで (11 月期) がビーム期間であった。このビーム期間までに、検出器の準備作業が必要である。

本章では、各 run に向けて行った WAGASCI、Wall-MRD および BabyMIND の準備作業と、取得したニュートリノビームデータについて記載する。

5.1 run13 に向けての準備作業

以下、作業内容を検出器ごとに示す。

5.1.1 WAGASCI WallMRD

- WAGASCI の上部構造体へ新規構造物を設置

2023 年 11 月に下流 WAGASCI の上部構造体へ、新規構造物を設置した。これについては、6 章にて詳細を記述する。

- WAGASCI 用の GDCC の交換

2023 年 10 月、ビーム準備の際に WAGASCI においてデータ取得ができなくなるという問題が発生した。これに対して図 4.6 より、WAGASCI のデータが全て収集される GDCC に問題があると推定し、WAGASCI 側の GDCC の交換を行った。

これにより、WAGASCI におけるデータ取得が再び可能になった。

- dead channel と光漏れの確認

WAGASCI と Wall MRD は同じ DAQ システムを使用している。図 5.1 の左は Wall MRD north top、右は WAGASCI upstream top の ADC 分布図である。各 ASU で MPPC の channel 毎に charge の ADC count とヒット数を確認できる。例えば、Wall MRD north top の channel 16 にヒットがないのは MPPC が接続されていないからである。この分布を見ることで、dead channel や光漏れを検出している channel がないかを確認することができる。ADC 分布図と過去の run での ADC 分布図を比較して、dead channel と光漏れの有無を確認した。

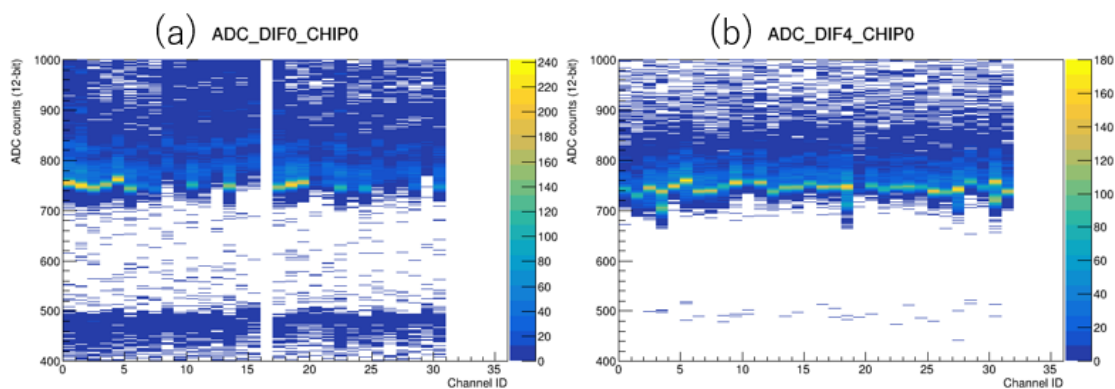


図 5.1 (a)Wall-MRD north top、(b)WAGASCI upstream top の ADC 分布図

- WAGASCI の上部構造体のデータ伝送用の内部ケーブルの交換
2024 年 1 月に下流 WAGASCI の上部構造体のデータ伝送用の内部ケーブルの交換を実施した。こちらについても、6 章にて詳細を記述する。
- CCC の交換
2024 年 5 月、データ取得に問題が発生し、CCC の交換を行った。交換後、再びデータ取得が可能になった。

5.1.2 Baby MIND

- カメラの設置
2023 年 11 月にカメラを ND280 実験ホールの B2 階に BabyMIND を捉えられるような位置に設置した。設置した位置とそれぞれのカメラの見え方を図 5.2、fig:BEAM-pre13-cameraMiekata にそれぞれ示す。これは B2 にある検出器の様子をオンラインで監視することを可能にしている。これにより、検出器での様子を外部から確認することができ、不測の事態にもいち早く気付けるようになる。

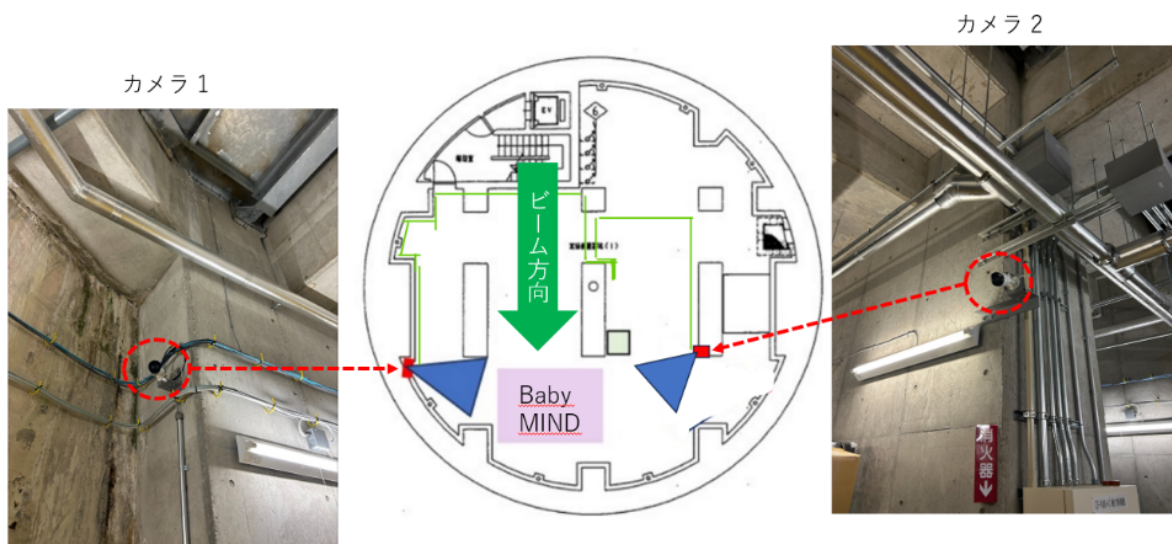


図 5.2 カメラの設置位置

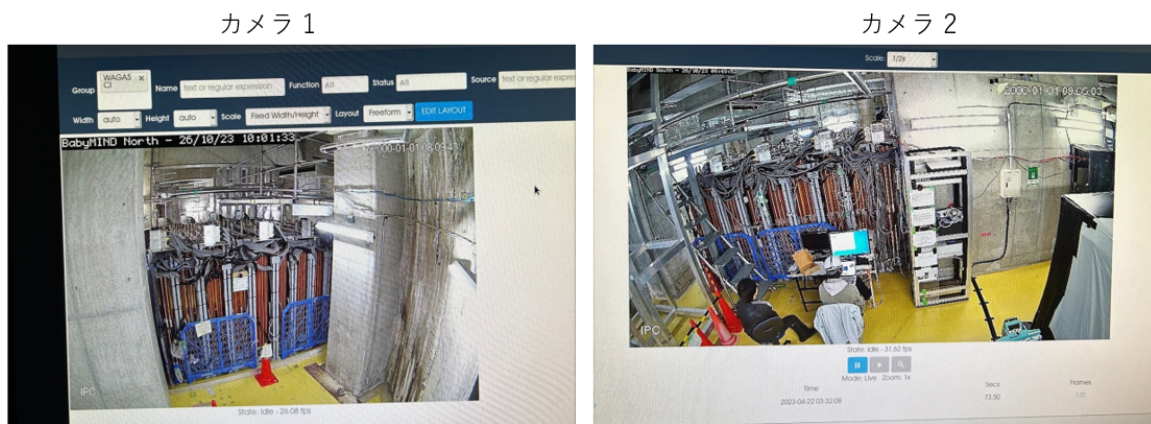


図 5.3 設置した 2 台のカメラから見える画像

- dead channel の確認

データ取得を行い、channel ごとの信号の波高分布を確認した。そのデータの一部を図 5.4 に示す。このように検出光子数のピークごとの間隔が一定でありながら、ピークの高さが下がっていくような形状であることを確認すると dead channel ではないと判断できる。この波高分布を各 FEB の各 channel で調べることで、dead channel の有無を確認した。

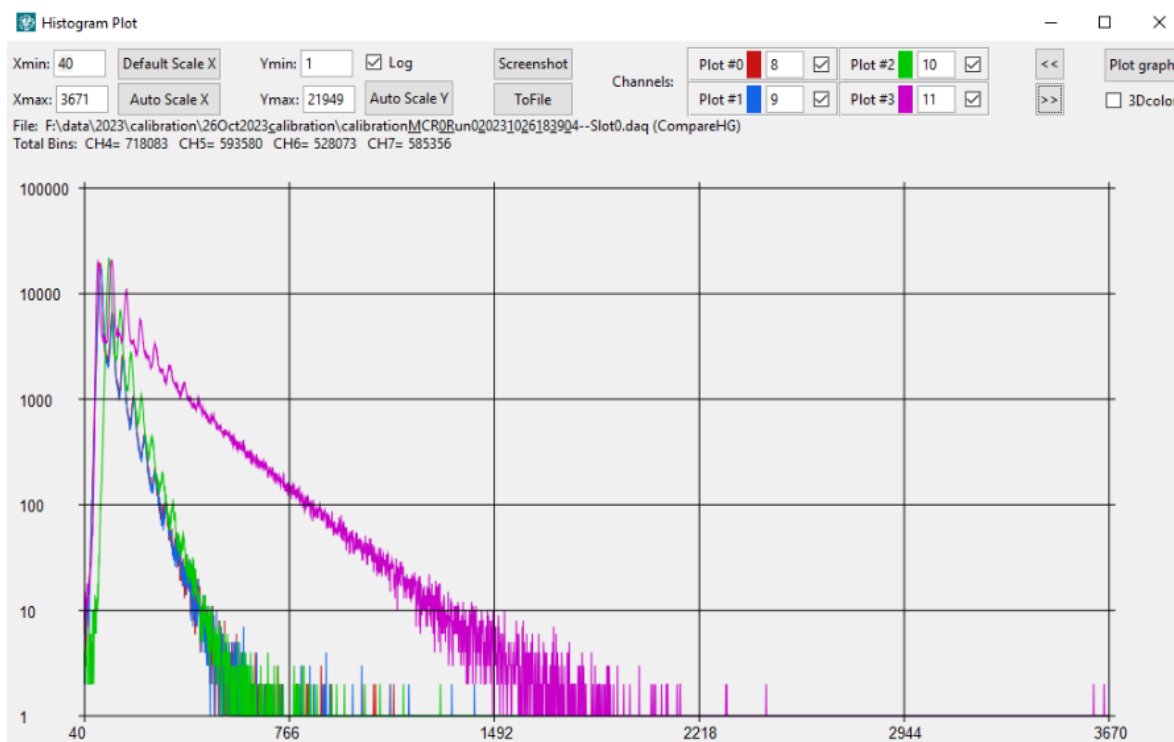


図 5.4 channel ごとの検出光子の様子を示した波高分布の例

5.2 run13の取得データの評価

run13におけるWAGASCI、Wall-MRDの取得データの一部を11月期、2月期、6月期それぞれ図5.5、5.6、5.7に示す。この図はBCID分布図であり、縦軸がエントリー数、横軸が時間軸となっており1ビン当たり580nsとなっている。

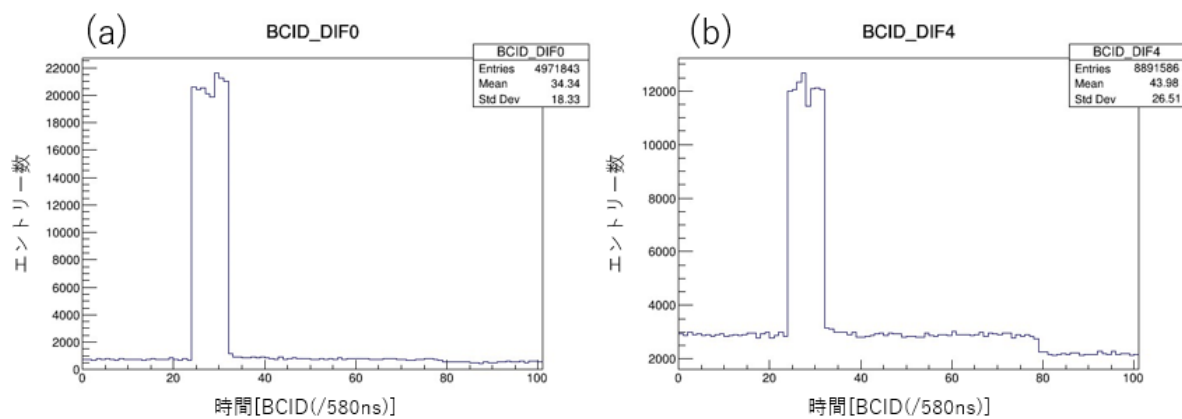


図 5.5 11月期 (2023/12/1) における (a)Wall-MRD north top、(b)WAGASCI upstream top の BCID 分布図

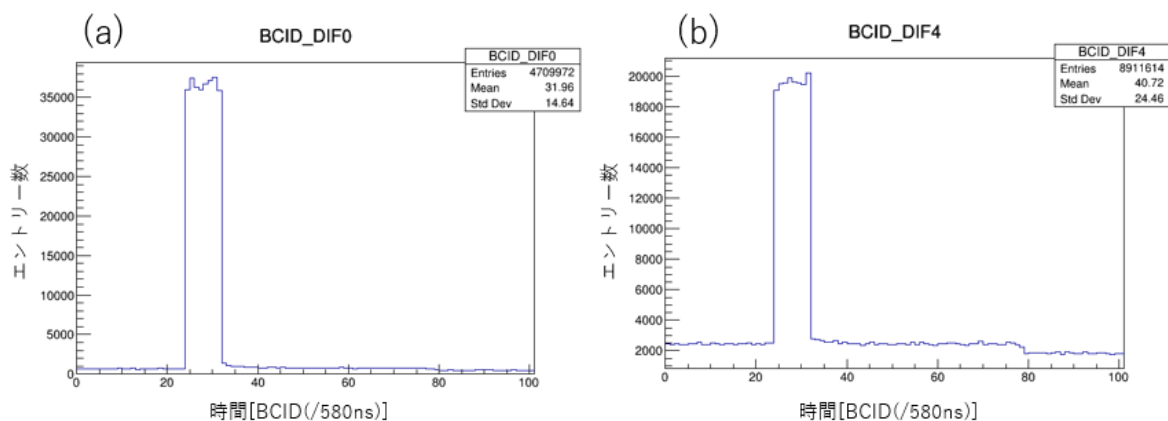


図 5.6 2月期 (2024/2/13) における (a)Wall-MRD north top、(b)WAGASCI upstream top の BCID 分布図

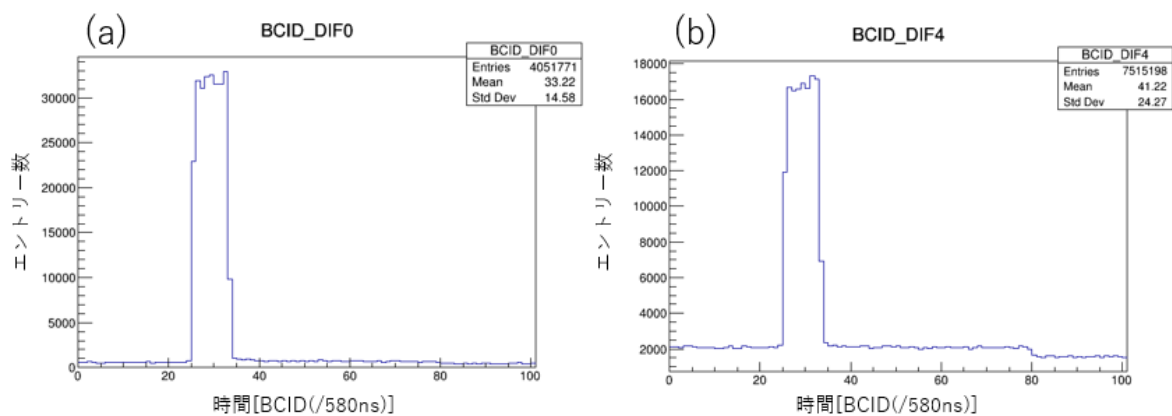


図 5.7 6月期 (2024/6/12) における (a)Wall-MRD north top、(b)WAGASCI upstream top の BCID 分布図

11月期、2月期では、それぞれニュートリノビーム由来の8バンチ構造を確認することができた。しかし、6月期では8バンチ構造をしっかりと確認することができなかった。このことについては、7章にて詳細を記述する。

また、BabyMINDの取得データの一部も11月期、2月期、6月期を図5.8に示す。この図はBabyMINDにおけるtiming plotであり、横軸は各FEBの番号、左側の縦軸はニュートリノビームが出てからの時間であり、右側の軸はhit数を示す2次元ヒストグラムとなっている。11月期、2月期、6月期いずれもニュートリノビーム由来の8バンチ構造を確認することができる。

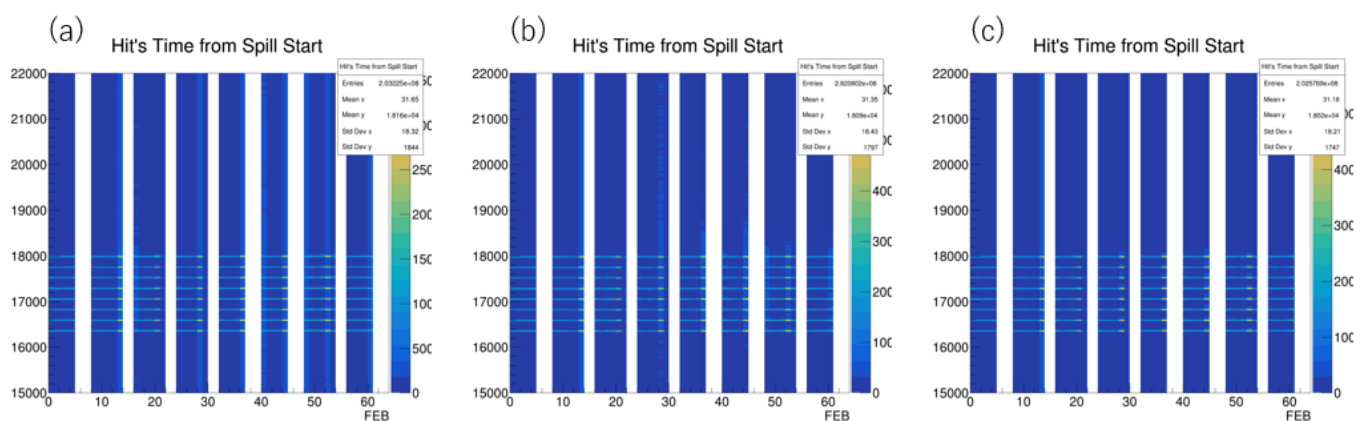


図 5.8 (a)11月期 (2023/12/1)、(b)2月期 (2024/2/13)、(c)6月期 (2024/6/12) における Baby-MIND の timing plot

