

# K<sup>0</sup>TO実験のための Neutron Collar Counter の製 作及び実機を用いた性能評価

京都大学大学院 理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻  
高エネルギー物理学研究室 修士課程 2年

関 繁人

平成 25 年 4 月 5 日

## 概要

K<sup>0</sup>TO 実験この崩壊分岐比の理論値は  $2.4 \times 10^{-11}$  と非常に小さく、シグナル事象の発見のためには、バックグラウンド事象を小さく抑えることが重要である。

K<sup>0</sup>TO 実験では、シグナル事象の検出にあたり、崩壊で生じた  $\pi^0$  起源の  $2\gamma$  を CsI カロリメーターで検出する。その際、それ以外の粒子が生成していないことを保証するために、全立体角を覆う検出器群 (veto 検出器) を用いる。

本論文では、崩壊領域上流部の beam hole を取り囲むよう設置される veto 検出器である Neutron Collar Counter (NCC) について述べる。この検出器の役割は、上流部での  $K_L$  崩壊で生じる  $\gamma$  を veto し、バックグラウンド事象を抑制することである。また、ビーム軸周辺に存在する中性子 (ハロー中性子) と検出器の相互作用によって生じた  $\pi^0$  や  $\eta$  が崩壊することで  $2\gamma$  を生成し、バックグラウンド源になりうる。そこで、ハロー中性子起源バックグラウンドを抑制すること、同時に、ハロー中性子起源のバックグラウンドを正確に見積もるため、ハロー中性子の energy と flux を測定することも NCC の重要な役割となる。

NCC は、複数の pure CsI 結晶を用いて構成、波長変換ファイバーを読み出しに用いることで上記の要求を満たすようデザインされている。バックグラウンド veto や、ハロー中性子の測定のためには、各結晶の発光量が十分大きく、かつ module 内で揃っていることが求められる。そこで私は、NCC に用いられる CsI 結晶の発光量を測定し、module 内の一様性を十分確保出来ることを確認し、実機の製作を行った。完成した実機についても光量を測定し、光量と一様性を十分確保することに成功した。

次に、読み出しに用いる光電子増倍管 (PMT) についての study を行った。NCC の設置場所は真空容器内であり、基板部の放電や発熱による温度上昇が問題となりうる。実際に、既存の PMT では放電が発生すること、発熱温度上昇を確認したため、真空対策を施した新型 PMT の開発を行い、放電の危険が抑えられていること、発熱による温度上昇も十分小さいことを確認した。また、1MHz 程度の高い counting rate による PMT の出力の変動が十分小さいこと、要求されるダイナミックレンジにおいて、出力の線形性が保証されていることも重要である。そこで私はこれらの項目を実際に測定し、各 PMT が NCC の運用環境において、十分使用に耐えうる性能を持っていることを確認した。

最後に、NCC を J-PARC 実験エリアにインストールし、宇宙線と  $K_L$  beam を用いて実機の性能を評価し、期待通りの性能が出ていることを確認できた。

# 目次

第 1 章	$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 探索実験	10
1.1	理論的背景	10
1.1.1	CP violation	10
1.1.2	$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の物理	11
1.2	$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊探索実験	12
1.2.1	E391a 実験	12
第 2 章	$K^0$ TO 実験	15
2.1	コンセプト	15
2.2	シグナル同定方法	15
2.3	検出器	17
2.3.1	CsI カロリメータ	17
2.3.2	Barrel Photon Veto 検出器	18
2.3.3	Collar Counter	19
2.3.4	荷電粒子検出器	19
2.3.5	Beam Hole Veto 検出器	19
2.4	ビームライン	20
第 3 章	NeutronCollarCounter	22
3.1	NeutronCollarCounter とは	22
3.2	E391a 実験における CC02	22
3.3	NCC のコンセプト	22
3.3.1	$K_L$ 崩壊起源のバックグラウンドの排除	24
3.3.2	ハロー中性子との相互作用によるバックグラウンドの抑制	24
3.3.3	ハロー中性子の energy と flux の測定	26
3.4	NCC のデザイン	26
第 4 章	NCC module 製作と性能評価	30
4.1	結晶光量に対する NCC の要求	30
4.2	結晶光量測定	30
4.2.1	測定方法	31

4.2.2	測定結果	32
4.3	module 製作	38
4.4	Module 光量測定	38
4.4.1	測定方法	39
4.4.2	測定結果	41
<b>第 5 章</b>	<b>PMT の性能評価と真空使用に向けた改良</b>	<b>45</b>
5.1	PMT の基本的性質	45
5.2	NCC が要求する PMT の性能	47
5.2.1	真空中での挙動に対する要求	47
5.2.2	出力安定性に対する要求	47
5.3	使用する PMT	48
5.4	真空試験	49
5.4.1	H7415	50
	新型 PMT の開発	50
5.4.2	H6568-10	53
5.4.3	全数試験	53
5.5	出力安定性の試験	55
5.5.1	レート耐性	55
5.5.2	パルスリニアリティ	57
5.5.3	全数試験	58
<b>第 6 章</b>	<b>NCC 実機の性能評価</b>	<b>64</b>
6.1	データ取得方法	64
6.2	真空中での動作	64
6.2.1	温度上昇	66
6.2.2	放電モニター	69
6.3	宇宙線を用いた性能評価	69
6.3.1	イベントディスプレイ	69
6.3.2	MIP に対する出力	69
6.3.3	各 module 内の uniformity	71
6.3.4	LED を用いた絶対光量の評価	73
6.4	$K_L$ beam を用いた性能評価	74
6.4.1	counting rate	74
<b>第 7 章</b>	<b>まとめ</b>	<b>77</b>
<b>付 録 A</b>	<b>謝辞</b>	<b>79</b>

# 目次

1.1	ユニタリー三角形と $K$ 中間子の崩壊モード . . . . .	11
1.2	$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊 diagram . . . . .	11
1.3	E391a 実験の解析結果。Z=270 付近に CC02 で生成した $\pi^0$ による event が見えている。また、Z=560 付近には、CV で $\pi^0$ が生成した event が 見えている。 . . . . .	13
1.4	E391a 実験 検出器群。beam は左下から右上に抜ける。 . . . . .	14
2.1	J-PARC 全体図 . . . . .	16
2.2	$K^0$ TO 検出器の全体図。崩壊領域の周りを veto 検出器で覆っている。 . . . . .	16
2.3	$\pi^0$ の崩壊位置の再構成に用いる各パラメータの関係 . . . . .	18
2.4	CsI カロリメータの Front View . . . . .	18
2.5	T1 ターゲット。5 枚の Ni 円盤からなり、厚さは合計で 53.9mm であ る。ターゲットは水に浸かっており、回転することで冷却を行う . . . . .	20
3.1	CC02 の位置 . . . . .	23
3.2	CC02 の front view と構造図 . . . . .	23
3.3	NCC の設置位置。module と読み出し用の PMT は全て Front Barrel の内側に置かれる . . . . .	24
3.4	上流部の $K_L$ 崩壊によるバックグラウンド。 $K_L$ の崩壊によって生じ た 2 つの $\pi^0$ からの 4 $\gamma$ のうち、異なる $\pi^0$ が起源となる 2 $\gamma$ が CsI に 入射すると、正しく崩壊位置を再構成できず、バックグラウンドにな りうる。NCC はこれらの $\gamma$ を止められる位置に設置されている . . . . .	25
3.5	CC02 バックグラウンド。ビーム中に存在する中性子と NCC が相互 作用し $\pi^0$ を生成、そこからの 2 $\gamma$ が CsI に入射しうる . . . . .	26
3.6	module の構造図。左は側面から見たもの。右は正面から見たもの。 . . . . .	28
3.7	NCC の読み出し概念図。アクリル板の中央部には 28 本の common ファ イバーが、その外側には片側 2 本ずつ、両側合わせて 4 本の individual ファイバーが front、middle、rear の順に並ぶ。 . . . . .	28
3.8	NCC 全体のデザインと $n/\gamma$ 分離のイメージ . . . . .	29
3.9	完成した NCC の Front view . . . . .	29

3.10 individual の energy deposit 分布。1GeV までの範囲で、99%の event を得られる	29
4.1 CC02 BG の simulation 結果。signal box に残った event における、NCC での energy deposit をプロットしたものである。threshold が 1MeV の場合と 2MeV の場合では、バックグラウンド数は 1.5 倍となる。	31
4.2 結晶光量測定 setup 概念図と実際の写真。setup は暗箱の中に収められている。	32
4.3 波長変換ファイバーを接着したアクリル板。	32
4.4 fiberPMT で LED の光を読みだした時の ADC プロット。pedestal と 1p.e. peak の差から gain を見積もった。	33
4.5 662keV $\gamma$ 線に対する ADC 分布。左上図は direct の ADC プロット。光電 peak を gaussian でフィットした。右上図は fiber の ADC プロット。光量が小さいため、pedestal や 1p.e.peak などが見えている。左下図は direct による cut をかけた後の fiber の ADC プロット。ここからペDESTAL を引いて、1p.e. あたりの ADC ch で割ったものが右下図である。光量としてはこのプロットの平均を用いた。このプロットは典型的な結晶におけるものであり、実際は結晶によって光量はバラついている。	34
4.6 光電 peak における光量が 27p.e. であった時に、662keV の $\gamma$ 線を用いて得られる光量分布の simulation。光電 peak の下側には compton 散乱のなだれ込みが存在している。	35
4.7 各結晶の光量測定結果。この時点では長さの factor は考慮していない。	35
4.8 結晶の長さの違いによる集光率の違いの概念図。結晶が小さくなるほど direct の立体角は大きく、fiber の立体角は小さくなる。また、結晶が小さいほど、アクリル板から光が散逸する効果が大きい	36
4.9 同じ結晶から切り出した middle と rear の光量比。平均の誤差は 2.6%、RMS は 18%である。	37
4.10 同じ結晶から切り出した front の 2 結晶の光量比。平均の誤差は 3.8%、RMS は 18%である。	37
4.11 サイズの補正をかけて得られた module 内での uniformity の見積もり。誤差は factor を決める際の middle と rear の光量比の RMS から求めている。	37
4.12 ファイバーを接着したアクリル板。右から rear、middle、front の領域に分かれている。	38
4.13 左図は common のファイバーアダプター。28 本のファイバーが円形に並んで接着されている。右図は individual のファイバーアダプター。4 本のファイバーが接着されている。	39

4.14	接着された3結晶。左から front、middle、rear の順に接着されている。	39
4.15	module に反射材を巻く作業	40
4.16	SUS を巻き、完成した module	40
4.17	module 光量測定 setup。結晶の上下に設置したプラスチックシンチレータを用いて宇宙線を tag し、common と individual をそれぞれ読み出す。	40
4.18	オシロスコープで読み取った common と individual の波形。黄色は common、青色は individual のものである。立ち下がり は 5ns 程度、pulse width は 100ns 程度である。	41
4.19	trigger 用のプラスチックシンチレータの ADC プロット。左図は front、中図は middle、右図は rear。このプロットから、trigger の cut 条件をそれぞれ 500、250、500 とした	42
4.20	rear に hit した event における common と individual の ADC 分布。左図が common、右図が individual。individual については、common による cut をかけてある。MIP peak がどちらも見えており、Landau 関数でフィットし、MPV を求めた。peak は 40MeV の energy deposit に対応している。	42
4.21	左図は common の光量測定結果。最低光量は 4.3p.e. であり、ほぼ全ての module で 4.5p.e. を達成している。右図は individual の光量測定結果。こちらも 1MeV あたりの光量を示してある。最低光量は 0.48p.e. であり、ほぼ全ての module で 0.5p.e. を達成している。どちらの図も誤差は 1~2% 程度と十分小さく、エラーバーはこの図では見えない。	43
4.22	各 module の uniformity。3 結晶のそれぞれに対応する common の出力とそれらの平均の間のずれを示した。	43
4.23	各 module の crosstalk のヒストグラム。上段左：front から middle、上段中：front から rear、上段右：middle から front、下段左：middle から rear、下段中：rear から front、下段右：rear から middle	44
5.1	一般的な PMT の構造。図は浜松ホトニクス社が提供している、H7415 の構造図である。	46
5.2	高レート環境下におけるダイノードの電圧比の変動の概念図。	47
5.3	抵抗の温度と許容電圧の関係。70°C を超えると、定格での使用が出来ず、温度が上がるにつれて許容電圧が下がっていく。	48
5.4	common での 1module あたりの counting rate。threshold を 1 MeV にすることで、counting rate は 1MHz に達する	48
5.5	H7415 外観図	49
5.6	H6568-10 外観図	49

5.7	H7415V の構造図。先端までモールドされており、光電面は 6mm 内側にある。	51
5.8	通常の基板部 (左) と開発した新型基板部 (右)	51
5.9	モールドされた基板部と、真空試験 setup。入手時点ではモールド材のサイズが大きかったため、実際の PMT の内径に近いサイズにカットして使用した。	52
5.10	新型基板の温度上昇。赤線はアルミ箔の外側、緑線はアルミ箔の内側で測定した温度と、基板部のサーミスタの温度との差を示したものである。	52
5.11	H6568-10 真空試験 setup。真空槽の中にスタンドを設置し、PMT を固定した。	53
5.12	放電モニター回路図	54
5.13	放電モニター多 ch 化回路図	54
5.14	thermistor 読み出し回路。	54
5.15	100k $\Omega$ の抵抗を直列につないだ時の thermistor の特性曲線。5V 電源を用いると、-40 $\sim$ 120 $^{\circ}\text{C}$ までの範囲で測定が可能である。	55
5.16	H7415V の温度上昇。真空引きの初期はターボポンプを使っていたため 0.3Pa 程度になっていた。その後ターボポンプを止め、4Pa での試験を行った。	55
5.17	放電モニターで得られた放電波形	56
5.18	H7415V の放電回数プロット。120 時間の経過後、放電が止まっている	56
5.19	レート耐性測定 setup	56
5.20	H7415 rate 耐性プロット。1kHz での出力で規格化して示してある。	57
5.21	H6568-10 rate 耐性プロット。1kHz での出力で規格化して示してある。	57
5.22	H7415V のリニアリティプロット	58
5.23	H6568-10 のリニアリティプロット	58
5.24	H6568-10 の典型的な gain variation。浜松ホトニクス社の資料をもとに作成した。数値は、最大の gain の ch を 100 として規格化したものである	59
5.25	HV 設定に対する H7415V の発熱量。抵抗値から算出した値である。	59
5.26	全数測定 setup	60
5.27	gain 測定時の ADC プロット。pedestal と 1p.e. が見えている。amp を入れているために pedestal の幅が広がっている。	60
5.28	H7415V gain curve	61
5.29	H6568-10 ch scan プロット。左図は左右方向、右図は上下方向である。	61
5.30	H6568-10 gain curve	62
5.31	各 PMT の gain variation。16ch の平均からのずれの大きさをプロットしたもの	62



5.32	ch毎のgain variation。典型的な1本について示している。最大のgainであったchを100として規格化している。 . . . . .	62
5.33	H6568-10 リニアリティ測定結果。各PMT、各chのノンリニアリティをプロットしている . . . . .	63
6.1	NCCの信号読み出しの流れ . . . . .	65
6.2	FADCで得られたNCCの波形データ。今回の解析では、頂点の値をADC countとして定義した。 . . . . .	65
6.3	K <sup>0</sup> TO detectorの真空排気システム。 . . . . .	66
6.4	2013年1月のrunにおける真空容器内部の各所の気圧変化。NCCの設置されているFront Barrel付近は、1週間で3Paになった。 . . . .	67
6.5	サーミスタ読み出し基板回路図。真空試験で用いた回路を改良し、64chまで読み出せるようになっている。 . . . . .	67
6.6	温度上昇plot . . . . .	68
6.7	サーミスタの温度特性。25~30℃付近において、誤差は5%程度である。 . . . . .	68
6.8	NCCのイベントディスプレイ。左上から右下に向けて、宇宙線が入射している様子がわかる。 . . . . .	70
6.9	選んだ宇宙線eventのイメージ図。縦の同じ列の全てのmoduleにhitがあることを要求した。 . . . . .	71
6.10	宇宙線event ADC plot。左図はcommon、中図はfrontの典型的なplotである。どちらも宇宙線のMIP peakが確認できる。また、右図は最も誤差が大きかったchのプロット。 . . . . .	71
6.11	各moduleのMIP peakのMPV値。左上がcommon、右上がfront、左下がmiddle、右下がrear。commonについては、RMSが5%となった。individualは3倍の開きが見られる . . . . .	72
6.12	NCC実機のuniformity。uniformityは最大で20%であった。 . . . .	72
6.13	LEDの設計イメージ。LEDはPMTを固定しているUチャンネルの上に設置され、広い範囲のファイバーを照らしている。 . . . . .	73
6.14	取り付けられたLED。中央部の白く見えるものがLEDである。 . . .	73
6.15	典型的なLEDシグナルのADCプロット。pedestalと1p.e. peakが確認できる . . . . .	74
6.16	LEDを用いて光量の評価ができた20moduleについて、module製作後の測定と今回のrunでの光量の比較をしたもの。 . . . . .	74
6.17	TMON triggerをtriggerにしたときの各イベントのtime stamp。time stampは1countが8nsに対応しており、6sのspillのうち、2sの間beamが出ているという構造が見えている . . . . .	75

- 6.18 beam spill 中の common の典型的な energy plot。このうち、1MeV を超えている event のみを用いた . . . . . 76
- 6.19 各 module の counting rate。左図は common、右図は individual について示したもの。common の counting rate は individual のものに対して5倍程度高くなっている。また、TMON trigger を trigger にした場合、他の2種の trigger に比べて2倍程度高くなっていることがわかる。common、individual のどちらについても、最内層の module は counting rate が高く、外層に行くにつれて下がっている。また、individual は、rear の rate が front や middle に比べて低い (図中で2層に分かれているのが見える)。 . . . . . 76

# 表 目 次

1.1 E391a 実験におけるバックグラウンド。主要なバックグラウンドは ビーム中の中性子の相互作用によるものである。 . . . . .	13
5.1 NCC で使用する各 PMT の仕様 . . . . .	49

# 第1章 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 探索実験

本章では、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  探索実験の動機となる理論的背景に触れ、その後  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  探索実験についての概要を述べる。

## 1.1 理論的背景

現在の宇宙において、物質と反物質の存在比は大きく偏っており、物質優勢宇宙となっている。これは CKM matrix の複素位相に起因する CP violation が存在することが要因の一つである [1]。しかし、定量的な説明に対しては CKM matrix のみでは不十分であることがわかっており、新しいメカニズムが必要とされている。中でも、標準理論を超える物理 (Beyond SM) の探索がこれを解明する鍵となると考えられている。

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊は、崩壊分岐比の理論的不定性が小さく [2]、標準理論の検証に非常に有効であるため、“golden mode” と呼ばれる。また、この崩壊は loop diagram を通して起きる崩壊であり、未知の重い粒子が loop を描くことが可能である。それによる崩壊分岐比の変化を観測できれば、Beyond SM への大きな指針となる。

### 1.1.1 CP violation

CKM matrix は

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

と表される。Wolfenstein パラメータ表示により、これは

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 & \lambda & \lambda^3 A(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & \lambda^2 A \\ \lambda^3 A(1 - \rho - i\eta) & -\lambda^2 A & 1 \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

となる。また、ユニタリー条件より

$$V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0 \quad (1.3)$$

である。現在の実験値により、 $\lambda \simeq 0.22$  であることを用いて、

$$V_{ub}^* - \lambda V_{cb}^* + V_{td} = 0 \quad (1.4)$$

と近似できる。よってユニタリ条件は複素平面上に三角形を描くことになる。図 1.2 はユニタリー三角形と呼ばれる、この三角形の高さは複素位相パラメータ  $\eta$  によって表されるため、これを測定することで、CP violation の大きさを決定することが出来る。

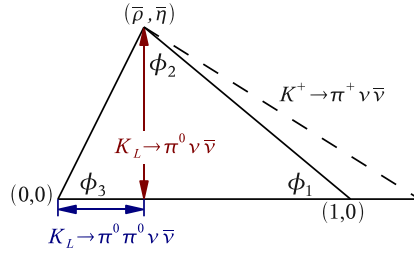


図 1.1: ユニタリー三角形と K 中間子の崩壊モード

### 1.1.2 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の物理

標準理論における  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊の diagram は図??によって表される。崩壊分岐比は

$$Br(K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) = (2.20 \pm 0.07) \times 10^{-10} Im(V_{ts}^* V_{td}) X(x_i) \quad (1.5)$$

で表され、現在の予測値は  $2.43 \times 10^{-11}$  である [2]。ここで  $X(x_i) = 1.464 \pm 0.041$  は Inami-Lim loop function の値である [3]。  $Im(V_{ts}^* V_{td}) = A^2 \lambda^5 \eta$  と表されることから、崩壊分岐比は  $\eta^2$  に比例することがわかる。また、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  のハドロン行列要素はよく知られている  $K_L \rightarrow \pi e \nu$  のハドロン行列とアイソスピン対称であるため、正確に知ることが出来るため、崩壊分岐比の理論的な不定性は小さい。さらに、こ

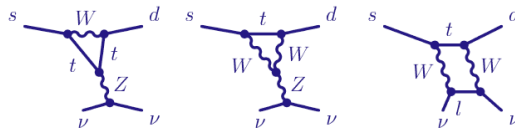


図 1.2:  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊 diagram

の崩壊モードは CP を直接的に破っていることが知られている。これらのことから、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊分岐比の探索は、CKM matrix による CP violation の検証に有用であると言える。

また、Grossman と Nir により、 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  の分岐比から理論モデルによらない分岐比の上限値が求まることが示されており [4]、上限値は

$$Br(K_L^0) \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu} < 1.4 \times 10^{-9} \quad (1.6)$$

となっている。この上限値を上回る感度での探索は、Beyond SM の探索手段として大きく注目されている。

## 1.2 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊探索実験

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊は、非常に小さい分岐比であることと、始状態、終状態ともに全ての粒子が中性であるという点から、実験は困難であり、未だ崩壊事象は観測されていない。現在の崩壊分岐比は K<sup>0</sup>TO 実験の先行実験である E391a 実験によって上限値が与えられており、上限値は  $2.6 \times 10^{-8}$  である [5]。K<sup>0</sup>TO 実験では、世界初の Grossman-Nir limit を超えた感度での崩壊探索を行い、崩壊事象の発見を目標としている。

### 1.2.1 E391a 実験

E391a 実験は茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構の 12GeV 陽子シンクロトロン (KEK-PS) を用いて行われ、2004 年 2 月から 2005 年 12 月まで 3 度の物理ランを行った。この実験は  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊探索に特化した世界初の探索実験であると同時に KOTO 実験のパイロット実験でもあった。KEK-PS からの一次陽子ビームをプラチナターゲットに入射し、出てきた二次ビームを一次ビームに対して  $4^\circ$  で取り出すことで  $K_L^0$  ビームを生成する。このビームをビームライン中に置かれたコリメーターによってコリメートすることでターゲットから見た立体角を  $12.6 \mu \text{ str}$  と非常に細いビームにして崩壊領域に導くことで、崩壊点を制限している。つぎに E391a 実験の検出器群を図 1.4 に示す。まず  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊のうち  $\pi^0$  からの  $2\gamma$  を CsI 電磁カロリメータで検出する。そして崩壊領域の全立体角を veto 用検出器で囲い、1つの  $\pi^0$  以外の粒子が何も無かったことを保証、崩壊事象の同定を行う。またビーム中に存在する中性子と検出器内の残留ガスが反応して  $\pi^0$  が生成されるとバックグラウンド要因となってしまうため、崩壊領域は  $10^{-5} \text{ Pa}$  という高真空環境に置かれている。E391a 実験において、シグナル事象は発見できなかったが、現在の崩壊分岐比の上限値はこの実験結果から決められており、

$$Br(K_L^0) \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu} < 2.6 \times 10^{-8} \quad (1.7)$$

となっている。E391a 実験においては、ビーム中に存在する中性子と CC02 と呼ばれる上流部の検出器の相互作用による  $\pi^0$  の生成に由来するバックグラウンドが主要なバックグラウンドであった。表 1.1 に E391a 実験におけるバックグラウンドを示す。

表 1.1: E391a 実験におけるバックグラウンド。主要なバックグラウンドはビーム中の中性子の相互作用によるものである。

CC02- $\pi^0$	$0.66 \pm 0.39$
CV- $\pi^0$	$< 0.36$
CV- $\eta$	$0.19 \pm 0.13$
$K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$	$(2.4 \pm 1.8) \times 10^{-2}$
backward $\pi^0$	$< 0.05$
Total	$0.87 \pm 0.41$

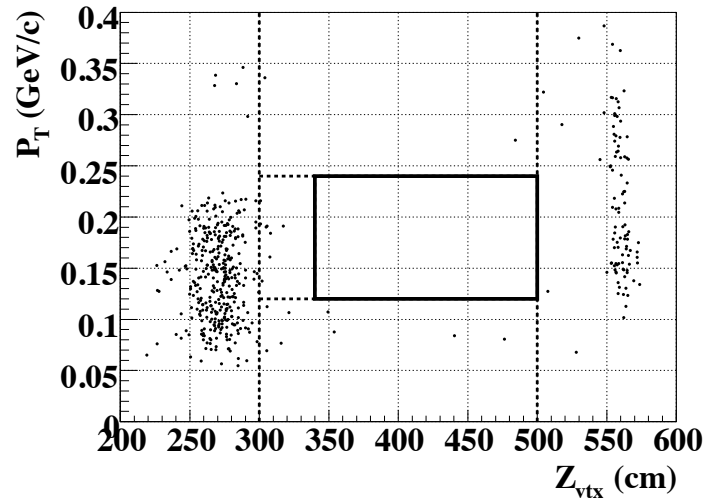


図 1.3: E391a 実験の解析結果。Z=270 付近に CC02 で生成した  $\pi^0$  による event が見えている。また、Z=560 付近には、CV で  $\pi^0$  が生成した event が見えている。

