

新ニュートリノ検出器 WAGASCI の建設と
新型 ASIC・SPIROC2D を用いた
信号読み出しシステムの開発

(Construction of a new neutrino detector WAGASCI and
development of its data acquisition system
with SPIROC2D)

理学研究科

数物系専攻

東 佑真

概要

T2K (Tokai to Kamioka) 実験は、茨城県東海村にある J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) から 295 km 離れた岐阜県神岡町にあるスーパーカミオカンデ (SK) へ、ニュートリノビームの中心軸を SK の方向から 2.5° ずらすことで、SK におけるニュートリノ振動確率が最大になるようなニュートリノのエネルギー領域を選択している (off-axis 法). T2K 実験では、前置検出器 ND280 (主にプラスチック) と後置検出器 SK (水) の標的原子核の違いや、ニュートリノ反応によって生成された荷電粒子に対する立体角アクセプタンスの違い (前置:前方散乱, 後置:全方位) によるニュートリノ-原子核反応断面積の不定性が、振動解析における系統誤差の要因の一つとなっている.

我々は、その不定性抑制のため、水とプラスチックにおけるニュートリノ反応断面積比の精密測定を目的とした WAGASCI (Water-Grid-And-SCIntillator) 実験を進めている. 実験で使用される WAGASCI 検出器は SK と同程度の立体角アクセプタンス (4π) を実現するために、シンチレータを垂直・水平に組み合わせた三次元格子構造を持つ. 検出器内部には水が注入されて水標的として用いられる. WAGASCI 実験は、ND280 と異なる off-axis 角 (1.5°) でニュートリノを検出することが計画されている. 検出器の構成は、ニュートリノ検出器を中央に据え、左右には side-MRD (Muon Range Detector), ビーム下流には Baby-MIND (prototype Magnetized Iron Neutrino Detector) が配置される. 中央のニュートリノ検出器は、ビーム上流から順にプラスチックを標的としている proton module, 水を標的としている WAGASCI から成っている. side-MRD はミューオンの飛程を測定するために置かれ、Baby-MIND はミューオンの運動量の測定や電荷の符号の識別を目的として配置される. WAGASCI 実験においては、ND280 よりもニュートリノエネルギーや立体角アクセプタンスが大きい状況でニュートリノ反応断面積を測定できる. 我々は水標的検出器を建設し、実験エリアにインストールした. 現在は WAGASCI 検出器の基礎性能や以下に述べる新しいエレクトロニクスの試験を行っている.

我々は、新たな信号読み出しシステムの開発も進めた. WAGASCI 検出器は 1280 本のシンチレータから構成されている. ニュートリノ反応で生成された荷電粒子がシンチレータを発光させる. このシンチレータ光を検出するために光検出器 MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) を 1280 個使用する. 信号を読み出すためのエレクトロニクスとして SPIROC2D (Silicon Photomultiplier Integrated Read-Out Chip) と呼ばれる新型 ASIC を 40 枚採用する. このチップは、36ch での制御, 信号増幅, デジタル変換や電荷・時間情報の保存等を行う. またエレクトロニクスボードとして ASU (Active Sensor Unit) も 40 枚採用し, SPIROC2D と光検出器としての 32ch アレイ型 MPPC を搭載させてこれらの制御を行う. これらの動作試験では周期的な信号を用いてデータ取得を行った.

本論文では、水標的のニュートリノ検出器 WAGASCI の建設過程やその過程の中で行われたシンチレータへの黒塗料塗布方法の確立や、エレクトロニクスの動作試験の結果について報告する.

目次

概要	iii
1 イントロダクション	1
1.1 ニュートリノ	1
1.1.1 ニュートリノの発見	1
1.1.2 ニュートリノの質量	2
1.1.3 ニュートリノ-原子核反応	2
1.2 J-PARC	3
1.2.1 LINAC	3
1.2.2 RCS	3
1.2.3 MR	4
1.2.4 ニュートリノビームライン	4
1.2.5 POT	5
1.3 T2K	6
1.3.1 off-axis 法	7
1.3.2 ニュートリノ振動解析	9
1.4 前置検出器	10
1.4.1 INGRID	10
1.4.2 Proton Module	10
1.4.3 ND280	11
1.5 Super-Kamiokande	13
1.6 WAGASCI	14
1.6.1 WAGASCI 検出器	16
1.6.2 プラスチックシンチレータ	17
1.6.3 波長変換ファイバー	17
1.6.4 MPPC	18
1.6.5 Baby MIND	21
1.6.6 Side MRD	21
2 WAGASCI 建設	23
2.1 水標的検出器 建設工程	23
2.1.1 シンチレータと波長変換ファイバーの接着と反射材塗布	24
2.1.2 シンチレータ表面への黒塗料塗布	26
2.1.3 格子構造上のレイヤー組み立て	27

2.1.4	sub-module 組み立て	29
2.1.5	Module 組み立て	29
2.2	シンチレータ光量測定	31
3	黒塗料塗布	34
3.1	動機	34
3.2	塗料の選定	34
3.3	水性シリコンカラスプレー	35
3.3.1	含有成分と内容量	37
3.3.2	塗料の管理	38
3.3.3	水性塗料の特徴	38
3.4	黒塗料塗布作業	38
3.4.1	作業環境	38
3.4.2	準備物	39
3.4.3	方法	42
3.5	作業場所環境問題	45
3.5.1	作業場所内濃度測定	47
3.5.2	作業者に対する改善	48
3.5.3	周辺環境に対する改善	51
3.6	環境改善結果	53
3.6.1	作業場所内の濃度測定結果	53
3.6.2	作業場所内の風速測定	53
3.7	黒塗料塗布の評価	54
3.7.1	光量測定	54
4	WAGASCI DAQ の開発	57
4.1	WAGASCI DAQ の概要	57
4.2	SPIROC2D	58
4.2.1	Analog part	59
4.2.2	Digital part	61
4.3	DAQ と SPIROC との信号のやりとり	64
4.4	データ解析の流れ	65
4.5	エレクトロニクスボード大量試験	65
4.5.1	準備物	66
4.5.2	ASU 複数枚での測定	67
4.5.3	Gain tuning	73
4.5.4	TDC と 実時間の対応	75

4.6	検出器へのエレクトロニクス取り付け	79
4.7	動作状況	82
5	結論	84
	謝辞	85
	参考文献	86

図目次

1.1	CCQE 反応のダイアグラム	3
1.2	J-PARC 航空写真	4
1.3	MR, RCS のバンチ構造	5
1.4	ニュートリノビームラインの構造	5
1.5	T2K 実験の概要	6
1.6	off-axis 角によるニュートリノエネルギーと, ミューニュートリノ振動確率	7
1.7	ニュートリノ-原子核の反応断面積	8
1.8	SK でのニュートリノフラックス	8
1.9	off-axis 法の概要	9
1.10	CP 対称性の破れに関するデータ	10
1.11	INGRID 全体図	11
1.12	INGRID 構造	11
1.13	Proton Module の概要	11
1.14	ND280 の概要	12
1.15	ND280 でのニュートリノフラックスと反ニュートリノフラックス	12
1.16	SK 概略	14
1.17	SK イベントディスプレイ ミューオン	14
1.18	SK イベントディスプレイ 電子	14
1.19	WAGASCI 実験の概要	15
1.20	WAGASCI 実験の概要 (top view)	16
1.21	各 off-axis 角でのニュートリノフラックス	17
1.22	WAGASCI 検出器に使用されるシンチレータ	18
1.23	WAGASCI 検出器の構造	18
1.24	ファイバーバンドルとファイバーの関係	19
1.25	MPPC の外観	19
1.26	MPPC の構造	19
1.27	MPPC の出力波形	20
1.28	32ch アレイ型 MPPC	21
1.29	32ch アレイ型 MPPC の拡大図	21
1.30	Baby MIND の概要	21
1.31	Side MRD の概要	22
2.1	建設した水標的 WAGASCI 検出器	23
2.2	自動接着システムの概略	24
2.3	シンチレータとファイバーの様子	25

2.4	オプティカルセメント	25
2.5	反射材	25
2.6	コンプレッサー（左）とディスペンサー（右）	26
2.7	塗布に使用するシリンジとノズル	26
2.8	真空脱泡	27
2.9	シンチレータのセッティング	27
2.10	シンチレータ内の乱反射	28
2.11	レイヤー組み立ての様子	28
2.12	グリッドシンチレータの固定	28
2.13	プレーンシンチレータの固定	29
2.14	組み上げた 1 Sub-Module の様子	29
2.15	ファイバーバンドルへのファイバー挿入	30
2.16	Module 組み立ての様子	30
2.17	水タンクへの挿入	31
2.18	完成したモジュールの移動（左），B2 へのインストール（右）	32
2.19	サンプリングによるシンチレータの平均光量	33
2.20	サンプリングによるシンチレータの平均光量 詳細	33
3.1	1 sub-module でのイベントディスプレイ	34
3.2	塗布によるシンチレータの平均光量の安定性	35
3.3	水性シリコンカラスプレー つや消しブラック	36
3.4	化学薬品等管理表	38
3.5	作業場所内の配置	39
3.6	作業場所全体	39
3.7	作業場所内部	39
3.8	ビニールハウス	40
3.9	電気送風機	40
3.10	フレキシブルダクト	41
3.11	フレキシブルダクト 概略	41
3.12	防毒マスク	42
3.13	吸収缶	42
3.14	黒塗料塗布前と後でのシンチレータの様子	43
3.15	シンチレータの机への配置	44
3.16	シンチレータの識別番号	44
3.17	ファイバーの保護	45
3.18	防毒マスクとゴーグルの装着	46
3.19	作業服，作業靴，ゴム手袋の装着	46
3.20	二度塗り後のシンチレータ	46

3.21	黒塗料塗布方法	47
3.22	使用した気体採取器	48
3.23	使用した検知管 113L	48
3.24	化学物質に対する破過曲線	49
3.25	排気法改善前の様子	49
3.26	電気送風機の配置変更	50
3.27	新たな吸気口の様子	50
3.28	ビニールハウス内のカーテン	51
3.29	ダクトの位置変更	52
3.30	使用した風速計	52
3.31	風速測定	52
3.32	作業靴	53
3.33	電源関係	53
3.34	気体検知管 キシレン用とエチルベンゼン用	54
3.35	ビニールハウス内の風速測定場所	55
3.36	黒塗料塗布前後におけるシンチレータの平均光量の差	56
4.1	WAGASCI エレクトロニクスの全容	57
4.2	ASU	58
4.3	Interface	58
4.4	DIF	59
4.5	GDCC	59
4.6	CCC による周期的なゲート信号の例	59
4.7	ニュートリノビームトリガーの概要	60
4.8	SPIROC Analog part	61
4.9	Digital part の実際の流れ	61
4.10	各 Digital part の動作	62
4.11	SPIROC における RAM のマッピング	63
4.12	デイジーチェーン接続の様子	64
4.13	spill の間でメモリが全て埋まる場合	65
4.14	spill の間でメモリが全て埋まらない場合	65
4.15	大量試験セットアップの概略	66
4.16	20 枚測定時の様子	66
4.17	使用した LED[61]	67
4.18	LED 点灯用の回路	67
4.19	LED の光拡散板への取り付け	67
4.20	実際の測定環境 (NM 棟 B2 フロアの場合)	68
4.21	試験に使用した供給電源	68

4.22	試験に使用したファンクションジェネレータ	68
4.23	LED 照射時の ADC 分布の確認	69
4.24	複数枚測定の設定アップの様子	69
4.25	ペDESTAL とコラムの二次元ヒストグラム	70
4.26	ペDESTAL のチップ間のばらつき	70
4.27	ノイズレートとスレシヨLD の関係	71
4.28	BCID 分布を用いたノイズレートの算出	72
4.29	ADC 分布におけるピーク間隔と p.e. との線形性	73
4.30	非線形性に関するヒストグラム	73
4.31	線形性測定時のノイズレートとゲインの値	74
4.32	ASU 40 枚の測定における設定アップ	74
4.33	input DAC とゲインの関係	75
4.34	40 枚の MPPC のゲインチューニングの結果	75
4.35	TDC Ramp 信号と BCID の対応関係	76
4.36	TDC Ramp 信号と TDC count の対応関係	76
4.37	TDC 測定時の設定アップ	77
4.38	Start Acquisition 信号の取り出しの様子	77
4.39	TDC 分布のヒストグラムと Ramp の再現	78
4.40	2000 ns まで遅延させた時の TDC Ramp の再現	79
4.41	BCID, TDC Ramp のタイミング	79
4.42	16 コラム分 LED を光らせた時の TDC Ramp の再現	80
4.43	再現した TDC Ramp に対するフィッティング結果	80
4.44	BCID の偶奇による TDC Ramp の傾き	81
4.45	LED のヒットタイミング	81
4.46	エレクトロニクスの取り付け	82
4.47	一週間のゲインヒストリー	82
4.48	イベントディスプレイの例	83

表目次

3.1	使用塗料の詳細	36
3.2	水性シリコンカラスプレー（つや消しブラック）の成分表	37
3.3	使用塗料の詳細	37
3.4	ビニールハウス サイズ	39
3.5	電気送風機 仕様	39
3.6	フレキシブルダクト 仕様	41
3.7	防毒マスクの吸引缶 仕様	42
3.8	風速測定 結果	52
3.9	測定に用いた気体検知管	54
3.10	濃度測定結果	54
3.11	風速測定 結果	55
4.12	SPIROC2D 仕様	60
4.13	LED 仕様	67
4.14	ノイズレート 範囲	72

1 イントロダクション

1.1 ニュートリノ

ニュートリノ (neutrino) はスピン $1/2$ のフェルミ粒子^{*1}である。また、電荷 0 の中性レプトンである。ニュートリノは弱い力としか相互作用しないため、弱い力を調べる手段として用いられる。クォークやレプトンには電荷が反対の反粒子が存在する。反粒子から形成される反物質が存在する証拠は無く、初期において粒子と反粒子の間の CP 対称性の破れによって反粒子は消えてしまったと考えられている。C 対称性とは粒子と反粒子を入れ替えても (電荷を反転させる) 物理現象が成り立つ対称性をいい、P 対称性とは鏡映しの状態においても同じ物理現象が成り立つ対称性のことをいう。この対称性の破れはクォークでは発見されている (小林・益川理論) がこれだけでは小さいため物質・反物質の非対称性は説明できない。それを補うものとしてニュートリノの CP 非対称性が物質・反物質の非対称性の原因になっているのではないかとされている。現在、ニュートリノと反ニュートリノが起こす物理現象が起こる割合に差が生じていることを確認するための実験が世界中で行われている。

1.1.1 ニュートリノの発見

1930 年に W. Pauli がニュートリノ仮説を提案したことで初めてニュートリノが素粒子論に登場した [1]。原子核が β 崩壊 (崩壊時に電子を放出する現象) する時に出現する電子のエネルギーは一定ではなく、連続的な値をとることが確認された。パウリは β 崩壊時に電子と同時に検出できない未知の粒子 (ニュートリノ) が生じており、それが失われたエネルギーを担っていると考えた (ニュートリノ仮説)。検出できないのは電荷がなく、質量が 0 あるいは非常に小さいからだと考えられた。これによりエネルギー保存則は保たれ、 β 崩壊は新たにニュートリノが加えられた 式 (1) として表された。

$$n \longrightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}_e \quad (1)$$

この崩壊は弱い相互作用によって起こる。

ニュートリノを発見するために式 (1) の逆反応

$$\bar{\nu}_e + p \longrightarrow e^{+} + n \quad (2)$$

が用いられる。検出原理としては、中性子 n と陽電子 e^{+} の消滅で生成される光子の同時測定である。F. Reines らはこの同時発生事象の観測に成功し、反ニュートリノを発見した [2]。式 (2) の反応における平均反応断面積は

$$\bar{\sigma} = (11 \pm 2.6) \times 10^{-44} \text{cm}^2 \quad (3)$$

となる [3]。

^{*1} フェルミ統計に従う粒子。二つの粒子が同じ状態に存在できない (パウリの排他律)

また、ニュートリノは3種類存在する。その発見の経緯を述べる。

1962年にL. M. Ledermanらによって高エネルギーの加速器を用いた実験が行われた[4]。加速器により二次的に生成された π や K によってほぼ純粋な ν_μ ビームが作られる。 π の崩壊は $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ であり、 K の崩壊は $K^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \pi^0$ である。生成されるニュートリノを原子核標的に当てて、それにより発生する μ や e がどのくらいの割合で観測されるのかが調べられた。もし、 $\nu_\mu = \nu_e$ ならば μ と e の発生する割合は同じくらいになるはずである。しかし、実際には μ が29個、 e が6個という結果になった。このことから、 $\nu_\mu \neq \nu_e$ であることが確認され、ニュートリノは二種類あることが分かった。

また1989年には、CERNの電子陽電子衝突加速器LEP (Large Electron Positron Collider) における実験において、中性ベクトルボソンである Z^0 が ν と $\bar{\nu}$ へと崩壊する確率を調べることで、ニュートリノは3種類であると決定された[5]。3番目の ν_τ は原子核乾板を使用したDONUT実験で2000年に発見された[6]。これは $\tau \rightarrow \nu_\tau + X$ (X は崩壊により生じる粒子全般) から生じる ν_τ を原子核との反応を通して検出する[7]。

1.1.2 ニュートリノの質量

1962年にニュートリノが質量を持ち、時間発展と共にニュートリノの種類が変化する現象が理論的に提唱された[8]。PMNS行列は以下のようにして表される。

$$U_{PMNS} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta_{CP}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

ここで、 $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$ 、 $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$ 、 δ_{CP} はCP対称性の破れを特徴づけるパラメータである。これより、ミューニュートリノの生存確率を表すと以下のようなになる。

$$\begin{aligned} P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = & 1 - 4(s_{12}^2 c_{23}^2 + s_{13}^2 s_{23}^2 c_{12}^2 + 2s_{12}s_{13}s_{23}c_{12}c_{23} \cos \delta) s_{12}^2 c_{13}^2 \sin^2 \Phi_{31} \\ & - 4(c_{12}^2 c_{23}^2 + s_{13}^2 s_{23}^2 s_{12}^2 - 2s_{12}s_{13}s_{23}c_{12}c_{23} \cos \delta) s_{12}^2 c_{13}^2 \sin^2 \Phi_{32} \\ & - 4(s_{12}^2 c_{23}^2 + s_{13}^2 s_{23}^2 c_{12}^2 + 2s_{12}s_{13}s_{23}c_{12}c_{23} \cos \delta) \\ & \times (c_{12}^2 c_{23}^2 + s_{13}^2 s_{23}^2 s_{12}^2 - 2s_{12}s_{13}s_{23}c_{12}c_{23} \cos \delta) \sin^2 \Phi_{21} \end{aligned} \quad (5)$$

であり、

$$\Phi_{ij} = \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E} \quad (6)$$

である。 $\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$ のような質量二乗差等のパラメータによって振動確率は記述される。

1998年にスーパーカミオカンデグループによってニュートリノ振動が観測されたことで、ニュートリノに質量があることが確認された。

1.1.3 ニュートリノ-原子核反応

ニュートリノ-原子核反応は荷電カレント反応(CC (Charged Current) 反応)と、中性カレント反応(NC (Neutral Current) 反応)の2種類に大別される。CC反応は W^+ ボソンを、NC反応は Z^0 ボソンを媒介粒子とする反応である。

後述する T2K 実験では 低エネルギー領域 (0.6 GeV/c) のニュートリノ反応を扱う. このエネルギー領域において主要な反応である 荷電カレント準弾性散乱 (CCQE 反応 : Charged Current Quasi Elastic) を主なイベントとして測定されている (図 1.1). この反応は二体反応であるので 標的原子核が静止していれば, 荷電レプトン (生成されるミューオン) のエネルギーや運動量のみで元のニュートリノエネルギーを再構成することができる. そのため, ニュートリノビームのエネルギースペクトル測定に利用される.

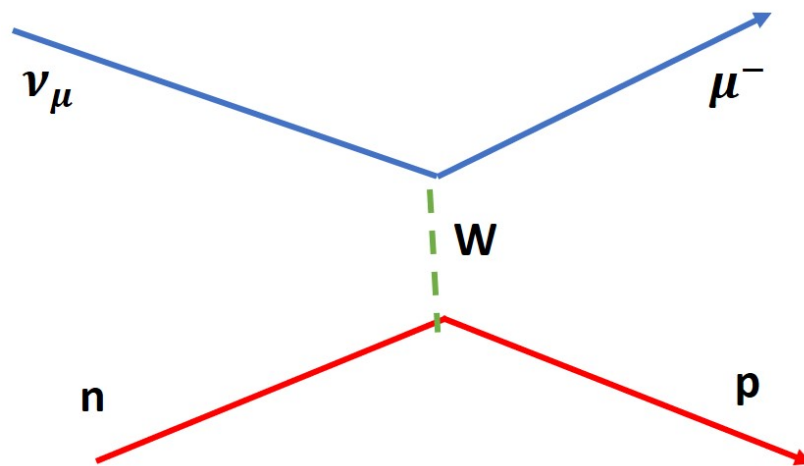


図 1.1 CCQE 反応のダイアグラム. ニュートリノと原子核の反応によって荷電粒子が生成される.

1.2 J-PARC

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) は茨城県那珂郡東海村にある加速器施設である (図 1.2). J-PARC の加速器は 400 MeV LINAC, 3 GeV RCS, 30 GeV(現在)MR といくつかの実験施設から成る. 実験施設は, 物質・生命科学実験施設 (MLF) やハドロン実験ホール, そしてニュートリノビームラインがある [9].

1.2.1 LINAC

LINear ACcelerator の略. イオン源で発生させた H^{-} (負水素イオン) を加速する. H^{-} は陽子と質量が同程度で, 陽子 1 個, 電子 2 個で構成される. 後述する RCS にビーム時間幅 $500 \mu s$ のパルスを 25Hz で送る.

1.2.2 RCS

Rapid Cycling Synchrotron[10] の略である. 周長が約 350 m あり, 400 MeV から 3 GeV まで加速させるブースターの役割を持つ. H^{-} を炭素薄膜に通して, 電子 2 個を取り除き陽子に変換する. LINAC からは L3BT (Linac to 3 GeV Beam Transfer) を通り RCS へ入射される. RCS への入射から MR への出射までを 25 Hz で繰り返す. RCS におけるビーム収束は双極子磁石と 4 重

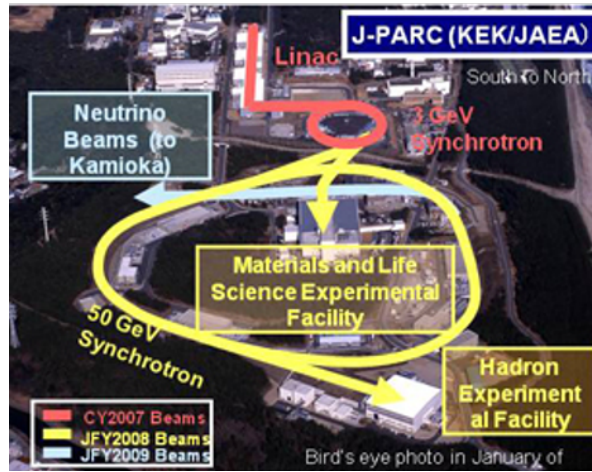


図 1.2 J-PARC 航空写真

極子磁石によって行われる。95% 以上は MLF (Materials & Life science experimental Facility) へ取り出される。ビームは高速の立ち上がり時間をもつキッカー電磁石によって、周回軌道を回っているバンチ全て (RCS の場合は最大 2 バンチ) を取り出す。

1.2.3 MR

Main Ring synchrotron[11] の略である。周長は 1.6 km にもなり、3 GeV から 30 GeV まで加速させる (光速の 99% まで)。RCS からは 3-50 BT (3 GeV to 50 GeV Beam Transport) を通って MR へ入射される。MR でのビームは最大 8 バンチで、RCS から 2 バンチずつ、最大 4 回入射される (図 1.3)。十分加速された陽子ビームはニュートリノビームラインへ送られる。現在、475 kW のビーム強度を達成している。

1.2.4 ニュートリノビームライン

ニュートリノビームラインは T2K 実験のためのビームラインである [12]。図 1.4 のようなビームラインにより純度の高い ν_μ を生成する。MR によって加速されて取り出された陽子ビームは、超伝導電磁石によって一次ビームラインで曲げられる。曲げられたビームをグラフィット標的に照射して大量の荷電 π 中間子を生成する。

3つのホーン電磁石で π 中間子を収束できる。 π^+ を収束 (FHC : Forward Horn Current) すれば ν_μ を主成分とするニュートリノビームに、 π^- を収束 (RHC : reverse horn current) すれば $\bar{\nu}_\mu$ を主成分とする反ニュートリノビームを生成可能である。

π 中間子は長さ約 100 m 程の decay volume と呼ばれるトンネルを通り ν_μ (式 (7)) と $\bar{\nu}_\mu$ (式 (8)) に崩壊する、その内部は π 中間子の吸収を減らすためにヘリウムガスで満たされている。

$$\pi^+ \longrightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (7)$$

$$\pi^- \longrightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (8)$$

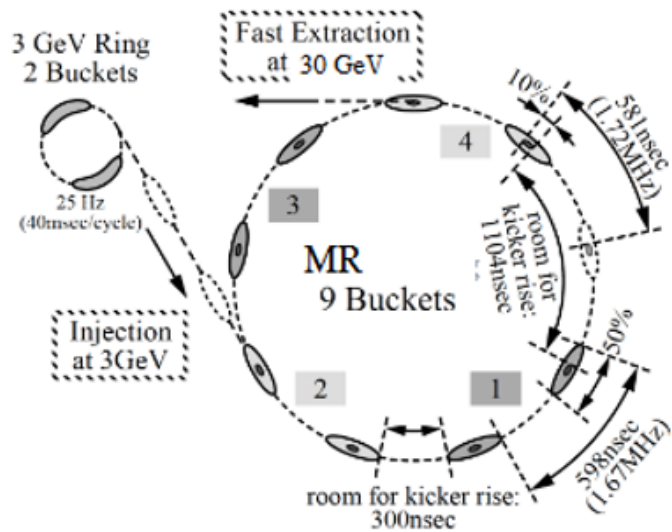


図 1.3 MR, RCS のバンチ構造 [11]

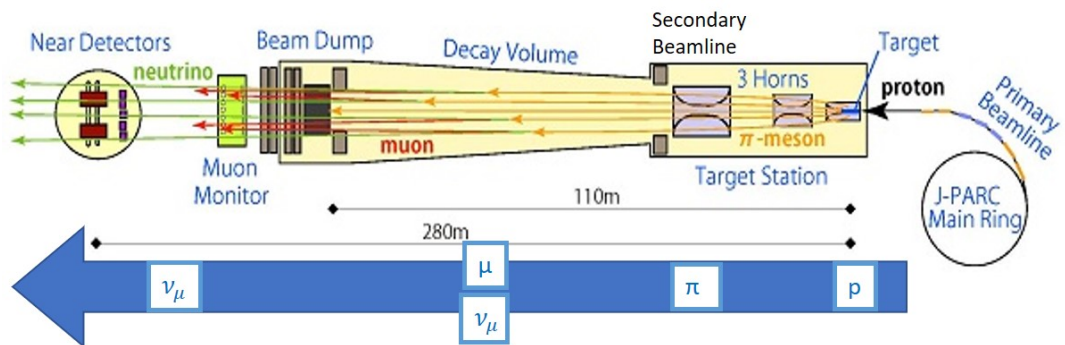


図 1.4 ニュートリノビームラインの構造. ニュートリノビームを生成する.

ニュートリノ以外の粒子 (μ 粒子) はグラファイトブロックでつくられた beam dump で吸収される. 吸収される μ は約 $5.0 \text{ GeV}/c$ 以下のものである. それ以上のエネルギーをもつ μ は beam dump を通り抜ける.

ここを通過したミューオンの分布をミューオンモニターで観測し, ニュートリノビームの強さ, 方向, 安定性を間接的にモニターする. ニュートリノビームの方向は後述するビーム軸中心に設置されている前置検出器 INGRID によって, ニュートリノ反応で生じた荷電粒子を観測することでも直接測定されている. どちらも 1 mrad の精度で測定することが求められている.

このような過程でニュートリノビームが 2.48 s 周期で, 8 バンチが 581 ns 間隔で生成される.

