

2016 年度 修士論文

**Belle II 実験 ARICH 用光検出器のための
モニターシステムの開発**

首都大学東京 理工学研究科 物理学専攻
博士前期課程 2 年 15879317

幡谷 航暉

平成 29 年 1 月 10 日

概要

Belle II 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 (KEK) にて建設中である電子・陽電子衝突型加速器 SuperKEKB を用いた大規模素粒子実験で 2018 年開始予定である。現在までに理解されている標準理論を超えた物理で予言される新粒子を直接生成してその性質を調べるエネルギーフロンティア実験に対し、Belle II 実験は B 中間子などの稀崩壊を大量に観測することにより間接的に新物理を探索するルミノシティフロンティア実験と呼ばれ、ここでは新物理の寄与は標準模型との「差異」として現れると考えられる。前身の Belle 実験では新物理探索に不十分であった稀崩壊事象の統計量を Belle II 実験では 50 倍の統計量と共に測定器の精度向上によって、この「差異」を観測することを主な目的としている。

Belle II 実験の種測定器である Belle II 測定器は各役割に応じた複数の副検出器から成る汎用測定器であり、その中で Endcap 部と呼ばれる領域での粒子識別 (主に荷電 K 中間子と荷電 π 中間子) を担う装置が Aerogel Ring Imaging Cherenkov 検出器 (ARICH) である。前身の Belle 測定器では粒子識別装置として閾値型 Cherenkov 検出器である Aerogel Cherenkov Counter (ACC) が搭載されたが、Endcap 部における ACC では 3σ 分離性能での粒子識別可能な運動量の上限が $2\text{ GeV}/c$ までであったのに対し、ARICH では 4σ 以上での粒子識別を $3.5\text{ GeV}/c$ まで拡張することを目標として開発している。ARICH は輻射体であるシリカエアロゲル、光検出器としてマルチアノード型 HAPD (Hybrid Avalanche Photo Detector)、その信号読み出し用電子回路で構成される。Cherenkov 光の放射角が粒子の種類 (質量) とその運動量、輻射体屈折率から決定できることを利用して粒子識別を行い、荷電粒子がシリカエアロゲルを通過した際に円錐状に放射される Cherenkov 光を多数の HAPD で 2次元リングイメージとして観測することで Cherenkov 光の放射角を測定する。

ARICH では 144-ch マルチアノード型 HAPD を 420 台使用するため、総チャンネル数は約 6 万チャンネルに上る。全チャンネルの応答の有無や検出効率などの動作状態はリングイメージの観測精度に深く影響するため、ARICH の性能を維持する上で全チャンネルの定期的な動作確認が不可欠となる。そこで LED 光をシリカエアロゲルによって乱反射させて HAPD に照射し、その応答を定期的に調べることで HAPD のモニタリングを行なうシステムの開発を行なった。

本研究では、まずモニターシステムの試作機を構築し HAPD 全チャンネルの生死判定、ノイズレベル、増幅率といった基本性能を長期的に監視可能であることを示した。また、建設中の ARICH 実機の一部にモニターシステムを実装し、組み上げたシステムの健全性の確認と各種設定値の調整を行なった。本論文では、主題であるモニターシステム試作機での動作検証と実機を用いた性能評価について述べると共に、2016 年夏より開始した宇宙線を用いた ARICH 本体の性能評価試験についても記述する。

目次

第 1 章	序論	11
1.1	Cherenkov 検出器	12
1.1.1	原理	12
1.1.2	実用例	14
1.2	光検出器のモニターシステム	16
1.3	本研究の目的	18
第 2 章	Belle II 実験	19
2.1	B 中間子系の物理・B ファクトリー実験	19
2.1.1	CP 対称性の破れの検証	19
2.1.2	B 中間子の物理	20
2.2	B 中間子系での新物理探索	24
2.2.1	Unitarity Triangle の精密測定	24
2.2.2	レプトニック崩壊観測による荷電ヒッグス探索	24
2.2.3	$b \rightarrow s\gamma$ 崩壊	25
2.3	SuperKEKB 加速器	26
2.4	Belle II 測定器	29
第 3 章	Aerogel RICH 検出器	40
3.1	Aerogel RICH への要求	40
3.2	Aerogel RICH 検出器の動作原理	41
3.3	Aerogel RICH 全体の構成と期待される性能	43
3.4	Aerogel RICH 検出器の構成要素	45
3.4.1	輻射体 シリカエアロゲル	45
3.4.2	光検出器 HAPD	46
3.4.3	読み出しシステム	51
第 4 章	ARICH モニターシステムの開発	56
4.1	モニターシステムの概要	56
4.2	モニターシステム構成要素の性能評価	64
4.2.1	光ファイバーごとの光量のばらつき評価	64

4.2.2	光拡散レンズの拡散角測定	66
4.3	モニターシステムの原理検証	68
4.3.1	測定方法とセットアップ	68
4.3.2	測定結果	70
4.4	長期安定性測定	75
4.4.1	ヒット率測定	75
4.4.2	増幅率測定	77
4.4.3	ノイズレベル測定	81
第 5 章	モニターシステムの実機運用試験	83
5.1	実装試験セットアップ	83
5.2	試験結果	86
5.3	モニターシステム用機器の設置位置	94
5.3.1	延長用光ファイバー試験	94
5.3.2	モニター用ファイバーの配置	98
第 6 章	ARICH 建設状況	100
6.1	Aerogel RICH 検出器開発の現状	100
6.2	宇宙線試験	102
第 7 章	結論	104
	謝辞	105
	参考文献	106
	付録	108
7.0.1	ASIC(SA03) パラメータ	108
7.0.2	Merger board	109

図目次

1.1	高エネルギー加速器研究機構の鳥瞰図	11
1.2	Cherenkov 光発生の概要図	12
1.3	粒子ごとの閾値運動量と輻射体の屈折率の関係	13
1.4	RICH の構成による分類	14
1.5	Aerogel Cherenkov counter(ACC) デザイン図 [5]	15
1.6	荷電 K/π 粒子の運動量と輻射体の屈折率の関係図	15
1.7	ACC 1 モジュールの概要図	16
1.8	ACC モニターシステム用光ファイバー [6]	17
1.9	光拡散箱の概要図 [6]	17
2.1	$B^0-\overline{B}^0$ 混合を表す Feynman diagram の例	20
2.2	非対称エネルギーでの B 中間子対生成と崩壊の概念図	21
2.3	$B \rightarrow J/\psi K_S$ を表す diagram	21
2.4	$B \rightarrow J/\psi K_{S/L}^0$ における崩壊時間分布と CP 非対称度	22
2.5	様々な実験結果により図られたユニタリティ三角形	23
2.6	Belle 実験と Babar 実験による $\sin 2\phi$ の値と世界平均 [11]	23
2.7	$B \rightarrow \tau\nu$ 崩壊のファインマンダイアグラムと荷電ヒッグスの寄与	24
2.8	Belle 実験、BarBar 実験での $B \rightarrow \tau\nu$ の崩壊分岐比の測定値と世界平均値	25
2.9	$b \rightarrow s\gamma$ 遷移における loop diagram	25
2.10	Super KEKB の概要図	27
2.11	重心系 (CMS) での衝突エネルギーとルミノシティによる加速器の分類	27
2.12	Nano-beam 方式の概念図	28
2.13	SuperKEKB 完成後の積分ルミノシティ (上) と到達ルミノシティの推移予想図 (下)[13]	29
2.14	Belle II 測定器の完成イメージ	30
2.15	Belle II 測定器の断面図	30
2.16	崩壊点検出器の完成イメージ図	31
2.17	PXD, SVD の各層の配置図。検出範囲は $17^\circ < \theta < 150^\circ$ となっている。	31
2.18	PXD(左) と SVD(右) の完成イメージ図	31
2.19	DEPFET の構造図と DSSD の構造図	32

2.20	粒子別の運動量とエネルギー損失の関係	33
2.21	CDC のワイヤ張りの様子	33
2.22	CDC 断面図。スモールセルとノーマルセル比較画像	33
2.23	DIRC の原理図	34
2.24	TOP モジュール概念図	34
2.25	(a) は MCP-PMT の外観図。(B) は MCP による電子増幅の概念図。	35
2.26	Aerogel RICH の完成イメージ	35
2.27	ECL モジュールと概要図	36
2.28	KLM の断面図	37
2.29	RPC 2 層で構成される Super Layer の概要図	38
2.30	Endcap KLM のシンチレータストリップの概要図	38
2.31	Belle II データ収集システムの概要図	39
3.1	シミュレーションによる $B \rightarrow \pi\pi$ からの荷電 π 中間子の運動量と角度分布 . . .	41
3.2	RICH における粒子識別方法の概念図	42
3.3	単層方式とマルチレイヤー方式の概要図	43
3.4	ARICH の設置位置	44
3.5	Aerogel RICH 設計図	44
3.6	シリカエアロゲルの内部構造	45
3.7	シリカエアロゲル	45
3.8	エアロゲルタイルが構造フレームに設置された様子と構造フレームの概要図 . . .	46
3.9	左図は 144ch マルチアノード型 HAPD の外観図。右図は HAPD の寸法。 . . .	46
3.10	微小光量に対する HAPD の波高分布の例	47
3.11	量子効率の波長依存性	48
3.12	左図は HAPD の構造図。右図は APD における増幅原理図。	49
3.13	HAPD の印加電圧と増幅率の関係	49
3.14	Radiative Bhabha 散乱のダイアグラム	50
3.15	中性子による放射線損傷の仕組み	50
3.16	Belle II 測定器の断面図と ARICH 内部の設置領域。	51
3.17	ARICH データ読出しシステム図	52
3.18	Front-end Board 内部の電子回路の構成	53
3.19	Front-end board の外観図	53
3.20	Threshold scan の説明図	55
4.1	モニターシステムの概念図	57
4.2	モニターシステム用光ファイバーの設置可能位置	58
4.3	モニターシステム用光ファイバーの外観	58
4.4	モニターシステム用光ファイバー先端	59

4.5	モニターシステム用光ファイバーバンドル設計図	60
4.6	LED 光源 (NSPB300B) 発光の様子と放射光の発光スペクトル	61
4.7	相対光量の温度依存性と主波長の温度依存性	61
4.8	LED・光ファイバー接続具	62
4.9	LED・光ファイバー接続具の設計図	62
4.10	LED 光源用ドライバーモジュール	63
4.11	LED ドライバーモジュールの出力信号	63
4.12	光ファイバー毎の光量のばらつき測定セットアップの概念図	65
4.13	暗箱内のセットアップの様子	65
4.14	光ファイバーバンドルごとでの光量のばらつき測定結果	66
4.15	光拡散角測定セットアップの概要図	67
4.16	光量測定で得られる ADC 値分布の例	67
4.17	測定結果。緑破線で NA=0.2, NA=0.4 相当となる位置を示した。	68
4.18	散乱光測定時のセットアップ概念図	69
4.19	暗箱内の様子	69
4.20	HAPD の 1 チャンネルからの散乱光による信号	70
4.21	Thresholdscan 測定の結果	71
4.22	Hitmap 図	72
4.23	Hitmap 図	72
4.24	磁場あり、磁場無し環境下での HAPD の振る舞い	72
4.25	光量の位置依存性測定結果	73
4.26	trgdelay と hdcycle とヒット率についての関係	74
4.27	安定性測定時のセットアップの概要図	75
4.28	Threshold scan の結果	76
4.29	ヒット率の時間変化	77
4.30	全測定チャンネル (36ch) についてのヒット率の時間変化	77
4.31	Threshold scan の結果と増幅率の算出方法	78
4.32	増幅率の時間変化	79
4.33	全測定チャンネル (36ch) についての増幅率の時間変化	79
4.34	HV 電圧と電子打ち込み増幅率の相関	80
4.35	データシート値と測定値の比較。	80
4.36	Bias 電圧と Avalanche 増幅率の相関	81
4.37	ノイズの時間変化	82
4.38	全測定チャンネル (36ch) についてのノイズレベルの時間変化	82
5.1	実装試験用アルミニウムカバーとエアロゲル	84
5.2	1 セクター内部のセットアップの概要図	84
5.3	モニターシステム概要図	85

5.4	モニターシステムで使用するモジュールの外観	85
5.5	高圧電源の外観	86
5.6	LED 光無しでの Threshold scan 結果	86
5.7	LED 光がある状態での Threshold scan 結果	87
5.8	設定閾値電圧	87
5.9	bit マップ	88
5.10	モニターシステム用 LED 光の光量分布	88
5.11	光ファイバーからの距離と光量との相関	89
5.12	実機試験での測定値と試作機での測定値の比較	90
5.13	LED driver の各波高値についてのヒット率の変化	91
5.14	光ファイバー近傍チャンネルでのヒット率と Amplitude の相関	92
5.15	入力波高値による Threshold scan 結果の違い	92
5.16	測定値のフィッティング結果とセクター全体での散乱光分布の見積もり	93
5.17	1 セクター断面方向での散乱光分布	93
5.18	Belle II 測定器内での LED 光源の設置位置	95
5.19	ファイバーパッチケーブルの外観	95
5.20	ファイバーパッチケーブルの仕様	95
5.21	延長用ファイバーと LED コネクタ接続図	96
5.22	光量の減衰測定の際のセットアップの概要図	96
5.23	延長用光ファイバーを接続した場合としていない場合のアナログ信号と ADC 値 分布	97
5.24	延長用光ファイバーを接続した場合としていない場合のアナログ信号と ADC 値 分布	98
5.25	光ファイバー配置案	99
6.1	KEK で建設が進む ARICH の様子	101
6.2	右図は宇宙線試験時の外観。左図は宇宙線トリガーの概要図。	102
6.3	ARICH の一部を使った宇宙線観測試験のイベントディスプレイの例	103
7.1	Merger board の外観図。	109

表目次

2.1	KEKB と SuperKEKB の主なビームパラメータの比較	28
2.2	CDC の Belle, Belle II でのパラメータの比較	34
3.1	代表的な輻射体物質とその物性値	45
3.2	HAPD の仕様 [28]	47
4.1	モニターシステム用光ファイバーの仕様 [30]	59
4.2	光ファイバーアセンブル品の仕様 [30]	60
4.3	測定時の HAPD と LED 光源の動作条件	70
5.1	エアロゲルと黒紙での検出光量の違い	89
5.2	ADC 値から算出した検出光電子数での比較	97
5.3	光ファイバーの本数ごとの ADC 値から算出した検出光電子数	98
6.1	量産版エアロゲルのパラメータ	100
7.1	Frontend board の ASIC(Global)	108
7.2	Frontend board の ASIC(Channel) のパラメータ	108

第 1 章

序論

1999 年より茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構 (KEK、図 1.1) で行われ、2010 年に測定が終了した Belle 実験 [1] は電子・陽電子非対称エネルギー衝突型加速器 KEKB 加速器によって大量の B 中間子対を生成後、その崩壊過程を Belle 検出器で観測することで B 中間子系における CP 対称性の破れを検証し、小林・益川模型 [2] を証明するに至った。また、新たなハドロン共鳴状態の発見といった数々の成果を挙げた。



図 1.1 高エネルギー加速器研究機構の鳥瞰図

現在の素粒子物理学の根幹をなす標準模型はこれまで多くの実験によって検証され、Belle 実験もその構築に大きく貢献したが依然として標準模型では説明できない物理事象や観測結果も存在する。そのような中、標準模型を超える新物理事象の探索を目的とした Belle II 実験 [3] が 2018 年の測定開始に向けて、準備が進められている。

1.1 Cherenkov 検出器

Cherenkov 効果または Cherenkov 光の性質を利用し、粒子識別を行う検出器を総称して Cherenkov 検出器という。Cherenkov 光を発生させる輻射体とその Cherenkov 光を検出するための光検出器によって構成されている。Cherenkov 検出器はその識別方法の違いから、“閾値型”と“リングイメージング型”の2種類に大別され、各実験の目的に応じて使い分けられる。この章では、それぞれのタイプの Cherenkov 検出器について原理や特徴を解説する。そして、Belle 実験で使用された閾値型 Cherenkov 検出器とそこで使用された光検出器のためのモニタリングシステムについて紹介し、本研究の目的を述べる。

1.1.1 原理

まず Cherenkov 光の発生条件について述べる。速度 v の荷電粒子が屈折率 n の透明な誘電体中を通過する際、物質内部の電場の分布が乱され局所的に分極状態となる。この状態が元の平衡状態へと戻る時、電場の変化分が光子として放出される。速度 v が物質中での光速を超える場合 ($v > c/n$)、この光は干渉し、強め合うことで観測される。この現象を Cherenkov 放射、またこの時に発生する光を Cherenkov 光という [4]。この Cherenkov 光は荷電粒子の進行方向に対して角度 θ_C を持って放射される。 $\beta = v/c$ とすると θ_C は以下の式で表すことができる。

$$\cos \theta_C = \frac{\frac{c}{n} \Delta t}{v \Delta t} = \frac{1}{n\beta} \quad (1.1)$$

速度 v の荷電粒子が Cherenkov 放射を起こす様子を図 1.2 に示す。

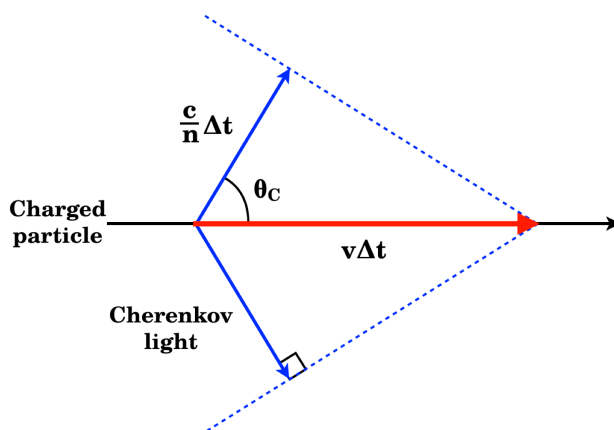


図 1.2 Cherenkov 光発生概要図。速度 v の荷電粒子が屈折率 n の物質中を通過した際に発生する Cherenkov 光とその放射角 θ_C の関係図。

閾値型

荷電粒子が輻射体を通過した際に Cherenkov 光が発生したかどうかによって粒子識別を行う粒子識別を行う方式を閾値型 Cherenkov 検出器という。質量 m の荷電粒子が屈折率 n の輻射体中を通過した際の運動量 p に対する Cherenkov 光発生条件は以下の式で与えられる。

$$p > \frac{m}{\sqrt{n^2 - 1}} \quad (1.2)$$

この式から、粒子ごとに Cherenkov 放射が起こる運動量 p が異なることがわかる。閾値型 Cherenkov 検出器はこの Cherenkov 光発生条件となる運動量の違いを利用している。2つの粒子を識別する際に粒子の運動量に対応して、片方のみ Cherenkov 光が発生するような屈折率の輻射体を選び使用する。各粒子ごとでの閾値運動量と輻射体の屈折率の関係を図 1.3 に示す。輻射体の屈折率と閾値運動量は反比例の関係にあるため、高屈折率の輻射体では常に Cherenkov 光が発生している状態になってしまう。そのため、閾値型 Cherenkov 検出器には低屈折率の輻射体が向いており、気体の輻射体がよく用いられる。

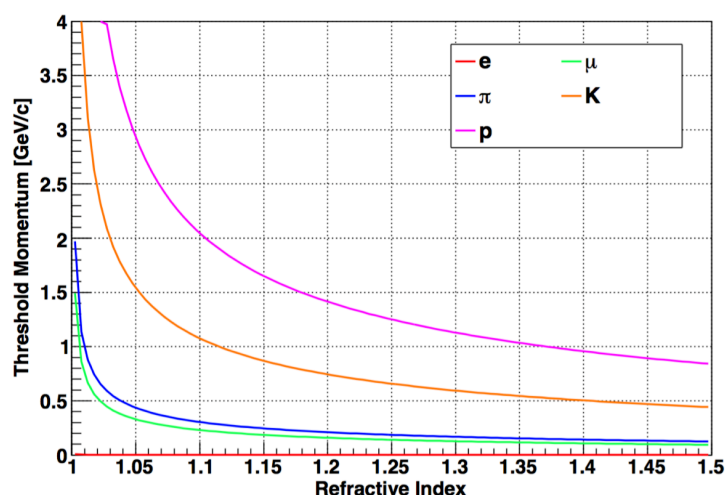


図 1.3 粒子ごとの閾値運動量と輻射体の屈折率の関係

リングイメージング型

輻射体で円錐状に発生する Cherenkov 光をリングイメージとして観測することで粒子識別を行うタイプの Cherenkov 検出器を一般に Ring Imaging Cherenkov counter(RICH) と呼ぶ。RICH は焦点方法の違いから、ミラー焦点型と近接焦点型という 2 種類に区別される。ミラー焦点型は発生した Cherenkov 光を鏡で反射させることで集光し、その焦点に光検出器を設置するという構造のものである。RICH では輻射体を厚くすることで発生光子数を増やすことができるが、リングイメージがぼやけてしまい、角度分解能が低下する。その点、ミラー焦点型では鏡の曲率を調整することで可能な限り光を絞ることができるため、角度分解能を落とすことなく発生光子

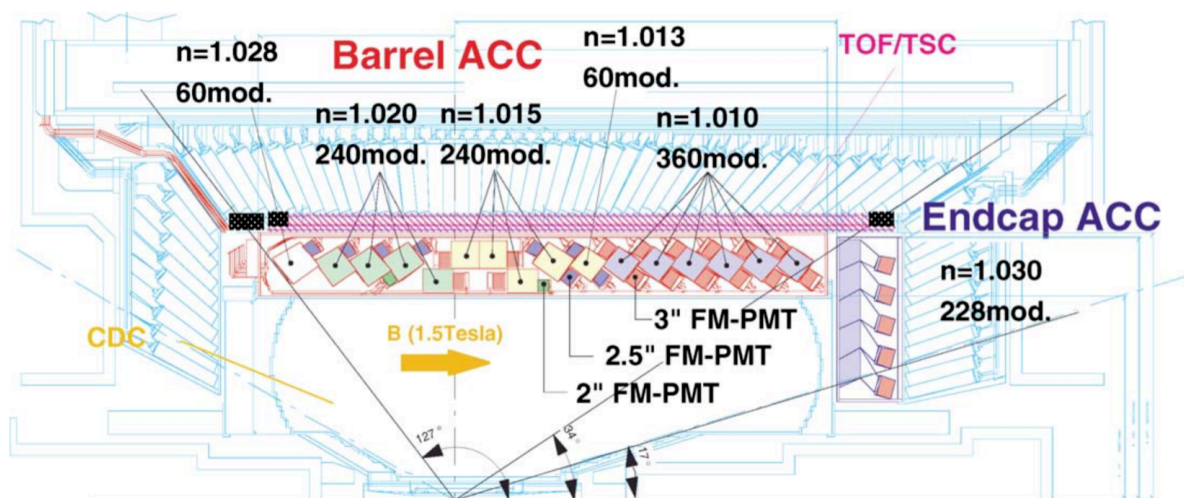


図 1.5 Aerogel Cherenkov counter(ACC) デザイン図 [5]