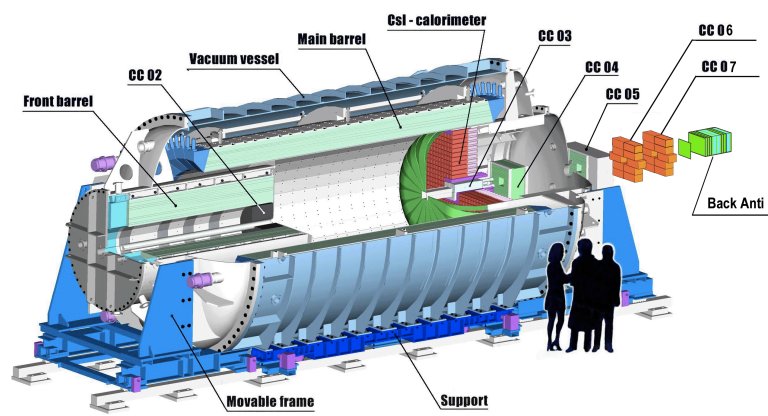


図 1.4: E391a 実験 検出器群。beam は左下から右上に抜ける。



## 第2章 $K^0$ TO実験

$K^0$ TO 実験は、茨城県東海村に建設された大強度陽子加速器 J-PARC(図 2.1) で 2013 年から行われる予定の  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  探索実験である。J-PARC 陽子シンクロトロンは 30GeV で運転しており、そのビーム強度は最大強度においては spill あたりの陽子数として  $2 \times 10^{14}$ POT(Proton on Target) に達すると見込まれている。これにより、E391a 実験で用いられた KEK PS の約 100 倍の  $K_L$  生成数が期待できる。また、ビーム軸周りに存在する中性子 (ハロー中性子) が少ないビームラインを建設することで、E391a 実験での主要バックグラウンド源であった、ハロー中性子起源のバックグラウンドを抑制する。以下に、実験コンセプトと検出器について述べる。

### 2.1 コンセプト

$\nu$  の検出の困難さから、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊では、終状態で観測できる粒子は  $\pi^0$  のみである。 $\pi^0$  は、98.8% の分岐比で  $2\gamma$  に崩壊する。このとき、 $\pi^0$  の寿命は  $8.4 \times 10^{-17}$ s と極めて短く、 $K_L$  の崩壊位置と  $\pi^0$  の崩壊位置は同一地点であるとみなしてよい。

$K^0$ TO 実験では、「 $\pi^0$  からの  $2\gamma$  以外の粒子が存在しない」ということをシグナルの条件とする。 $2\gamma$  については、CsI 電磁カロリメータで位置とエネルギーを測定、 $\pi^0$  の再構成を行う。同時に、「それ以外に何も無い」ことを保証するため、崩壊領域全体を veto 検出器で覆う (図 2.2)。また、ペンシルビームと呼ばれる細く絞ったビームを使用することで、崩壊点をほぼビーム軸上に限定することができる。崩壊領域は高真空 ( $10^{-5}$ Pa) にし、残留ガスとビームの相互作用によって生じた  $\pi^0$  に由来するバックグラウンドを抑制する。

### 2.2 シグナル同定方法

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊事象同定には、主に再構成した  $\pi^0$  のビーム軸上の位置  $Z_{vtx}$  と横運動量成分  $P_t$  を用いる。先に述べた通り、 $Z_{vtx}$  は  $K_L$  の崩壊地点と見なせる。同定条件のうち、主要なものは以下の 2 つである。

- FrontBarrel の上流端を  $Z=0$  とし、 $3\text{m} < Z_{vtx} < 5\text{m}$  の範囲で崩壊していること



図 2.1: J-PARC 全体図

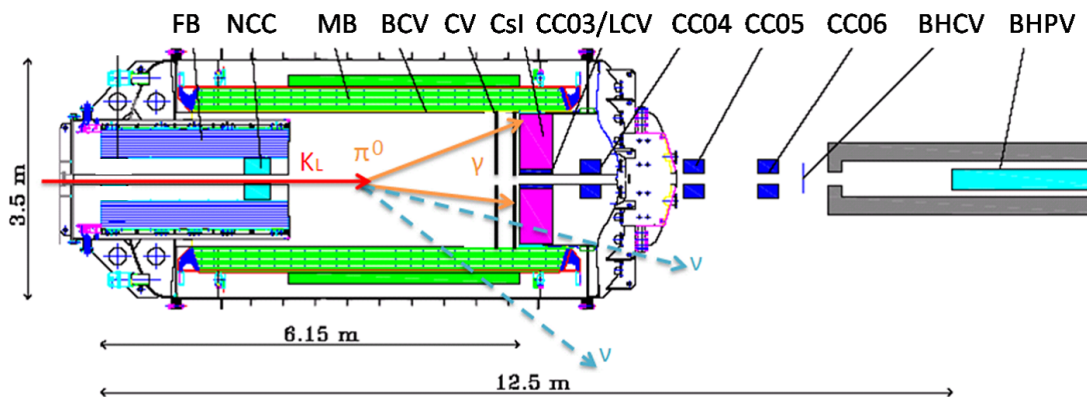


図 2.2:  $K^0$ TO 検出器の全体図。崩壊領域の周りを veto 検出器で覆っている。

崩壊領域内で確実に崩壊していることを要求し、CC02 BG のようなバックグラウンドを落とす。

- 高い横運動量をもつこと ( $130\text{MeV}/c < P_t < 250\text{MeV}/c$ )

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊では、 $\nu$  が運動量を持ち去ってしまうため、高い横運動量を持つことになる。 $K_L \rightarrow 2\gamma$  などの崩壊では、こういった高い横運動量は観測されない。

$\pi^0$  の再構成のためには、CsI 電磁カロリメータでの  $2\gamma$  の情報を用いる。以下では  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊過程の同定方法について述べる。

$\pi^0$  の崩壊位置をビーム軸上であると仮定し、CsI カロリメータで測定した  $\gamma$  の入射位置とエネルギーを用いることで、幾何学的な条件から

$$r_{12}^2 = d_1^2 + d_2^2 - 2d_1d_2\cos\theta \quad (2.1)$$

$$d_1 = r_1^2 + d_z^2 \quad (2.2)$$

$$d_2 = r_1^2 + d_z^2 \quad (2.3)$$

が成り立つ。ここで  $r_{12}$  は 2 つの  $\gamma$  の間の CsI 表面上での距離、 $\theta$  は 2 つの  $\gamma$  の成す角、 $d_1$  と  $d_2$  は  $\gamma$  の入射位置と  $\pi^0$  の崩壊位置との距離、 $r_1$  と  $r_2$  は  $z$  軸と  $\gamma$  の入射位置との距離、 $d_z$  は  $\pi^0$  崩壊点と CsI カロリメータ表面の距離である。不変質量として  $\pi^0$  の質量  $M_{\pi^0}$ 、入射  $\gamma$  のエネルギー  $E_1$ 、 $E_2$  を用いると、

$$\cos\theta = 1 - \frac{M_{\pi^0}^2}{2E_1E_2} \quad (2.4)$$

が成り立つ。以上の式から、崩壊位置  $Z_{\nu\bar{\nu}}$  を求まる。さらに、この崩壊位置を用いることで、2  $\gamma$  の運動量ベクトルが求まり、 $\pi^0$  の横運動量を計算することが出来る。K<sup>0</sup>TO 実験では、求めた崩壊位置と横運動量の値などの cut 条件を用いて、CsI で検出された 2  $\gamma$  が  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊起源であることを示す。

## 2.3 検出器

K<sup>0</sup>TO 実験の各検出器について説明する。

### 2.3.1 CsI カロリメータ

CsI カロリメータは、 $\pi^0$  崩壊で生じた  $2\gamma$  の位置とエネルギーを測定する為の電磁カロリメータである。E391a 実験で使用されていた CsI カロリメータが  $7 \times 7 \times 30\text{cm}^3$  の CsI 結晶を使用していたのに対し、K<sup>0</sup>TO 実験の CsI カロリメータは、長さ 50cm

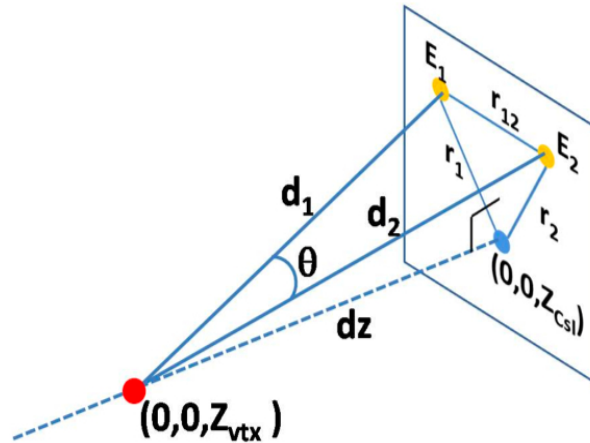


図 2.3:  $\pi^0$  の崩壊位置の再構成に用いる各パラメータの関係

の CsI 結晶を使用する。この CsI は、アメリカのフェルミ国立研究所 (FNAL) で行われた KTeV 実験で使用されたもので、 $2.5 \times 2.5 \times 50\text{cm}^3$  と、 $5 \times 5 \times 50\text{cm}^3$  の 2 種類を用いる。中心部に  $2.5 \times 2.5 \times 50\text{cm}^3$  の結晶を 2240 個、その外側に  $5 \times 5 \times 50\text{cm}^3$  の結晶を 335 個並べて使用する (図 2.4 参照)。

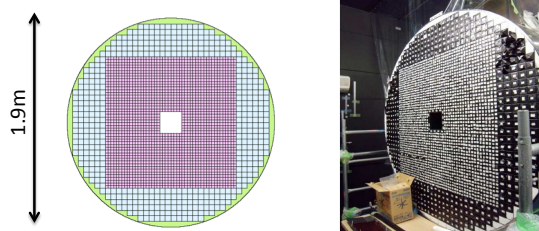


図 2.4: CsI カロリメータの Front View

E391a の CsI カロリメータより  $z$  方向に長くなった事で、電磁シャワーの漏れによる  $\gamma$  のエネルギーの不定性が小さくなっている。これにより、CsI で検出された  $2\gamma$  から再構成される  $\pi^0$  の崩壊点の不定性が小さくなっている。また、結晶が細分化されたことで、位置分解能等が上昇している。

### 2.3.2 Barrel Photon Veto 検出器

Barrel Photon Veto のは  $K_L$  の崩壊により生成される  $\gamma$  を検出し、veto するための検出器であり、鉛とシンチレーターによる sampling calorimeter である。読み出しに

は波長変換ファイバーとPMTを使用する。この検出器は、E391a実験で使用したものを再利用する。Barrel Photon Vetoは崩壊領域の前方にあるFront Barrel(FB)と崩壊領域を覆うMain Barrel(MB)から構成される。FBは崩壊領域よりも前で崩壊した $K_L$ の崩壊による $\gamma$ や、崩壊領域で崩壊し上流に飛んできた $\gamma$ がターゲットである。一方MBは崩壊領域で崩壊した $K_L$ からの $\gamma$ がターゲットとなる。 $\gamma$ の検出効率を高めるため、MBはupgradeを計画しており、現在studyが進んでいる。

### 2.3.3 Collar Counter

CollarCounterはビーム軸に沿って検出器の外へ逃げる粒子を捕まえるために、ビーム付近に設置された検出器の総称であり、NCC、CC03、CC04、CC05、CC06のことを指す。NCCについては第3章で述べる。

CC03はCsIカロリメータ内層部に、CC04は真空容器内最下流、CsIカロリメータの直後に設置される。CC03、CC04はどちらもpure CsIで構成され、ビームホールを抜けていく $\gamma$ 線をvetoすることが役割となっている。

$K^0$ TO実験ではさらに下流に向かってビームホールを抜けてくる粒子のvetoのためにCC05、CC06が設置される。

### 2.3.4 荷電粒子検出器

$K_L$ の崩壊においては、大半が $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ (12%),  $K_L \rightarrow \pi^\pm\mu^+\pi^0$ (27%),  $K_L \rightarrow \pi^\pm e^+\pi^0$ (40%)のように荷電粒子を含んでいるため、例えば $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ の $\pi^0$ からの $2\gamma$ がCsIで検出され、残りの $\pi^+$ 、 $\pi^-$ が検出されなければ、バックグラウンドになってしまう。このため、荷電粒子をvetoする検出器が必要であり、CsIカロリメータ前面に設置されるCharged Veto(CV)、MB内側に設置されるBarrel Charged Veto(BCV)、CC03内側に設置されるLiner CV (LCV)、NCC内側に設置されるNCC.LinerCV(NCC.LCV)が存在する。BCVについてはE391aで使用したものを再利用する。CV、LCV、NCC.LCVはそれぞれ厚さ3mmのプラスチックシンチレータで構成されている。CVはCsIカロリメータ直前とcm上流に、LCVはCC03内側のCFRP製ビームパイプ内壁に、NCC.LCVはNCC内側のCFRP製ビームパイプ内壁に、それぞれ取り付けられる。

### 2.3.5 Beam Hole Veto 検出器

バックグラウンド抑制のためには、ビームホール中に逃げた粒子をvetoすることも重要であり、 $K^0$ TO実験では $\gamma$ 線 veto 検出器であるBeam Hole Photon Veto(BHPV)、荷電粒子 veto 検出器であるBeam Hole Charged Veto(BHCV)が置かれる。これらは

いずれも、ビーム中に大量に存在する中性子に対しては不感であること、ビーム中という高レート環境での安定した動作が求められる。BHPVは鉛による $\gamma$ コンバータとエアロジェル放射体を用いたチェレンコフ検出器である。BHCVはプラスチックシンチレータまたはガス検出器の使用が検討されている。ガス検出器としては、ガスシンチレーション光をPMTで読み出す方式を取ることで、高レート耐性を確保している。

## 2.4 ビームライン

K<sup>0</sup>TO実験で用いる $K_L$ ビームラインについて述べる。陽子シンクロトロンから取り出された陽子ビームをT1 targetと呼ばれるターゲットに照射、生成した二次粒子を $16^\circ$ 方向に引き出し、2つのコリメータで細く絞る。T1 targetはNi円盤5枚で構成され、冷却水中に浸かった状態で回転することで冷却がなされる。ただし、現在はNi標的を用いず、金のロッドによる標的が使用されている。コリメータの前には鉛の $\gamma$ アブソーバが置かれ、 $\gamma$ を出来るだけ排除している。コリメータ間にはマグネットが置かれ、荷電粒子はここで取り除かれる。コリメータは、

- ビームを細く絞る
- ハロー中性子をできるだけ少なくする

という観点で設計されている。

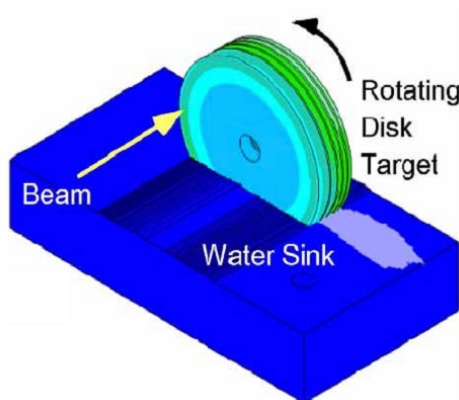


図 2.5: T1 ターゲット。5枚のNi円盤からなり、厚さは合計で53.9mmである。ターゲットは水に浸かっており、回転することで冷却を行う

まず、ビームを絞ることについては、 $\pi^0$ の横運動量の不定性を減らす、各検出器のビームホールを小さくすることでビームホールを通過して逃げる粒子を減らす、という目的から設計され、立体角は $7.8\mu\text{str}$ になっている。

次にハロー中性子の削減については、ビーム周りに存在するハロー中性子が検出器と相互作用を起こして $\pi^0$ や $\eta$ 中間子を生成、それらの崩壊で生じた $2\gamma$ がバックグラウンドとなる。これらを抑制する為に、 $K_L$ に対してハロー中性子の数が少ないビームラインを設計する必要がある。K<sup>0</sup>TO実験では、E391a実験に比べてハロー中性子と $K_L$ の数の比が66倍小さく設計されている。

## 第3章 NeutronCollarCounter

本論文の主要テーマである、Neutron Collar Counter について述べる。

### 3.1 NeutronCollarCounter とは

Neutron Collar Counter(NCC) はビーム軸周りに設置される検出器 (Collar Counter) の1つであり、E391a 実験では CC02 と呼ばれていた検出器に相当する。この検出器は崩壊領域の上流側、ビーム軸を囲うように設置され、上流部で崩壊した  $K_L$  由来の  $\gamma$  を veto し、 $K_L$  起源バックグラウンドを抑制する事が主な役割である。

### 3.2 E391a 実験における CC02

E391a 実験における CC02 は図 1.4 で示したように、検出器上流部のビーム軸周りに設置されていた検出器である。CC02 は鉛とプラスチックシンチレーターを積層したサンドイッチカロリメータである。読み出しは波長変換ファイバーを用いていた(図 3.2)。上流側と下流側は鉛 1mm/シンチレーター 5mm を 1layer として 7layer、中心は鉛 2mm/シンチレーター 5mm を 1layer として 29layer 積層してあり、Total の放射長は  $15.73X_0$  であった。これにより、 $K_L$  崩壊由来の  $\gamma$  を veto することが CC02 の役割であった。

E391a 実験では、この CC02 とハロー中性子の相互作用によって生成した  $\pi^0$  によるバックグラウンドが主要なバックグラウンドであった (CC02 BG)。CC02 は検出器内に鉛の不感領域が存在しており、ここでハロー中性子が相互作用するような event を検出することが困難であったことが原因の1つである。この問題を解決するよう、NCC はデザインされている。

### 3.3 NCC のコンセプト

NCC は、崩壊領域上流部の Front Barrel 内側、NCC の結晶下流端が Front Barrel の下流端から 30cm 上流になるように設置される。

NCC は、以下の3点を考慮してデザインされた。



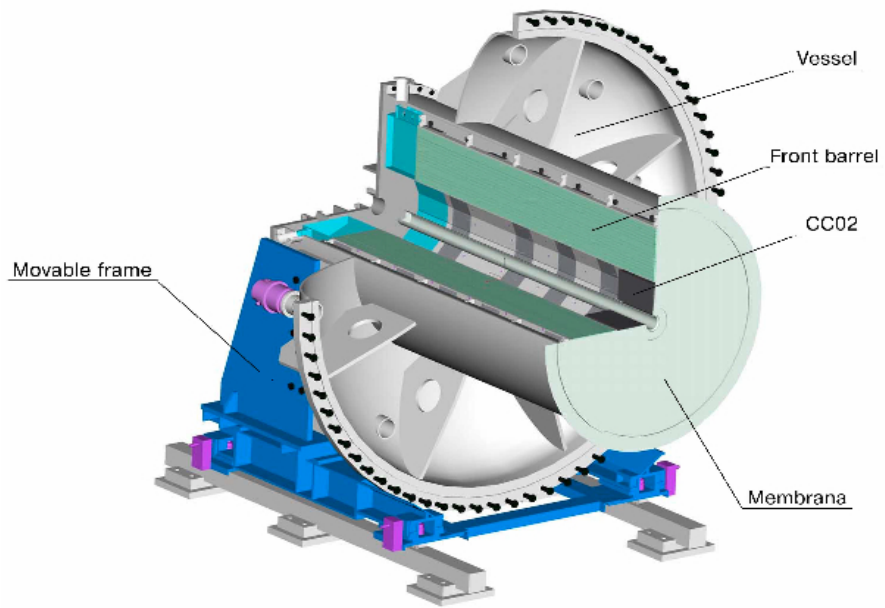


図 3.1: CC02 の位置

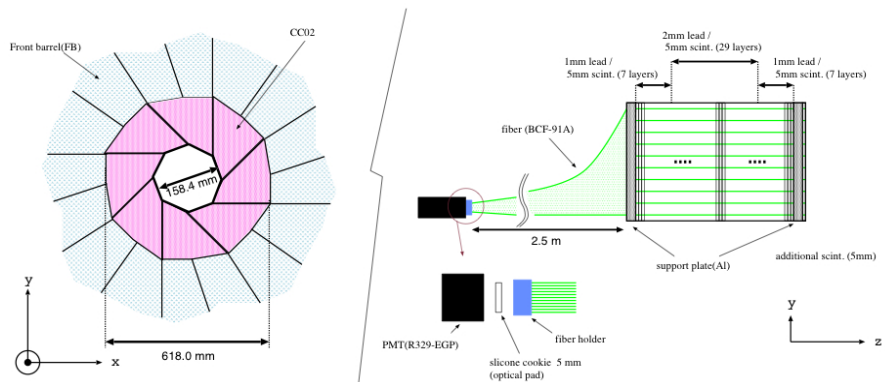


図 3.2: CC02 の front view と構造図

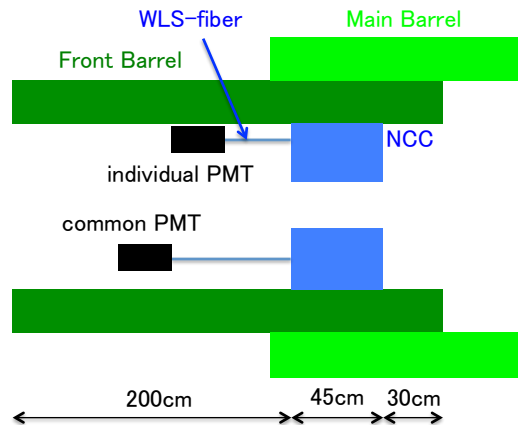


図 3.3: NCC の設置位置。module と読み出し用の PMT は全て Front Barrel の内側に置かれる

- $K_L$  崩壊起源のバックグラウンドの排除
- ハロー中性子の相互作用によって生成した  $\pi^0$  によるバックグラウンドの抑制
- ハロー中性子の energy と flux の測定

それぞれについて以下で述べる。

### 3.3.1 $K_L$ 崩壊起源のバックグラウンドの排除

NCC の 1 つ目の役割は、 $K_L$  崩壊起源のバックグラウンドの排除である。崩壊領域よりはるか上流で  $K_L$  が崩壊し、 $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$  や  $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^0$  など、複数の  $\pi^0$  を生成した場合を考える。これらの  $\pi^0$  はそれぞれ  $2\gamma$  に崩壊するが、それらのうち 2 つが CsI に入射し、それ以外の  $\gamma$  を検出出来ないと、 $K_L \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}$  event と見間違ふ可能性が生じる (図 3.5)。崩壊が上流部で起こっているため、 $\gamma$  を検出できない可能性が高い。

そこで、NCC は崩壊領域と上流部を隔てるように設置され、上流部での  $K_L$  崩壊による  $2\gamma$  を止める役割を担う。

### 3.3.2 ハロー中性子との相互作用によるバックグラウンドの抑制

NCC の 2 つ目の役割は、先に述べた CC02 BG の抑制である。ハロー中性子と CC02 の相互作用によって  $\pi^0$  が生成、 $2\gamma$  に崩壊して CsI に入射することが CC02 BG の要因である。本来であればこういった event は CC02 付近に崩壊位置が存在し、cut

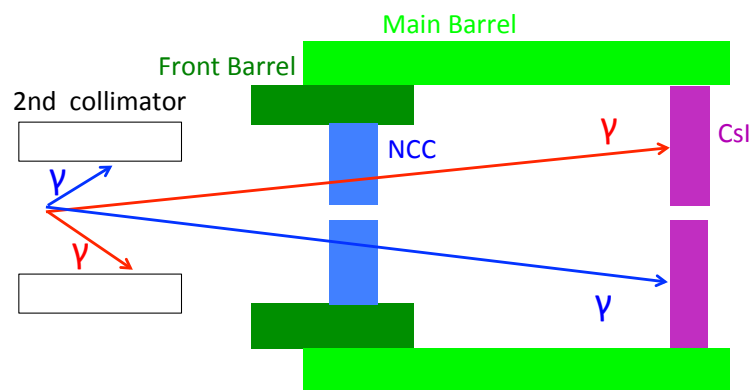


図 3.4: 上流部の  $K_L$  崩壊によるバックグラウンド。  $K_L$  の崩壊によって生じた2つの  $\pi^0$  からの4  $\gamma$ のうち、異なる  $\pi^0$  が起源となる2  $\gamma$  がCsIに入射すると、正しく崩壊位置を再構成できず、バックグラウンドになりうる。NCCはこれらの  $\gamma$  を止められる位置に設置されている

条件によって取り除かれるが、CsIでenergyを低く見積もってしまう（シャワーの漏れ等）と、崩壊位置が下流にずれ込むことになり、signal box内に入ってしまう可能性が生じる。こういったeventがE391a実験での主要バックグラウンドであったため、 $K^0$ TO実験ではCC02 BGを抑制する対策が取られている。対策としては、

1. ハロー中性子の割合が少ないビームライン
2. CsI カロリメータの改良
3. CC02 (NCC) の位置の変更
4. ハロー中性子と相互作用した event を確実に検出できる検出器 (NCC) の開発