5.3 run14 に向けての準備作業

以下、作業内容を run13 と同様に検出器ごとに示す。

5.3.1 WAGASCI WallMRD

- エレクトロニクスの清掃

2024年10月、WAGASCIとWall-MRD周りのエレクトロニクスの清掃を行った。蓄積された埃や汚れによる接触不良に由来するデータ取得の問題を未然に防ぐためである。図4.12の左側のPCやCCC、GDCC等の埃や汚れの除去を行った。

- CCCの交換

2024年10月、CCCを新しいものに交換した。これについては、7章にて詳細を記述する。

- dead channel と光漏れの確認

run13のときと同様に、dead channel と光漏れの有無を確認した。

5.3.2 Baby MIND

- FEB の清掃

2024 年 10 月、WAGASCI や Wall-MRD と同様にエレクトロニクスの清掃を行った。こちらにも蓄積された埃や汚れによる接触不良に由来するデータ取得の問題を未然に防ぐためである。清掃後、一部の FEB の故障が判明した。これは、作業者によって発生した静電気の影響によるものと考えられる。

- 故障した FEB の修理

清掃後に故障した FEB を修理した。修理された FEB を設置した後、データ取得が正常になされることを確認した。

- dead channel の確認

run13 のときと同様に dead channel の確認を行った。

5.4 run14 の取得データの評価

run14 における WAGASCI、Wall-MRD の取得データと BabyMIND の取得データの一部をそれぞれ図 5.9、5.10 に示す。

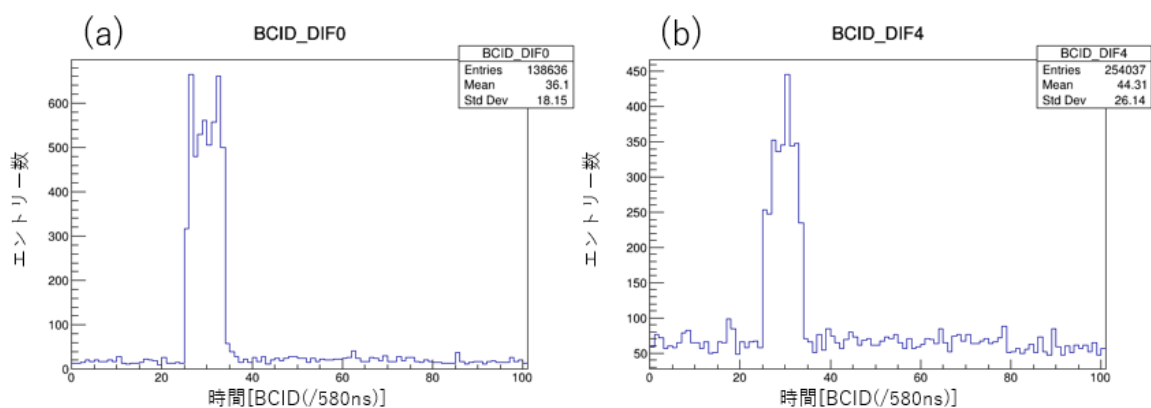


図 5.9 2024/11/28 における、(a)Wall-MRD north top、(b)WAGASCI upstream top の BCID 分布図

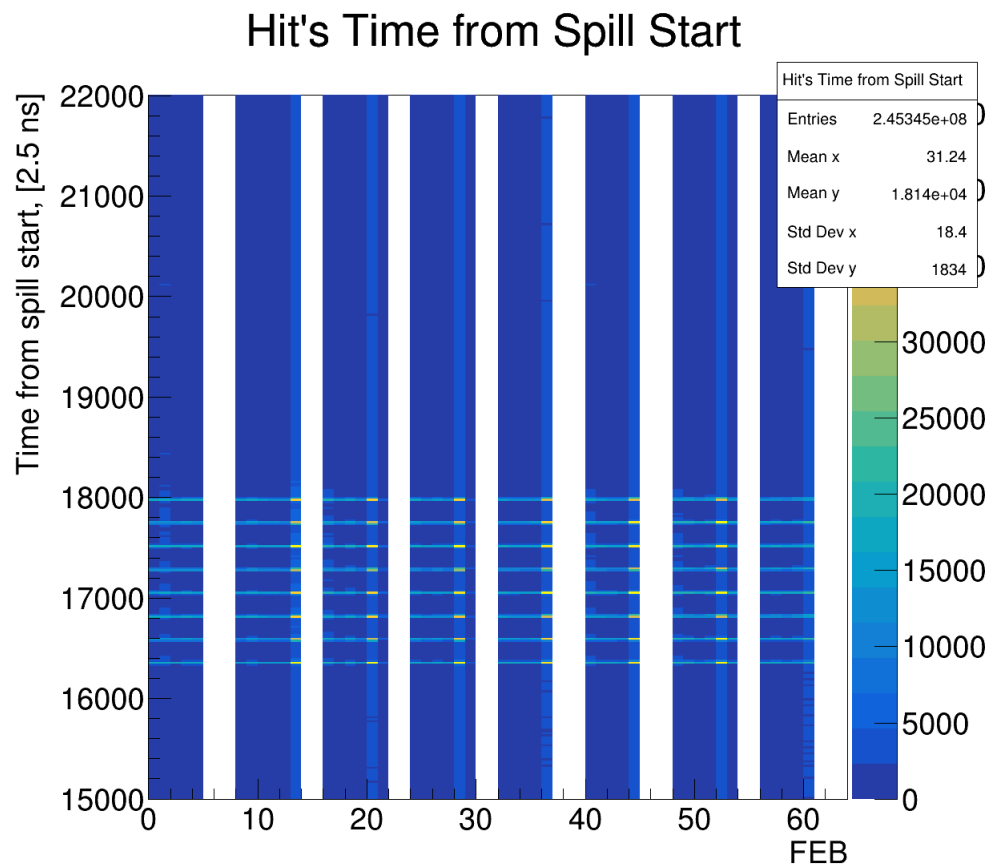


図 5.10 2024/11/28 の BabyMIND の timing plot

WAGASCI、Wall-MRD では 8 バンチ構造を確認することができず、run13 の 6 月期からの改善を確認することができなかった。一方で、BabyMIND では run13 と同様の 8 バンチ構造を確認することができた。

5.5 まとめ

T2K 実験 run13 と run14 に向けて、それぞれデータ取得のための準備作業を行い、ニュートリノビームデータを取得した。

WAGASCI、Wall-MRD では、run13 の 11 月期と 2 月期では 8 バンチ構造を確認することができたが、6 月期以降では確認できなくなった。run14 の 11 月期でも改善はみられていない、このことは 7 章でも詳細を記述するが、早期の解決が必要である。BabyMIND では、run13 と run14 ともに 8 バンチ構造を確認することができた。

各装置の運用状況については、今後も注視し、問題が発生次第早期に対応していく必要がある。

第 6 章 WAGASCI の上部構造体の改良

6.1 目的

run12(2022年11月～2023年6月)に、下流 WAGASCI の上部構造体 (DWG Top) に設置された読み出しエレクトロニクスにてデータ取得ができなくなるという問題が起こった。ここで、DWG の場所をあらためて、図 6.1 に記載する。また図 6.2 はデータ取得がうまくいかない様子を示す一例である。下流 WAGASCI のデータ転送速度のみ他と比べ異常に値が小さいことがわかる。

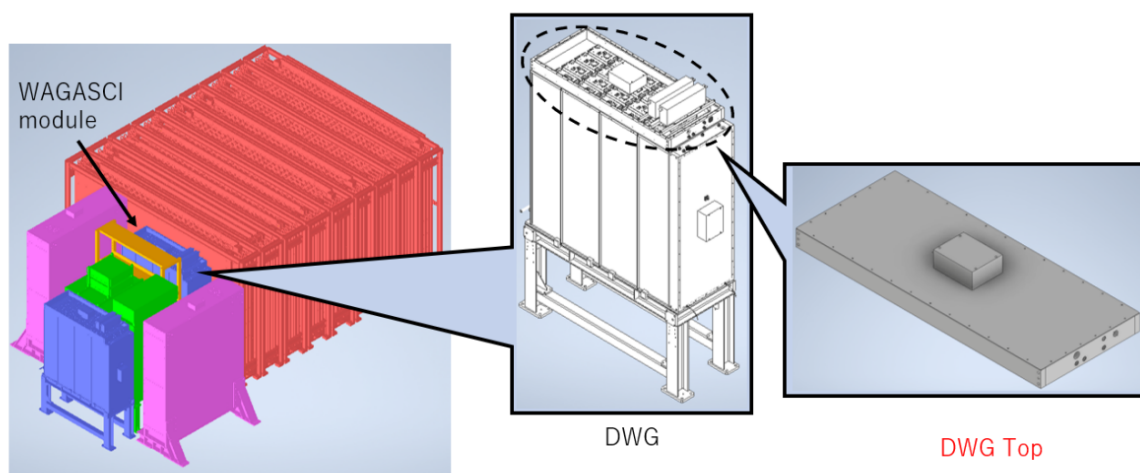


図 6.1 DWG Top を示す CAD モデル

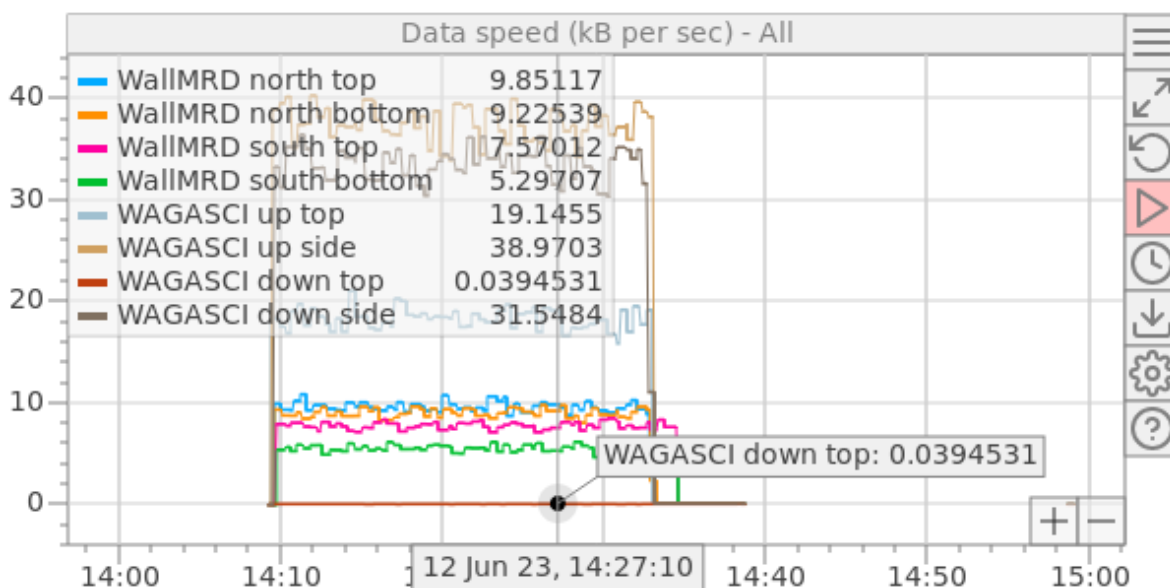


図 6.2 データ取得の失敗例

この問題は突然起こり、その場しのぎの対処をしていた。また、その場しのぎの対応をしたとしても、後日再びデータ取得の停止が発生するということが続いていた。

その場しのぎの対処でデータ取得が可能になるものの、根本的な解決はできない状態が続いてしまっ

おり、安定的なデータ取得の障壁となっていた。本章では、この問題に対する根本的な解決を目指し、その取り組みと成果について述べる。

6.2 データ取得停止の原因推定

DWG の上部構造体における本問題が発生した際、解決策として DWG の上部構造体のカバーの開閉を行っていた。開閉途中の DWG の上部構造体とカバーの実物写真を図 6.3 に示す。

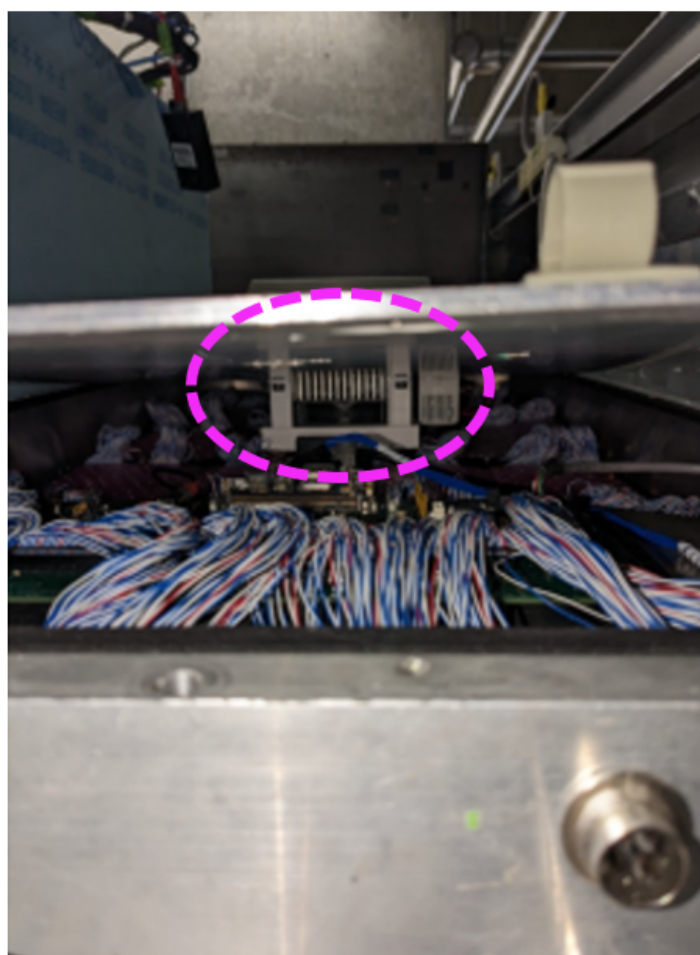


図 6.3 開閉途中の DWG の上部構造体とカバー

ここで図中の色付きで囲われた部分は、装置内部のエレキを冷やすためのファンである。ファンによって、エレキから発生する熱が装置内部にこもらないような構造となっている。

また、ここで図 6.4 にふたを開けた際の内部の写真を示す。

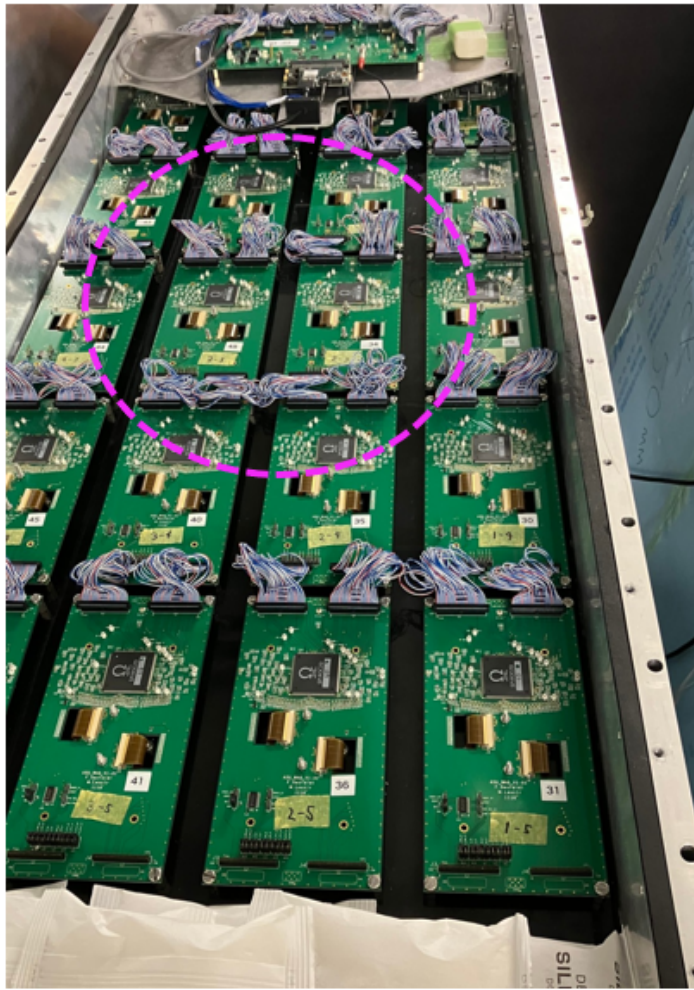


図 6.4 装置内部の写真

図 6.4 のように IF と各 ASU、および各 ASU 同士がデータ伝送用のケーブルを通して接続されている。ここで、図 6.3 における色付きの丸で覆われた箇所にあるケーブルがほかの部位と比較して潰れていることがわかる。この箇所は図 6.4 に示される DWG Top のカバーについているファンが位置する場所である。つまり、DWG Top のカバーによって内部のケーブルが圧迫していることがわかる。本問題が発生した際、DWG Top のカバーを開け、この潰れた箇所に対するケーブル圧迫を一時的に解消することで対応を行っていた。また、この対応の後にデータ再取得をすることで一時的な解決がなされていた。

これらを踏まえ、本問題の原因は DWG Top のカバーによる内部のケーブル圧迫によるものと推定した。

6.3 DWG 上部構造体への新規構造物の追加

前節より、本問題の根本的な解決のために、DWG Top のカバーのファンによるケーブル圧迫を解消させることが必要となった。このために、カバーとケーブルとの距離を生むための追加の新規構造物を設置することを試みた。

以下、新規構造物設置のためのデザイン、CAD を用いた設計、DWG Top への設置、および実際のデータ取得に対する評価について述べる。

6.3.1 DWG Top の設置方法

デザインを議論するために、DWG Top がどのようにして設置されているのかについて調査を行った。図 6.5 の左が DWG Top の構造物の CAD モデルである。図 6.5 の右のように、LONG BAR と SHORT BAR がそれぞれ 2 本ずつあり、これらを組み合わせることで内部にあるエレキを囲う構造をとっている。エレキは DWG Top 本体に取り付けられており、この構造物は WAGASCI 検出器本体に取り付けられている。