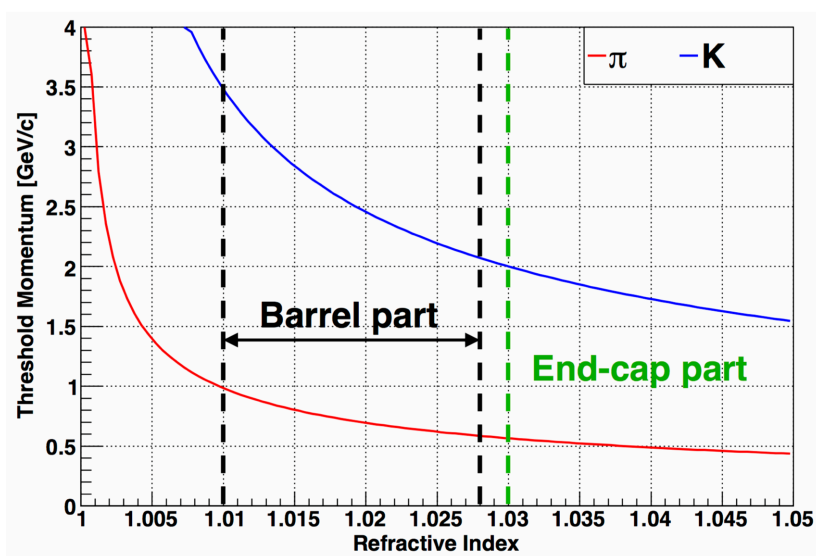


図 1.6 荷電 K/π 粒子の運動量と輻射体の屈折率の関係図。質量の軽い粒子ほど閾値運動量が低くなる。Barrel 部 (黒破線) と Endcap 部 (緑破線) それぞれの輻射体屈折率 (識別可能領域) を示した。

ACC は 1188 のモジュールから構成されており、輻射体にはシリカエアロゲル、光検出器として Fine-mesh PMT (FM-PMT) が採用された。図 1.7 に Barrel 部, Endcap 部それぞれで使用された ACC モジュールの概要図を示す。ACC モジュールは 5 枚のシリカエアロゲルと 1、2 台の FM-PMT から成り、FM-PMT は合計 1788 台が使用された。エアロゲルはアルミニウム製の容器 ($12 \times 12 \times 12 \text{ cm}^3$) 内に重ねて格納され、その横に設置された FM-PMT で Cherenkov 光の検出を行う。

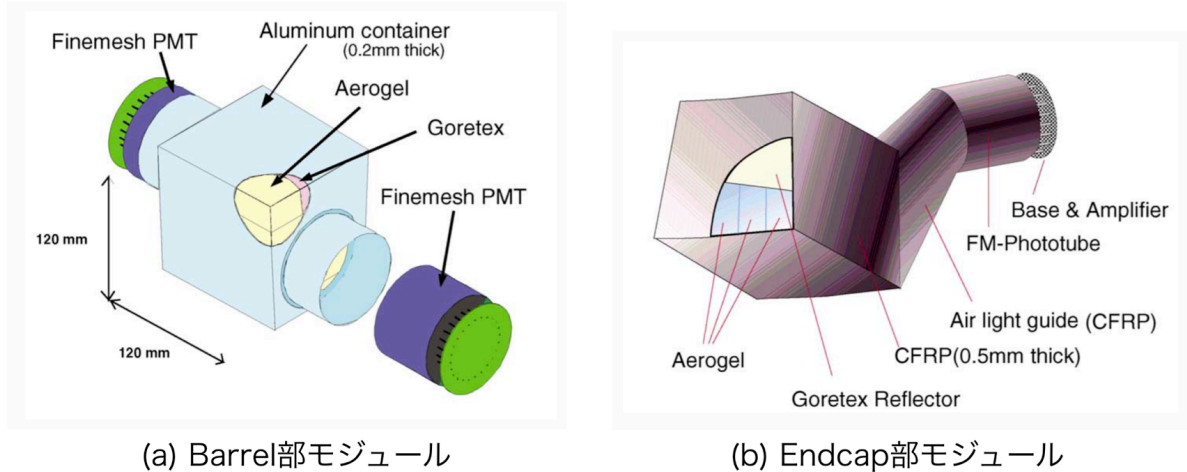


図 1.7 ACC 1 モジュールの概要図 [5]。(a) が Barrel 部用, (b) が Endcap 部用のモジュール。エアロゲル中で発生した Cherenkov 光を FM-PMT によって検出する。Barrel 用と Endcap 用で形状の違いはあるが、基本的な検出原理は同じである。

1.2 光検出器のモニターシステム

光検出器のモニターシステムの一例として、Belle ACC でのモニターシステムの概要を解説する。FM-PMT の増幅率やエアロゲルでの発光量は時間と共に変化する可能性がある。そのため、高精度な粒子識別を維持するためにはそれらの変化を数 % レベル [6] の精度でモニタリングする必要がある。ACC のモニタリング方法としてはモジュール内の光量をコントロールし易い点やモニター用光源自体をモニタリングできるという点から、それぞれのモジュール毎にリファレンス用のパルス光源を設置する方法が採用された。このようなモニターシステムの実現のためには「十分な光量を発する光源」と「その光を均一に分配するシステム」が必要となる。さらに、モニター光は実際の荷電粒子によって発せられる Cherenkov 光の波長や発光時間にできるだけ近いものが望ましい。実際の Cherenkov 光の発光継続時間は 1 ns 以下であり、光検出器ではパルス状に検出される。そのため、モニターシステムにおいてもパルス光を使用し、可能な限り発光時間が早く、時間や温度に左右されない安定したパルス光源が必要となる。通常、モニター光源にはキセノンランプや LED 光源、またはレーザーが用いられるがキセノンランプの光は波長が長過ぎること、レーザー光は温度変化に敏感であることから ACC のモニターシステムでは LED 光源、特に Cherenkov 光と波長が同程度 (波長 470 ns)[6] のものが使用された。

ACC モニターシステム用光ファイバーは 19 本の光ファイバーの束として設計され、それらを計 80 組使用することで 1188 個の ACC モジュールへ光を行き渡らせる (図 1.8)。また、LED 光源からの光量の不均一性によって生じる光ファイバー毎への入射光量のばらつきを低減するため、アルミニウム製の光拡散箱を使用し、LED 光を複数回反射させた後に光ファイバーに入射させるという方法が採用された。図 1.9 に光拡散箱の概要図を示す。

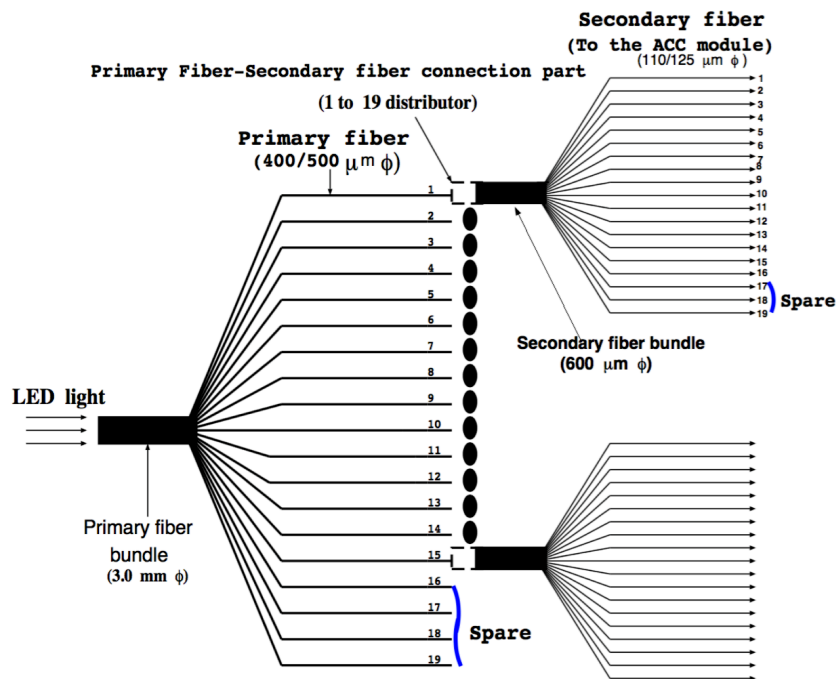


図 1.8 ACC モニターシステム用光ファイバー [6]

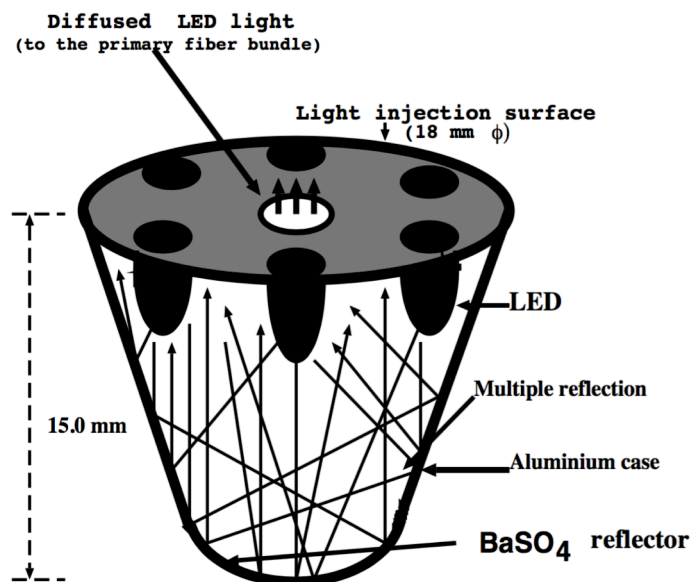


図 1.9 光拡散箱の概要図。6 個の LED 光源からの光を拡散箱内で拡散後、光ファイバーバンドルに入射させることで光ファイバーごとの光量のばらつきを低減した。

1.3 本研究の目的

Belle II 実験で使用される粒子識別装置 Aerogel RICH 検出器 (ARICH) は輻射体内で荷電粒子が放射した Cherenkov 光を光検出器によって二次元リングイメージとして観測し、その放射角を測定することにより粒子識別を行うリングイメージ型 Cherenkov 検出器である。ARICH の詳細については、第 3 章で記述する。ARICH で使用される光検出器は Hybrid Avalanche Photo-Detector (HAPD) と呼ばれる 144-ch マルチアノード型光検出器であり、420 台を使用するため ARICH 全体での総読出しチャンネル数は 60,480 になる。ACC 同様、これら光検出器の動作のモニタリングは高精度な粒子識別性能を保つためには不可欠となる。

Cherenkov 検出器のモニターシステムは光検出器に照射したモニター光を利用する方法が一般的であるが、ARICH は輻射体と光検出器の 2 層構造になっており、構造上モニター光を光検出器に向けて直接照射することができない。そこで、ARICH モニターシステムではモニター光を光検出器側からエアロゲルに向けて照射し、エアロゲル内部で散乱された光を光検出器で観測することによってモニタリングを行うという方法を採用した。モニター光源には光量の時間的・温度的な安定性の利点から LED 光源を用い、光ファイバを使って 1 つの光源から多数のモジュールへ LED 光を分配するという ACC と同様の方法を取る。

ARICH モニターシステムの開発に当たって重要となる項目を以下に示す。

モニターシステム構成要素の性能評価

モニターシステムで使用する光ファイバーバンドルが要求性能を満たしていることの確認。

モニタリング方法の原理検証

エアロゲルによる散乱度合の理解及び散乱光を用いた光検出器性能のモニタリング方法の確立。

ARICH 実機での運用試験

モニターシステムを実機に搭載しての動作確認と実用性の検証。

これらの項目について検証を行った。

2 章では ARICH が使用される Belle II 実験について解説し、3 章では主に ARICH の動作原理及び構成要素について記述する。4 章では ARICH モニターシステムの概要について触れた後、光ファイバーバンドルの性能評価とモニターシステムの試作機を用いて行った原理検証について述べる。また、散乱光による光検出器の基本性能のモニタリング方法と長期安定性の評価結果についても記述する。5 章では現在建設中である ARICH 実機へのモニターシステムの実装試験について解説し、6 章で本研究の結論を述べる。

第 2 章

Belle II 実験

この章では、Belle II 実験の物理的背景となる B 中間子系の物理、Belle II 実験で観測が期待される標準模型を超えた新物理について解説し、これらの物理事象の観測のために開発が行われている加速器・検出器について紹介する。

2.1 B 中間子系の物理・ B ファクトリー実験

2.1.1 CP 対称性の破れの検証

1964 年に J. W. Cronin、V. L. Fitch らが中性 K 中間子の CP 固有状態の 1 つである K_L が CP 対称性のため崩壊しないと考えられていた $2\pi(CP\text{ even})$ への崩壊を含むことを観測し、世界で初めて K 中間子系における CP 対称性の破れを示した。 CP 対称性の破れを説明する理論として 1973 年に小林誠と益川敏英によって提唱された Kobayashi-Maskawa 模型 [2] はそれまでの u, d, s クォークのみからなる系の観測結果と矛盾せず、標準模型の範囲で説明できた。この模型では 3 世代 6 種類 (u, d, c, s, t, b) クォークを導入し、それらのフレーバー固有状態と質量固有状態の変換行列 (Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) 行列) の中に複素位相が 1 つ以上含まれていれば CP 対称性が自発的に破れることが示されている。そこで、CKM 行列のパラメータとして有限個の複素位相が存在することを検証するための実験が計画がされた。特に、 b クォークに関する行列要素 (V_{tb}) が比較的大きな値になることが示唆されたため、 b クォークを含む B 中間子系における CP 非対称度は K 中間子系よりも大きいと期待された。しかし、 K 中間子の CP 固有状態である K_S と K_L では 500 倍もの寿命差があるためにそれぞれの識別が可能であったが、 B 中間子の CP 固有状態である B_L と B_H の寿命は共に $O(10^{-12})$ 秒程度のため、崩壊時間差による識別が困難であった [7]。

この課題を解決する方法として「非対称エネルギー衝突」が考案された。この手法は異なる運動量で電子と陽電子を衝突させることで衝突後の系に Lorentz boost を生じさせ、相対論的效果により B と \bar{B} の飛行距離を延ばし、そこから崩壊時間差を観測可能なオーダーで測定するというものである。この手法を用いて B 中間子系での CP 対称性の破れの観測を主な目的としている電子・陽電子衝突型加速器実験を「 B ファクトリー実験」と呼んでいる。 B ファクトリー実験とし

て Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) の PEP-II 加速器を用いた BaBar 実験と KEK の KEKB 加速器を用いた Belle 実験が計画され、共に 1999 年から実験を開始した。その結果、両グループは 2001 年のほぼ同時期に CP 対称性の破れの観測を公表し、Kobayashi-Maskawa 模型を世界で初めて実験的に証明することに成功した。その後、BaBar 実験は 2008 年、Belle 実験は 2010 年に運転を終了した。

2.1.2 B 中間子の物理

B 中間子は e^- と e^+ の対消滅によって生じる $\Upsilon(4S) = (b\bar{b})$ という bottomonium 共鳴状態が崩壊することで生成される。 B ファクトリー実験では電子・陽電子ビームの衝突エネルギーは $\Upsilon(4S)$ の質量に合わせて重心系で $10.58 \text{ GeV}/c^2$ となるように設計されている。生成された $B^0\bar{B}^0$ 中間子対は box diagram と呼ばれる過程 (図 2.1) によって互いに重ね合わせの状態にあり、これを $B^0\text{-}\bar{B}^0$ 混合 (mixing) と呼ぶ。

Belle II 実験では SuperKEKB 加速器によって e^- を $7.0 \text{ GeV}/c$ 、 e^+ を $4.0 \text{ GeV}/c$ に加速し、衝突させる。このような非対称エネルギー衝突によって衝突後の系に $3.0 \text{ GeV}/c$ 程度の運動量を与える。生成した $B^0\text{-}\bar{B}^0$ 対は図 2.2 のように終状態へ崩壊する。

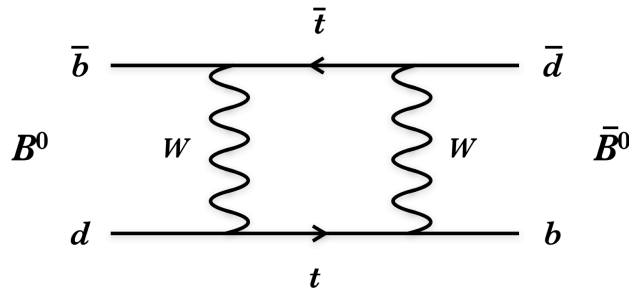


図 2.1 $B^0\text{-}\bar{B}^0$ 混合を表す Feynman diagram の例

CP 対称性の破れの観測で重要となる B^0 が図 2.3 上のような tree diagram を経て CP 固有状態である $J/\psi K_S$ へと崩壊する場合を考える。この場合、 B^0 が box diagram を介して \bar{B}^0 に遷移してから $J/\psi K_S$ へと崩壊する図 2.3 下のような崩壊モードも含まれる。これらの崩壊の終状態は同じであるため、親となる B 中間子が B^0 か \bar{B}^0 かを終状態から同定することは不可能である。そこで親を同定するため、図 2.2 に示したように CP 固有状態 $f_{CP} = J/\psi K_S$ に崩壊する方 (signal side) ではなく、もう一方の B 中間子が完全に同定できる崩壊 (tag side) を正確に観測することで signal side の親粒子を同定する方法を用いる。図 2.2 に示した崩壊では B^0 を tag side としてを観測することで、もう一方の \bar{B}^0 を signal side の親粒子として同定している。この時、 B^0 から崩壊した $\bar{D}^0 (\rightarrow K^+\pi^-)$, π^- , μ^+ は CP 固有状態ではないので、それ以外の量子数から B^0 と同定することが可能であり、signal side の親粒子も確実に \bar{B}^0 だと同定することができる。このように崩壊した B 中間子が B^0 か \bar{B}^0 かを同定する測定方法を「フレーバータギング」と呼ぶ。

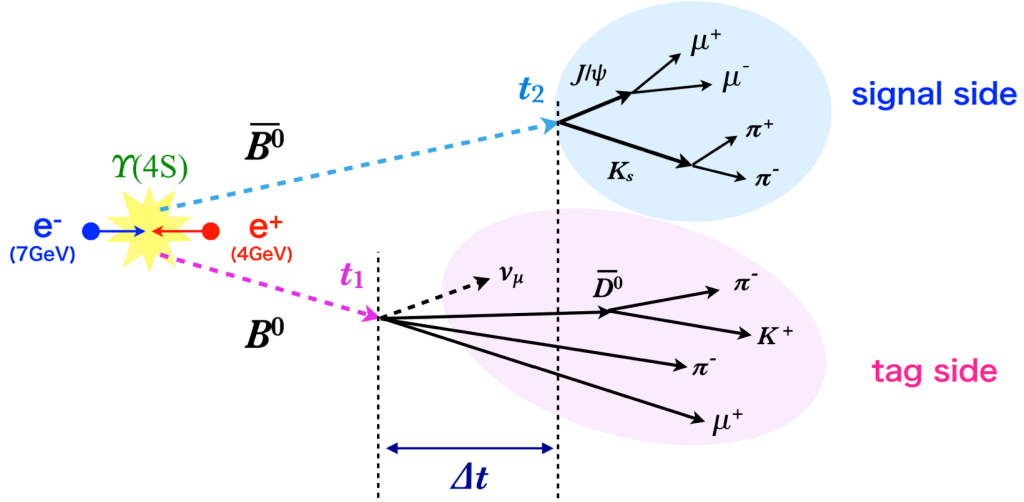


図 2.2 非対称エネルギーでの B 中間子対生成と崩壊の概念図

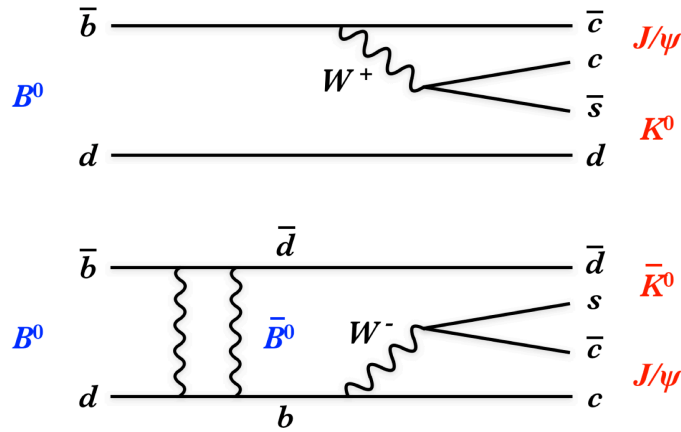


図 2.3 $B \rightarrow J/\psi K_S$ を表す diagram。上図が B^0 が直接終状態へと崩壊するモード、下図が弱い相互作用による Box diagram を介して \bar{B}^0 へと遷移してから崩壊するモードを表す。

図 2.3 のように $B^0-\bar{B}^0$ 混合の効果によって同じ終状態への崩壊パターンが複数ある場合、これらは量子力学的に干渉し合い、 B^0 が崩壊する場合と \bar{B}^0 が崩壊する場合で崩壊分岐比 (崩壊確率) に差が現れる。この崩壊分岐比の差を観測することが CP 非対称度を測定することになる。このように混合を通じて CP 非対称性が観測される現象を間接的 CP 対称性の破れ (Indirect CPV) と呼ぶ。signal side の崩壊時間を t_{sig} 、tag side の崩壊時間を t_{tag} とした時、崩壊確率はこれらの崩壊時間差 $\Delta t = t_{\text{sig}} - t_{\text{tag}}$ を用いて以下の式 (2.1) で表される。

$$\Gamma(B^0\bar{B}^0\text{pair} \rightarrow f_{\text{sig}}, f_{\text{tag}}) = \frac{e^{-\frac{|\Delta t|}{\tau}}}{4\tau} (1 + q(S \sin(\Delta m \Delta t) + A \cos(\Delta m \Delta t))) \quad (2.1)$$

q は B 中間子のフレーバー、 τ は B 中間子の寿命、 Δm は B^0 と \bar{B}^0 の質量差を表している。

S は $B^0\text{-}\overline{B}^0$ 混合における間接的 CP 対称性の破れ、 A は直接的 CP 対称性の破れ (Direct CPV) に対応するパラメータ (CP violation parameter) であり、今回のモード ($b \rightarrow c\bar{c}s$) では $S = -\xi_f \sin 2\phi_1$, $A = 0$ である。 ξ_f は終状態 f_{CP} によって決まり、 $f_{CP} = J/\psi K_S$ の時は $\xi_f = -1$ 、 $f_{CP} = J/\psi K_L$ の時は $\xi_f = +1$ である。 ϕ_1 は CKM 行列の要素で定められるユニタリテーター三角形 (Unitarity Triangle) を決める値であり、 $\phi_1 = \arg(-V_{cd}V_{cb}^*/-V_{tb}V_{tb}^*)$ で定義される。 $J/\psi K_{S/L}^0$ への崩壊に現れる CP 非対称度 A_{CP} は以下の式 (2.2) で与えられる。

$$\begin{aligned} A_{CP}(\Delta t) &= \frac{\Gamma(\overline{B}^0(t) \rightarrow f_{CP}) - \Gamma(B^0(t) \rightarrow f_{CP})}{\Gamma(\overline{B}^0(t) \rightarrow f_{CP}) + \Gamma(B^0(t) \rightarrow f_{CP})} \\ &= -\xi_{CP} \sin 2\phi_1 \sin(\Delta m \Delta t) \end{aligned} \quad (2.2)$$