があげられる。

前章で述べた通り、ビームラインの設計段階でハロー中性子を抑えることで、バックグラウンドを抑制している。また、CsIカロリメータの長さが30cmから50cmになり、シャワーの漏れが抑えられることで、energyをより精度よく測定することが可能になっており、崩壊位置を決定する精度が向上している。これにより、signal box内に入ってしまうCC02 BG eventを減少させることができる。NCCの位置の変更としては、CC02と比較して上流側に30cm移動させ、signal boxへのeventしみが抑制されている。しかし、ハロー中性子との相互作用で生じた中性子などの二次粒子と、 $\pi^0$ からの2 $\gamma$ のうち片方がCsIに入射、もう一方を検出し損ねるようなeventもCC02 BGには含まれている。こういったeventを排除するためには、ハロー中性子が相互作用した場合に出来る限り検出できるような設計にする必要がある。

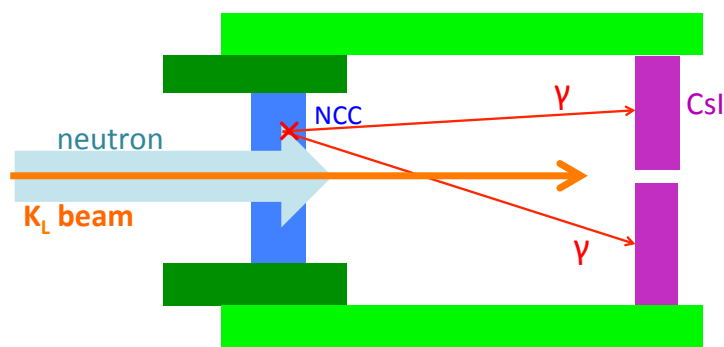


図 3.5: CC02 バックグラウンド。ビーム中に存在する中性子と NCC が相互作用し  $\pi^0$  を生成、そこから  $2\gamma$  が CsI に入射する

### 3.3.3 ハロー中性子の energy と flux の測定

ハロー中性子起源のバックグラウンドには、CC02 BG の他に、CV と相互作用した  $\pi^0$  や  $\eta$  中間子が  $2\gamma$  に崩壊することによるものが存在している (CV- $\pi^0$  BG、CV- $\eta$  BG)。こうしたバックグラウンドを排除するよう CV はデザインされているが、実際にバックグラウンドの値を評価する際には、ハロー中性子の energy や flux を測定し、押さえておくことは重要である。そこで NCC は、 $K_L$  崩壊起源の  $\gamma$  からハロー中性子を分離、測定を行えるようデザインされた。

## 3.4 NCC のデザイン

以上の要求から決定された、NCC のデザインについて述べる。NCC は、以下の特徴を持つ。

- 検出器全体を pure CsI 結晶で構成する

CsI 結晶の特徴として、 $\gamma$  に対しては短い放射長 (1.85cm) を持つことがあげられる。 $\gamma$  の入射に対して直ちに反応することから、 $K_L$  崩壊由来のバックグラウンドを排除するためには非常に有効である。また、ハロー中性子との相互作用で生じた  $\pi^0$  も、崩壊して生じた  $\gamma$  が直ちに検出されるため、CC02 BG 削減にも繋がる。一方、中性子に対しては長い反応長 (36.5cm) をもつ。このことは、ハロー中性子との相互作用で  $\pi^0$  を生成しにくい、という利点に繋がる。

また、全体を CsI 結晶で構成することにより、NCC は Full active detector としての機能をもつ。これは、CC02 BG 抑制の観点では有利に働く。E391a 実験で CC02 BG が問題となったのは、鉛等による不感領域が検出器内に存在してお

り、ハロー中性子がそこで相互作用したような event を検出することが困難であったことが原因のひとつである。しかし、Full active であることにより、中性子と相互作用して  $\pi^0$  が生じたとしても、そこから生じた粒子を検出し、veto することが可能である。

NCC で使用する CsI 結晶は、E391a 実験の CsI カロリメータで使用された  $7 \times 7 \times 30\text{cm}^3$  の pure CsI 結晶を加工して用いる。図??に示すように、上流部に長さ 15cm(以下 front)、中流部に長さ 20cm(以下 middle)、下流部に長さ 10cm(以下 rear) の 3 種類の結晶を組み合わせ、長さ 45cm の 1 つの module とする<sup>1</sup>。NCC 全体はこれらの 3 結晶をまとめた module を 48 個積み上げることで全体を構成する。なお、外側には outer module と呼ばれる module が 8 個存在し、KTeV 実験で用いられた  $5 \times 5 \times 50\text{cm}^3$  の結晶を加工して用いる。

- 結晶ごとに読み出しを行う

図 3.6 のように、NCC の各 module は 3 つの CsI 結晶から構成されており、各結晶からの読み出しは、波長変換ファイバーと光電子増倍管 (以下 PMT) を用いて独立に読み出す。各結晶それぞれの信号情報を用いることで、シャワー形状の違いをもとに、 $\gamma$  とハロー中性子を分離することが可能になる。図 3.8 は分離のイメージ図である。 $\gamma$  については、放射長の長さから、上流、下流、内側から入射した  $\gamma$  はそれぞれ入射位置の結晶でシャワーを生成する。一方中性子については、反応長の長さから、主に middle (あるいは rear) でシャワーを生成する。上下流、および内側の module に hit がなく、middle のみに hit があるような event については、中性子 event と考えることができる。

NCC における読み出しには 2 種類が存在する。3 結晶の信号を全てまとめて読み出す (以下 common) と、各結晶を独立に読み出す (以下 individual) である。common は  $\gamma$  veto 用に用いられる読み出しで、確実な veto のために光量を確保するためにまとめて読み出す方式をとっている。common では、1MeV 以上の energy deposit を検出、veto する必要がある [6]。また、後に述べる宇宙線を用いたキャリブレーションのため、100MeV 程度の energy deposit を検出する必要もある。individual はハロー中性子測定に用いられる読み出しで、各結晶を独立に読み出す方式をとっている。individual では、10MeV から 1GeV までの energy deposit を検出することで、全 event の 99% を得ることが出来る (図 3.10)。common に対しては 1module あたり 28 本、individual に対しては 1 結晶あたり 4 本、合計 40 本のファイバーが用いられ、クラレ社の  $\phi 1\text{mm}$  の PMP ファイバーを用いる。individual のファイバーは、遮光のために黒色の塗料で塗られ、図 3.7 に示すように、読み出す結晶の部分のみファイバー表面が露出するようになっている。例を挙げると、rear のファイバーは front の領域と middle の領域が遮光され、front や middle の光を吸収しないようになっている。

<sup>1</sup>各結晶のサイズは、正確にはそれぞれ 14.6cm、20cm、9.6cm であり、module の長さは 44.6cm となる。

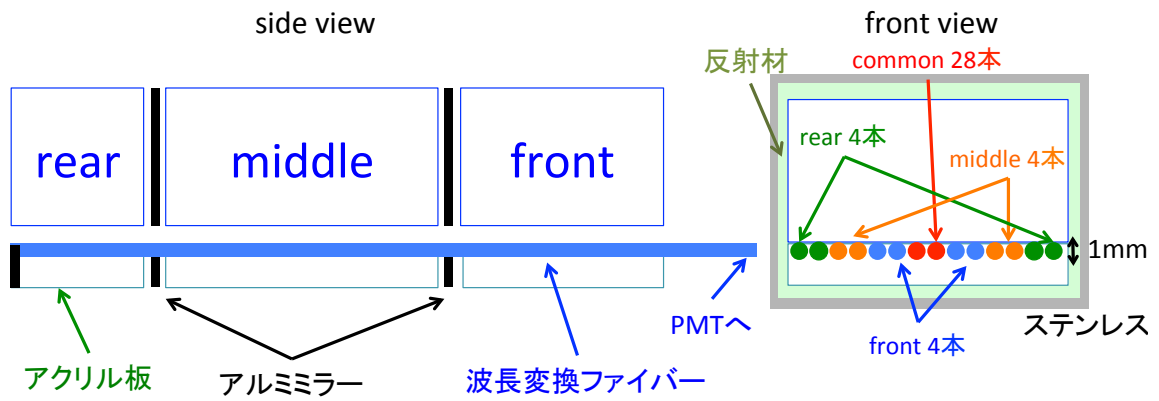


図 3.6: module の構造図。左は側面から見たもの。右は正面から見たもの。

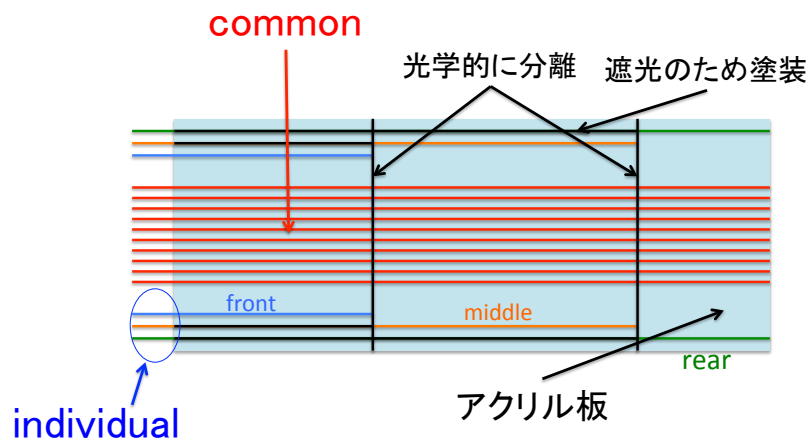


図 3.7: NCC の読み出し概念図。アクリル板の中央部には 28 本の common ファイバーが、その外側には片側 2 本ずつ、両側合わせて 4 本の individual ファイバーが front、middle、rear の順に並ぶ。

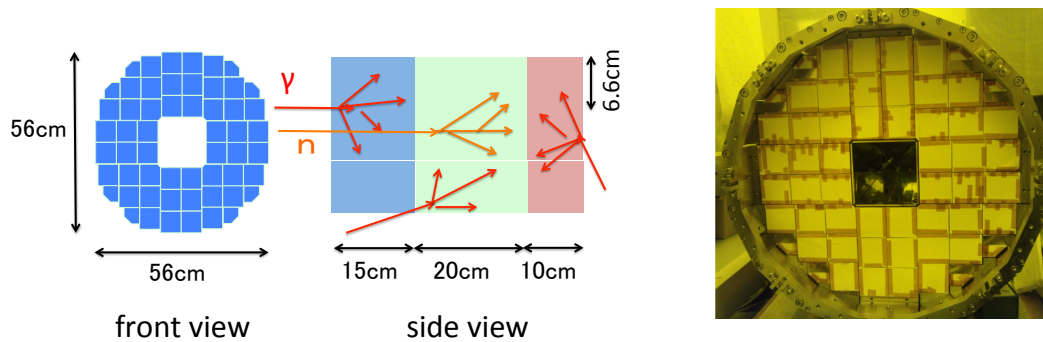


図 3.8: NCC 全体のデザインと  $n/\gamma$  分離のイメージ 図 3.9: 完成した NCC の Front view

NCC の各 module は、図 3.6 で示したような構造になっている。front-middle 間、middle-rear 間をそれぞれ厚さ  $500\mu\text{m}$  のアルミニウム製のミラー 2 枚を介して接着されている。このミラーは、結晶間を光学的に切ることで、隣の結晶に光が漏れることを防ぐ役割を持っている。また、アクリル板の側も、長さがそれぞれ 10cm、15cm、20cm のものをミラーを介して接着し、アクリル板内部での光の漏れを防いでいる。アクリル板の表面にはファイバーを敷設するための溝が掘られており、ファイバーがアクリル表面から飛び出さないようになっている。common ファイバーはアクリル中央部に、その外側に front、middle、rear の順に individual ファイバーが並ぶ。

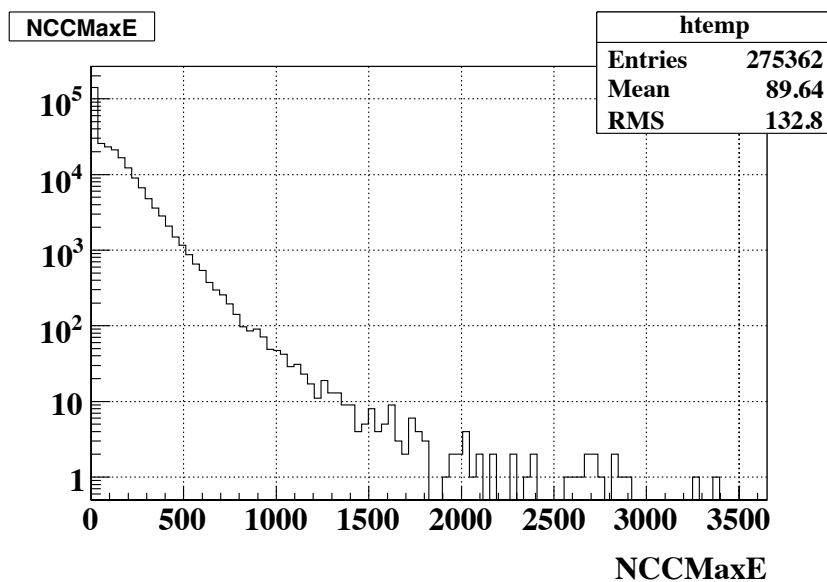


図 3.10: individual の energy deposit 分布。1GeV までの範囲で、99%の event を得られる

## 第4章 NCC module製作と性能評価

NCCのmoduleは、front、middle、rearの3結晶から構成される。commonの読み出しは3結晶の信号をまとめて読み出すものであり、front、middle、rearの間で光量が揃っている必要がある。そこで、使用するCsI結晶の光量を測定し、module内の3結晶について光量が出来るだけ揃うように結晶を選定することで各moduleに使用する結晶を決定した。その後moduleの製作を行い、完成後は各moduleについて光量を測定した。製作したmoduleからは十分な光量が得られ、実機に使用するのに問題がないことを確認した。以下にその測定方法と結果について述べる。

### 4.1 結晶光量に対するNCCの要求

3.4節で述べたように、commonについては、1MeV以上のenergy depositのeventをvetoすること、individualについては、10MeV以上のenergy depositのeventを検出する必要がある。そのために最低限必要な光量として、commonについては1MeVあたり4.5photo electron(以下 p.e.)、individualについては10MeVあたり4.5p.e.の光量を要求することとした。

### 4.2 結晶光量測定

NCCで使用するCsI結晶は、E391a実験で用いた $7 \times 7 \times 30\text{cm}^3$ の結晶を切断、研磨加工し、6.6cm角、長さはfront、middle、rearの各結晶でそれぞれ15cm、20cm、10cmとした結晶である<sup>1</sup>。module製作にあたって、加工後の光量について測定を行い、実際に使用できるだけの光量が確保されているかどうかの確認は必要である。また、module内の3結晶それぞれに同じ値のenergy depositがあった際に、commonで得られる光量の違い(以下 uniformity)は、veto thresholdの不定性につながる。例えばfrontがmiddleやrearに対して2倍の光量である場合を考え、thresholdはmiddleとrearを基準に決定しているとする。あるenergy deposit(ここでは1MeVとする)にthresholdをかけるという場合、これは1MeVに対応する光量が得られたeventを選ぶということであり、同じようにthresholdを超えるeventを取ってきても、front

<sup>1</sup>正確には14.6cm、20cm、9.6cmである。



に hit があつた場合は、middle や rear の場合に比べて energy deposit が半分になっているということであり、これは front に対しては veto をかけ過ぎているということになる。実際にこの不定性がどの程度バックグラウンド veto に対して不都合であるかを知っておく必要がある。図 4.1 は、CC02 BG を simulation で見積もった際に、signal box に残った各 event における NCC への energy deposit のうち、最も大きな energy を落とした結晶について、energy deposit をプロットしたものである。1MeV に threshold をかけた場合、2event が残る事がわかる。不定性が大きく、実際は 2MeV に threshold がかかっていたような場合を考えるとこれは 3event に対応し、バックグラウンド数は 1.5 倍となる。統計を増やしてより精度の高い見積もりを行う必要があるが、uniformity は数十%程度に抑えておく必要があると考えられる。そのためにも、各結晶の光量はできるだけ揃えておく必要がある。そこで、結晶を波長変換ファイバーを用いて読み出したとき、どれだけの光量が得られるのかを実際に測定しておく必要がある。以下に測定手順と結果を述べる。

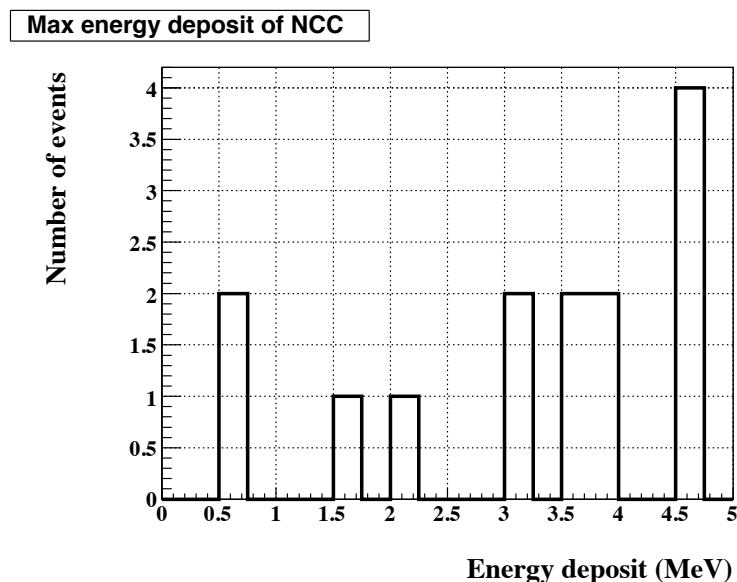


図 4.1: CC02 BG の simulation 結果。signal box に残った event における、NCC での energy deposit をプロットしたものである。threshold が 1MeV の場合と 2MeV の場合では、バックグラウンド数は 1.5 倍となる。

#### 4.2.1 測定方法

CsI 結晶の光量測定には、 $^{137}\text{Cs}$  の 662keV  $\gamma$  線を用いた。測定 setup を図 4.2 に示す。結晶の端面から  $\gamma$  線を照射し、下面には 28 本の  $\phi 1\text{mm}$  の波長変換ファイバーを

接着した長さ 20cm、幅 6.6cm のアクリル板 (図 4.3) を置き、PMT でファイバーからの光を読み出した (以下 fiber 読み出し)。これは、common に対応した configuration である。また、線源に対して結晶の対面には、PMT を結晶に直付けし、信号を読み出した (以下 direct 読み出し)。trigger にはこの direct 読み出しの信号を用いた。direct 読み出しには浜松ホトニクス社の  $\phi 51\text{mm}$  PMT である H6521 (石英 window を使用しており、UV に感度がある)、fiber 読み出しには同社の  $\phi 33\text{mm}$  PMT である H7415 を用いた。 $\gamma$  線が入射する面以外の 5 面については、ゴアテックス社のテフロン製の反射材を巻き、光量を確保した。波長変換ファイバーや反射材は、実機で用いるものと同じものである。また、PMT の gain をモニターするため、青色 LED を設置した。

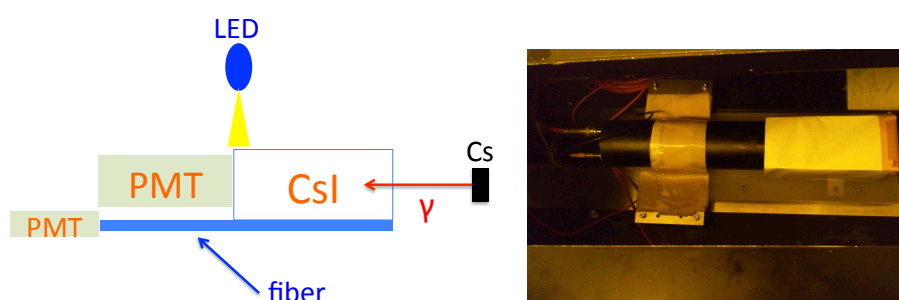


図 4.2: 結晶光量測定 setup 概念図と実際の写真。setup は暗箱の中に収められている。

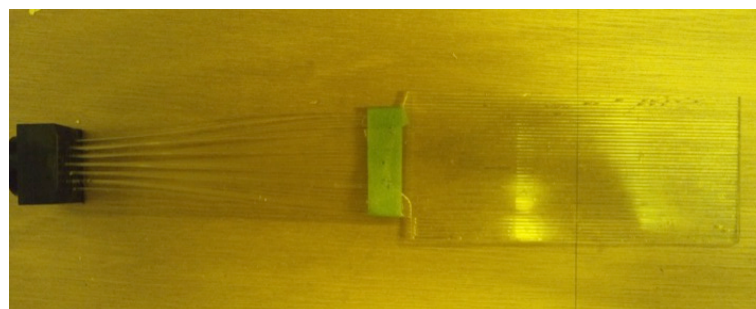


図 4.3: 波長変換ファイバーを接着したアクリル板。

## 4.2.2 測定結果

前節で述べた setup を用いて、各結晶の光量を測定した。測定した結晶は、front49 本、middle51 本、rear51 本である。図 4.4 は LED の光を fiber 読み出し用の PMT で

読みだした時の ADC プロットである。pedestal と 1p.e. peak の差を読み取り、gain を求めた。図 4.5 は、direct と fiber の ADC 分布をプロットしたものである。direct の ADC 分布の光電 peak の上側  $1\sigma$  を cut 条件とし、fiber の peak を決定した。上側のみを cut 条件としたのは、図 4.6 に示すように、photon statistic の影響によって、compton 散乱のなだれ込みが光電 peak 付近に存在している影響を避けることが目的である。図 4.6 は、測定の configuration で、 $\gamma$  線が結晶に落とす energy deposit をモンテカルロシミュレーションにて見積もり、direct 読み出しの光量を用いて smear して得られたものである。direct 読み出しの光量は 27p.e./662keV とした。これは、今回の測定において、最も direct 読み出しの光量が小さかった結晶の光量である。photon statistic の影響は、光量が小さいほど大きくなるため、なだれ込みの効果はこの結晶において最大となる。compton 散乱 event の割合は、光電 peak の前後  $1\sigma$  で、2.3%、上側  $1\sigma$  で 0.5% であり、上側  $1\sigma$  をとることで compton 散乱の影響はほぼ無視出来ることがわかった。

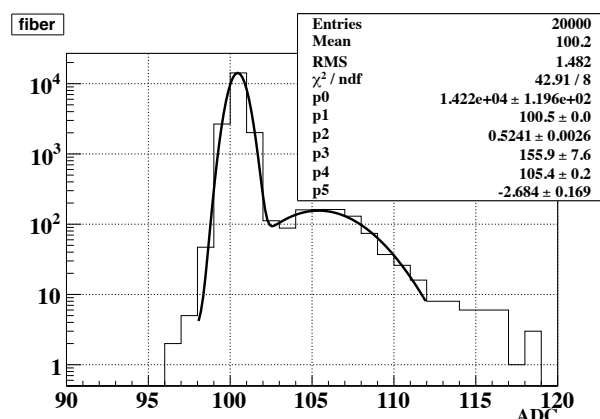


図 4.4: fiberPMT で LED の光を読みだした時の ADC プロット。pedestal と 1p.e. peak の差から gain を見積もった。

こうして得られた各結晶の光量を図 4.7 に示す。傾向として、middle、front、rear の順に光量が大きい。また、ほかと比べて極端に光量が小さいような結晶が存在している。ここで光量の評価に際し、いくつか考慮すべき点がある。図 4.8 に示すように、結晶が小さくなると、fiber と direct の立体角比が小さくなる。実機では結晶が全て反射材で覆われているが、この測定においては、direct で光が吸収されるため、direct の立体角が大きいほど、fiber で得られる光量が小さくなると考えられる。また、アクリル板の長さが 20cm で固定されているのに対し、結晶側は長さが異なる。結晶が小さい程、アクリル板の結晶と接していない部分から、アクリル中を伝播する光が散逸しうる。よって、こちらも fiber で得られる光量は小さくなると考えられる。そのため、結晶の組み合わせを決める際には、長さの違いによる factor を考慮す

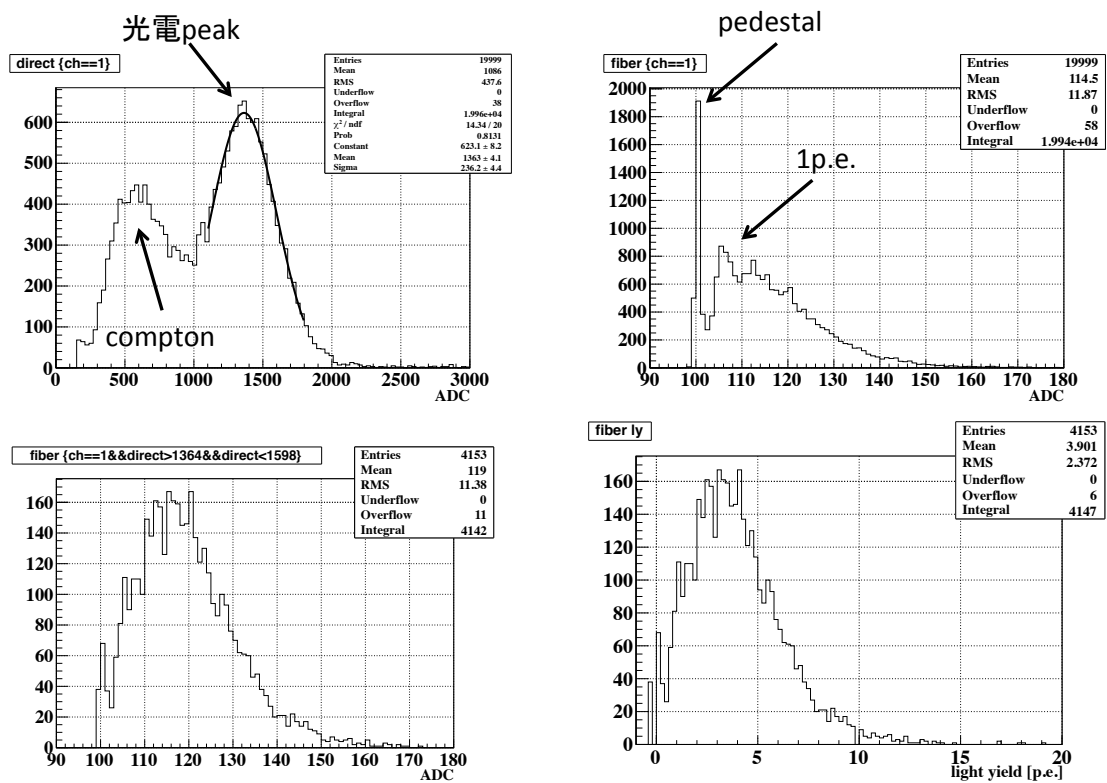


図 4.5: 662keV  $\gamma$  線に対する ADC 分布。左上図は direct の ADC プロット。光電 peak を gaussian でフィットした。右上図は fiber の ADC プロット。光量が小さいため、pedestal や 1p.e. peak などが見えている。左下図は direct による cut をかけた後の fiber の ADC プロット。ここからペDESTAL を引いて、1p.e. あたりの ADC ch で割ったものが右下図である。光量としてはこのプロットの平均を用いた。このプロットは典型的な結晶におけるものであり、実際は結晶によって光量はバラついている。