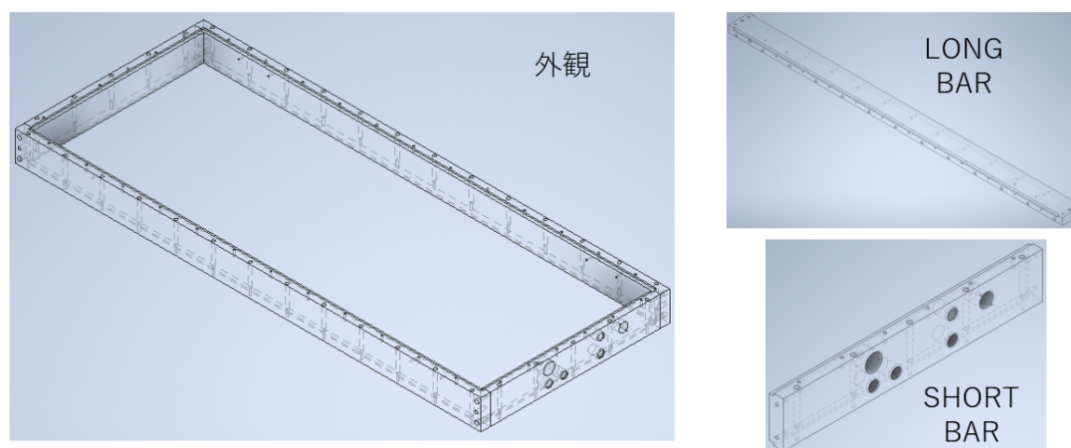
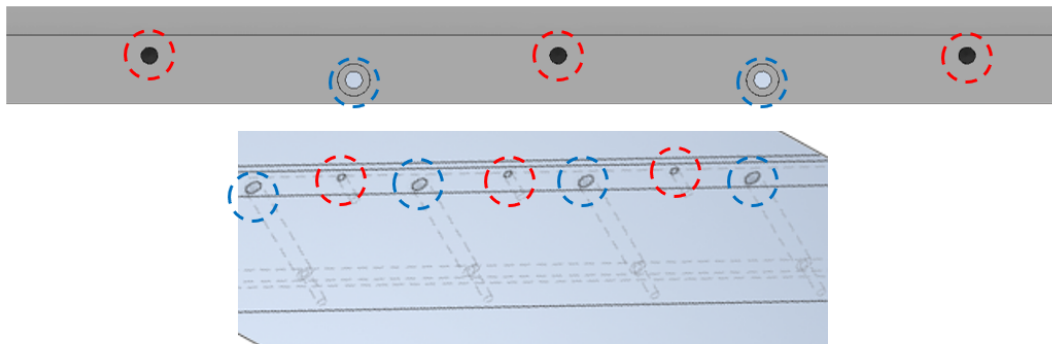


図 6.5 DWG Top の構造物の CAD モデル

また、図 6.6 に BAR のねじ穴について記載した図を示す。図 6.6 のようにねじ穴には 2 種類ある。1 つはカバーを固定するためのねじ穴、もう 1 つは DWG Top 本体に対して固定するねじ穴である。また、図 6.7 は設置されている構造物の概略図である。図 6.7 のねじ穴を図のようにしてカバーと構造物を固定することで、内部にあるエレキの保護を実現している。



- カバーの固定
- 本構造物(エレキボックスの側面)と下のWAGASCI本体の構造物との固定

図 6.6 BAR の各ねじ穴の用途

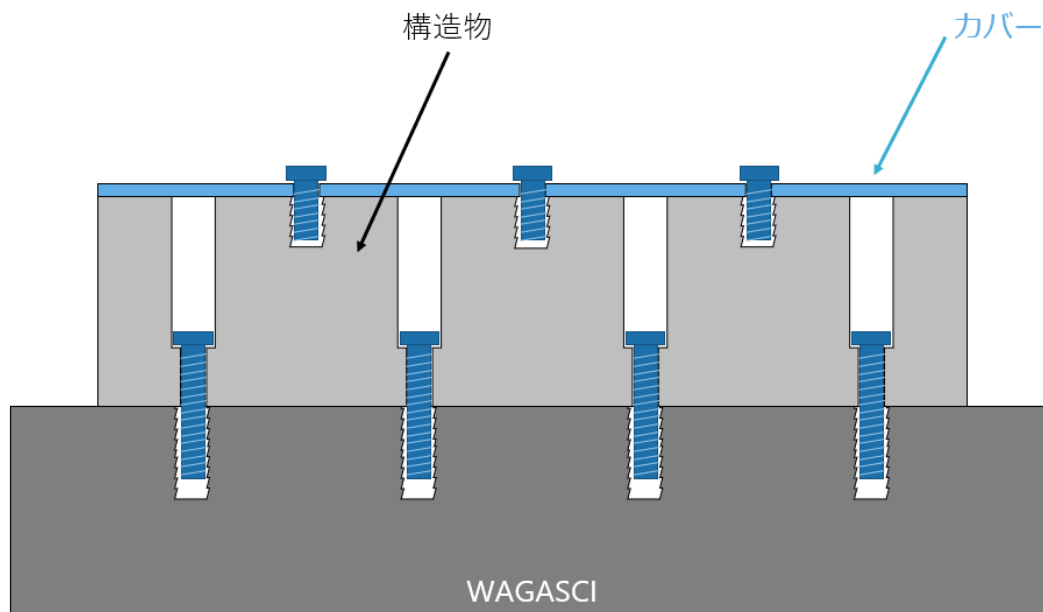


図 6.7 装置内部の写真

6.3.2 新規構造物のデザイン

デザインを考える上で長期的に設置できる点、また容易に設置できるという点をそれぞれ満たすようなデザインを考える必要があった。

まず溶接による固定を検討した。溶接であれば、長期的な固定が実現できるからである。しかし、元々 WAGASCI の構造物本体に用いられている材質がアルミニウム (A 6063) であったことが判明した。この材質の場合、酸化被膜を形成しやすく溶接性が悪化してしまう点と、熱伝導性が高く溶接箇所以外でも熱の影響が出てしまい強度が低下してしまうという点が問題点としてあった。これらより溶接での固定は困難であると結論付けた。

また、テープによる固定の検討もされた。溶接と比べると容易に設置することができるからである。しかし、固定が簡素である分、長期的な固定としては不十分であるという懸念点が挙げられた。これより、テープによる固定も不向きであると判断した。上記を踏まえ、新たなる固定方法としてカバーのねじ穴として利用していた箇所の一部を、新規構造物の固定用のねじ穴として利用する方法を検討した。この固定方法の概要図を図 6.8 に示す。ねじ穴の一部を利用することで、構造物に対しての固定とカバーの固定を両立することができる。

これにより、容易に、且つ長期的な固定を実現することが可能になった。よってこのデザインをもとに設計を行った。この際、本問題の発生原因と思われるファンの厚みから新規構造物の高さは5cmとした。

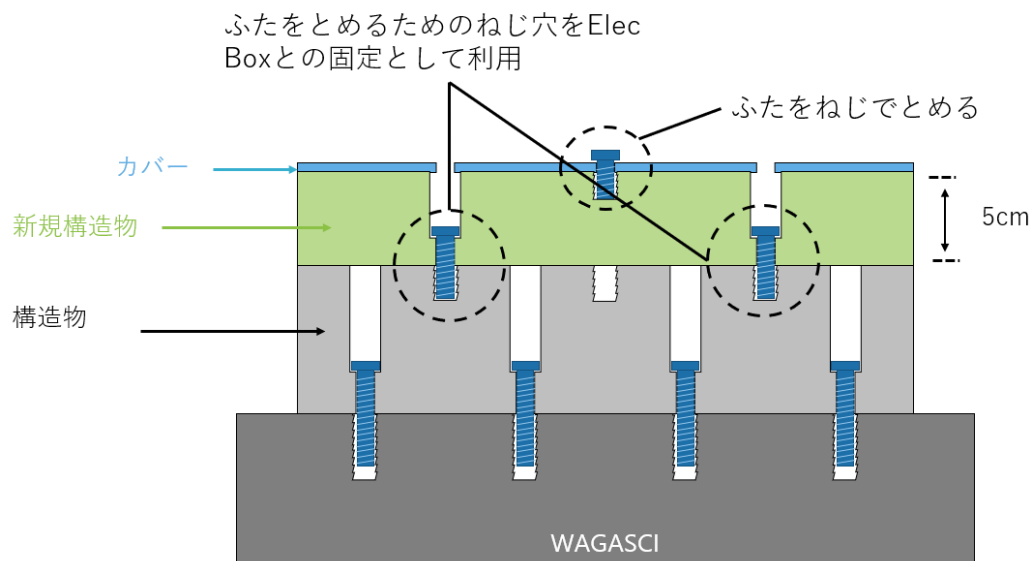


図 6.8 新規構造物の概要図

6.3.3 新規構造物の設計、および製図

前節を踏まえ、CAD を用いて新規構造物の設計を行った。図 6.9 にその CAD のモデル図を、図 6.10 に設置後のモデル図を示す。元の構造物と同様に LONG BAR と SHORT BAR をそれぞれ 2 本ずつ作製し、組み合わせる構造とした。ねじ穴の位置はカバーをつけるためのねじ穴の位置とズレがないことに注意を払い設計した。元の構造物に対して取り付けるためのねじ穴が、LONG BAR には 4 つ、SHORT BAR には 2 つ、それぞれ設けた。

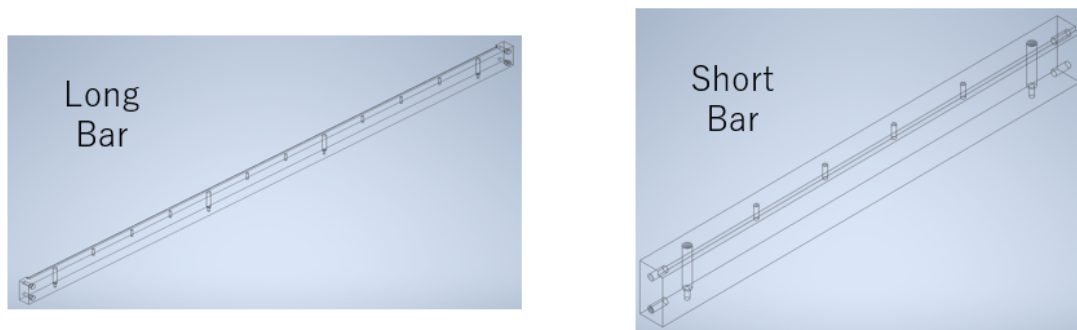


図 6.9 新規構造物の CAD モデル

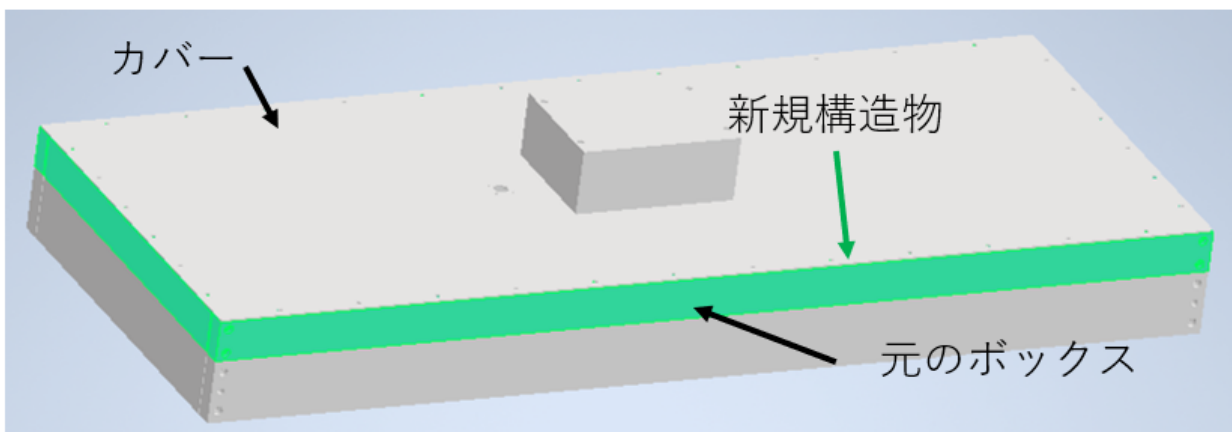


図 6.10 新規構造物を設置後の DWG Top のモデル図

これらを踏まえ、製図をし、新規構造物の製作を行った。設計図は図 6.11、図 6.12 にそれぞれ示す。

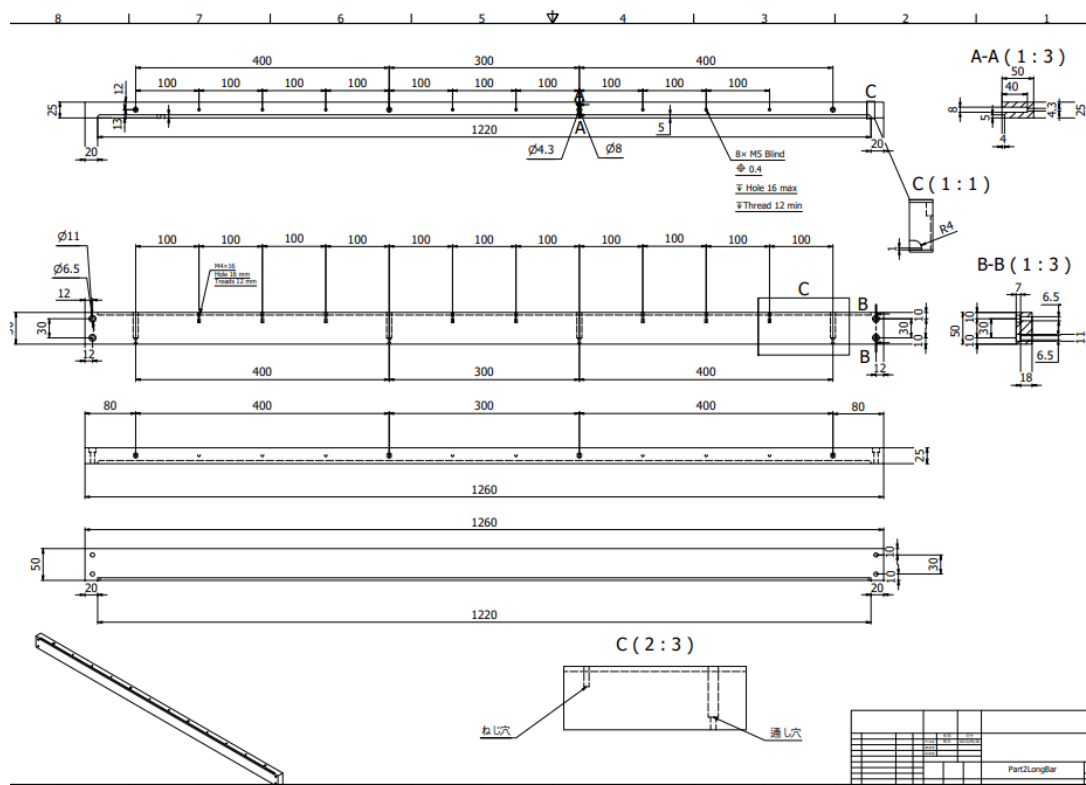


図 6.11 LONG BAR の設計図

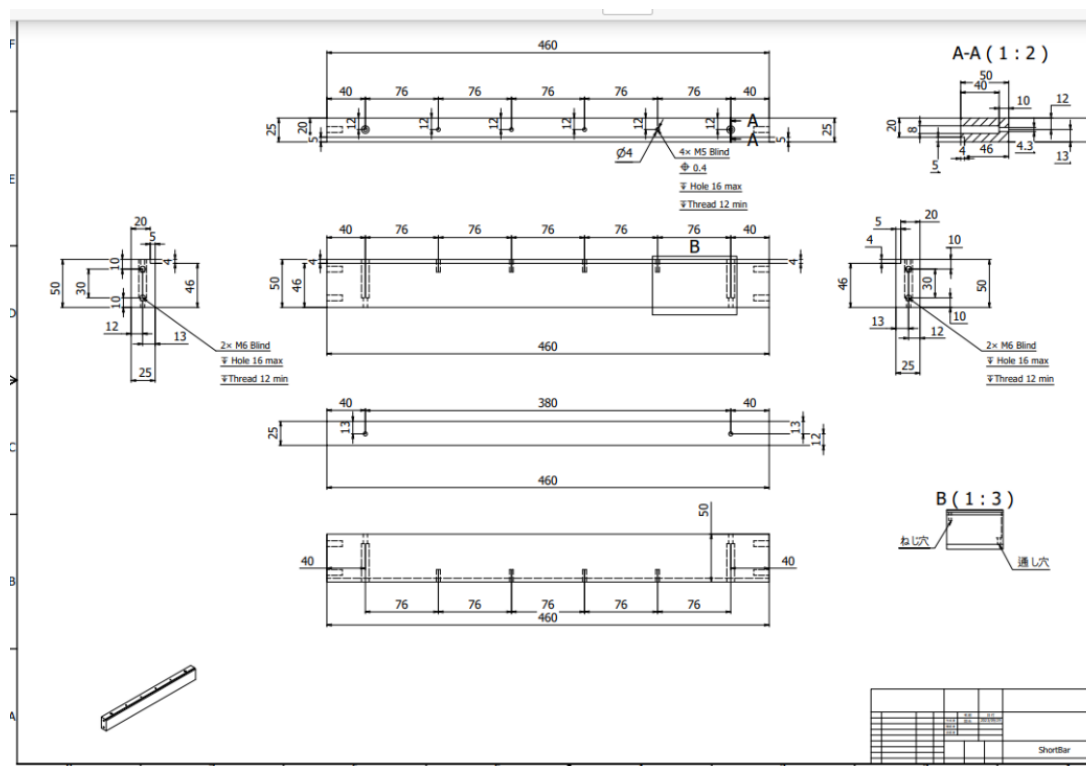


図 6.12 SHORT BAR の設計図

6.3.4 DWG Top への設置

図 6.11、6.12 から作製した新規構造物を DWG Top に 2023 年 11 月、設置した。図 6.13 に実際に設置した様子の写真を示す。赤丸の印が付いている箇所は、元の構造物に対して固定するためのねじ穴であるが、作製段階の加工精度の影響により、この箇所のみねじによる固定はできなかった。しかし、その他のねじ穴の固定は行うことができたため、長期的な固定は十分である確認はできた。



図 6.13 新規構造物を設置した DWG Top

また、図 6.14 に示すように元の構造物と新規構造物との間には遮光テープを貼った。これにより光漏れによる信号の検出を防ぐことができる。ふたと新規構造物の間も同様にして遮光を行った。



図 6.14 元の構造物と新規構造物との間を遮光した様子

以上より、新規構造物の設置が完了した。次にデータ取得を行い、新規構造物の設置による本問題に対する評価を行った。

6.3.5 データ取得と評価

run13 が新規構造物の設置後の 2023 年 11 月末から始まり、ニュートリノビームのデータ取得を行った。ニュートリノビームが出るまでの準備期間を含めたおよそ一か月の間は、DWG Top のみデータ取得が突然停止するという問題が発生することはなかった。また、その際に取得したデータの一例を図 6.15 に示す。この図は BCID 分布図であり、縦軸がエントリー数、横軸が時間軸となっており 1 ビン当たり 580ns となっている。DWG Top にて取得したデータから連続した 8 つのピークを確認することができ、ニュートリノビーム由来の 8 バンチを確認することができた。