$\sin 2\phi_1$ は B^0 が $J/\psi K_{S/L}^0$ へ崩壊した時の崩壊時間分布と \overline{B}^0 が $J/\psi K_{S/L}^0$ へ崩壊した時の崩壊時間分布の差から求めることができる。図 2.4 に $B \rightarrow J/\psi K_{S/L}^0$ における崩壊時間分布とそれから得られる CP 非対称度の結果を示す [9]。青のプロットが $B^0 \rightarrow J/\psi K_{S/L}^0$ 、赤のプロットが $\overline{B}^0 \rightarrow J/\psi K_{S/L}^0$ の時の結果を示している。

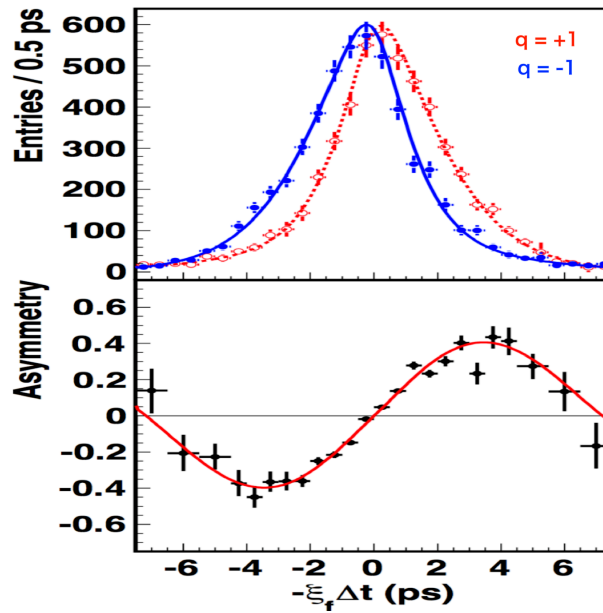


図 2.4 $B \rightarrow J/\psi K_{S/L}^0$ における崩壊時間分布の測定結果とその結果から得られた CP 非対称度 [9]。下図は上図の赤と青の差を取ったものであり、この振幅が $\sin 2\phi_1$ に比例することをを用いて ϕ_1 を求めることができる。

このようにして求めた $\sin 2\phi_1$ に対する制限を CKM 行列の CP 位相パラメータ ($\bar{\rho}, \bar{\eta}$) 平面上に示したものが図 2.5 である。 $\sin 2\phi_1$ の決定には $B \rightarrow J/\psi K_{S/L}^0$ 以外のモードも利用することができる。様々な崩壊モードの解析によって、Belle 実験と BaBar 実験で得られた $\sin 2\phi_1$ の値をまとめたものを図 2.6 に示す。さらに、他の実験による測定結果や崩壊モードの観測を組み合わせることで ϕ_1 以外の角や辺の大きさを決定することが可能である。

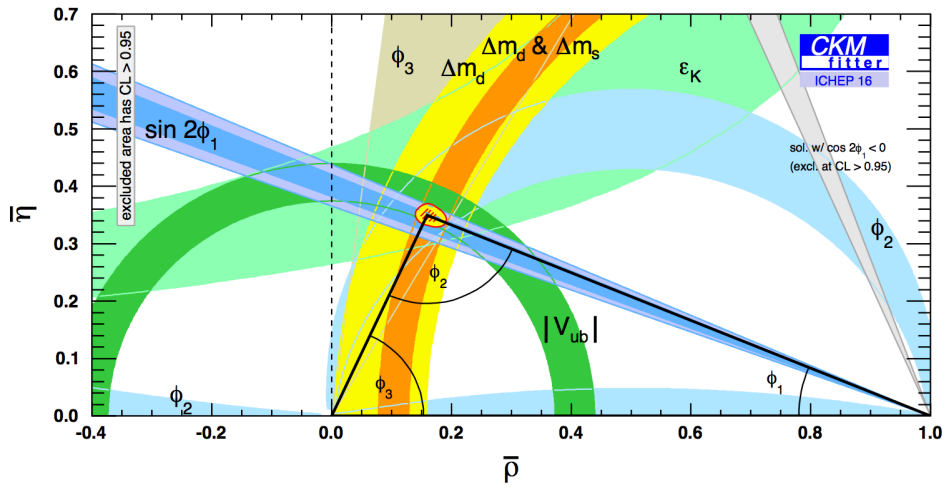


図 2.5 様々な実験結果により図られたユニタリティー三角形 [10]。CKM パラメータ $(\bar{\rho}, \bar{\eta})$ をフィットした結果であり、三角形の角度や辺の大きさが実験結果により制限されている。

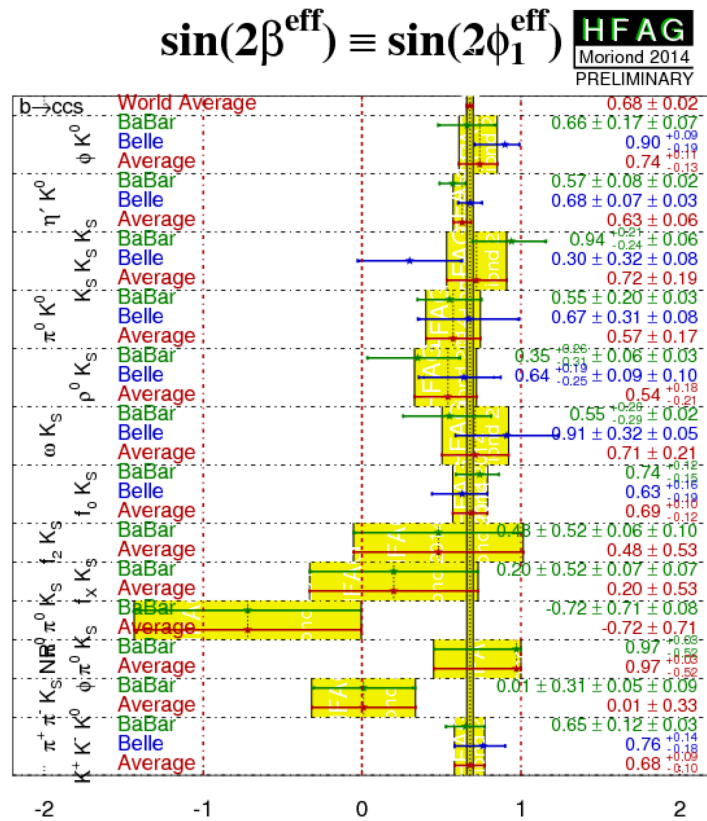


図 2.6 Belle 実験と Babar 実験による $\sin 2\phi$ の値と世界平均 [11]

2.2 B 中間子系での新物理探索

2.2.1 Unitarity Triangle の精密測定

Belle II 実験では測定精度や統計量が向上することに伴い、ユニタリティー三角形の各角度と各辺のさらなる精密測定が期待される。特に、角度に関する観測モードは tree diagram が支配的であるため、新物理の寄与が少なく標準理論の範囲内での観測が可能である。

2.2.2 レプトニック崩壊観測による荷電ヒッグス探索

超対称性理論では標準理論におけるヒッグス粒子の他に中性ヒッグス (H^0) と 荷電ヒッグス (H^\pm) の存在が予言されている。特に荷電ヒッグスはセミレプトニック崩壊過程である $B \rightarrow \tau\nu$ や $B \rightarrow D\tau\nu$ に現れると考えられている。図 2.7 に $B \rightarrow \tau\nu$ のファインマンダイアグラムを示す。これらの過程は標準理論においては W^\pm を介することで起こると考えられるが、荷電ヒッグスが存在する場合にはこの W^\pm の交換部分に荷電ヒッグスの寄与が加わることで標準模型で予想される崩壊分岐比から大きくずれると考えられている。

Belle 実験及び BarBar 実験での $B \rightarrow \tau\nu$ の崩壊分岐比の測定値と世界平均値を図 2.8 に示す。現在、この世界平均値は標準模型による理論値と 1.6σ 程度ずれているが、もしこのずれが Belle II 実験で確認されれば新粒子の寄与によるものであるという解釈が成り立つ。

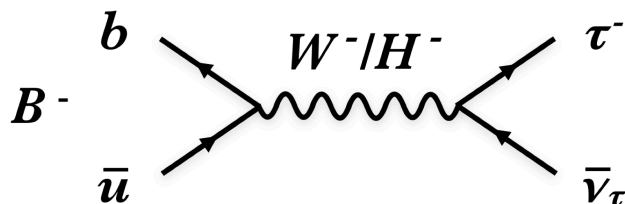


図 2.7 $B \rightarrow \tau\nu$ 崩壊のファインマンダイアグラムと荷電ヒッグスの寄与

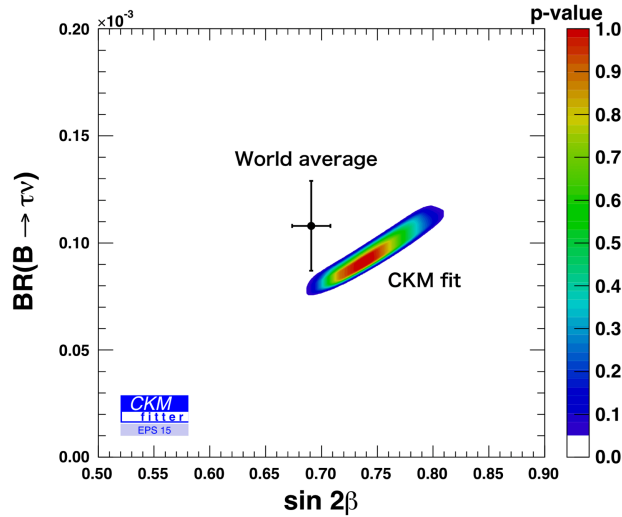


図 2.8 Belle 実験、BarBar 実験での $B \rightarrow \tau\nu$ の崩壊分岐比の測定値と世界平均値 (黒プロット)[12]

2.2.3 $b \rightarrow s\gamma$ 崩壊

図 2.9 に $b \rightarrow s\gamma$ 遷移における loop diagram を示す。 $b \rightarrow s\gamma$ 遷移は標準理論の範囲内では tree diagram のみでの崩壊が禁止されているため loop を介して観測され、荷電ヒッグスや超対称性粒子といった新粒子はこの loop 中に仮想粒子として現れる可能性がある。また、この崩壊過程はハドロン相互作用の影響が小さいため、新物理への感度が高いと考えられる。この遷移を含む崩壊モードの崩壊分岐比や CP 非対称度を精密に測定することにより、新粒子の寄与の観測が期待される。

この過程は $B \rightarrow X_S\gamma$ 崩壊 (X_S はストレンジを 1 つ含む終状態の総称) の中に現れ、 X_S の終状態には多数の K/π 粒子が含まれる。よって、これらの崩壊モードを精密に観測するためには、高い K/π 粒子識別が求められる。

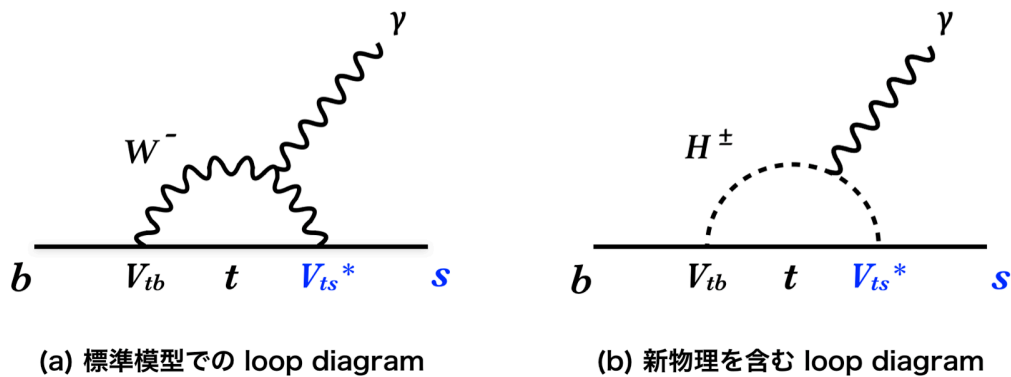


図 2.9 $b \rightarrow s\gamma$ 遷移における loop diagram

2.3 SuperKEKB 加速器

SuperKEKB 加速器 (図 2.10) は Belle 実験で使用された前身の加速器である KEKB 加速器をアップグレードした電子・陽電子非対称衝突型加速器である。SuperKEKB 加速器は、稼働当時に世界最高ルミノシティ ($2.1 \times 10^{34} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$)[13] を記録した KEKB 加速器の 40 倍のルミノシティを目指しており、現在調整運転を開始している。

一般に、加速器の特徴は「衝突エネルギー」と「ルミノシティ」という 2 つのパラメータで表される。ビーム衝突型加速器におけるルミノシティ (Luminosity: \mathcal{L}) とは単位面積、単位時間あたりのビーム衝突頻度を表しており、単位時間あたりの物理事象数 $N [\text{s}^{-1}]$ と反応断面積 $\sigma [\text{cm}^2]$ を用いて以下の式で定義される。

$$N = \mathcal{L}\sigma \quad (2.3)$$

したがって、ルミノシティは $[\text{cm}^2\text{s}^{-1}]$ という次元を持つ。

加速器実験は、LHC に代表される重い粒子を直接生成する程の高い衝突エネルギーで行われる「エネルギーフロンティア実験」と高ルミノシティ加速器を用いることによる高い統計量によって稀崩壊事象を精密に観測し新物理事象を間接的に探索する「ルミノシティフロンティア実験」に大別される。Belle 実験や Belle II 実験はこれに分類される。エネルギーフロンティア実験では可能な限りエネルギーを上げることで新物理の兆候を直接的に探索することができるが、探索可能なエネルギーに制限がある。ルミノシティフロンティア実験では探索エネルギーへの制限はなく、エネルギーフロンティア実験では届かないような高いエネルギースケールへの感度がある一方、新物理の正体を明らかにするためには別なアプローチによる証拠を積み重ねなければならないという特徴がある。素粒子実験はこれらの方法が両輪となって互いを補い、発展してきた歴史がある。図 2.11 にこれまで使用されてきたものや現在開発中のものも含めた主要な加速器を衝突エネルギーとルミノシティによって分類したものを示す。

次に SuperKEKB 加速器へのアップグレードについて述べる。ルミノシティ \mathcal{L} は電子・陽電子ビーム衝突に関する各種パラメータを用いて、以下のように表せる。

$$\mathcal{L} = \frac{\gamma_{e\pm}}{2er_e} \left(1 + \frac{\sigma_y^*}{\sigma_x^*}\right) \left(\frac{I_{e\pm}\xi_{y\pm}}{\beta_y^*}\right) \left(\frac{R_L}{R_{\xi_y}}\right) \quad (2.4)$$

$\gamma_{e\pm}$ は Lorentz 因子、 e は素電荷量、 r_e は古典電子半径を表す。 σ_y^*/σ_x^* は電子・陽電子ビーム衝突点における水平方向 x ・垂直方向 y のビームサイズ比である。 $I_{e\pm}$ はビーム電流、 $\xi_{y\pm}$ は Beam-beam parameter と呼ばれる量で、衝突点でビーム同士が互いに及ぼし合う力の大きさを表す。 β_y^* は衝突点におけるビームサイズを決める絞り込みの大きさに対応する量、 R_L/R_{ξ_y} は砂時計効果 (ビームを絞り過ぎると衝突点前後でビームが広がる現象) や交差角衝突に対する補正係数である。また、添字の \pm は電子 (-) と陽電子 (+) の積を表す。(2.4) よりルミノシティ \mathcal{L} を向上させるためには「ビーム電流 $I_{e\pm}$ を上げる」、「ビームサイズ β_y^* を小さくする」という方法があることが分かる。KEKB から SuperKEKB への改良ではビーム電流 $I_{e\pm}$ を約 2 倍、ビームサイズ β_y^* を約 1/20 にすることで約 40 倍のルミノシティを実現する。

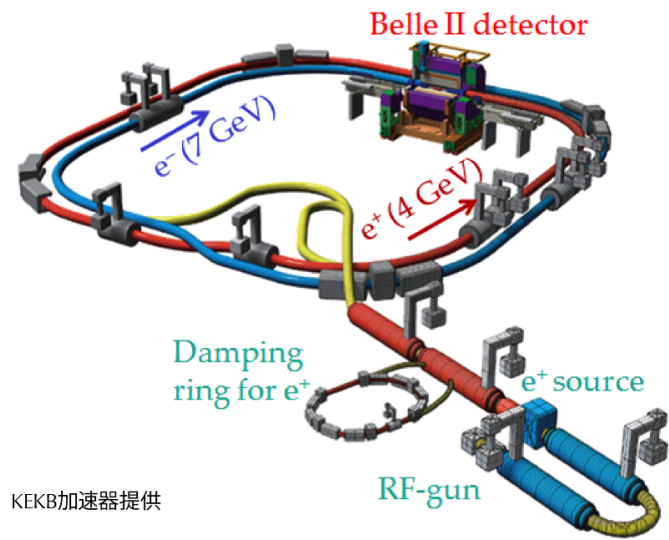


図 2.10 Super KEKB の概要図

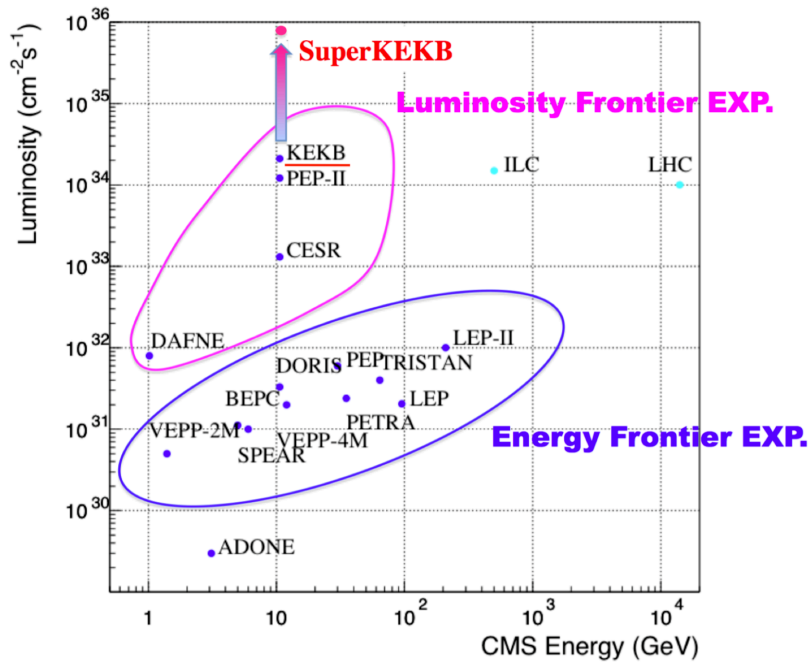


図 2.11 重心系 (CMS) での衝突エネルギーとルミノシティによる加速器の分類。青線で囲まれた加速器がエネルギーフロンティア実験、紫線で囲まれた加速器がルミノシティフロンティア実験に属する。

また、SuperKEKB ではビームサイズ β_y^* を小さくするために「Nano-Beam 方式」を採用した。図 2.12 に Nano-Beam 方式の概念図を示す。これは衝突点におけるビームサイズを小さく絞り電子・陽電子衝突を高い頻度で起こさせることでルミノシティを向上させるという方法である。通常、ビームを絞る場合は砂時計効果による制限によってビームが重なる長さ程度までしか絞ることができない。しかし、この方法を取ることでビームの交差角度を大きく、水平方向のビームサイズを小さくすることで図 2.12 の L に示すように限られた領域でのみ衝突が起こるため、砂時計効果が緩和され、ビームをより絞ることが可能となる。

ビーム中では (陽) 電子同士の衝突・散乱が起こる。これは「Touschek 効果」と呼ばれ、SuperKEKB ではビームを絞ることにより、この頻度の増大が予想される。特に、この効果は陽電子が受けやすいため、LER のビームエネルギーを KEKB の 3.5 GeV/c から 4.0 GeV/c に増強することで低減する。これに伴い、衝突エネルギーを $\Upsilon(4S)$ の生成エネルギーに合わせるため HER のビームエネルギーは 8.0 GeV/c から 7.0 GeV/c にする。ビームエネルギーの変化による測定への影響はほぼないと考えられている。表 2.1 に Super KEKB への主な変更点をまとめる。Nano-Beam 方式のために Super KEKB ではこれらの量を KEKB より小さくできるよう開発が行なっている。

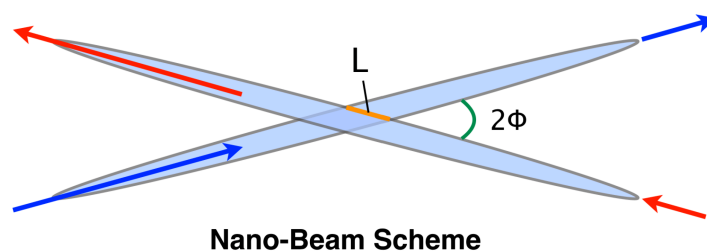


図 2.12 Nano-beam 方式の概念図

表 2.1 KEKB と SuperKEKB の主なビームパラメータの比較

パラメータ	KEKB	SuperKEKB
Energy (LER/HER)[GeV/c]	3.5/8.0	4.0/7.0
$\xi_{y\pm}$	0.129/0.090	0.090/0.088
β_y^* [mm]	5.9/5.9	0.27/0.30
$I_{e\pm}$ [A]	1.64/1.19	3.60/2.62
\mathcal{L} [$10^{34} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$]	2.11	80