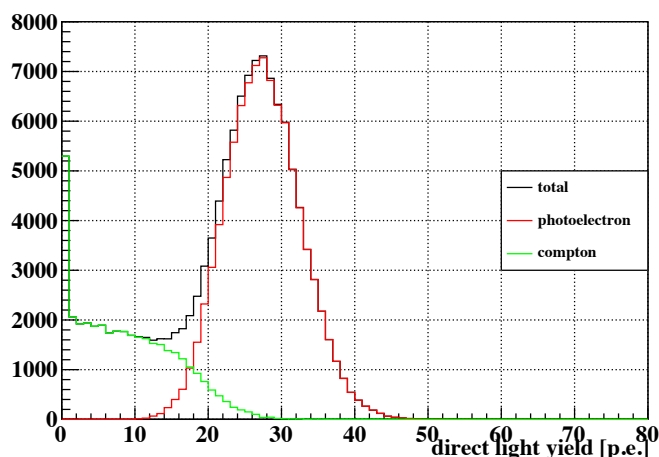


図 4.6: 光電 peak における光量が 27p.e. であった時に、662keV の  $\gamma$  線を用いて得られる光量分布の simulation。光電 peak の下側には compton 散乱のなだれ込みが存在している。

る必要がある。また、それ以外にも光量に影響する要因が存在している。まず、アクリルと結晶間のライトコンタクトは、実機ではオプティカルセメントで接着されているが、今回の測定ではエアコンタクトである。また、ファイバー長による減衰や、実機では結晶にミラーが接着される、direct 読み出しで吸収される光がないなど、様々な効果が複雑に絡んでくると思われる。これら全てを完全に見積もることは困難であるため、今回の測定では、絶対光量を算出するのではなく、結晶の相対光量による順位付けをし、組み合わせを決定するという方針に立った。ただし、先に述べた長さの違いによる factor については、この時点で見積もっておくこととした。

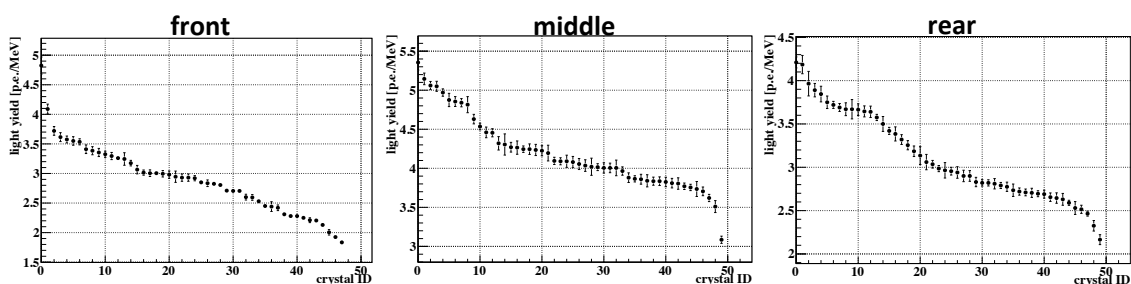


図 4.7: 各結晶の光量測定結果。この時点では長さの factor は考慮していない。

以下、factor の見積もりについて述べる。結晶の加工の際、30cm の結晶から 10cm と 20cm、もしくは 15cm を 2 本切り出している。これらはそれぞれ middle と rear、front 2 本という組み合わせであるため、middle と rear については、切り出す前に同

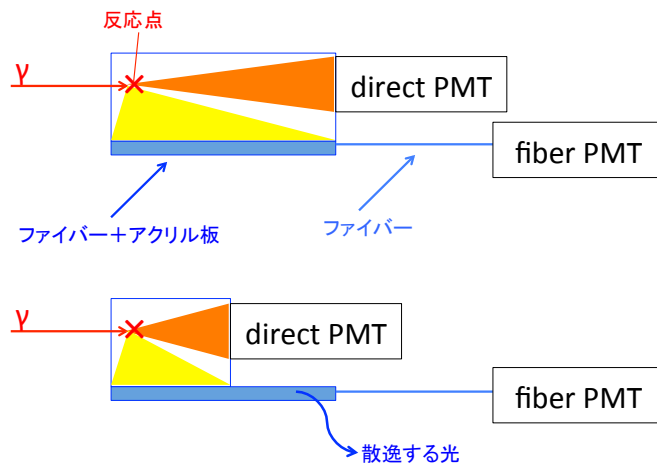


図 4.8: 結晶の長さの違いによる集光率の違いの概念図。結晶が小さくなるほど direct の立体角は大きく、fiber の立体角は小さくなる。また、結晶が小さいほど、アクリル板から光が散逸する効果大きい

じ結晶であった組み合わせをとることができる。これらの結晶の絶対的な光量と同じだと仮定し、測定で得られた光量の比を取ることで middle-rear 間の factor とした。その結果、 $\text{rear/middle}=0.745\pm 0.02$  を得た (図 4.9)。RMS は 18% と大きい、これは 2 結晶の絶対光量と同じだという仮定がどれだけ正しいのかによっていると考えた。そこで、同じ結晶から得られた front の 2 結晶の光量比を調べた結果のプロットが図 4.10 front 同士の比較では、 $1.335\pm 0.05$  という光量比が得られた。理想的にはこれは 1 になるべきものである。しかし、RMS が 18% と大きく、また、2 つの結晶の比の取り方によって、これは変わり得るものであるため、1 からずれていることについてはあまり意味を持たないと思われる。ここで、18% という RMS は、先に述べた middle-rear 間の光量比の場合と等しいことがわかる。よって、factor の広がりについての理解はできたと考えた。front の結晶については、長さの影響をこの方法で決定することが出来ないため、暫定的に middle-rear 間の factor と同じ値を用いることとした。factor を考慮に入れたうえで、1MeV あたり 4.5p.e. 以上の光量が得られると見積もられた結晶 (front、middle、rear 各 51 本) から光量順で上位 48 本を用いて、module 内の各結晶の光量が揃うように組み合わせを決定、各 module での uniformity を求めた (図 4.11)。この uniformity は、3 結晶それぞれに hit があった場合の common の光量の平均からのずれとして算出し、例えば front であれば、

$$\text{uniformity} = \frac{\text{front}}{(\text{front} + \text{middle} + \text{rear})/3} \quad (4.1)$$

で表される。結果、uniformity は factor の精度を考慮に入れて最大 70% になる。これは十分小さいとは言えない。そこで、まず 1module を製作、uniformity を確認した。

完成した module の光量測定方法や結果については 4.4 節で述べるが、uniformity は 10%以内に収まっていたため、問題は無いと判断し、他の module の製作に進んだ。module の製作後は、改めて全 module について uniformity を確認した (4.4.2 にて述べる)。

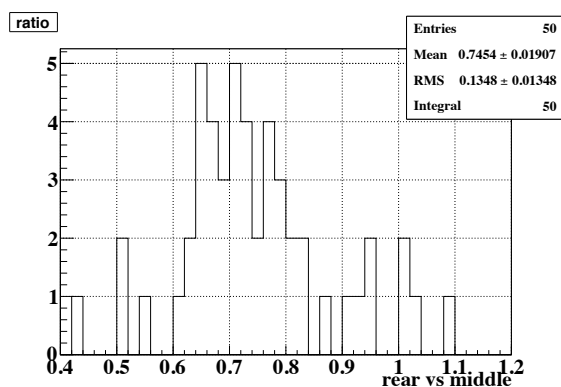


図 4.9: 同じ結晶から切り出した middle と rear の光量比。平均の誤差は 2.6%、RMS は 18%である。

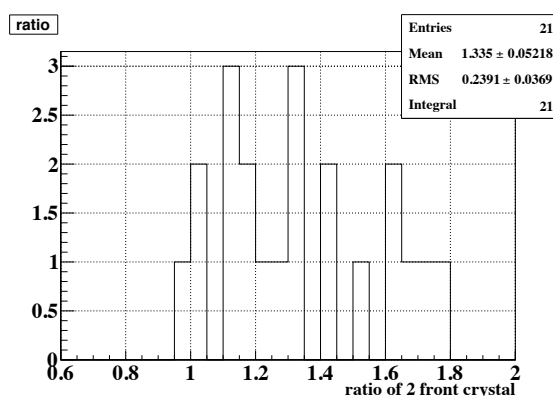


図 4.10: 同じ結晶から切り出した front の 2 結晶の光量比。平均の誤差は 3.8%、RMS は 18%である。

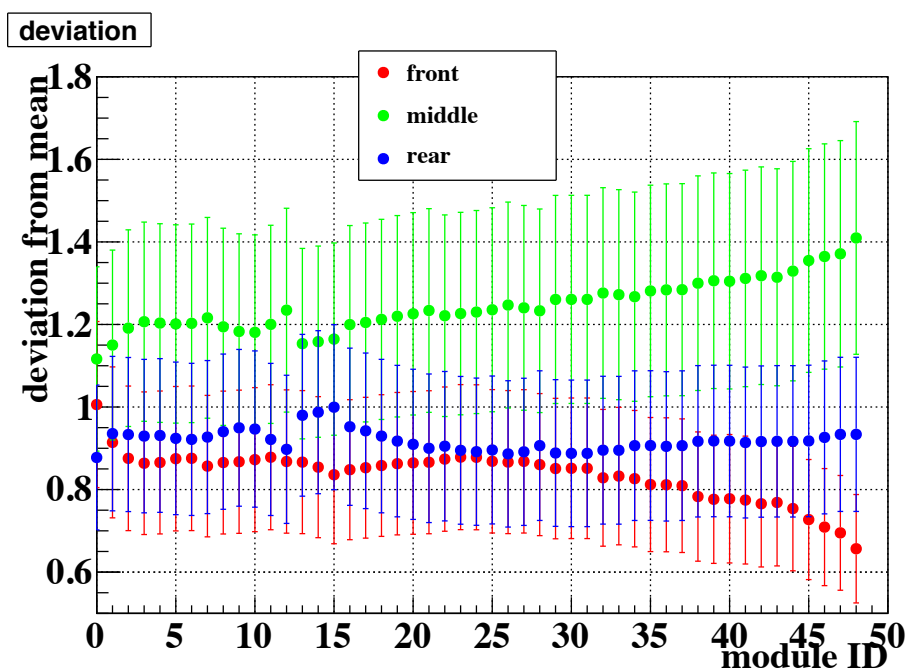


図 4.11: サイズの補正をかけて得られた module 内での uniformity の見積もり。誤差は factor を決める際の middle と rear の光量比の RMS から求めている。

### 4.3 module 製作

選定した結晶を用いて、実際に module の製作を行った。以下に製作過程について述べる。

読み出しに用いるファイバーが接着されたアクリル板の製作に際し、3.4 で述べたように、individual に用いられるファイバーは、読み出しを行わない結晶部分については遮光をする必要がある。黒色の塗料を3度重ね塗りした後、ファイバー端面を研磨した。次に、10cm、15cm、20cm のアクリル板 (front, middle, rear に対応) を並べ、間にアルミ製の厚さ 1mm のミラーを挟んで固定し、表面の溝にファイバーを敷設、オプティカルセメント (ELJEN EJ500) を上から塗り、硬化させた。このオプティカルセメントは、作業時間1時間、硬化時間24時間のものであり、硬化のために1日以上静置した。その後、PMT との contact に用いるアダプターをファイバーにオプティカルセメントを用いて接着し、端面を研磨することでアクリル板が完成した (図 4.12)。

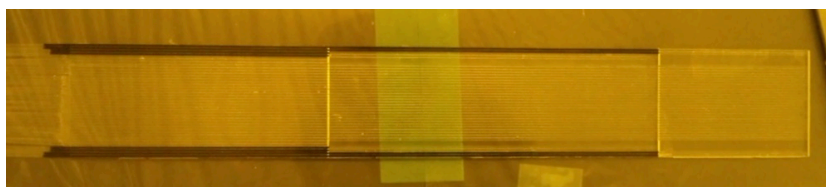


図 4.12: ファイバーを接着したアクリル板。右から rear、middle、front の領域に分かれている。

アクリル板の製作と並行して、結晶の接着を行った。まず、front 結晶と rear 結晶の片側、middle 結晶の両側にアルミ製の厚さ 0.5mm のミラーをオプティカルセメントを用いて接着した。次に、ミラー同士を接着することによって3結晶を固定、全体を1つの module とした (図 4.14)。

最後に、完成した3結晶とアクリル板を接着した。アクリル板を固定し、板の表面にオプティカルセメントを塗布、結晶を上から載せて固定し、硬化させた。その後、テフロン製の厚さ  $250\mu\text{m}$  の反射材を表面に巻き (図 4.15)、結晶の保護のため、厚さ  $100\mu\text{m}$  の SUS をその上から巻きつけ、module の製作を終えた。これを 48module について行い、全 module が完成した。

### 4.4 Module 光量測定

完成した各 module について common では 1MeV あたり 4.5p.e.、individual では 10MeV あたり 4.5p.e. の光量が実際に得られるかを測定した。また、その際、module 内で uniformity がどの程度かを求めた。以下に測定手順と結果を述べる。



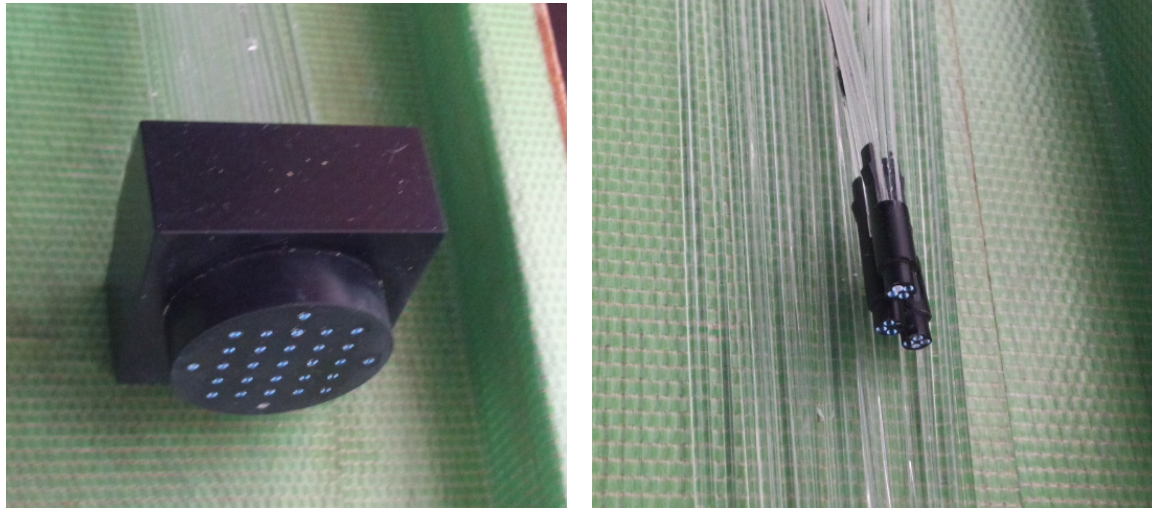


図 4.13: 左図は common のファイバーアダプター。28本のファイバーが円形に並んで接着されている。右図は individual のファイバーアダプター。4本のファイバーが接着されている。



図 4.14: 接着された3結晶。左から front、middle、rear の順に接着されている。

#### 4.4.1 測定方法

完成した module の光量測定では、結晶同士が接着されていることや、全体を SUS で覆ってしまっていることから、direct による trigger を用いることが出来ない。また、individual の光量を測定するためには、最低でも 10MeV 以上の energy deposit があることが望まれるが、これを線源で達成するのは困難である。そこで、測定には宇宙線を用いることとした。宇宙線による MIP event では、40MeV の energy deposit があり、十分に測定可能である。線源と比較して統計をためるのには時間がかかってしまうが、1module につき、半日程度のデータ取得によって十分な統計が得られており、宇宙線を用いた測定は可能であると判断した。

module の光量測定 setup を図 4.17 に示す。front、middle、rear の各結晶の上下に設置した厚さ 3mm、6cm 角のプラスチックシンチレータの hit を用いて宇宙線を tag し、プラスチックシンチレータと common に対しては  $\phi 3.3\text{cm}$  の PMT である H7415、

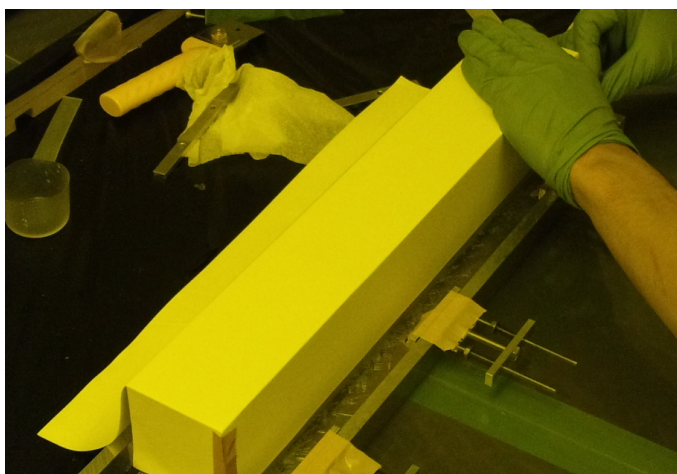


図 4.15: module に反射材を巻く作業



図 4.16: SUS を巻き、完成した module

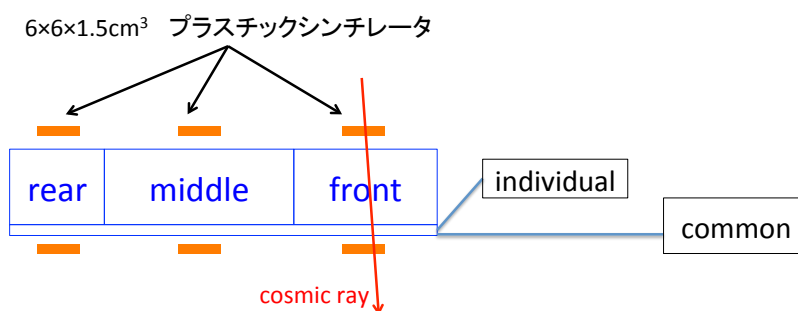


図 4.17: module 光量測定 setup。結晶の上下に設置したプラスチックシンチレータを用いて宇宙線を tag し、common と individual をそれぞれ読み出す。

individual に対しては 3cm 角の Multi-Anode PMT である H6568 を用いて信号を読み出した。図 6.2 はオシロスコープを用いて見た宇宙線 event の信号である。プラスチックシンチレータを用いた trigger と同期して、common と individual の信号が読み出せていることがわかる。上下のシンチレータの coincidence を取り、3 結晶について or をとることで、いずれかの結晶に宇宙線が hit した event についての trigger を作った。どの結晶に hit したかを区別するため、上側の 3 枚のプラスチックシンチレータの信号を ADC で取り込み、energy deposit による cut をかけた。図 4.19 は各プラスチックシンチレータの ADC 分布である。front、middle、rear について、それぞれ ADC count で 500、250、500 程度に threshold をかけることで、いずれの結晶に hit したかを区別できることが読み取れる。その後、MIP peak を Landau 関数でフィット、Most Probable Value (MPV) を求めた。図 4.20 の左図は common の、右図は individual のプロットである。individual のプロットをする際には、common の MIP peak の前後  $1\sigma$  で cut をかけた。また、common、individual それぞれについて、平均 0.1p.e. 程度の光量になるよう LED を照射し、gain のモニターとして使用した。

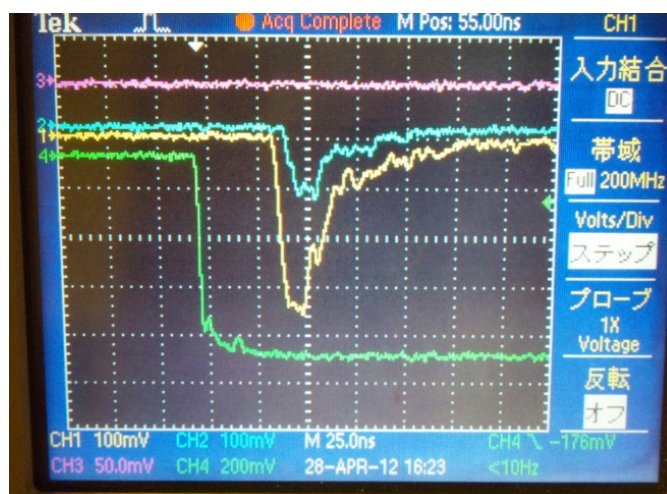


図 4.18: オシロスコープで読み取った common と individual の波形。黄色は common、青色は individual のものである。立ち下がり は 5ns 程度、pulse width は 100ns 程度である。

#### 4.4.2 測定結果

測定項目は、front、middle、rear の各結晶に hit があった時の common、individual の光量と、module 内の uniformity である。加えて、crosstalk(他の ch に hit があった

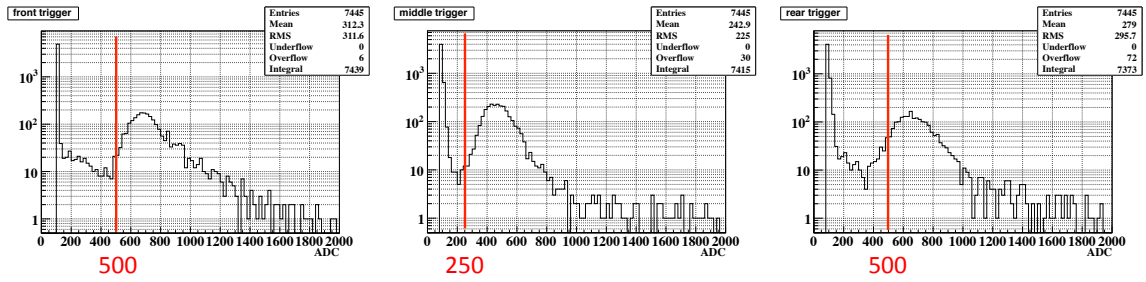


図 4.19: trigger 用のプラスチックシンチレータの ADC プロット。左図は front、中図は middle、右図は rear。このプロットから、trigger の cut 条件をそれぞれ 500、250、500 とした

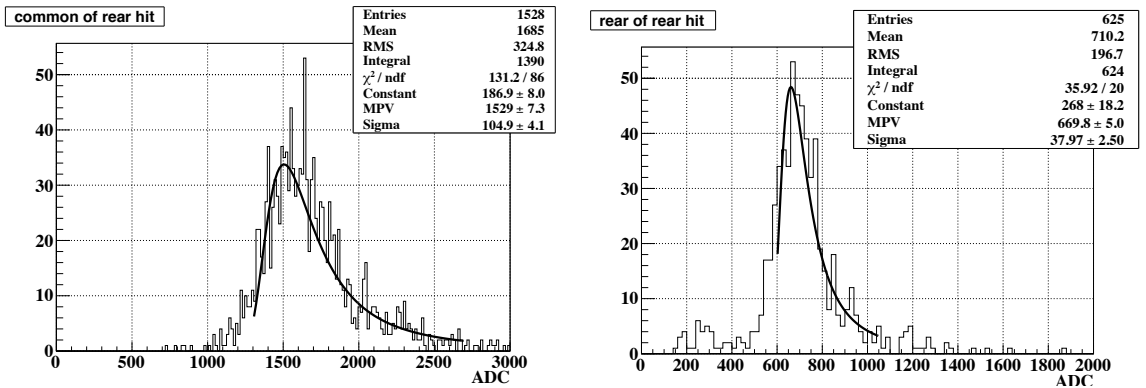


図 4.20: rear に hit した event における common と individual の ADC 分布。左図が common、右図が individual。individual については、common による cut をかけてある。MIP peak がどちらも見えており、Landau 関数でフィットし、MPV を求めた。peak は 40MeV の energy deposit に対応している。

場合に得られる光量) の測定も行った。crosstalk の原因としては、各結晶に割り当てられている individual 用のファイバーが他の結晶の光を吸収してしまう、結晶の接着部から光が漏れ出てしまうなどの可能性がある。また、MA-PMT の光電面の各 ch は光学的に切れているわけではなく、ファイバーから光電面に入射する光が他の ch に入ってしまったたり、増幅された電子が他の ch のダイノードに侵入してしまう可能性がある。まず、common、individual の光量測定結果を図 4.21 に示す。

module の量産前に製作した 1module は、module ID32 にあたる。common、individual とともに光量の要求を満たしていた。他の common の光量については、ほぼ全ての module で 4.5p.e./MeV を達成した。実機に用いる際は、光量の高い 12module を NCC 最内層に配置し、外層には光量が低いものを配置することとした。その理由は、beam 軸に近いところではハロー中性子が多く存在しており、最内層の module