1.2.5 POT

データ量の蓄積を評価するために POT という値が用いられる. POT とは Proton On Target の略である. これはニュートリノ生成標的に照射した陽子の数のことを表している 1 スピル (8 バ

ンチ) で約 2×10^{14} 程度である。標的に生成された 2 次粒子では正確な粒子数が判断できないため、標的に当たる前の陽子を基準としている。ビームフラックスなどの規格化の際に用いられる。

1.3 T2K

T2K (Tokai to Kamioka) 実験 [12] は、茨城県東海村にある J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) から 295km 離れた岐阜県神岡町にあるスーパーカミオカンデヘミュー (反ミュー) ニュートリノビームの中心軸を 2.5° ずらして射出し (off-axis 法), ニュートリノ振動現象を精密に測定する目的で行われている長基線ニュートリノ振動実験である (図 1.5)。

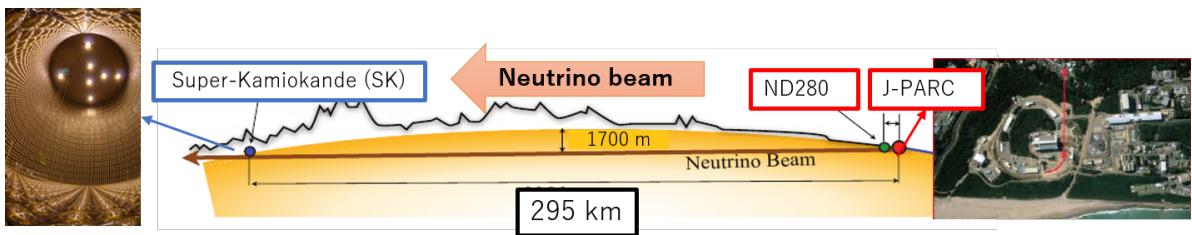


図 1.5 T2K 実験の概要

生成したニュートリノビームはニュートリノ生成点から 280 m 下流にある前置検出器 (ND280) と 295km 下流のスーパーカミオカンデ (SK) の双方で観測し、比較することによってニュートリノ振動のパラメータを測定する。off-axis 法によりニュートリノビームのエネルギーを SK での振動が最大に (図 1.6), そしてバックグラウンドの影響が少なくなる (図 1.7) 600 MeV に調整される [12]。このような 1 GeV 付近のエネルギー帯では後述する CCQE 反応が支配的となり、この反応によって生成される荷電粒子を観測対象としている。ニュートリノエネルギーの変化は off-axis 角に依存するので (図 1.6), ニュートリノビームの方向を正確に監視する必要があり、ミューオンモニター (MUMON) によって間接的に、INGRID によって直接的に監視される。

T2K 実験における物理的目標は以下である [15]。

1. ミューニュートリノから電子ニュートリノ ($\nu_\mu \rightarrow \nu_e$) へのニュートリノ振動を観測することによって, θ_{13} , δ_{CP} といった振動パラメータを測定する。
2. ミューニュートリノビームからのニュートリノ振動による ν_μ 消失現象から, θ_{23} , Δm_{32}^2 を精密に測定する。

振動パラメータを決定するために, SK で期待される観測量をニュートリノフラックス (図 1.8) やニュートリノ-原子核相互作用モデルに基づいて予測する。その予測における不定性を減らすために, 前置検出器と後置検出器のフラックス間における不定性を減らすことは重要である [16]。

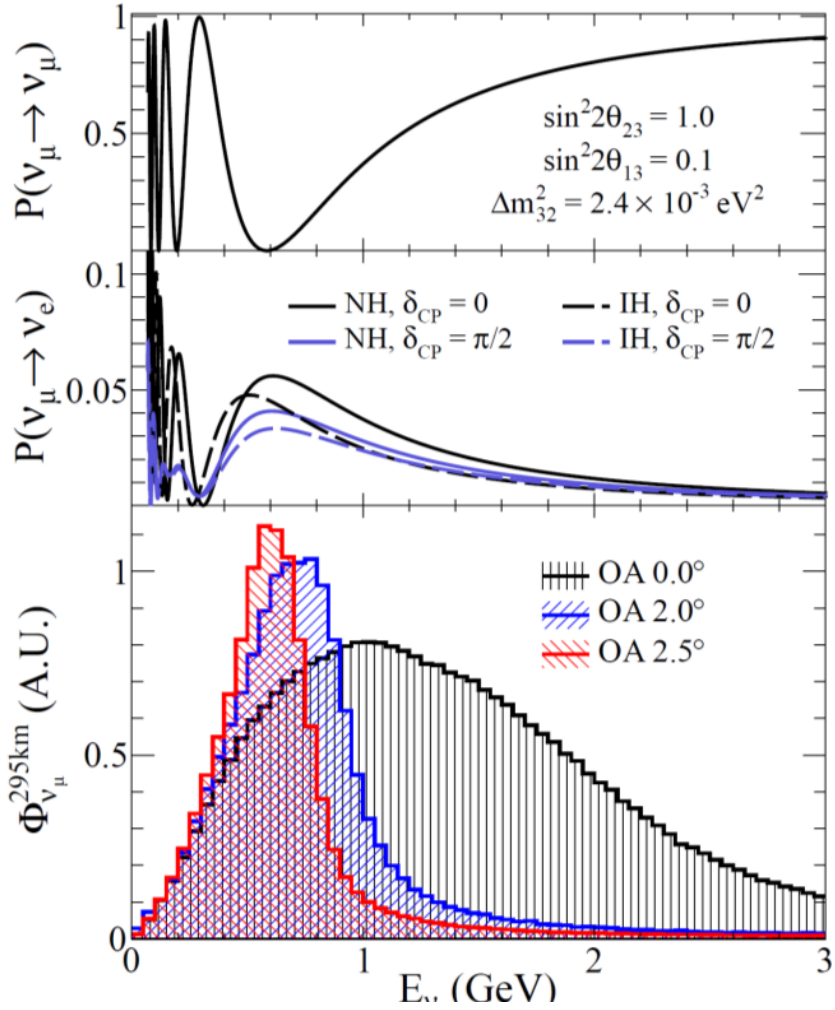


図 1.6 off-axis 角によるニュートリノエネルギーと、ミューニュートリノ振動確率 [13]. 0.6 GeV 付近で振動確率が最大になっていることが確認できる。

1.3.1 off-axis 法

T2K 実験において、バックグラウンドの抑制や、ニュートリノ振動確率を最大にするためにニュートリノビームの中心軸を 2.5° ずらす off-axis 法が採用されている (図 1.9) [18]. ニュートリノは π 中間子の二体崩壊から生成される. 実験室系におけるニュートリノのエネルギー E_ν は

$$E_\nu = \frac{M^2 - m_\mu^2}{2(E_\pi - p_\pi \cos \theta_\nu)} \quad (9)$$

で表される [18]. m_π , m_μ はパイオンとミューオンの質量であり, E_π , p_π はパイオンのエネルギーと運動量である. また, θ_ν はパイオンとニュートリノ方向との間の角度である. T2K では off-axis 角 2.5° なので $\theta_\nu = 2.5^\circ$ のときのエネルギーになる. およそ $0.6 \text{ GeV}/c$ である.

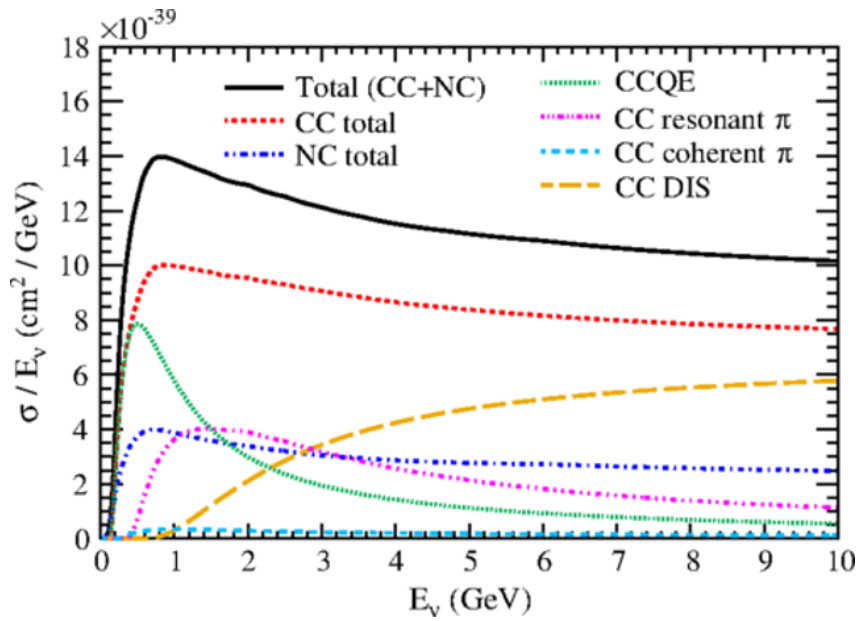


図 1.7 ニュートリノ-原子核の反応断面積 [14]. シミュレーションにより予測された反応モードごとの反応断面積. 0.6 GeV 付近では CCQE 反応が支配的であることが分かる.

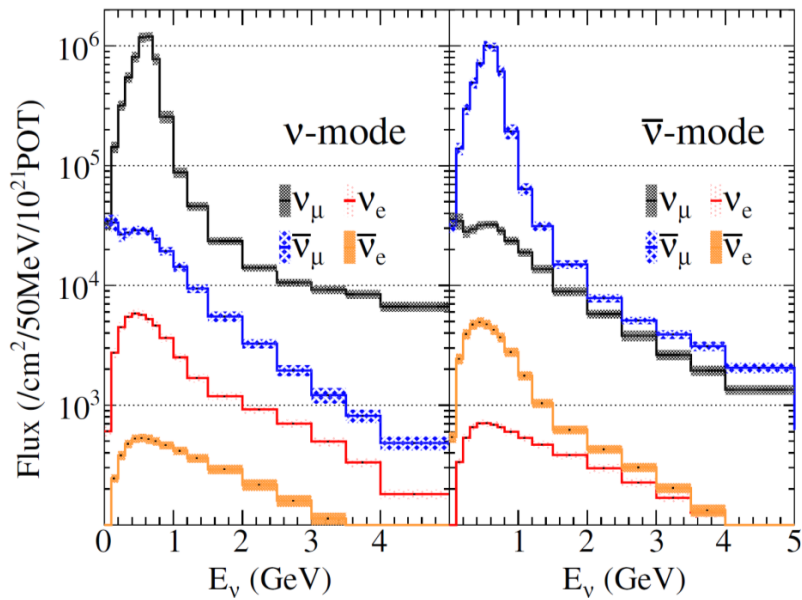


図 1.8 SK でのニュートリノフラックス [17]. 左図: ニュートリノビームのフラックス, 右図: 反ニュートリノビームのフラックス.

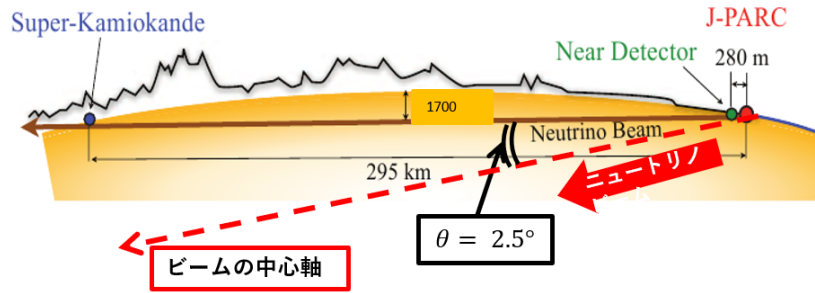


図 1.9 off-axis 法の概要

1.3.2 ニュートリノ振動解析

基本的な流れは、モンテカルロシミュレーション (MC) による予想と実データの比較である。T2K における振動解析では、SK で予測されるニュートリノ事象のエネルギー分布と、SK で観測された実データにおけるエネルギー分布を、それぞれ比較することで振動パラメータを求める。ここで、SK での予測はニュートリノ振動を仮定していないものとする。

エネルギー分布を得るためにはまずニュートリノイベントがいくつあるのかを調べる必要がある。SK で観測されるイベント数は、SK での CCQE 反応によるイベントを選ぶことで得られる。予測されるイベントは以下の式を基本として求められる。

$$N = \sigma_{\nu} \Phi_{\nu} \varepsilon \quad (10)$$

N はニュートリノ振動が起これないと仮定した時に予測されるニュートリノイベントであり、求めるべき値である、 σ_{ν} はニュートリノ反応モデル、外部実験におけるニュートリノ反応に関するデータ、前置検出器 INGRID で測定された反応断面積等によって予測されるニュートリノ反応断面積である。 Φ_{ν} は陽子ビームモニターによって測定されたビーム強度や POT, INGRID によって測定されているビーム方向等によって予測されるニュートリノフラックスである。最後に、 ε は SK の検出器シミュレーション等によって予測される SK における CCQE 反応の検出効率である。これらによってニュートリノイベントが予測される。

次にこれらのイベントのエネルギー再構成を行う。T2K において観測対象としているのは二体反応である CCQE 反応であるので、荷電レプトンの情報のみでエネルギー再構成可能である。こうして決められたエネルギースペクトルを、 Δm_{32}^2 , θ_{23} , δ_{CP} というような自由度をもつ最大尤度関数でフィッティングを行う。、大まかにはこのような流れで振動解析が行われている [19]。

また、T2K において CP 対称性の破れの探索も行われている。それに関するデータが図 1.10 である。CP 対称性の破れがないことを 95% の確率で棄却しているという結果になった。

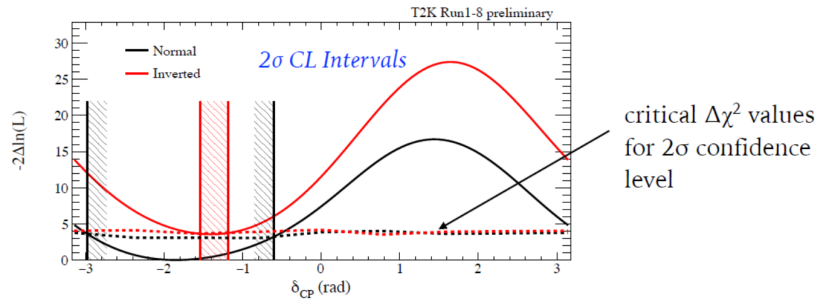


図 1.10 CP 対称性の破れに関するデータ 縦軸は実験データとの整合性を表しており、大きいほど観測データと合致していないことを表している。横軸は CP 位相を表しており、左端・右端がそれぞれ $-\pi$, π である。有意水準 95% で棄却された領域は縦軸黒斜線の外側である。
[20]

1.4 前置検出器

精密なニュートリノ振動測定において重要なのは、ニュートリノビームの強度や方向とニュートリノ反応の十分な理解である。外部のデータのみを利用して不定性を減らそうとすることもできるが、それだと測定器の違いによる系統的な不定性が残ってしまう。そのような不定性を減らすためにニュートリノ生成標的からビーム下流に 280 m 離れたところに、前置検出器が建設された。

1.4.1 INGRID

INGRID [21] は Interactive Neutrino GRID の略称である。この検出器はビーム中心軸上 (on-axis) に設置されたニュートリノ検出器で、ニュートリノの方向、強度、安定性を監視する役割を持つ。ニュートリノビーム全体を捕捉するために INGRID は垂直・水平方向に 7 台のモジュールを十字形に配置し、10m × 10m の範囲をカバーする (図 1.11)。

また、各モジュールは 9 枚の鉄標的層と 11 枚のトラッキング用シンチレータ層 (X, Y という 2 つの層からなる) が交互に挟み込まれたような構造をしている。それらはモジュール外から来る荷電粒子を取り除くための veto シンチレータ層で取り囲まれている (図 1.12)。

使用されるシンチレータの中心には波長変換ファイバーが埋め込まれており、荷電粒子によって励起されたシンチレータが放出したシンチレータ光がそのファイバーを通過して光検出器へと伝わる。

1.4.2 Proton Module

Proton Module はプラスチックシンチレータのみで形成された飛跡検出器である (図 1.13)。この検出器はニュートリノ反応によるミューオンと共に生成される陽子やパイオンを検出することで、ニュートリノ反応の種類を同定することが目的である。また、ニュートリノ反応の断面積測定も目的としている。本論文における水標的 WAGASCI 検出器の試験においてはプラスチック標的

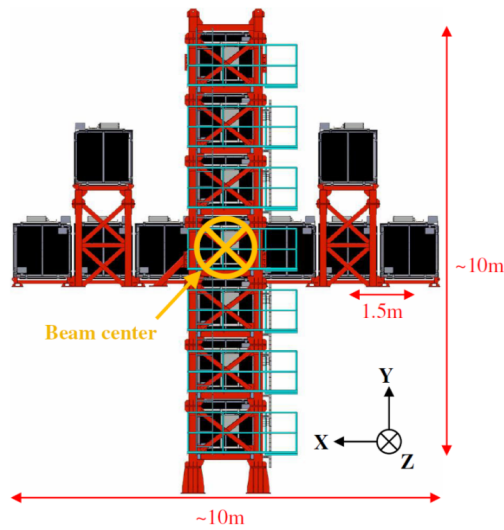


図 1.11 INGRID 全体図

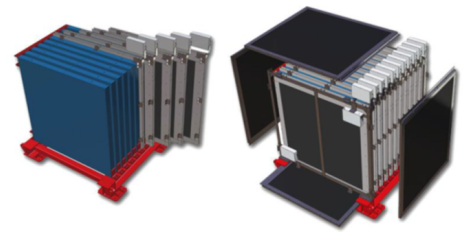


図 1.12 INGRID 構造

の検出器として用いられている。

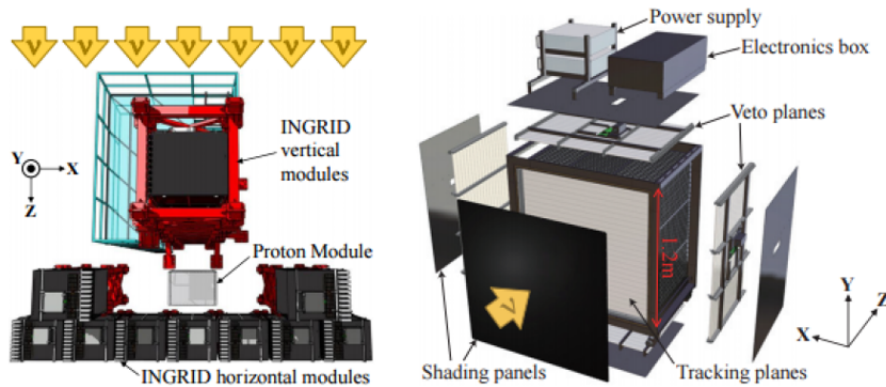


図 1.13 Proton Module の概要

1.4.3 ND280

前置検出器 ND280 は off-axis 角 2.5° 方向に置かれた検出器である (図 1.14)。生成直後のニュートリノビームのフラックスやエネルギー分布を測定することで (図 1.15) SK におけるフラックスの予想等, 振動解析に用いられる。ND280 において, μ 運動量や角度分布の fit 結果によって, ニュートリノフラックス (SK) とニュートリノインタラクションモデルの不定性を制限可能である。

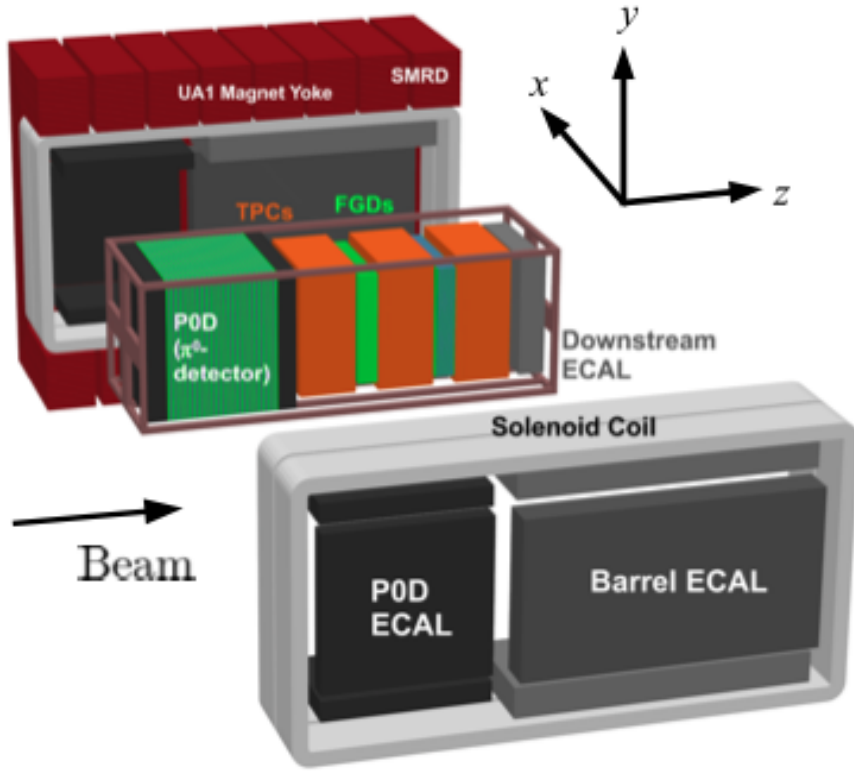


図 1.14 ND280 の概要

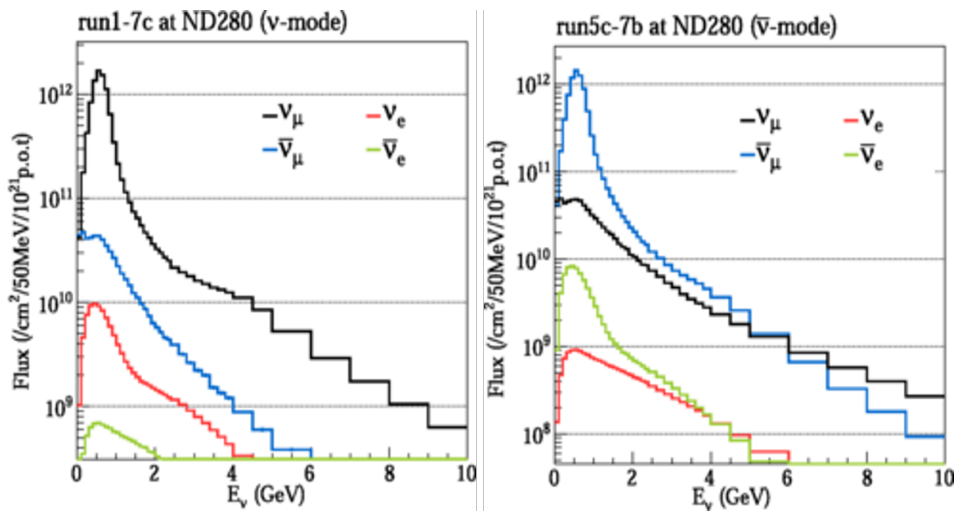


図 1.15 ND280 でのニュートリノフラックスと反ニュートリノフラックス [22]

1.5 Super-Kamiokande

Super-Kamiokande (SK) は岐阜県神岡町にある, 50 kt の水チェレンコフ検出器である. 図 1.16 は検出器の概略である [23]. SK は神岡町の山中, 地下 1 km のところに 50 kt の水タンクを設置し, その内面の 40% を浜松ホトニクスが開発した 50 cm 径の大型光電子増倍管 10000 本で覆っている [24]. SK における測定原理としてチェレンコフ放射が用いられる. 以下, その原理について説明する.

チェレンコフ放射は物質中の荷電粒子が同物質内での光速よりも速く動く時に発生する現象である [25]. この速度は式 (11) より与えられる.

$$\beta c = v = c/n \quad (11)$$

n は屈折率, c は真空中での光速である. そのためチェレンコフ放射を発生する粒子の速度 $v_{particle}$ は

$$v_{particle} > c/n \quad (12)$$

で表される. このとき, 電磁衝撃波を発生させ, その時の放射角 θ_c は式 (13)

$$\cos \theta_c = \frac{1}{\beta n(\omega)} \quad (13)$$

で表され, この角度で円錐状に広がっていく.

ニュートリノ反応で生成された電子やミューオン等が水中の光速を超えた時にこの現象が生じる. このとき生じる光をチェレンコフ光という. SK は水標的の検出器のため, 式 (12) より, $\beta > 0.75$ ($n = 1.33$) でチェレンコフ光が放出される. また, 方向は式 (13) より, $\cos \theta_c = 0.75$ で $\theta_c = 42^\circ$ である.

生じたチェレンコフ光は先述の通り放射状に発生するので, 光電子増倍管においてはリングのように観測される. このリングによって粒子の進行方向と発生点が決まる. また, 観測された光量はエネルギーに対応するので, エネルギー, 運動量の再構成が可能となる. ミューオンは電子より質量が大きく (約 200 倍), 制動放射*² よりも電離損失*³ が支配的であるため, エネルギーを失いつつそのまま検出器に到達する. したがって, 図 1.17 のような輪郭のはっきりとしたリングになる. 電子は制動放射により γ 線を放出し, その γ 線が電子・陽電子に対生成する. この過程が連続的に起こる事で電磁シャワーと呼ばれる現象を発生させるので, 多数の電子が生成されて図 1.18 のような輪郭がぼやけたリングになる. 電子とミューオンとの誤認率は 1% 以下である. SK には様々なニュートリノ (太陽ニュートリノ, 大気ニュートリノなど) が観測可能であるが, 観測結果が何

*² Bremsstrahlung: 高エネルギーの荷電粒子が媒質の原子核のそばを通ると, クーロン力を受けて軌道が曲がり (加速度運動), 荷電粒子が電磁波を放射してエネルギーを失う現象. 高エネルギー領域において支配的な現象であり, 軽い粒子ほど損失は大きい [26].

*³ 電離: 高エネルギー荷電粒子が通過する物質中の原子を電離させる現象. このときのエネルギー損失は dE/dx で表され, それは粒子の質量や媒質によらない. 低エネルギー領域で支配的である [26]. 制動放射との境界となるエネルギーは Critical energy と呼ばれる.

由来のものなのかを識別する必要がある。加速器によるニュートリノの識別は、時間によって行われる。J-PARC で生成されるニュートリノビームは数秒ごとに数マイクロ秒の間で発生するので、そのタイミングで観測されたニュートリノは加速器由来のニュートリノであると分かる。

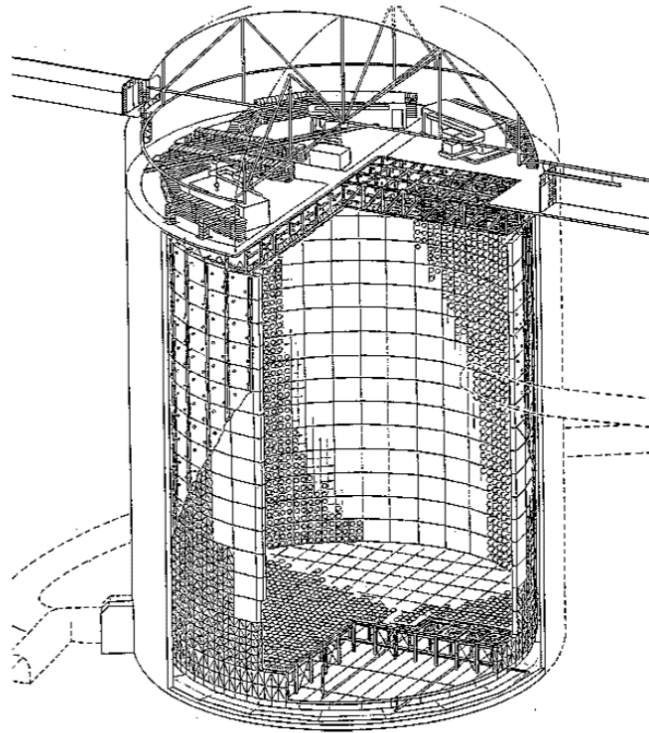


図 1.16 SK 概略 [23]

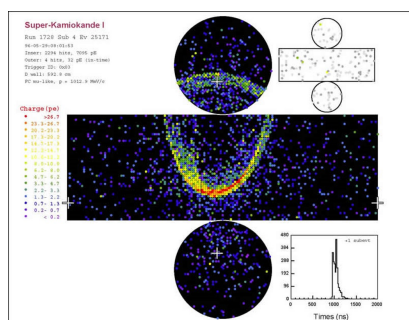


図 1.17 SK イベントディスプレイ ミューオン

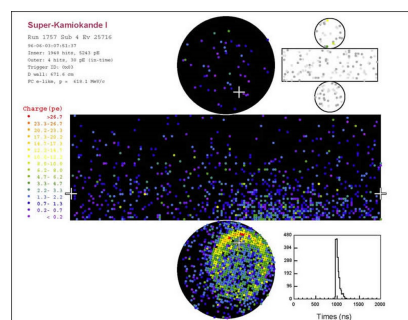


図 1.18 SK イベントディスプレイ 電子

1.6 WAGASCI

ND280 と SK の標的原子核の違いや、荷電粒子に対する立体角アクセプタンスの違いによるニュートリノ反応断面積の不定性を抑制し、振動解析における系統誤差を削減するために

WAGASCI (WATER-GRID-AND-SCINTILLATOR) 実験が進められている [28].

1 GeV 領域の原子核-ニュートリノ反応への理解は非常に重要である。しかし、原子核の多体系における効果が複雑であり理解しにくくなっている。前置検出器を用いた様々な測定が行われており、その結果、理解を妨げている要因の一つとして、ニュートリノビームのスペクトルが単色ではないということが挙げられている。それを解消するには異なるニュートリノエネルギーからの寄与を考えるべきである。そのため、前置検出器 ND280 とは異なるエネルギーをもつ off-axis 角において、ニュートリノ-原子核反応を調べる必要がある。WAGASCI 実験は ND280 と異なる位置において、水とプラスチックにおけるニュートリノ反応断面積比を精密に測定することを目的としている。反応断面積は式 (14) で表される。

$$\sigma = \frac{N_{\text{obs}} - N_{\text{BG}}}{\Phi_{\nu} T \varepsilon} \quad (14)$$

N_{obs} は観測された CC 反応によるニュートリノイベント数、 N_{BG} はモンテカルロシミュレーション (MC) によって予想されたバックグラウンドのイベント数である。また、 Φ_{ν} はニュートリノのフラックス、 T は標的の原子核数、 ε は検出器の全 CC 反応イベントに対する検出効率である。これらを測定することで断面積を求めることができる。

実験で使用されるニュートリノ検出器 WAGASCI は、後置検出器と同程度の立体角アクセプタンス (4π) を実現するために、シンチレータを垂直・水平に組み合わせた三次元格子構造を持っており、その内部には水が注入される。WAGASCI 実験では、ND280 と異なる off-axis 角 (1.5°) の場所にビーム上流から順にプラスチック標的 (proton module)・水標的 (WAGASCI) のニュートリノ検出器を中央に据え、左右にミュオンの飛程を測定するための side-MRD (Muon Range Detector)、ビーム下流にはミュオンの運動量の測定や電荷の区別を目的とした Baby-MIND (prototype Magnetized Iron Neutrino Detector) によって検出器を囲むような配置での測定が計画されている (図 1.19, Topview: 図 1.20)。ND280 よりもニュートリノエネルギーや立体角アクセプタンスが大きい状況でニュートリノ反応断面積を測定することが可能になる (図 1.21)。また、シンチレータ由来のバックグラウンドが 20% 程存在するので、水を注入しない WAGASCI 検出器 (water-out WAGASCI) を用いられる予定である。

我々は上で述べた水標的の検出器の建設を進めている。

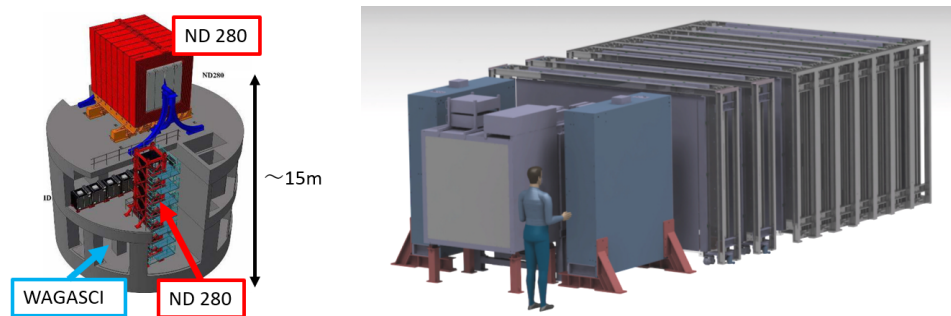


図 1.19 WAGASCI 実験の概要 [28]

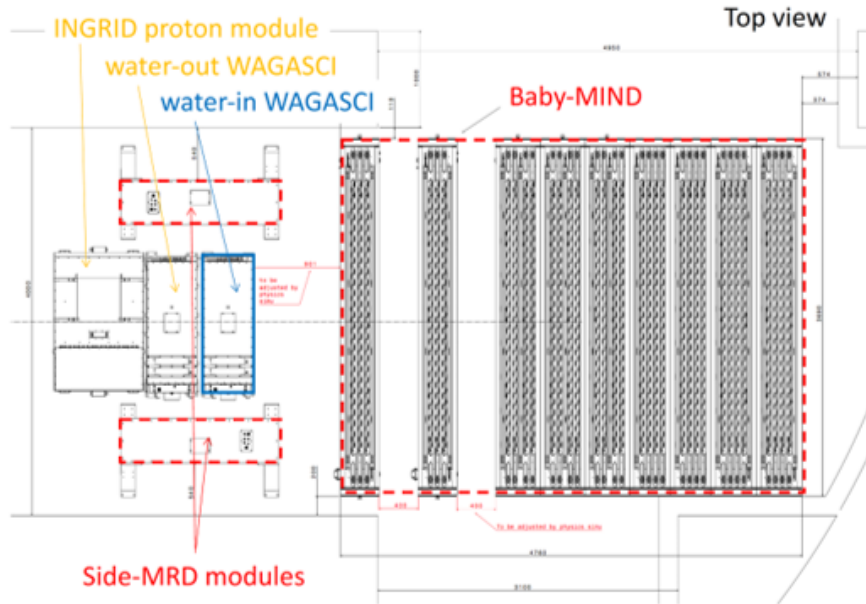


図 1.20 WAGASCI 実験の概要 (top view) [28]

1.6.1 WAGASCI 検出器

ニュートリノ反応事象の計数率は

$$N = \Phi_\nu \times \sigma_\nu \times N_{\text{TARGET}} \quad (15)$$

と表される。 Φ_ν は ν のフラックス、 σ_ν は ν の反応断面積、 N_{TARGET} は標的原子核数である。断面積 σ_ν は E_ν に比例して増加するので、 E_ν を上げることで測定を有利にできる。 Φ_ν は加速器で決まる。しかし、ニュートリノは弱い相互作用しかしないため、その反応断面積は非常に小さいことが知られている。つまり、実験において N_{TARGET} や、標的重量をどのくらい大きくできるかが重要である。標的が大きく、かつ標的自身が測定器となることで、生じた反応を無駄にしないようにする必要がある [29]。

水標的の WAGASCI 検出器はシンチレータの薄さから水 (標的) : プラスチック = 4 : 1 という質量比を実現している。検出器自体は sub -Module と呼ばれる全体の 1/4 の部分が 4 つ組み合わさっている構造であり、全体で 1 m × 1 m × 0.5 m の大きさである。ニュートリノ反応によって生じた荷電粒子はこのシンチレータを発光させる (シンチレーション光)。その光は波長変換ファイバーを通して光検出器 MPPC で検出される。以下で WAGASCI 検出器を構成する部分について説明する。

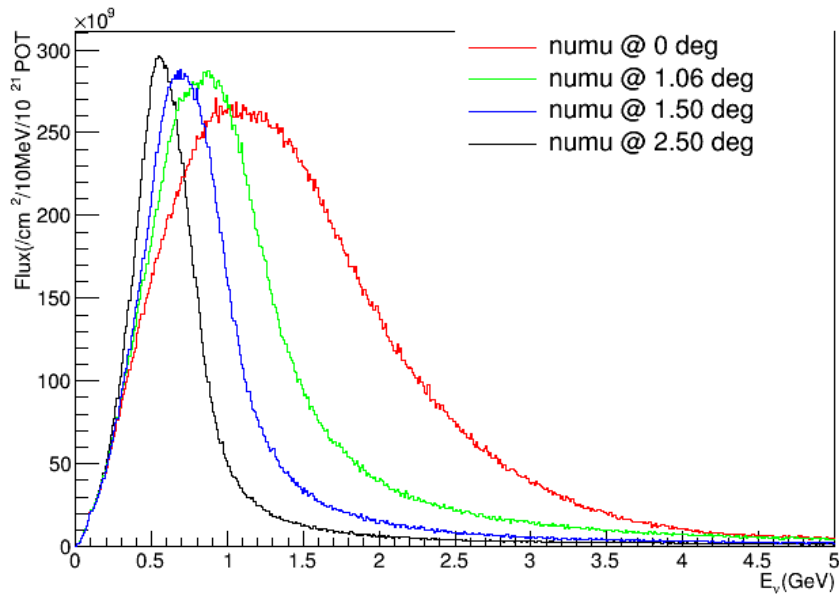


図 1.21 各 off-axis 角でのニュートリノフラックス. 1.5°:WAGASCI 検出器が配置される場所, 2.5°:ND280

1.6.2 プラスチックシンチレータ

WAGASCI 検出器に使用するシンチレータは Fermi 研究所で作られた押し出し型のプラスチックシンチレータである. 主にポリスチレン (1% : PPO, 0.03% : POPOP) から成り, 表面は TiO_2 を含む反射材が塗布されている. 1020 mm × 25 mm × 3 mm であり, 波長変換ファイバーを通すための溝がある. シンチレータとのニュートリノ反応は, 水との反応断面積測定においてバックグラウンドとなる. この薄さのおかげで, 水とシンチレータの質量比を減らす事ができ, バックグラウンドを抑制できる.