ルミノシティ \mathcal{L} を実験期間で時間積分したものを積分ルミノシティ (integrated luminosity) と呼ぶ。Belle II 実験開始後の SuperKEKB による積分ルミノシティと到達ルミノシティの推移予想図を図 2.13 に示す。KEKB では運転終了直前に積分ルミノシティ $1 ab^{-1}$ を達成したが、SuperKEKB では運転開始 7 年後には $50 ab^{-1}$ を目指す。

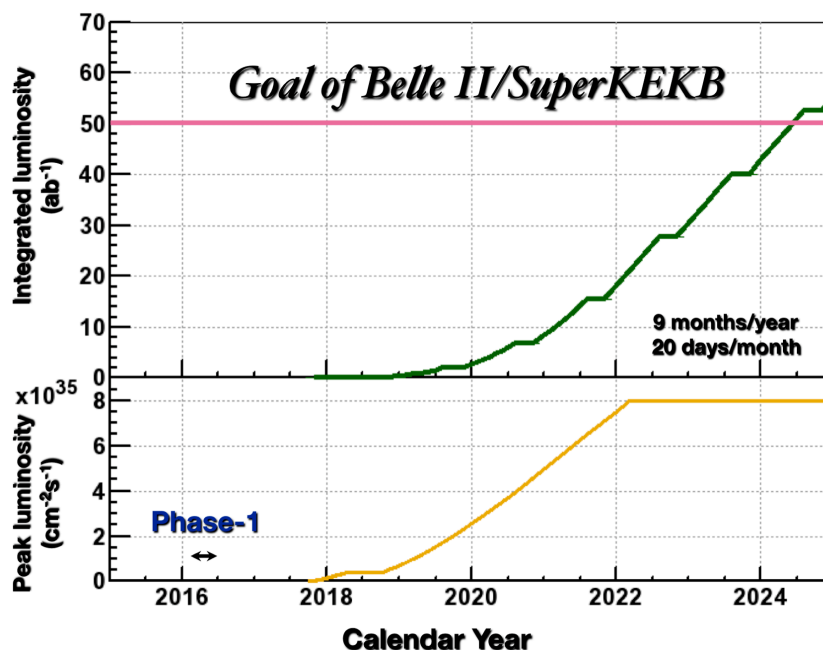


図 2.13 SuperKEKB 完成後の積分ルミノシティ (上) と到達ルミノシティの推移予想図 (下)[13]

2.4 Belle II 測定器

Belle II 測定器は役割ごとに設計された複数の副検出器から成る汎用測定器であり、衝突点に近い内層から粒子崩壊点検出器 (PXD, SVD)、飛跡・運動量検出器 (CDC)、荷電粒子識別装置 (TOP, Aerogel RICH)、電磁カロリメーター (ECL)、長寿命粒子識別装置 (KLM) となっている。PXD, TOP, Aerogel RICH は Belle II 実験へのアップグレードに伴い採用された新型検出器となっている。Belle II 測定器の概要図を図 2.14 に示す。

また、Belle II 測定器内部はビーム軸の同心円に沿った円筒状の領域とその円筒の底面に当たる領域の 2 つの領域に大別でき、それぞれを “Barrel 部”, “Endcap 部” と呼んでいる。SuperKEKB は非対称エネルギー衝突のため、衝突後の重心系は電子の進行方向に Lorentz boost される。この boost された粒子が飛来する側の Endcap 部を “Forward-Endcap”, 反対側を “Backward-Endcap” と区別しており、Forward-Endcap 側にのみ粒子識別装置 Aerogel RICH が設置される。Belle II 測定器の断面図を図 2.15 に示す。

以下では、各検出器について簡単に説明する。

PXD, SVD

Belle II 測定器の最内層において B 中間子の崩壊点の測定を担う検出器が PXD(Pixel Detector) と SVD(Silicon Vertex Detector) と呼ばれる 2 種類の構造の異なる検出器である。 B 中間子の崩壊後にできる荷電粒子の飛跡を数十 μm の精度で検出し、崩壊点を再構成する。これらの検出器は複層構造となっており、PXD は 2 層のピクセル検出器、SVD は 4 層のシリコンストリップ検出器で構成されている。Belle 実験時は SVD の 4 層のみで構成されていたが、Belle II 測定器では内側に PXD を新たに追加することにより崩壊点位置検出性能のさらなる向上が図られている。

崩壊点検出器の完成イメージ図を図 2.16 に配置図を図 2.17 に示す。

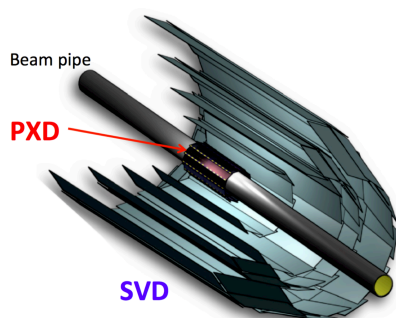


図 2.16 崩壊点検出器の完成イメージ図

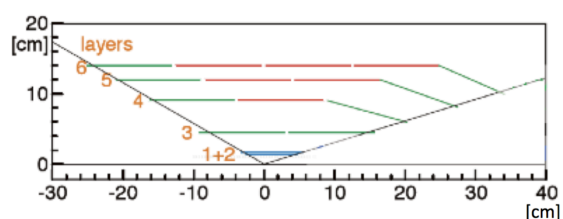


図 2.17 PXD, SVD の各層の配置図。検出範囲は $17^\circ < \theta < 150^\circ$ となっている。

図 2.18 に PXD と SVD の完成イメージ図を示す。PXD は DEPFET (DEpleted P-channel Field Effect Transistor) と呼ばれるピクセル化された半導体検出器から構成される。SVD は DSSD(Double-sided Silicon Strip Detector) と呼ばれるシリコン型検出器を層の両面にストリップ状に貼りつけた構造を取っており、両面のシリコン型検出器の向きが直交するようになっているために 2次元位置情報の取得が可能となる。図 2.19 に DEPFET と DSSD の構造を示す。

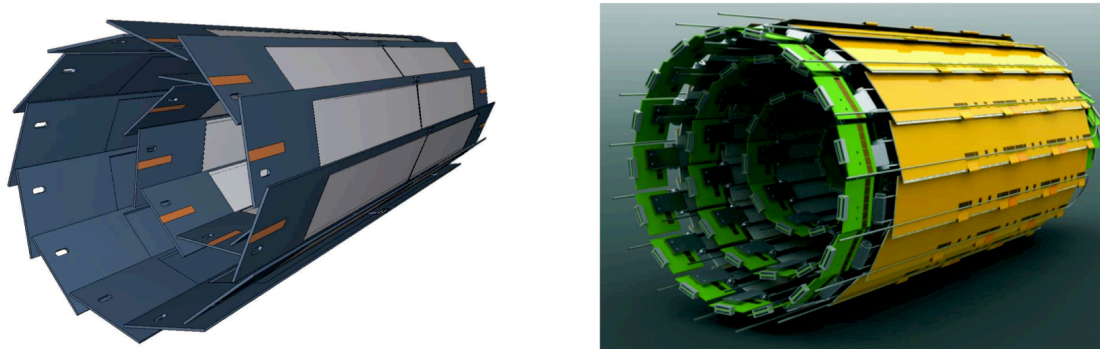
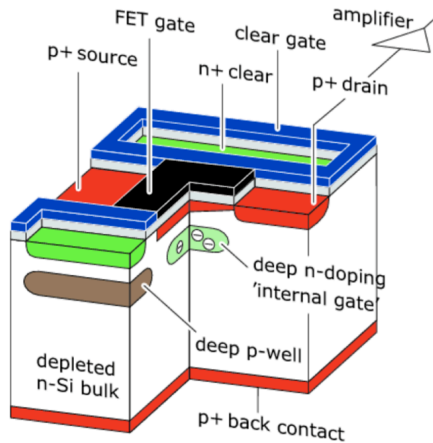
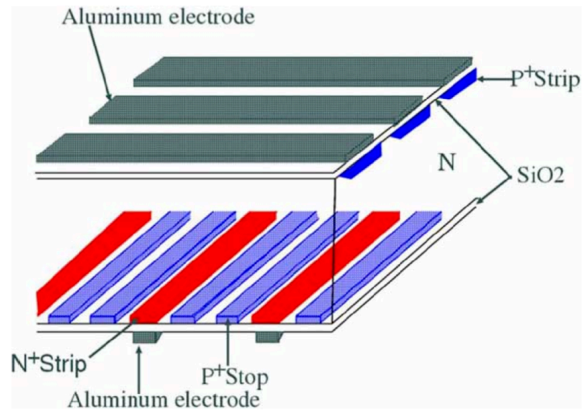


図 2.18 PXD(左) と SVD(右) の完成イメージ図



(a) DEPFET の構造図



(b) DSSD の構造図

図 2.19 (a) DEPFET の構造図。シリコン空乏層に荷電粒子が入射することで電子・正孔対を生じ、トランジスタで増幅後に読み出される。(b) DSSD の構造図。バルクシリコンの両側に p 型と n 型の半導体ストリップが直交して取り付けられている。

CDC

中央飛跡検出器 CDC(Central Drift Chamber) は検出器内部に充填された混合ガス (He 50%, C₂H₆ 50%) 中を荷電粒子が通過する際に電離する電子を検出し、粒子の飛跡の再構成を行う。また、Belle II 測定器内部はビーム軸方向に 1.5 T の磁場をかけることによって、荷電粒子の飛跡は螺旋運動を描く。磁場 B [T] と測定された曲率半径 ρ [m] を用いることで、以下の式から通過粒子の運動量 p を求めることができる。

$$p [\text{GeV}/c] = 0.3 \rho [\text{m}] B [\text{T}] \quad (2.5)$$

CDC 内部には高電圧 ($\sim 2.3 \text{ kV}$) が印加された多数の電極ワイヤが張られている。電極ワイヤには信号読み出し用 (センスワイヤ) と電場形成用 (フィールドワイヤ) の 2 種類があり、センスワイヤは金メッキタングステン、フィールドワイヤはアルミニウム製である。混合ガス中で発生した電子は電場によって陽極に向かって移動 (ドリフト) し、検出される。この電子が各ワイヤに到達するまでのドリフト時間を求めることにより、通過粒子の位置を検出している。さらに、読み出された電荷量から荷電粒子がガス中で失ったエネルギー (dE/dx) を測定することで粒子識別が可能である。図 2.20 に電子、陽子、荷電 K , π 中間子の運動量と CDC 内で失うエネルギー (dE/dx) の関係を示す。図から CDC でも $1 \text{ GeV}/c$ 以下の運動量領域では p, K, π の識別が可能なが分かる。Belle II 実験では後述する粒子識別装置と合わせることでより広い運動量領域での粒子識別が可能となる。

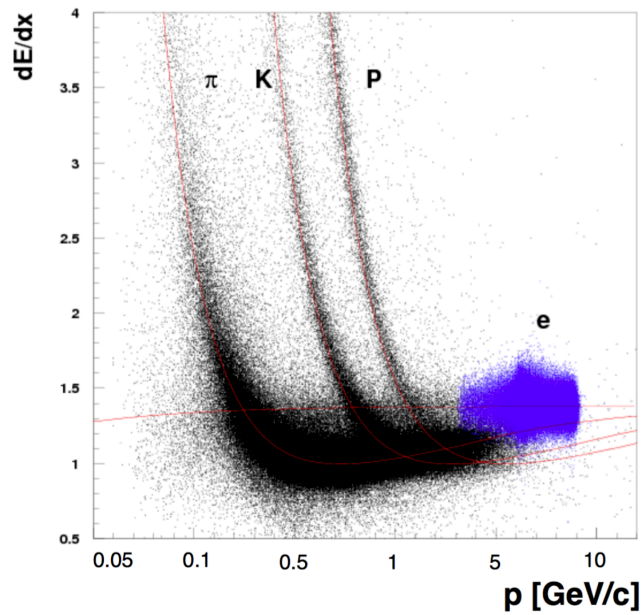


図 2.20 粒子別の運動量とエネルギー損失の関係

Belle II CDC では全 56 層の内側の 8 層のワイヤ設置密度を上げてセルサイズを小さくする (Small-cell chamber) ことで位置分解能の向上を図ると同時に各セルの占有率を下げることでバックグラウンドの影響が低減される。図 2.21 に CDC のワイヤ張りの様子を示し、図 2.22 に Belle 実験、Belle II 実験それぞれの CDC の断面図を示す。また、イベントレートの増大に伴って、読み出しエレクトロニクスについても改良が成される。検出器内で信号を増幅・整形し、アナログ信号を ADC に、デジタル信号を TDC に送信するという方法を取ることでデッドタイムを電子のドリフト時間である 200 ns 程度に抑え、高レートでの読み出しに対応している。表 2.4 に Belle II 実験でのアップグレードによる CDC の主要パラメータの比較を示す。



図 2.21 CDC のワイヤ張りの様子

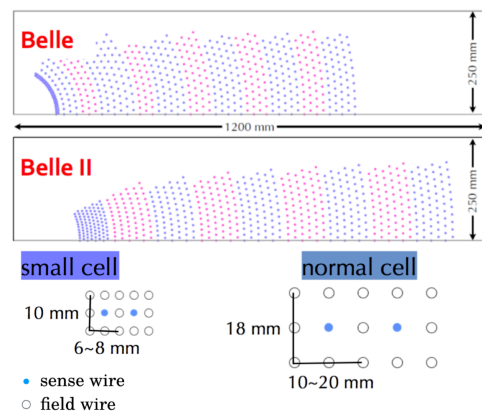


図 2.22 CDC 断面図。スモールセルとノーマルセル比較画像

表 2.2 CDC の Belle, Belle II でのパラメータの比較

パラメータ	Belle	Belle II
シリンダー内半径 (mm)	77	160
シリンダー外半径 (mm)	880	1130
レイヤー (層) 数	50	56
センスワイヤ数	8,400	14,336
センスワイヤ直径 (μm)	30	30
充填ガス	He-C ₂ H ₆	He-C ₂ H ₆

TOP

Belle II 測定器の Barrel 部において、荷電 K, π 中間子の識別を担う検出器が TOP (Time-of-Propagation) である。TOP は輻射体である石英ガラスのクォーツバーを荷電粒子が通過した際に発生する Cherenkov 光を輻射体端部に光学的に接続された光検出器で観測し、粒子識別を行う DIRC (Direction of Internally Reflected Cherenkov light) というタイプの Cherenkov 検出器である。図 2.23 に粒子識別の原理図、図 2.24 に TOP モジュールの概要図を示す。

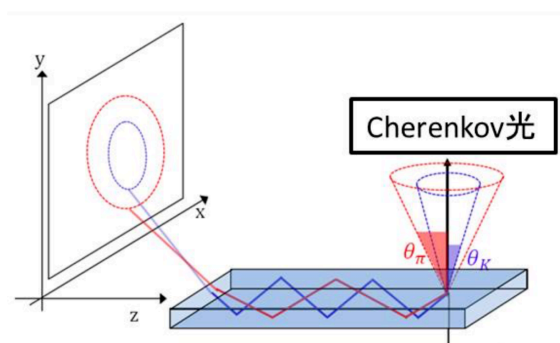


図 2.23 DIRC の原理図

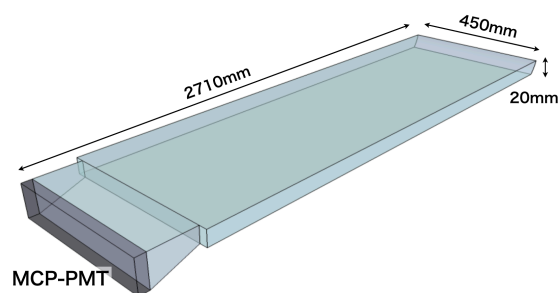


図 2.24 TOP モジュール概念図

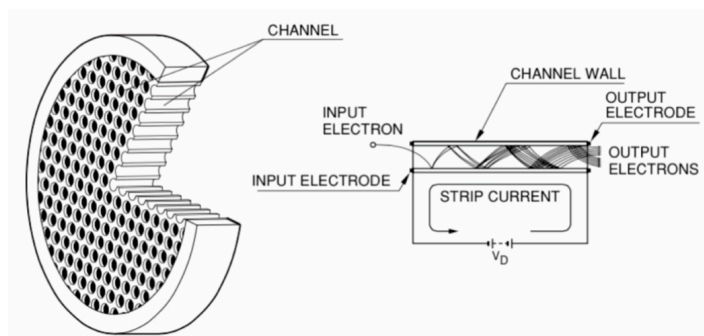
荷電粒子がクォーツバー通過時に放出した Cherenkov 光はクォーツバー内を全反射して端部に到達し、半円形の形としてを検出する。この際、1章で述べた RICH と同様に荷電粒子の質量の違いによるリング半径差を利用して粒子識別を行う。また、Cherenkov 光放射角が異なることでクォーツバー内で全反射を繰り返した際の経路長にも差が生じる。重い粒子ほど Cherenkov 放射角が小さいため経路長が長くなり、結果として検出されるまでの伝搬時間が長くなる。リング半径差を用いた粒子識別に加え、この伝搬時間の差を用いる TOF (Time-of-Flight) 測定も同時に行うことで高い粒子識別性能を達成することが可能となる。

これらの測定を可能とするため、TOP で使用する光検出器には高い位置分解能と時間分解能を有する MCP-PMT (Micro-Channel Plate Photo-multiplier tube) が採用された。MCP-PMT は高磁場中 (~ 1.5 [T]) での動作が可能であり、 $4 \times 4 = 16$ チャンネルのアノードプレートを内蔵

し、1ch のサイズは 5.3mm 四方である。プレート上に多数空いた直径 $10\ \mu\text{m}$ の穴で信号増幅を行い、最終的に 1 チャンネルで増幅率 $O(10^6)$ を得ることができ、50 ps 以下という高い時間分解能を有する。また、クォーツバーと MCP-PMT の間にはライトガイドが設置し、リングイメージを拡大することで位置分解能の向上が図られる。図 2.25 に MCP-PMT の外観図と MCP による信号増幅の原理図を示す。



(a)MCP-PMT



(b)MCPによる電子増幅原理図

図 2.25 (a) は MCP-PMT の外観図。(B) は MCP による電子増幅の概念図。

Aerogel RICH

Endcap 部での K^\pm, π^\pm の識別を行うのが Aerogel RICH(Aerogel Ring Imaging Cherenkov counter) である。ARICH も TOP と同様の Cherenkov 光検出器であり、放射体で発生した Cherenkov 光をその背後に設置した光検出器によってリングイメージとして観測し、その半径から K/π 識別を行う。放射体にはシリカエアロゲルを用い、144-ch マルチアノード型 Hybrid Avalanche Photo Detector(HAPD) を 420 台使用する。

ARICH の詳細については第 3 章で記述する。

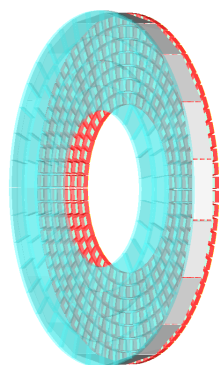


図 2.26 Aerogel RICH の完成イメージ

ECL

Belle II 測定器の Barrel 部 と Endcap 部において主に電子・陽電子や光子のエネルギーを測定するために使用される検出器が ECL(Electromagnetic Calorimeter) である。装置内部の結晶シンチレータへと入射した電子や光子は電磁シャワーを形成し、ほぼ全エネルギーを失う。電磁シャワーが失ったエネルギーはシンチレーション光へと変換される。この時その光量はエネルギーに比例するため、光検出器で光量を測定することにより入射粒子のエネルギーを求めることができる。また、電子と陽電子の非弾性散乱である Bhabar 散乱の測定も行うことで、その頻度から加速器のルミノシティを見積もる役割も担う。

ECL の 1 モジュールとその概要図を図 2.27 に示す。光子検出には PIN フォトダイオードを使用し、シンチレータには発光量が多く、高いエネルギー分解能を持つ CsI(Tl) 結晶 (時定数 $\tau \sim 1 \mu\text{m}$) が用いられる。Belle II 実験ではルミノシティの強化に伴うビームバックグラウンドの増加が予想されるため、読み出し回路をアップグレードすることで高レートでの測定に対処する。また、特にビームバックグラウンドの影響を大きく受ける Endcap 部では、シンチレータをより反応速度の速い CsI 単結晶 (時定数 $\tau \sim 30 \text{ ns}$) へ置き換えることで pile-up の抑制が図られる。1 モジュールは Barrel 部に 6624 個、前方 Endcap 部には 1152 個、後方 Endcap 部には 960 個の合計 8736 個が使用され、Belle II 測定器における広い領域をカバーする。

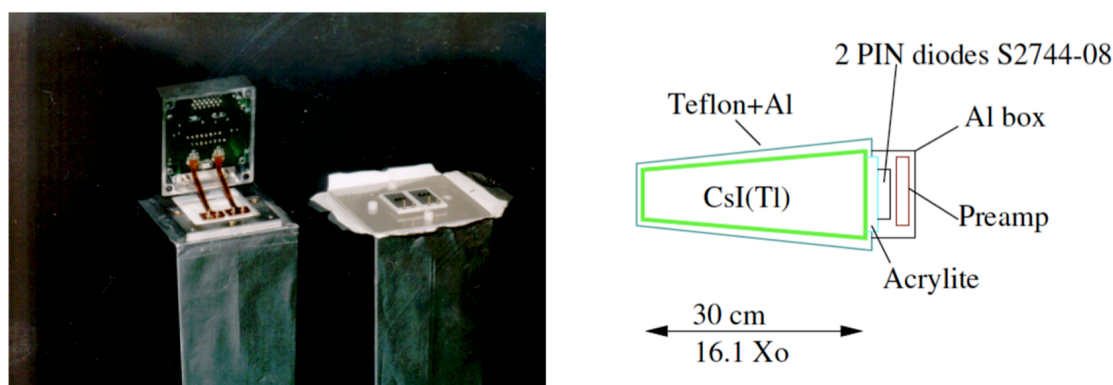


図 2.27 ECL モジュールと概要図

KLM

KLM(K-Long/Muon detector) は Belle II 測定器の最外層部に設置され、比較的寿命が長い K_L^0 中間子と μ 粒子の識別を行う検出器であり、Resistive Plate Chambers(RPC) と呼ばれるガスチェンバーと鉄板とのサンドウィッチ構造を取っている。KLM に到達した粒子のうち、貫通力の強い μ はそのまま通過していくが、 K_L^0 は KLM の鉄の層を貫通することができず全てのエネルギーを落として崩壊してしまう。この KLM 内での軌道形状の違いと CDC 等の飛跡検出器で得られた飛跡情報を利用することにより、 K_L^0/μ 識別が可能となる。KLM の断面図を図 2.28 に