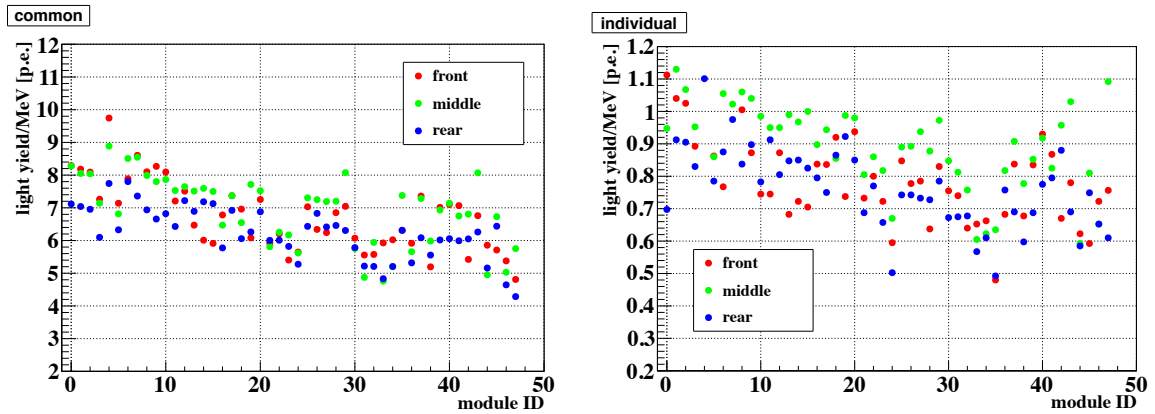


図 4.21: 左図は common の光量測定結果。最低光量は 4.3p.e. であり、ほぼ全ての module で 4.5p.e. を達成している。右図は individual の光量測定結果。こちらも 1MeV あたりの光量を示してある。最低光量は 0.48p.e. であり、ほぼ全ての module で 0.5p.e. を達成している。どちらの図も誤差は 1~2% 程度と十分小さく、エラーバーはこの図では見えない。

は中性子と相互作用する頻度が高くなることから、それらの event を確実に検知するため、感度が高い大光量の module を置き、検出効率を高めるためである。

図 4.22 は各 module の uniformity をプロットしたものである。最も悪い module で 25% であった。製作前に見積もった uniformity よりもよい結果が得られており、十分小さい値であると言える。

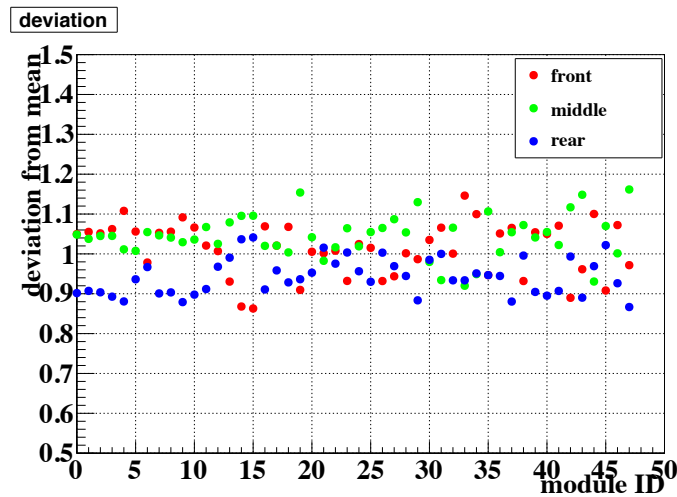


図 4.22: 各 module の uniformity。3 結晶のそれぞれに対応する common の出力とそれらの平均の間のずれを示した。

また、individualについては、ほぼ全ての結晶で0.5p.e./MeVを達成しており、十分な光量が達成できていることを確認した。crosstalkについては、他chにhitした場合と、自chにhitした場合の光量比を定義として見積もった。frontについてはmiddleとrearの、middleについてはfrontとrearの、rearについてはfrontとmiddleの間わるcrosstalkが存在しており、図4.23にそれら6パターンのcrosstalkの測定結果を示す。ほぼ全moduleについて、1%以下のcrosstalkであることが確認できた。rearからfrontへのcrosstalkが0.14%となっている。rearのエリアにmiddleやfrontファイバーは存在していない(図3.7)ことや、間にmiddleを挟んでいるため結晶間の光漏れは考えにくいことから、PMTにおけるcrosstalkがこの程度であると判断できる。また、frontからmiddleへのcrosstalkが0.39%、その逆のmiddleからfrontへのcrosstalkが0.16%である。middleエリアにfrontファイバーは存在していないため、この差は結晶の接着部から光が漏れている効果であると考えられる。

以上の結果から、common、individualのいずれにおいても、十分な光量が得られており、かつuniformityやcrosstalkなどについても十分小さく抑えられていることが確認できた。これをもって、moduleの積み上げを開始し、実機を完成させた。

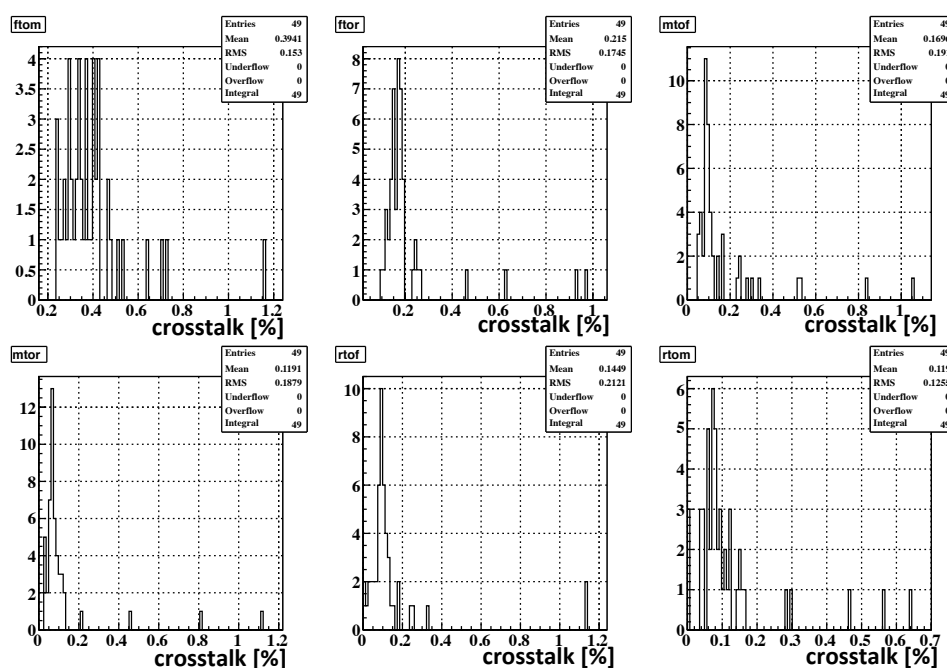


図 4.23: 各 module の crosstalk のヒストグラム。上段左: front から middle、上段中: front から rear、上段右: middle から front、下段左: middle から rear、下段中: rear から front、下段右: rear から middle

## 第5章 PMTの性能評価と真空使用に向けた改良

読み出しに使用する光電子増倍管（以下PMT）については、1Pa以下の真空で使用可能であること、高レート環境での出力変動を抑える、等の課題が存在する。この章では、それらについてのstudyについて述べる。

### 5.1 PMTの基本的性質

PMTは一般的に図5.1のような構造を持っている。図5.1は浜松ホトニクス社のH7415のものである。入射した光を検出、光電子を増幅する光電管部分と、光電管に電圧を印加する基板部、それを覆う $\mu$ -metalの外装からなる。光電管には1~2kV程度の高電圧が印加されている。そのため、基板部分は狭い領域に高電圧がかかることになるため、数Pa~数百Pa程度の真空では、放電を引き起こしやすくなっている。放電は加速された電子が気体分子と衝突、気体を電離させることによって起こる。真空度が上がるにつれて電子の平均自由行程は長くなり、気体を電離させるのに十分な速度に加速されるため、放電が生じやすくなる。しかし、さらに真空度が上がると、気体分子と衝突する頻度が落ち、放電は起こりにくくなる。よって、先に述べた通り、放電は数Pa~数百Pa程度で起こりやすい。また、基板抵抗の発熱量は通常数百mW程度となっており、放熱が不十分であると、基板抵抗の温度が上昇していく。

次に、出力の安定性について、まずレート耐性について述べる。高レート環境下では、基板部を流れるベース電流が変化し、ダイノード間の電圧比が変動する。図5.2に示すように、各ダイノードが電流を基板部から引くため、ベース電流はカソードに近い程大きくなる。このとき、ダイノード初段部の電圧比が大きくなり、gainがそれによって上昇していく。ただし、最終段とアノードの間には流入する電流が存在しないことと、全体の電圧が外部電源によって固定されていることから、この部分の電圧は減少し、アノードでの電子の収集効率が落ちてしまう。この効果が次第に支配的になり、最終的にはgainが減少することになる。よって、入射光量が大きいほど、gainが高い程この効果は低レートで起こり、影響が大きくなると考えられる。一般的に、レート耐性を上げるためには、ベース電流を増やす（基板抵抗を抵

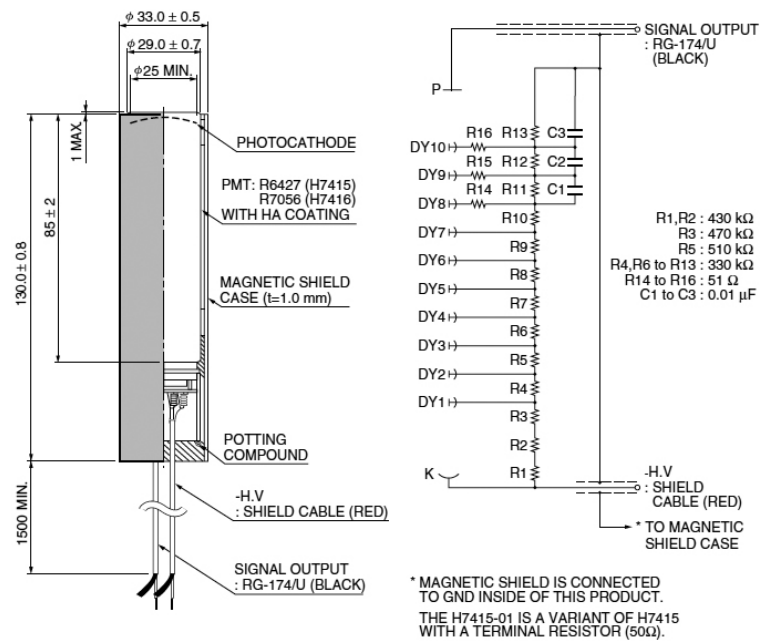


図 5.1: 一般的な PMT の構造。図は浜松ホトニクス社が提供している、H7415 の構造図である。

抗値の小さいものに変更する) ことで、ダイノードに流入する電流の影響を相対的に小さくしたり、最終段の抵抗分割比を大きくする (テーパタイプ) ことで、最終段の電圧降下の影響を小さくする、ツェナーダイオードなどを用いて最終段の電圧を固定する、などの対策がとられる。

次に、パルスリニアリティについて述べる。大光量が入射したり、gain 設定が高くと、ダイノード後段 (特に最終段など) において、電荷密度が高まることで電子の移動が妨げられる空間電荷効果が働く。また、瞬間的に大電流を流すこととなるため、電源が必要な電流を供給しきれなくなる。その結果、入力と出力の関係は徐々に線形から離れていく。リニアリティ特性を良くするためには、テーパタイプにすることで最終段の電圧を確保し、空間電荷効果に打ち勝って電子を収集させたり、容量の大きいコンデンサを配置することで瞬間的に大電流が流れる際の電流供給源とする、などの対策がとられる。



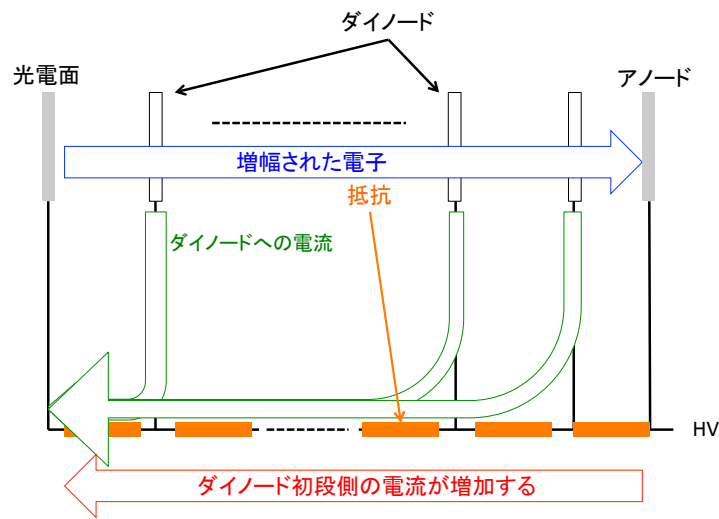


図 5.2: 高レート環境下におけるダイノードの電圧比の変動の概念図。

## 5.2 NCCが要求するPMTの性能

### 5.2.1 真空中での挙動に対する要求

NCCは真空容器内に設置、1 Pa 程度の環境下で運用されるため、放電の可能性が存在しており、長期にわたって安定的に動作させるためにはこの可能性は排除する必要がある。また、真空中では対流による放熱が期待できないため、放熱効率が空気中に比べて落ちてしまう。温度上昇が大きくなると、基板抵抗の抵抗値の変動によってPMTのgainが変化してしまったり、基板抵抗の破壊などが生じる危険性が高まる(図5.3、立山科学デバイステクノロジー社の資料をもとに作成)ことから、温度上昇を最小限に抑えることも課題となる。

### 5.2.2 出力安定性に対する要求

NCCは崩壊領域上流、beam軸の直近に設置されるため、高いcounting rateが予測される。図5.4に示すように、thresholdを1MeVとしたときのcounting rateはfull intensity( $2 \times 10^{14}$ POT、3.3s周期の0.7s取り出し)で1MHzに達する。そこで、実際にこの効果を測定し、運用に支障がないgain設定を決めることが必要である。また、3.4にて述べたように、common読み出しでは1MeV~100MeVまで、individual読み出しでは10MeV~1GeVというダイナミックレンジにおいて、出力に線形性があることが重要である。4章で述べた光量測定の結果から、各moduleの光量は、common読み出しについては1MeVあたり5~10p.e.、individual読み出しについては1MeV

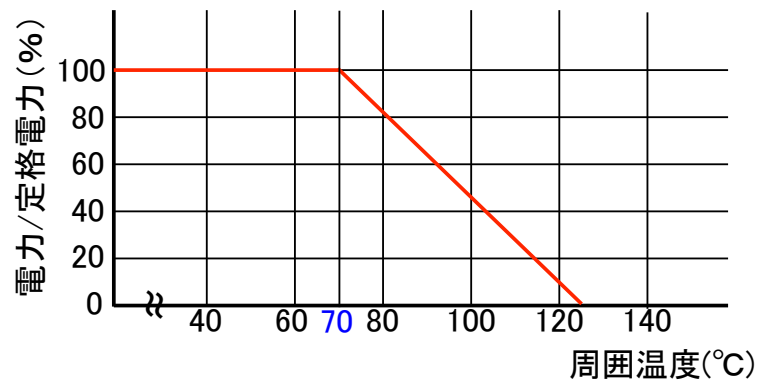


図 5.3: 抵抗の温度と許容電圧の関係。70°Cを超えると、定格での使用が出来ず、温度が上がるにつれて許容電圧が下がっていく。

あたり 0.5~1p.e. 程度であることがわかっている。すなわち、どちらの場合も下は 5~10p.e. 程度、上は 1000p.e. 程度の範囲での線形性が重要となる。

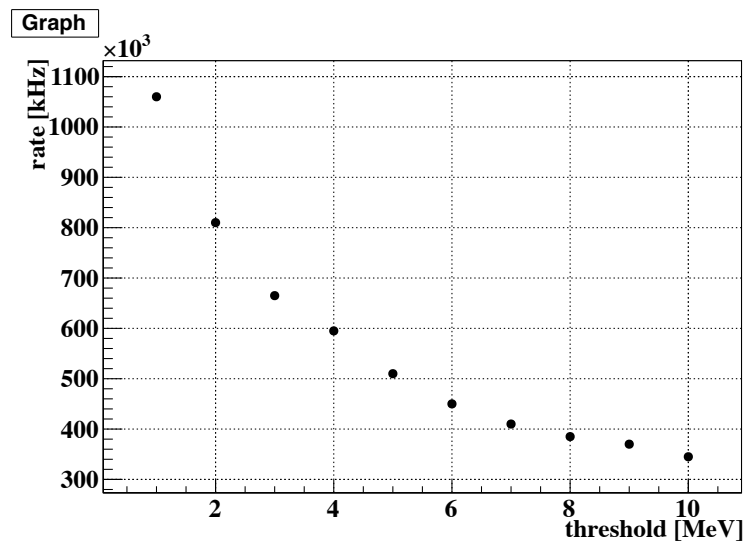


図 5.4: common での 1module あたりの counting rate。threshold を 1 MeV にすることで、counting rate は 1MHz に達する

### 5.3 使用する PMT

使用する PMT の候補として、common に対しては浜松ホトニクス社の H7415、individual については同社の H6568-10 を用いる (図 5.5、5.6)。各 PMT の仕様は表

5.1 の通りである。outer に対しては、受光面を UV window にした H7416 を用いる。H6568-10 は 16ch Multi Anode PMT である。H6568-10 については、1 本の PMT あたり 12ch を読み出しに用い、12 本の PMT で individual の合計 144ch を読み出す。



図 5.5: H7415 外観図

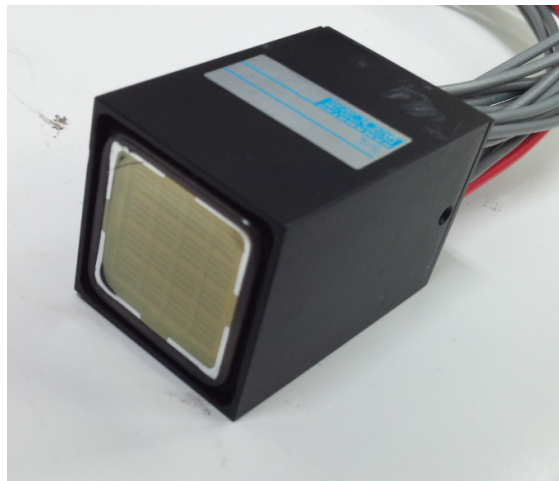


図 5.6: H6568-10 外観図

表 5.1: NCC で使用する各 PMT の仕様

	H7415	H6568-10
管径	φ33mm	30mm 角
受光面サイズ	φ25mm	4mm × 4mm × 16ch
光電面	バイアルカリ	バイアルカリ
窓材質	硼珪酸ガラス	硼珪酸ガラス
定格 (最大許容電圧)	-2000V	-1000V
gain(typical)	$5 \times 10^6$	$3.5 \times 10^6$
基板抵抗値	4.81MΩ	3.96MΩ
抵抗分割比	4:1:2.6:1...1	1.5:1.5:1.5:1...1 : 2 : 3.6
定格における基板抵抗の発熱量	830mW	350mW

## 5.4 真空試験

先に述べたとおり、NCC が設置される上流部は、1Pa 以下の真空状態になるようデザインがなされている。そこで、10Pa 以下の条件下で放電、過度の温度上昇がないことを目標とした。

### 5.4.1 H7415

H7415の真空試験について述べる。真空槽内にPMTを設置し、定格である-2000Vを印加した。 $\mu$ -metalには熱電対を取り付けてあり、温度上昇を測定できるようにした。結果、5Pa以上で放電が確認された(放電による大電流のため、HV moduleのcurrent limitを超えて電源が落ちてしまった)ため、このまま使用することは難しい事がわかった。同時に、20°Cの温度上昇を確認した。ただし、内部の基板部はモールドされているため、直接温度を測ることが出来ない。これで十分かどうかは不明である。

#### 新型PMTの開発

以上のことから、H7415をそのままNCCの読み出しに使用することはできない。そこで、真空での使用に耐えうるよう改良することを試みた。具体的には、

- 光電管部分周辺の空間を全てモールドする(図5.7)
- 光電面を管先端から6mm内側にする
- 抵抗を表面実装タイプにする
- 抵抗配置の変更
- 基板上へのサーミスタの実装

という改良を行った(図5.8)。内部空間を絶縁抵抗値の高い物質でモールドし、放電を防ぐ。また、光電面を管先端から6mm内側に下げ、光電面と外装との間の放電を防いでいる。また、従来の基板では、アキシヤル抵抗を用いており、抵抗の足が飛び出している部分で放電が起こっていた。これを改善するため、抵抗を表面実装タイプに変更した。放熱に関しては、従来の基板では、抵抗が集中して配置されており、抵抗付近に熱が集中する構造になっていた。そこで、基板の枚数を増やし、かつ抵抗を基板外周部に分散させて配置することで放熱効率を向上させた。抵抗を表面実装型にしたことは、この抵抗を分散させる面でもメリットとなる。また、基板部の温度上昇を実際にモニターするために、基板部にはサーミスタを実装した。この改良が有用であることを確認するため、モールドされた基板部のみのサンプルを用いて真空試験を行った。測定setupを図5.9に示す。

モールドの上からアルミ箔を巻いて熱浴とし表面と内側に熱電対を取り付け、真空槽内に設置した。放電が生じたかどうかについては、HV moduleによる電流値の変化の有無と、signal cableをオシロスコープにつなぐことで、放電時に発生する信号の有無を確認することで判断した。結果、放電については、10Pa以下での放電が起こらないことを確認した。温度上昇はサーミスタの抵抗値をテスターで読み取る

ことで測定した。図 5.10 はサーミスタの温度と熱電対の測定結果との差を示している。モールド外周部と基板部の温度差が 15℃程度、アルミ箔の外周部と基板部の温度差は 40℃であった。安全サイドに立って、基板部分と外周部の温度差として、40℃を想定することとする。HV の値を調整することにより (HV 設定については後に述べる)、抵抗の発熱量は試験時の 60%以下に抑えられ、温度差は 25℃程度になると見積もられる。また、PMT を設置する構造体を冷却水で冷却することで、PMT 外周の温度を出来るだけ下げしておくことで、温度上昇は十分小さく抑えられると考えられる。運用時、実際に温度上昇がどうなっているかは、温度モニターを用いて監視することとした (6 章にて述べる)。

以上のことから、新型である H7415Vmod(以下 H7415V) は真空中での使用に十分耐えるという結論が得られた。

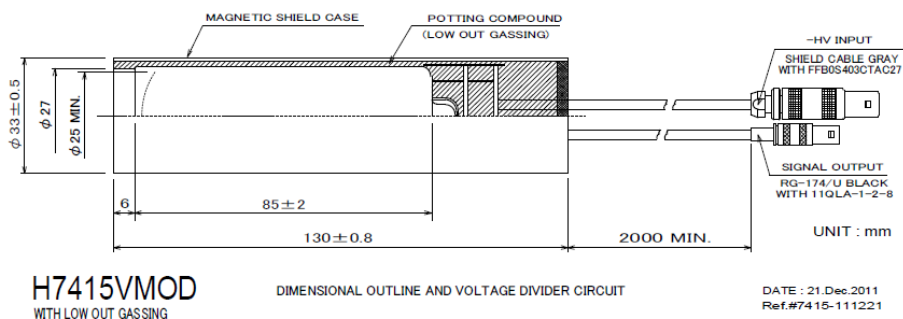


図 5.7: H7415V の構造図。先端までモールドされており、光電面は 6mm 内側にある。

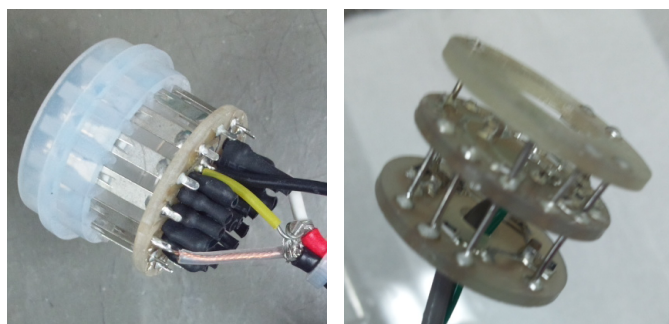


図 5.8: 通常の基板部 (左) と開発した新型基板部 (右)

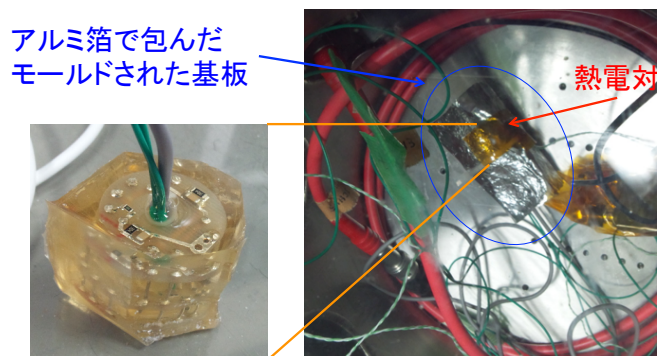


図 5.9: モールドされた基板部と、真空試験 setup。入手時点ではモールド材のサイズが大きかったため、実際の PMT の内径に近いサイズにカットして使用した。