このシンチレータによるバックグラウンドを見積もるために, 水に浸さない WAGASCI 検出器 (Water-out WAGASCI) を利用する予定である. 1280 本のうち, 半分は図 1.22 のような 50 mm 程のスリットを持っている (グリッドシンチレータ). この溝を用いて, 特徴的な格子状構造を形成する (図 1.23).

1.6.3 波長変換ファイバー

シンチレーション光は波長変換ファイバーによって導かれる. 検出器に用いているのは Kuraray 社の Y-11(200) non-S タイプである [30]. 直径は 1.0 mm であり, 吸収波長が 430 nm, 発光波長は 460 nm である. シンチレータの発光波長が 420 nm, MPPC の最大感度波長が 440 nm であり, それぞれ適切であることが分かる. 図 1.22 のようにシンチレータに接着されている. ファイバーは 32 本単位でまとめられて図 1.24 のようなファイバーバンドルへと集約される. そして, こ

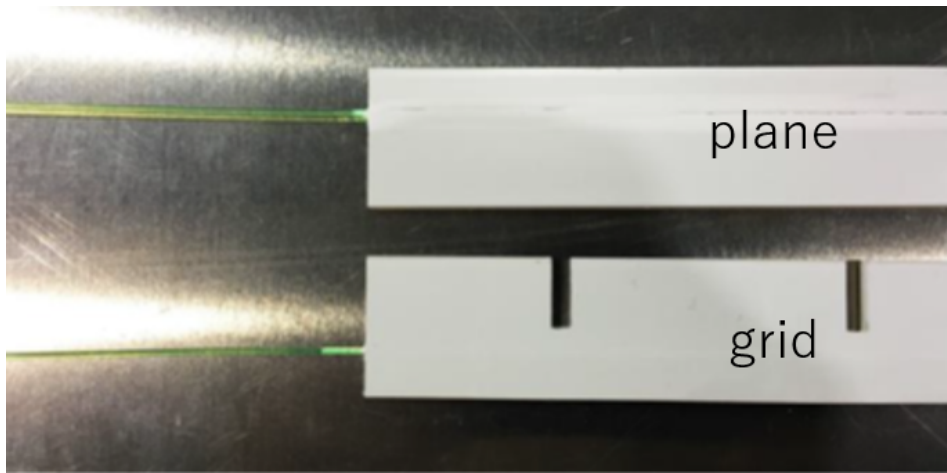


図 1.22 WAGASCI 検出器に使用されるシンチレータ. 上がプレーンシンチレータで, 下がグリッドシンチレータである.

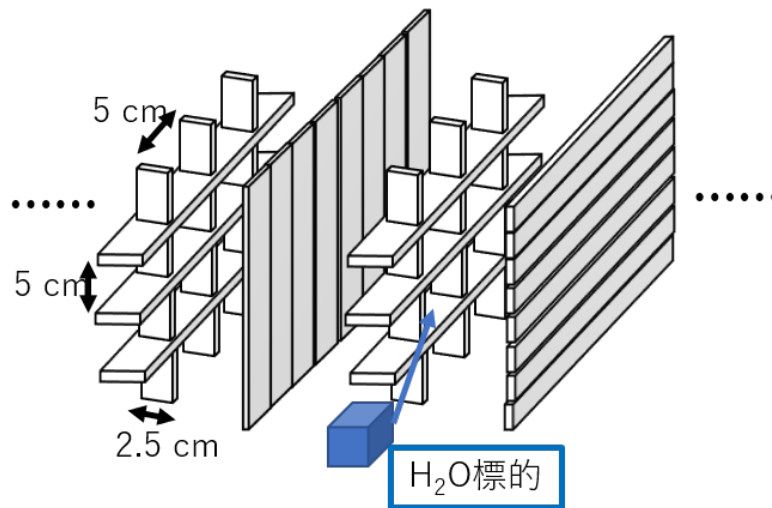


図 1.23 WAGASCI 検出器の構造. シンチレータを格子状に組み合わせた構造をしている.

のバンドルに取り付けられる MPPC で光を検出する.

1.6.4 MPPC

MPPC (Multi Pixel Photon Counter) は浜松ホトニクスが開発したフォトンカウンティングデバイスの一種である (図 1.25). 特徴は, 低電圧で動作, 広い感度波長範囲 (320 nm ~ 900 nm), 高い検出効率 (35%), また耐磁場性を持ち, 焼き付きが無い. MPPC は図 1.26 のようにガイガーモードの APD (Avalanche Photo Diode) とクエンチング抵抗を直列に繋いだものを 1 ピクセルとし, ピクセルを並列に配置したもので成り立つ. クエンチング抵抗はガイガーモードを止める (クエンチする) 働きを持ち, それにより各ピクセルから出力される波形はほぼ一定となる. そ



図 1.24 ファイバーバンドルとファイバーの関係. 32本のファイバーをまとめて、バンドルに挿入する. Oリングをバンドルに取り付けて水漏れを防ぐ.



図 1.25 MPPCの外観

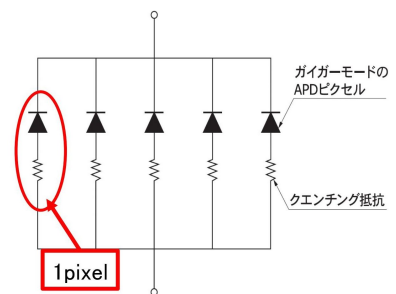


図 1.26 MPPCの構造. ガイガーモードのAPDとクエンチング抵抗で1ピクセルを成す

のため、1 p.e.^{*4}、2 p.e.、3 p.e. ... という離散的な値を持つ出力波形を得る (図 1.27 の右図). このような並列配置により、MPPCは各APDが出す波形の重ね合わせを出力する. MPPCの波形を測定することで、MPPCが検出した光子数を推定することができる.

MPPCは構造上様々な特性を持つ. その特性を以下に示す.

ゲイン

ゲインは、入射光子により発生した電子がアバランシェ増幅により何個になったかを表す値

^{*4} p.e. とは photon equivalent (光子相当) という意味である.

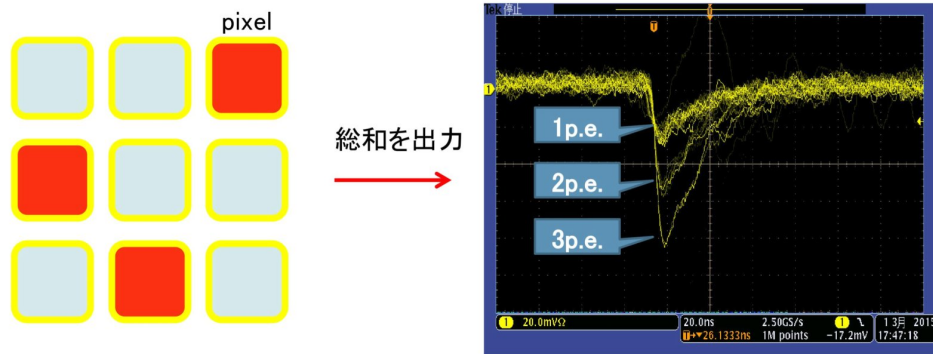


図 1.27 MPPC の出力波形. 3 ピクセルに光子が入射した場合 (左図) には, MPPC の出力波形は 3 p.e. となる (右図).

であり, 1 ピクセルの出力する電荷量 Q を素電荷 q で割ることによって得られる (式 (16)).

$$Gain = \frac{Q}{q} \quad (16)$$

ダークカウント

ダークカウントは入射光子と関係なく, 熱運動で励起された電子が電子雪崩を起こす現象である. 熱運動によって生じる現象のため, 温度が高いほど熱運動の頻度が高くなる. そのため, ダークカウントは温度依存性が大きい. また, ダークカウントにより発生したパルスと光子を検出したときのパルスは区別ができない. MPPC のノイズのひとつである.

クロストーク

クロストークは, 電子雪崩の際に二次光子が生成され, 他のピクセルでその二次光子が電子雪崩を起こす現象である. 本来 1 p.e. である信号が, クロストークにより別ピクセルでの反応も同時に起こるために 2 p.e. 以上に見える. これも MPPC のノイズにあたる.

アフターパルス

アフターパルスは, 電子雪崩で増幅された電子が格子欠陥に捕獲され, それが再び放出され雪崩を起こす現象である. 本来のパルスより少し遅延した信号を出す.

WAGASCI 検出器において, 新たに開発された 32ch のアレイ型 MPPC (S13660(ES2)) を使用する (図 1.28, 図 1.29). これはノイズレートが 100 kHz (スレシヨルド 0.5 p.e. において) に抑えられ, 動作電圧も広くなり (~ 5 V), クロストークもノイズレートの 3% まで減少した. 使用予定の全ての MPPC の性能評価 (ダークノイズレート, クロストークレート, ゲイン等) は検出器へのインストール前に行われた. 大量の MPPC を効率良く制御, 読み出すために EASIROC (Extended Analogue SI-pm ReadOut Chip) が使用された.

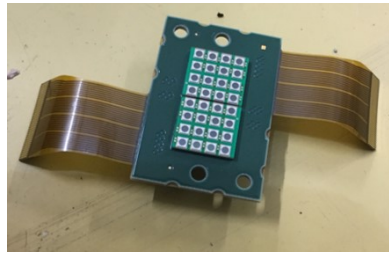


図 1.28 32ch アレイ型 MPPC

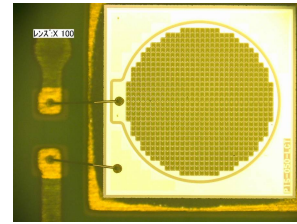


図 1.29 32ch アレイ型 MPPC の拡大図

1.6.5 Baby MIND

Baby MIND [31] は下流に配置されるミューオン飛程検出器であり, Magnetized Iron Neutrino Detector の略称である. 33 枚の磁力化された鉄板からなるモジュールと, 18 枚のプラスチックシンチレータからなる (図 1.30). 鉄板からなるモジュールの大きさは一枚 3500 mm × 2000 mm × 50 mm である. この検出器の目的は μ^+ , μ^- を高い効率で区別することと, 0.3-5.0 GeV/c の範囲で運動量を測定することである. Baby MIND はニュートリノと反ニュートリノによる μ^+ , μ^- を磁力で曲げ, その軌跡の曲率によって電荷の同定を行う. また, それによって運動量測定も行う. ニュートリノイベントにおいて 30% 程が反ニュートリノによるものであり, バックグラウンドになるためこの同定は重要である.

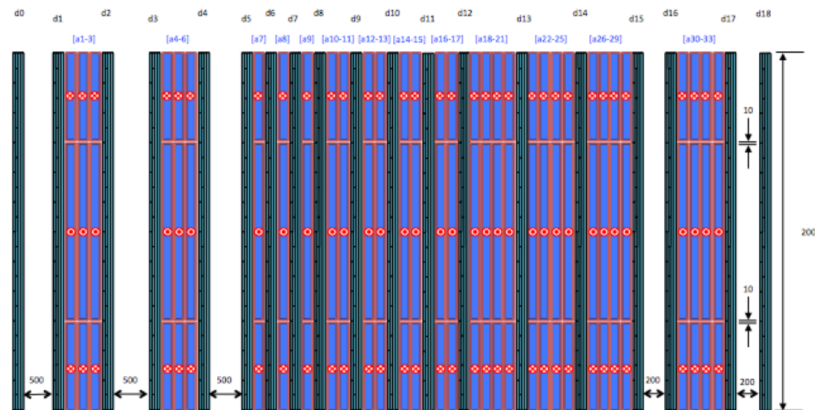


図 1.30 Baby MIND の概要. 鉄板 33 枚と, プラスチックシンチレータ 18 枚から形成される. 鉄板の間隔によって運動量測定の精度が変わる.

1.6.6 Side MRD

Side MRD は中心検出器の左右に配置されるミューオン飛程検出器 (MRD) である. MRD は中心検出器内で生じた CC 反応由来のミューオントラックを選ぶために用いられる. また, 中心検出器外の物質 (検出器ホールの壁等) とニュートリノの相互作用由来のトラックを排除する. ミューオンの運動量は検出器内の飛程 (path rangth) から再構成される.

この検出器は 11 枚の鉄板と 80 本のシンチレータから構成される。全体の大きさは 2236 mm × 1630 mm × 975 mm である (図 1.31)。光量を稼ぐために波打つような形状で波長変換ファイバーが接着されている。

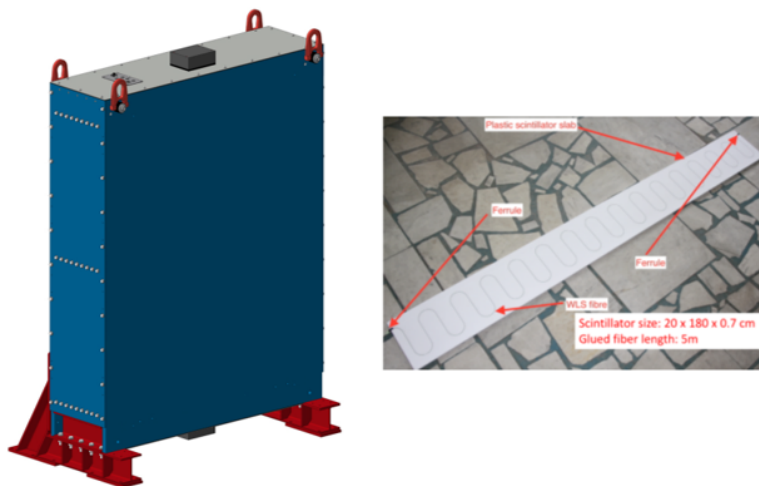


図 1.31 Side MRD の概要. 左図 : Side MRD の概要, 右図 : Side MRD に用いられるシンチレータ.

2 WAGASCI 建設

WAGASCI 実験の中心検出器である水標的検出器を 2016 年 8 月頃から 2017 年 8 月頃にかけて建設した。図 2.1 の水標的検出器が実際に建設したもので、実験エリアである NM (ニュートリノモニター) 棟 B2 フロアにインストールが完了している。プラスチック標的である Proton Module や、鉄標的である INGRID Module は既存のものを使用している。

現在、WAGASCI 本実験に向けて、ニュートリノビームによる検出器の動作試験や性能評価、新しいエレクトロニクスの試験を行っている。ここでは検出器建設についてまとめる。

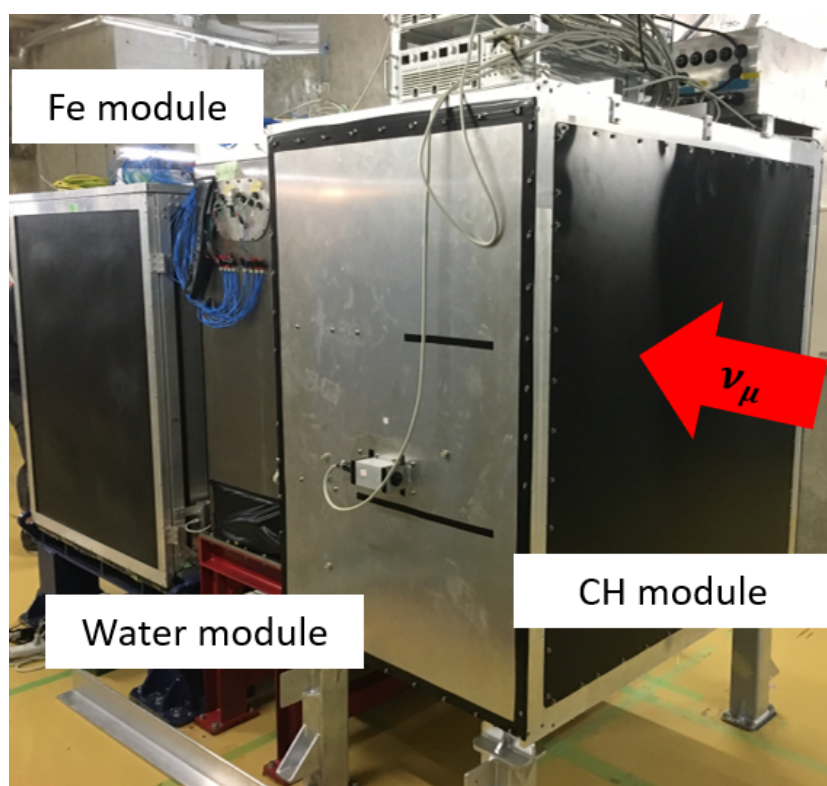


図 2.1 建設した水標的 WAGASCI 検出器。ビーム上流からプラスチック・水・鉄標的検出器が並ぶ。

2.1 水標的検出器 建設工程

水標的検出器の建設工程は以下の通りである。

1. シンチレータの加工
 - (a) シンチレータと波長変換ファイバーの接着と反射材塗布
 - (b) シンチレータ表面への黒塗料塗布
2. 加工したシンチレータによる組み立て

- (a) 格子構造上のレイヤー組み立て
- (b) sub-module 組み立て
- (c) Module 組み立て

これら一連の作業を段階に分けて一日約 8 時間のシフトを組み、製作を進めていった。以下で詳細を述べていく。

2.1.1 シンチレータと波長変換ファイバーの接着と反射材塗布

WAGASCI 検出器にはシンチレータが 1280 本必要なため、最初にその加工を行う。図 2.2 のようなシステムを用いてシンチレータにファイバーを接着、反射材塗布する [33] (図 2.3)。X・Y 方向に移動可能なアクチュエーターにシリンジとノズルを取り付け、ディスペンサーによってシリンジ内の薬品を塗布する仕組みである。作業台にはシンチレータを固定可能なアルミ板が 5 枚配置されており、1 枚につき 5 本、計 25 本のシンチレータを並べることができる。接着・塗布終了後はシンチレータを乾燥させるために保管棚へ移動させ、新しいシンチレータを作業台に移し同様の作業を行う。ファイバー接着が完了したシンチレータの乾燥後に反射剤塗布を行うので、これらの作業を同時に行うことはできない。

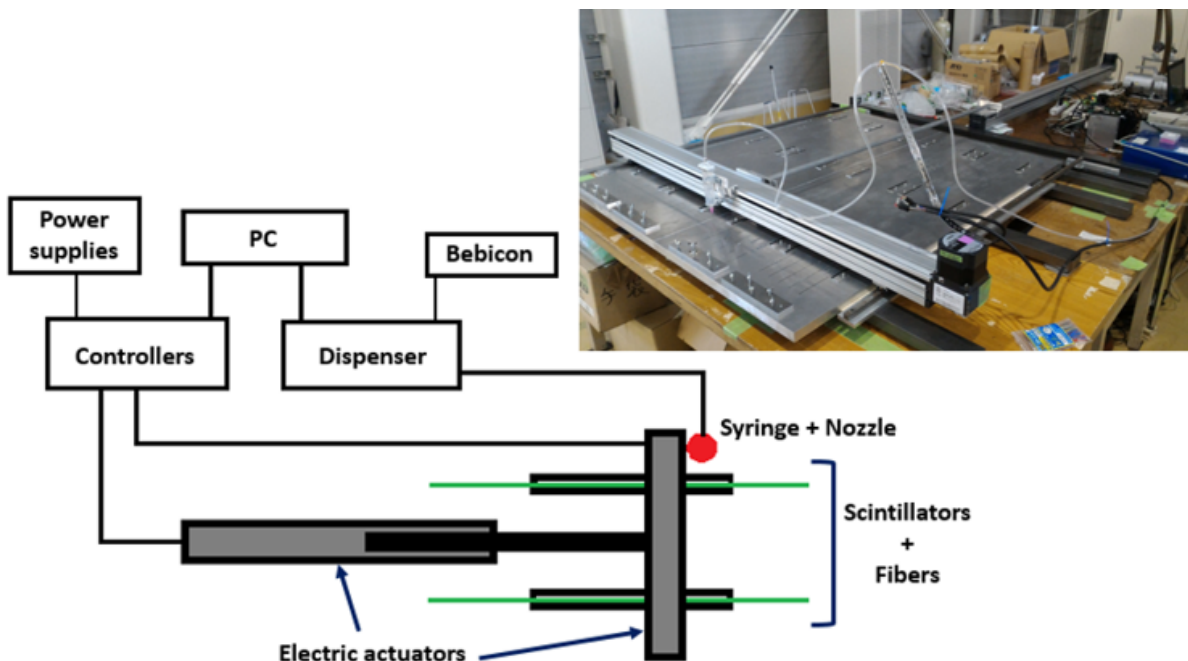


図 2.2 自動接着システムの概略

ファイバー接着にはオプティカルセメントという接着剤を使用する (図 2.4)。主剤と硬化剤を 4 : 1 の質量比で混合する。使用する波長変換ファイバーの透過率とほぼ一致する。

使用する反射材は図 2.8 であり、シンチレーション光の損失を防ぐために塗布する。主剤と硬化剤を 33 : 1 の質量比で混合する。シンチレータ表面には製作時にすでに塗布されており、この工程



図 2.3 シンチレータとファイバーの様子. ファイバーがシンチレータの溝部分に挿入され接着されている.



Resin

Hardener

図 2.4 オプティカルセメント. 主剤と硬化剤 (Eljen Technology EJ-500) [34]

では溝部分にのみ塗布を行う. そのほかのシンチレータ切断面やグリッドシンチレータの噛み合わせ部分は手作業での塗布を行う.



Part A

Part B

図 2.5 反射材. 主剤 (左) 硬化剤 (右) (Avian Technologies 社の Avian-D[35])

オプティカルセメントや反射材の塗布はコンプレッサーとディスペンサーを用いて行う (図 2.6). コンプレッサーで圧縮された空気はディスペンサーによって制御される. ディスペンサーで設定された吐出時間・圧力で塗布可能である. ディスペンサーの先に図 2.7 のようなシリンジを取

り付けることでシンチレータへの塗布を行う。使用する薬品をシリンジに詰める前に、図 2.8 のように真空脱泡を行い、薬品内部の空気をできる限り取り除く。



図 2.6 コンプレッサー（左）とディスペンサー（右）



図 2.7 塗布に使用するシリンジ（左）とノズル（右）。ディスペンサーに接続される。反射材塗布時に使用する刷毛ノズル（右上）、ファイバー接着に使用するノズル（右下）

シンチレータを自動接着システム上へ図 2.9 のように配置し、システムを動作させて接着と反射材塗布を行う。

2.1.2 シンチレータ表面への黒塗料塗布

水標的 WAGASCI 検出器は 3 次元格子状構造であるため、図 2.10 のような垂直・水平に組み合わされた格子が存在する。我々が建設する検出器よりも前に作られた検出器（INGRIID Water Module^{*5}）において宇宙線を用いた光量試験を行ったところシンチレータ間でのクロストークが発生していることが分かった。この原理はいまだ解明されていないが、シンチレーション光が格子内で乱反射することで発光したシンチレータとは異なる部分で反応してしまうからだと考えられている。

^{*5} 2015 年度に製作され、ビーム軸中心にインストールされている。

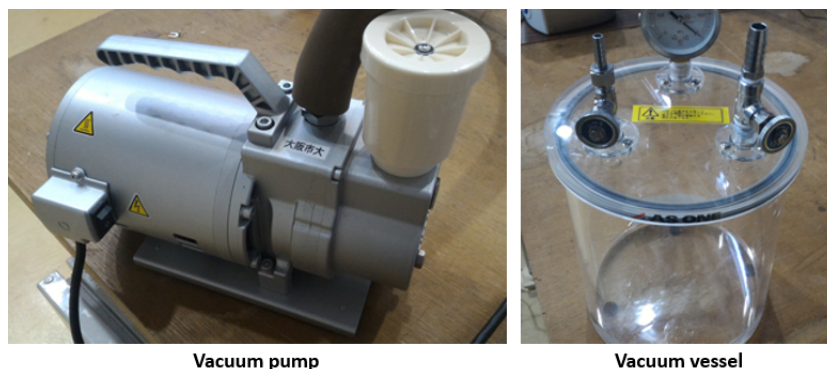


図 2.8 真空脱泡. 真空ポンプ (左), 真空容器 (右). 使用する薬品を中に入れて薬品内の空気を取り除く.

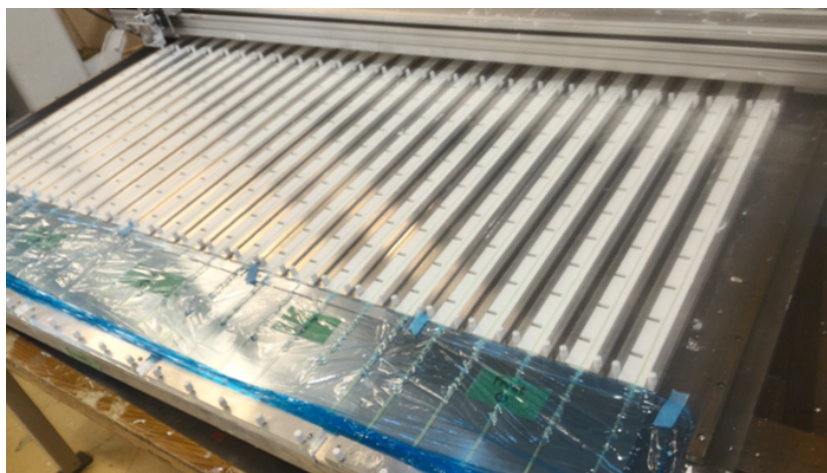


図 2.9 シンチレータのセッティング. シンチレータを固定し, シンチレータから飛び出しているファイバーを塗布しないようにラップで保護する.

このクロストークを抑制するために今回の製作から新たに黒塗料の塗布を工程に加えた. 黒塗料塗布作業において, 実験施設側の安全規制やそれに関する要請があった. 塗布方法の詳細, 要請に対する環境改善等は 3 章にまとめた.

2.1.3 格子構造上のレイヤー組み立て

上述したシンチレータ加工の後, ABS 樹脂でできたフレームを用いて図 2.11 のようにグリッドシンチレータを格子構造状に組み上げていく. グリッドシンチレータとプレーンシンチレータを組み合わせたものをレイヤーと呼ぶ. Y 方向, X 方向それぞれ 20 本のシンチレータの挿入が完了した後で, 図 2.12 のようにシリコン接着剤を用いてフレームとシンチレータを固定する.

その後, 図 2.13 のようにプレーンシンチレータをグリッドシンチレータ上に 40 本固定していく. 固定は同じくシリコングルーを使用する.

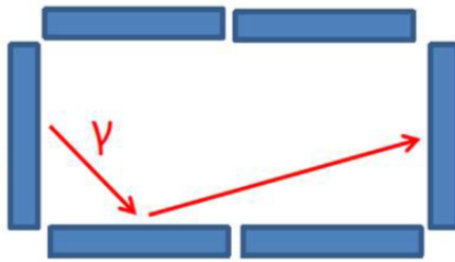


図 2.10 シンチレータ内の乱反射. シンチレータから漏れ出たシンチレーション光が格子状構造内で乱反射することでクロストークが発生していると考えられている.

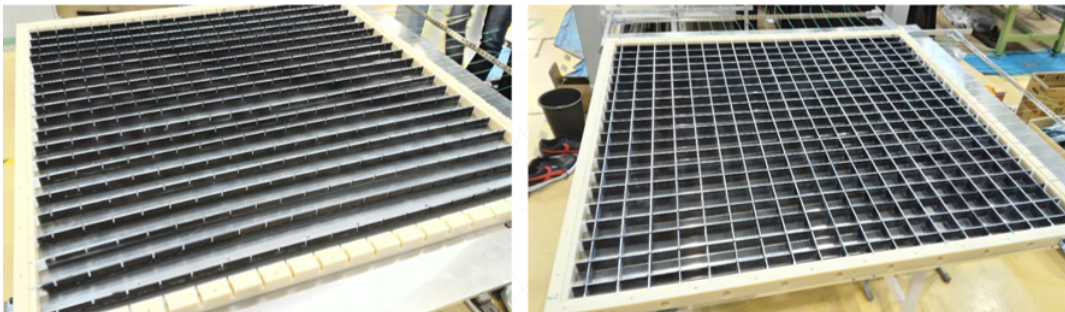


図 2.11 レイヤー組み立ての様子. グリッドシンチレータを Y 方向に固定したのち (左図), X 方向に組み合わせ固定する.



図 2.12 グリッドシンチレータの固定. シリコングルーを使用し ABS 樹脂フレームとシンチレータを接着する.