示す。RPC と鉄板は Barrel 部では 15 層 + 14 層、Endcap 部では 14 層 + 14 層が設置される。

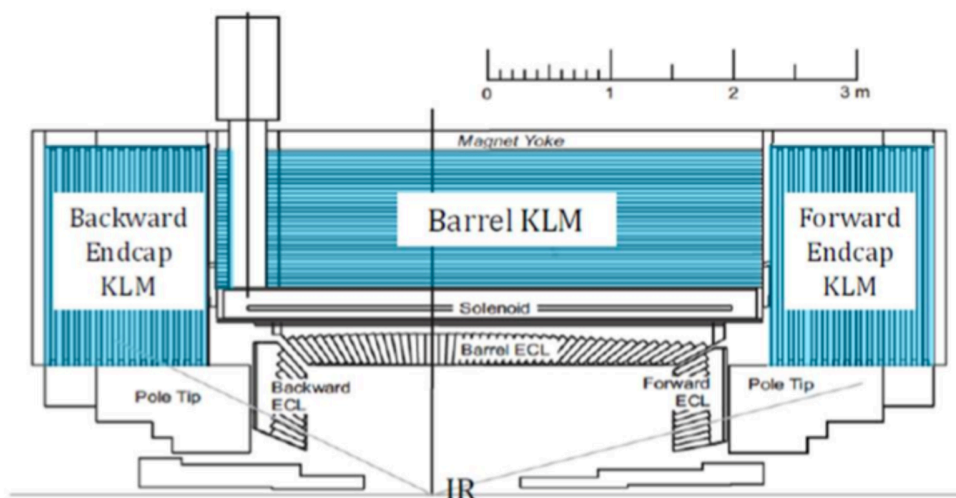


図 2.28 KLM の断面図

RPC は高電圧を印加した絶縁性ガラスで混合ガス ($\text{Ar} : \text{C}_4\text{H}_{10} : \text{HFC} - 134\text{a} = 30\% : 8\% : 62\%$) を挟んだ構造をしている。図 2.29 に RPC 2 層で構成されるモジュール (Super Layer) の構成を示す。荷電粒子が RPC を通過するとストリーム放電が起きる。この際の電場変化によって発生する誘導電流をストリップ読み出し電極で検出することで荷電粒子の通過位置を観測する。しかし、RPC は一度放電を起すると再充電まで約 2 秒ほどかかるため Dead time が生じ、レート耐性が悪いという特徴がある。そこで、バックグラウンドレートが特に高い Endcap 部では Dead time の短いプラスチックシンチレーションカウンターを使用することで反応速度を向上させている。図 2.30 に Endcap KLM の 1 モジュールの概要図とシンチレータストリップの構造を示す。ストリップ状のプラスチックシンチレーションカウンターであり、1 層あたり 75 本のシンチレータが設置されている。荷電粒子がシンチレータを通過した際に発生したシンチレーション光はシンチレータ中心部の波長変換光ファイバーを通じて光検出器 MPPC (Multi Pixel Photon Counter) に導かれ、検出される。このような改良によって、Endcap 部のバックグラウンドを低減できる見込みである。

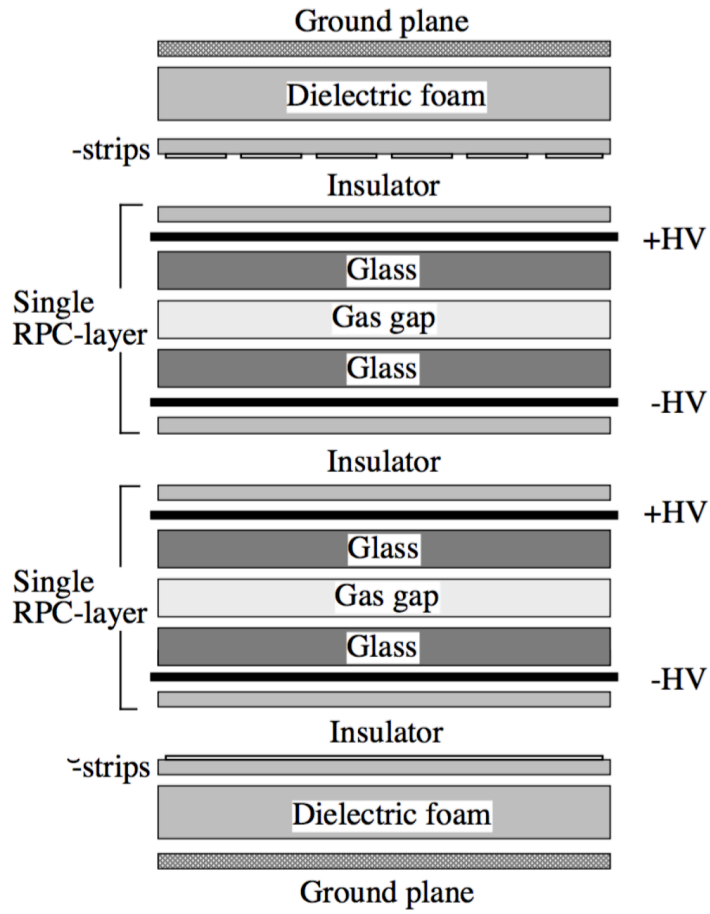


図 2.29 RPC 2 層で構成される Super Layer の概要図

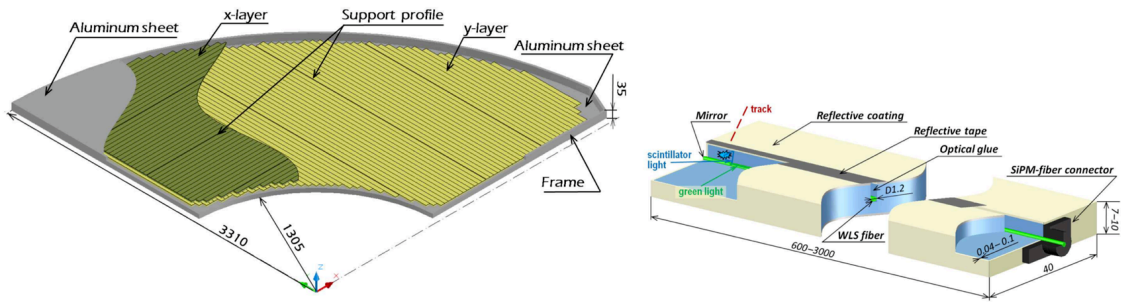


図 2.30 Endcap KLM のシンチレータストリップの概要図 [20]。左図は Endcap KLM 1 モジュール。右図はシンチレータの構造と検出原理図。

データ収集システム

図 2.31 に Belle II データ収集 (data acquisition : DAQ) システムの概要図を示す。Belle II 実験ではルミノシティが Belle 実験の 40 倍に増加することに伴い、トリガーレートにおいても Belle 実験では最大 0.5 kHz だったのに対し、Belle II 実験では最大 30 kHz にまで増大し、読み出されるデータ量も最大 30 GB/s に達する見込みである。

Belle II DAQ システムでは磁気テープなどの物理ストレージに蓄積するデータ量を削減するために、物理解析に必要なと思われるデータをハードウェア的にオンラインで取捨選択を行うトリガーシステムが導入される。各検出器からの信号はデジタル化された後、Belle2Link と呼ばれる Belle II 実験独自の光通信規格によって COPPER(Common Platform of Pipe-line Electronics Readout) へと転送するという共通の読み出しフレームワークを使用する*1。このように各検出器の読み出しを統一することで Dead time を低減することが可能となると同時に、ハードウェアとファームウェアを統一することで開発時間の短縮と低コスト化が図られた。

PXD を除く検出器からのデータは COPPER を通して読み出され、専用サーバで統合して 1 イベントごとに逐次イベントが再構成 (イベントビルディング) した後に High Level Trigger(HLT) と呼ばれる専用トリガーモジュールによって前出の物理解析に必要なかどうかの取捨選択が行われる。PXD では読み出されるデータ量が他の検出器に比べて膨大であるため、COPPER を使用することは困難である。そこで、CDC のトラッキング情報と TOP の飛行時間情報によるトリガーと HLT からの事象選別トリガーの両方を用いて荷電粒子が通過した付近のピクセルのみでデータ取得を行う Online SElection Node(ONSEN) と呼ばれる別モジュールを使用し、データ量の削減を行なう [21]。

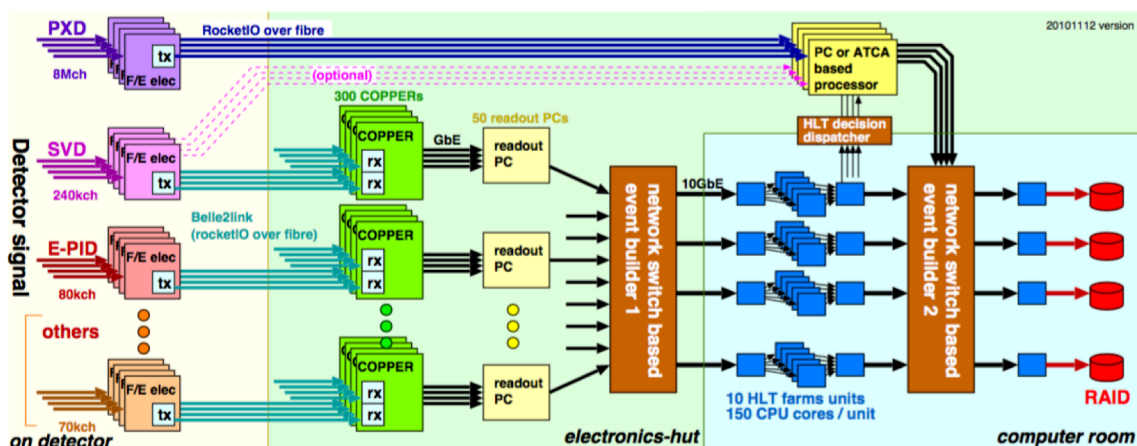


図 2.31 Belle II データ収集システムの概要図

*1 PXD を除く検出器

第 3 章

Aerogel RICH 検出器

この章では、新型粒子識別装置 Aerogel RICH 検出器 (ARICH) について解説する。ARICH は 2.4 節で述べたように、Belle II 測定器の Endcap 部において荷電 K/π 粒子の識別を担当する検出器であるが、空間的な制限からコンパクトな形状が求められ、且つ高い粒子識別性能が求められる。

本章では ARICH への要求についてまとめ、動作原理や主な構成要素である輻射体、光検出器、読み出しシステムについて解説する。

3.1 Aerogel RICH への要求

粒子識別 (Particle Identification:PID) はフレーバータギングや B 中間子の崩壊事象観測にとって非常に重要な役割を担う。 B 中間子の同定には $1.5 \text{ GeV}/c$ 以下の低運動量領域でのフレーバータギングが重要であり、また B 中間子の稀崩壊事象観測には $1.5 \text{ GeV}/c \sim 3.8 \text{ GeV}/c$ といった広範囲での K/π 識別が求められる。Belle 実験では ACC、Time of Flight(TOF)、CDC を組み合わせ使用することで 3σ での K/π 識別を達成したが、空間的制約上 Endcap 部には TOF を設置することができず、Endcap 部 ACC はフレーバータギング用として $0.5 \text{ GeV}/c \sim 2.0 \text{ GeV}/c$ での低運動量領域に限定された設計となっていた。

Belle II 実験は非対称エネルギー衝突であるため Forward-Endcap 部に高運動量の崩壊粒子が飛来しやすい。図 3.1 に $B \rightarrow \pi\pi$ からの荷電 π 中間子の運動量と角度分布を示す。Belle II 実験がターゲットとするより稀少な物理事象の観測のためにはこのような高運動量領域での粒子識別効率の改善が必須である。しかしながら、TOF や ACC と同様の方法で高運動量粒子の観測を行う場合、識別性能の向上が困難となる。TOF が有する時間分解能が 100 ps であるのに対して、 $4 \text{ GeV}/c$ の K/π 粒子が衝突点から垂直に飛来し TOF で検出される場合、 K 中間子と π 中間子の飛行時間差は 28 ps 程度であるため識別できず、さらに、これほどの時間分解能の実現も困難である。また、ACC の粒子識別性能は検出される光子数に依存している。輻射体内での発生光子数は屈折率が高いほど増加し、識別性能も向上する。しかし、識別可能運動量領域は屈折率と反比例関係にあるため、識別性能と識別可能運動量領域を両立し、向上を図ることができない。Belle II 実験では高運動量の K/π 粒子の識別をしつつ、フレーバータギングに重要な低運動量領域もカ

バーするような新型粒子識別装置が必要となり、ARICH の開発を行った。ARICH は Belle II 測定器のビーム軸から $13.6^\circ < \theta < 33.4^\circ$ にあたる Forward-Endcap 部での粒子識別を担い、識別可能運動量領域を

$$0.5 \text{ GeV}/c \sim 3.5 \text{ GeV}/c$$

に定め、この領域において 4σ 以上の精度で K/π 識別を行うことを目指している。

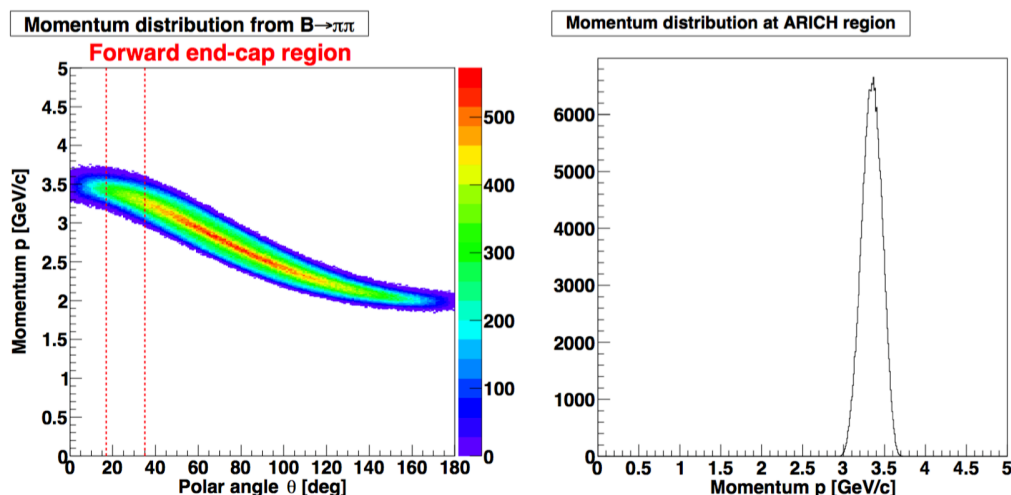


図 3.1 シミュレーションによる $B \rightarrow \pi\pi$ からの荷電 π 中間子の運動量と角度分布 [23]。左図は粒子の飛来角度と運動量の関係であり、赤破線は Forward-Endcap 部の領域を表している。右図は Forward-Endcap 部での π 中間子の運動量分布である。

3.2 Aerogel RICH 検出器の動作原理

ARICH は輻射体であるエアロゲルを荷電粒子が通過する際に円錐状に発生する Cherenkov 光をリングイメージとして観測し、粒子識別を行うリングイメージング型 Cherenkov 検出器である。より具体的な粒子識別原理を以下に示す。質量 m の荷電粒子が輻射体を通過した時、発生する Cherenkov 光の放射角 θ_C と質量 m の間には以下の式が成り立つ。

$$m = \frac{p}{c} \sqrt{n^2 \cos^2 \theta_C - 1} \quad (3.1)$$

p は荷電粒子の運動量、 c は真空中の光速、 n は輻射体の屈折率である。運動量 p は CDC から得られ、屈折率 n はエアロゲルの調節された値であるため既知である。よって、放射角 θ_C を測定することにより質量 m 、つまり粒子の種類を知ることが可能となる。ARICH ではこの関係を利用して粒子識別を行う。図 3.2 に示すように、エアロゲル内で円錐状に発生した Cherenkov 光を後段の光検出器で検出する。それによって得られた検出位置情報から 2 次元リングイメージを再構成し、そのリング半径から Cherenkov 光の放射角を求めることで飛来粒子の同定を行う。Cherenkov 光発生点から検出器までの拡散距離を L 、リング半径を r として、簡易的に以下の幾

何学的関係式

$$\theta_C = \tan^{-1} \left(\frac{r}{L} \right) \quad (3.2)$$

を用いて、観測されたリング半径から放射角を算出できる。

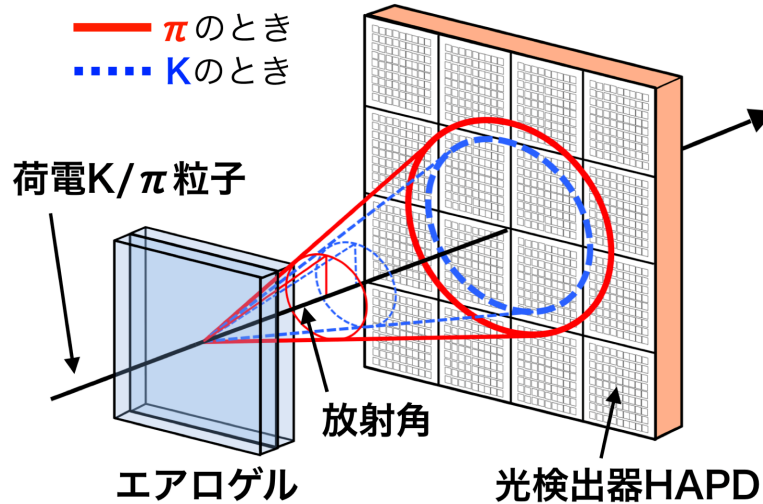


図 3.2 RICH における粒子識別方法の概念図

Endcap 部の設置スペースは狭い領域に限られており、検出器を小さくする必要があったため構造体を小さく抑えることができる近接焦点型の RICH(1.1.1 節) を採用した。しかし、識別性能を向上させるためには角度分解能を低下させることなく検出光子数を増やす手段が必要であった。1トラック (1 回の荷電粒子通過) 当たりの角度分解能 σ は以下の式に従う。

$$\sigma = \frac{\sigma_{\text{single}}}{\sqrt{N_{\text{p.e.}}}} \propto \frac{1}{\sqrt{d}} \quad (3.3)$$

σ_{single} は 1 光子当たりの角度分解能、 $\sqrt{N_{\text{p.e.}}}$ は 1 トラックで実際に検出された光電子数、 d は輻射体厚さである。 $N_{\text{p.e.}}$ は輻射体を厚くすることで増えるが、同時に式 (3.3) における 1 光子当たりの角度分解能 σ_{single} も大きくなり悪化してしまう。これは輻射体が厚くなることにより光子放出点の不定性が大きくなるためである。先行研究から輻射体の厚さは 20 mm 前後が最適であることが分かっている [27]。そこで、輻射体の厚さを変えず検出光電子数を維持したまま、且つ角度分解能を向上させる方法として「マルチレイヤー方式」を採用した。その概念図を図 3.3 に示す。これは屈折率の異なる輻射体を複数組み合わせる方法である。同図 (a) が屈折率が均一な輻射体が 1 枚の場合、(b) が異なる屈折率 n_1 、 n_2 の輻射体を 2 枚重ねた場合である。マルチレイヤー方式では屈折率を $n_1 < n_2$ とすることでリングイメージを絞り、角度分解能を向上させている。ARICH ではこの方法を用いることで高い識別性能の達成を目指す。

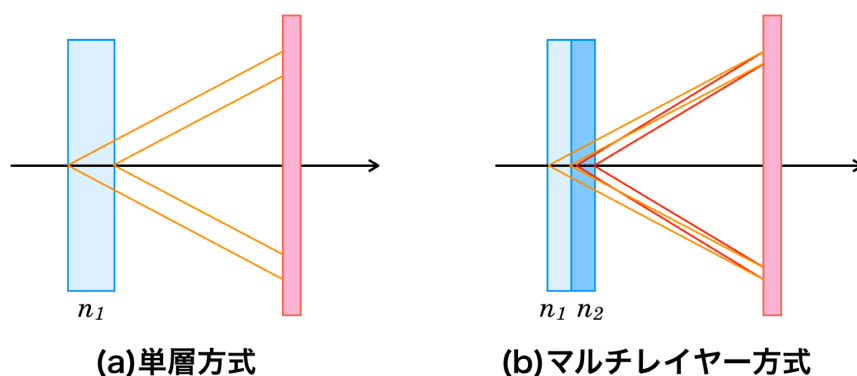


図 3.3 (a) 輻射体 1 層、(b) 輻射体 2 層それぞれでの Cherenkov 光放射の様子。(b) では屈折率を $n_1 < n_2$ と設定することでリングイメージを絞っている。

3.3 Aerogel RICH 全体の構成と期待される性能

図 3.4 に Belle II 測定器内部での ARICH の設置位置を示す。ARICH は Belle II 測定器のビーム軸から垂直方向に $17^\circ < \theta < 35^\circ$ の領域にあたる Forward-endcap 部に設置される。また、設置スペースがビーム軸方向に 280 mm に限られるため、この空間に収まるようなコンパクトな設計である必要がある。以下に、ARICH の構成要素とそれらに要求される性能を示す。

- **輻射体**

0.5 GeV/c ~ 3.5 GeV/c の運動量領域で粒子が Cherenkov 光を発生するように屈折率が 1.05 付近であること。検出光子数を増やすために透過長が大きい物質であること。

- **光検出器**

位置分解能を有し、1 光子の検出が可能であること。また、1.5 T 以上の磁場中での動作が可能であること。

- **読み出し回路**

多チャンネル (約 6 万チャンネル) での同時読み出しが可能であること。奥行き 5 cm の設置領域に収まるよう小型で高集積化されていること。

これらの要求性能を満たすものとして、輻射体には「シリカエアロゲル」、光検出器に「Hybrid Avalanche Photo-Detector(HAPD)」を採用した。また、読み出し回路についても ARICH 用に開発を行った独自のシステムを使用する。

図 3.5 に ARICH の基本設計図 (抜粋) を示す。ARICH は外径約 1.1 m, 内径約 0.4 m のリング型であり、赤線で示した位置には反射鏡が設置される。これは ARICH 外層壁まで到達した Cherenkov 光を反射させて光検出器で観測できるようにすることによって、検出光子数を減らさないためである。