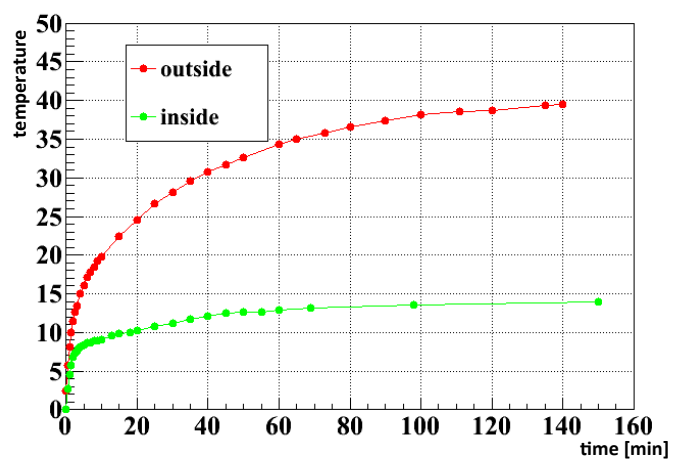


図 5.10: 新型基板の温度上昇。赤線はアルミ箔の外側、緑線はアルミ箔の内側で測定した温度と、基板部のサーミスタの温度との差を示したものである。

## 5.4.2 H6568-10

MA-PMT H6568-10 についても、H7415 と同様の setup で真空試験を行った (図 5.11)。定格である-1000V を印加し、温度測定は、熱電対を基板部の抵抗に直接取り付けて行った。結果、放電開始気圧は 34Pa と十分大きく、放電については問題がないことがわかった。同時に、温度上昇についても 5°C と小さく、こちらも問題はないことを確認した。H6568-10 の基板は、すでに表面実装型の抵抗が外周部に取り付けられている構造になっており、放熱効率が高いことと、定格が 1000V と小さく、発熱量が小さいことが理由であると考えられる。また、定格が小さいことで、放電の可能性も下がっていると考えられる。以上の結果から、H6568-10 については、真空中での使用に十分耐えるという結論が得られた。



図 5.11: H6568-10 真空試験 setup。真空槽の中にスタンドを設置し、PMT を固定した。

## 5.4.3 全数試験

NCC 実機で用いる全数について、真空試験を行った。測定時の気圧は 4Pa、電圧はどちらも定格をかけた。測定項目は、H7415V(H7416 の改良版である H7416V も含む) については放電試験と温度上昇測定、H6568-10 については放電試験である。放電モニターとしては、図 5.12 のような回路を用いてモニターを行った。基板部分に流れる電流の放電発生時の変化を、グラウンド直前に抵抗を差し込むことで読み取った。H7415V については、同時に 16 本の測定を行うために、図 5.13 のような回路をさらに追加した。信号の読み取りにはオシロスコープを用い、波形をネットワーク経由で取り込み、解析を行った。また H7415V の試験時は、サーミスタの抵抗値を読み出す回路 (図 5.14) を用いて温度上昇をモニターしながら行った。

まず、H7415V の試験結果について述べる。試験時の温度上昇については、内部の温度は 55~65°C であった (図 5.16)。 $\mu$ -metal に取り付けられた熱電対は 35~40°C を示し

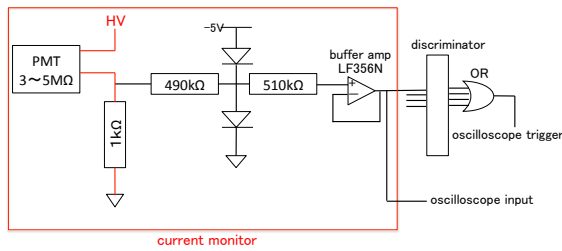


図 5.12: 放電モニター回路図

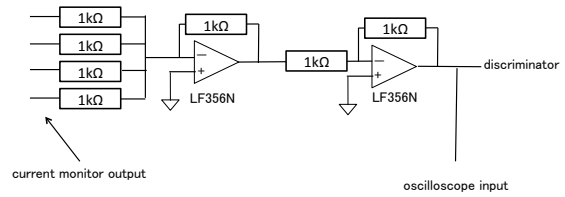


図 5.13: 放電モニター多 ch 化回路図

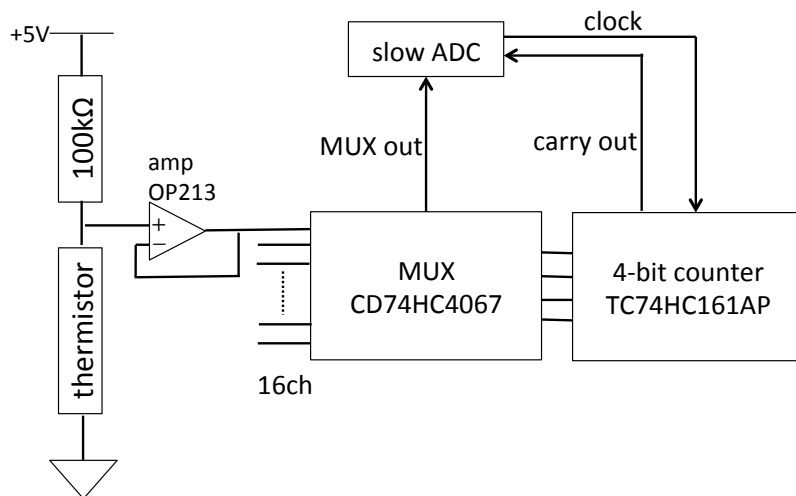


図 5.14: thermistor 読み出し回路。

ており、外周部との温度差は  $30^{\circ}\text{C}$  以下に収まっていたことがわかった。次に放電については、試験した全数 61 本のうち、2 本で連続放電が見られた (図 5.17、図 5.18)。しかしそのどちらも、真空引き後 120 時間程度が経過した時点で放電がやみ、以後 50 時間にわたって放電は見られなかった。この 2 本については、再度 1 週間の真空試験を行い、放電が起こらないことを確認した。このことから、運用時には、真空引き開始から十分な時間をとってから電圧をかけることで、放電は起こらないと思われる。他の PMT については、1 週間の試験で、1 発ないし 2 発の放電があったが、放電の大きさは、電流値としては  $50\mu\text{A}$  程度であり、ベース電流の 1 割程度であったため、これに関しては運用に問題がないと考えた。H6568-10 については、単発放電はいくつか起きたが、連続放電は見られなかったため、こちらも運用に問題がないと考え、PMT の真空試験を終えた。実際に実機にて運用した際の真空中での挙動は 6 章にて述べる。



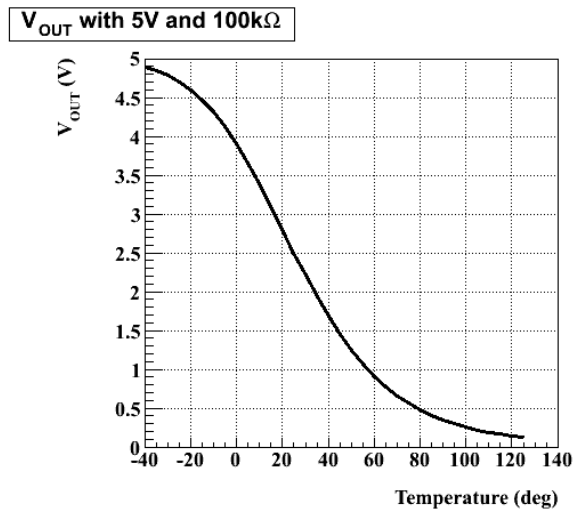


図 5.15: 100k  $\Omega$ の抵抗を直列につないだ時の thermistor の特性曲線。5V 電源を用いると、-40~120  $^{\circ}\text{C}$ までの範囲で測定が可能である。

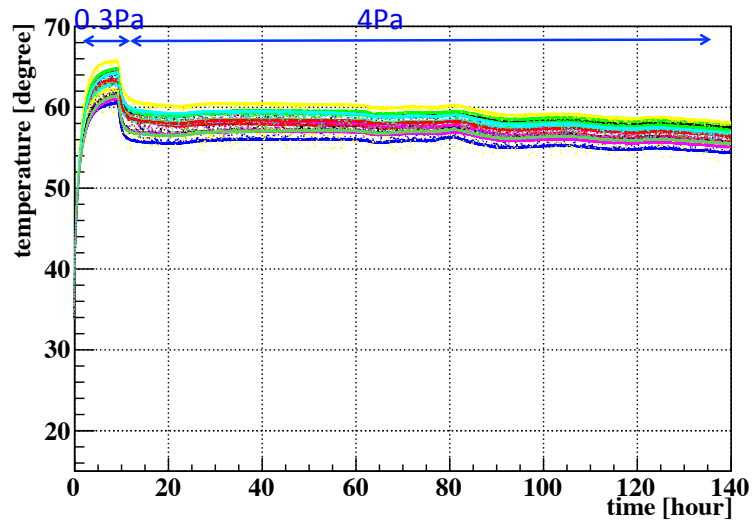


図 5.16: H7415V の温度上昇。真空引きの初期はターボポンプを使っていたため 0.3Pa 程度になっていた。その後ターボポンプを止め、4Pa での試験を行った。

## 5.5 出力安定性の試験

### 5.5.1 レート耐性

レート耐性の測定 setup を図 5.19 に示す。

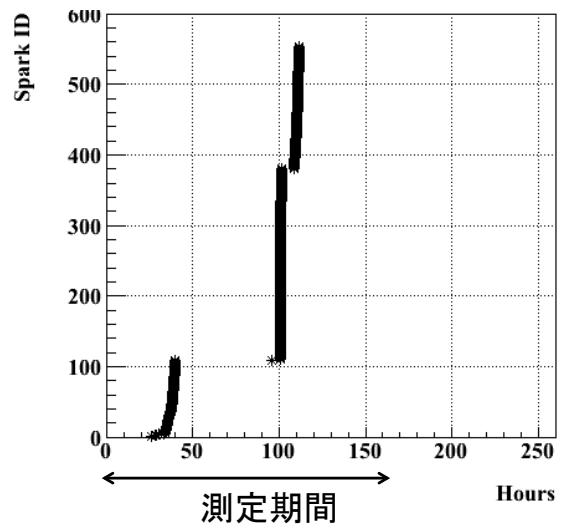
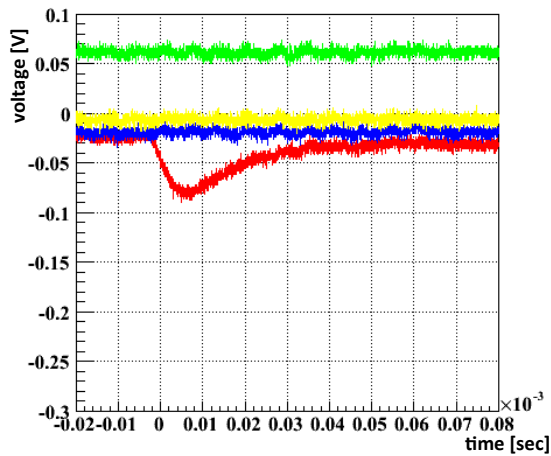


図 5.17: 放電モニターで得られた放電波形 図 5.18: H7415V の放電回数プロット。  
120 時間の経過後、放電が止まっている

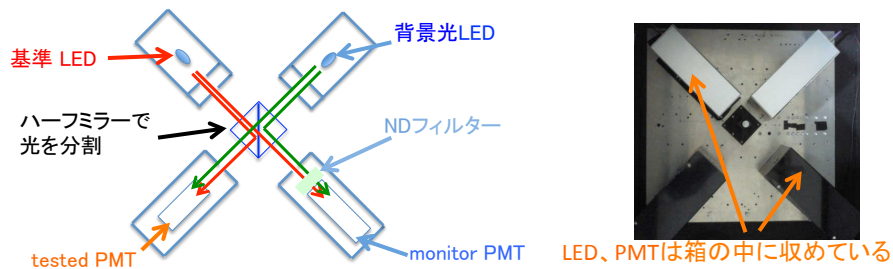


図 5.19: レート耐性測定 setup

青色 LED からの光をハーフミラーを用いて分割、測定する PMT と、LED の光量をモニターする PMT にそれぞれ入射させた。ここでモニター用の PMT には、通常の H7415 を用いた。この測定基準となる LED は、高レートになり過ぎない程度 (1kHz) で点灯し、測定する PMT には 100p.e. の光量が入射するよう調節した。背景光用に別の LED を用意し、同様にそれぞれの PMT に入射させた。このとき、背景光 LED の光量は測定する PMT には 100MeV 相当 (H7415 では 1000p.e.、H6568-10 では 100p.e.) が入射するよう調節した。背景光のレートを 1kHz~1MHz の間で変化させ、基準光の信号の出力の変化を測定した。図 5.20、5.21 に測定結果を示す。

H7415 については、gain が高くなるにつれて、より大きな出力変動が見られた。そこで、変動を 10% に抑えられるように、1MeV あたり 10p.e. の光量を持つ module に

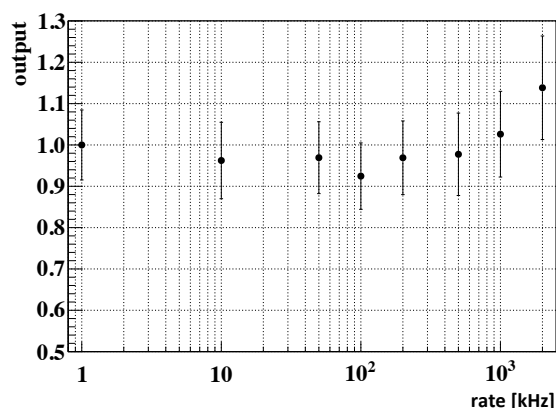
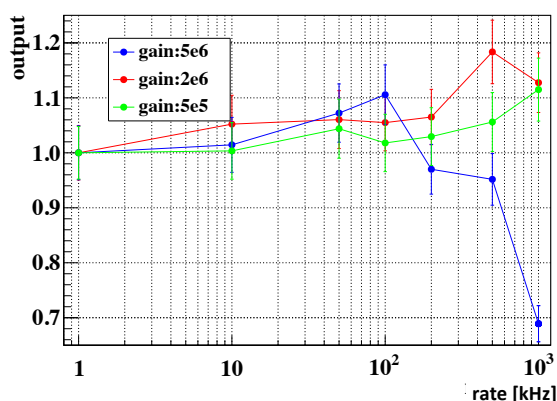


図 5.20: H7415 rate 耐性プロット。1kHz での出力で規格化して示してある。  
 図 5.21: H6568-10 rate 耐性プロット。1kHz での出力で規格化して示してある。

対して、gain 設定を  $2 \times 10^6$  程度にして運用することを決定した。この設定は、レートが数百 kHz になると変動が大きくなるという結果が得られているが、2013 年内は加速器の強度としては 50kW 以下での運転を行う予定であり、高々 100kHz 程度のレートになると予想される。そのため、当面の運用は問題ないと考えられる。後々、加速器の出力が上昇するような状況下では、gain 設定を下げ、アンプを導入することで対応可能である。

H6568-10 については、1MeV あたり 1p.e. の光量をもつ module に対して、 $8 \times 10^5$  程度での運用で変動が 10%以内に抑えられることを確認した。

### 5.5.2 パルスリニアリティ

NCC の要求としては、common では、veto threshold である 1 MeV から最大で 100MeV まで (キャリブレーションに用いる宇宙線の MIP peak が 40MeV であり、これを十分含む範囲)、individual では 10MeV から最大 1GeV まで (ハロー中性子 event の 99%がこの範囲に存在している) の間でリニアリティが確保されている必要がある。これは入射光量において、どちらの読み出しもおおよそ 10~1000p.e. に相当する。そこで、実際にこの範囲におけるリニアリティを測定した。基準光は 1kHz で点灯、入射する光量を 10~1000p.e. の間で変化させ、出力の変化を測定した。図 5.22、5.23 に測定結果を示す。横軸を energy deposit に換算した時の ADC の出力をプロットした。

H7415 については、 $5 \times 10^6$  の gain 設定において、出力の変動は 5%以内に収まっていることがわかった<sup>1</sup>。先に述べたとおり、運用時はこれより低い gain 設定である

<sup>1</sup>150MeV 付近で直線から外れているのが見られるが、想定しているレンジ外なので今回は許容した。

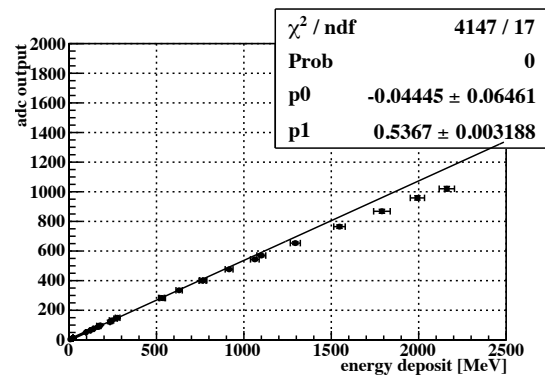
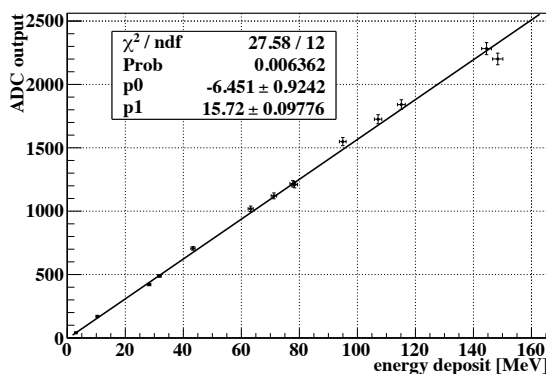


図 5.22: H7415V のリニアリティプロット 図 5.23: H6568-10 のリニアリティプロット

( $2 \times 10^6$ ) を考えると、ノンリニアリティは十分小さく、運用に問題がないといえる。

H6568-10 についても同様に、 $8 \times 10^5$  の gain 設定では 10~1000p.e. の入射光量に対し、出力変動は 5% 以内に収まっている事がわかった。

注意しておくべき点として、入射光量がより大きいような環境ではノンリニアリティが大きくなっている。先に述べた通り、gain 設定が大きくなった場合にも同様の効果が見られると考えられる。MA-PMT においては、同一の個体内であっても、ch ごとに gain variation が存在している (図 5.24)。そのため、gain が高い ch については、ノンリニアリティが大きくなることが予想される。これを考慮し、実際に用いる PMT 全 ch について、リニアリティを測定しておくことが望ましいと考え、全数測定時には実際に全 ch について測定を行うこととした (次節で述べる)。

### 5.5.3 全数試験

実機で用いる全 PMT について性能評価を行った。観点としては、まず H7415V については、十分低い HV 設定下で、threshold を 1MeV にかけるのに十分な gain を得られるかどうかである。これは、発熱を抑える観点から非常に重要である。具体的には、設定値を 1500V に抑えることで、発熱量は 6 割程度に抑えられる (図 5.25)。そこで、gain curve を作成し、十分高い gain を持っていることを確認する。H6568-10 については、パルスリニアリティの測定が重要である。

測定 setup を図 5.26 に示す。setup は、2 種の PMT の測定を同じシステムで行えるようデザインした。青色 LED からの光をクリアファイバーを用いて PMT に導入、同時に光量モニター用の PMT を用意し、こちらにもクリアファイバーを用いて光を導入した。H6568-10 の 16ch 全てについて測定を行うため、測定架台は暗箱内、自動ステージ上に置かれ、暗箱外からの操作で上下左右に移動できるようになっている。

100	97	97	92
89	82	66	70
66	72	66	76
70	68	69	96

図 5.24: H6568-10 の典型的な gain variation。浜松ホトニクス社の資料をもとに作成した。数値は、最大の gain の ch を 100 として規格化したものである

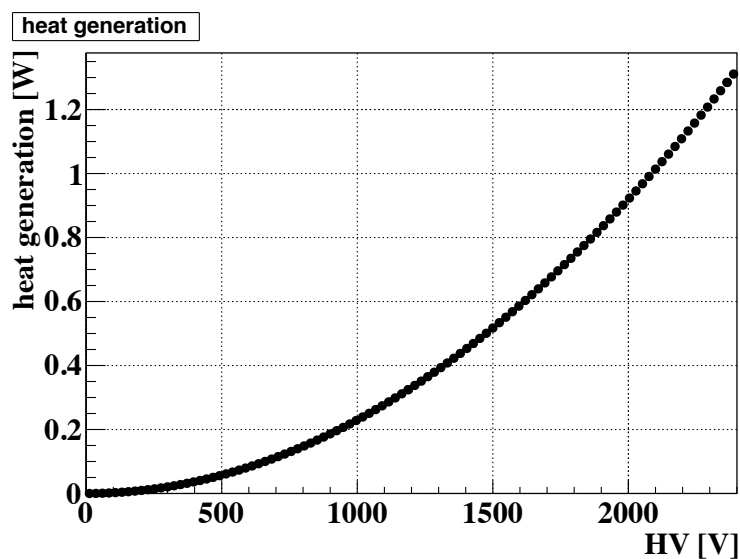


図 5.25: HV 設定に対する H7415V の発熱量。抵抗値から算出した値である。

まず、H7415V の測定について述べる。LED の光量を 1kHz、平均 0.1p.e. 程度に調整した。HV は 1300、1500、1800V の 3 点とした。ADC 分布から、pedestal と 1p.e. の peak の値を読み取り、gain を求めた。測定結果を図 5.28 に示す。

使用する全 PMT について、1500V での gain が  $3 \times 10^6$  を超えており、運用に問題

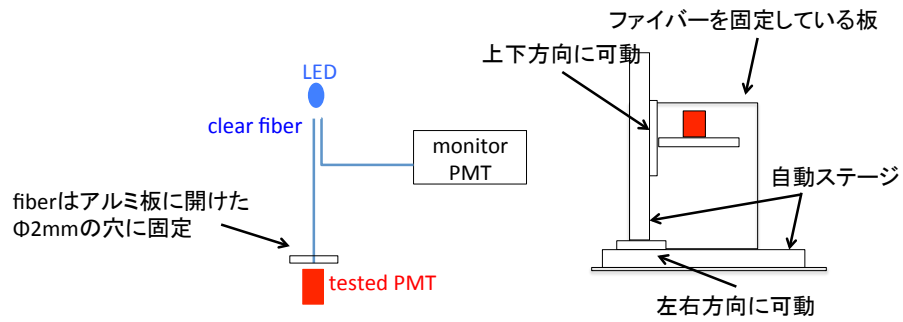


図 5.26: 全数測定 setup

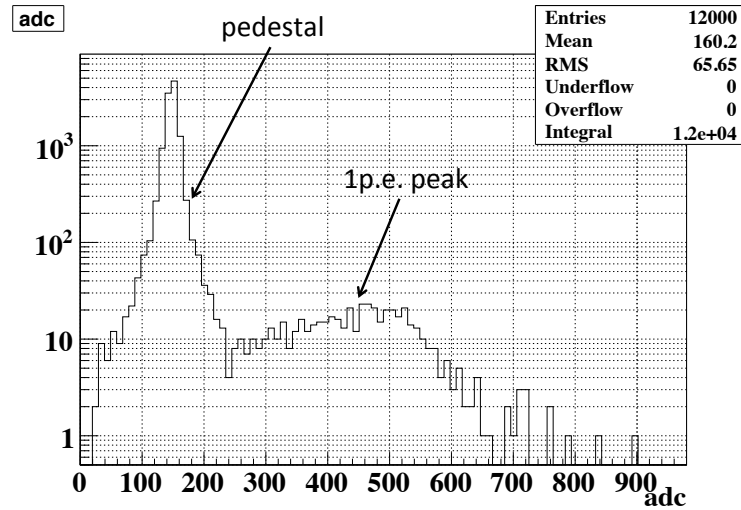


図 5.27: gain 測定時の ADC プロット。pedestal と 1p.e. が見えている。amp を入れているために pedestal の幅が広がっている。

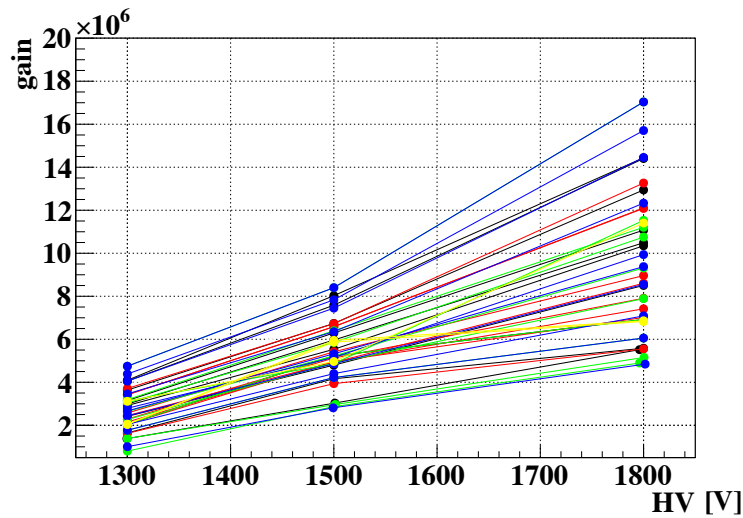


図 5.28: H7415V gain curve

がないことを確認した。

次に、H6568-10 の測定について述べる。測定に先がけて、各 ch の光電面の位置を精査した。ファイバーの位置が光電面中心とずれていると、入射光量を正しく見積もることが出来ないためである。精査は、LED の光量を 100p.e. 程度に調整し、 $200\mu\text{m}$  ずつステージを動かしたときの出力の変化を測定することで行った。結果をプロットしたものが図 5.29 である。ステージの移動に伴って出力が変化していること、ほぼ