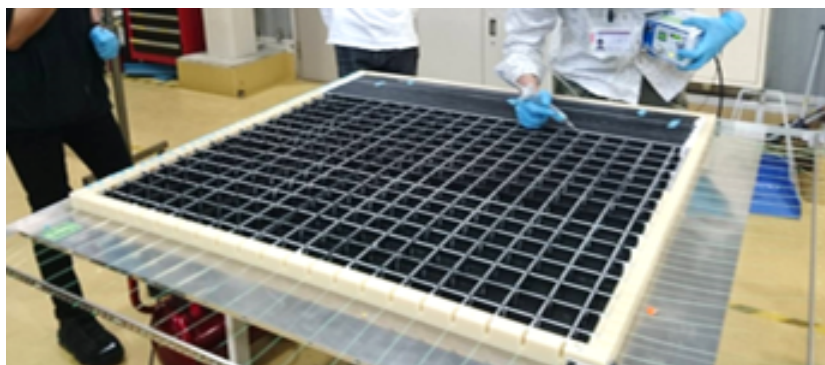


図 2.13 プレーンシンチレータの固定. 図 2.12 で固定したグリッドシンチレータの上にプレーンシンチレータを固定していく.

2.1.4 sub-module 組み立て

上述したレイヤーを 4 つ組み合わせたものを Sub-Module と呼ぶ. これは全体の 1/4 を意味する. 組みあがった Sub-Module は図 2.14 であり, ファイバーは図 2.15 のようにファイバーバンドルへと挿入され, 株式会社スズノ技研によってファイバー端面の研磨が行われる.

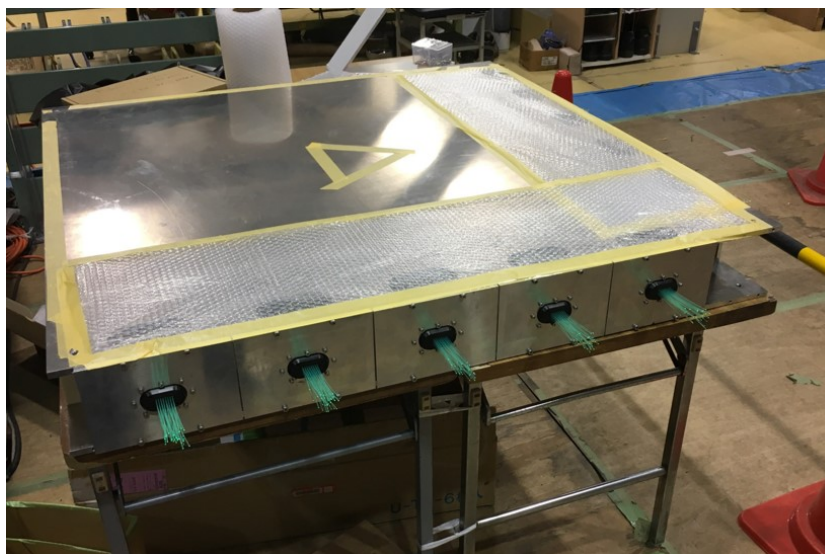


図 2.14 組み上げた 1 Sub-Module の様子

2.1.5 Module 組み立て

Sub-Module が 4 台完成した後でそれらを組み合わせて固定し, 1 つの Module にする (図 2.16) .

それを水タンクに入れて固定する (図 2.17) . 完成したモジュールは NM (ニュートリノモニター) 棟の B2 フロアへとインストールされる (図 2.18) .

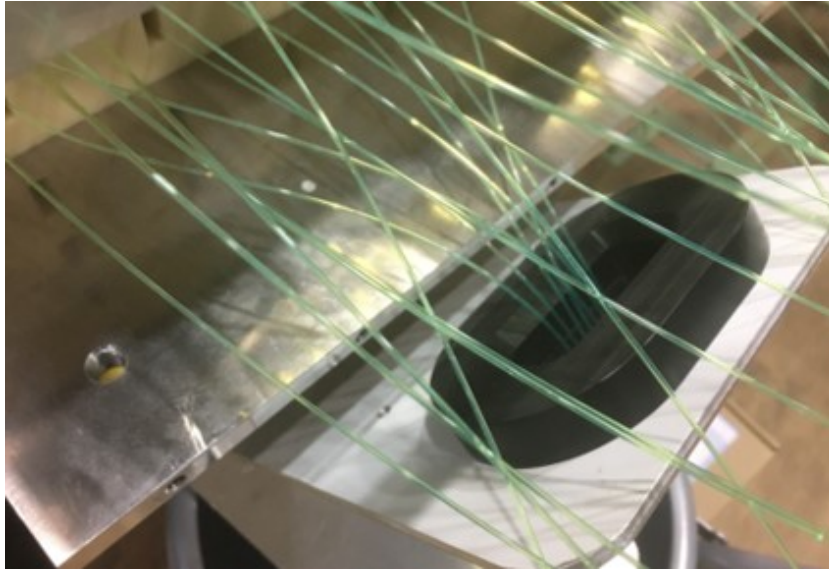


図 2.15 ファイバーバンドルへのファイバー挿入。 オプティカルセメントによって接着される。



図 2.16 Module 組み立ての様子。 Sub-Module を一つずつ接続させていく。 Module 接続完了の様子（右図）

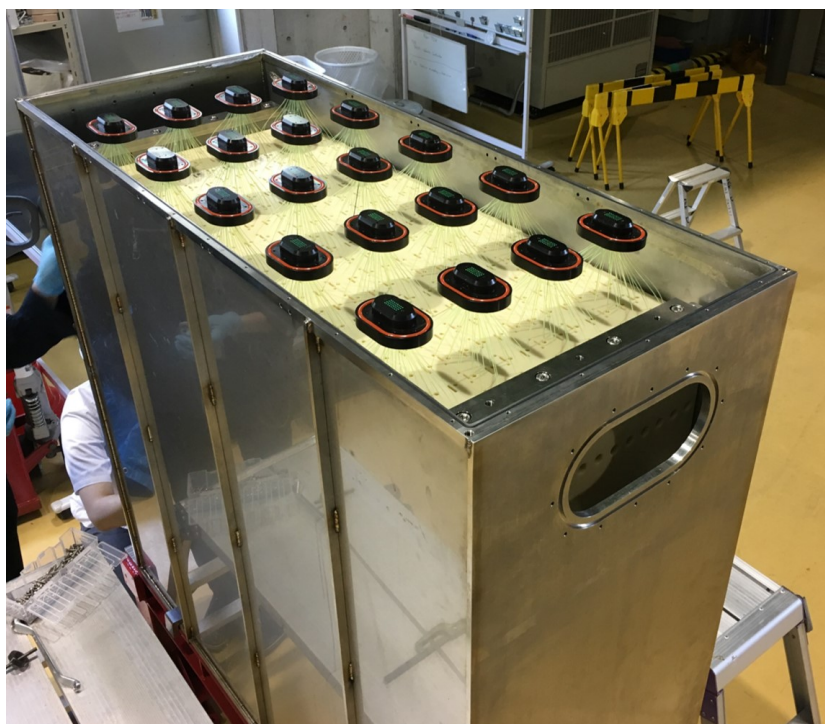


図 2.17 水タンクへの挿入。インストール後は水を入れて水標的とする。ファイバーバンドルに取り付けられている橙色のリングは O リングと呼ばれるもので、バンドルと固定した治具との隙間からの水漏れを防ぐ。

2.2 シンチレータ光量測定

WAGASCI 検出器では、シンチレータの光量はニュートリノ反応検出において重要である。そのため、シンチレータ組み立て前の加工時において光量を予め測定し、光量が十分出ているかを確認する必要がある。我々は全体の約 20% にあたる 300 本をサンプルにして測定を行った。図 2.19 はその結果である。光量の平均値は 17.53 p.e. である。2015 年度に製作された INGRID Water Module の光量は 20.97 p.e. であるため、2 p.e. 程光量が低下したことが分かる。INGRID Water Module はサンプリング測定時に黒塗料塗布が行われていなかった。そのため、この光量の低下は黒塗料塗布による影響だと考えられる(参考 §3.7)。図 2.20 はシンチレータの種類ごとに分けられた光量分布である。その影響を考慮しても、今回のシンチレータの光量は荷電粒子の飛跡再構成には十分な値である。

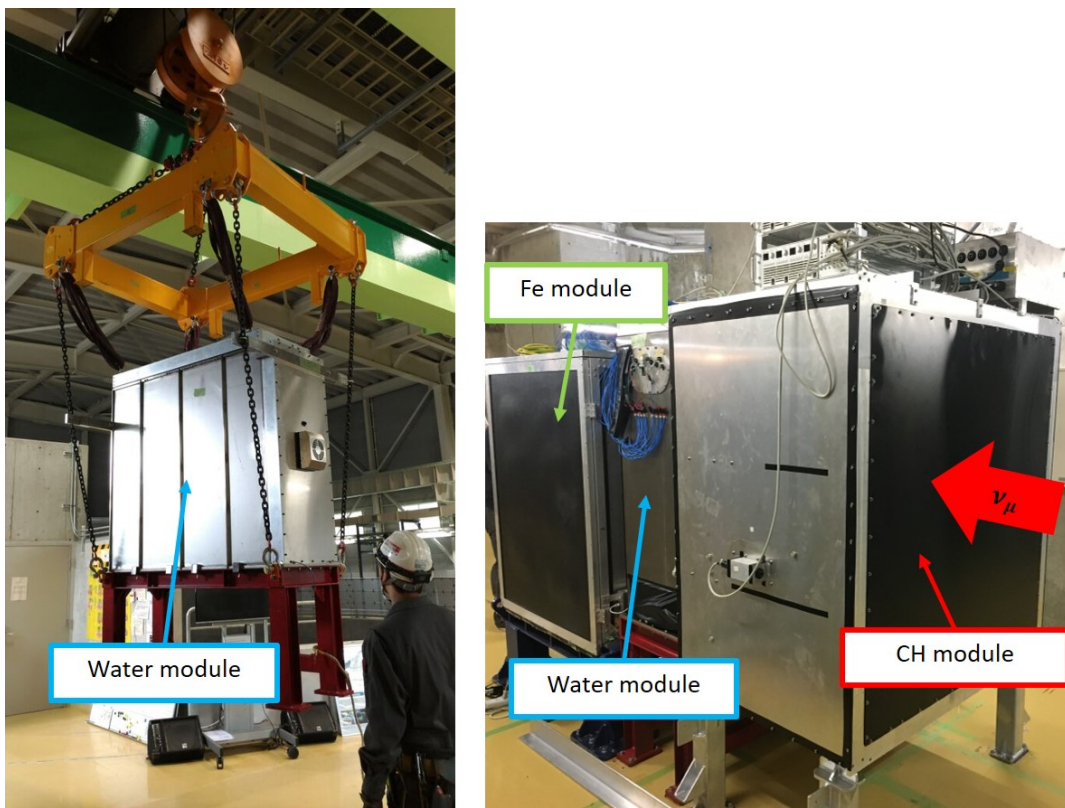


図 2.18 完成したモジュールの移動 (左), B2 へのインストール (右)

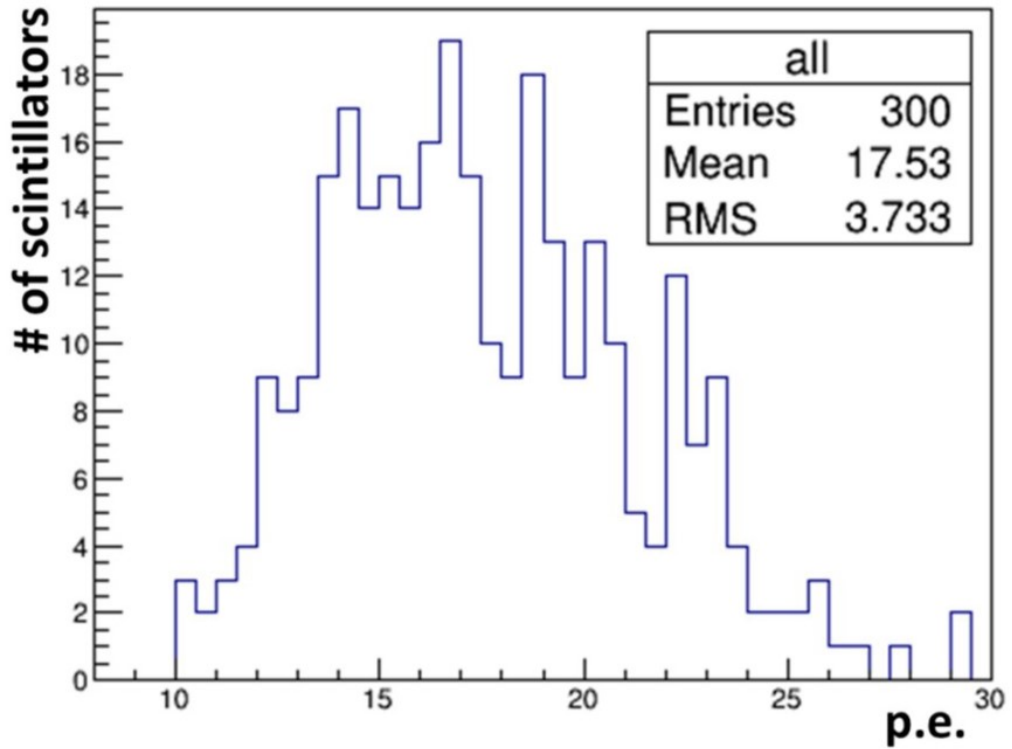


図 2.19 サンプリングによるシンチレータの平均光量 [32]

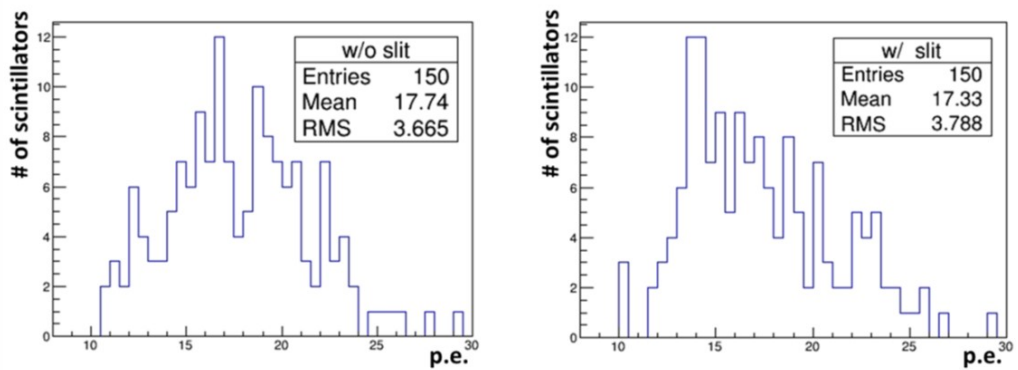


図 2.20 サンプリングによるシンチレータの平均光量. プレーンシンチレータ (左), グリッドシンチレータ (右) [32]

3 黒塗料塗布

3.1 動機

今回製作した水標的 WAGASCI 検出器の前に INGRID Water Module が作られた。INGRID Water Module とは、INGRID と同じくビーム軸上に置かれた WAGASCI 検出器のことを指している。INGRID Water Module の submodule (全体の 1/4 の部分) が宇宙線を用いて試験された。その際のイベントディスプレイでは、光量の大きいヒット (ミューオンのヒット) の周辺に光量の小さいヒット、つまりシンチレータ間のクロストークと思われる事象が確認された (図 3.1)。そこで、小型のモックアップを作成し、宇宙線を用いて試験したところ、隣接するスリット無しシンチレータ間で、光量に対して 6%、格子内で光量に対して 9% のシンチレータ間のクロストークが観測された。そこで、クロストークを抑制するために、シンチレータの表面に黒塗料を塗布する作業が追加された。INGRID Water Module の submodule の組み立てが終了した後でクロストークが存在することが確認されたので、組みあがった状態でシンチレータ全体に対して黒塗料塗布を行っていた。

今回の水標的 WAGASCI 検出器の製作においても同様の塗料で塗布を行った。前回と異なる点は、submodule まで組み上げてから塗布を行うのではなく、あらかじめ、シンチレータ一本一本を塗布しておく方法を取るところにある。そのため、新たな塗布方法を確立する必要がある。

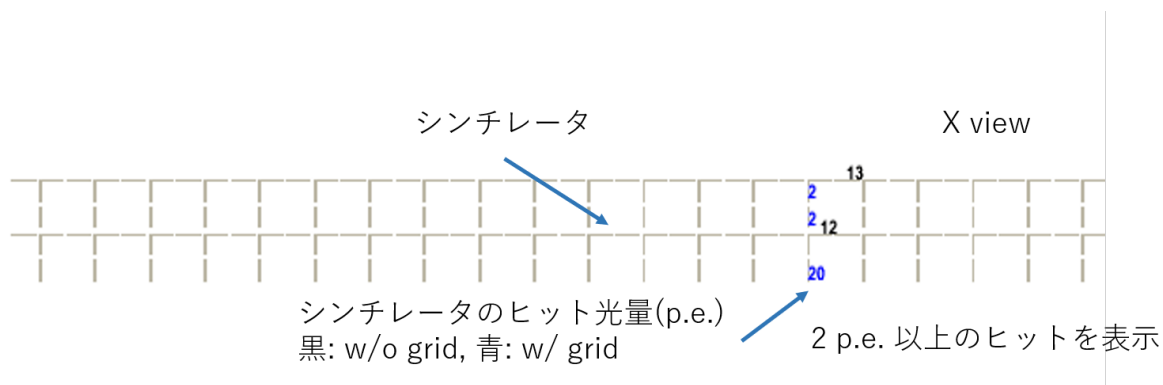


図 3.1 1 sub-module でのイベントディスプレイ 光量の大きいヒットのまわりに小さい光量のヒットが見える

3.2 塗料の選定

INGRID Water Module への黒塗料塗布に使用する塗料選定の経緯について簡単に述べる。WAGASCI 検出器は水を注入して水標的として用いられるため、シンチレータに対する水中での塗料定着度の安定性が要求され、塗布されたシンチレータの平均光量の安定性も要求された。恒温槽を用いて 50°C の環境で二週間の熱浴試験が行われた (反応を促進させるため)。使用候補塗料の

種類は

- 水性アクリル塗料
- 水性アクリルラッカー塗料
- 水性アクリルシリコン塗料

である。

目視による確認の結果、塗料が剥がれなかったのは「水性シリコン塗料」であった。そのため黒塗料塗布にはカンペハピオの「水性シリコンカラー Sprey つや消しブラック」が使用されることに決定した。水性アクリル塗料では、塗料の剥がれが見られ、水性アクリルラッカー塗料は表面を拭くと塗料の移りが見られたからである。シリコンカラー Sprey 塗布時におけるシンチレータの平均光量の安定性を示したグラフは図 3.2 である。

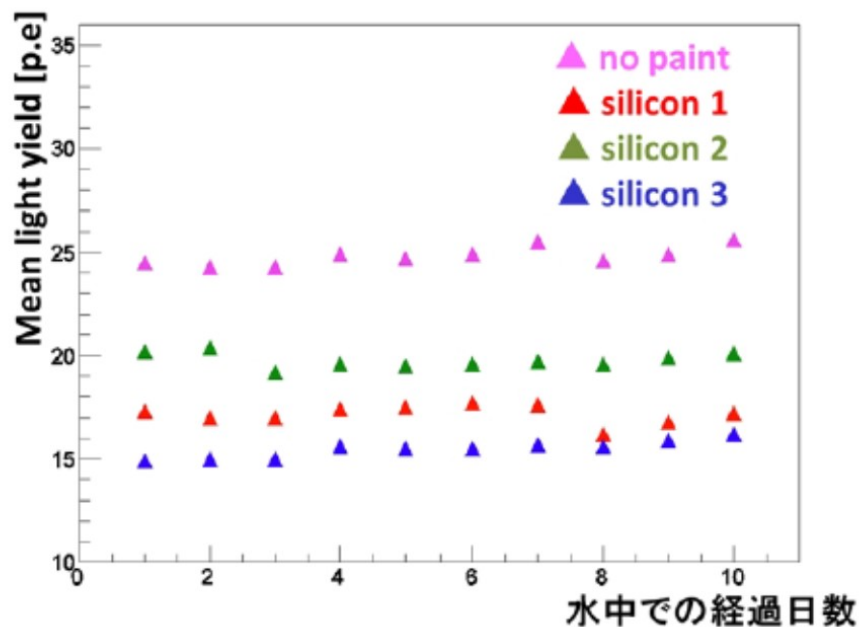


図 3.2 塗布によるシンチレータの平均光量の安定性. 図中の「silicon1, 2, 3」はそれぞれ種類の異なる塗料が塗布されている時の平均光量, 「no paint」は黒塗料が塗布されていない時の光量を表している. このグラフから黒塗料が与えるシンチレータの平均光量への影響は少ないと分かる [32].

3.3 水性シリコンカラー Sprey

ここでは使用する塗料に関する詳細な情報と特徴について述べていく。水性シリコンカラー Sprey の詳細は図 3.3, 表 3.1 である。

通常, 水性塗料を塗布する時は複数回にわたり重ね塗りすることが推奨されている。そうするこ



図 3.3 水性シリコンカラーズプレー つや消しブラック

表 3.1: 使用塗料の詳細

製品名	水性シリコンカラーズプレー つや消しブラック
容量	300 ml
乾燥時間	指触乾燥:約 30 分, 完全乾燥:約 2 時間 (気温 20°C)
塗り面積 (二度塗り時)	0.6~1.0 m ²

とで塗りムラなくできるだけ均等に塗布できるからである。シンチレータ間のクロストークを抑制するために、均等にムラ無く塗布する必要がある。

表 3.1 にある完全乾燥とは、塗膜が完全に乾燥するまでの時間で、指触乾燥とは、塗膜表面が乾き触っても塗料が手に付かなくなるまでの時間のことを言う。これらは全て通常の塗り方（膜厚 9 ~12 μ m）での時間である。塗り方により塗膜を厚くした時、指触乾燥時間は変わらないが、完全乾燥時間は延びる。その場合、塗り重ね間隔を長くする必要がある。また、完全乾燥前に重ね塗りをすると塗膜に皺が出来たり完全乾燥に時間を要するようになる。このため、塗料を塗り重ねる場合は最低でも 2 時間は待つ必要があり、実際の作業時にはこの間隔で重ね塗りを行った。

3.3.1 含有成分と内容量

水性シリコンカラスプレーの成分、管理濃度*⁶，許容濃度*⁷ は表 3.2，塗料の内分量は表 3.3 である [39].

表 3.2: 水性シリコンカラスプレー（つや消しブラック）の成分表

成分名	CAS No.* ⁸	分類	含有量 [重量 %]	管理濃度	許容濃度
カーボンブラック	1333-86-4	発がん性物質	0.8		3.5 mg/m ³
エチレングリコールモノブチルエーテル	117-76-2	-	6	25 ppm	20 ppm
エチレングリコールモノターシャリブチルエーテル	7580-85-0	-	8		
イソプロピルアルコール	47-63-0	-	3	400 ppm	200 ppm
キシレン	1330-20-7	PRTR 第 1 種* ⁹ (1% 未満通知不要)	0.2	50 ppm	100 ppm
エチルベンゼン	100-41-4	PRTR 第 1 種 (1% 未満通知不要)	0.2	20 ppm	100 ppm
アンモニア水	1336-21-6	-	0.5		25(NH ₃) ppm
フタル酸ジ-ノルマルブチル	84-74-2	PRTR 第 1 種 (1% 未満通知不要)	0.5		5 mg/m ³
ジメチルエーテル	115-10-6	-	61		

表 3.3: 使用塗料の詳細

色名	密度 (g/cm ³)(比重)		引火点 (°C)
	混合物	塗料/噴射剤	塗料/噴射剤
つや消しブラック	0.79	1.04/0.66	41.0/-41

これより，使用塗料に含まれる主な有機溶剤は「イソプロピルアルコール」，「エチレングリコールモノブチルエーテル」，「エチレングリコールモノターシャリブチルエーテル」，噴射剤は「ジメチルエーテル」である．このように，噴射剤や塗料には有機ガスが多数含まれているので，密閉した空間（今回の場合はビニールハウス内）で作業を行う際には作業者に対する十分な安全対策が必要になる．

*⁶ 有害物質に関する作業環境の状態を評価するために，作業環境測定の結果から作業環境管理の良否を判断する際の管理区分を決定するための指標 [37]

*⁷ 作業環境許容濃度:TLV (Threshold Limit Value) とも呼ぶ. TLV は，ほとんどすべての作業者が毎日繰り返し暴露しても，有害な影響が現れないと考えられる化学物質の気中濃度のことである [38].

*⁸ 個々の化学物質を同定するための番号.Chemical Abstracts Service が管理している [36].

*⁹ Pollutant Release and Transfer Register の略称. 有害な化学物質がどれだけ排出されているかが公表される [40].

3.3.2 塗料の管理

黒塗料塗布作業を含む建設作業は全て、茨城県東海村 J-PARC 内の NA (Neutrino Assembly) 棟で行っている。使用する塗料は化学薬品の部類に当たるので、化学薬品取扱いに関する J-PARC の規則に従う必要がある。

使用予定の黒塗料を保管場所に置いておく場合、図 3.4 のような管理表に使用量・残量・入手量を記入しておく。

図 3.4 化学薬品等管理表. 使用する化学薬品 (この場合は黒塗料) をこの表に記入する。

また、使用後のスプレー缶は通常のスプレー缶の廃棄法と同じく、残存しているガス・塗料を排出して底に穴を空けておく。そのスプレー缶は年二回の一般安全セクション側で行われる廃薬品等回収時に廃棄する。

3.3.3 水性塗料の特徴

使用した塗料は水性塗料である。ここでは水性塗料の特徴について述べる。

塗料は塗装されることで塗膜を形成する。水性塗料において、樹脂を溶かしている溶剤の主成分は水（揮発性有機化合物も少量含まれる）であり、塗料が塗布されると溶剤が空気中へと蒸発して樹脂が定着し、溶剤が蒸発した後の塗膜は水に強くなる。完全に乾燥していない時に水に濡れると塗料が流れてしまうため、乾燥時間が非常に重要である [41]。

3.4 黒塗料塗布作業

以下では黒塗料塗布作業に使用した備品や実際の作業場所について述べる。

3.4.1 作業環境

ビニールハウス内に机を 4 台設置し、その上にシンチレータを 23 本/1 台ずつ配置して黒塗料塗布を行う (図 3.5)。換気のために送風機を 2 台机の下に設置した。作業場所の外観は 図 3.6、内部

は 図 3.7 である。

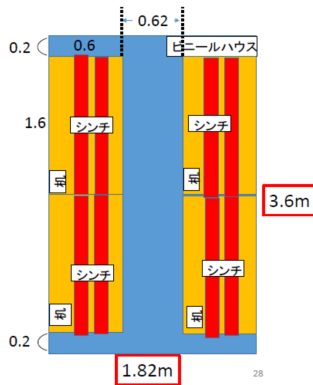


図 3.5 作業場所内の配置



図 3.6 作業場所全体



図 3.7 作業場所内部

3.4.2 準備物

以下、備品の詳細を説明する。

ビニールハウス

グリーンハウス NH-20D 型 (表 3.4) を使用し、他作業場所や作業者への黒塗料による暴露を防ぐ (図 3.8) [42].

表 3.4: ビニールハウス サイズ

型式	間口 [cm]	高さ [cm]	奥行 [cm]
NH-20D 型	182	202	360

電気送風機・ダクト

ビニールハウス内の換気のために電気送風機を使用する (図 3.9). 仕様は表 3.5 である [43].

表 3.5: 電気送風機 仕様

	MJPBS-300
電源	AC100 V
周波数	50/60 Hz
消費電力	320/520 W
回転数	2800/3300 rpm
風量	64/77 m ³ /min
風圧	367/440 Pa
送風機最大口径	350 mm
本体重量	11.0 kg



図 3.8 ビニールハウス



図 3.9 電気送風機

電気送風機によって取り出されたビニールハウス内の空気を，作業場所外へ排出するためにフレキシブルダクト (表 3.6)[44] を使用する (図 3.10, 概略 図 3.11). 電気送風機との接続は，フレキシブルダクトに付属してあるひもを用いて固定する.



図 3.10 フレキシブルダクト

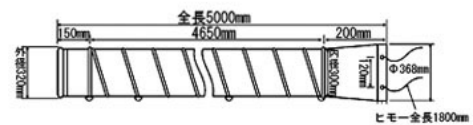


図 3.11 フレキシブルダクト 概略

表 3.6: フレキシブルダクト 仕様

	フレキシブルダクト
取付径	340 mm
長さ	5 m
ピッチ	150 mm
ひも長	1800 mm

防毒マスク・吸収缶

黒塗料塗布作業に伴って，作業者に対する保護を目的として有機ガス用のマスクを用意する必要がある．マスクは重松製作所の防毒マスク GM31 を使用し (図 3.12)[45]，それに取り付ける吸収缶は CA-1P1/OV(図 3.13)[46] である．

吸収缶の内部にある活性炭によって有機ガス等の粒子状の物質を取り除き，装着者が吸う空気を浄化する (物理吸着)．物理吸着とは吸収缶の除毒原理の一つを指す．活性炭には微細な穴 (細孔) が多数存在するため，表面積が大きくなる (1 g 当たり 800~2,000 m³ 程)．また活性炭表面には引力 (ファンデルワールス力) が生じており，気体中の分子が引きつけられて，吸着されて細孔に保持される [48]．

吸収缶の除毒能力 (有効時間) には限りがある．吸収缶を使用し続けると吸収缶内の吸着剤 (活性炭) が飽和してしまい，気体分子が吸着されずにそのまま通過してしまう．この状態を破過といい，吸収缶が破過するまでの時間を破過時間と呼ぶ [48]．この破過という状態があるために，吸収缶の交換が必須となっている．使用した吸収缶の破過に関する情報や，その



図 3.12 防毒マスク



図 3.13 吸収缶

他仕様について表 3.7 にまとめた [48]. 吸収缶のパッケージに記載された破過曲線（横軸:破過時間と縦軸:気体濃度の関係）と、カタログに記載されたものをまとめている.

表 3.7: 防毒マスクの吸収缶仕様

品番	CA-1P1/OV(有機ガス用)
耐湿性	吸湿すると能力が減退する
試験ガス	シクロヘキサン
最高許容透過濃度*10	5 ppm*11
試験濃度	200 ppm
試験温度・湿度	20°C, 50%
試験流量	30 L/min
破過時間*12	150 分

つまり、破過時間を越える前に吸収缶を交換する必要がある。我々はこのシクロヘキサンにおける破過時間を目安に、実際の塗布作業において 150 分経過した吸収缶は廃棄した。

使用済みの防毒マスク用の吸収缶は防毒マスクから取り外し、黒塗料スプレー缶と同じように年二回の一般安全セクション側で行われる廃薬品等回収時に出すことで廃棄する。

3.4.3 方法

今回作成する水標的 WAGASCI 検出器にはシンチレータを予備も含めて約 1500 本程加工する。シンチレータは一度の作業で 92 本塗布する (図 3.14)。ここでは塗布方法の詳細を述べる。塗布は

*10 吸収缶に試験ガス含有空気を通した場合、吸収缶を通過した空気中の試験ガスの濃度が破過と判定されない最高の濃度 [48].