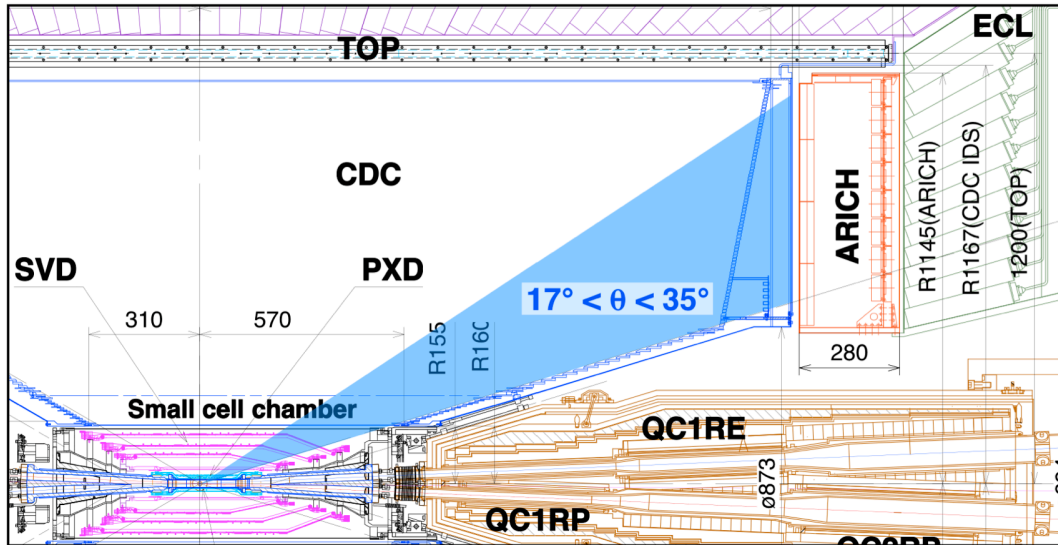


図 3.4 ARICH の設置位置

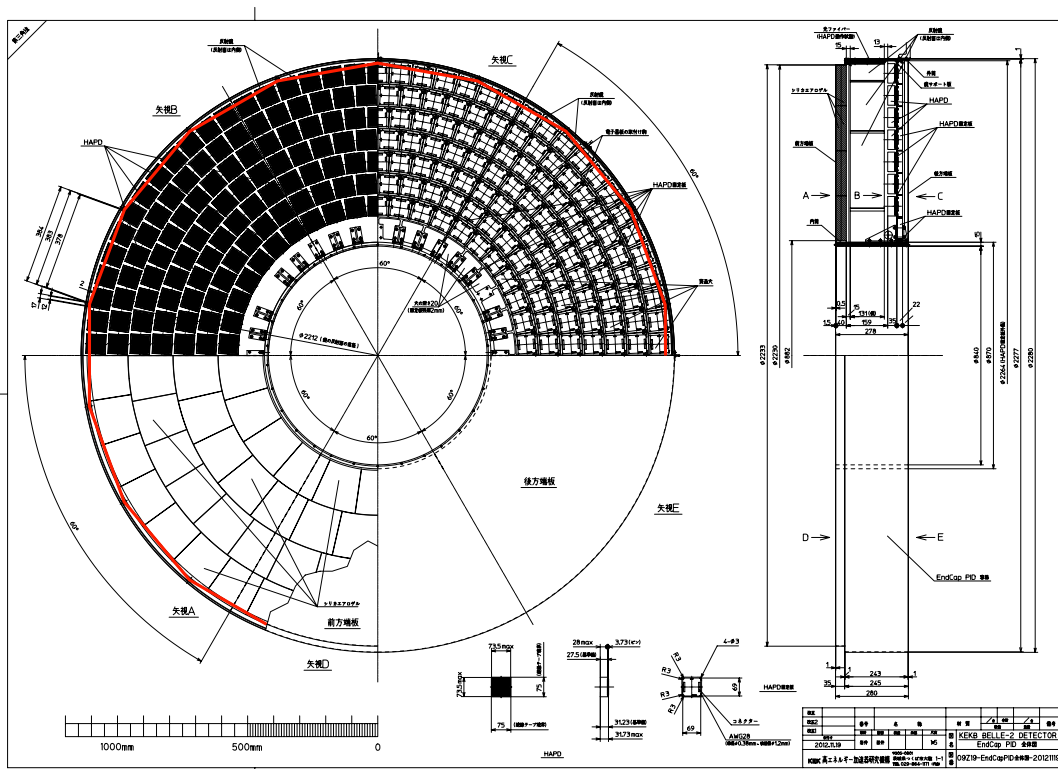


図 3.5 Aerogel RICH 設計図。上半分は光検出器 HAPD 設置位置、下半分はエアロゲル設置位置を表している。青線で示した位置には反射鏡が設置される。

3.4 Aerogel RICH 検出器の構成要素

ここでは、ARICH の主な構成要素である輻射体 シリカエアロゲル、光検出器 HAPD、読み出しエレクトロニクスについて解説する。

3.4.1 輻射体 シリカエアロゲル

シリカエアロゲルとは SiO_2 が三次元的に配列した多孔物質 (図 3.6) であり、体積の約 98% を空気が占めている。構造上、固体でありながら低屈折率、低密度を持つ特殊な物質であり、粒子径が数十 nm 程度と可視光の波長 (400nm ~ 700nm) に比べて小さいことから優れた光透過性を持っている。また、密度を自由に調整することが可能であることから、 $n = 1.007 \sim 1.2$ の間で任意の屈折率を選択できるという点も特徴の一つと言える。図 3.7 にシリカエアロゲルの外観、表 3.4.1 に代表的な輻射体とその物性値を記す。^{*1}

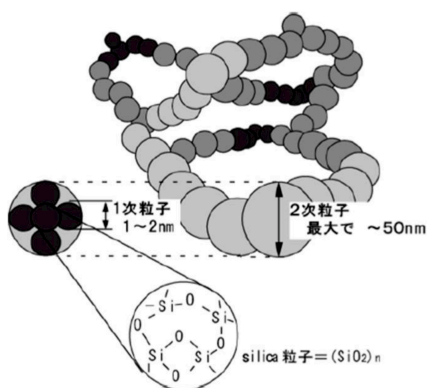


図 3.6 シリカエアロゲルの内部構造

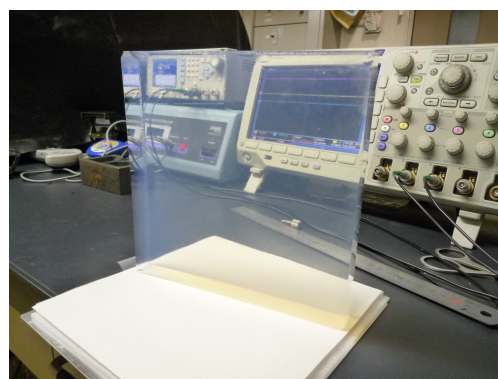


図 3.7 シリカエアロゲル

表 3.1 代表的な輻射体物質とその物性値

物質	屈折率	密度 [g/cm ³]
シリカエアロゲル	1.007 ~ 1.2	0.0281 ~
空気	1.00028	0.001293
水	1.3428	0.99984
ガラス	1.48 ~ 2.00	2.4 ~ 2.6

ARICH で使用されるシリカエアロゲルはアルミニウム製の扇状格納容器に入れられ、容器とシリカエアロゲルの間には黒色の紙が挿入される。これはエアロゲル内で後方散乱し角度情報を

^{*1} シリカエアロゲルを構成する粒子が可視光波長より小さいことによる光学的特徴として Rayleigh 散乱を起こすことが挙げられる。

失った Cherenkov 光子の検出を防ぐためである。図 3.8 に構造フレームの概要図とフレームに設置されたエアロゲルの外観を示す。

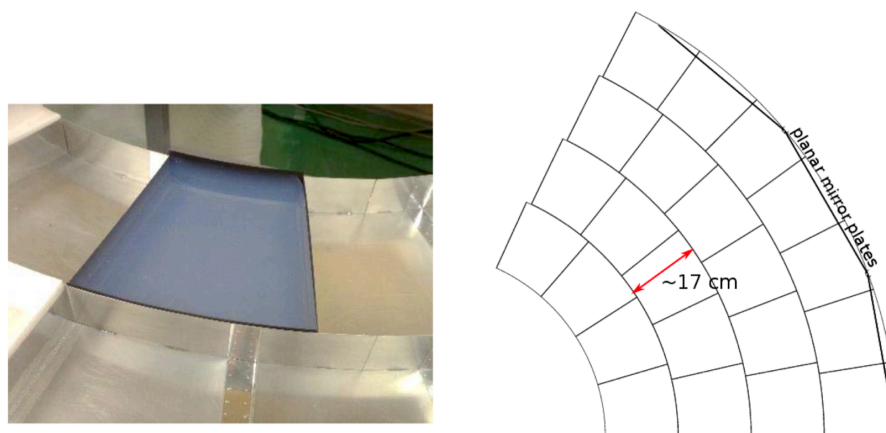


図 3.8 左図はエアロゲルタイルが構造フレームに設置された様子。右図は構造フレームの概要図。

3.4.2 光検出器 HAPD

ARICH では要求性能を満たす光検出器として 144-ch マルチアノード型 HAPD(Hybrid Avalanche Photo Detector) を採用し、浜松ホトニクス (株) と共同で開発を行った。シリカエアロゲルの屈折率を 1.05, 輻射体を通過する荷電粒子の運動量を $4 \text{ GeV}/c$ とした場合、(3.1) より K/π 中間子による Cherenkov 光の放射角度差 ($\theta_\pi - \theta_K$) は 23 mrad 程度と算出され、拡散距離を 20 cm とすると光検出器上でのリング半径差は約 5 mm となる。従って、粒子識別する上では 5 mm 以下の位置分解能を持つ光検出器が求められる。HAPD はこの位置分解能を満たし、加えて 1 光子検出可能、磁場中での動作が可能といった性能を併せ持っている。図 3.9 に HAPD の外観と寸法を示す。

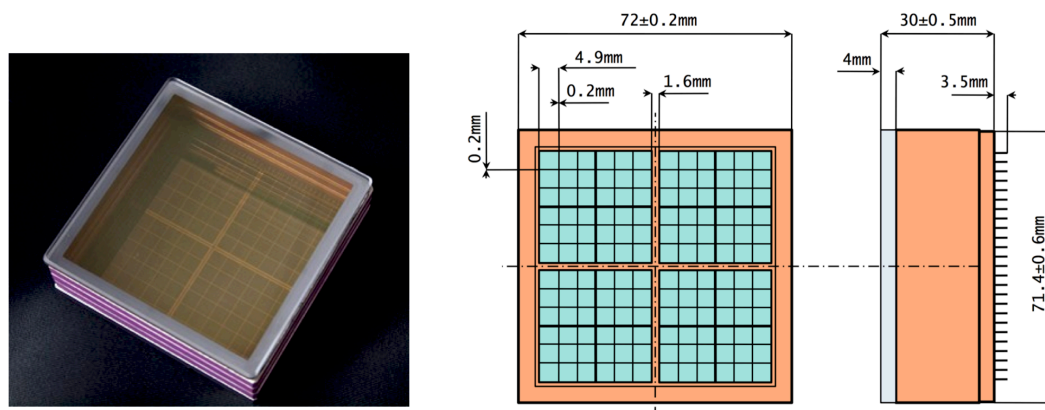


図 3.9 左図は 144ch マルチアノード型 HAPD の外観図。右図は HAPD の寸法。

HAPD の仕様

表 3.4.2 に光検出器 HAPD の仕様を示す。HAPD は要求される位置分解能を達成するため、 $6 \times 6 = 36$ にピクセル化された APD チップを 4 枚内蔵し、合計で 144ch での読み出しが可能である。1ch あたりのピクセルサイズは $4.9 \times 4.9 \text{ mm}^2$ である。入射窓には合成石英を使用しており、光電面にはスーパーバイアルカリと呼ばれる高量子効率のアルカリ合金を蒸着させることで Cerenkov 光と同程度である約 400 nm の波長領域で 28% 以上の量子効率 (QE) となっている。図 3.10 に微小光量に対する HAPD の波高分布、図 3.11 に量子効率の波長依存性についての図を示す。

表 3.2 HAPD の仕様 [28]

外寸		$73 \times 73 \times 28 \text{ mm}^3$
総チャンネル数		$12 \times 12 = 144 \text{ ch}$
有効面積		65%
入射窓	材質	合成石英
	厚さ	3 mm
光電面	材質	スーパーバイアルカリ
	量子効率	~ 28% (波長: 400nm)
APD	チップ数	4
	チップサイズ	$4.9 \times 4.9 \text{ mm}^2$
	逆 Bias 電圧	~ 400 V
	Avalanche 増幅	~ 40
電子打ち込み	電子打ち込み増幅	~ -8.5 kV
	打ち込み増幅	~ 1700
S/N 比		~ 15

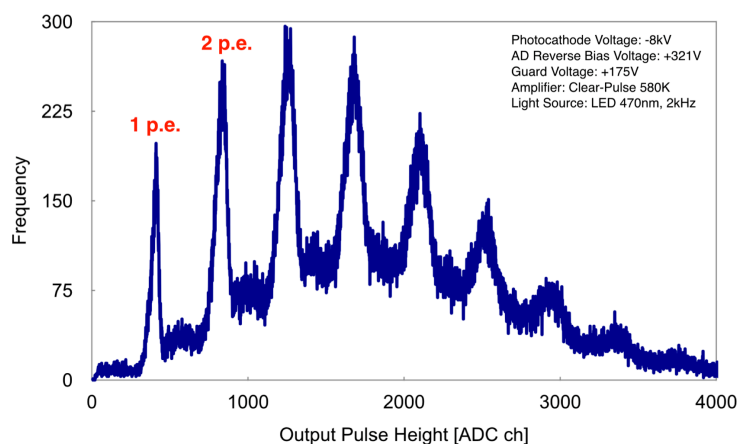


図 3.10 微小光量に対する HAPD の波高分布の例

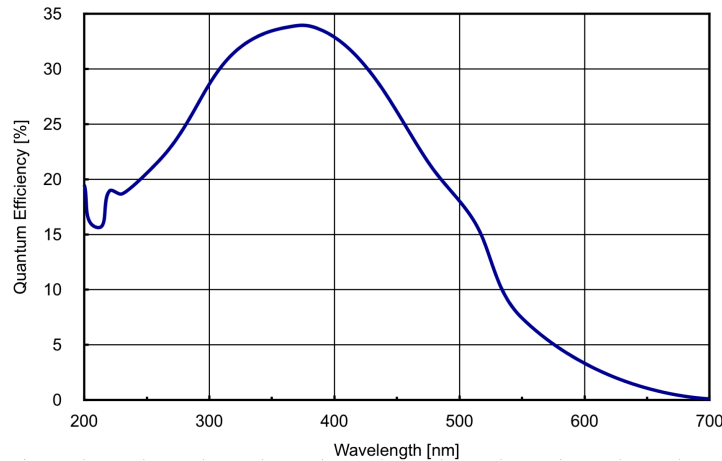


図 3.11 量子効率の波長依存性

動作原理

図 3.12 に HAPD の構造と動作原理図を示す。HAPD は真空管内部にピクセル化された APD(Avalanche Photo Diode)*²が内蔵された構造となっている (図 (a))。また、入射窓の内側にはアルカリ金属を蒸着させることで光電陰極としている。

HAPD は「電場による加速」と「APD での Avalanche 増幅」の二段階の電子増幅機構を持っている。APD の増幅原理を図 3.12(b) に示す。逆 Bias 電圧の印加によって空乏層が形成された APD に光電子が入射すると電子-正孔対が生成される。これらそれぞれが逆 Bias 電圧によって電極へとドリフトする。この際、空乏層内の格子原子や不純物と衝突することで2次キャリアを励起させ、この反応が連鎖を繰り返す Avalanche(雪崩) 増幅が起こることによって、最終的には入射光電子数に比例した電圧パルスとして検出することができる。しかし、APD による増幅率は $O(10)$ 程度と、一般的な光電子増倍管 (PMT) の増幅率 ($O(10^6) \sim O(10^8)$) に比べて低く、1 光子レベルの信号読み出しをするには不十分である。そこで、これを補うために電場による加速増幅を行う。光電面で生成された光電子を高電圧により電場加速することで、入射エネルギーを上げ、APD への入射時に空乏層内で生成される電子-正孔対の数を増やしている。この電場加速による電子打ち込みで $O(10^3)$ 程度の増幅率が稼げるため、最終的には $O(10^4)$ 程度の増幅率を得ることが可能となる。また HAPD では、電子打ち込み増幅による初段増幅率が後段の APD での Avalanche 増幅率よりも大きいため初段での統計的ゆらぎの伝搬が小さく、1 光子検出性能に優れている。さらに、APD の増幅原理から垂直方向の磁場の影響を受けることはなく、1.5 T の高磁場中でも正常に動作することが確認されている。図 3.13 に典型的な HAPD における、印可電圧と各増幅率の関係を示す。

*² Avalanche(雪崩) 増幅を利用した受光ダイオードの一種

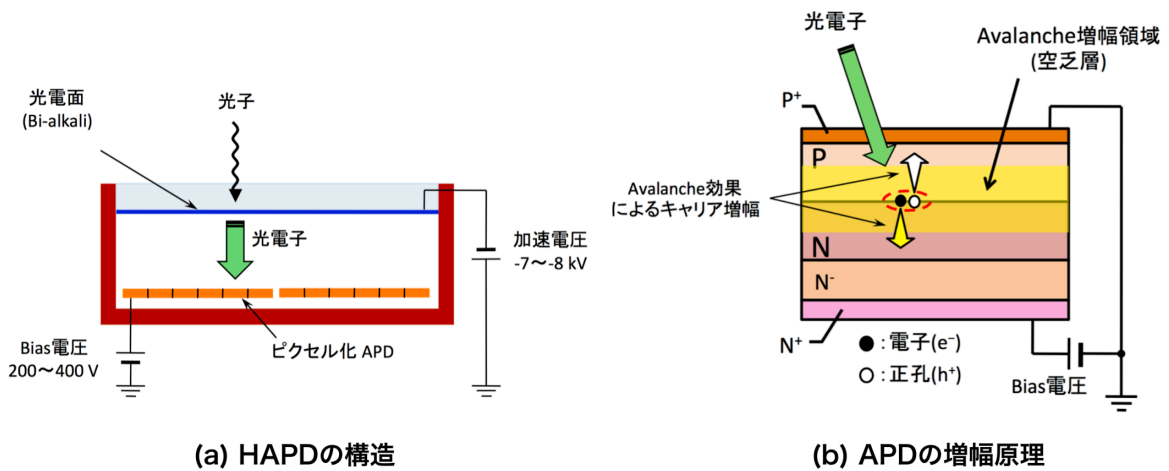


図 3.12 左図は HAPD の構造図。右図は APD における増幅原理図。

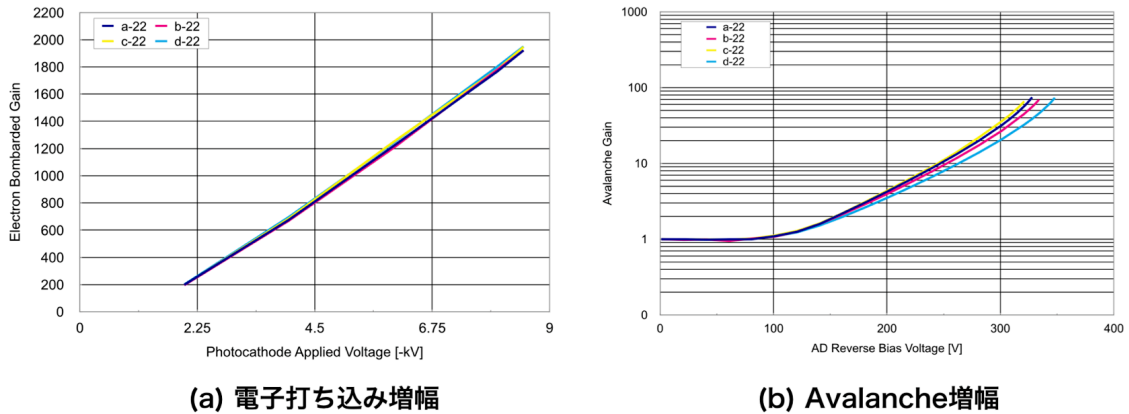


図 3.13 ある HAPD サンプル (KA0603) における印加電圧と増幅率の関係。(a) HV 電圧印加による電子打ち込み増幅率。(b) 逆 Bias 電圧印加による Avalanche 増幅率。なお、各線は各 APD 1 チャンネルの測定値を表す。

放射線による影響

次に放射線による影響とその対策について述べる。Belle II 実験では電子・陽電子ビーム衝突点における Radiative Bhabha 散乱 (図 3.14) という反応により γ 線が放出される。この際発生した γ 線はビームパイプや電磁石などの構造物と衝突することで中性子が放出され、Endcap 部にまで飛来すると考えられる。さらに、衝突点付近では同一バンチ内の同種粒子同士が相互作用することで Touschek 散乱を引き起こす。Touschek 散乱の影響を受けて軌道はずれた粒子はビームパイプに当たることで電磁シャワーを生成し、高エネルギーの γ 線が ARICH などの検出器に飛来することとなる。こういった外部から飛来する中性子や γ 線は検出器へのバックグラウンドとなるだけでなく、物理的な損傷を引き起こす要因にもなる。

シミュレーションにより Belle II 実験では年間積算中性子量は 1.0×10^{11} neutrons/cm²、ガンマ線量は 100 Gy 程度と見積もられている。ARICH でもこのような放射線、特に中性子による HAPD の損傷が危惧されており、以下では具体的な中性子による影響と対策について述べる。

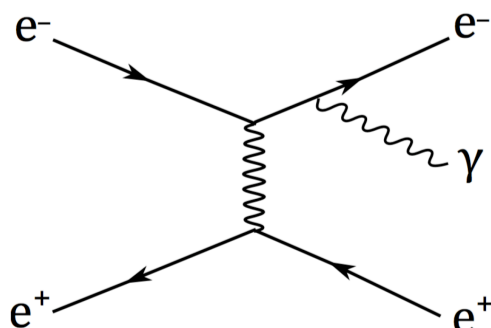


図 3.14 Radiative Bhabha 散乱のダイアグラム

HAPD 内部の半導体に大きなエネルギーを持った中性子線が入射した際、半導体結晶を構成する原子が弾性衝突によって叩き出され格子欠陥を生じる場合がある。さらに、この弾き飛ばされた原子は周囲の隙間に入り込み格子間原子となる。このような格子欠陥と格子間原子の対を Frenkel 欠陥という (図 3.15(a))。多くの格子欠陥と格子間原子は再結合を起こし消滅するが、一部は安定な欠陥となり半導体に中間準位を形成する。この中間準位を介することで、通常伝導帯へ励起できなかった束縛電子が励起されやすくなってしまう (図 3.15(b)(c))。その結果、漏れ電流 (リーク電流) が増加することでノイズレベルも増加し検出器性能の悪化、延いては故障の要因となる。