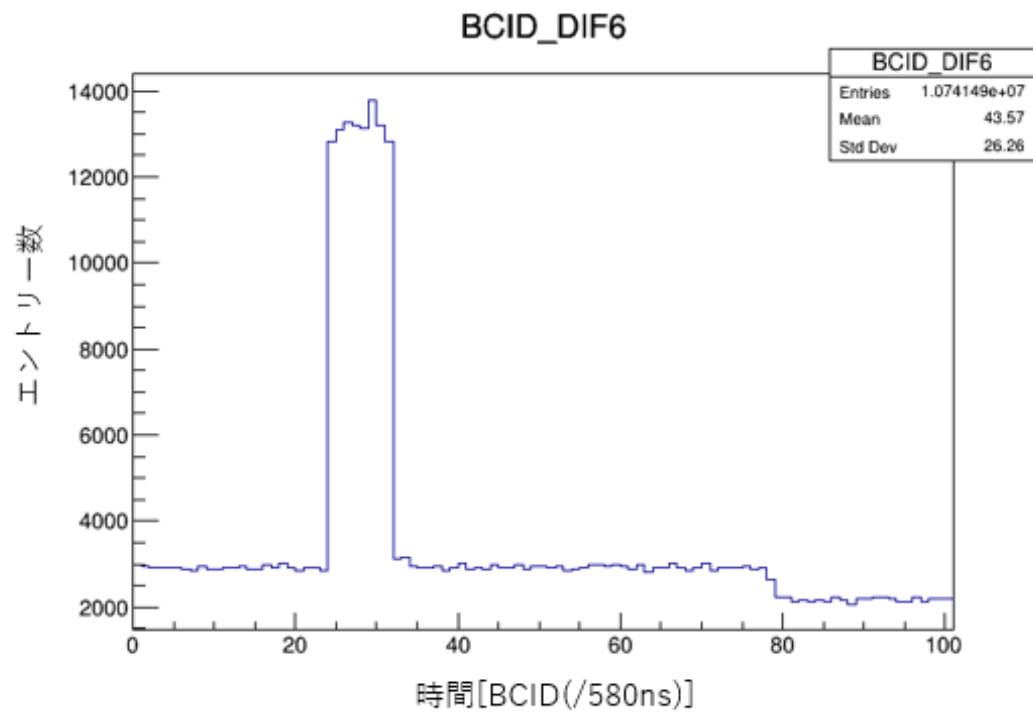


図 6.15 11/27 に取得した DWG Top のデータ

しかし、run13 のニュートリノビームのデータを取得中の 2023 年 12 月 13 日に、本問題が再び発生してしまった。このときのデータ取得の様子を図 6.16 に示す。DWG Top の Data speed のみ非常に小さい値となってしまっている。このときも、ふたを一度開けることで問題が解決し、以降 12 月の間はこの問題が発生することはなかった。しかし、問題の根本的な解決には至っていないことが判明した。

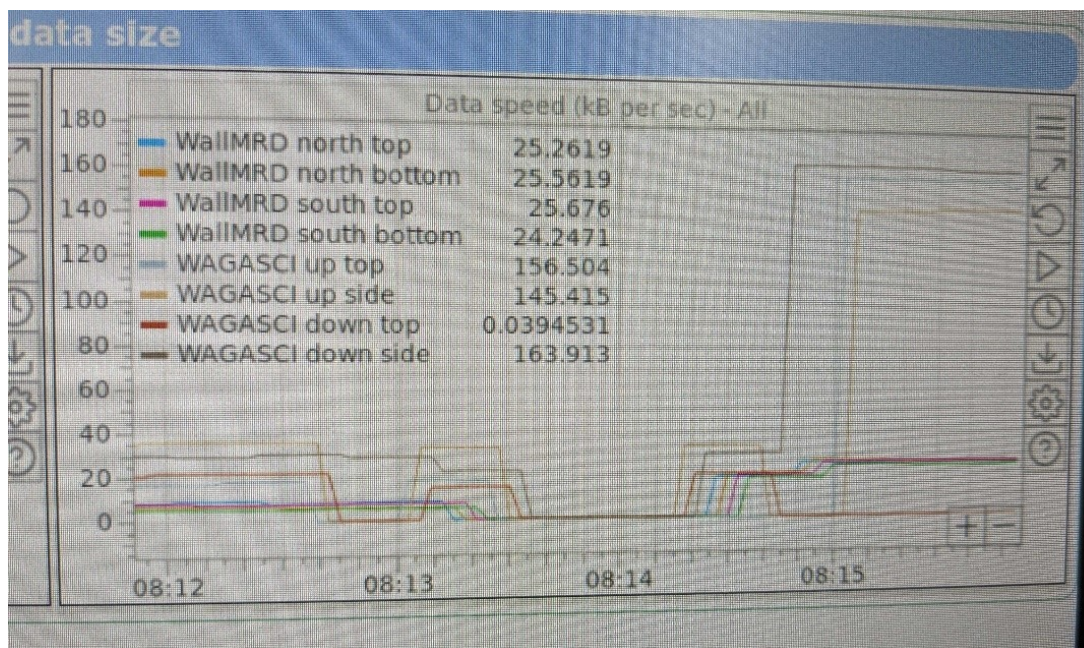


図 6.16 2023/12/13 に発生した DWG Top のデータ取得が突然停止している様子

本問題は、新規構造物の設置により run12 と比べると一定の改善が見られたが、完全な解決には至っていないことが判明した。しかし、一定の改善が見られたことから、DWG Top のカバーによる内部のケーブルの接触が原因であることも特定された。これらを踏まえ 12 月に発生した問題は、これまでの DWG Top のカバーの圧迫により、IF と各 ASU、および各 ASU 同士がデータ伝送用のケーブルが損傷していたことによるものと推定した。これを受け、run13 のニュートリノビームの運転が再開されるまでの 2024 年 1 月に DWG Top の内部のケーブルの交換を実施した。

6.4 内部ケーブルの交換

前節より本問題の根本的な解決に向けて、IF と各 ASU、および各 ASU 同士がデータ伝送用の内部ケーブルを交換することが必要になった。

以下、その作業の様子、ケーブル交換によるデータ取得への影響の調査、および実際のデータ取得の評価を示す。

6.4.1 ケーブル交換の作業

2024年1月、内部ケーブルの交換を実施した。その写真を図 6.17 に示す。図中の赤く丸がついている4つのケーブルを除く他全てのケーブルの交換を実施した。これは当時予備としてあったケーブルの数の問題によるものであり、4つのケーブルは他と比べて DWG Top のカバーによる圧迫が小さい箇所にあったため、交換しなかった。

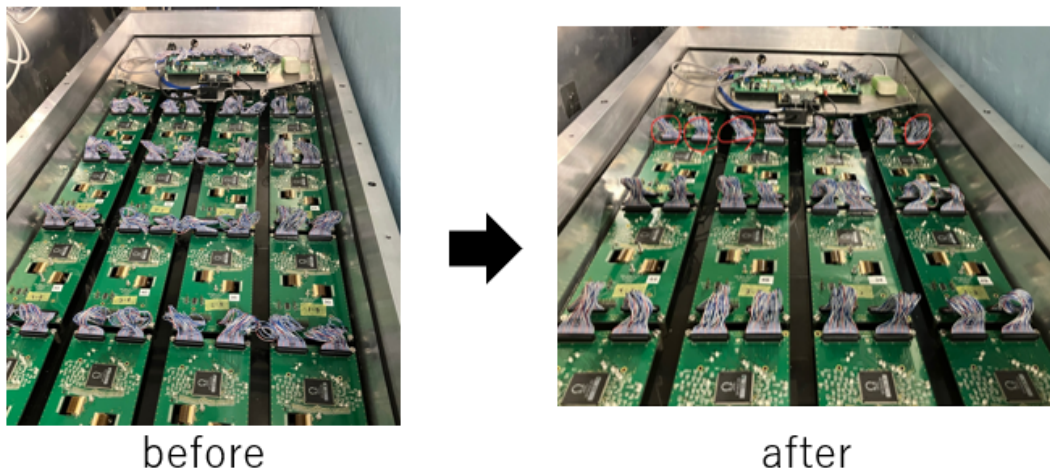


図 6.17 ケーブル交換の実施の様子 (左：実施前、右：実施後)

6.4.2 データ取得状況の確認

ケーブル交換の実施後、DWG Top によるデータ取得を行った。ケーブル交換の実施により、DWG Top のデータ取得に問題が発生しないかをニュートリノビームの運転が再開される前に調べるためである。具体的には、電圧を印加し目標の電圧値に達し、データ取得が可能かどうかを調べるというものである。

電圧を印加させる様子を示す図と、データ取得が可能かどうかを示す図をそれぞれ図 6.18、6.19 に示す。

High Voltage						
On/Off (All)	Ramp Up (All)			Ramp Down (All)		
	On/Off	Ramp Up	Ramp Down	Target Voltage (V)	Actual Voltage (V)	Actual Current (A)
WAGASCI upstream	On/Off	Ramp Up	Ramp Down	57.00	57.00	0.00
WAGASCI downstream	On/Off	Ramp Up	Ramp Down	57.00	56.93	0.00
WalHRD north	On/Off	Ramp Up	Ramp Down	57.00	57.04	0.00
WalHRD south	On/Off	Ramp Up	Ramp Down	57.00	57.02	0.00

Low Voltage						
On/Off (All)	Ramp Up (All)			Ramp Down (All)		
	On/Off	Ramp Up	Ramp Down	Target Voltage (V)	Actual Voltage (V)	Actual Current (A)
WAGASCI upstream	On/Off	Ramp Up	Ramp Down	5.00	5.00	4.71
WAGASCI downstream	On/Off	Ramp Up	Ramp Down	5.00	5.00	4.79
WalHRD north	On/Off	Ramp Up	Ramp Down	5.00	5.00	1.70
WalHRD south	On/Off	Ramp Up	Ramp Down	5.00	5.00	1.43

図 6.18 電圧の印加を示す画面

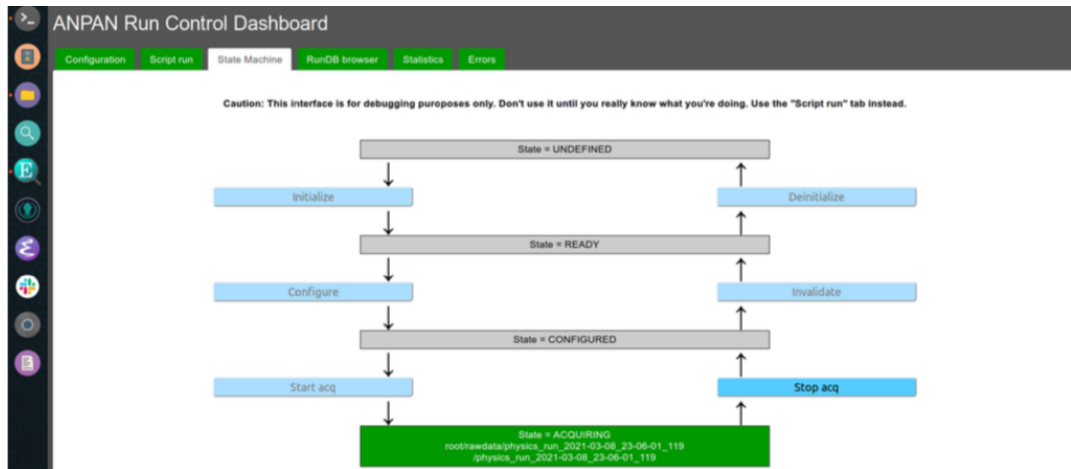


図 6.19 データ取得状況を示す画面

以下、調べ方を示す。

- 図 6.18 の黒色で囲われた画面で DWG の Low Voltage(LV) を印加する。このときの電圧値は 5V が目標値である。
- LV の電圧値が 5V であることを確認する。
- 同様にして図 6.18 の赤色で囲われた DWG の High Voltage(HV) を印加する。このときの電圧値は 57V が目標値である。
- HV の電圧値が 57V であることを確認する。
- データ取得を行い、図 6.19 の中央一番下の画面が緑になることを確認する。これは、図 4.6 の部分における DAQ PC にデータの伝送が可能な状態であることを示しており、データ取得が可能な状態である。
- Data speed が増えているかどうかを確認する。

上記の作業を行い、ケーブル交換によるデータ取得に問題が発生していないかを調べた。電圧値が目標値に達しないときは、ケーブルの差し込みの具合や向きなどを一つずつ調べた。この作業を行い、ニュートリノビームの運転が再開される前までにデータ取得が可能な状態であることを確認した。

6.4.3 データ取得と評価

run13 のニュートリノビームの運転が、2024 年 2 月に再開された。この際に取得したデータの一例と下流 WAGASCI のデータ伝送速度を示す一例を図 6.20、6.21 にそれぞれ示す。図 6.20 において、図 6.15 と同様に連続した 8 つのピークを確認することができ、ニュートリノビーム由来の 8 バンチを確認することができた。また、図 6.21 においても DWG Top の Data speed が正常の値であることを確認した。

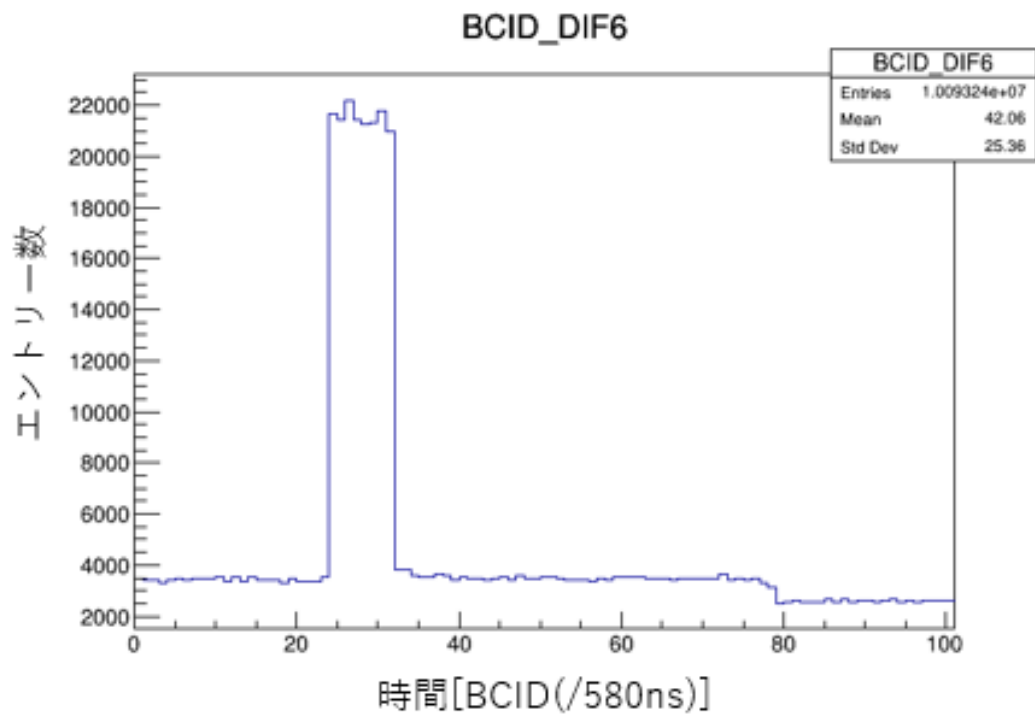


図 6.20 2/16 に取得した DWG Top のデータ

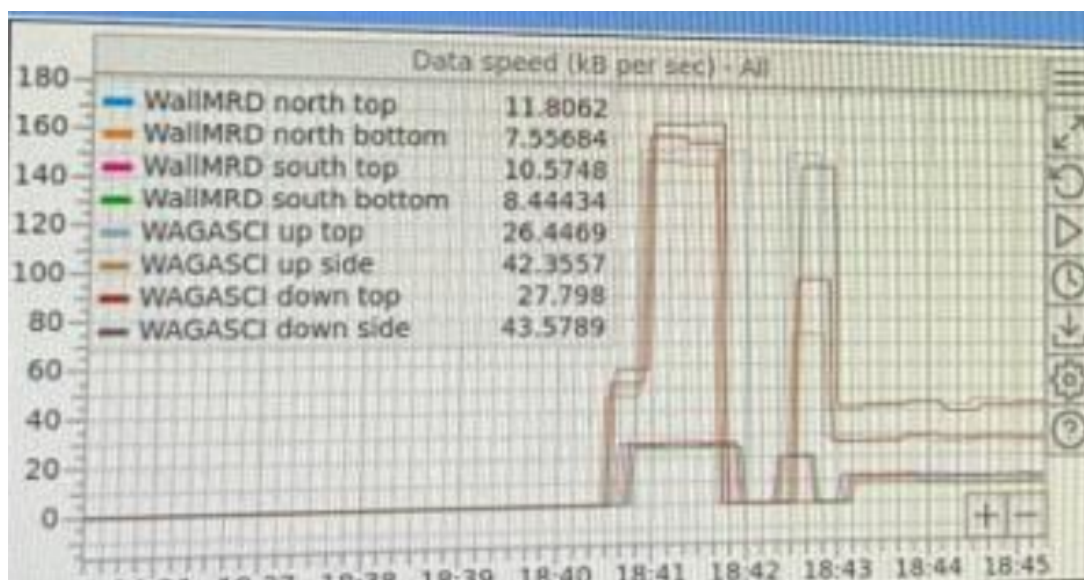


図 6.21 下流 WAGASCI を含むデータ伝送速度の一例

また、ケーブル交換の実施後、DWG Top のデータ取得が突然停止するという問題は、run13(2024 年 2 月)に限らず、その後の run13(2024 年 6 月)、run14(2024 年 11 月、12 月)でも発生しなかった。これより、内部ケーブルの交換により、本問題は解決したと言える。

6.5 まとめ

run12にてDWG Topのデータ取得が突然停止するという問題が発生した。これに対し、DWG Topのふたによる内部ケーブルの圧迫が原因と特定し、新規構造物を設置した。また、内部ケーブルの交換を実施し、データ取得および評価を行った。これらの実施後、本問題の発生はなくなり、解決をしたと言える。今後は同じような問題が発生しないかを注視していく必要がある。

第 7 章 WAGASCI / Wall-MRD における 時間情報システムの評価

7.1 目的

run13 の 6 月期 (2024 年 6 月) に、WAGASCI と Wall-MRD それぞれ取得したデータから解析をして BCID 分布図を出力したところ、8 バンチ構造が確認できないという問題が発生した。図 7.1、7.2 に各検出器の BCID 分布図を示す。また、ここで DWG と同様、WAGASCI upstream top(UWG Up)、WAGASCI upstream side(UWG Side)、WAGASCI downstream side(DWG Side) とそれぞれ表記する。