*11 parts per million の略. (参考) 0.1% = 1000ppm

*12 この表で言う破過の定義は、「防毒マスクの吸収缶に有毒ガスを通気した際、透過側から最高許容透過濃度を超える有毒ガスが漏出する現象」を言う。

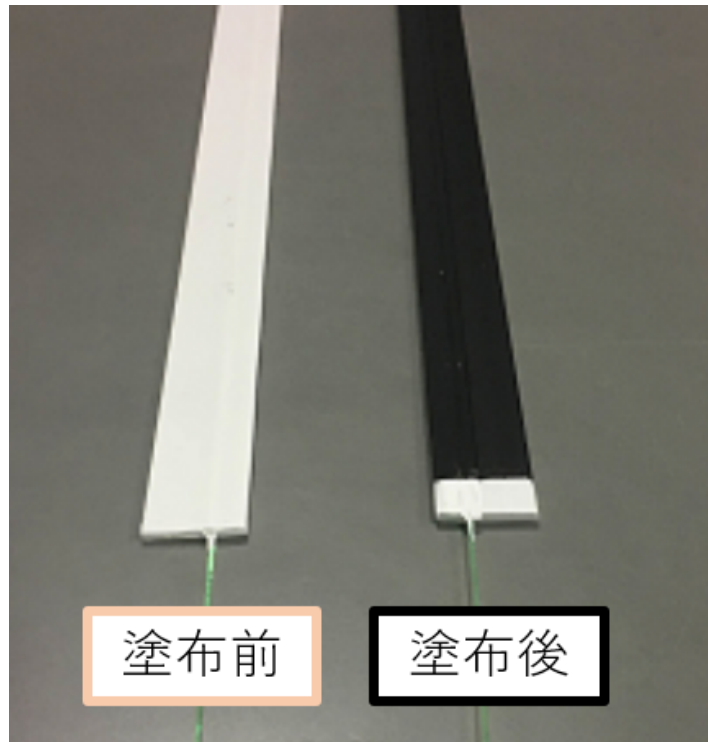


図 3.14 黒塗料塗布前と後でのシンチレータの様子

以下の流れで行った.

1. 波長変換ファイバーが接着され、反射材も塗布されたシンチレータ 92 本を乾燥棚からビニールハウス内の机に移動させ、23 本ずつ配置する (図 3.15) .
2. シンチレータの識別番号をつける (図 3.16).
3. ファイバーに黒塗料が付着するのを防ぐために保護する (図 3.17).
4. 送風機を動作させて、スプレーに含まれる有機ガスの吸入を防ぐために防毒マスクを装着する. また、目に直接塗料が入らないようにゴーグルも装着する (図 3.18).
作業者の体への塗料の暴露防止のため作業服と作業靴、そしてゴム手袋を装着しているかを確認する (図 3.19).
5. スプレーを使用し表裏二度塗りを行う (図 3.20).

手順 5. シンチレータへの塗布方法に関して以下でさらに詳細に述べる. 塗布後の乾燥時間の目安は 2 時間である. シンチレータを裏返す必要があるため、特に表側の乾燥時間は十分に確保する. 順序としては、表 (1) → 表 (2) → 裏 (1) → 裏 (2) となる. 裏 (1) → 裏 (2) は 30 分～1 時間程乾燥させてから二度塗りを行う (裏返す必要は無く、その後は次の日まで放置して乾燥可能であるため). 送風機は塗布作業中、常時動作させておく.

一度の塗布で 6～7 秒かけてシンチレータの端から端へスプレーを噴射する. その際、二本同時に塗布する. 実際の塗布は図 3.21 のように行う. 黒塗料の塗布試験時にスプレーの噴射時間・噴射口



図 3.15 シンチレータの机への配置



図 3.16 シンチレータの識別番号



図 3.17 ファイバーの保護. ラップを用いて黒塗料の付着を防ぐ.

の角度とシンチレータまでの距離等の最適化を行った. その結果, シンチレータに対してできる限り均一な塗布を行うために以下の点に注意した (参照 図 3.21).

- 一回の噴射で 6~7 秒かけて塗布を行う.
- スプレーの噴射口は水平から 30°~50° 上げる.
- 噴射口の位置は塗布したいシンチレータから 10~15 cm 離す.
- 途中で止まらない (止まると塗りムラができてしまうため).

上記の注意点は全て均一な塗布を目指すためである. 前回の塗布時 (INGRID Water Module への塗布) と同様の塗布量を基準としている.

3.5 作業場所環境問題

黒塗料の暴露を防ぐために, ビニールハウス内で作業を行う. 内部はスプレーから排出される有毒ガスで充満する恐れがあるため, 送風機を使用し換気を行う. このような作業環境でのシンチ

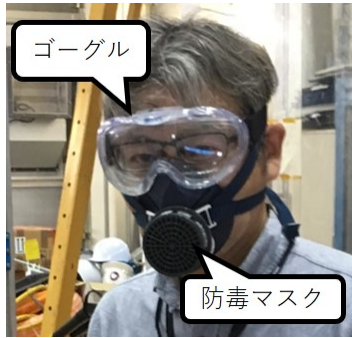


図 3.18 防毒マスクとゴーグルの装着



図 3.19 作業服，作業靴，ゴム手袋の装着



図 3.20 二度塗り後のシンチレータ

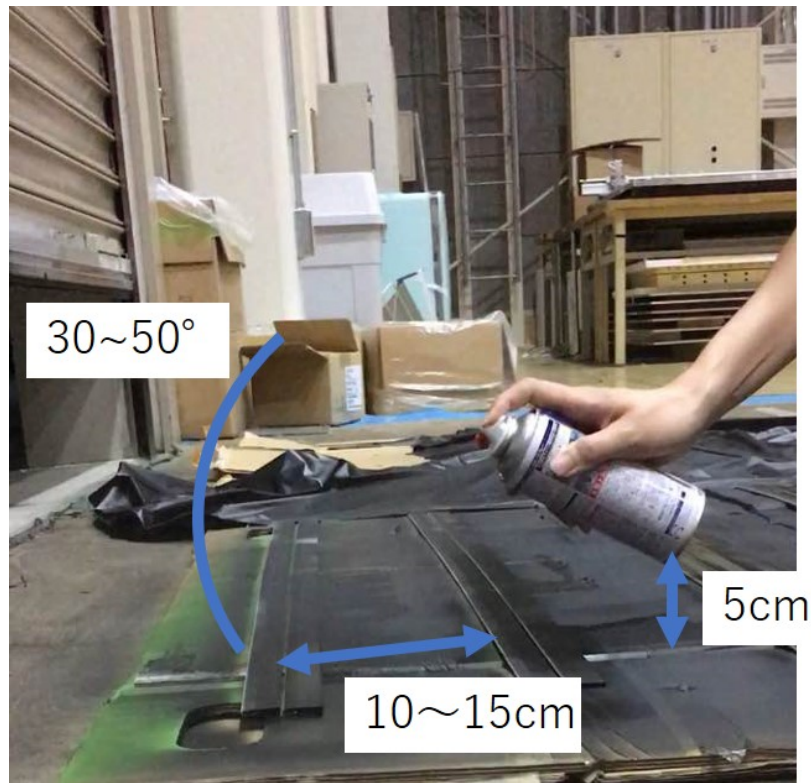


図 3.21 黒塗料塗布方法. 塗布試験時の様子である. スプレーの噴射口の角度を水平にしすぎるとスプレー缶の構造の問題により均一に噴射できなくなるため, 噴射口はできるだけ上げる.

レータに対する黒塗料塗布作業の開始に向けて, J-PARC の一般安全セクション側による確認・調査が行われた. 確認事項は主に以下の二つの点からなる.

- 作業者に対する安全性
- 作業場所・周囲環境に対する安全性

これらのような確認が行われた結果, 一般安全セクション側から作業場所の環境改善が必要という指摘を受け, 一時作業を中断させ環境改善を行った. その経緯や要請, 環境改善の過程を以下で述べる.

3.5.1 作業場所内濃度測定

黒塗料塗布作業を行うにあたって, 一般安全セクション側から指摘を受けた化学物質は以下の成分である.

- イソプロピルアルコール
- エチレングリコールモノブチルエーテル
- キシレン
- エチルベンゼン

それぞれの管理濃度，許容濃度は表 3.2 を参照。

これらの化学物質に対して，一般安全セクションによる作業場所濃度測定が行われた。濃度測定にはガステック社の気体採取器 GV-100 (図 3.23) と，検知管 (図 3.23) が使用された [52]。この濃



図 3.22 使用した気体採取器。この先端に検知管を差し込んで使用する。



図 3.23 使用した検知管 113L

度測定の結果，イソプロピルアルコール (許容濃度:200 ppm) ・エチレングリコールモノブチルエーテル (許容濃度:20 ppm) に関して許容濃度以上の数値が測定された。そのため作業を再開するためには濃度の低減，作業者の安全の確保が必須となる。(最初の一般安全セクション側による濃度測定で用いた検知管は，イソプロピルアルコールとエチレングリコールモノブチルエーテルどちらも反応してしまうものであった。詳細な数値は不明であったが，明らかに許容濃度以上の数値を示していたため，作業中断の運びとなった。)

3.5.2 作業者に対する改善

示された管理濃度に関わらず，有機溶剤は有害であるという認識の下，以下の指摘があった。

- 防毒マスク・ゴーグル等の着用，防毒マスクの吸収缶の交換義務
- 人が作業するエリアの有機ガス濃度低減措置 (排気法の検討)

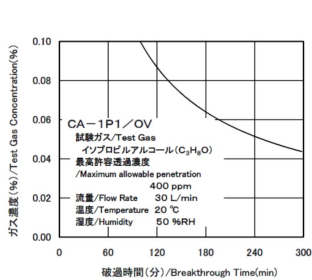
これらに対する改善箇所について以下で述べる。

防毒マスク・ゴーグルに関して

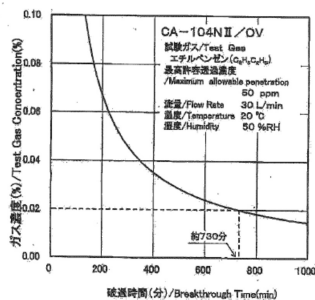
排気が十分に行われたとしても，スプレーから排出されるガスや塗料乾燥時に揮発する有機溶剤は人体には有害である。そのため防毒マスク・ゴーグルを装着することは必須であり，特に防毒マスクの吸収缶に関してはその有効時間を理解しておくことは重要である。以下では一般安全セクション側から指摘を受けた化学物質に関する破過時間について述べる。

吸収缶の各化学物質に対する破過曲線を以下に示す (図 3.24)。エチルベンゼンに関しては企業側にも使用吸収缶に対する破過曲線が無いいため，別の有機ガス用吸収缶 (CA-104N2/OV) の破過曲線を示している。CA-1P1 の破過時間は CA-104N2 の約 0.4 倍に当たる。

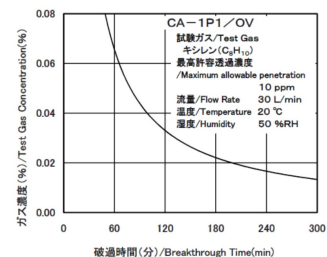
これらの破過曲線から，吸収缶を使用する時間 (150 分) に当たる各化学物質の濃度はイソプロピルアルコールが約 700 ppm，エチルベンゼンは CA-1P1 に換算して約 500 ppm，キシレンは約 300 ppm であることが分かる。これらは各管理濃度よりも十分に低い値であるこ



(a)



(b)



(c)

図 3.24 化学物質に対する破過曲線。(a) イソプロピルアルコール [49], (b) エチルベンゼン [50], (c) キシレン [51]

とが分かるので、管理濃度を越えないような作業環境を整備すれば安全な作業が可能である。

排気法の改善

排気法の検討について、一般安全セクション側からの具体的な要請は以下の通りである。

- ビニールハウス内の空気の流れを考慮し、スプレーが風下、作業者が風上になるような排気をする。
- ビニールハウス内で作業者がスプレーからの暴露を低減できるような対策がとれると良い。

参考として、指摘があった当初のビニールハウス内の排気法は図 3.25 であった。



図 3.25 排気法改善前の様子。吸気用と排気用で電気送風機を使い分けていた。また配置場所は机の下であった。

作業場所環境改善に当たって、有機溶剤を扱う塗装作業における関連法規を参考にした。有

機溶剤中毒予防規則第二章設備の第五条 [53] において

屋内作業場等において第1, 2種の有機溶剤を使用する場合、蒸気の発生源を密閉する設備、局所排気装置又は、プッシュプル型換気装置を設置しなければならない。

とある。黒塗料塗布作業において準備していた機材でも可能と思われるプッシュプル型換気法に近付けるように改善を進めた。プッシュプル換気法とは吸気口（プッシュ）から風を送り、有機溶剤により発生したガスを補足し排気口（プル）へと押し出す方法である。ガスを吸収するだけの局所排気装置と比べて広範囲の発散源を捕捉することができ、さらに局所排気装置より少ない風量で換気可能である。対象となる作業場の空間を仕切り等によって囲うことなく換気できるので、作業スペースを有効に使い、作業者に対しても開放感があり、作業性を損なわない [55]。プッシュプル換気法における制御風速は 0.2 m/s である [54]。

改善内容は以下の通りである。電気送風機を机の下から机の上に置き直し (図 3.26)、電気送風機とは反対側に位置するビニールハウス部分に穴を開けた (図 3.27)。電気送風機は一定の風量でビニールハウス内の空気を吸気し、ダクトを通じて作業場所外へ排出されるため、ビニールハウス内の気圧は減少する。気圧の減少に伴い、新たに開けた穴から空気がビニールハウス内に取り込まれるので空気の流れが生まれる。これにより、塗布部分に滞留する有機ガスを効率良く排気することができる。

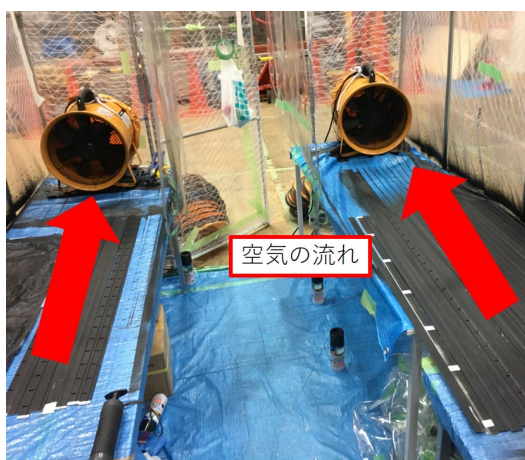


図 3.26 電気送風機の配置変更。以前は机の下に配置していたが、机の上に変更した。



図 3.27 新たな吸気口の様子。シンチレータを配置する直線上に空気の流れができるように穴を開けた。

また、作業者の塗料による暴露を防ぐために塗布対象と作業者との間にカーテンを作成した (図 3.28)。作業性向上のため、塗布対象側に手を入れてスプレーによる塗布が出来るように机から 30 cm 程空間を空けてカーテンを設置した。

このように、作業者に対する十分な改善が実現したため作業場所内の諸測定を再び実施した。この測定結果は §3.6 に示している。



図 3.28 ビニールハウス内のカーテン

3.5.3 周辺環境に対する改善

周辺環境に対して以下の指摘や要請を受けた。

- 排気ダクト位置が搬入口シャッターの建物出入口に近い側になっている
- 有機溶剤は可燃性であることに注意し，火器や電気接点に注意する
- 作業後（4 回目の塗布後）にすぐに送風機を消して作業終了してビニールハウス内の濃度が十分下がるのか疑問

これらの改善箇所について述べる。

排気ダクト位置の変更

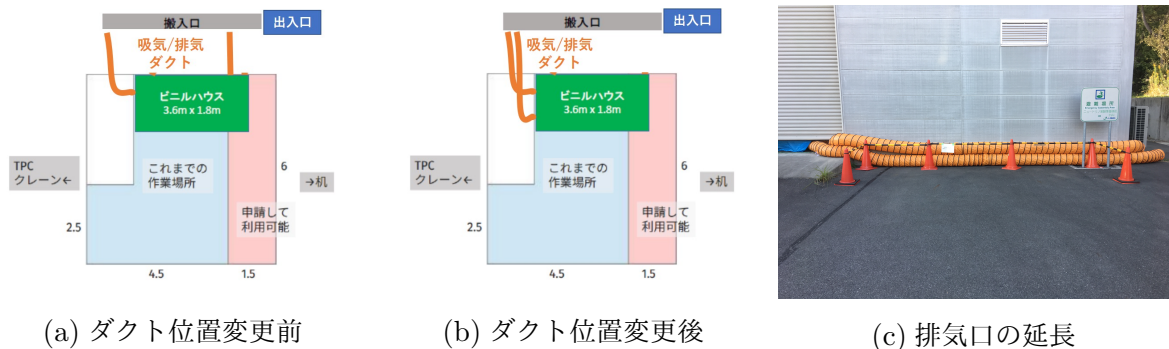
排気ダクトを出入口から遠ざけるために図 3.29(b) のように改善を行った。これにより，作業場所へ出入りする者への暴露を防ぐことができる。また，ダクトを 3 つ連結させて屋外へ延長させることで付近にいる人々への影響を少なくした (図 3.29(c))。

電気送風機の風速がダクトを延長したことでどのくらい減少しているのかを調べるために，吸気口と排出口の風速を測定した。減少の割合は式 17 とする。

$$\text{減少率 [\%]} = \frac{v_{\text{排出口}}}{v_{\text{吸気口}}} \times 100 \quad (17)$$

使用した風速計は一般安全セクション側からお借りしたクリモマスター風速計 (MODEL6531) である (図 3.30)。

二つの電気送風機の吸気口 (ビニールハウス内) と，排気口から排出される空気の平均風速



(a) ダクト位置変更前

(b) ダクト位置変更後

(c) 排気口の延長

図 3.29 ダクトの位置変更



図 3.30 使用した風速計



図 3.31 風速測定. 排気口側の様子

を測定する (図 3.31). 風速計のサンプリングタイム:1 s, サンプル数 60 で測定を行った. 測定結果は以下である (表 3.8). これより, 減少率は電気送風機 1 が 51.8%, 電気送風機 2 が 57.5% である. 風速は大きく下がっているが, 排気には十分な値である.

表 3.8: 風速測定 結果

電気送風機	$v_{\text{吸気口}} [\text{m/s}]$	$v_{\text{排出口}} [\text{m/s}]$
1	7.47	3.87
2	7.98	4.59

有機ガスの引火防止への配慮等

作業者は静電気防止のために作業靴を履き (図 3.32), 電気送風機の電源は全てビニールハ

ウス外で取り付けを行っている (図 3.33(b)).



図 3.32 作業靴



図 3.33 電源関係. 漏水した場合に電源タップが水没しないように少し上に取り付けている.

作業後の有機ガス濃度に関して

3.5.2 節に記載した換気法の改善により、作業後のガス濃度に関して問題のない値にまで下がった。そのため、作業後は換気のため 10 分程送風機を運転させた後に電源を切ったとしても作業場所内外に対して問題がないことが確認できた。濃度測定結果は以下 §3.6 で示す。

3.6 環境改善結果

環境改善後に作業場所内の有機ガス濃度測定、風速測定を行った。

3.6.1 作業場所内の濃度測定結果

新たに必要になった検知管を購入し、作業場所内における各有機ガス濃度を測定した。測定に用いた検知管は表 3.9 にまとめた。濃度測定において重要なのは作業員付近の値であるので、作業員の顔の高さ (約 1.5~1.7 m) で測定を実施した。測定結果は以下の通りである (表 3.10)。全てにおいて許容濃度以下であることが確認出来た。この結果より、作業場所内の改善によって適切な換気法が実施されていることが確認できた。

3.6.2 作業場所内の風速測定

作業場所内での風速測定は 図 3.35 の箇所で行った。シンチレータが配置されている机上から 10~15 cm 垂直に離れた場所で、風速計はサンプリングタイム 1 s、サンプル数 60 で測定を実施した。参考として室内の風速は 0.05 m/s であり、プッシュプル法の制御風速は捕捉面 (塗布対象付近) において 0.2 m/s である。測定結果は以下の通りである (表 3.11) この結果より、作業場所内



図 3.34 気体検知管 キシレン用とエチルベンゼン用.

表 3.9: 測定に用いた気体検知管

測定対象	使用検知管番号 (ガステック)
イソプロピルアルコール	113L
エチレングリコールモノブチルエーテル	113LL
エチルベンゼン	122L
キシレン	123L

表 3.10: 濃度測定結果 全てにおいて許容濃度・管理濃度以下である.

測定対象	測定状況		
	作業側 (塗布中)	塗布対象側 (塗布中)	送風機 OFF 時の机上 (塗布終了 5 分後)
イソプロピルアルコール	20 ppm 以下 (未検出)	20 ppm 以下 (未検出)	20 ppm 以下 (未検出)
エチレングリコールモノブチルエーテル	20 ppm 以下 (未検出)	20 ppm 以下 (未検出)	20 ppm 以下 (未検出)
エチルベンゼン	2 ppm 以下 (未検出)	2 ppm 以下 (未検出)	2 ppm 以下 (未検出)
キシレン	2 ppm 以下 (未検出)	2 ppm 以下 (未検出)	2 ppm 以下 (未検出)

の改善によって適切な換気法が実施されていることが確認できた.

3.7 黒塗料塗布の評価

3.7.1 光量測定

黒塗料塗布が本当に妥当なものだったのかを調べるために塗布前後の宇宙線を用いた光量の比較を行った. 図 3.36 はその結果であり, 塗布後は塗布前より光量が 2 p.e. 程減少していることが分かる. クロストークによる影響が軽減されたと考えられ, 今回の黒塗料塗布がクロストークを効果的に抑えられていることが分かる.

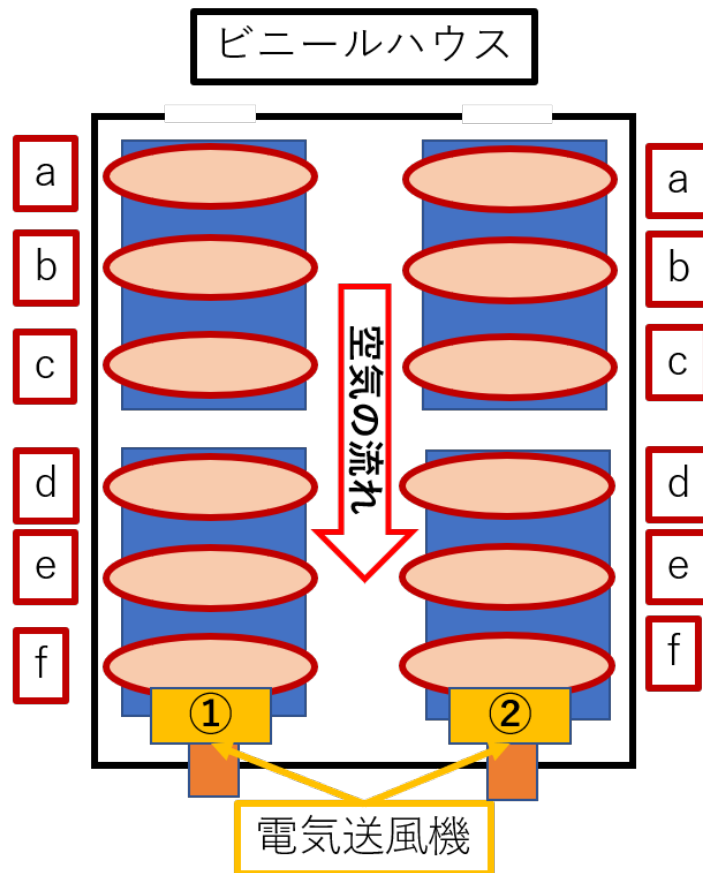


図 3.35 ビニールハウス内の風速測定場所

表 3.11: 風速測定 結果

測定箇所 (図 3.35)	風速 [m/s]	
	電気送風機 1 側	電気送風機 2 側
a	0.93	1.22
b	0.69	1.69
c	1.45	2.03
d	1.03	1.84
e	1.14	1.49
f	3.23	2.94

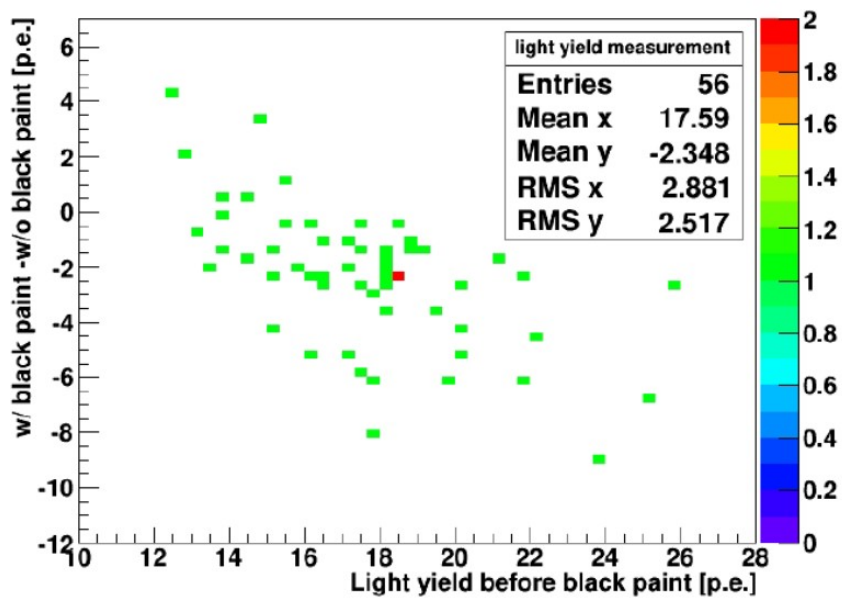


図 3.36 黒塗料塗布前後におけるシンチレータの平均光量の差 [32]。横軸が塗布前の光量で、縦軸が塗布前と塗布後の光量の差を表している。塗布後は塗布前より光量が 2 p.e. 程減少しており、クロストークの影響が軽減されたと考えられる (light yield : 光量)。

4 WAGASCI DAQ の開発

検出器建設と並行して，新たな信号読出しシステム (DAQ : Data acquisition system) の開発も進められている．光検出器としては MPPC を 1280 個用いている．信号を読み出すためのフロントエンドエレクトロニクスとして SPIROC2D (Silicon Photomultiplier Integrated Read-out Chip) と呼ばれる新型 ASIC チップを 40 枚採用する．DAQ に用いられる SPIROC2D やその他のエレクトロニクスはフランスの LLR (Laboratoire Leprince-Ringuet of l'Ecole polytechnique) で開発されている．我々は開発されたエレクトロニクスを用いて WAGASCI 検出器の DAQ を開発している．ここではエレクトロニクスの動作試験に関する結果について報告する．

4.1 WAGASCI DAQ の概要

WAGASCI エレクトロニクスの全容を 図 4.1 に示す．この DAQ システムは ILC (International Linear Collider) 用細分化カロリメータの試作機に用いられたものと同様の方法で開発されている [57]．

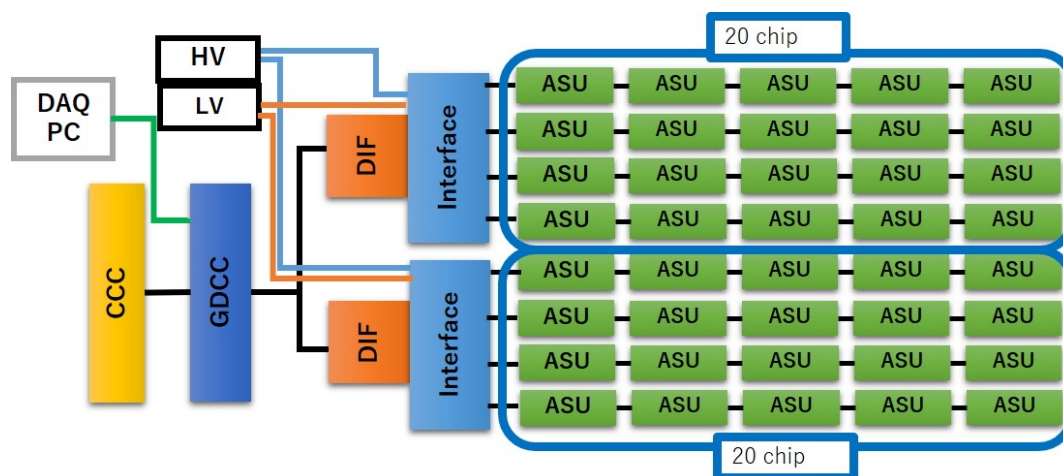


図 4.1 WAGASCI エレクトロニクスの全容

WAGASCI 検出器で用いられるエレクトロニクスボードを以下で説明する．

ASU

Active Sensor Unit の略．ASU には 32 チャンネルのアレイ型 MPPC と SPIROC2D が取り付けられており (図 4.2)，MPPC からの信号を SPIROC2D でデジタル信号に変換し，Interface へと伝える．Interface と ASU とは 50 ピンのコネクタ二つを通して繋げる．

Interface board

Interface は 4 つの ASU，1 つの DIF と繋がっており (図 4.3)，DIF と 4 つの ASU 間で並列に信号を伝達する．Interface から ASU を通して MPPC に電圧を供給し，DIF に備わっ

ている FPGA や SPIROC2D へも電力を供給する役割を持つ。



図 4.2 ASU



図 4.3 Interface

DIF

Detector InterFace の略. DIF は FPGA を持ち, SPIROC を制御する. 内部には 5 MHz の Slow Clock 信号を持ち, コマンドにより DAQ 信号を作成する. DAQ 信号と設定を SPIROC に伝達する. Interface を通して SPIROC からの出力データを受け取る. ファームウェアは GDCC によって制御される (図 4.4).

GDCC

Giga Data Concentrator Card の略. VME*¹³6U 規格で設計されている. DIF とは HDMI ケーブルにより接続される. データ保存・解析のための PC へのデータ転送はイーサネットケーブルを使用している. そのため, GDCC は DIF と PC との信号伝達の中継としての役割を持つ (図 4.5). GDCC は FPGA を内部に持ち, ファームウェアの書き換えによって後述する CCC モードとして利用できる.

CCC

Clock & Control Card の略. CCC はエレクトロニクス全体へのクロック信号 (50 MHz) を生成する. このクロック信号を用いてゲート信号を作成することができる. エレクトロニクス大量試験の測定時にはそれにより作られた, 図 4.6 のような Internal spill と呼ばれる周期的なゲート信号を用いた. またニュートリノビームを用いた測定時には, J-PARC からビームトリガーを受け取りそのタイミングでゲート信号を作成する (図 4.7).

4.2 SPIROC2D

SPIROC [58] は SiPM (Silicon PhotoMultiplier) の読み出しを持つ ILC ハドロンカロリメータのためのフロントエンドエレクトロニクスとして OMEGA により開発された. その要求に応えるため, 広いダイナミックレンジ, 低ノイズ, 低消費電力, そして多チャンネルでの読み出しを可能にしている. 表 4.12 は SPIROC2D の仕様である. ここにある SiGe とはシリコンゲルマニウムを用いた半導体製造過程をとっているという意味である [59]. SPIROC は 36 個のチャンネルを持つ. 一つのチップでアナログ信号をデジタル信号に変換し, 電荷情報や時間情報を保存する 16

*¹³ VersaModule Eurocard の略



図 4.4 DIF

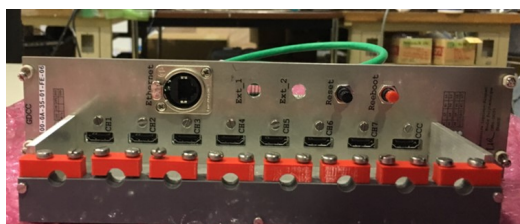


図 4.5 GDCC

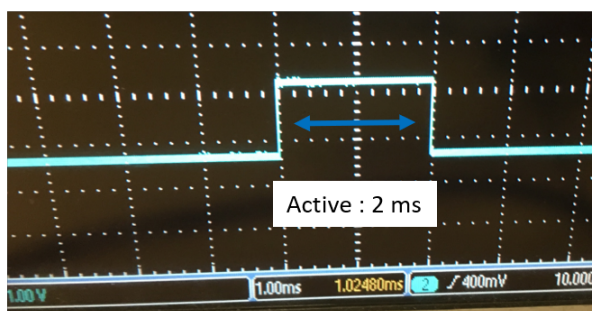
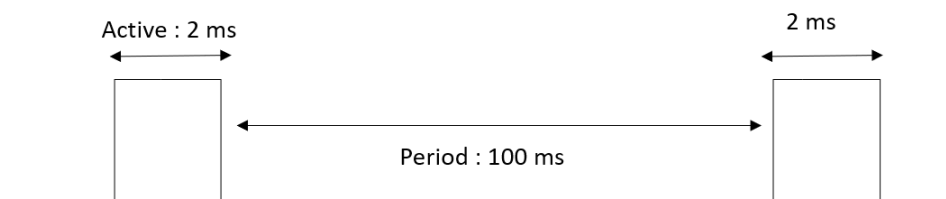


図 4.6 CCC による周期的な信号の例. active : 2 ms, period : 100 ms (10 Hz) の場合の例. 信号の概要 (上図) と実際の信号 (下図). 実際のニュートリノビームを用いた測定における, 検出器のキャリブレーションのときは, active : 5 ms, period : 260 ms の周期的信号を用いている.