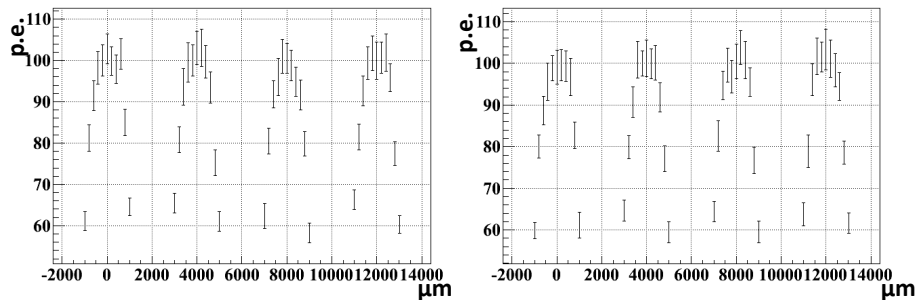


図 5.29: H6568-10 ch scan プロット。左図は左右方向、右図は上下方向である。

平坦な部分が見られることがわかる。この平坦部分の中心を各 ch の中心と定義、以後の測定はそれらの点で行った。gain 測定時には、LED の光量を 1kHz、平均 0.1p.e. 程度に調整した。HV 設定は 800、850V、900V とした。測定結果を図 5.30 に示す。850V 程度で全 ch の gain が  $1 \times 10^6$  を超えており、運用時に定格である 1000V 付近での運用をする必要がないことがわかった。このとき、PMT 内の各 ch に対して、gain

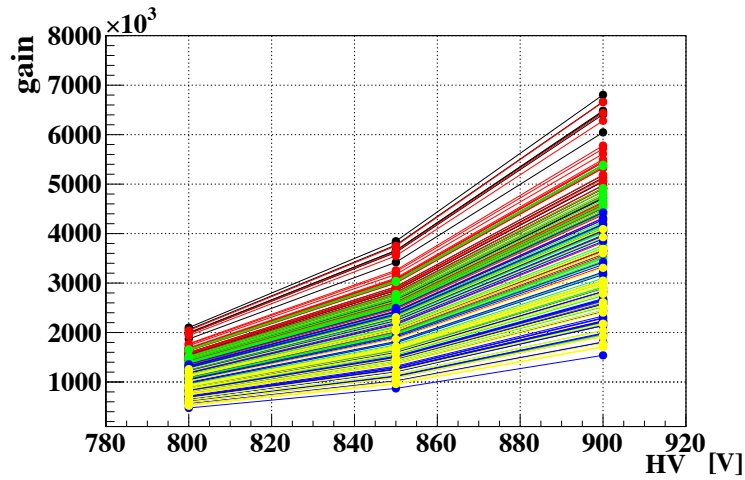


図 5.30: H6568-10 gain curve

variation が存在していることが確認できた (図 5.31)。16ch の gain の平均からのずれとしては、最大で 60% となっていた。傾向としては、中央の 4ch が gain が低いことがわかっており (図 5.32)、実機で使用する 12ch にはこれらを含めず、外側の ch のみを使用することとした。

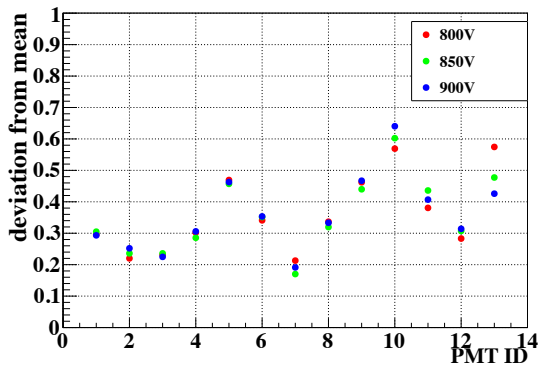


図 5.31: 各 PMT の gain variation。16ch の平均からのずれの大きさをプロットしたものの

93	69	67	100
68	58	64	77
78	68	71	78
100	73	73	96

図 5.32: ch 毎の gain variation。典型的な 1 本について示している。最大の gain であった ch を 100 として規格化している。

次にリニアリティの測定を行った。HV 設定は、gain の最も低い ch で  $1 \times 10^6$  の gain が得られる値として設定し、光量を 10、100、500、1000p.e. と変化させ、出力の変化を測定した。測定結果を図 5.33 に示す。1000p.e. までの入射光量に対して、ノンリニアリティは最大で 12% となった。ここでノンリニアリティとは、低光量時の入力と出力の関係性を外挿したものと、実際の出力のずれである。H6568-10 について



ても、運用に問題がないことを確認し、実機で使用することを決定した。実機で使用する際は、今回取得したリニアリティデータをもとに、データ解析の際に補正をかけることを考えている。

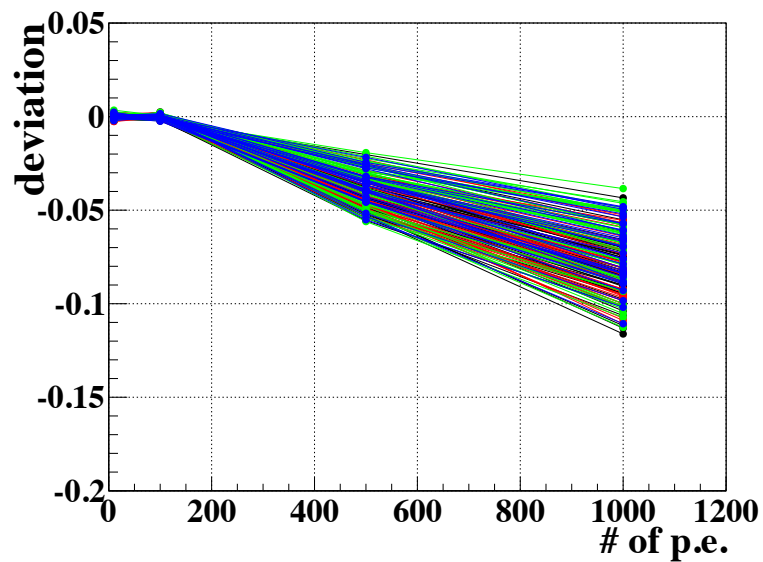


図 5.33: H6568-10 リニアリティ測定結果。各 PMT、各 ch のノンリニアリティをプロットしている

## 第6章 NCC実機の性能評価

完成したNCCは、2012年12月、J-PARC  $K^0$ TO detector内にインストールした。NCCの位置は、Front Barrel内に設置後行われた測定により、Front Barrel下流端からNCCの結晶下流端が31.5cmの位置であることがわかった。これは、設計時の位置に比べて、1.5cm上流に置かれたことになる。その後、上流部と中流部、下流部をそれぞれ合体させ、 $K_L$  beamline上に設置した。これにより、 $K^0$ TO detectorのうち真空容器内に設置される検出器群に関しては全てインストールされ、物理データ取得に向けた調整を開始した。空気中でのrunを2012年12月14日～27日に、真空中でのrunを1月7日～17日にそれぞれ行い、各検出器の調整と、DAQシステムのstudy、 $K_L$  yieldの測定を行った。以下に、これらのrunにおいて得られたデータを用いたNCC実機の性能評価について述べる。

### 6.1 データ取得方法

NCCのシグナルは、図6.1のような流れで読み出す。PMTの信号をフィードスルーを通じて真空容器外にあるコンバータに入力する。このコンバータは、single-end入力をdifferential出力に変換するためのものである。その後、LANケーブルを用いてこのdifferential信号を125MHz FADCに入力し、8nsごとに64sampleの波形を記録する。図6.2は、実際にrun中に得られたNCCの波形データである。以降、波形の頂点の値をADC countと定義し、解析を進めた。

データを取得するためのtriggerシステムには、L1、L2、L3の3段階のtriggerが存在する。L1では、Et sum triggerなどの簡単なtriggerを発行する。Et sum triggerは、8nsごとに読みだした電圧値を足しあわせ、その値がthresholdを超えたら発行されるtriggerである。次のL2では、L1では取り扱えない、より複雑な条件を用いたtriggerを発行する。L3ではPCを用いて、各検出器の情報を統合し、eventを再構成し、選別を行う。

### 6.2 真空中での動作

$K^0$ TO detectorの真空排気システムは、図6.3のようにになっている。メンブレンと呼ばれる厚さ200 $\mu$ mの膜によって、崩壊領域は区切られ、高真空となっている。

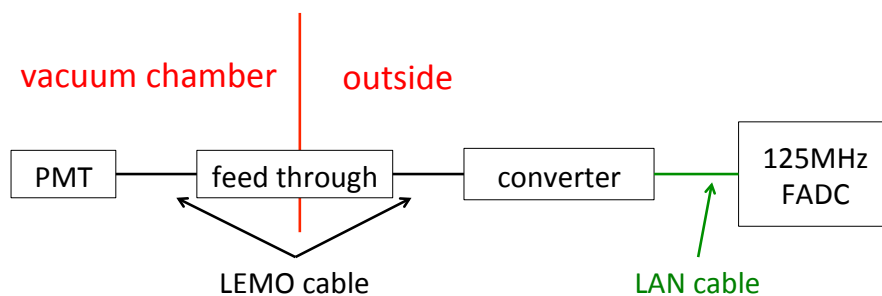


図 6.1: NCC の信号読み出しの流れ

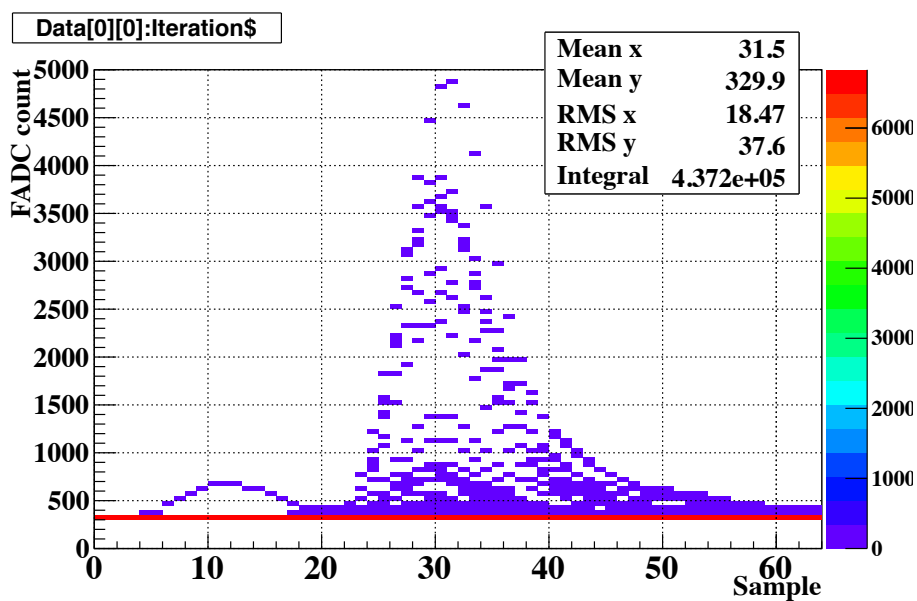


図 6.2: FADC で得られた NCC の波形データ。今回の解析では、頂点の値を ADC count として定義した。

また、上流部と下流部についても区切られており、それぞれ排気ポンプを用いて真空引きを行う。1月のrunにおいて、NCCの設置された上流部、Front Barrel付近は、真空引き開始から1週間で3Pa程度の気圧になった。真空容器内の気圧変化を図??に示す。以下では、この環境下でのPMTの温度上昇、放電について述べる。

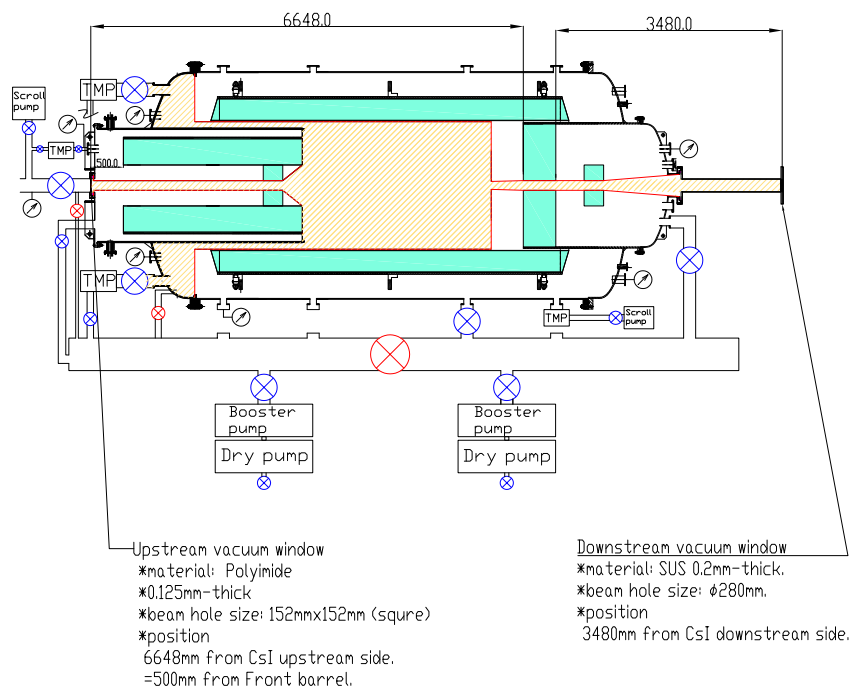


図 6.3: KOTO detector の真空排気システム。

### 6.2.1 温度上昇

真空試験と同様に、サーミスタ読み出し用の基板を用いて common用  $\phi 3.3\text{cm}$  PMT の H7415 基板部のサーミスタの抵抗値を読み出し、PMT の温度上昇をモニターした。基板は真空試験で用いたものを改良し、64ch まで読み出せるようにした。測定した PMT は、common48ch、outer8ch、NCC\_LCV4ch の計 60ch と、冷却水配管の表面 2ch、Front Barrel 上流部内壁 1ch、Front Barrel 上流部に置かれたサーミスタ読み出し基板上の 1ch の計 64ch である。測定結果を図 6.6 に示す。

基板部の温度は、HV 設定の最も高い PMT である ID 4 で  $35^\circ\text{C}$ 、冷却水配管との温度差としては  $20^\circ\text{C}$  である。5 章で述べた温度上昇の見積もりとしては、最大でも  $25^\circ\text{C}$  程度であろうという結果であったが、今回の結果はそれを実現したものであった。なお、サーミスタの calibration を行なっていないことによる誤差が実際には含まれており、スペックシートによると、誤差は 5% 程度となっている (図 6.7)。しか

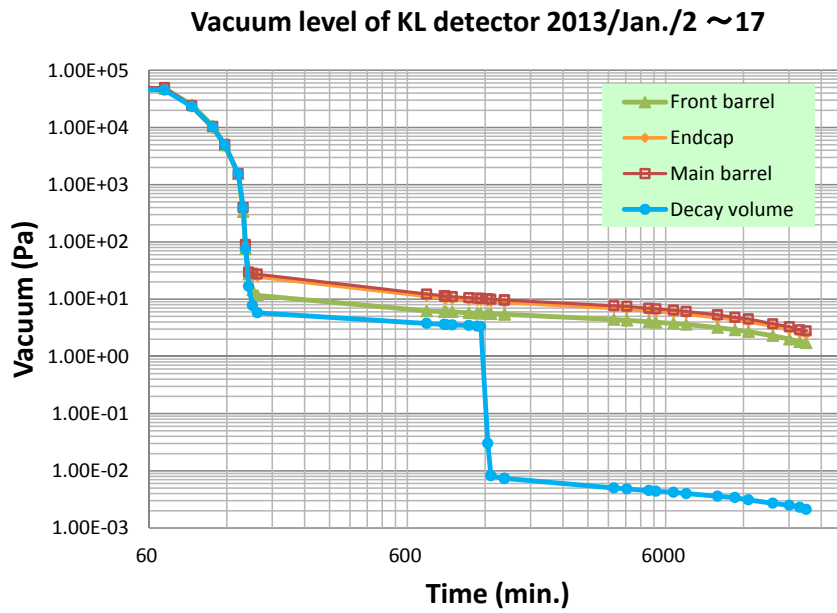


図 6.4: 2013 年 1 月の run における真空容器内部の各所の気圧変化。NCC の設置されている Front Barrel 付近は、1 週間で 3Pa になった。

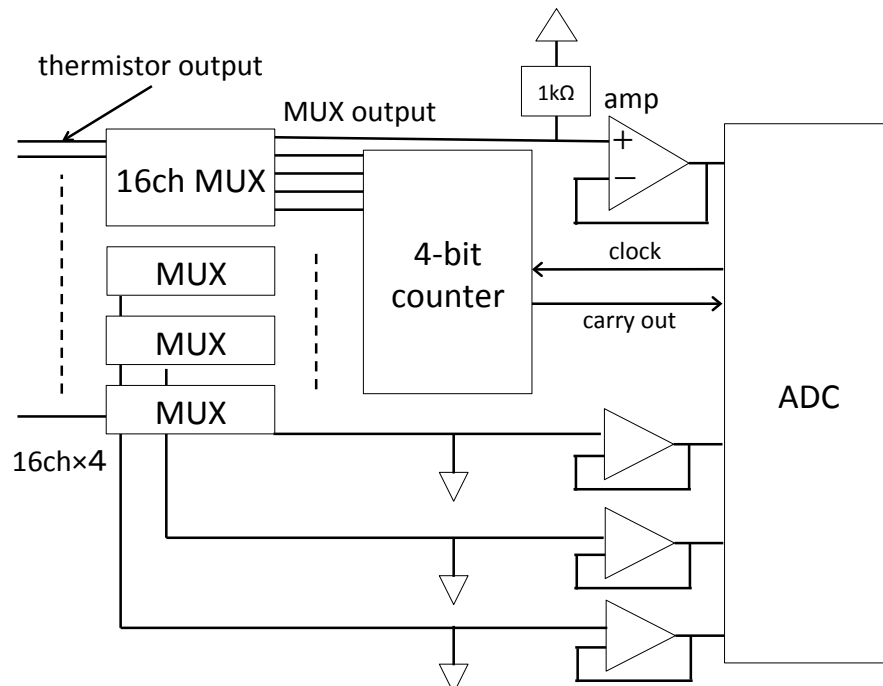


図 6.5: サーミスタ読み出し基板回路図。真空試験で用いた回路を改良し、64ch まで読み出せるようになっている。

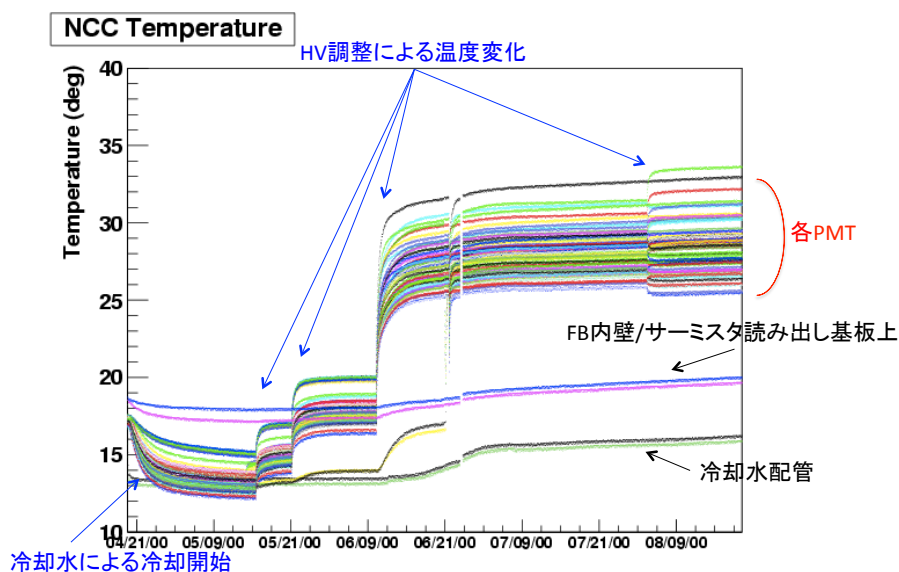


図 6.6: 温度上昇 plot

し、その誤差を考慮に入れても、目標であった 70 °C 以下という条件を十分達成する低い値である。以後の run においても温度モニターは引き続き行なっていくが、使用した全 PMT において、発熱の観点では、現状で問題は確認されなかった。

Temp. (°C)	NCP□□WF104J type		
	Resistance (kΩ)		
	Low	Center	High
-40	3729.0380	4397.1193	5171.9295
-35	2647.2336	3088.5989	3594.5428
-30	1902.5755	2197.2250	2531.1628
-25	1383.3182	1581.8805	1804.4223
-20	1016.2022	1151.0367	1300.5024
-15	754.3293	846.5788	947.7345
-10	565.4664	628.9882	697.8966
-5	427.6799	471.6321	518.8009
0	326.4567	357.0117	389.4505
5	251.2051	272.4995	294.8601
10	194.8470	209.7098	225.1420
15	152.2795	162.6506	173.2936
20	119.8614	127.0802	134.3970
25	95.0000	100.0000	105.0000
30	74.7365	79.2216	83.7660
35	59.1874	63.1671	67.2459
40	47.1711	50.6766	54.3066
45	37.8301	40.9035	44.1161
50	30.5087	33.1946	36.0267

図 6.7: サーミスタの温度特性。25~30 °C 付近において、誤差は 5% 程度である。

## 6.2.2 放電モニター

真空試験で用いた回路を用いて、common 4ch、individual 1ch について放電をモニターした。common については、真空試験で一定期間の間放電が見られていた2本と、他2本をモニターすることとした。今回使用した回路では、信号読み出しと同時に放電をモニターすることが出来ないため、beam data 取得開始後は放電モニターを行なっていない。

common は30時間、individual については1時間のモニター期間で、放電は全く確認できなかった。よって放電についても、測定した期間においては問題はなかった。しかし、データ取得中に放電が起こっていないことを保証するものではないため、以後の run においてはデータ取得と同時に使用出来る新しい放電モニターを導入する予定である。

## 6.3 宇宙線を用いた性能評価

$K_L$  beam を用いたデータ取得とは別に宇宙線 event のデータ取得を行い、各 module の energy calibration や、ケーブルのスワップチェックを行った。その結果について述べる。

### 6.3.1 イベントディスプレイ

まず、NCC のイベントディスプレイ (図 6.8) を用いて、ケーブルのスワップチェックを行った。common に energy deposit があつた場合に、individual 側での対応は正しいかを見ることで、ケーブルのつなぎ込みや、ファイバーのつなぎ込みのミスを見ることが出来た。現在は、全ての ch において、正しい対応付けがなされている。

### 6.3.2 MIP に対する出力

宇宙線 event の取得に当たって、NCC の Et sum が 1000 を超えるような event のデータを取得した。これは、common でおよそ 20MeV 以上の energy deposit に相当する。宇宙線の MIP event では、1module に 40MeV の energy deposit があることから、宇宙線 event を収集するには十分低い trigger threshold となっている。cut 条件としては、

- 自 module の上下方向すべての module について、ADC 値が 1000 以上であること

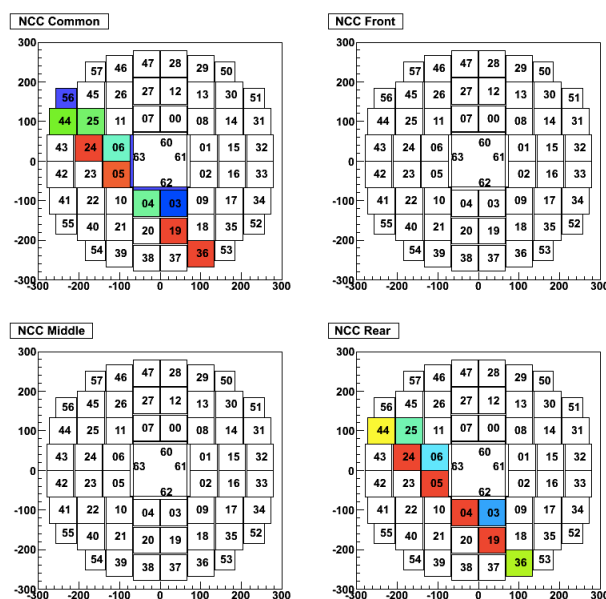


図 6.8: NCC のイベントディスプレイ。左上から右下に向けて、宇宙線が入射している様子がわかる。

を用いた。図 6.9 のような、縦に貫通する event を選び、着目している module の上下にあるすべての module について MIP の 1/2 の energy deposit があることを要求し、宇宙線 event とした。そうして得られた ADC 分布を Landau 関数でフィッティングし、peak の位置を求めた。解析に用いたデータは、200 分のデータ取得によるものである。図 6.10 は common、individual の典型的な宇宙線 event における ADC プロットである。左図は common、左図は front のものであり、どちらも MIP peak が確認できる。右図は最も誤差が大きかった ch でのプロットである。common は 1% 以下の精度で calibration ができている。individual については、特に rear は結晶サイズが小さいこともあり、統計が少ない傾向があるが、最も誤差が大きい module で誤差は 4% であり、3 時間のデータ取得により、5% 程度の精度で calibration することが可能であることがわかった。

また、各 module の MIP peak の値を図 6.11 に示す。common については、RMS で 5% 以内に MIP peak の値を揃えることができていくことがわかる。individual については最大で 3 倍程度の開きが生じてしまっている。L1 trigger では calibration factor を考慮に入れず、ADC count のみで trigger を発行するため、Et sum trigger が必要な状況において、peak の値は揃っていることが望ましい。実際に、ハロー中性子測定を行う場合、common の Et sum を trigger 条件に含めることを考えている。そこで、以降の run では HV 設定を調整し、可能な限り MIP peak の値を揃えることを予定している。