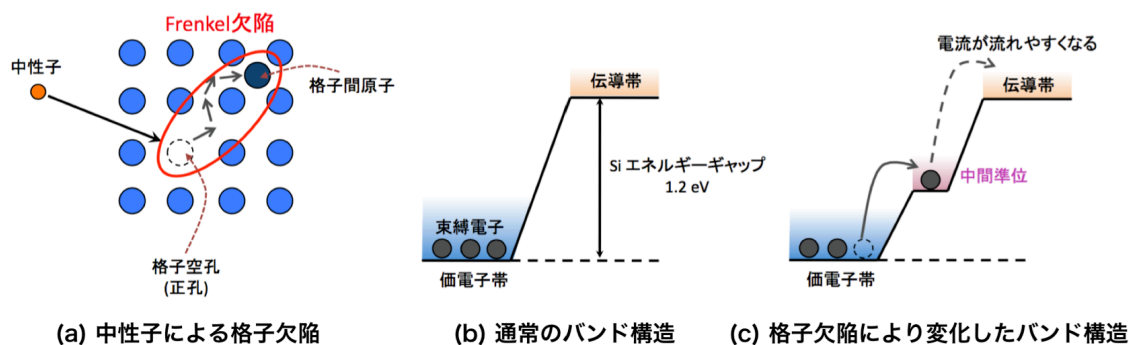


図 3.15 中性子による放射線損傷の仕組み [22]

このような問題に対して、読み出し回路内の Shaping time の最適化によるノイズ量の低減や半導体の P 層を薄くすることによってリーク電流の影響を抑える対策が図られている [22]。

3.4.3 読み出しシステム

図 3.16 に ARICH 内部の設置領域の見取り図を示す。ARICH の設置領域はビーム軸方向に奥行き約 280 mm の狭い空間に限られており、ARICH 本体の構成要素をこの空間内に全て設置する必要がある。それぞれの奥行き方向の幅は、エアロゲルが 40 mm、HAPD が 30 mm、さらに Cherenkov 光の拡散距離が 160 mm であるため、読み出しシステムに残された空間は 50 mm である。この領域内で読み出しを行うために、ARICH 読み出しシステムでは“Front-end board”と“Merger board”という 2 種類の専用読み出し回路を使用する。Front-end Board(FEB) は HAPD 1 台あたり 1 枚搭載され、HAPD からの信号読み出しと信号処理を行う。Merger board(MB) は複数台の FEB から情報を統合し、Belle II データ収集 (DAQ) システムに送信する役割を担う。これらの読み出し回路は集積回路 (IC) を用いた高集積化によって、限られた設置空間での読み出しを可能にした。図 3.17 に FEB と MB を用いた ARICH 読み出しシステムの概念図を示す。

また、HAPD は 144ch のピクセル検出器であり、ARICH 全体では 420 台を使用するため、総チャンネル数は約 6 万チャンネルに上る。したがって、多チャンネルでの同時信号処理及び読み出しが必要となる。さらに、1 光子検出効率を向上させるために高利得・低雑音な増幅機能も求められる。

以下では Front-end Board、Merger Board の詳細について述べる。

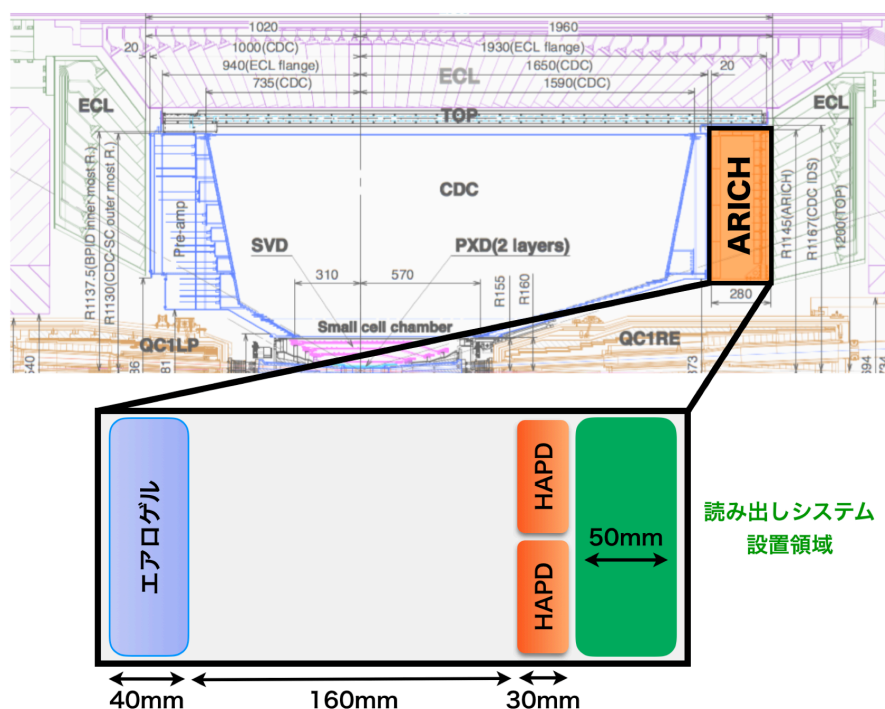


図 3.16 Belle II 測定器の断面図と ARICH 内部の設置領域。読み出しシステムは約 50 mm の領域に収めなければならない。

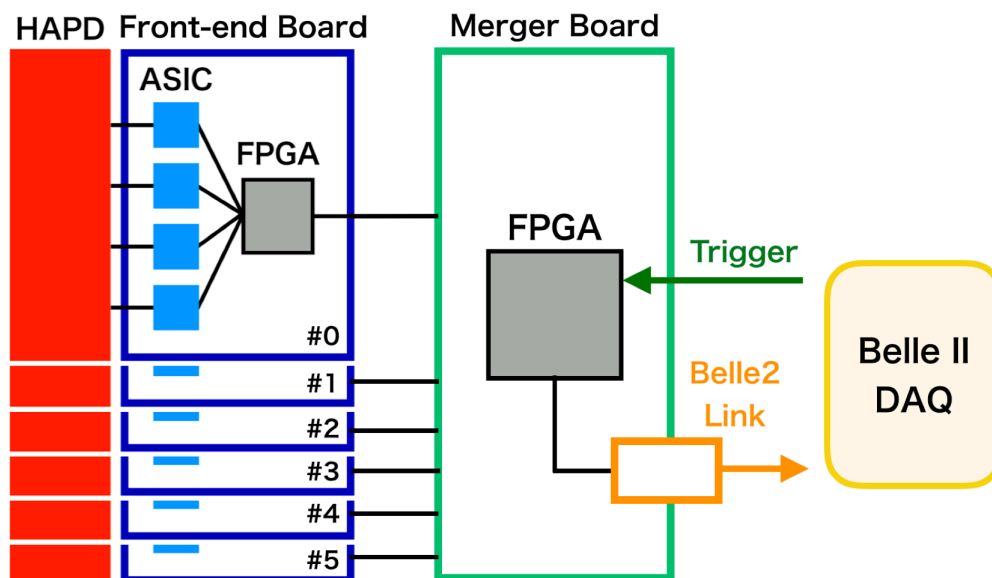


図 3.17 ARICH データ読出しシステム図

Front-end board

リングイメージの生成において重要なのはピクセル毎での光子のヒットの有無である。したがって、波高値などのアナログ情報は必要なく、ARICH 用読み出し回路の動作としては光子のヒットの有無という bit 情報のみで良い。よって、Front-end Board での主な動作は HAPD からのアナログ信号をデジタル信号に変換するというものである。Front-end Board 内部の電子回路の構成を図 3.18 に示す。Front-end Board は主にアナログ信号処理を行う SA03 という専用 ASIC (Application Specific Integrated Circuit) とデジタル信号処理を行う FPGA(Field Programmable gate array) で構成されている。

ASIC は汎用 IC を組み合わせたような回路と異なり、個別に設計を行ない 1 つの IC とすることで高集積化が可能となり、高速動作に適している。ARICH では専用 ASIC として SA シリーズの開発が行われ、最終版である “SA03” は量産・性能評価がともに完了している。SA03 では HAPD からの微弱な信号に対して、増幅器 (Amplifier) での増幅、波形整形器 (Shaper) での Shaping time(波形整形時間) の調整を行う。その後、比較器 (Comparator) を通る際に、設定した閾値電圧よりも波高値が大きい信号を光子信号と判断し、デジタル信号として出力する。SA03 から出力されたデジタル信号は FPGA のシフトレジスタに保持され、外部トリガー入力と同期して後段に出力されるようになっている。SA03 を使用する上で重要な機能としてオフセット調節機能がある。SA03 では全チャンネル共通の閾値電圧 V_{th} が供給される。したがって個体差によって増幅率や雑音性能が揃っていないと光子信号の判断に差が出てしまうことになる。これを補正するために各チャンネルごとにオフセットを調節することで信号検出率を揃える操作が必要となる。より精密な検出率の調整のためオフセットは粗調節・微調節がそれぞれ 16 段階の計 256

段階で調節が可能である。

FPGA はプログラム可能な論理回路デバイス IC の一種であり、ハードウェア記述言語 (HDL) によって自由に回路を書き換えることが可能である。シフトレジスタは 8 クロック分のヒット情報を保持可能で、トリガーの入力ごとに最初の 4 クロック分のデータが 4bit のデジタル信号として MB へと送信される。また、FPGA では ASIC の各種パラメータの設定も担っている。図 3.19 に Front-end Board の外観を示す。

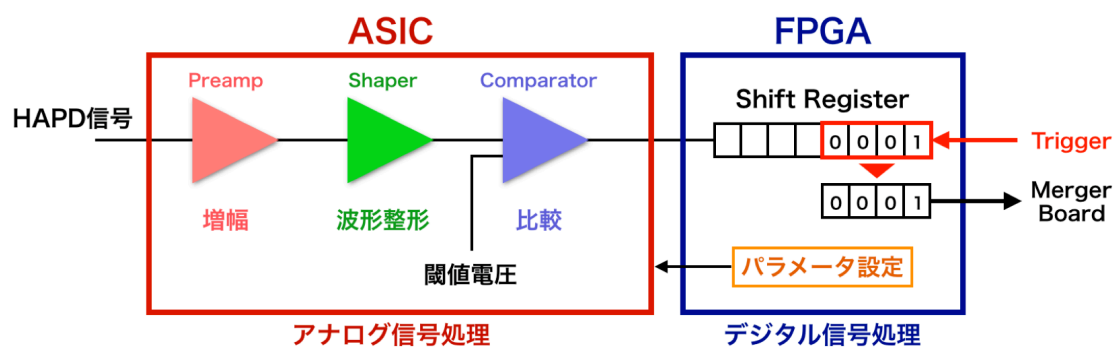
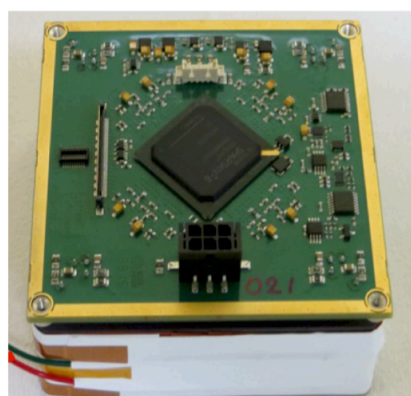
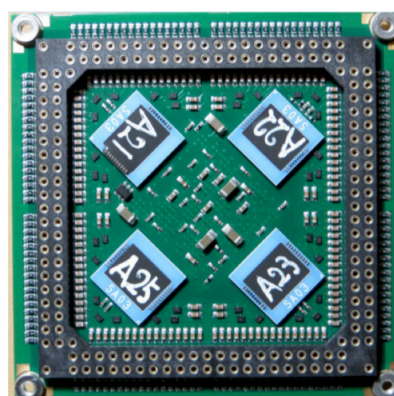


図 3.18 Front-end Board 内部の電子回路の構成



(a) 信号読み出し側



(b) HAPDピンコネクタ側

図 3.19 Front-end board の外観図。(a) は Front-end Board と HAPD を接続した様子。(b) は HAPD 接続面。4 つの ASIC(SA03) が搭載されている様子。

ASIC(SA03) の信号処理

SA03 からのデジタル信号から入力信号の波高値やノイズ量などアナログ量を算出するための測定とその解析方法について解説する。SA03 からの出力は 2 値のデジタル信号であるため直接アナログ波高値などの情報を得ることはできないが、比較器の閾値電圧とその時の計数率 (あるいはヒット率) の変化から間接的にアナログ情報を得ることができる。この測定方法を “Threshold

scan”と呼ぶ。

図 3.20 に Threshold scan の概念図を示す。図 3.20 左側の波形は比較機への入力アナログ信号で時間 (軸横) に対する波高電圧 (縦軸) の変化を示す。図 3.20 右側の波形はその入力に対応した比較器の出力デジタル信号で閾値電圧 (縦軸) を変化させたときの検出イベント数 (あるいはヒット率) を示している。同図 (a) は入力信号が無いノイズのみを測定したときの結果である。ノイズの波高分布は Gauss 分布に従うと仮定して、ヒストグラムのピークを以下の Gauss 関数

$$\frac{N}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.4)$$

で近似する。この Gauss 分布の標準偏差 σ をノイズの波高値と定義し、中心値 μ がそのチャンネルのオフセット電圧を表す。

同図 (b) はテストパルス入力時のような理想的な入力信号に対する Threshold scan の結果である。ノイズがほとんど無く理想的なパルスが入力された場合、Threshold scan 分布は図のように矩形型となる。 V_{th} の低い方の縁がオフセット電圧に、高い方の縁がパルスの最大値に対応している。つまり 2 つの縁の差を求めることでアナログ信号の波高値を得ることができる。この矩形を近似するには誤差関数

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (3.5)$$

と相補誤差関数

$$\text{erfc}(x) = 1 - \text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt \quad (3.6)$$

を使用する。また式 (3.6) は近似させる場所によって以下のように使い分ける。

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{V_{th} - \mu_{sig}}{\sqrt{2}\sigma_{sig}}\right) &: (\text{upperside}) \\ \frac{1}{2} \text{erfc}\left(-\frac{V_{th} - \mu_{ofs}}{\sqrt{2}\sigma_{ofs}}\right) &: (\text{lowerside}) \end{aligned} \quad (3.7)$$

ここで V_{th} は誤差関数の変数としての閾値電圧である。また図 3.20(a) で定義した σ と μ が出て来るが、これは 2 つの誤差関数それぞれの中心 (μ_{sig} は入力波形の最大値、 μ_{ofs} はオフセット電圧に対応) と標準偏差に対応している。これら 2 つの誤差関数の中心値の差 $\mu_{sig} - \mu_{ofs}$ が出力信号の波高値に相当する。

同図 (c) は HAPD が平均 1 光子程度の光を検出した時の Threshold scan の結果である。実際の光検出時の入出力信号は図 3.20 の (a) と (b) を足し合わせたような光子信号と雑音成分の合成波形となる。Threshold scan 分布の一番高いピークがノイズピーク、その上にある広い階段状の部分が 1 光電子パルスに相当するので、(b) と同様の解析をして $\mu_1 - \mu_0$ が 1 光電子信号によるアナログ信号波高値となる。1 光電子パルスより高い領域に分布が続いているのは、1 光電子パルスにのっているノイズによる傾斜と 2 光電子パルスが検出されるためである。

このように Threshold scan を用いることによって HAPD からのアナログ信号の情報を間接的に取得することができ、後述するモニターシステムでの各種測定に利用した。

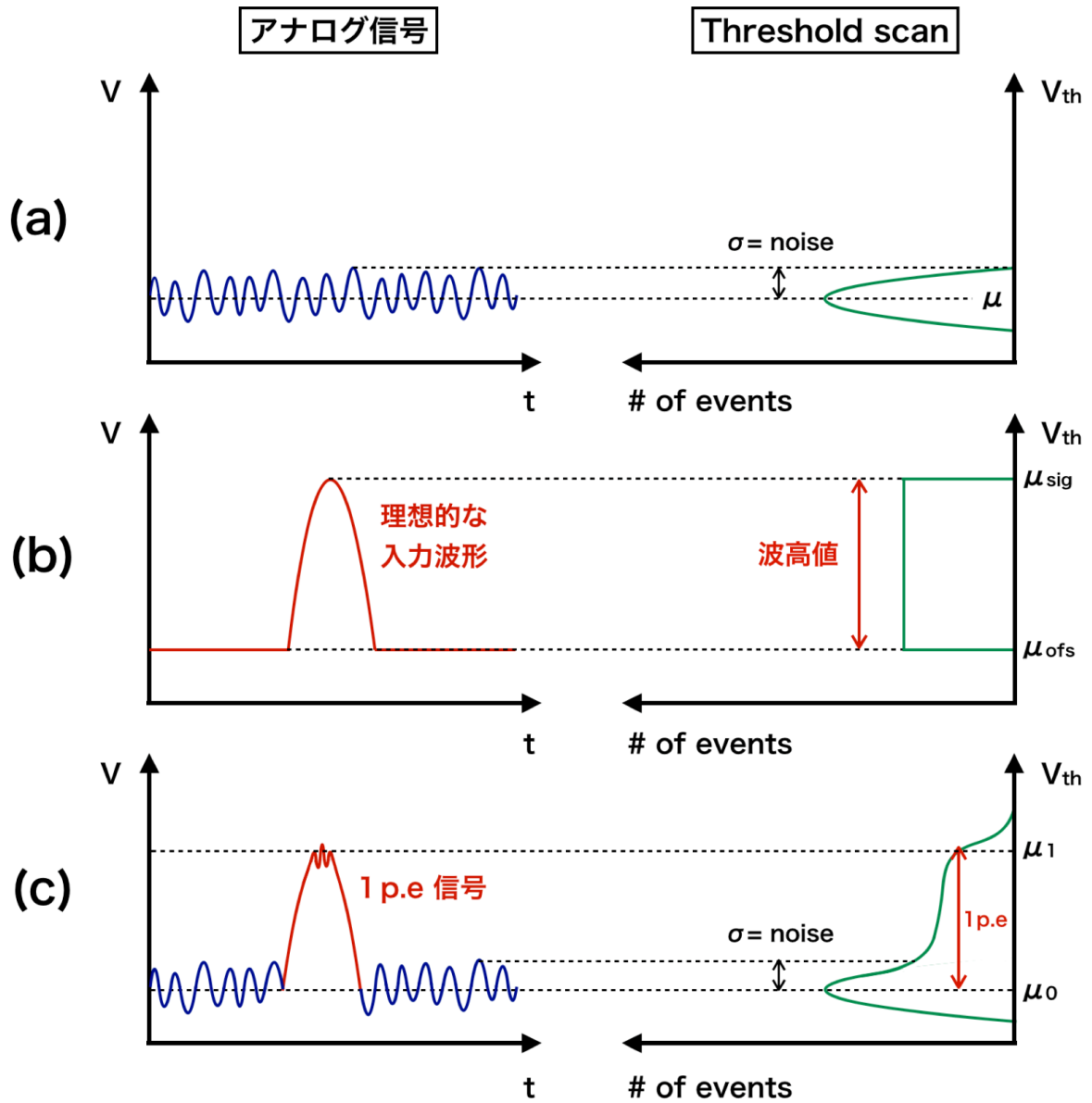


図 3.20 比較器に入力されるアナログ信号と Threshold scan の結果。(a) はノイズのみを測定した時の結果。(b) が理想的な波形を与えたときに予想される結果。(c) が HAPD からの出力波形を測定した時の結果。

第 4 章

ARICH モニターシステムの開発

ARICH では LED 光を光ファイバーによって検出器内部に導入・照射し、エアロゲルで散乱された光を観測することで光検出器の動作をモニタリングを導入する。

この章では、ARICH 用モニターシステムの概要について述べた後、構成要素と光ファイバーの性能評価、また試作機を用いたモニターシステムの性能評価試験について報告する。

4.1 モニターシステムの概要

前章で述べたように ARICH が設置される Endcap 部は放射線量が高く、HAPD は特に中性子による損傷が考えられる。中性子損傷への対策は図られているものの、HAPD チャンネルの故障や増幅率の変動といった影響を受ける可能性がある。ARICH は HAPD チャンネルのヒット位置からリングイメージを生成するため、高い粒子識別性能を保つ上では各チャンネル毎の定期的な動作確認が不可欠となる。モニターシステムは Belle II 実験の各時期で以下のような役割を担う。

Belle II 実験開始時期

ビームデータを用いた性能確認が困難であるため、組み上げたシステムの健全性の確認用に使用。

Belle II 実験安定期

故障チャンネル情報の取得。

各チャンネルからの出力変化時のキャリブレーション用光源として使用。

ARICH モニターシステムは本来の荷電粒子起源の Cherenkov 光の放出検出を妨げず、その上でモニターシステムのための空間を追加する必要がない設計が求められる。また、全 HAPD を同時にモニタリングが行えるよう、ARICH 内部に 1 光子レベルの微弱光が一様に行き渡るような光拡散システムが求められる。そこで、これらの課題を解決するモニター方法として Belle 実験 ACC のモニターシステムを一部踏襲した以下のような方法を採用した。

ARICH モニターシステムの概念図を 4.1 に示す。ARICH は HAPD の正面にエアロゲルタイ尔が敷き詰められているため光ファイバーの設置ができず、直接モニター光を照射することが困難である。そのため、ARICH では LED 光を光ファイバーを用いて検出器内部に導入し、HAPD

の間からエアロゲルに向けて照射するという方法をとる。エアロゲル表面または内部で散乱された光を HAPD で観測することで、その応答から HAPD をモニタリングする。

ARICH 全体を 60° ごとに分割して HAPD 70 台ごとに便宜的に区切った領域を“セクター”と呼ぶ (図 4.2)。モニターシステム用光ファイバーはセクターあたり最大 15 本設置可能であり、各光ファイバー設置位置の間隔は約 15 cm である。このような設置可能な位置に対して最適な設置位置・本数を検証することが本研究の課題の一つである。