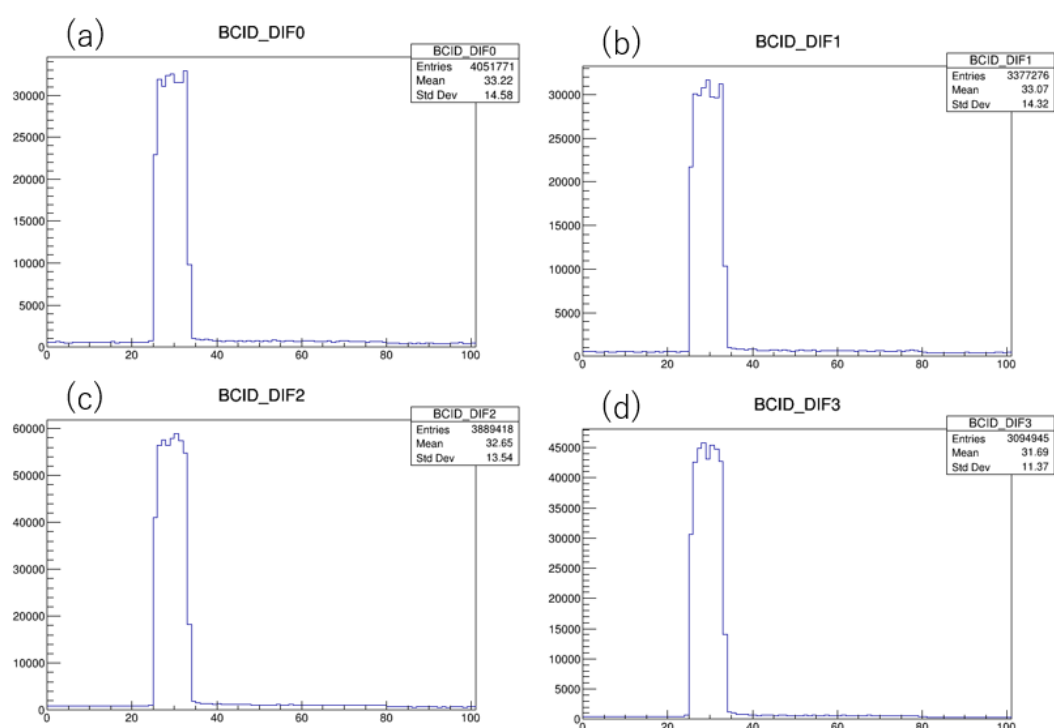


図 7.1 2024/6/12 の BCID 分布図、(a)Wall-MRD North top、(b)Wall-MRD North bottom、(c)Wall-MRD South top、(d)Wall-MRD South bottom

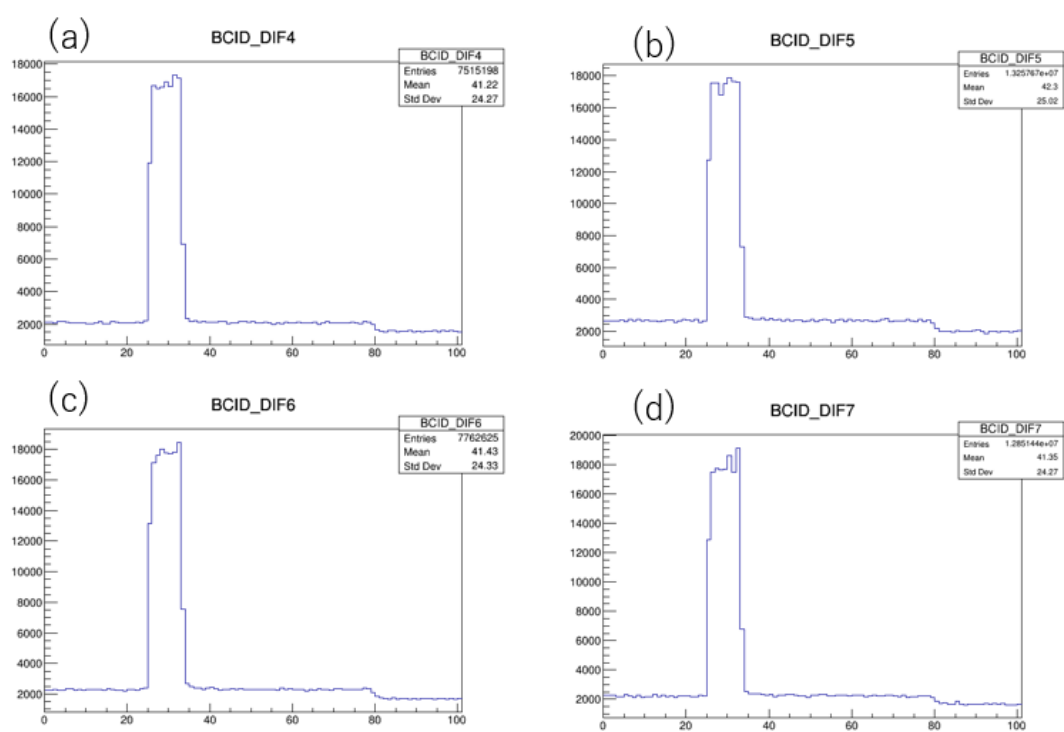


図 7.2 2024/6/12 の BCID 分布図、(a)UWG Up、(b) UWG Side、(c) DWG Top、(d) DWG Side

全ての図において、7つのピークとその前後に2つの小さなピークがあるという形をとっている。本章では、この問題に対しての解決を目指したその取り組みと成果について述べる。

7.2 timing plot の出力による原因推定

WAGASCI と Wall-MRD では、ニュートリノビームデータの取得状況を確認する際、BCID 分布図の出力をして確認している。本問題ではその BCID 分布図から 7 つのピークと 2 つの小さなピークを確認しており、ここで一番左側の小さなピークから①、②、という形で番号を⑨まで振る (図 7.3)。ここで①のピークと⑨のピークの大きさを重ね合わせると、他の②から⑧のピーク値と同程度の大きさとなる。

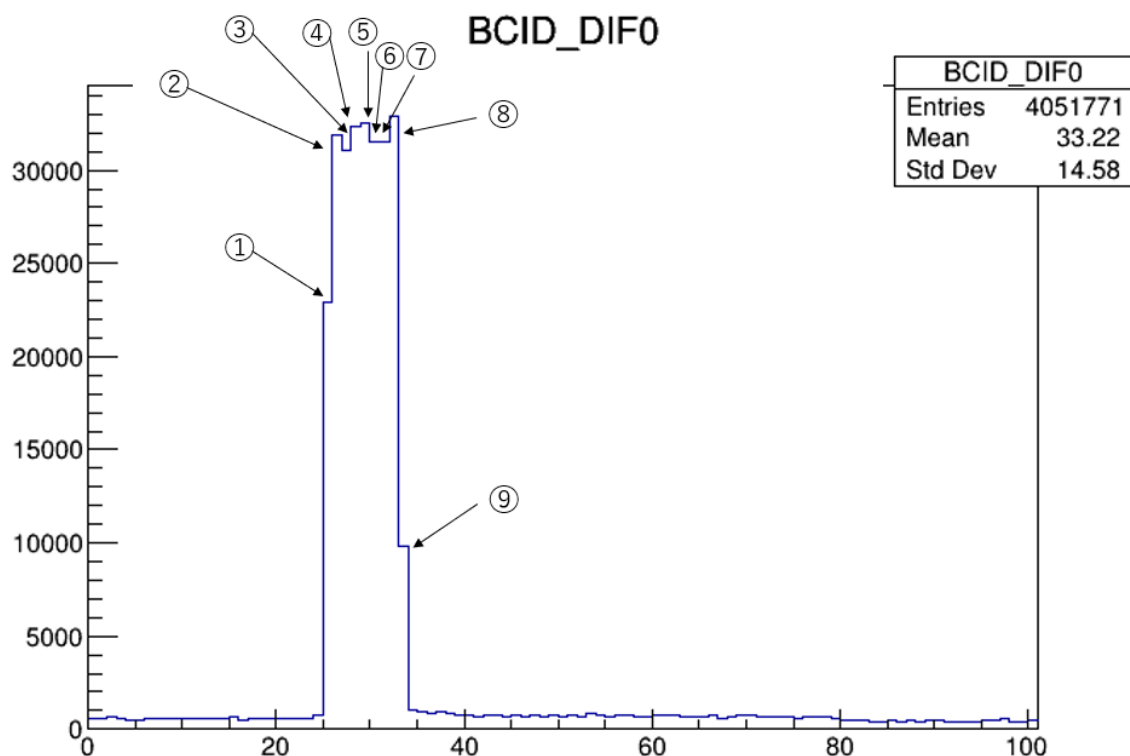


図 7.3 9 つのピークに番号を振った BCID 分布図

一方、BabyMIND で取得したデータの timing plot を図 7.4 に示す。図 7.4 のように、BabyMIND 側では 8 バンチを確認することができる。J-PARC 加速器の構造上、9 バンチになることはそもそもありえない。仮に、もしニュートリノビームが 8 バンチでなかった場合は、ビームモニターで瞬時に分かるので、8 バンチでないことは、やはりありえない。これより WAGASCI/Wall-MRD の時間情報に関連した機器等に問題があることがわかる。

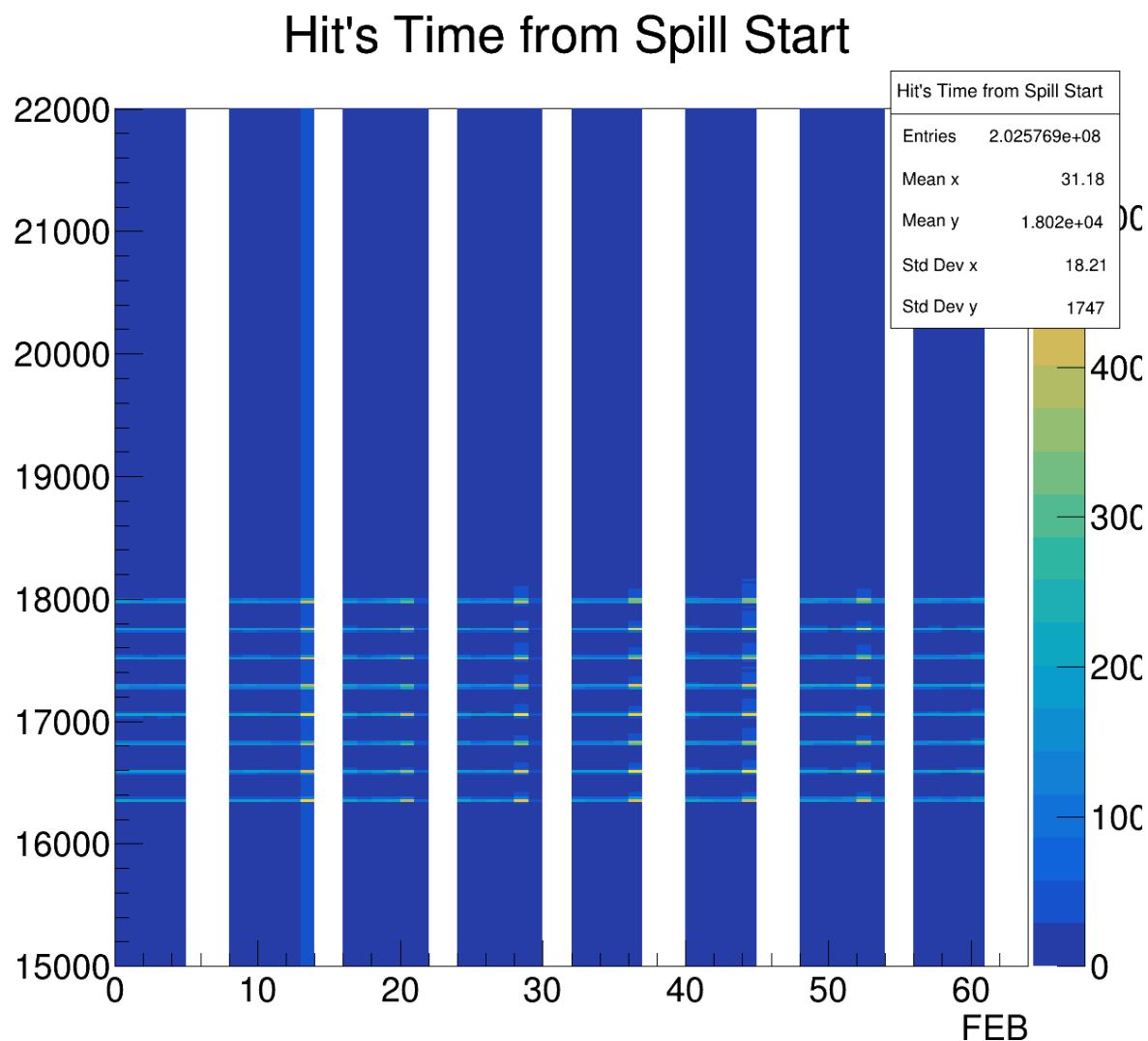


図 7.4 BabyMIND で取得した 2024/6/12 の timing plot

これを踏まえ本問題は、WAGASCI と Wall-MRD 側において、測定される時間情報の記録が規則的にずれて記録されたことによって起こったと考えた。これより、1 ビンあたり 580ns の時間分解能である BCID 分布図に対し、さらに細かい時間分解能での図である timing plot を出力することで、このばらつきと時間情報の記録の様子を評価した。

7.2.1 timing plot の出力

ここで WAGASCI と Wall-MRD の時間情報の記録の様子を改めて図 7.5 に示す。図 7.5 のように WAGASCI と Wall-MRD は、粗い時間情報の BCID と細かい時間を記録する TDC という 2 つの時間情報を組み合わせて記録している。

BCID は 580ns ごとに 1 ずつ記録されていく。一方で、TDC は 1 つの BCID において 4096 カウントしている。このように BCID を記録していくと同時に TDC を記録しており、これらの情報を組み合わせることで timing plot の出力が可能になる。

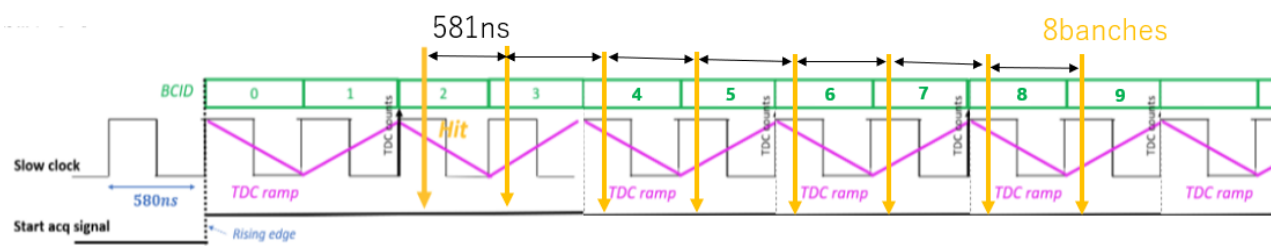


図 7.5 時間情報の記録の様子

また、timing plot を出力するときは、TDC の不感時間を考慮する必要もある。BCID の番号が切り替わる時、TDC ramp 信号の傾きも正負で切り替わる。この切り替わる前後の時間は TDC の上限または下限を超えてしまう。不感時間とは、この切り替えのときに生じる。図は TDC の不感時間について示されたものである。

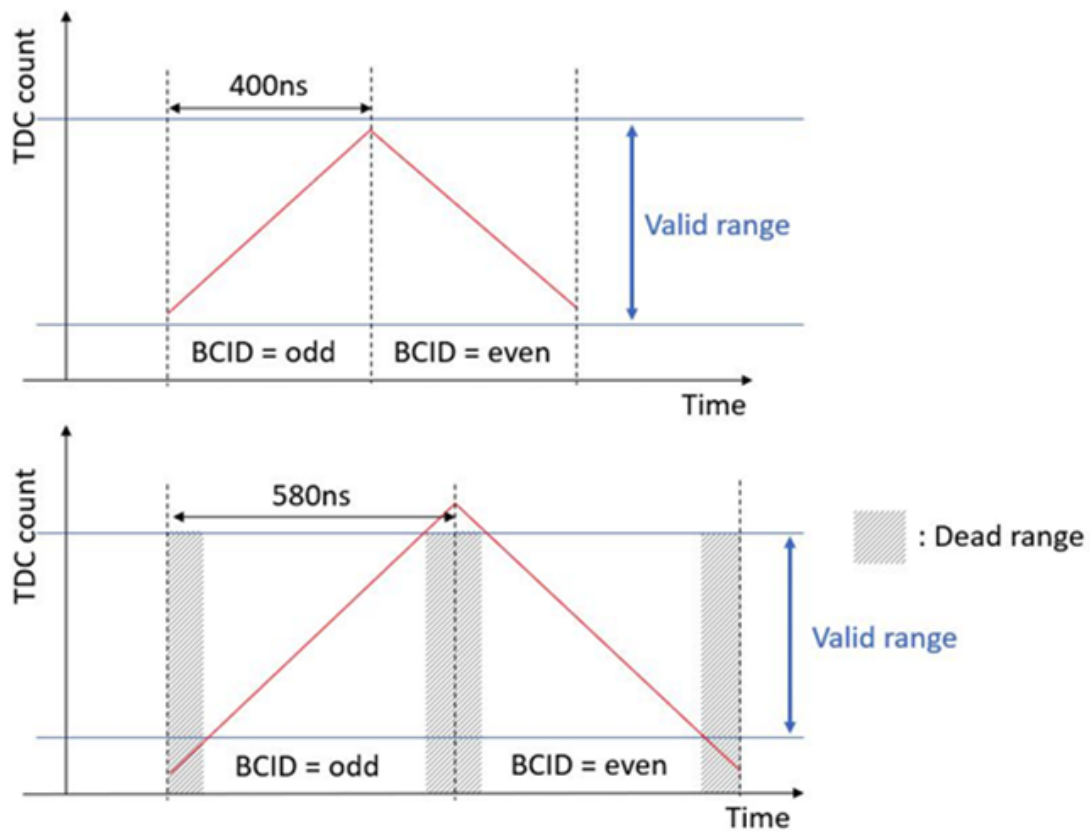


図 7.6 TDC ramp の不感時間 (灰色の箇所)

上記の BCID と TDC、また時間情報における不感時間について考慮した上で timing plot を出力した。また、このとき光量の閾値は 3.5p.e. とした。

7.2.2 データの評価

以下、出力した timing plot を以下に示す。比較のため、run13 の 11 月期、2 月期、6 月期の BCID 分布図と timing plot を示す。