### 6.3.3 各 module 内の uniformity

次に、同じデータセットを用いて、uniformity を見積もった。uniformity は、4章で述べたものと同様に、以下の式で表される。

$$\text{uniformity} = \frac{\text{front}}{(\text{front} + \text{middle} + \text{rear})/3} \quad (6.1)$$

上式は、front における uniformity を表している。uniformity の算出の方法としては、上で述べた宇宙線 event において、individual の情報を用いて front に hit した event、middle に hit した event、rear に hit した event をそれぞれ区別し、common の出力の比較をとった。このとき、individual の threshold は MIP peak の 1/2 とした。測定結果を図 6.12 に示す。

uniformity は 20% 以内であることが確認できた。以前と同じように、middle の光量が他に比べて高い、という結果が読み取れる。しかし、module 完成時に測定した uniformity は 25% であり、より小さな値となっていることがわかった。uniformity の変化の原因についてはこれからの study 項目の 1 つである。

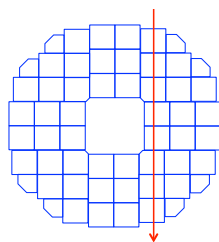


図 6.9: 選んだ宇宙線 event のイメージ図。縦の同じ列の全ての module に hit があることを要求した。

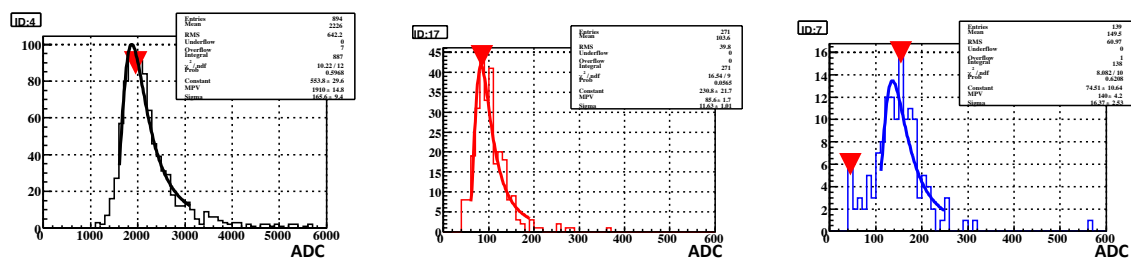


図 6.10: 宇宙線 event ADC plot。左図は common、中図は front の典型的な plot である。どちらも宇宙線の MIP peak が確認できる。また、右図は最も誤差が大きかった ch のプロット。

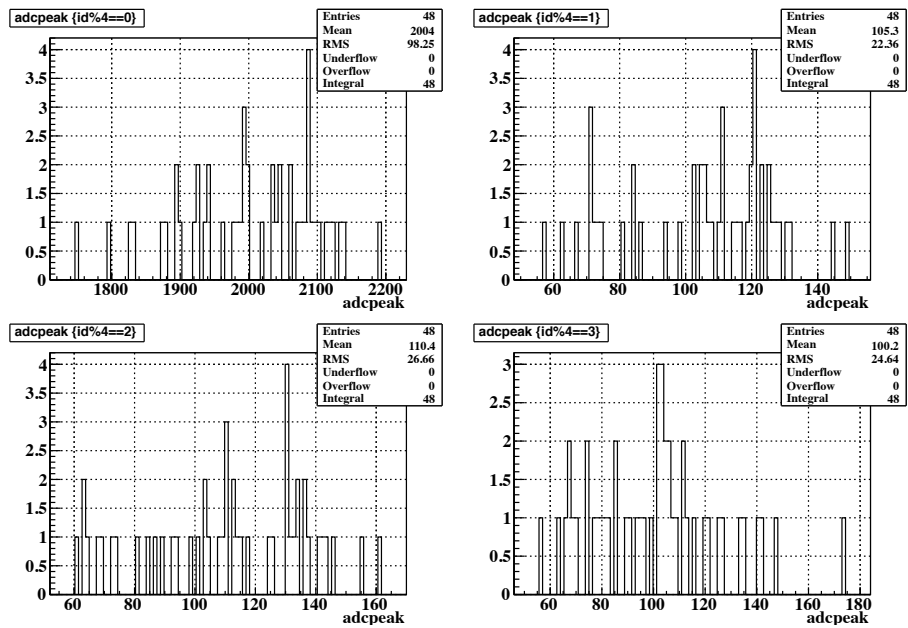


図 6.11: 各 module の MIP peak の MPV 値。左上が common、右上が front、左下が middle、右下が rear。common については、RMS が 5% となった。individual は 3 倍の開きが見られる

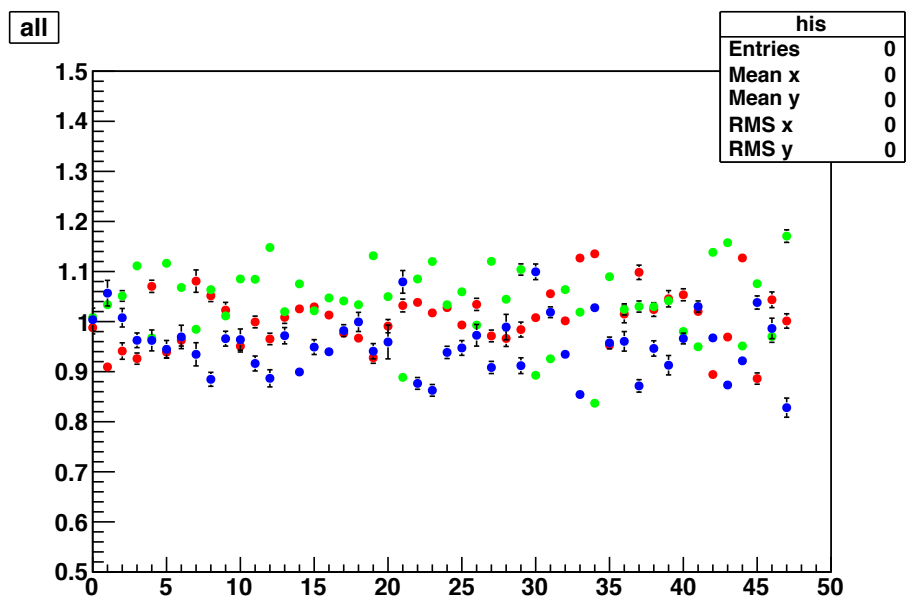


図 6.12: NCC 実機の uniformity。uniformity は最大で 20% であった。

### 6.3.4 LED を用いた絶対光量の評価

PMT を取り付けている構造体には、紫外LED(日亜化学工業株式会社 NSPU510CS) が計 16 個取り付けられている。ファイバーを照らすことで PMT の動作確認が可能である(図 6.13、図 6.14)。LED の発する光には指向性があるため、広い範囲のファイバーを照らすために LED の表面はヤスリがけした。今回の run では、LED の光量は run 中に調節することが出来なかった。そのため、偶然適切な光量が入射しており、かつ gain 設定が 1p.e. のシグナルを測定するのに適する程度に高かった、common の 20ch に対してのみ gain を測定することが可能であった。図 6.15 に LED によるシグナルの ADC プロットを示す。pedestal と 1p.e. peak が読み取れる。それらの peak の ADC count の差を取り、1p.e. あたりの count を求めた。先に得られた宇宙線の MIP peak の値をこの count 数の比をとることで MIP peak における光量を算出、最終的に 1MeV あたりの光量を求めた、プロットしたものが図 6.16 である。。module 製作後に測定した光量と比較して、大きく変化していることがわかった。原因として考えられるものとしては、周辺温度の違い、ファイバーと PMT のライトコンタクトの強さ、積み上げやインストールなどの際の衝撃によるダメージなどが考えられる。温度については、1°C の温度上昇につき、1% 光量が落ちることが知られている。いずれにしても、現状では原因を突き止めるには至っておらず、今回光量を評価出来なかった残りの module の評価を含め、今後の課題である。

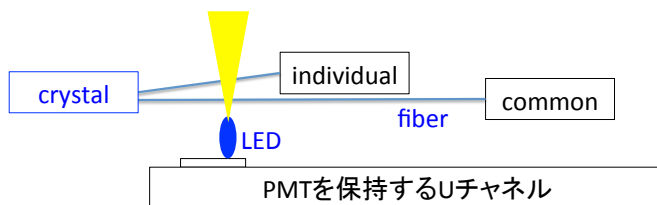


図 6.13: LED の設計イメージ。LED は PMT を固定している U チャンネルの上に設置され、広い範囲のファイバーを照らしている。

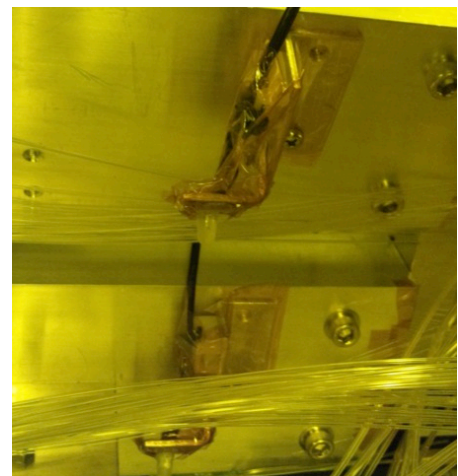


図 6.14: 取り付けられた LED。中央部の白く見えるものが LED である。

## 6.4 $K_L$ beam を用いた性能評価

### 6.4.1 counting rate

run 中の NCC の各 module の counting rate を測定した結果を述べる。測定した run において、beam 強度は 15kW であった。測定方法は、TMON trigger (target から 13.7m の位置に置かれた厚さ 2mm、1cm 角の 3 枚のプラスチックシンチレーターの coincidence 信号を利用した、beam の spill 構造に比例した幅 40ns の trigger)、clock trigger、FADC に実装された scaler の 3 種である。scaler は、FADC で読み取った電圧値が、設定した threshold を超えた回数を記録するものである。clock trigger の rate は 1kHz、scaler の threshold は common 1MeV、individual 10MeV に設定し、TMON trigger や clock trigger についても、同じ threshold を設定することとした。

図 6.17 は TMON trigger を trigger としたとき、波形データの各 sample に与えられる time stamp をプロットしたものである。time stamp は、FADC のデータ取得開始から終了までの間、FADC 内部で 8ns 毎に count する clock の count 数であり、 $250 \times 10^6$  count、すなわち 2s の beam 構造を見ることができる。この情報から、time stamp が  $80 \times 10^6 \sim 280 \times 10^6$  の間は beam が出ているとし、以後の解析を行った。

図 6.18 は TMON trigger を trigger としたときの common の典型的な energy deposit をプロットしたものである。これらの event のうち、1MeV 以上の energy deposit があつた event の中で、peak の timing が 25~45sample(160ns) の範囲にある event を計数した。これを (trigger  $\times$  160ns) という値で割ってやることで、counting rate が得られる。clock trigger についても同様に解析を行った。scaler のデータについては、scaler の count 数を、(spill 数  $\times$  2s) で得られる beam が出ている時間で割ることで

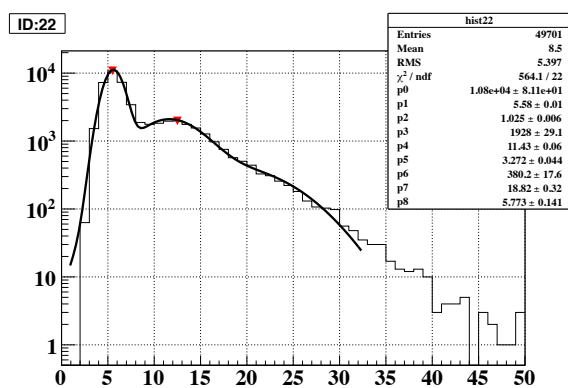


図 6.15: 典型的な LED シグナルの ADC プロット。pedestal と 1p.e. peak が確認できる

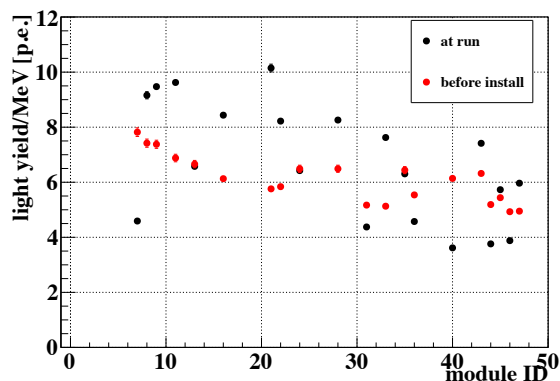


図 6.16: LED を用いて光量の評価ができた 20module について、module 製作後の測定と今回の run での光量の比較をしたもの。

counting rate を得る。得られた counting rate をプロットしたものが図 6.19 である。TMON trigger が他に比べて 2 倍程度高い値を示している。これは spill 内の beam 構造が完全にフラットではなく、強度の高い瞬間と低い瞬間が存在していることが原因の 1 つである。各 module の counting rate は、common で最大 120kHz、individual で最大 28kHz (TMON trigger での値) となった。5 章で述べた PMT のレート耐性試験の結果から、どちらも出力の安定性が十分確保されている領域であることが確認できた。

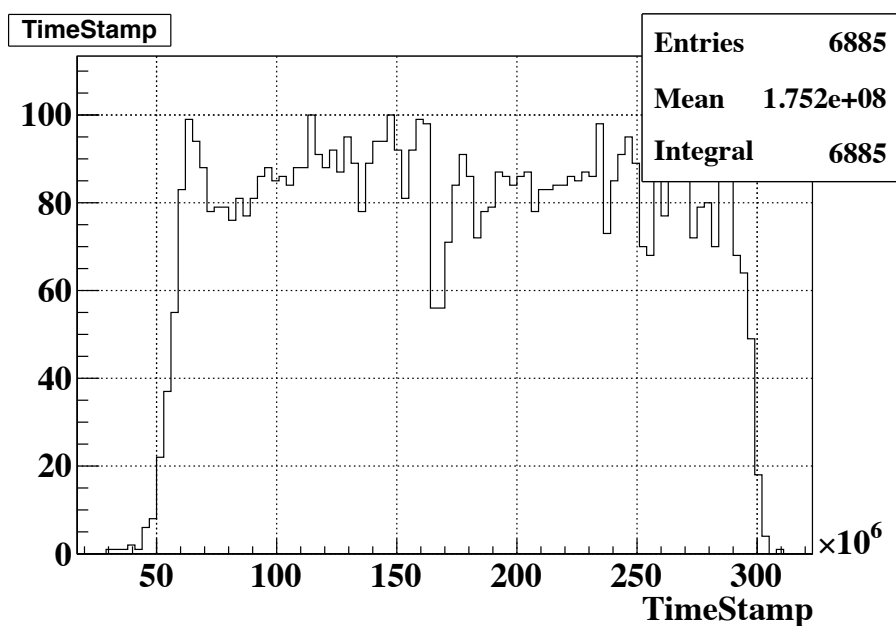


図 6.17: TMON trigger を trigger にしたときの各イベントの time stamp。time stamp は 1count が 8ns に対応しており、6s の spill のうち、2s の間 beam が出ているという構造が見えている

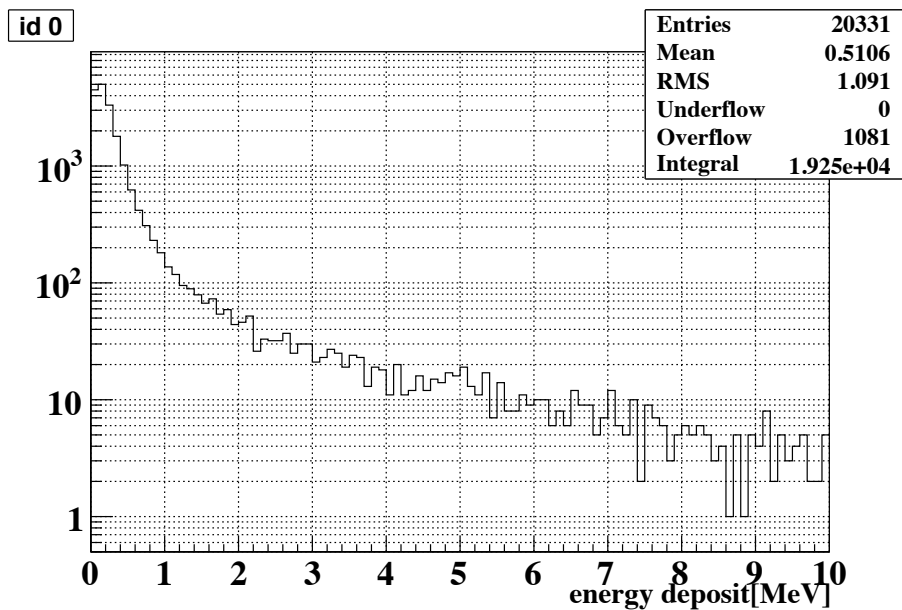


図 6.18: beam spill 中の common の典型的な energy plot。このうち、1MeV を超えている event のみを用いた

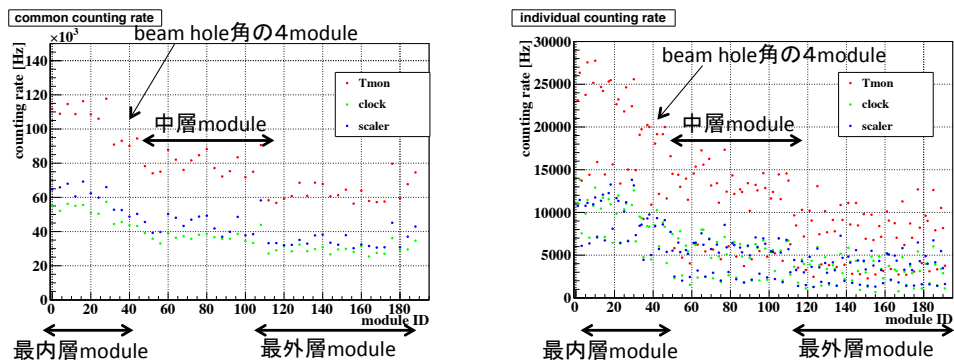


図 6.19: 各 module の counting rate。左図は common、右図は individual について示したものの。common の counting rate は individual のものに対して 5 倍程度高くなっている。また、TMON trigger を trigger にした場合、他の 2 種の trigger に比べて 2 倍程度高くなっていることがわかる。common、individual のどちらについても、最内層の module は counting rate が高く、外層に行くにつれて下がっている。また、individual は、rear の rate が front や middle に比べて低い (図中で 2 層に分かれているのが見える)。

## 第7章 まとめ

本論文では、K<sup>0</sup>TO 実験において使用される光子 veto 検出器である NCC の製作と性能評価について述べた。

NCC は pure CsI 結晶で構成され、各 module は 3 つの結晶を接着し、波長変換ファイバーを用いて個別に読み出す individual と、3 結晶をまとめて読み出す common の 2 種の読み出しが存在する。まず、候補となる結晶の光量を測定し、十分な光量を持つ結晶を選定し、module の製作を行った。完成した module についても光量を測定し、common で 1MeV あたり 4.5p.e.、individual で 10MeV あたり 5p.e. の光量を達成していることを確認した。

次に、common の読み出しに用いられる  $\phi$ 33mm PMT の H7415、individual の読み出しに用いられる 16ch MA-PMT の H6568-10 の 2 種の PMT について性能評価を行った。真空中での動作に関しては、1Pa 以下の環境下において、発熱による温度上昇が小さいこと、放電が起こらないことを条件とした。H7415 については 5Pa 以上の気圧下では放電が生じており、安全マージンを確保するため、改良を施すこととした。改良の結果、十分な時間真空引きをすることで、10Pa 以下で放電が起こらないことを確認、温度上昇も十分小さいことを確認した。また、H6568 については、30Pa 以下で放電はなく、かつ温度上昇も十分小さいことを確認、両者共に真空中での使用が可能であるという結論に達した。次に、高レート環境下での出力安定性と、要求されるダイナミックレンジにおける出力安定性を測定した。レート耐性については、出力変動が抑えられる gain 設定を決めることができた。また、ノンリニアリティが 5% 以内に抑えられる範囲はダイナミックレンジの要求に対して十分広いことを確認した。H6568 については、ch によってはノンリニアリティが大きくなる可能性が示唆されたため、全 ch のリニアリティを測定、後のデータ解析の際に補正をかけることとした。

以上の研究を経て実機の製作を進め、2012 年 12 月、J-PARCK<sup>0</sup>TO 検出器内に NCC をインストールした。2013 年 1 月に行われた真空中での engineering run において、実機の真空中での動作確認を行い、問題なく動作していることを確認した。放電モニターについては、beam データ取得と同時に行うことが現状では出来ないため、これを行えるような新しいシステムを開発、導入する予定である。また、宇宙線や LED による calibration を行い、common については 1MeV あたり 3.6p.e. 以上の光量を確保していることを確認した。この光量評価に関しては、全ての module について

行えておらず、今後の brushup が必要である。beam を用いたデータでは、各 module の counting rate を計測し、common で最大 70kHz、individual で最大 15Hz という結果を得て、出力変動が十分小さく抑えられている範囲であることを確認した。

今後は、先に述べた新しい放電モニターの開発と、LED calibration システムの開発を行う。また、module の光量の評価を進め、光量が変化している原因を探る。physics run までに module の性能評価を終え、2013 年 5 月からは物理データを取得、ハロー中性子の測定と、background についての study を進める。



## 付録A 謝辞

2年間の研究生生活と、本論文の執筆において、多くの方々にお世話になりましたこと、この場を借りて皆様にお礼を申し上げたいと思います。

中家剛教授には、貴重な研究の機会を与えて頂いたこと、感謝しております。様々なところで見受けられる細やかな気配りを、これから自分でも身につけられたらと思っております。

南條創助教には、2年間の研究生生活で多くの事を学ばせて頂きました。多岐に渡る研究内容でしたが、どの分野においても的確な助言を頂いたこと、感謝しております。これまでは製作が主でしたが、これからは解析がメインになると思いますので、まだまだ相談することが多いかと思っております。どうかよろしく願いいたします。

野村正准教授には、Weekly Meeting に毎週参加して頂き、数々の助言を頂きました。特に、実験全体を見通した上でのコメントは、非常に参考になりました。岡山大学の笹尾登教授には、Weekly Meeting に参加していただいた他、NCC member Meeting での助言や、様々な設計に携わって頂きました。数々の無理を言ったと思いますが、都度対応してくださったおかげで、NCC の完成を見ることが出来たと思っています。

京都 Kaon の学生には、日々の生活を含め、非常にお世話になりました。塩見さんには、京都でお世話になったのは1年間でしたが、所々で頂いた励ましは助けになりました。大阪大学に移られましたが、K<sup>0</sup>TO メンバーとしては、これからもお世話になります。河崎さんには、一緒に NCC という検出器を作り上げることが出来たこと、嬉しく思っております。自分のせいでなかなか製作が進まなかった面が多々あったと思います。行き詰まったときにもらえる的確なコメントは、非常に参考になりました。また、増田さんには、3回生の課題演習からお世話になっております。K<sup>0</sup>TO 実験に興味を持った最初のきっかけを作ってくださったのは増田さんでした。内藤さんには、様々な場面で夜遅くまで付き合ってくださいました。生意気な後輩ですが、もう少し付き合ってくださいると幸いです。前田さんには、データ解析の手法など、何度もコメントを頂きました。方針がそれによって定まったことも幾度となくありました。また、日根野くんのおかげで、NCC 製作は笑いの絶えない環境になったと思います。頼りない先輩であったかと思っておりますが、これからもよろしく願います。

大阪大学の山中卓教授や、KEK の小松原健教授を始めとする JUMMER の皆様にも、非常にお世話になりました。特に山中教授や、高島くん、豊田くんには NCC の

組み上げの際、非常にお世話になりました。24年中にNCCにチームを当てられたのはあのヘルプがあったからこそだと思います。ありがとうございました。

同期の合田幸平くん、田代拓也くん、長崎時大くん、楽しい研究生活をありがとうございます。4人それぞれバラバラの実験グループでしたが、むしろ様々な情報が得られてよかったかと思います。最後になりますが、ここまで見守って頂いた両親と、最愛の妹に感謝を。

## 参考文献

- [1] Andrei D Sakharov. "Violation of CP in variance, C asymmetry, and baryon asymmetry of the universe" Sov. Phys. Usp., Vol. 34, pp. 392-393, 1991.
- [2] J. Brod et al. "Two-loop electroweak corrections for the  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  decay" Phys. Rev. D 83, 034030, 2011.
- [3] Takeo Inami and C. S. Lim. "Effects of superheavy quarks and leptons in low-energy weak processes \$  $K_L \rightarrow \mu \bar{\mu}$ ,  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  and  $K_0 \leftrightarrow \bar{K}_0$ " Progress of Theoretical Physics, Vol. 65, No. 5, pp. 1772-1772, 1981.
- [4] Yuval Grossman and Yosef Nir. " $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  beyond the standard model." Phys. Lett. B, Vol. 398, pp. 163-168, Apr 1997.
- [5] J.K.Ahn et al. "Experimental study of the decay  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ " Phys. Rev.D 81, 072004, 2010.
- [6] 河崎直樹. KOTO 実験のための Neutron Collar Counter の design および開発. 修士論文, 京都大学, 理学研究科物理第二教室高エネルギー研究室, 2009.
- [7] 浜松ホトニクス株式会社 光電子増倍管 -その基礎と応用- [http://jp.hamamatsu.com/resources/products/etd/pdf/PMT\\_handbook\\_v3aJ.pdf](http://jp.hamamatsu.com/resources/products/etd/pdf/PMT_handbook_v3aJ.pdf)