個のメモリ (column) を持つ.

SPIROC2D とは SPIROC のバグが改善された新しいバージョンである. SPIROC にはアナログ信号を処理する Analog part と, 主にデジタル信号を扱う Digital part がある.

DIF から送られた設定 (Configuration) を読み込み, 測定に反映させる.

4.2.1 Analog part

MPPC からのアナログ信号を処理するために以下のものが組み込まれている (図 4.8). SPIROC の Analog part には MPPC のチャンネルごとにゲインを調節できるように, 8-bit input DAC による高電圧調節機能が付いており, 0 - 2.5V で調節可能である. 広いダイナミックレンジを可能にするために, High/Low gain 用の増幅率の違う Preamplifier が備え付けられている. さらに,

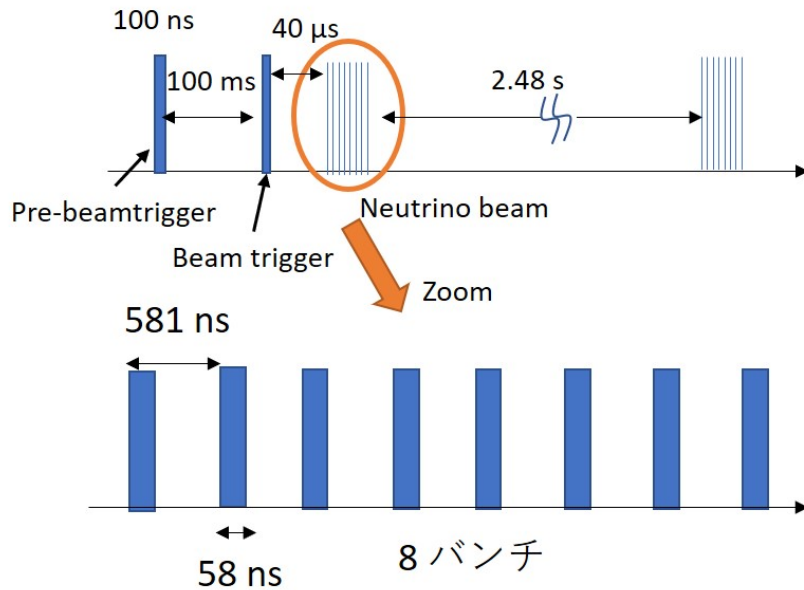


図 4.7 ニュートリノビームトリガーの概要. pre-beamtrigger の 100 ms 後に beamtrigger が到来する. その 40 μs 後にニュートリノビームバンチが来る. このタイミングでゲート信号を開く.

表 4.12: SPIROC2D 仕様

項目	仕様
使用技術	AMS (Austria Micro Systems) 社 SiGe 0.35 μm
大きさ	32 mm ² (4.2 mm × 7.2 mm)
電源	5V / 3.5V
電力消費	25 μW (idle mode 時)
ダイナミックレンジ	1 p.e. - 2000 p.e.
分解能 (TDC)	~100 ps
pe/noise ratio on trigger channel	24
Auto-Trigger	0.5 p.e.

スレシヨルドを越える信号が発生した場合に、遅延のないようにするための Fast Shaper (15 ns) や、トリガーを発生させるための Discriminator がある. Discriminator のスレシヨルドの電圧は 10-bit DAC によって決められる.

また、漏れ無く電荷情報を保存するために、MPPC からの出力がアンプで増幅された後、Slow Shaper と呼ばれる波形生成機を通る (50~100 ns). 電荷情報を保存するための Analog memory には SCA (Switched Capacitor Array) を採用している [60]. その深さは 16 (Column と定義される) であり、コンデンサへの充電によって保存する.

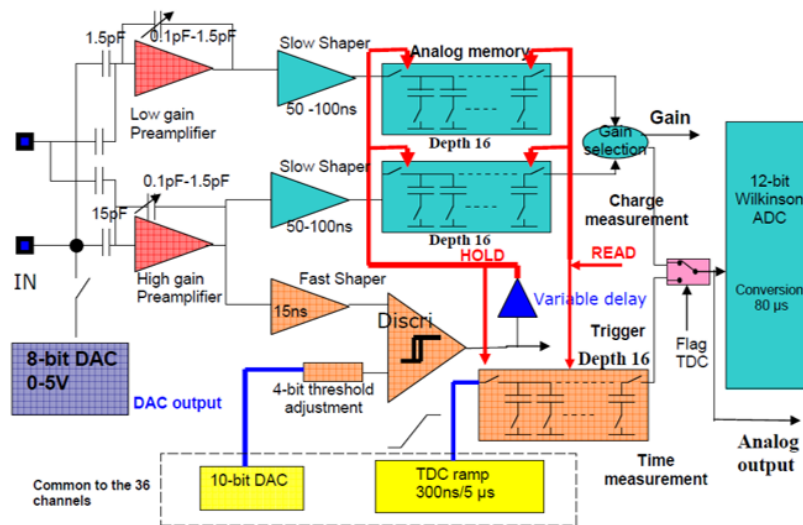


図 4.8 SPIROC Analog part. SPIROC2D 内の 1 ch における概要である [58].

4.2.2 Digital part

Digital part はデータ収集全体を制御したり、Analog part によって保存された信号を処理する部分である。情報の読み出しには以下の段階が存在する。

1. Acquisition phase
2. Conversion phase
3. Readout phase
4. Idle phase

この流れをまとめたものが図 4.9 であり、それぞれの過程における動作は図 4.10 である。

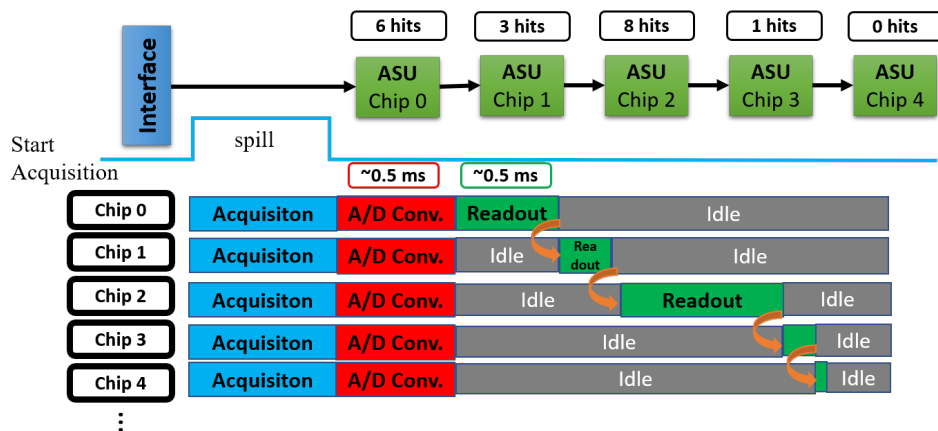


図 4.9 Digital part の実際の流れ

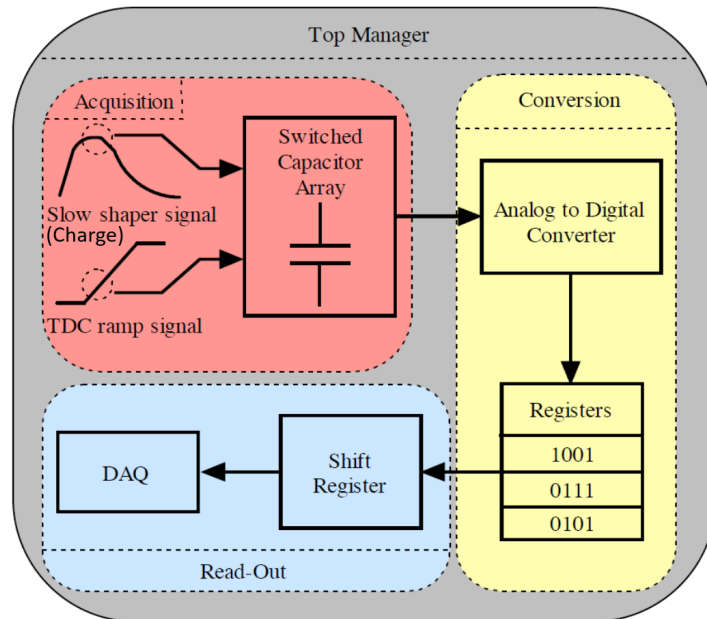


図 4.10 各 Digital part の動作

Acquisition phase

CCC から Start Acquisition コマンドが DIF へ送られ、DIF で Start Acquisition 信号が生成される。その間 Acquisition gate 信号 (Spill 信号と呼ぶ) が続く。同時に”Bunch Crossing”と呼ばれる信号も生成される。これは CCC の 50 MHz のクロック信号を使用して DIF 内の Slow Clock 信号 (2.5 MHz) を用いて 580 ns 周期で作られる。Spill 信号の周期と幅もクロック信号を用いて変更可能である。後述する動作試験には幅 2 ms, 周期 100 ms の Spill を使用した。入力された信号が 10bit DAC により決められた スレシールドを越えるとトリガーが発生し、電荷・時間情報・トリガー発生の有無 (hit) 等をコラムに保存する。信号の保存は”Track and Hold”と言われる手法で行われる。トリガータイミングにおいてアナログ信号の波高を保持し、その電圧値を保存する。Bunch Crossing 信号は BCID (Bunch Crossing IDentification) としてトリガーが発生した時の時間情報を粗く保存する。コラムに保存されると全 ch 同時に次のコラムへと移動する。つまり、1ch でのみトリガーが発生し、その他の ch ではトリガーが発生しなかった場合でも次のコラムに移動することになる。

Conversion phase

保存された 36 ch における各コラムのアナログ信号による情報を ADC によってデジタル値に変換する。ADC は Analog to Digital Converters の略で、アナログ信号の情報をデジタル信号に変換するデバイスである [25]。変換手法によって種類があり、広く使用されるのは逐次比較型であるが、SPIROC2D では電圧-時間変換方式の 12-bit の Wilkinson 型 ADC が使用されている。その手法は以下の通りである。

入力信号の電圧がゲート信号の間でコンデンサを充電する。その後、このコンデンサは一定

の速度で放電し、同時に一定周期のパルス波（Ramp 信号）も発振され Scaler によってその個数を数えられる。放電が終了すると Scaler も停止し、その数はコンデンサの電荷に比例した値を示す。

ADC により変換された情報や BCID, Chip ID 等は 4 kbytes の RAM *¹⁴ ヘアドレスと共に保存される。図 4.11 は実際のマッピングである。全体で 0.5 ms 程で終了する。

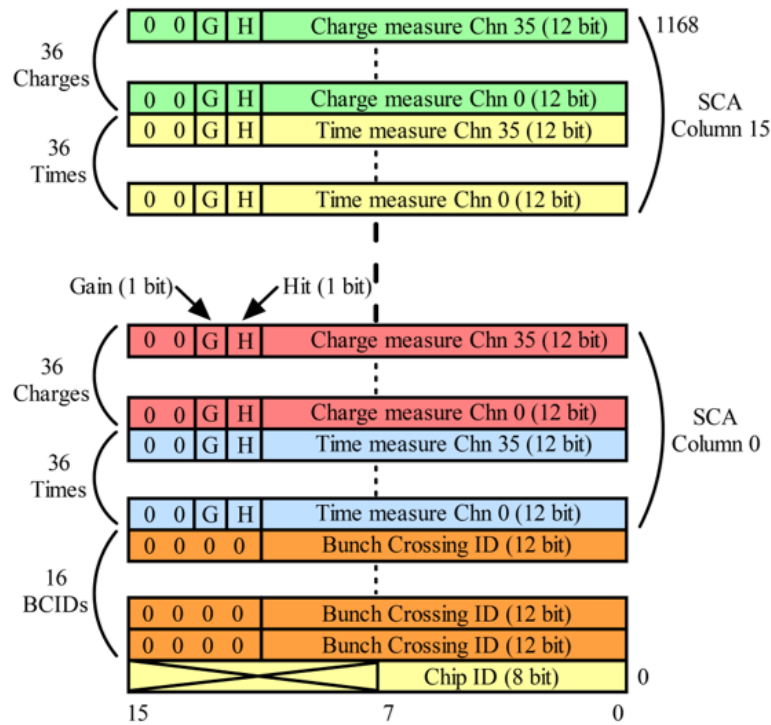


図 4.11 SPIROC における RAM のマッピング

Readout phase

保存されたデータはチップ毎に読み出しが行われる。読み出し時のデータの通路（バス）は全チップにおいて共通なため全チップ同時に読み出すことは不可能である。複数のチップで読み出す時は、デジチェーンによって行う。図 4.12 がデジチェーンによるデータ読み出しの流れである。InterFace ボードには全てのエレクトロニクスが接続されるわけではない。1 枚のチップの読み出しが終わると次のチップへ移る。この方法を用いて 40 枚の読み出しを行う。1 枚のチップの読み出しで最大 4 ms の時間を要する。

Idle phase

動作していない時の省電力モード。Digital part のほとんどがこのモードである。

*¹⁴ Random Access Memory の略称。アドレス信号による番地情報を与えることで、任意の番地に対して読み出しや書き込みを行える記憶装置である。

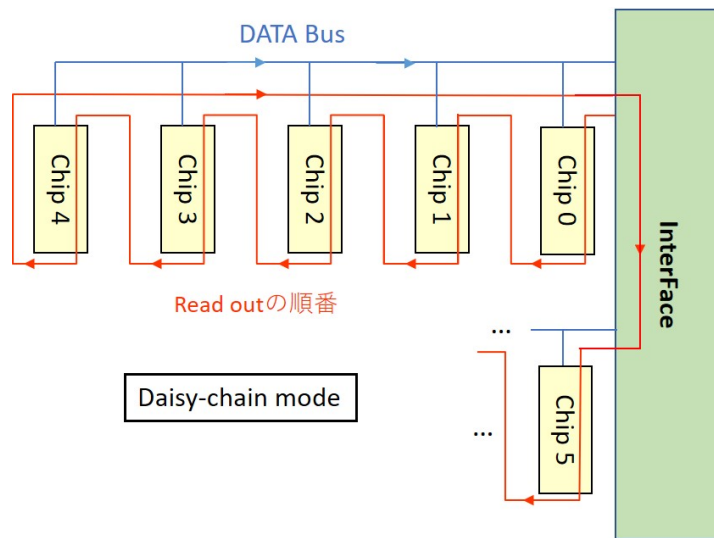


図 4.12 デイジーチェーン接続の様子

4.3 DAQ と SPIROC との信号のやりとり

SPIROC における Digital parts の流れは DAQ PC からの信号によって制御される。DAQ からの信号に対して SPIROC も応答し信号を与える。図 4.13 は 16 個のメモリがすべて使用されている場合、図 4.14 は Acquisition phase 中にメモリが全て使用されなかった場合の信号を表している。DAQ 信号の流れは以下の過程で進む。

1. Start acquisition
Digital part の Acquisition phase がスタートする。
2. Chip saturation
16 個のメモリが全て使用されるとこの信号が発生し、Acquisition が終了し、Conversion が始まる。メモリが全て使用されない場合でも Conversion に移行するために、この信号が 1 中に生成される。
3. Start conversion
Conversion phase をスタートさせる。
4. Start readout.
2 のパルスの終端で Conversion phase が終わり、Readout phase が始まる。
5. End readout
ここで Readout は終了する。

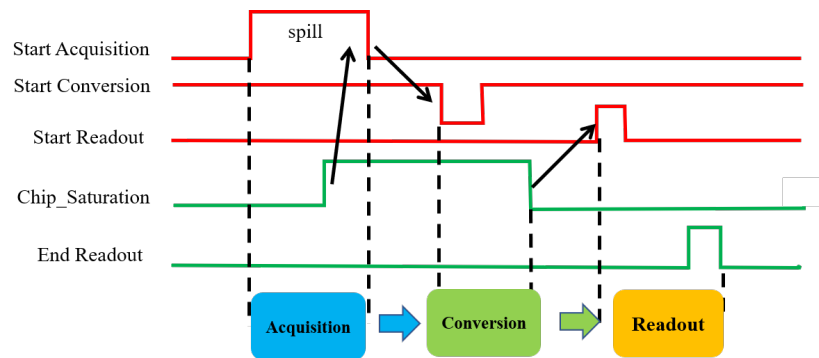


図 4.13 spill の間でメモリが全て埋まる場合. 緑:SPIROC 側からの信号, 赤:DAQ PC 側からの信号.

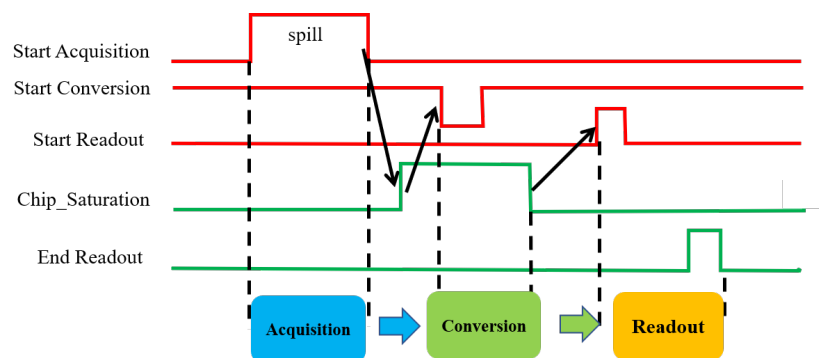


図 4.14 spill の間でメモリが全て埋まらない場合. 緑:SPIROC 側からの信号, 赤:DAQ PC 側からの信号.

4.4 データ解析の流れ

収集したデータの解析の基本的な流れは以下の通りである.

1. 取得したバイナリデータを root ファイルへと変換する
2. root ファイル内の tree 情報を元にヒストグラムを生成
3. 作成したヒストグラムを用いて, 必要となる基本情報をチャンネルごとにまとめる.
4. チャンネルごとにまとめた情報をチップ単位でまとめ直す.

MPPC のキャリブレーションや検出器の動作確認には手順 4. によって生成された情報を用いる.

4.5 エレクトロニクスボード大量試験

WAGASCI 検出器に取り付ける前に使用予定のエレクトロニクスボードの動作試験をする必要がある. 試験において主に以下の測定を行った.

- ペDESTALの個体差

- ノイズレート
- ADC 分布におけるピーク間隔と p.e. との線形性
- MPPC ゲイン
- TDC と 実時間の対応

4.5.1 準備物

測定は基本的には以下のようなセットアップで行った. 図 4.15 はその概略であり, 実際の測定状況は図 4.16 である. 基本的な構成は WAGASCI DAQ のセットアップ (図 4.1) と同じである.

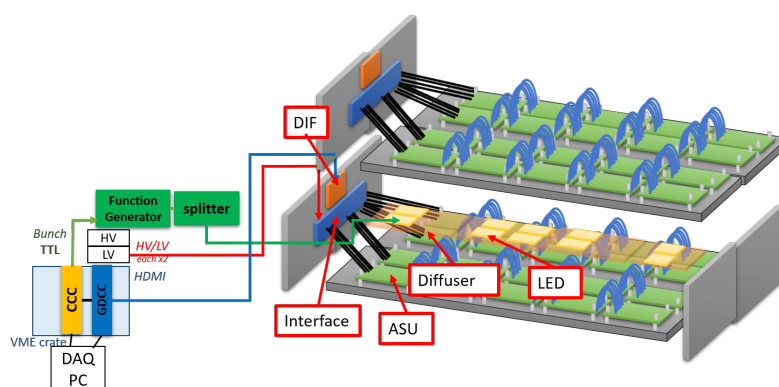


図 4.15 大量試験セットアップの概略. ASU を固定するための棚 (暗箱を兼ねている) を用意し, 1 段で 20 枚の同時測定を行える. 上部には LED を取り付けることもでき, LED による測定も可能である.

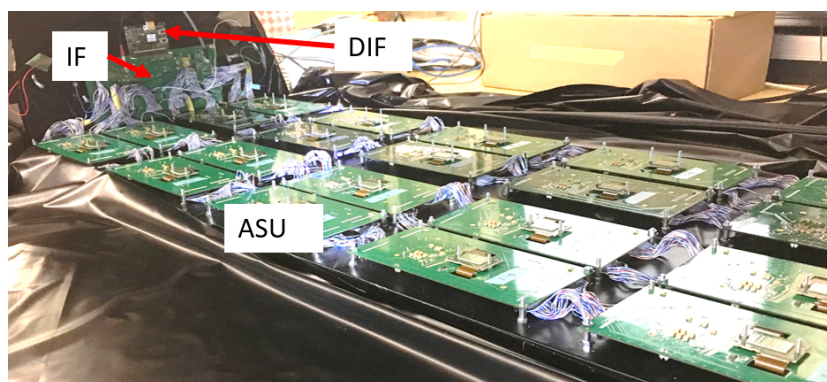


図 4.16 20 枚測定時の様子

測定用の LED は図 4.17 であり, その回路は図 4.18 である. LED の仕様は表 4.13 である.

LED のセットアップへの取り付けは図 4.19 のようにした.

実際の測定環境は図 4.20 のようである. MPPC への供給電源として YOKOGAWA の GS610 [62] を, エレクトロニクスボード等への供給電源として KENWOOD PW18-1.8AQ [63]

表 4.13: LED 仕様

項目	仕様
メーカー	Vishay Semiconductors 社
型番	VLMB1300-GS08
大きさ	1.6mm × 0.8mm × 0.8mm
波長	475 nm

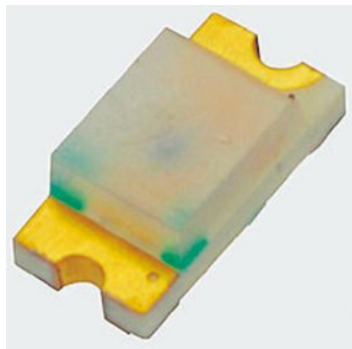


図 4.17 使用した LED[61]

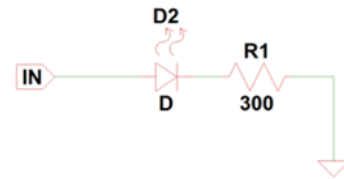


図 4.18 LED 点灯用の回路. LED への信号の入力は LEMO コネクタと LEMO ケーブルにより行う. 300 Ω の抵抗を取り付けている.

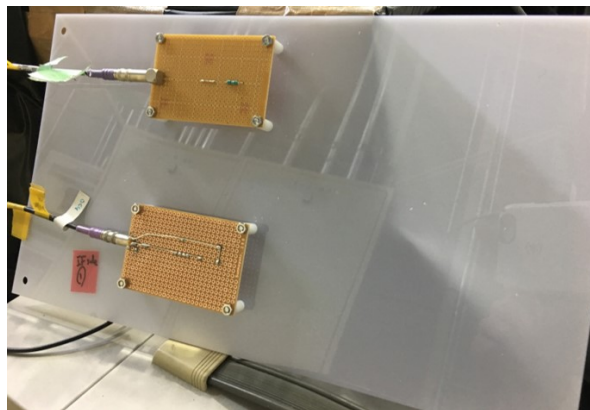


図 4.19 LED の光拡散板への取り付け. 光を一様に拡散させるために光拡散板を使用した.

を使用している (図 4.21). 電源は全て InterFace ボードに接続され, 各ボードへと供給される. また, LED への信号入力のために Tektronix 社のファンクションジェネレータ AFG1062 を使用した [64] (図 4.22).

CCC のクロック信号で作成したバンチ信号を用いて LED を光らせたときの ADC 分布は図 4.23 である. このように p.e. ごとのピークが立っていることが確認できる.

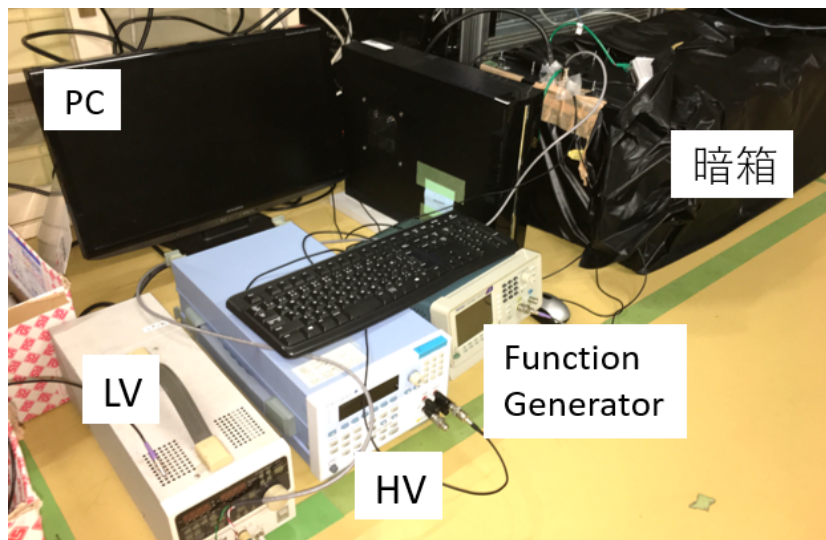


図 4.20 実際の測定環境 (NM 棟 B2 フロアの場合)



図 4.21 試験に使用した供給電源。 MPPC への電源供給用 (左), 各ボードへの電源供給用 (右)

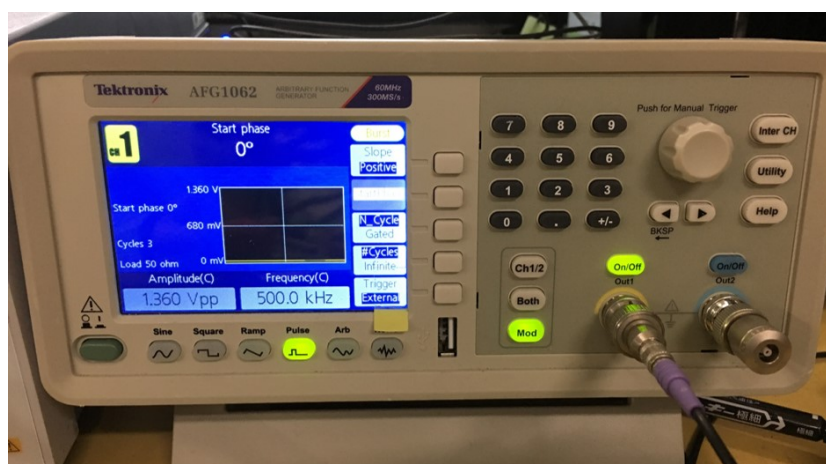


図 4.22 試験に使用したファンクションジェネレータ。 Start Acquisition 信号との同期に利用した。

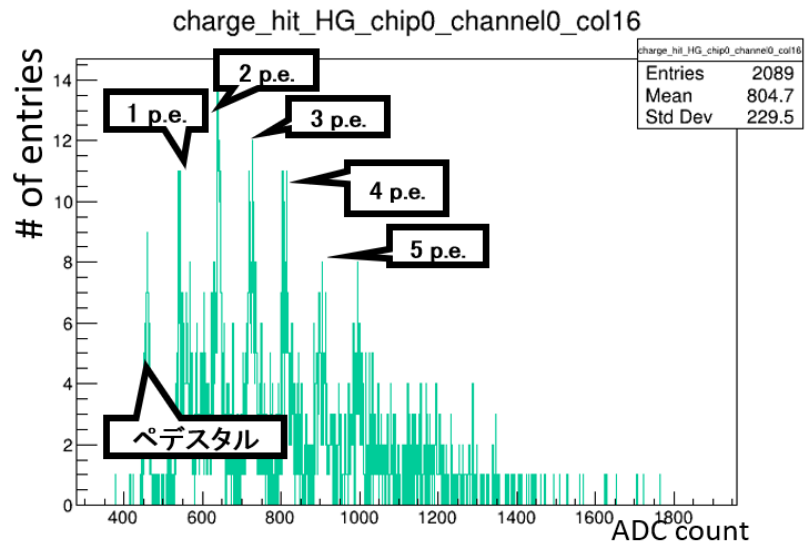


図 4.23 LED 照射時の ADC 分布の確認。このときの測定条件は threshold を 0.5 p.e. に設定している。CCC によるバッチの設定は active : 40 ns, period : 5800 ns で、256 個の信号を一回の Acquisition gate 内に入れている。コラム 16 個全ての分布をまとめたものである。

4.5.2 ASU 複数枚での測定

ここでは簡単な例として 1 枚～4 枚での ASU 測定の様子を述べる。図 4.24 は実際のセットアップの様子である。

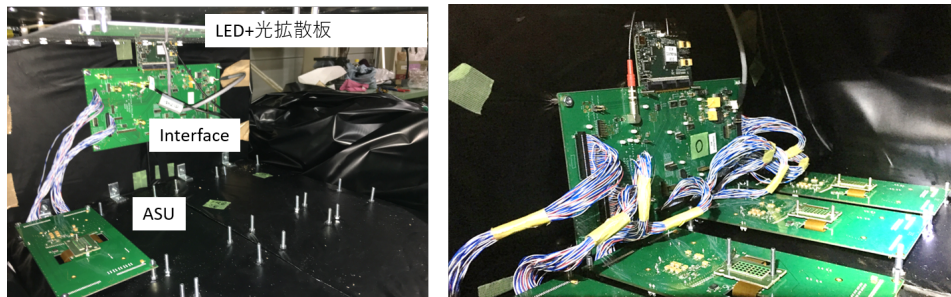


図 4.24 複数枚測定の設定アップの様子。左図：1 枚測定，右図：4 枚測定。

ペDESTALの変動

ペDESTALは ADC のオフセットである。SPIROC 一つ一つに ADC が内蔵されている。MPPC のキャリブレーションを行う際、ペDESTALを用いるので、このペDESTALを把握しておく必要がある。図 4.25 がそのプロットであり、チップ一枚においてコラム間で約 10 ADC count 程 (1σ) のばらつきが見られた。4 枚測定でも同様にチャンネル，コラム間で約 10 ADC count 程のばらつきが確認できた (図 4.26)。

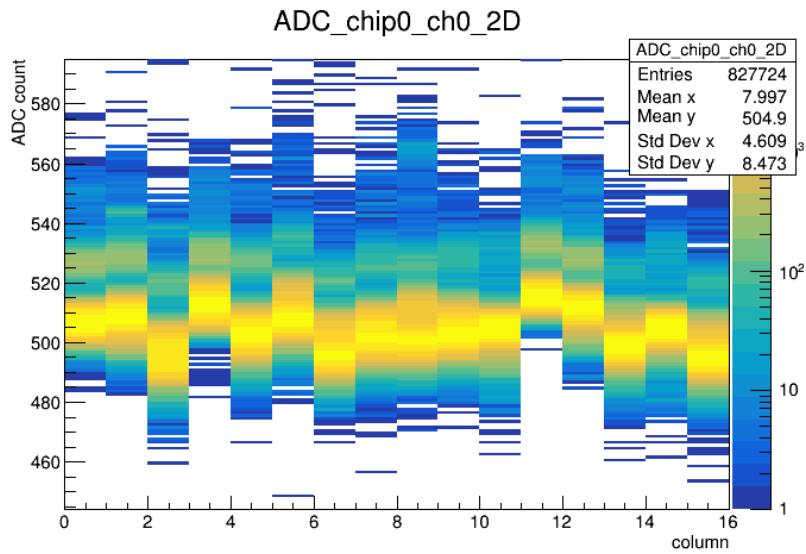


図 4.25 ペDESTALとコラムの二次元ヒストグラム. コラムごとに ADC count をプロットしたもの. ~ 10 ADC count ほどの変動が見られた. これはヒットが無かった場合の ADC 分布である.