- run13 の 11 月期

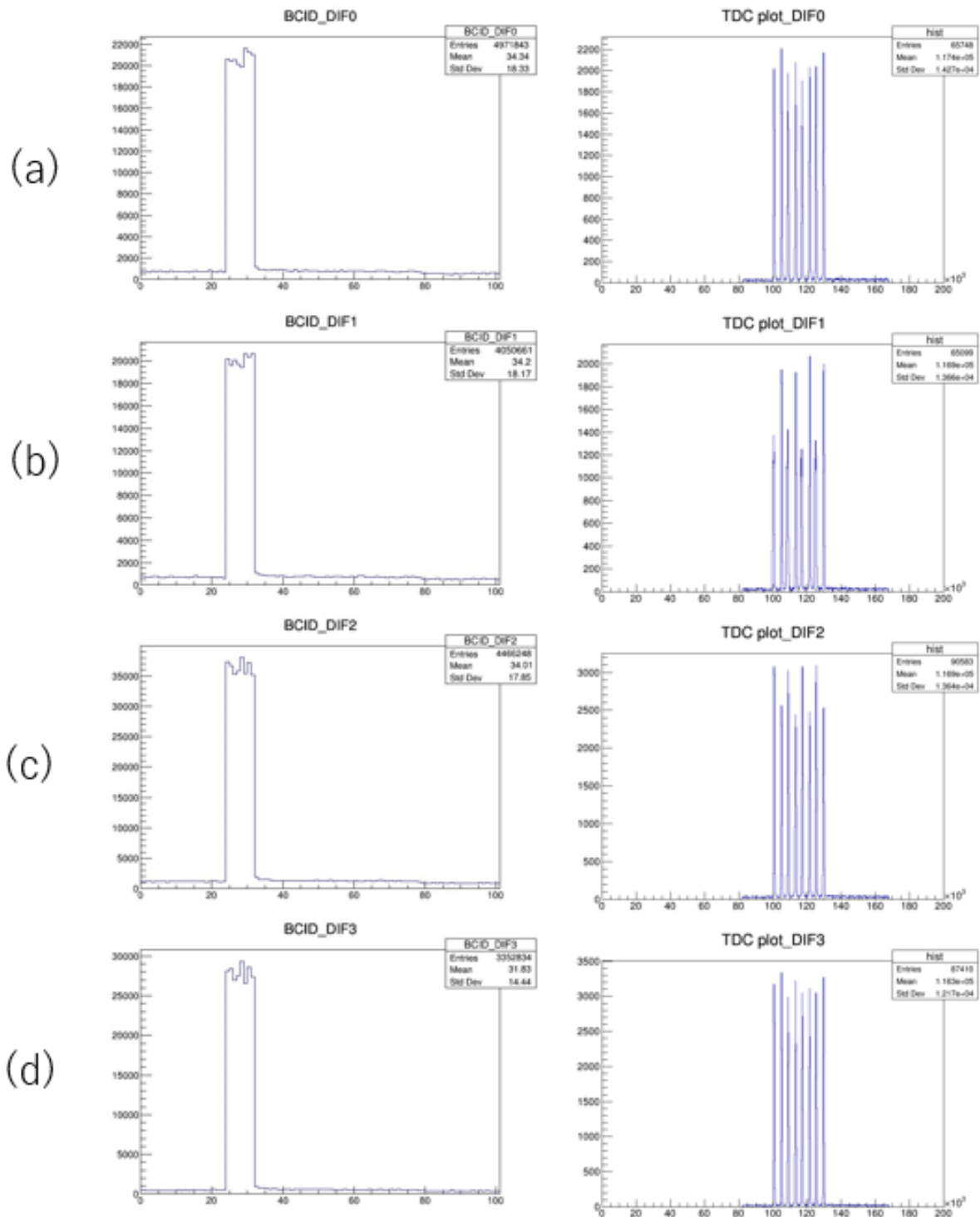


図 7.7 2023/12/1 の BCID 分布図と timing plot、(a)Wall-MRD North top、(b)Wall-MRD North bottom、(c)Wall-MRD South top、(d)Wall-MRD South bottom

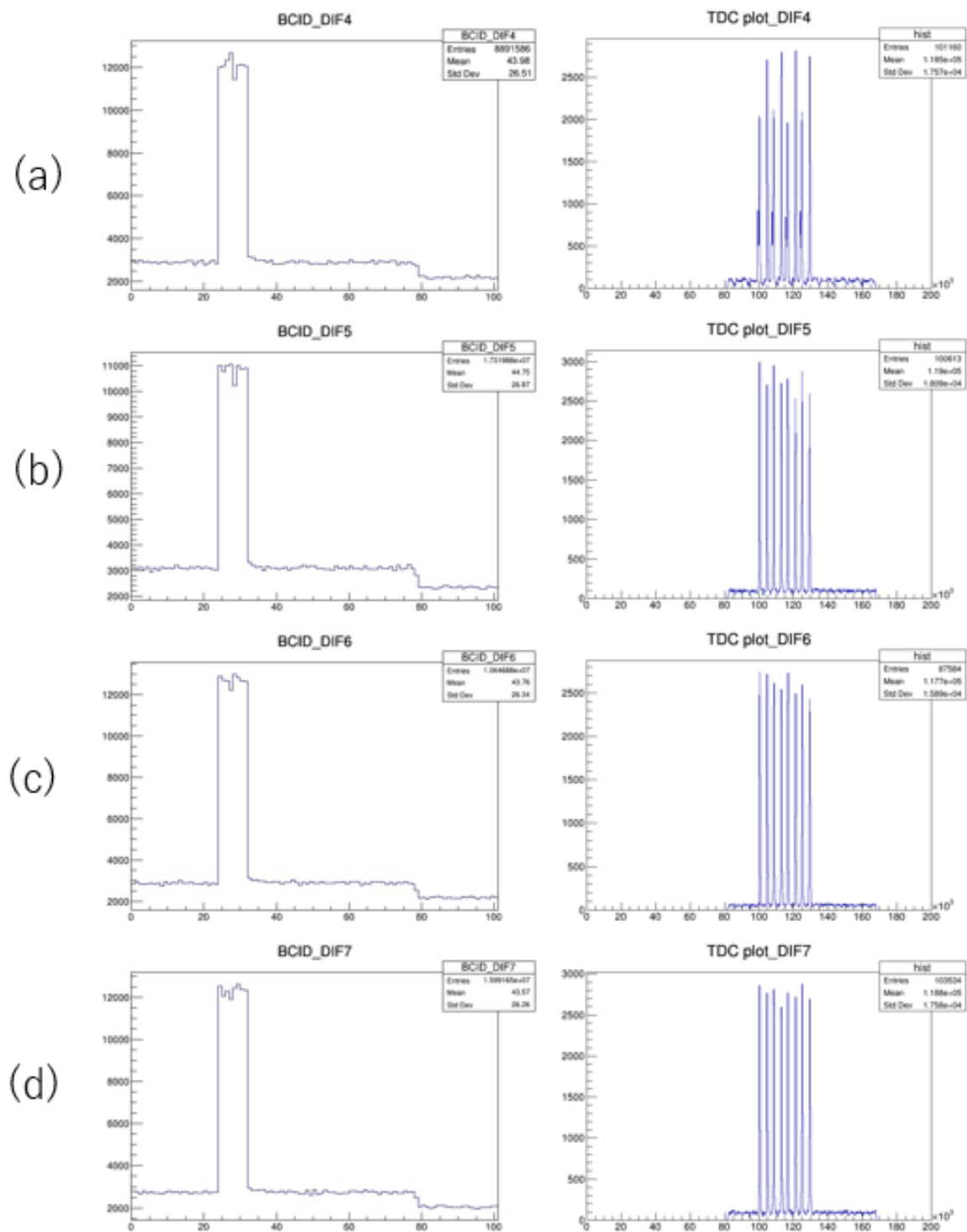


図 7.8 2023/12/1 の BCID 分布図と timing plot、(a)UWG Up、(b) UWG Side、(c) DWG Top、(d) DWG Side

- run13 の 2 月期

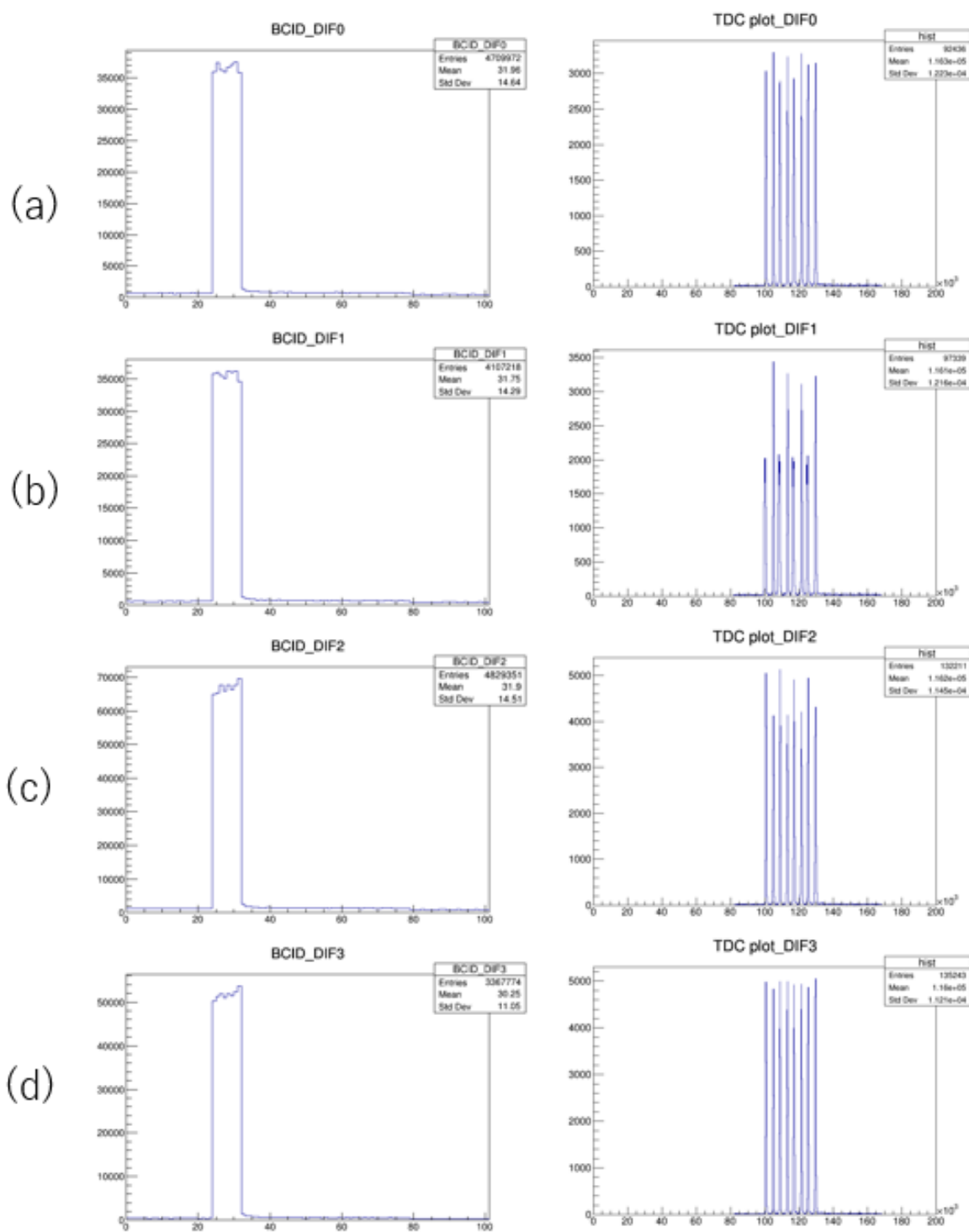


図 7.9 2024/2/13 の BCID 分布図と timing plot、(a)Wall-MRD North top、(b)Wall-MRD North bottom、(c)Wall-MRD South top、(d)Wall-MRD South bottom

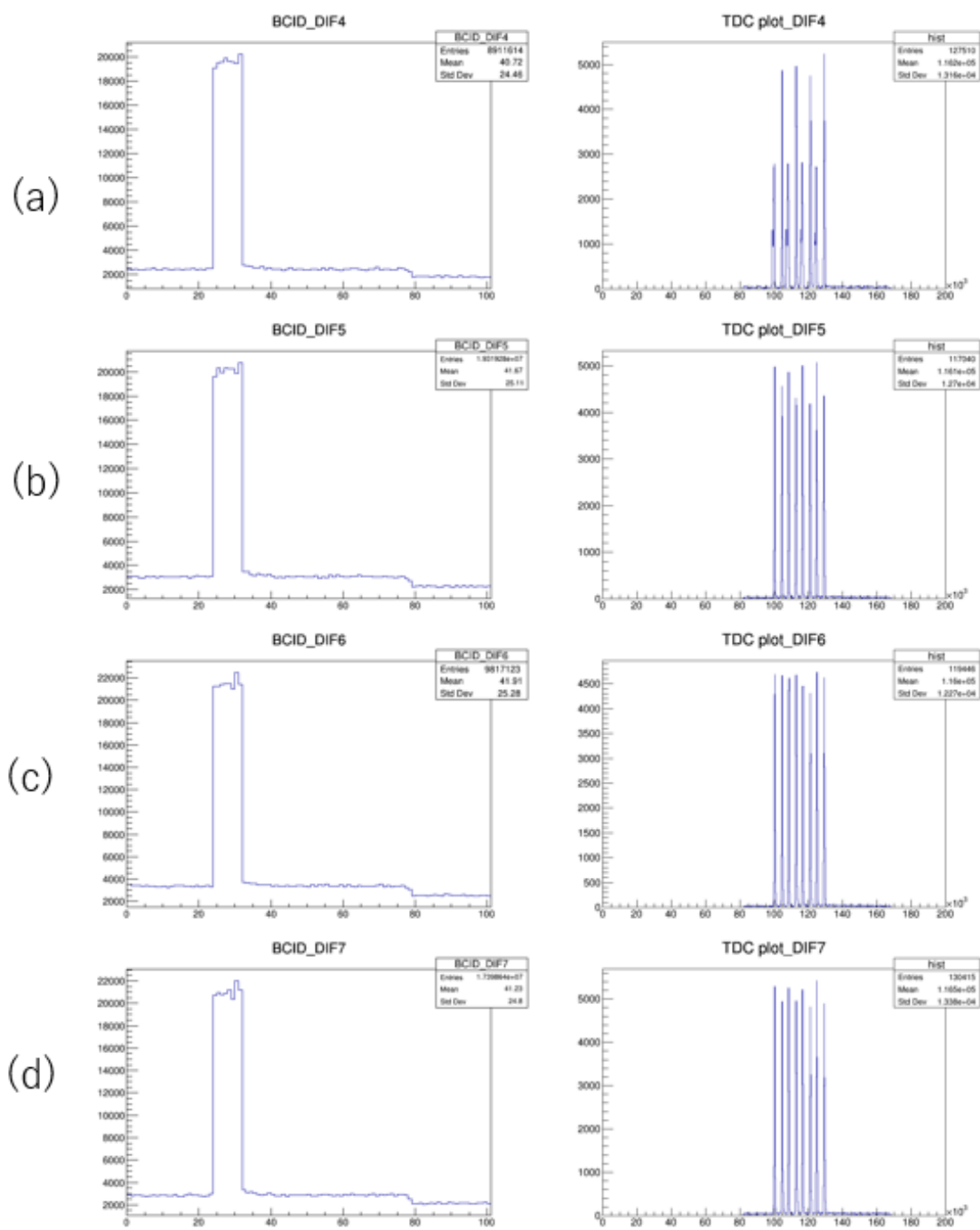


図 7.10 2024/2/13 の BCID 分布図と timing plot、(a)UWG Up、(b) UWG Side、(c) DWG Top、(d) DWG Side

- run13 の 6 月期

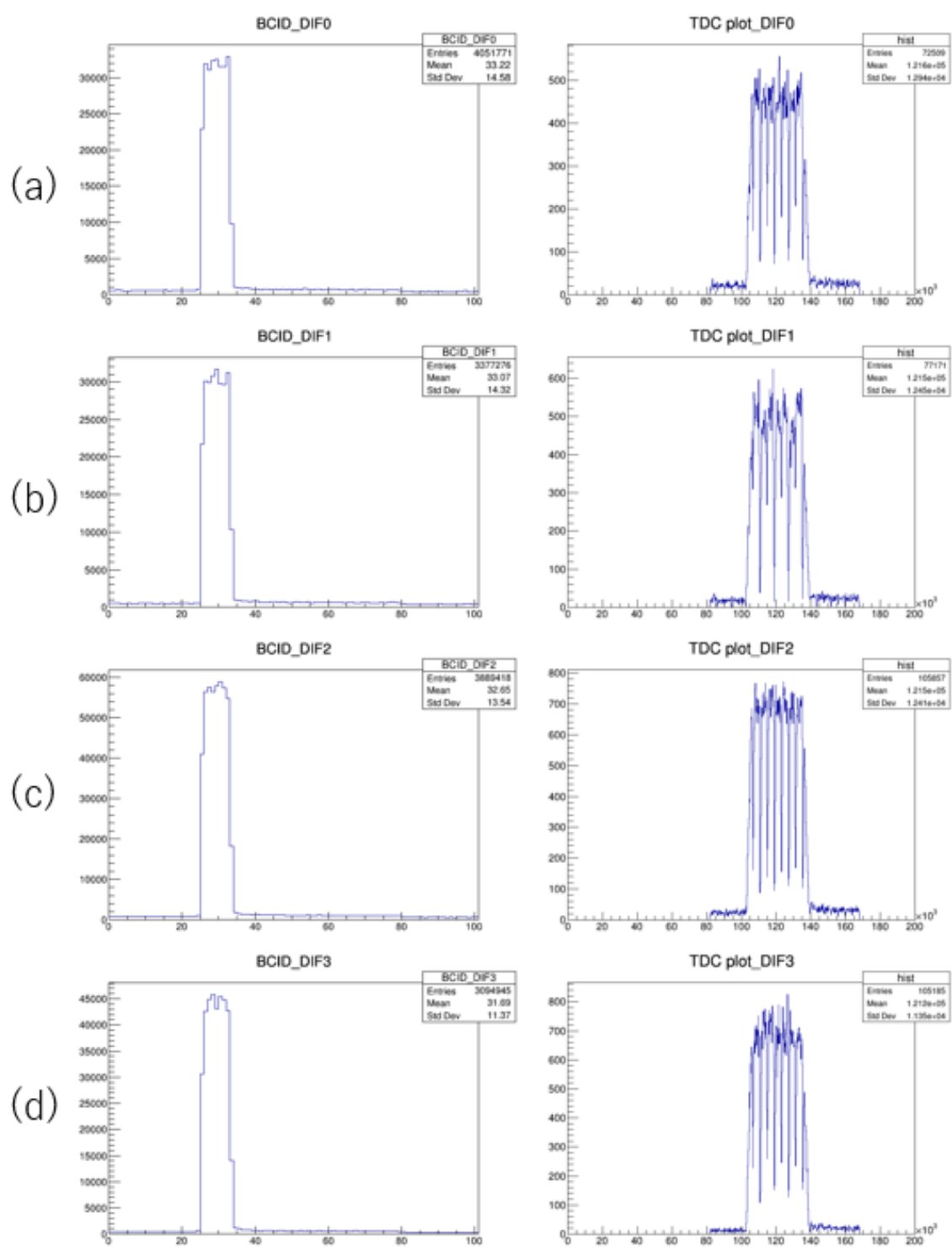


図 7.11 2024/6/12 の BCID 分布図と timing plot、(a)Wall-MRD North top、(b)Wall-MRD North bottom、(c)Wall-MRD South top、(d)Wall-MRD South bottom

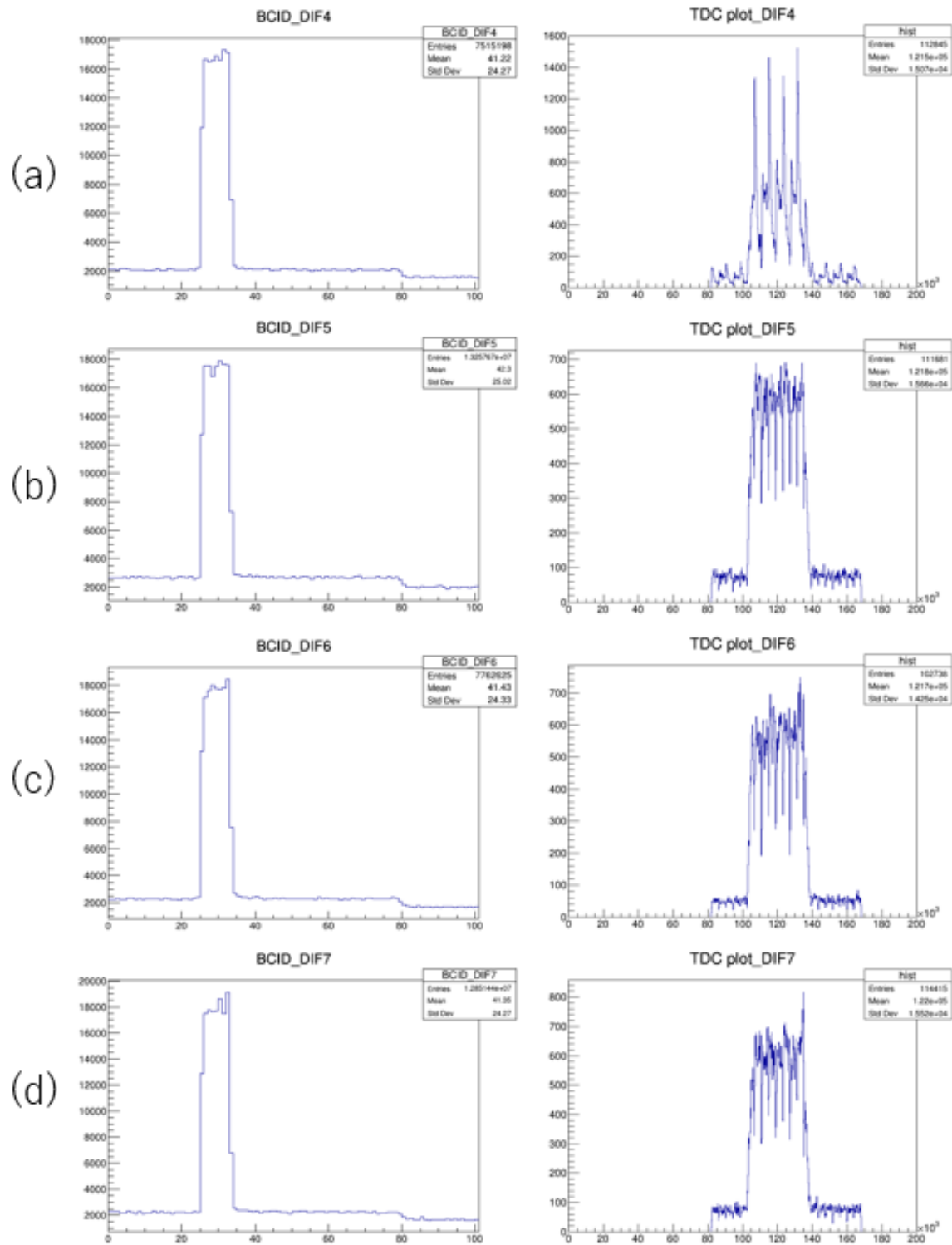


図 7.12 2024/6/12 の BCID 分布図と timing plot、(a)UWG Up、(b) UWG Side、(c) DWG Top、(d) DWG Side

図に示すように、BCID 分布図において 8 バンチ構造を確認した run13 の 11 月期、2 月期においては timing plot においても綺麗な 8 バンチ構造を確認することができた。しかし、8 バンチ構造が確認されなかった 6 月期においては、BCID 分布図と同様に timing plot でも 8 バンチ構造を確認することができず、ビームに同期したピークがみられなかった。

7.2.3 原因推定

前節より、出力した timing plot から時間情報の記録に問題が発生していたことがわかった。ここで WAGASCI と Wall-MRD のデータ取得システムの概要図を改めて図 7.13 に示す。

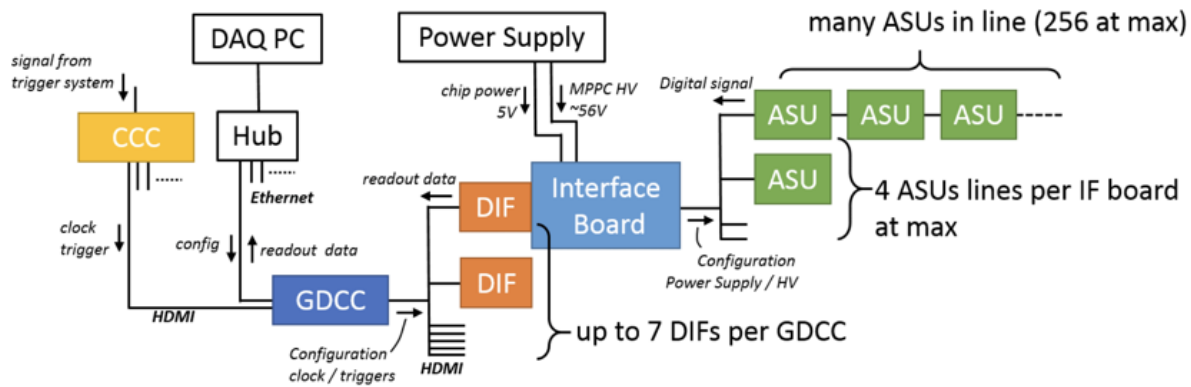


図 7.13 WAGASCI と Wall-MRD のデータ取得システムの概要図

図 7.13 に示すように、ビームのトリガーの情報は 1 つの CCC から、WAGASCI 用の GDCC と Wall-MRD 用の GDCC それぞれに伝送される。このように、時間情報は CCC によって処理されている。

CCC に関しては、2024 年 5 月に run13 の 6 月期のビームに向けた準備期間において、run13 の 11 月期、2 月期で使用していた CCC を新しい CCC へと交換していた。

WAGASCI と Wall-MRD の計 8 つの検出器全て、かつ CCC を交換した後に本問題が発生したことから CCC の交換が原因であると推定した。これらを踏まえ、run14 に向けた対策として新しい CCC への交換を実施した。

7.3 run14 に向けて実施した対処とその成果

7.3.1 CCC の交換

run14 に向けての準備期間である 2024 年 10 月に、5 月以降使用していた CCC から新しい CCC へと交換した。新しい CCC は横浜国立大学にて、動作確認したものである。

データ取得が可能な状態であることを確認した上で、ニュートリノビームが出されたらすぐに BCID 分布図と timing plot の出力をそれぞれ行った。

7.3.2 交換後のデータ取得と評価

run14 の取得したデータの BCID 分布図および timing plot を図 7.14、7.15 に示す。

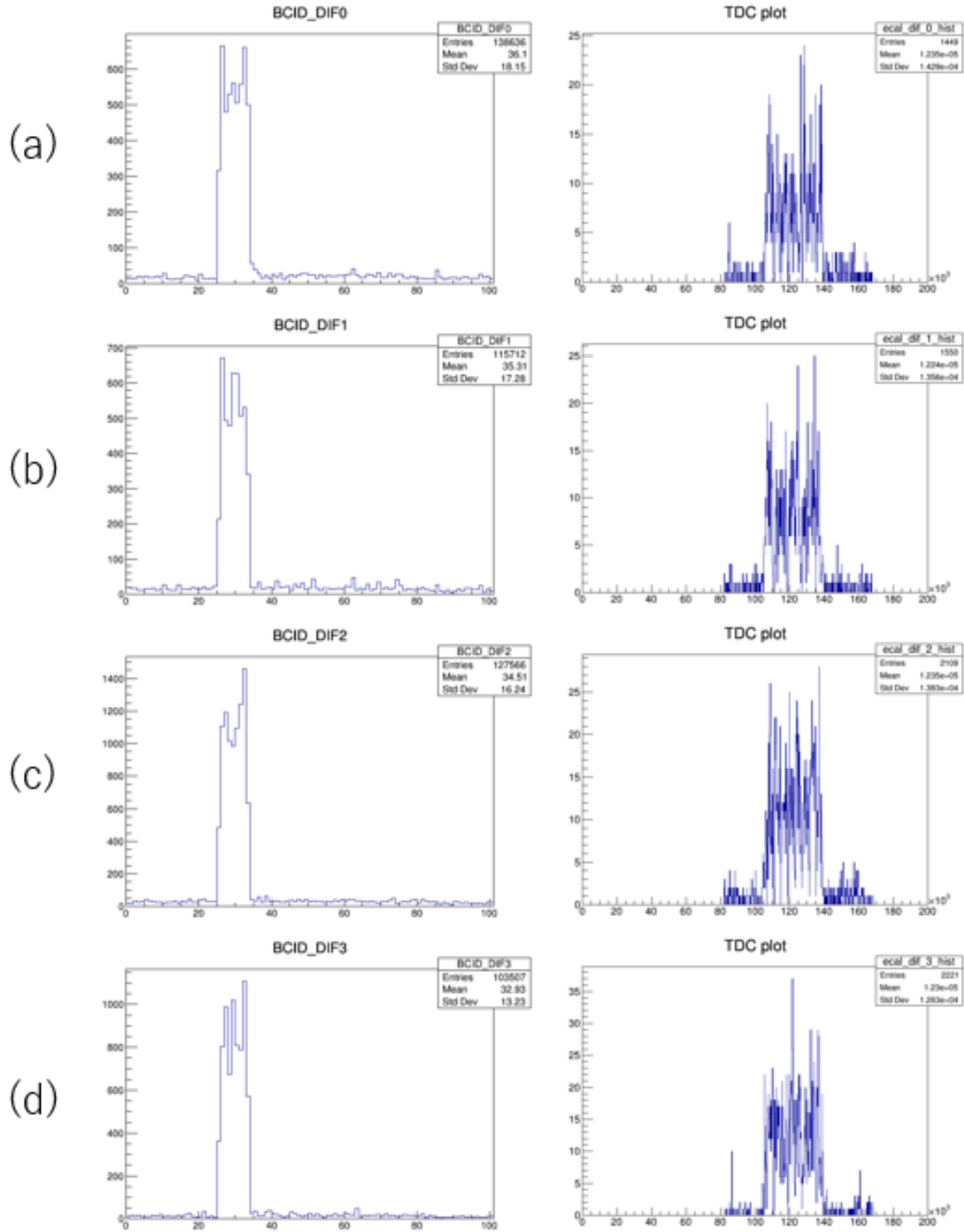


図 7.14 2024/11/28 の BCID 分布図と timing plot、(a)Wall-MRD North top、(b)Wall-MRD North bottom、(c)Wall-MRD South top、(d)Wall-MRD South bottom

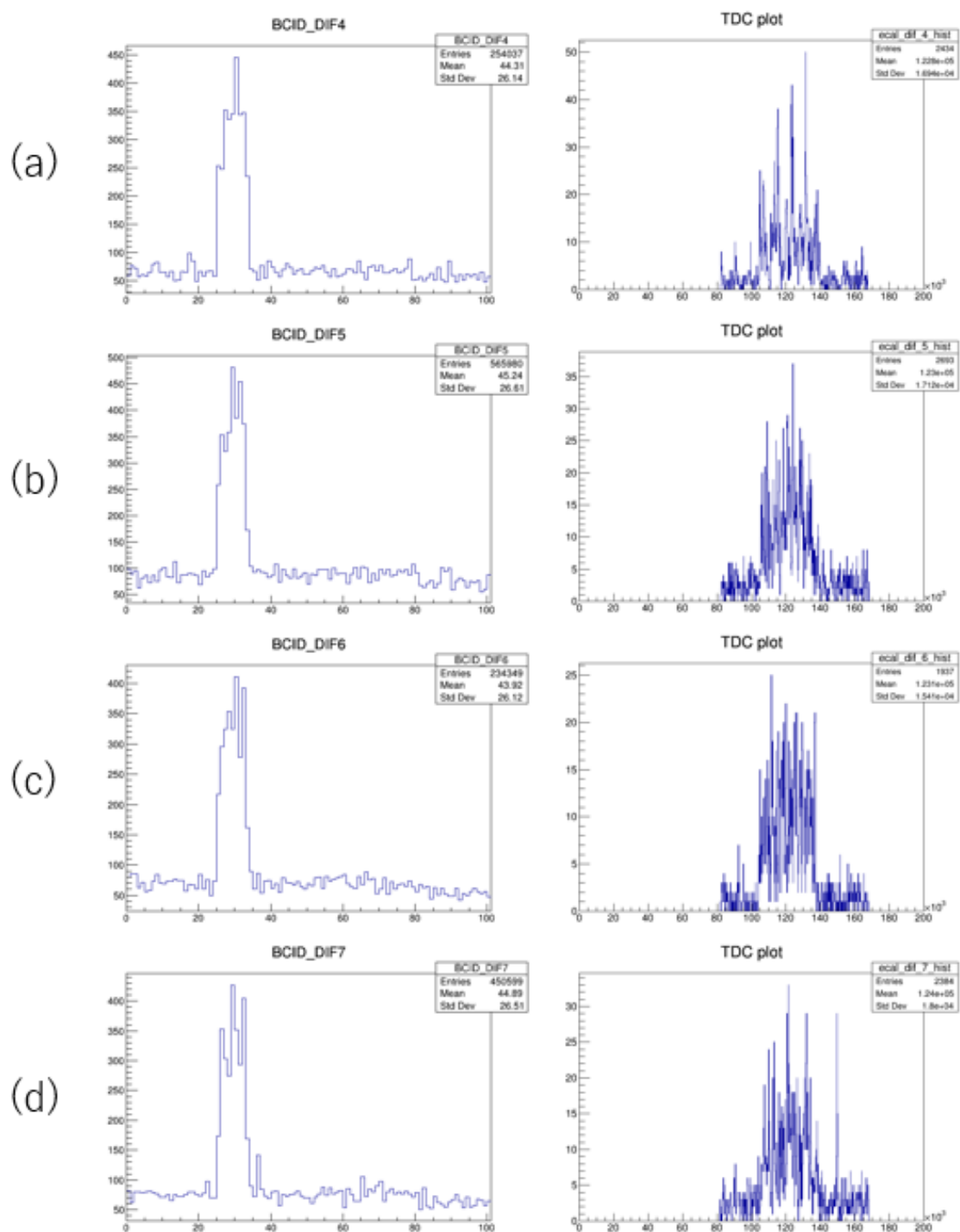


図 7.15 2024/11/28 の BCID 分布図と timing plot、(a)UWG Up、(b) UWG Side、(c) DWG Top、(d) DWG Side

図のように BCID 分布図と timing plot それぞれどちらからも 8 バンチ構造の改善は見られなかった。これは別日でも同様のデータとなっていた。

改善が見られない原因として、CCC の FPGA の書き換えが最新のものになされていないことが挙げられた。これを受け、CCC の FPGA の書き換えを最新のものに書き換え、再度評価を行った。

7.3.3 FPGA の書き換えによるデータ取得と評価

CCC の FPGA の書き換えは Xilinx 社が提供している ISE design suite というソフトウェアを用いて行った。書き換えた後のデータを図に示す。

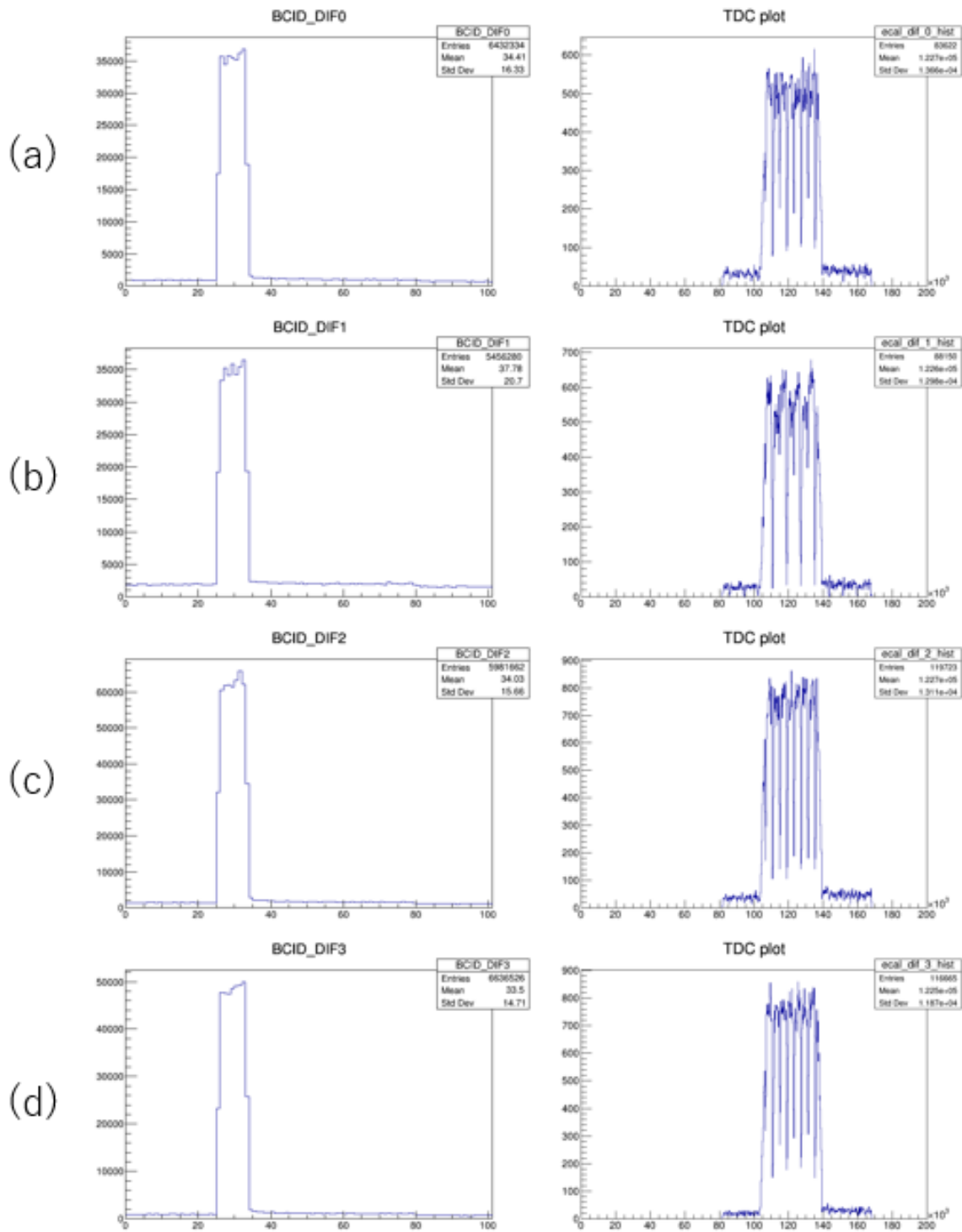


図 7.16 2024/12/5 の BCID 分布図と timing plot、(a)Wall-MRD North top、(b)Wall-MRD North bottom、(c)Wall-MRD South top、(d)Wall-MRD South bottom