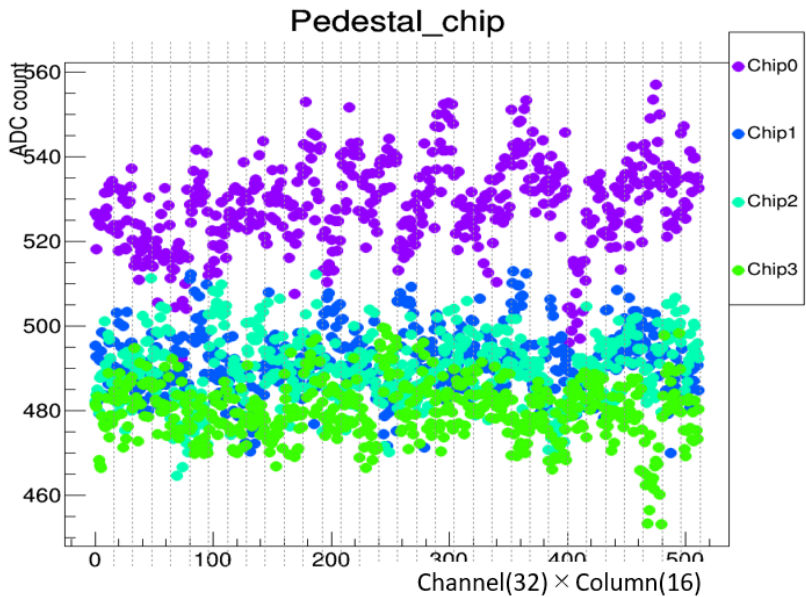


図 4.26 ペDESTALのチップ間のばらつき. 4枚の ASU を使用した測定. ペDESTALが ~ 10 ADC count 程チャンネル間でばらついているのを確認できる (各チップ).

ノイズレート

データ収集において、光量に対してどのスレシヨルド値を定めるかはノイズを抑えるためにも重要である。SPIROC はチャンネルごとにスレシヨルド値を DAC 値によって変更可能である。SPIROC の特性上、スレシヨルド以上の信号の情報しか保存しないため、電荷情報の ADC 分布もスレシヨルド以上の値で形成される（ペDESTアルを除く）。そのため、光量に関して、電荷のデジタル値（ADC 値）からだけで何 p.e. なのかを判断するのは難しい。そこで我々はスレシヨルドを変化させながら測定を行い、BCID の分布からノイズレートを算出する。BCID とは Bunch Crossing IDentification 略であり、設定したスレシヨルドを超えた時の時間情報をクロック信号の個数を用いて粗く保存された情報である。ノイズレートが急激に変化する部分が光量のピーク部分に相当するはずなので、比較的平坦な部分が光量のピークの谷であると考えられる（図 4.27）。MPPC のノイズレートとも比較することでどのようなスレシヨルドに設定できているかが分かる。使用する MPPC のノイズレートは 0.5 p.e. スレシヨルドで ~ 60 kHz, 1.5 p.e. スレシヨルドで ~ 1 kHz 程であることが分かっている。

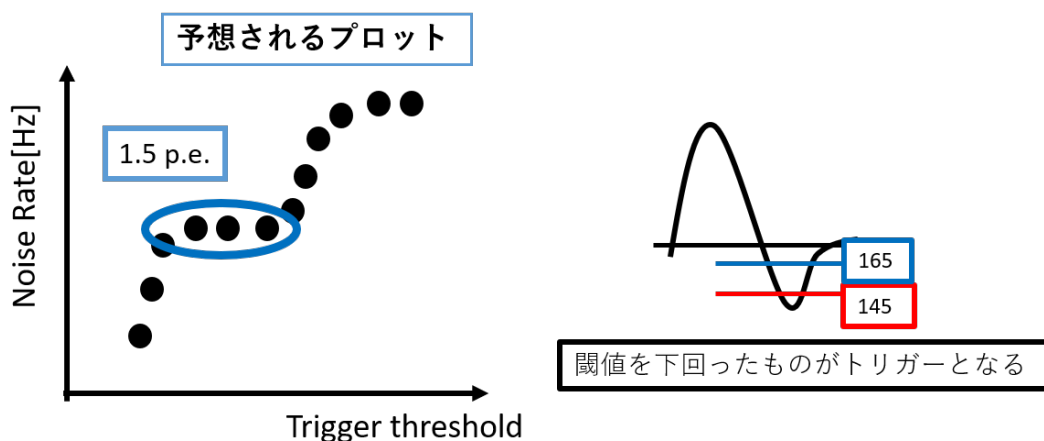


図 4.27 ノイズレートとスレシヨルドの関係。スレシヨルドの変化に応じてノイズレートが変化し、電荷の ADC 分布の特性上 0.5, 1.5 p.e. などのピークの谷になると平坦になるはずである（左図）。スレシヨルドが上がるとノイズレートが上がるのは、SPIROC のディスクリミネータのコンパレータが逆に接続されているため、信号のアンダーシュートの部分で動作するからである（右図）。

測定方法について述べる。スレシヨルドを変化させて測定を行い、BCID 分布を作成する。BCID はヒットした時の時間情報を大まかに決めるものであり、1 BCID（クロック信号一回分）において 1 ヒットしか計上できない。複数回ヒットがあった場合は数え落としてしまう。そのためその数え落とし分の補正を行う必要がある。ランダムなノイズの場合、ノイズレートが十分高ければ、16 コラム全て埋まるはずである。BCID 分布の BCID = 0 \sim 15 までで定数でフィットを行い得られた結果が見かけ上のノイズレートであると考えられる（式

(18)) .

$$P(\text{見かけのノイズレート}) = \sum_{n=0}^{\infty} P_0^n \quad (18)$$

ここで P_0 は数え落としがない時のノイズがスレシヨルドを越える確率であり, n は 1 BCID 内でヒットした回数である. これより, BCID 分布を用いたノイズレート算出の式は以下で表される.

$$\text{NoiseRate}[\text{Hz}] (P_0) = \frac{P}{(1 + P) \times 580\text{ns}} \quad (19)$$

式 (19) の P は

$$P(\text{見かけのノイズレート}) = \frac{\text{BCID (0~15 まで) 分布の fit 結果}}{\text{Spill 数 (AcquisitionGate の数)}} \quad (20)$$

である. Spill 数とは測定開始から終了までの Acquisition Gate の総数である. BCID 分布を用いたノイズレート測定の結果を図 4.28 に示す. これより, 右図プロットの平坦な部分は MPPC のノイズレートを考慮するに, 0.5 p.e. 相当であると分かる. このような測定でスレシヨルドの光量との対応を見積もることができると確認した. このノイズレートの測定は多数行われ, 表 4.14 のような対応が定められている.

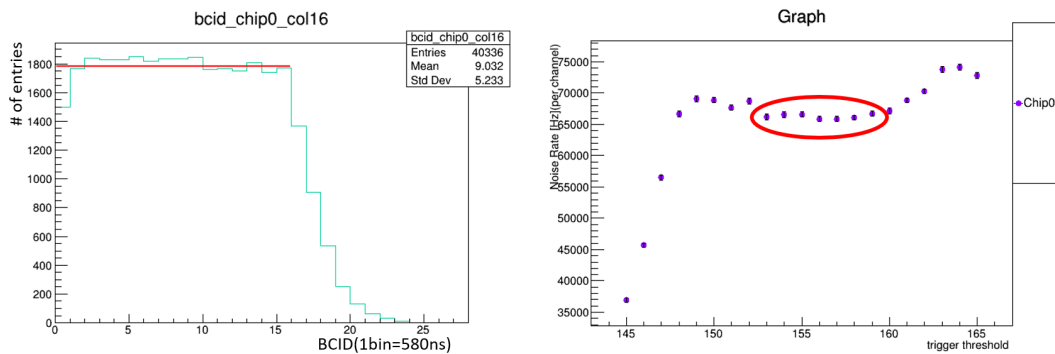


図 4.28 BCID 分布を用いたノイズレートの算出. 各スレシヨルド値で測定した BCID 分布の 0 ~ 15 コラムまでで直線フィットを行い, その結果を用いてノイズレートを求める (左図). スレシヨルドの変化に対するノイズレートのプロット (右図). 左図の BCID 分布はスレシヨルドの DAC 値が 165 のとき.

表 4.14: ノイズレート 範囲

p.e.	ノイズレート (下限) [Hz]	ノイズレート (上限) [Hz]
3 p.e.	50	250
2 p.e.	1000	5000
1 p.e.	20000	100000

ADC 分布におけるピーク間隔と p.e. との線形性

ここではそのピーク間の ADC count の値が p.e. に対応するかを調べた. 図 4.29 はフィッティングの様子である. このようにしてピーク間隔と p.e. との線形性を確認し, 図 4.30 のように各点ごとに非線形性を確認した (式 (21)). その結果, 1 チップ内での非線形性は 1% 以下であり, 1 チップ内での非線形性のばらつきは 1% 程であると確認できた. 十分な線形性があると考えられる. このときの設定でのノイズレートやゲインの測定結果は図 4.31 である.

$$\text{非線形性} = \frac{\text{data} - \text{fit}}{\text{fit}} \times 100 \quad (21)$$

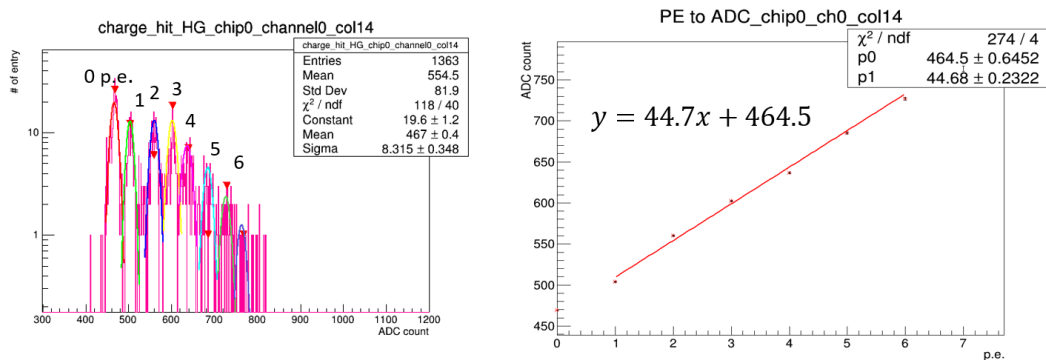


図 4.29 ADC 分布におけるピーク間隔と p.e. との線形性. ADC 分布 (左図) のピークを Gaussian でフィッティングし, p.e. との対応をプロットする. スレシヨルドは 0.5 p.e. であり, 1 p.e. 以上のピークでプロットを作成した (図 4.31).

4.5.3 Gain tuning

MPPC キャリブレーションにおいて, ゲインは重要な値である. WAGASCI 検出器において MPPC のゲインはピーク間の ADC count の差で表され, 我々は 40 ADC count 程をチューニングの設定値として決めた. Gain tuning は ASU 40 枚で行った (図 4.32). 以下流れを示す.

1. input DAC を変化させてゲインを測定する (HV 依存性)
input DAC を変化させて 5 点ゲインの測定を行う. ゲインはスレシヨルド 0.5 p.e., 1.5 p.e. それぞれで測定を行い, そこから 1 p.e., 2 p.e. の ADC count を求め差を取る. この差をゲインと定義する.
2. Gain= 40 となるような input DAC 値をフィッティングによって求める.
測定したデータで図 4.33 のようなプロットを作成し, フィッティングによって目標のゲインに最適な input DAC をチャンネルごとに求める.
3. その input DAC 値で再度測定を行いゲインを確認する.

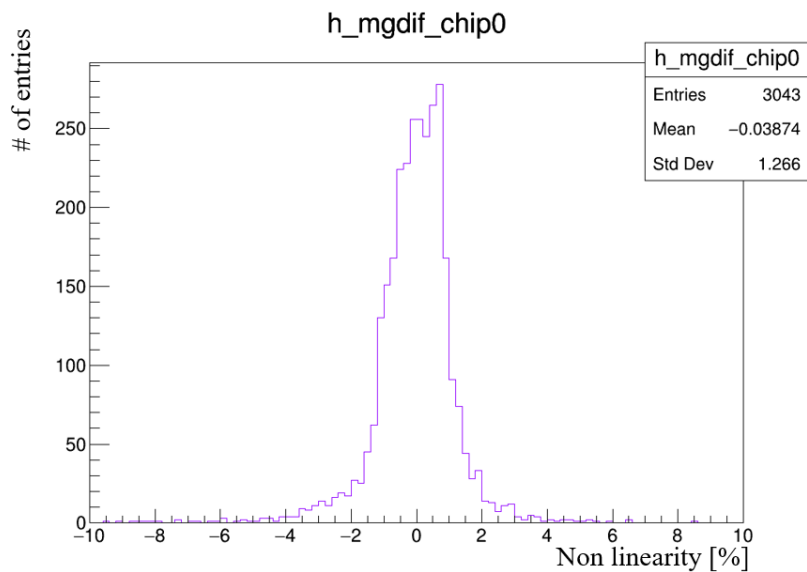


図 4.30 非線形性に関するヒストグラム. 横軸: 式 (21) の非線形性, 縦軸: イベント数. プロットは各 p.e. に関して, 32 channel \times 16 column 内のデータ数分の平均である. 非線形性は $\sim 1\%$ 以下である.

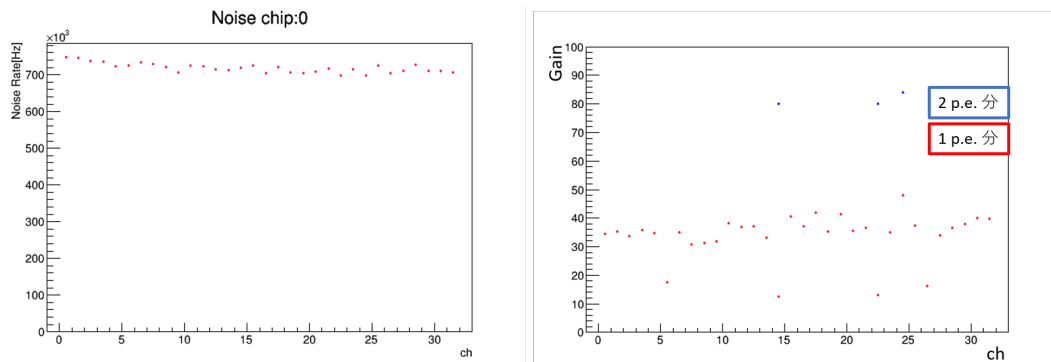


図 4.31 線形性測定時のノイズレートとゲインの値. 横軸: チャンネル, 縦軸: ノイズレート (左), ゲイン (右). ノイズレートの値から 0.5 p.e. のスレシヨルドで設定できていることがわかり, 後述する MPPC ゲインの値も大半のチャンネルで 40 程度だとわかる.

その input DAC を適用させてゲインの確認を行った. その結果が図 4.34 である. 大半のチャンネルで 5% 以下でゲインをチューニングできた.

4.5.4 TDC と 実時間の対応

ニュートリノビームによるニュートリノ反応かどうかを判別するには様々な手法があるが, ニュートリノバンチの入射タイミングによるイベントカットも方法の一つである. SPIROC には実時間を直接測定するものは無いので, 内蔵されている TDC を用いて測定を行う必要がある.

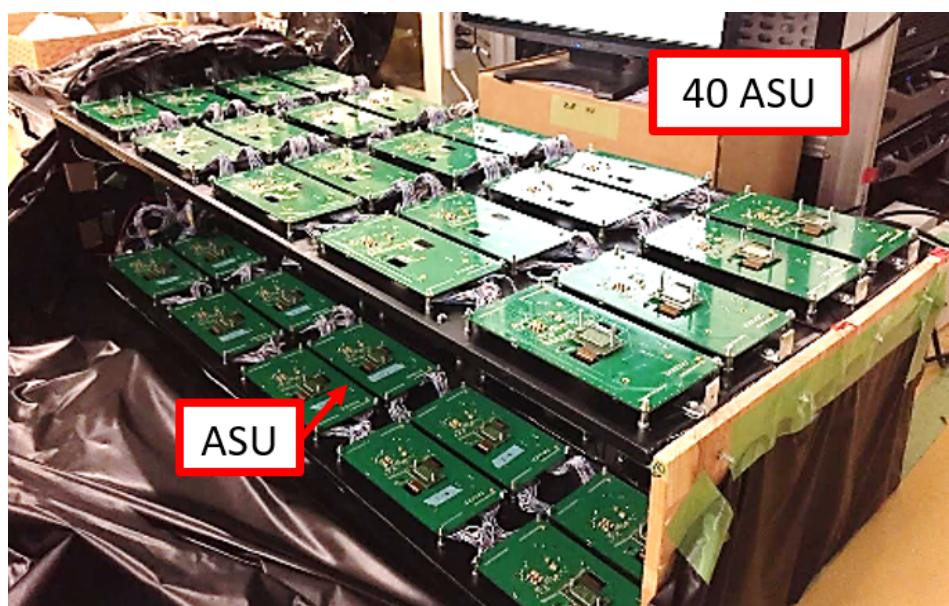


図 4.32 ASU 40 枚の測定におけるセットアップ

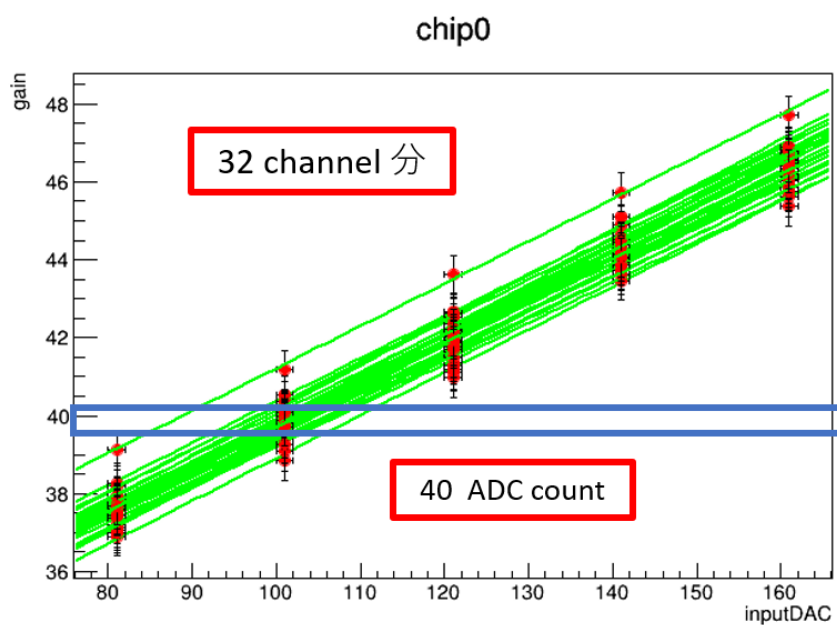


図 4.33 input DAC と ゲインの関係. 5 点測定のプロットに対してフィッティングを行う. プロットは 1 枚のチップの 32 チャンネル分をまとめている.

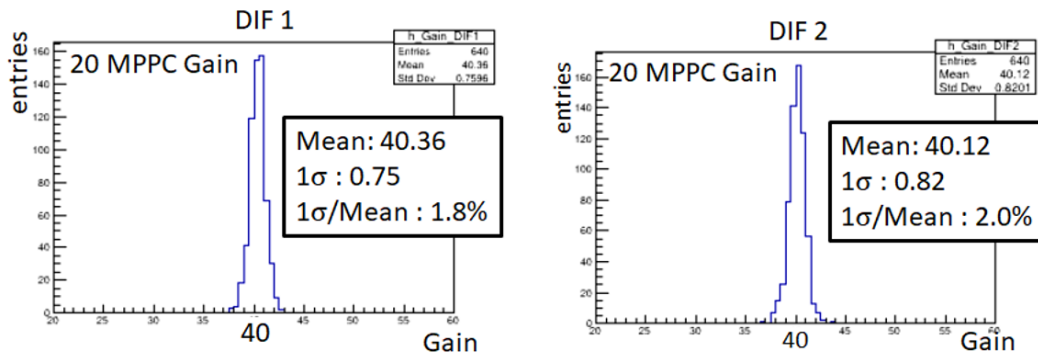


図 4.34 40 枚の MPPC のゲインチューニングの結果. 20ASU, 32 チャンネル分の結果のまとめである.

以下 SPIROC2D の TDC について説明する. TDC は Time-to-Digital Converters の意味である. SPIROC における TDC は TDC Ramp と呼ばれる信号によって特徴づけられる. 前バージョンである SPIROC2C において TDC Ramp 信号が改善された [65]. 図 4.35 がその概要である. この TDC 原理は SPIROC2D においても利用されている.

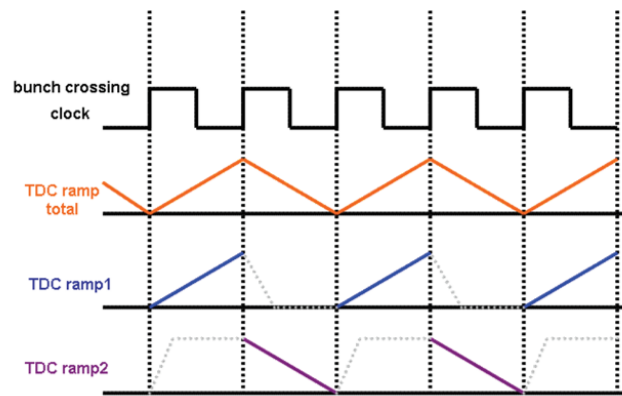


図 4.35 TDC Ramp 信号と BCID の対応関係 [65]. BCID を意味するクロック信号の個数が増えていくごとに, TDC Ramp は傾きを変えながらランプ信号を発生させる.

TDC Ramp 信号のどこかのタイミングでスレシヨルドを越えるヒットがあった場合, TDC Ramp の電圧値が保持され, そのときの BCID と共にメモリに保存される (図 4.36).

TDC 測定は LED を用いて行う. TDC と実時間との対応を見るために, LED への入力信号を任意に遅延させ, TDC count のピーク値から遅延時間と TDC との対応関係を調べる. その際問題となるのは Acquisition Gate と LED 信号とのずれである. Acquisition Gate とタイミングが合っていないならば LED は一定のタイミングで光っているにもかかわらず, データ取得のタイミングが合っていないために TDC はランダムに分布してしまうからである. 本測定では Acquisition Gate の始まりである Start Acquisition 信号のタイミングで LED への入力信号を直接同期させ

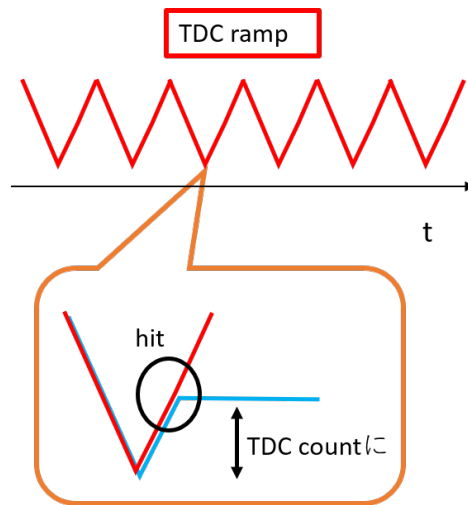


図 4.36 TDC Ramp 信号と TDC count の対応関係

ることでそのずれを解消できた。

セットアップは図 4.37 のようにした。図 4.38 のように、InterFace 上にあるピンからプローブを使用して Start Acquisition 信号を取り出した。LED への入力信号は自由に生成したいので、Start Acquisition 信号をファンクションジェネレータの外部トリガー部分に差し込み、このタイミングで LED への入力信号を発振できるようにした。これでタイミングの同期は完了した。

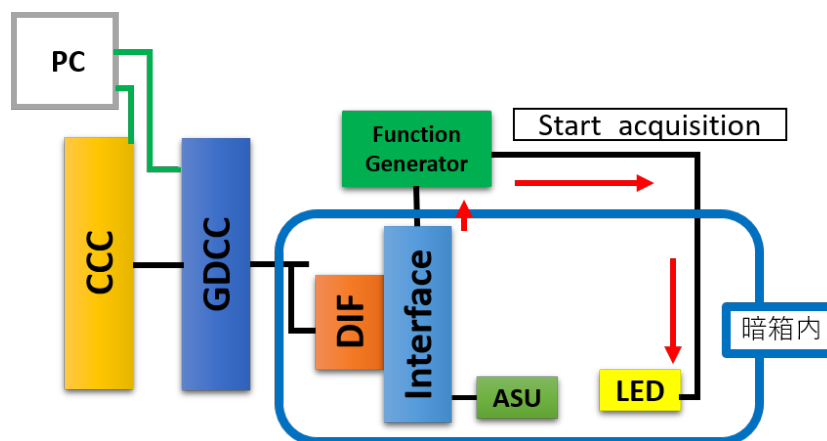


図 4.37 TDC 測定時のセットアップ

以下に実際の測定の結果を示していく。LED への入力信号は 1 回だけのパルス、16 回のパルスの二種類で測定を行った。LED は active : 50 ns, period : 2 ms (一回のみ LED 点灯), 4 ms (16 回 LED 点灯) という信号を入力している。図 4.39 はファンクションジェネレータにより 400 ns まで遅延させて測定した時の結果である。この測定で TDC Ramp 構造の一端が再現できており、1 TDC count は約 0.13 ns 程に対応することが分かる。

図 4.40 はさらに遅延時間を伸ばしたときの結果である。このプロットは Start Acquisition 信

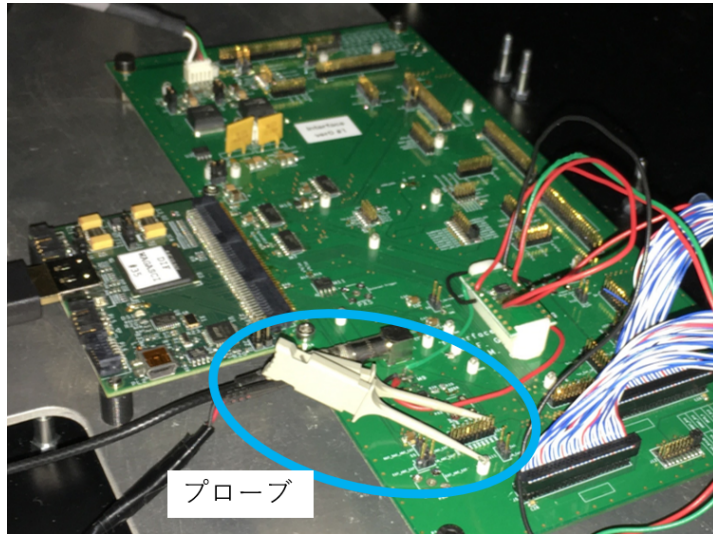


図 4.38 Start Acquisition 信号の取り出しの様子. プローブを使用して, LEMO ケーブルで信号を取り出した. 片方は GND に繋がっている.

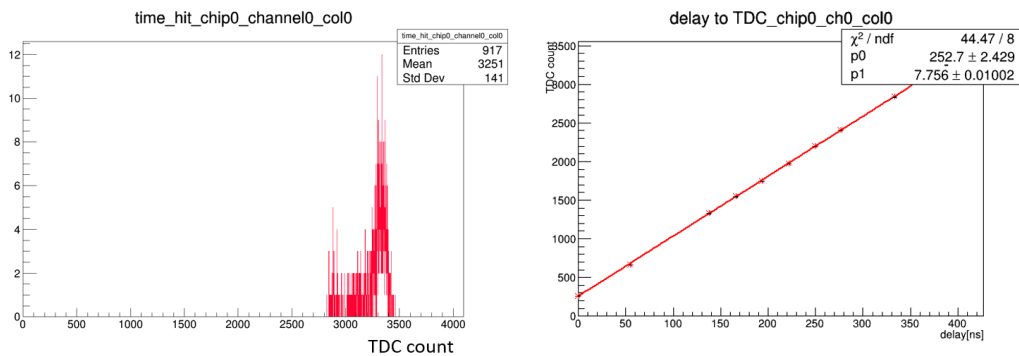


図 4.39 TDC 分布のヒストグラムと Ramp の再現. LED に入力する信号を遅延させ, その遅延時間を横軸に, TDC 分布の最大値を持つ bin に相当する TDC count を縦軸にする. チャンネル・コラムごとにプロット.

号のはじまりである 0 ns から遅延を開始している. 概ね, BCID の切り替わりに対応して TDC Ramp が再現できていることが確認できる. 最初の 500 ns 程は TDC count がランダムに値を持っていることが分かる. 理由としては, 厳密には Start Acquisition のタイミングで BCID や TDC Ramp が始まっているわけではなく, Start Acquisition から約 580 ns 程遅れて出力される validation signal である ValEvt 信号の立ち上がりタイミングが合っているからだと考えられる. (図 4.41).

先程までは全てコラム 0 のみ光らせる (LED を一回だけ光らせる) 測定だったが, 図 4.42 は 16 回光らせて 16 個のコラムを動作させた時の測定結果である. 全てのコラムにおいても十分に TDC Ramp の構造が再現できていることが確認出来た.

これらの結果から実時間の変換式を求めた. 変換式は TDC Ramp へのフィッティングの式と同

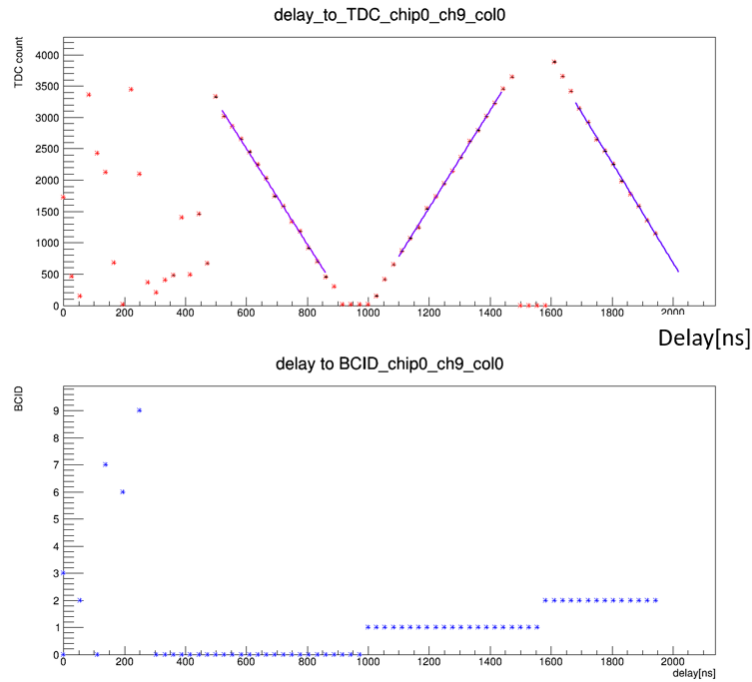


図 4.40 2000 ns まで遅延させた時の TDC Ramp の再現

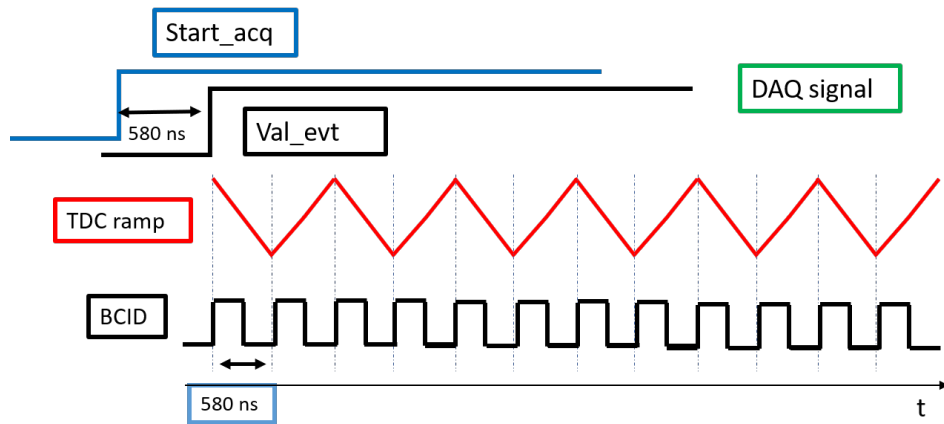


図 4.41 BCID, TDC Ramp のタイミング

様で,

$$\text{TDC} = a \times \text{delay}[\text{ns}] + b \quad (22)$$

である. a b はそれぞれ再現した TDC Ramp の傾き, 切片である. 図 4.43 は切片と傾きをまとめたヒストグラムである. いずれも $1\sigma/\text{Mean}$ は 1% 程度である. この結果から傾きは $a_{\text{even}} = -7.78$, $a_{\text{odd}} = 7.89$, 切片は $b_{\text{even}} = 7158$, $b_{\text{odd}} = -7932$ と定めた. また, 同コラム内の BCID 偶奇ごとに傾きのフィッティング結果をまとめたものが図 4.44 である. BCID ごとの違いは $1\sigma_{\text{even}}/\text{Mean}_{\text{even}}$, $1\sigma_{\text{odd}}/\text{Mean}_{\text{odd}}$ それぞれ 5%, 3% 程度だと確認できる.

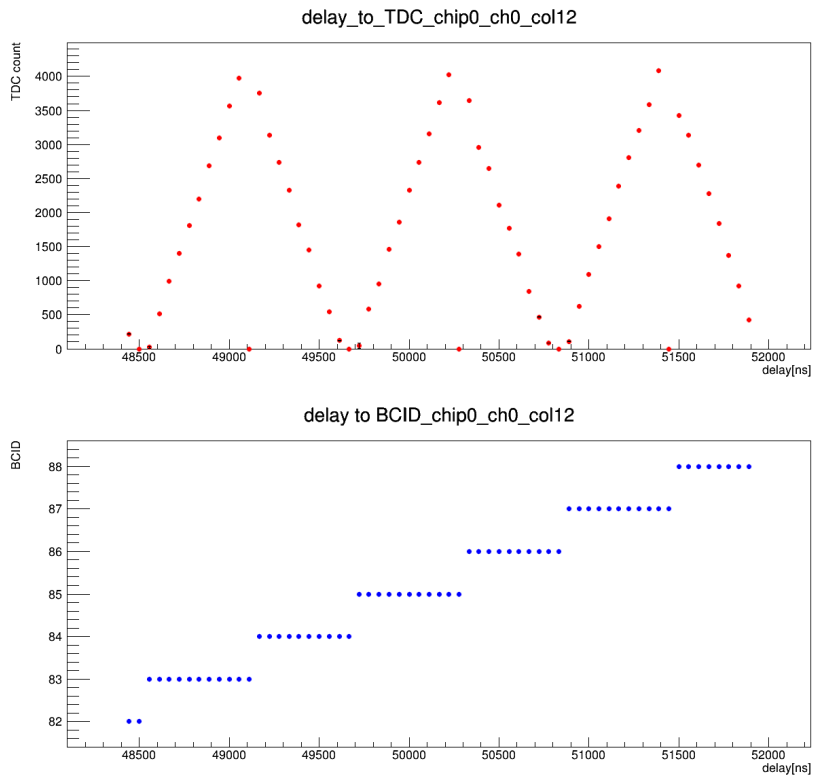


図 4.42 16 コラム分 LED を光らせた時の TDC Ramp の再現. プロットはコラム 12 である.

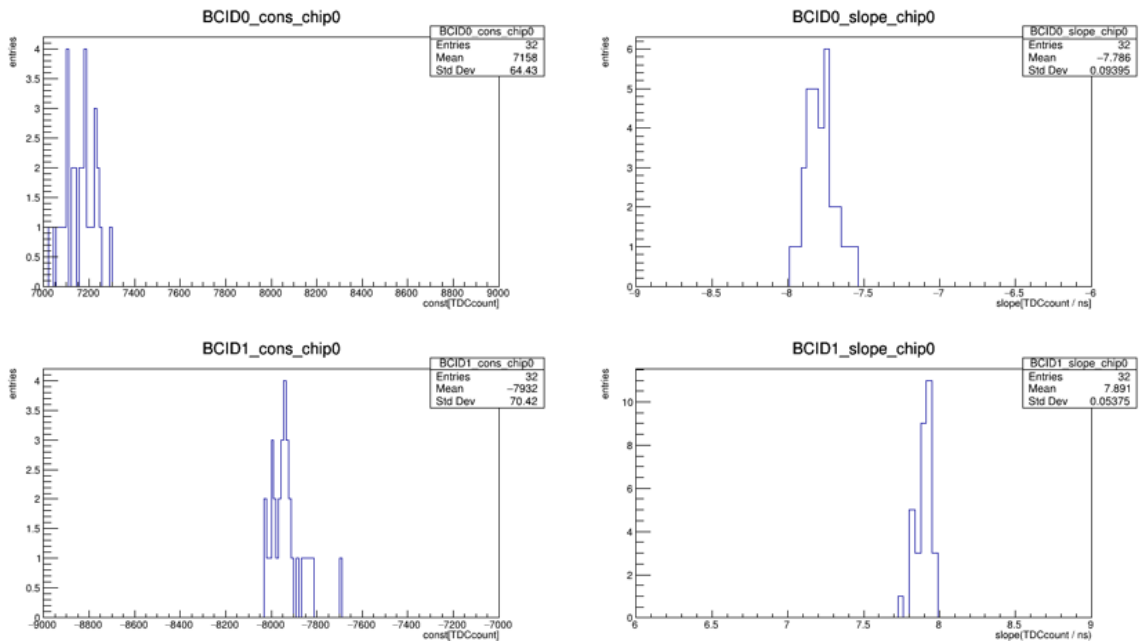


図 4.43 再現した TDC Ramp に対するフィッティング結果. BCID 0, 1 の切片 (左図) と傾き (右図) であり, 32 チャンネル分の結果である. BCID の偶奇により TDC Ramp が変化していることが分かる.

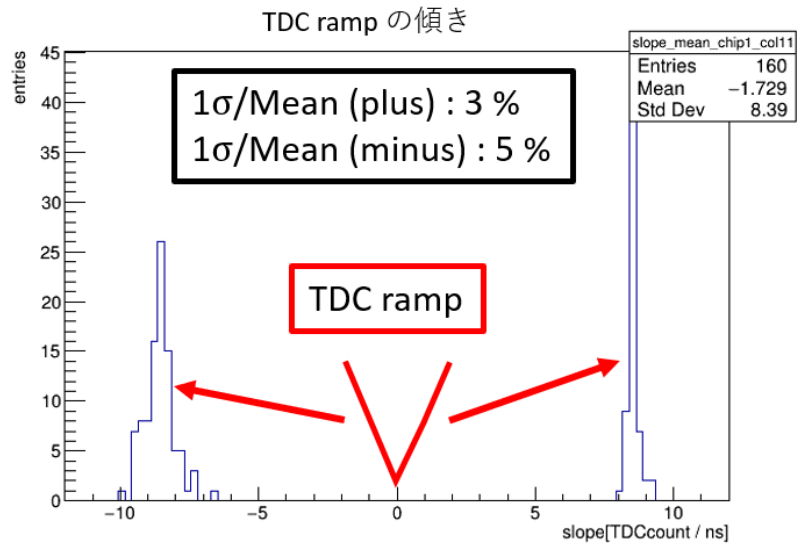


図 4.44 BCID の偶奇による TDC Ramp の傾き. あるコラム (この場合コラム 11) における傾きのフィッティング結果のまとめ.

これらの結果から変換式を解析プログラムに組み込み, LED のヒットタイミングを再構成したものが図 4.45 である. LED は一定の間隔で DAQ 信号とのタイミングのズレもないことが確認できた.

4.6 検出器へのエレクトロニクス取り付け

試験されたエレクトロニクスはインストールされた検出器への取り付けを行った. 図 4.46 はその様子である.

4.7 動作状況

取り付けが完了し, ニュートリノビームによる測定が 2017 年 10 月下旬から始まった. 以下はその動作状況である. 図 4.47 は一週間のゲインヒストリーである. 10% 以内で安定していることが確認できる. 前年度に作成された INGRID Water Module と同等の安定性である.

図 4.48 はイベントディスプレイである. ヒットしたときの光量を元に, 同 BCID 内でのヒットで飛跡を再構成した. これよりニュートリノイベントが確認できた

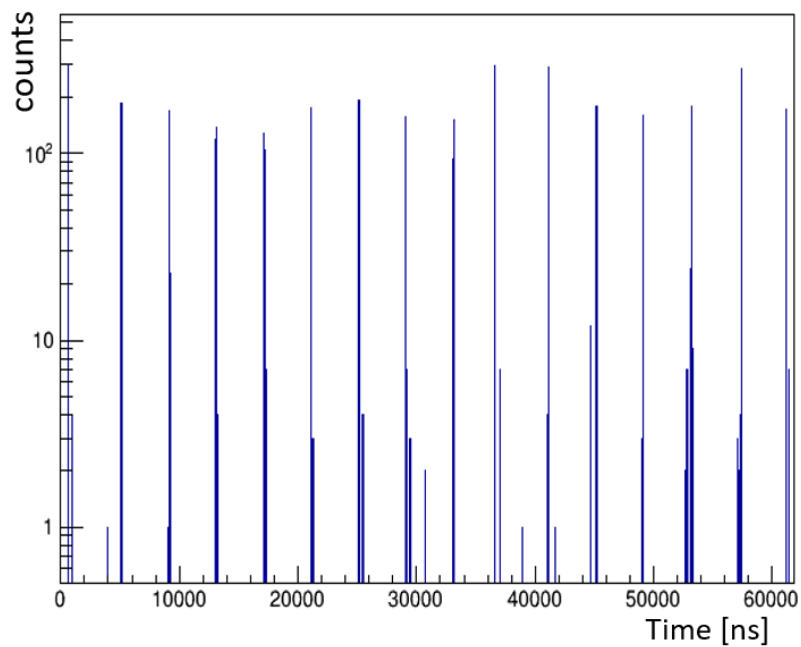


図 4.45 LED のヒットタイミング. 実時間の変換式を解析プログラムに組み込み, それを元に LED のヒットタイミングを再構成した. 16 回 LED を光らせたため 16 個のピークが現れていることが確認出来る.

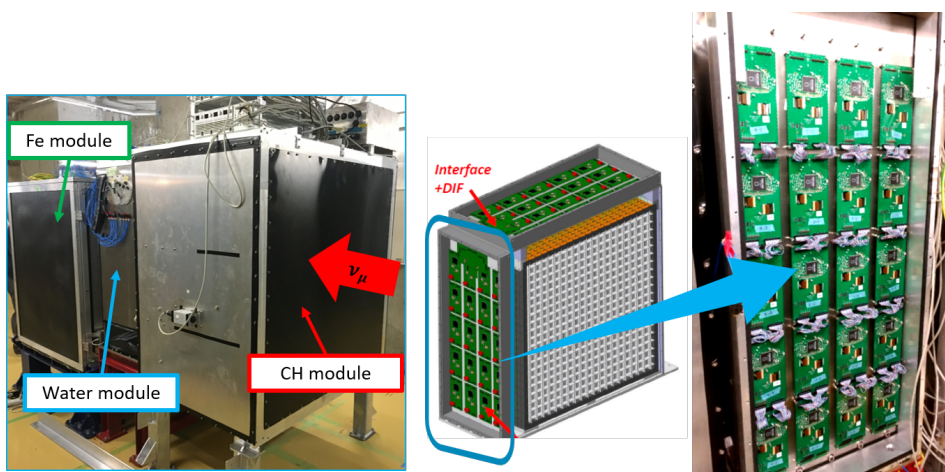


図 4.46 エレクトロニクス取り付け. 左: インストールされた検出器, 中央: 取り付けイメージ, 右: エレクトロニクスの取り付け.

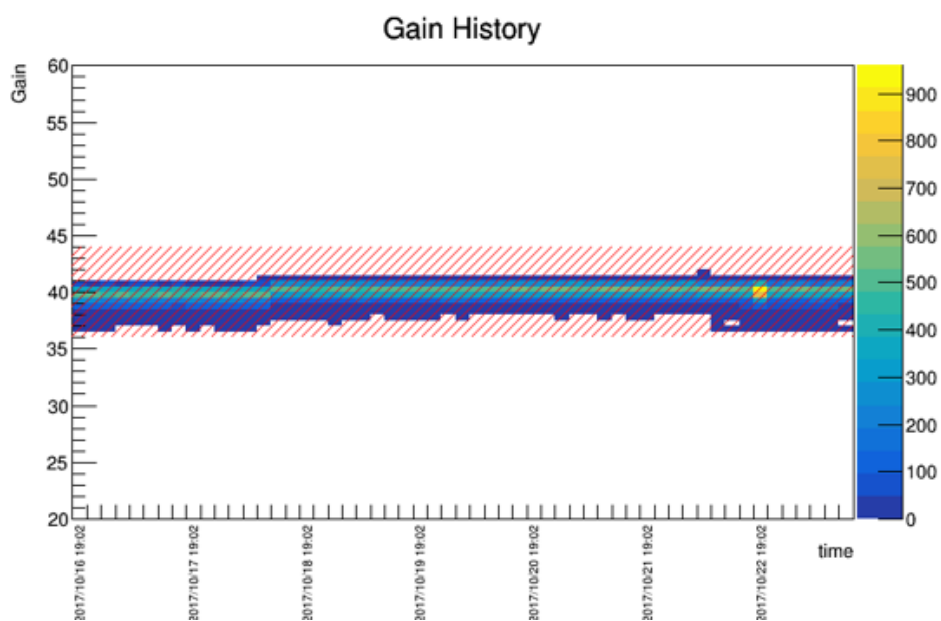


図 4.47 一週間のゲインヒストリー. 10% 以内で安定していることが確認できる.

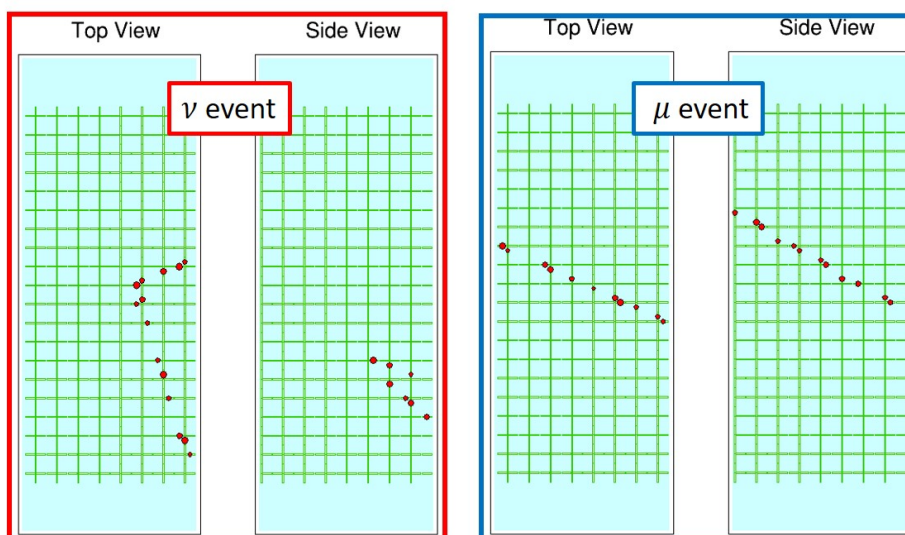


図 4.48 イベントディスプレイの例. 図の左側からニュートリノビームが到来している. 左: 検出器内でニュートリノが反応したイベント, 右: ビーム上流でニュートリノが反応した時に生じたミュオンのイベント. それぞれ上からの図 (Top View) と横からの図 (Side View) がある.

5 結論

T2K 実験では、前置検出器 ND280（主にプラスチック）と後置検出器 SK（水）の標的原子核の違いや、ニュートリノ反応によって生成された荷電粒子に対する立体角アクセプタンスの違いによるニュートリノ-原子核反応断面積の不定性が系統誤差の要因となっている。WAGASCI 実験は、その不定性を抑制するため、水とプラスチックにおけるニュートリノ反応断面積比の精密測定を目的としている。実験で使用される WAGASCI 検出器は SK と同程度の立体角アクセプタンス (4π) を実現するために、シンチレータを垂直・水平に組み合わせた三次元格子構造を持つ。また、前置検出器と異なるエネルギー領域で測定できるため、反応断面積に対する更なる理解を深めることが出来るという特徴を持っている。

我々は、水標的のニュートリノ検出器 WAGASCI の建設、その過程で行われたシンチレータへの黒塗料塗布方法の確立、作業場所の環境改善を行った。黒塗料塗布作業において懸念される人体への悪影響や、作業環境の悪化に対して、換気方法の改善や逐一濃度測定を行った。その結果、指摘を受けていた有機ガス濃度を未検出 (20 ppm 以下) にまで削減することができた。また、黒塗料塗布によってシンチレータのクロストークが軽減されていることも、光量測定の結果から分かった。

また、新たな信号読出しシステムの開発も進めた。信号を読み出すためのエレクトロニクスである新型 ASIC SPIROC2D を 40 枚、エレクトロニクスボードとして ASU を 40 枚 使用して動作試験を行った。ペDESTAL は 各チップごとにチャンネル間で 10 ADC count 程のばらつきを確認した。また、MPPC ノイズレートを測定することで、スレシヨルドと DAC 値との対応付けることができた。ADC 分布に関して、線形性が確認でき、MPPC のゲインも 5% 以下でチューニングした。TDC 測定に関しては Ramp 構造が確認でき、実時間への変換式を求めた。しかし、TDC 測定は全てのチップで行えていないため、チップの個体差はどのくらいあるのか不明である。実時間を知ることは重要であるので、今後も取り組んでいく必要がある。

謝辞

本論文の作成を通して、周りの方々に支えられてきたのだなと改めて気づきました。指導教員である、清矢 良浩教授には研究のことでアドバイスをいただいたり、研究とは関係の無いことに関しても面白く、また為になることを話して頂いたことが非常に印象的でした。また、発表練習において私の方に不手際な点が多々あったときでも熱心に指導して下さったことにとっても感謝しています。山本 和弘准教授には授業やゼミにおいて、一緒に考えて下さったことを感謝しています。私の事務手続きに不備や疑問点があった際も丁寧に対応してくださってとても助かりました。大阪市立大学名誉教授である奥沢 徹先生には普段のミーティングで質問や的確なアドバイスが頂けて非常に感謝しています。豊田 博俊氏には電子回路の製作で困っている時に何度も助けてくださいました。本当にありがとうございました。

T2K, WAGASCI 実験では多くの方々に助けていただきました。京都大学の中家 剛教授、市川 温子准教授にはミーティングや現場で貴重なお話を聞くことができ、また世間話なども何の隔たりもなくしてくださってとてもありがたかったです。横浜国立大学の南野 彰宏准教授には、現場で私が困っている時に寄り添って共に問題解決へ向けて考えて下さり、本当にお世話になりました。東京大学の横山 将志准教授はミーティングで私が聞かれた質問の意味が分からなかった時に助けてくださいました。ありがとうございました。また、古賀 太一郎先輩、林野 竜也先輩、細見 郁直先輩には現場入りして間も無い頃に優しく丁寧に教えていただきました。特に、竹馬 匠泰先輩 田村 陸君にはエレクトロニクス試験関連でかなり迷惑をかけてしまっていたと思います。それでも丁寧に教えていただき本当に感謝しています。また、中村 輝石先輩、仲村 佳悟先輩、芦田 洋輔先輩、平本 綾美先輩、宇野 亘君、安留 健嗣君、藤田 亮君にも出張先で様々な面でお世話になりました。

本学高エネルギー物理研究室の皆さんには感謝しています。金 賢一先輩、手島 菜月先輩、竹崎 優斗先輩には何度も力を貸して頂いたことを覚えています。本当にありがとうございます。原田 潤先輩、古谷 優子先輩には、私が困っているときは自分の事のように考えてくださっていたのが凄く印象的でした。また、同期である森本 史明君、井上 翼君には昼夜を問わず議論を交わした時間が懐かしく、充実した時間でした。久木田 直哉君、田中 慎也君、吉中 晴香さんには様々な頼みごとをしましたが、みなさん嫌な顔をせず引き受けてくれて本当に感謝しています。

研究で培った経験や考え方を社会に出ても役立てていきたいと思っています。最後に私の支えとなってくださった家族と友人に、深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] E. J. Konopinski and G. E. Uhlenbeck, *Phys. Rev.* 48, 7 (1935).
- [2] C. L. Cowan et al., “Detection of the Free Neutrino: a Confirmation”, *Science* 124, 103 (1956). <http://science.sciencemag.org/content/124/3212/103>
- [3] K. Zuber, “Neutrino Physics Second Edition”, CRC Press (2011).
- [4] G. Danby et al., *Phys. Rev. Lett.* 9, 36 (1962)
- [5] D. Decamp et al. (ALEPH Collaboration), *Phys. Lett. B* 231, 519 (1989).
- [6] K. Kodama et al. (DONUT Collaboration), *Phys. Lett. B* 504, 218 (2001).
- [7] 中家 剛, “ニュートリノ物理 ニュートリノで探る素粒子と物理”, 共立出版 (2016).
- [8] Z.Maki, M.Nakagawa, and S.Sakata., *Prog. Theor. Phys.* 28, 870 (1962).
- [9] Accelerator Technical Design Report for High-Intensity Proton Accelerator Facility Project, JAERI Report No. JAERI-Tech 2003-044 and KEK Report No. 2002-13.
- [10] H. Hotchi et al., “Beam commissioning of the 3-GeV rapid cycling synchrotron of the Japan Proton Accelerator Research Complex”, *Phys. Rev. STAB.* 12, 040402 (2009). <https://journals.aps.org/prab/pdf/10.1103/PhysRevSTAB.12.040402>
- [11] KEK, “J-PARC 加速器の概要”, (2010) http://accwww2.kek.jp/oho/OH0\%20text\%20archives\%202005-2011/OH010\%20web\%20final/OH010_koseki_20100828.pdf
- [12] K. Abe et al.(T2K Collaboration), *Nucl. Instrum. Meth. A* 659, 106 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2011.06.067>
- [13] Christophe Bronner, “T2K oscillation results”, in proceedings of NUFACT2014 (2014).
- [14] K. Abe et al.(T2K Collaboration), *Phys. Rev. D* 91, 112002 (2015).
- [15] K. Iwamoto et al., “Recent Results from T2K and Future Prospects” in proceedings of ICHEP2016, PoS 517, (2016) [http://inspirehep.net/record/1596616/files/PoS\(ICHEP2016\)517.pdf](http://inspirehep.net/record/1596616/files/PoS(ICHEP2016)517.pdf)
- [16] K. Abe et al.(T2K Collaboration), *Phys. Rev. D* 87, 012001 (2013)
- [17] K. Abe et al.(T2K Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* 116, 181801 (2016).
- [18] D. Beavis, A. Carroll, I. Chiang et al, “Long Baseline Neutrino Oscillation Experiment”, *Phys. Des. Rep.*, BNL 52459(1995).
- [19] 木河 達也, “Measurement of Neutrino Interactions and Three Flavor Neutrino Oscillations in the T2K Experiment”, 京都大学博士論文 (2014). https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/theses/doctor/kikawa_dt.pdf
- [20] M. Hartz, “KEK seminar for new T2K results.”, KEK seminar and press release (2017).
- [21] K. Abe et al.(T2K Collaboration), *Nucl. Instrum. Meth. A* 694, 211 (2012)
- [22] K. Abe et al.(T2K Collaboration), *Phys. Rev. D* 96, 052001 (2017) <https://journals.aps.org/prd/pdf/10.1103/PhysRevD.96.052001>

- [23] Y. Ashie et al.(Super-Kamiokande Collaboration), "Measurement of Atmospheric Neutrino Oscillation Parameters by Super-Kamiokande I", Phys. Rev. D 71, 112005 (2005).
- [24] Y. Fukuda et al.(Super-Kamiokande Collaboration), "The Super-Kamiokande detector", Nucl. Instrum. Meth. A 501, 418 (2003) https://ac.els-cdn.com/S016890020300425X/1-s2.0-S016890020300425X-main.pdf?_tid=fa5cc8c0-0a44-11e8-92ca-00000aacb35d&acdnat=1517815381_07f6708ed5d714ea8f0c71a1a66995d0
- [25] William R.Leo, "Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments"
- [26] 大阪市立大学 理学部 物理学科 実験教育ワーキンググループ, "専門物理学実験", p15, (2011).
- [27] M. Aoki et al., Phys. Rev. D 67, 093004 (2003).
- [28] A. Minamino et al.(WAGASCI Collaboration), "Study of neutrino-nucleus interaction at around 1 GeV using cuboid lattice neutrino detector, WAGASCI, muon range detectors and magnetized spectrometer, Baby MIND, at J-PARC neutrino monitor hall", Proposal for J-PARC PAC (2017).
- [29] 長島順清 (1998), 『素粒子物理学の基礎 II』, 朝倉書店.
- [30] Kuraray, "Scintillation Materials". http://www.phenix.bnl.gov/WWW/publish/donlynch/RXNP/Safety\%20Review\%206_22_06/Kuraray-PSF-Y11.pdf
- [31] M. Antonova et al., JINST 12 C07028 (2017)
- [32] 原田潤, "新ニュートリノ検出器 INGRID Water Module の製作及びそれによる飛跡再構成の研究", 大阪市立大学修士論文 (2017) .
- [33] 金賢一, "Measurement of neutrino interactions at an off-axis angle 1.6 degrees using the near-detector INGRID and development of a new neutrino near-detector for the T2K neutrino oscillation experiment", 大阪市立大学修士論文 (2016)
- [34] Eljen Technology, "OPTICAL CEMENT EJ-500" <http://www.eljentechnology.com/products/accessories/ej-500>
- [35] Avian Technologies, "Avian-D White Reflectance Coating" <http://aviantechnologies.com/catalog/avian-d-white-reflectance-coating/>
- [36] CAS, Chemical Abstracts Service Home Page (<http://www.cas-japan.jp/>)
- [37] 厚生労働省, 職場の安全サイト, 管理濃度 (作業環境評価基準別表) (http://anzeninfo.mhlw.go.jp/yougo/yougo12_1.html)
- [38] 環境省, PRTR 用語解説, 作業環境許容濃度 (ACGIH) (<https://www.env.go.jp/chemi/prtr/db/dic/0072.html>)
- [39] カンペハピオ, 水性シリコンカラスプレー 安全データシート, GHS 対応 SDS 水性シリコンカラスプレー + 各色 2016.8.4.pdf
- [40] 環境省, PRTR とは何か (https://www.env.go.jp/chemi/prtr/archive/guidei_H12/1-syou.pdf)
- [41] カンペハピオ, 塗料の基礎知識 (http://shop.kanpe.jp/index.php?main_page=page_4)

- [42] ファーマーズ・ライフ, グリーンハウス NH-20D (http://www.synegeo.com/2013_farmers_life/nanei/img/shouhinshousai/gh_nh20d_35258921/pdf_NH20D.pdf)
- [43] モノタロウ, 電気送風機 MJPBS-300 (https://jp.images-monotaro.com/etc/pdf/manual/G1024183_manual_20171031.pdf)
- [44] モノタロウ, フレキシブルダクト (<https://www.monotaro.com/p/0823/2463/>)
- [45] 重松製作所, 防毒マスク, GM31 (http://www.sts-japan.com/products/bodoku_mask/detail/gm31.html)
- [46] モノタロウ, 吸収缶, CA-1P1/OV (<https://www.monotaro.com/g/00008177/>)
- [47] 重松製作所, 防毒マスク, 製品カタログ (http://www.sts-japan.com/products/bodoku_mask/pdf/catalog.pdf)
- [48] 防毒マスク用吸収缶の除毒能力について (<http://www.yamaguchis.johas.go.jp/m1600/m1600-11.pdf>)
- [49] 重松製作所, CA-1P1/OV のイソプロピルアルコールに対する破過曲線 (CA-1P1/OV(イソプロピルアルコール).pdf)
- [50] 重松製作所, CA-104N2/OV のエチルベンゼンに対する破過曲線 (CA-104N2/OV(エチルベンゼン).pdf)
- [51] 重松製作所, CA-1P1/OV のキシレンに対する破過曲線 (CA-1P1/OV(キシレン).pdf)
- [52] ガステック, 検知管式気体測定器 概要紹介 https://www.gastec.co.jp/product/detector_tube/summary/
- [53] 中央労働災害防止協会, 有機溶剤中毒予防規則 第二章 設備 (第五条―第十三条の三) <https://www.jaish.gr.jp/anzen/hor/hombun/hor1-2/hor1-2-21-2-0.htm>
- [54] サンエス工業株式会社, 塗装設備に関する関連法規 <http://www.sanesu-ind.co.jp/products/LAW3.pdf>
- [55] 興研株式会社, プッシュプル型換気装置 <http://www.koken-ltd.co.jp/product/clean/push/basis.html>
- [56] Naruhiro Chikuma, "Research and development of magnetized muon range detector and readout electronics for a neutrino cross section experiment", Master's thesis, University of Tokyo (2016)
- [57] F. Gastaldi, R. Cornat, F. Magniette, and V. Boudry, "A scalable gigabit data acquisition system for calorimeters for linear collider", in proceedings of TIPP2014, PoS 193, (2014)
- [58] Omega, SPIROC 2 User Guide (2009)
- [59] R. R. Ward et al., "SiGe semiconductor devices for cryogenic power electronics - IV", Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006. APEC '06. https://www.researchgate.net/profile/Rm_Nelms/publication/224633030_SiGe_semiconductor_devices_for_cryogenic_power_electronics_-_IV/links/540606e90cf2bba34c1e3b86.pdf
- [60] F.Dulucq, "Presentation of the 'ROC' Chips Readout", TWEPP-09, in2p3-00425501

- (2009) <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.366.7287&rep=rep1&type=pdf>
- [61] Vishay Semiconductors, "Highbright 0603 ChipLED", <https://docs-apac.rs-online.com/webdocs/1180/0900766b81180479.pdf>
- [62] YOKOGAWA, "GS610 ソースメジャーユニット カタログ", https://www.yokogawa.co.jp/pdf/provide/J/GW/Bulletin/0000032337/0/BU7655-00.pdf?_ga=2.19178800.902783364.1517995710-867503942.1517995710
- [63] TEXIO(KENWOOD), "多出力直流安定化電源 PW-A シリーズ 取扱説明書", http://www.texio.co.jp/uploads/PW-A_B71-0013-01_J.pdf
- [64] Tectronix, "AFG1000 Series Arbitrary/Function Generator Quick Start User Manual"
- [65] S Conforti Di Lorenzo et al., JINST 8 C01027 (2013).