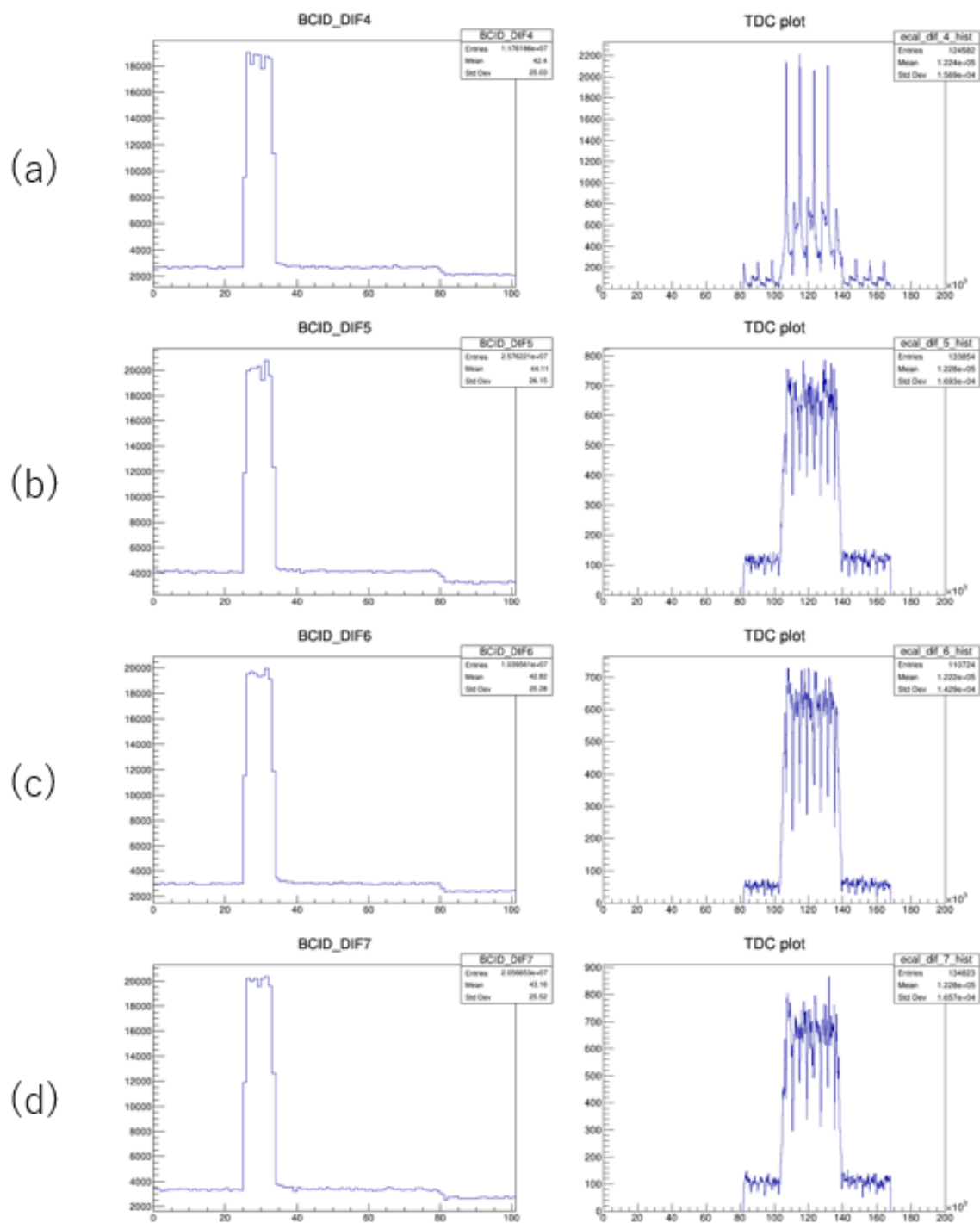


図 7.17 2024/12/5 の BCID 分布図と timing plot、(a)UWG Up、(b) UWG Side、(c) DWG Top、(d) DWG Side

書き換え後も前と同様の図となり、改善を確認することができなかった。CCC の単なる交換だけでは、本問題は解決できない見通しとなった。

以上を踏まえ、CCC の基板上に問題があるかどうかや、あるいは別の場所に問題あるかどうかを含め、今後確認していく必要がある。

7.4 物理解析用データとしての有用性評価

本節では run13 の 6 月期以降で取得したデータの物理データとしての有用性について記述する。

7.4.1 ADC 分布図の比較

8 バンチ構造を確認できなくなった 6 月期以前の ADC 分布図と以降の ADC 分布図の一例を図 7.18 に示す。

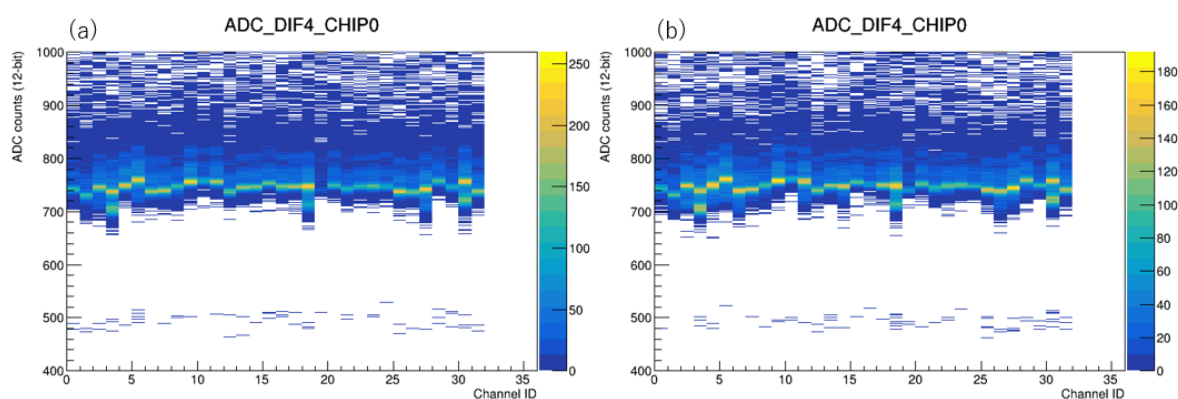


図 7.18 (a)2023/12/1、(b)2024/6/12 の UWG Top の ADC 分布図

ビーム中は 2.5 p.e. 程度に閾値を設定している。これは ADC 分布図においておよそ 700ADC カウント弱に相当する。およそ 600 以下の ADC カウントにおいて信号が見えるのはフェイクヒットと呼ばれるものである。図 7.18(a)、(b) のように 6 月期前後の ADC 分布図の比較をしても図に大きな違いは見られない。よって荷電粒子そのものの検出をすることができていることがわかる。これより ADC カウントの情報をもとにバックグラウンドやノイズの処理を行うことができ、タイミング情報を使わない限り、物理解析は可能である。

7.4.2 時間情報の有無による解析の影響

時間情報がないことによる問題点として、飛跡の構成が完全にできないという点が挙げられる。ニュートリノ反応によって生じた荷電粒子の飛跡を構成する際、飛跡点の候補を挙げることは可能であるが、時間情報が欠けていることから荷電粒子の方向を識別することができないためである。

詳細を記すために、図 7.19 は飛跡の様子を示す概略図である。図中の (a) と (b) は飛跡の一例である。

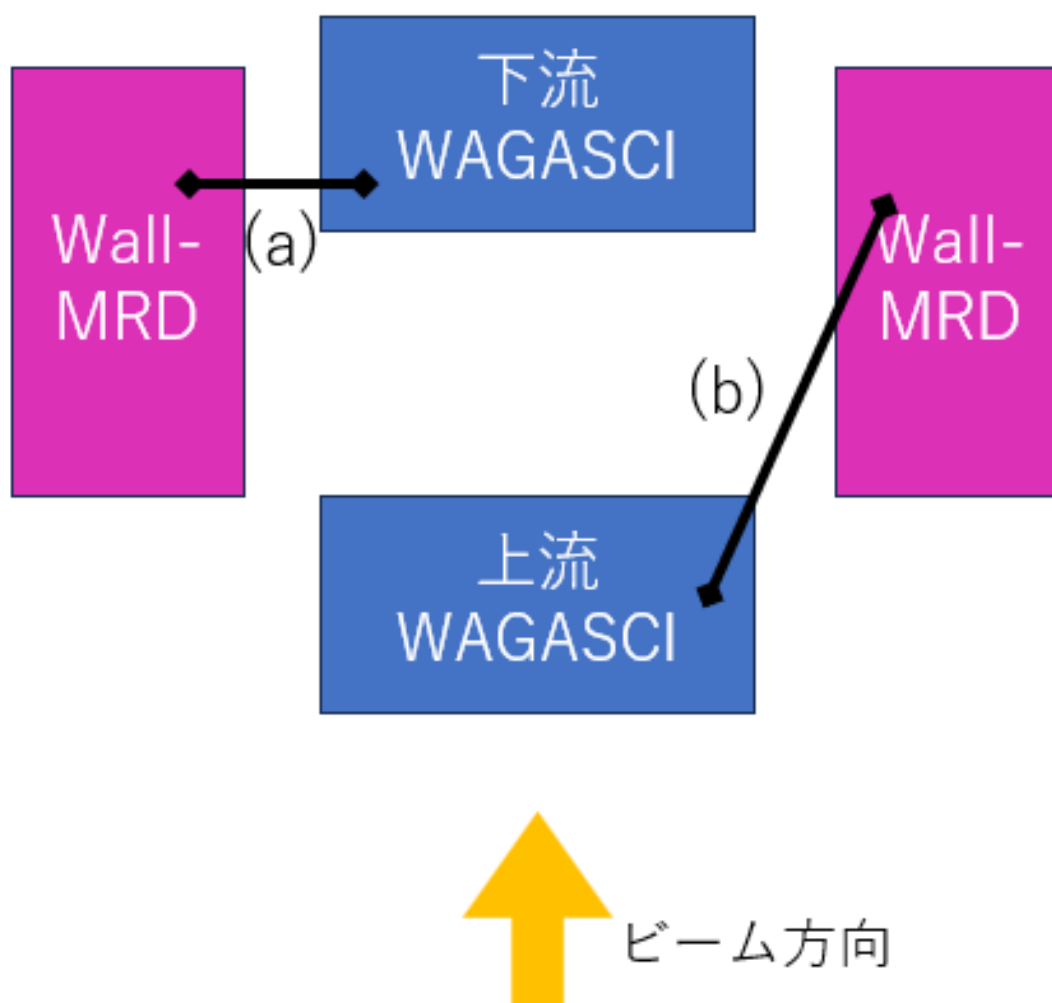


図 7.19 飛跡の様子を示す概略図

(a) の飛跡において、ニュートリノ反応がおよそ 90° 方向で起こっている。この向きで反応が起こる確率は同じであるため、反応によって生じた粒子が Wall-MRD から下流 WAGASCI へ飛んだのか下流 WAGASCI から Wall-MRD へ飛んだのかという識別ができない。そのため、このような飛跡は物理データとして解析することはできない。

(b) の飛跡においても、(a) と同様に飛んだ向きの識別はできない。しかしニュートリノ反応では、図のように上流 WAGASCI から Wall-MRD への前方に飛ぶような反応は起こりやすく、Wall-MRD から上流 WAGASCI への後方に飛ぶような反応は起こりにくい。これらのことを踏まえ、(b) の飛跡は物理データとして解析することが可能である。

このように、物理データとして解析することが可能であるデータとできないデータがあり、飛跡を完全に構成するためには時間情報が必要である。そのため、早急に解決すべき問題であることに変わりはない。

7.5 まとめ

run13 の 6 月期にニュートリノビームの由来の 8 バンチ構造を確認することができなくなるという問題が発生した。BCID 分布図と timing plot の確認、および 2023 年 5 月に実施した CCC の交換作業を踏まえ、原因は時間情報の信号を処理する CCC にあると推定した。CCC を 2024 年 10 月に交換し、その後にニュートリノビームのデータ取得を行ったところ、8 バンチ構造の確認はできなかった。今後は、CCC の基板や他のデータ取得システムを含めて確認する必要がある。また、ADC 分布図から荷電粒子の検出ができていることから物理データとしての解析は可能ではあるが、早急に解決すべき問題であるという点で変わりはない。

第 8 章 結論

T2K 実験は長基線加速器ニュートリノ振動実験である。茨城県東海村にある J-PARC から岐阜県飛騨市神岡町に位置する後置検出器であるスーパーカミオカンデへニュートリノビームを放つ。このとき、J-PARC 側の前置検出器群で振動前のニュートリノを、スーパーカミオカンデで振動後のニュートリノをそれぞれ観測している。ニュートリノは標的の原子核と反応した際に放出される荷電粒子の検出を通して、間接的に観測される。T2K 実験の更なる精度の向上には、統計量の増加と系統誤差の削減が課題である。

T2K 実験の前置ニュートリノ検出器 ND280 は大角度に散乱された粒子に対する検出効率が低いという弱点がある。これに対し、水をニュートリノ標的として、シンチレータを格子状に組むことで全方向に高い検出効率でニュートリノ反応を検出するニュートリノ検出器である WAGASCI と、大角度に散乱した荷電粒子の飛跡、運動量の観測を目的としたミュオン飛程検出器である Wall MRD、BabyMIND が開発された。これらの検出器でニュートリノと水標的の反応を全方向に高い検出効率で測定することで、ニュートリノ反応による系統誤差を削減することが WAGASCI 検出器群の目的である。WAGASCI はニュートリノと水標的の反応断面積を測定する検出器で T2K 実験ニュートリノ振動解析における系統誤差の削減を目指しており、安定的なデータ取得が求められている。

本研究では、2023 年 11 月から行われた T2K 実験 run13 および 2024 年 11 月から行われた run14 に向けて、WAGASCI 検出器群の準備を行い、ニュートリノビームデータを取得した。BabyMIND は各 run でニュートリノビーム由来の 8 バンチ構造を確認することができたが、WAGASCI と Wall-MRD では run13 の 11 月期と 2 月期では 8 バンチ構造を確認できたものの run13 の 6 月期と run14 では確認できなかった。

また、安定したデータ取得を目指すために下流 WAGASCI の上部構造体の改良を行った。これは run12 で発生した下流 WAGASCI の上部構造体に設置された読み出しエレクトロニクスにてデータ取得ができなくなるという問題の解決を目指し行った。上部構造体に対しての新規構造物の設置、および内部ケーブルの交換を通して、データ取得の運用状況の改善を実現した。

さらに、上記のように run13 の 6 月期に発生した WAGASCI と Wall-MRD の 8 バンチ構造を確認できないという問題に対して、timing plot の出力を通して WAGASCI のデータ収集システムの評価を行った。timing plot の出力を通して、時間情報の信号の処理に問題があると推定し CCC の交換を行ったが、run14 で状況の改善は確認できなかった。問題は解決していないが、8 バンチ構造の確認できないデータについて、ADC 分布を確認した結果、ADC 分布は正常であり、収集したデータはタイミング情報を使わない限り、物理解析に使用できそうであることを確認した。

今後は WAGASCI と Wall-MRD の 8 バンチ構造を確認できない問題の改善のために、CCC の基板そのものや他のデータ取得システムを含めて問題がないか検証する必要がある。また、WAGASCI 検出器群の安定的なデータ取得のために、各検出器の運用状況を注視していく必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたって、多くの方々からご指導ご協力をいただきました。

東京都立大学の高エネルギー物理実験研究室でお世話になりました先生方には、研究に関しまして多くのことをご教授頂きました。指導教員である角野秀一先生、汲田哲郎先生には日頃から研究に関して多大なるご指導、本論文の添削に加え、研究室での生活面でのサポートなど多大なるご支援を頂きました。不自由なく研究に打ち込むことができ、充実した研究生活を送ることができたのは角野先生、汲田先生のおかげです。深く感謝申し上げます。

昨年卒業された研究室の先輩である在原さん、古井さん、鮫島さん、北村さんにも大変お世話になりました。特に在原さんには同じ T2K 実験における WAGASCI-BabyMIND グループの先輩として、研究を始めた当初から数えきれないほどのご指導とご助言を頂きました。卒業された後もなお手厚いサポートをしていただきました。前向きに楽しく研究できたのも在原さんのおかげです。また、古井さんもグループは違いましたが同じ T2K 実験の先輩として、現地の生活面でのアドバイスを頂きました。深く感謝申し上げます。特任研究員の Thomas さんと潮田さんにも大変お世話になりました。お二方のこれからの益々のご活躍をお祈り申し上げます。

後輩の鎌田君、菊田君、田口君、村澤君、学部で卒業された荒井君、宮崎君、村田君にも大変お世話になりました。ともに過ごした時間は短いですが、楽しい日々を送らせて頂きました。そして同期の黒川君、初芝君、望月君にも感謝申し上げます。3 人とは異なる実験グループで、出張期間は合わない期間が長く続くことも多かったです。楽しく研究室での生活を送れたのは 3 人のおかげです。

T2K 実験グループの方々からは研究に関して、多くのご指導ご協力を頂き、多くのことを学ばせて頂きました。横浜国立大学の南野彰宏先生、京都大学の木河達也先生、Ngoc さん、東北大学の市川温子先生、John さんには大変お世話になりました。特に南野先生、木河先生には研究に関して親身に相談に乗ってくださり、J-PARC での研究活動に際しても数えきれないほどのサポートを頂きました。深く感謝申し上げます。

先輩である在原さん、大阪公立大学の本條さん、横浜国立大学の工藤さん、東北大学の中野さん、同期の大阪公立大学の山本君、横浜国立大学の伊藤君、東京理科大学の佐藤さん、後輩の鎌田君、大阪公立大学の船山君は J-PARC での研究生活においていつも温かく接してくださり、多くのサポートを頂きました。深く感謝申し上げます。特に在原さん、本條さん、工藤さんには日々の研究に関する議論や多くのアドバイスを交わしてくださりました。改めて感謝申し上げます。

最後に、これまで支えてくれた大切な家族に心から感謝を申し上げ、謝辞とさせていただきます。

参考文献

- [1] ”標準模型の素粒子一覧”. <https://higgstan.com/standerd-model/> , (参照 2025-01-08)
- [2] ”ニュートリノ振動の発見”.
https://tenkyo.net/kaiho/pdf/2015_11/01special-1kawagoe.pdf , (参照 2025-01-08)
- [3] ”T2K 実験公式ホームページ”. <https://t2k-experiment.org/ja/about-t2k/> , (参照 2025-01-08)
- [4] ”J-PARC 公式ページ”. <https://j-parc.jp/c/for-researchers/> , (参照 2025-01-08)
- [5] ”J-PARC 公式ページ オンライン施設公開 2020”. https://j-parc.jp/c/OPEN_HOUSE/2020/neutrino.html , (参照 2025-01-08)
- [6] 在原拓司, ”T2K 実験の新型前置検出器 Super-FGD のキャリブレーションシステムの開発” 東京都立大学修士論文 (2020 年度)
- [7] 古藤達朗, ”T2K 実験の新型前置検出器 SuperFGD の LED キャリブレーションシステムのインストールに向けた研究” 東京都立大学修士論文 (2022 年度)
- [8] 工藤悠仁, ”T2K 実験前置ニュートリノ検出器 WAGASCI/Baby MIND を用いたニュートリノビーム測定” 横浜国立大学修士論文 (2023 年度)
- [9] Y. Itow et al. The jhf-kamioka neutrino project, 2001
- [10] K. Abe et al. (T2K Collaboration). Constraint on the matter-antimatter symmetry-violating phase in neutrino oscillations, 2019
- [11] 安留健嗣, ”新検出器 Baby MIND を導入した T2K-WAGASCI 実験の最適化と解析アルゴリズムの構築” 京都大学修士論文 (2018 年度)
- [12] 浜松ホトニクス社 MPPC カタログ
https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/mppc_kapd9008j.pdf , (参照 2025-01-08)