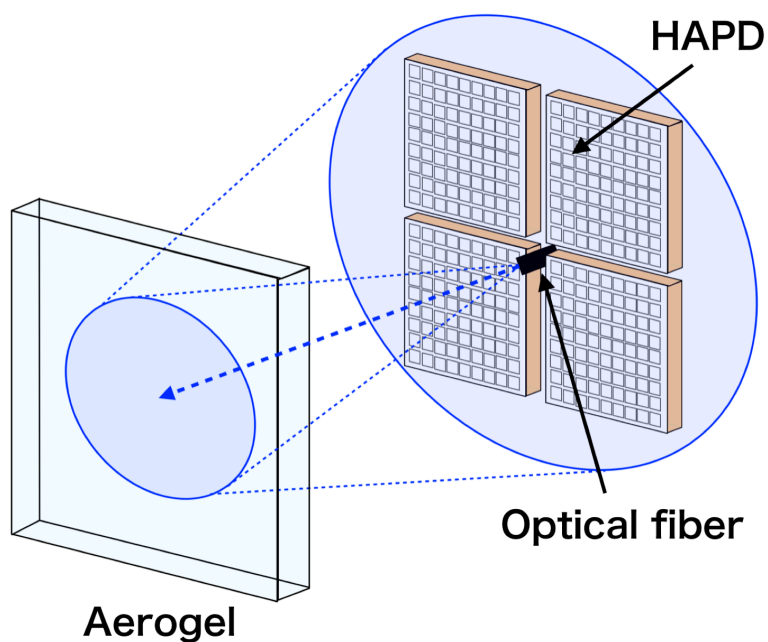


図 4.1 モニターシステムの概念図。光ファイバーから LED 光を照射し、エアロゲルで散乱された光を利用して検出器のモニタリングを行う。

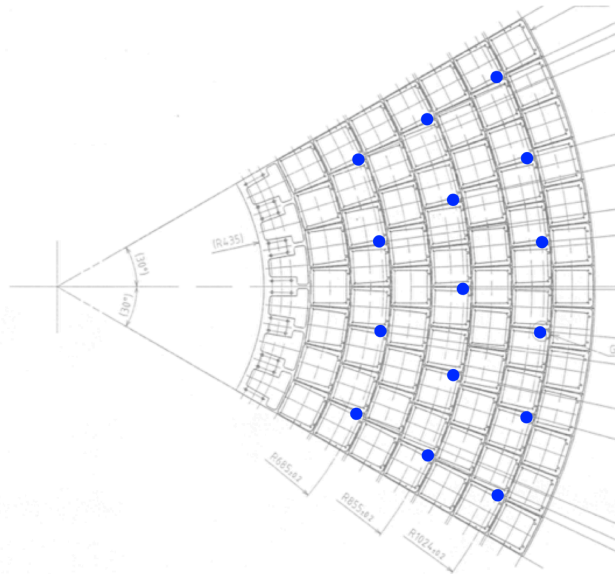


図 4.2 モニターシステム用光ファイバーの設置可能位置。1 セクターにつき 15 箇所の設置位置が設けられている。

モニターシステム用光ファイバー

光ファイバーの外観の様子を図 4.3 に示す。モニターシステム用光ファイバーバンドル (フジクラ社製) は計 22 本の分岐ファイバーから成る。また、22 本の分岐ファイバーは 4 種類の長さに分かれており、約 50 cm が 5 本、約 80 cm が 6 本、約 110 cm が 5 本、140 cm が 6 本となっている。ここで同じ長さの光ファイバーのまとまりを“ブランチ”と呼ぶ。また、これらは No1~No22 の番号が振られており、No1~5 が 50cm のブランチ、No6~11 が 80cm のブランチ、No12~16 が 110cm のブランチ、No17~22 が 140cm のブランチである。ARICH 1 セクターにつき 1 セットのバンドルを使用し、ARICH 全体で 6 セットを使用する。

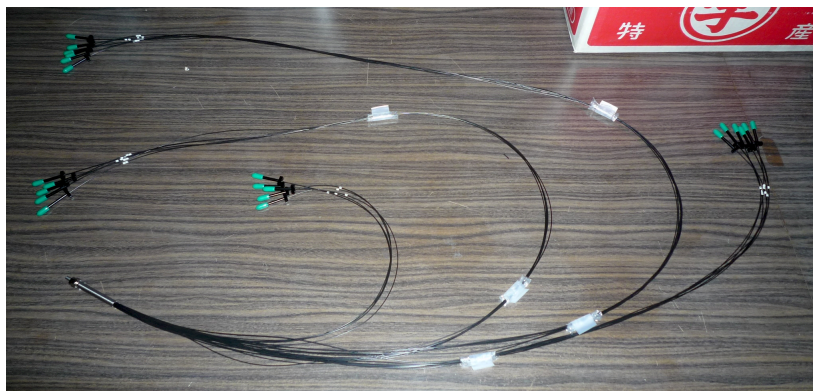


図 4.3 モニターシステム用光ファイバーの外観

図 4.4 に分岐ファイバー先端の様子を示す。分岐ファイバーの端末スリーブはアルミニウム製であり、表面を酸化アルミニウム皮膜で覆われている。また、分岐ファイバー先端には光を拡散させるためのレンズが装着されている。拡散レンズには開口数開口数 (Numerical Aperture : NA) と呼ばれるレンズの分解能を求めるための指数があり、この値が拡散角に関係している。NA は物体からレンズに入射する光線の光軸に対する最大角度を θ 、物体とレンズの間の媒質の屈折率を n (レンズの屈折率ではない) として $NA = n \sin \theta$ で表される。分岐ファイバーに装着されている拡散レンズは $NA=0.4$ に設計されており、物体とレンズの間の物質が空気 ($n = 1$) である場合 $NA0.4$ は拡散角にしておよそ 47° に相当する。

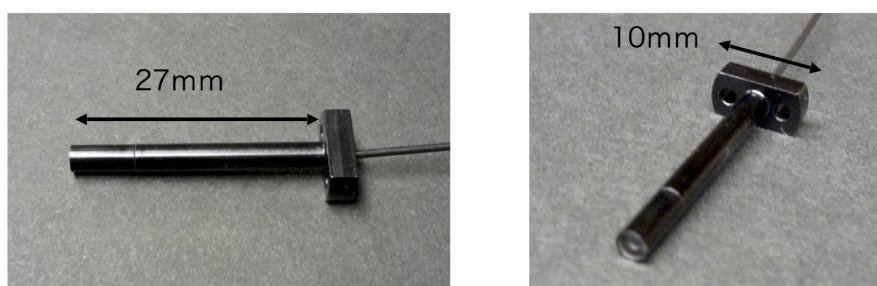


図 4.4 モニターシステム用光ファイバー先端

表 4.1 モニターシステム用光ファイバーの仕様 [30]

項目	構造及び特性
ファイバー種別	純粋石英コア (高 OH) ファイバー
コア径	$118 \pm 5 \mu\text{m}$
クラッド径	$125 \pm 5 \mu\text{m}$
開口数 (NA)	0.21 ± 0.02
一次被覆	エポキシ系樹脂
保護チューブ	ポリエチレン
チューブ外径	$0.9 \pm 0.1 \text{ mm}$
伝送損失	100 dB/km 以下 ($\lambda = 400 \text{ nm}$)
許容曲げ半径	R 40 mm

表 4.2 光ファイバーアセンブル品の仕様 [30]

項目	構造及び特性	
ファイバー心数	22 心	
集束側端末	905 SMA コネクタ付き	
分岐側端末	端末形状	レンズ付き端末スリーブ × 22 端末
	レンズ仕様	合成石英ガラスレンズ
	拡散角	約 47°
	レンズホルダ	ネジ (M2) 脱着式
耐熱温度	両端面：80 °C (その他：60 °C)	

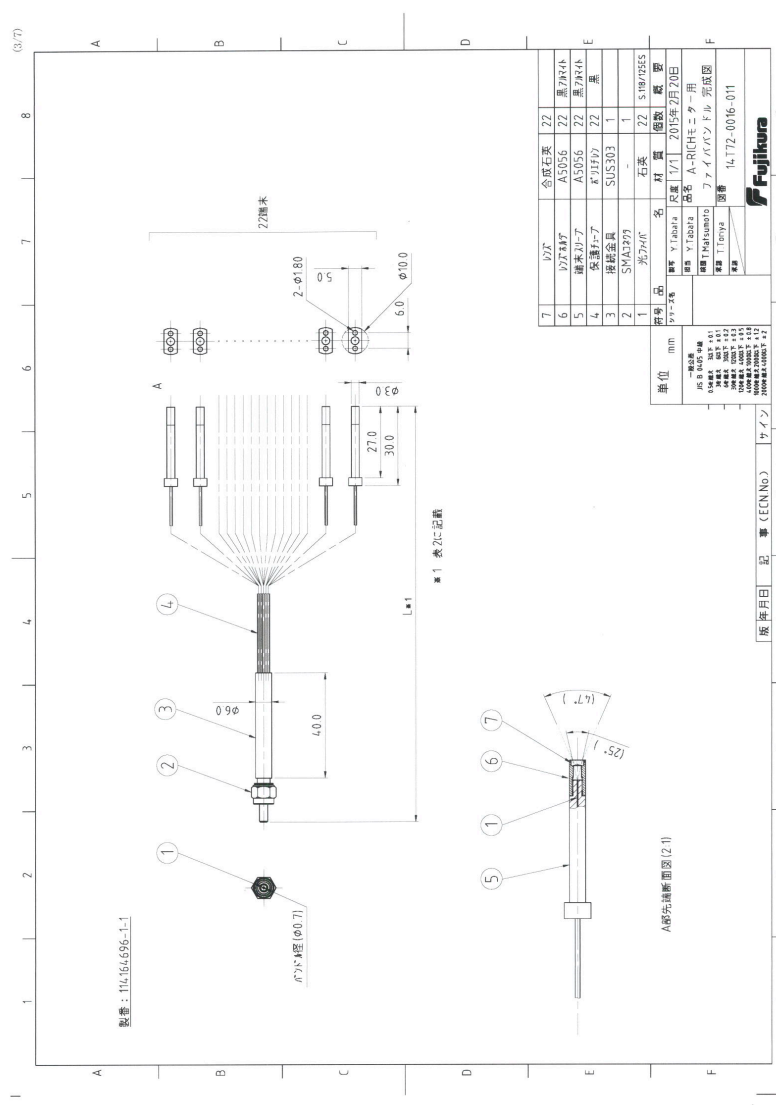


図 4.5 モニターシステム用光ファイバーバンドル設計図

LED 光源

ARICH モニターシステム用光源には温度・時間的な安定性が高い LED(Light Emitting Diode) 光源を使用する。モニター光は HAPD の感度波長領域を考慮し、Cherernkov 光と同程度の波長を持つ光源が望ましく、また放出光の指向性が高いほど光ファイバーバンドルに入射する光量が大きいため効率的である。このような観点から、LED 光源には日亜化学工業(株)の NSPB300B(波長:470 nm)を採用した。図 4.6 に LED 光源を光らせた様子と放射光の発光スペクトルを示し、図 4.7 に相対光量の温度依存性と主波長の温度依存性を示す。

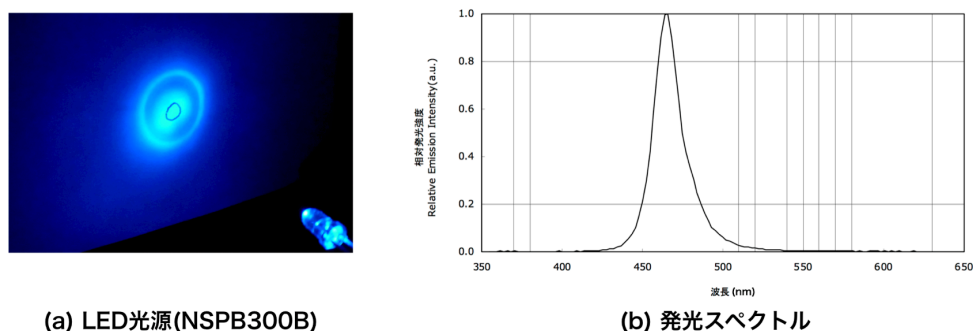


図 4.6 左図は LED 光源 (NSPB300B) 発光の様子。右図は放射光の発光スペクトル (周囲温度:25 °C, 電流:20mA) [31]。

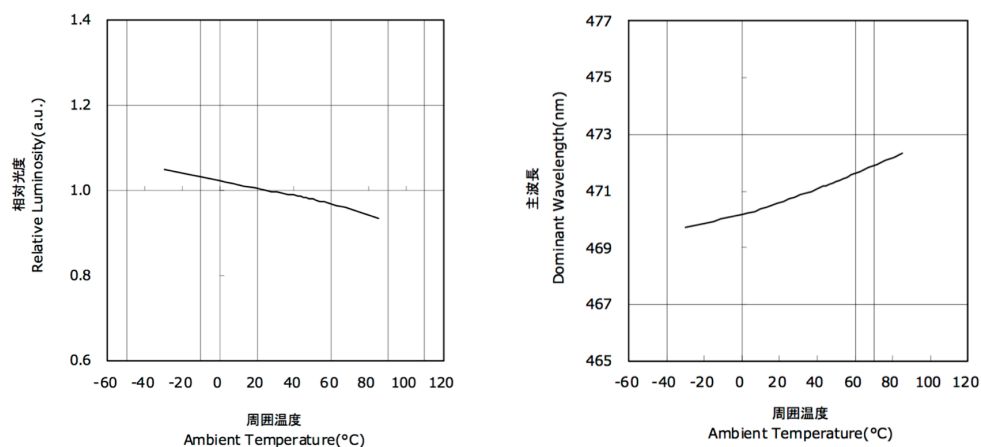


図 4.7 左図は相対光量の温度依存性、右図は主波長の温度依存性 [31]。いずれも動作電流 $I = 20 \text{ mA}$ の場合。

次に、LED 光源とバンドルの接続具について述べる。LED・光ファイバー取り付け器具の外観を図 4.8 に、設計図を図 4.9 に示す。筒状の接続具内に LED 光源を設置し、黒色 RTV シリコンゴムで固定した。SMA レセプタクル (905D-R181-001) を用いてバンドルと接続する。バンドルと同様に ARICH の 1 セクターにつき 1 個の接続具を使用し、ARICH 全体では 6 個を用いる。

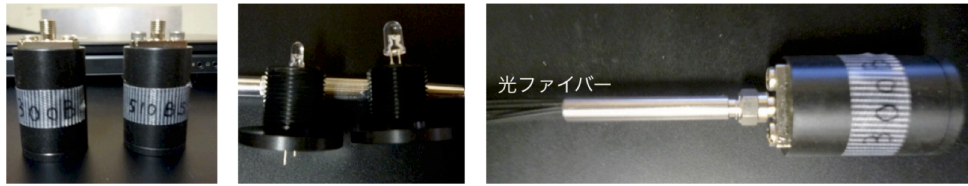


図 4.8 LED・光ファイバー接続具。左図は接続具の外観。中央図は接続具内部の LED 光源取り付け部。右図はバンドルと接続具を接続した時の様子。

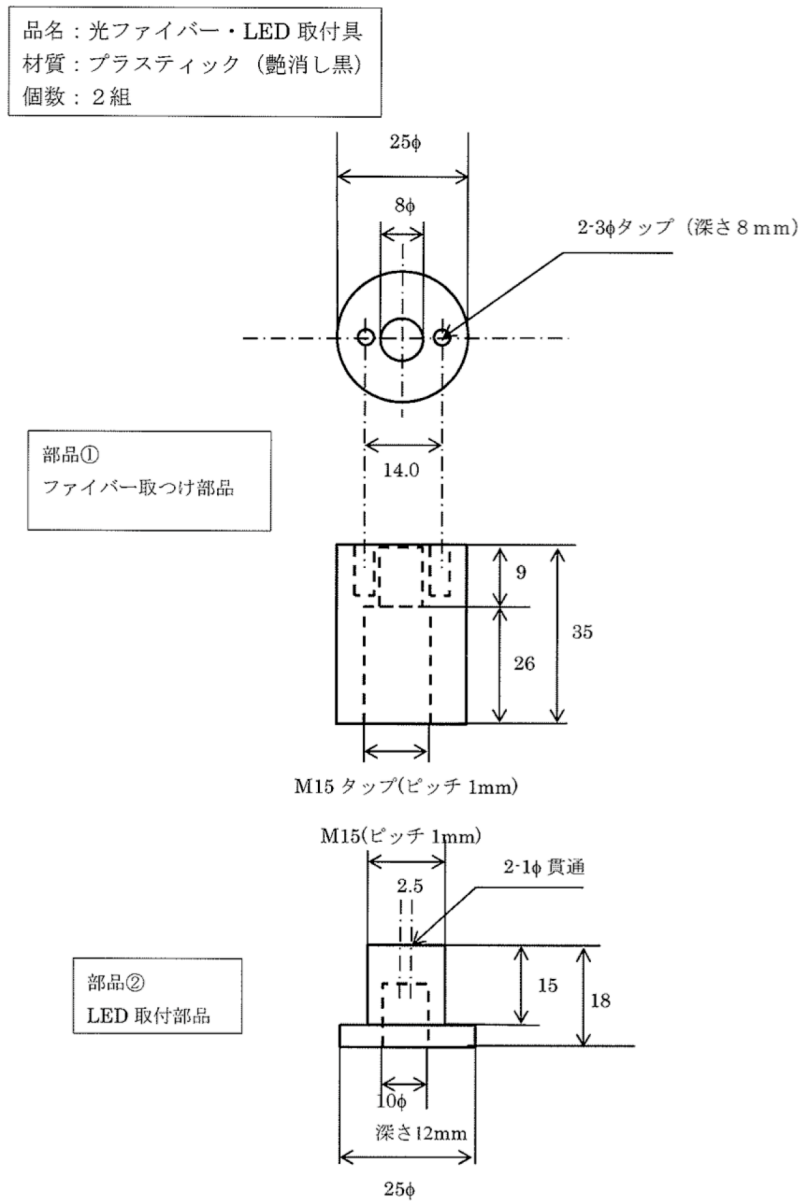


図 4.9 LED・光ファイバー接続具の設計図

LED ドライバーモジュール

LED 光源へのパルス信号は Belle ACC のモニターシステムで使用されていたドライバーモジュール (図 4.10) を使用する。このドライバーモジュールは NIM 規格^{*1}のモジュールであり、出力パルスの波高値 (Amplitude) と信号幅 (Width) は自由に調節可能であり、外部入力に同期してパルスを出力する。最大 6 本まで出力可能であり、1 台で 6 個の LED を光らせることができる。ARICH モニターシステムでは計 6 個の LED 光源を使用するため、この LED ドライバー 1 台で全 LED 光源を光らせることが可能である。波高値は 1.2 V ~ 7.5 V の範囲、信号幅は 20 ns ~ 100 ns の範囲で調節可能である。なお、LED ドライバーから信号が出力されている際には、モジュール上部の LED が点灯する。図 4.11 に LED ドライバーからの出力信号の様子を示す。



図 4.10 LED 光源用ドライバーモジュール

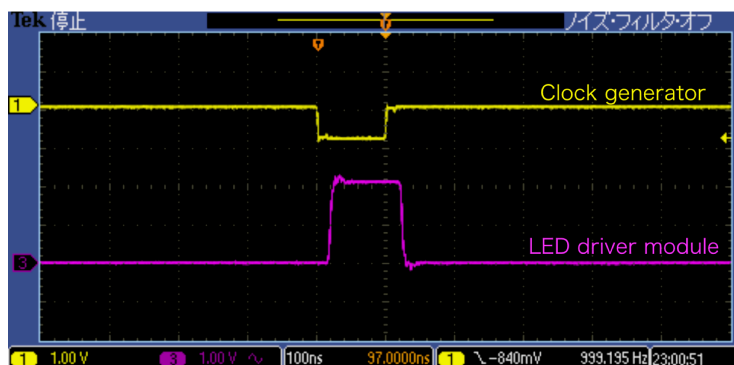


図 4.11 LED ドライバーモジュールの出力信号

^{*1} NIM規格: Nuclear Instrument Modules

4.2 モニターシステム構成要素の性能評価

次に、光ファイバーバンドルの性能評価の結果についてまとめる。光ファイバーバンドルは1つの入光口から22本に分岐しているため各分岐ファイバーごとに光のON/OFFを含めた光量調節を行うことができない。したがって、各分岐ファイバーからの出力光量に大きな差がないことが望ましい。また、分岐ファイバー端末部の拡散レンズの拡散角が要求を満たしているかの確認を行なった。光ファイバー先端には拡散レンズが装着されているが、その性能が要求を満たしているかの確認を行った。したがって、ARICH モニターシステム用光ファイバーバンドルに対する評価項目は以下の3点である。

- **光ファイバーの欠陥の有無**

- 各分岐ファイバーが正常に光を伝送すること

- **光量のばらつき**

- 平均からの光量差が $\pm 10\%$ 以内であること

- **開口数 (NA) が 0.4**

- 光拡散レンズの開口数 (NA) が 0.4 相当であること

これらについての評価結果を報告する。

4.2.1 光ファイバーごとの光量のばらつき評価

測定セットアップ

図 4.12 に測定セットアップの概略図、図に暗箱内のセットアップの様子を示す。分岐ファイバー 22 本全てを暗箱内に導入し、光電子増倍管 (Photo-Multiplier Tube : PMT) によって各ファイバーからの光強度を測定した。PMT は自動ステージの上に固定されており、暗箱を開閉することなく横移動できるようにした。また、LED 光源は暗箱の外に配置しており、光ファイバー・LED 接続具を用いてバンドルに LED 光を導入している。各分岐ファイバーは暗箱内に設置した固定板に横一列に設置しており、各ファイバーの間隔は 1cm に統一した。PMT の光電面に $\phi 1$ cm の穴の空いたマスクをすることで、両隣の光ファイバーからの光を遮断している。このような方法を取ったのは、一度の設置で全光ファイバーを測定できるようにすることにより、暗箱の開閉によるノイズや光ファイバーの設置精度のむらを低減するためである。

PMT からの出力信号はアナログ信号であるので、デジタル-アナログ変換器 (Analog-to-Digital Converter : ADC) によってデータ取得を行った。LED 光源への入力電圧はパルス信号としてファンクションジェネレータで生成し、パルス信号と同期した TTL 信号を Level adaptor モジュールで NIM 信号に変化したものをトリガー信号として使用した。本測定では波高値 +1.5 V の矩形パルスを 1 kHz で LED 光源に送り、発光させた。

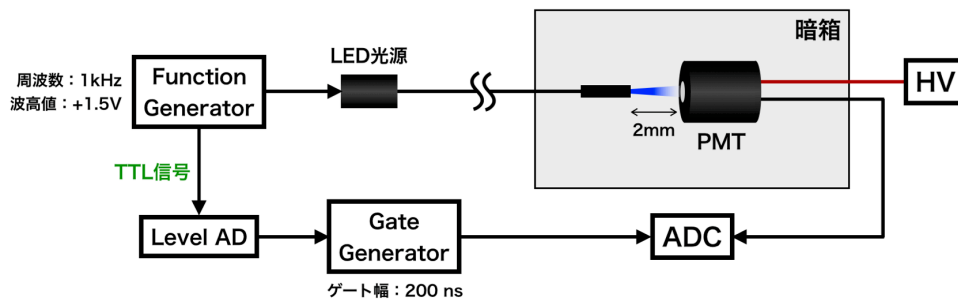


図 4.12 光ファイバー毎の光量のばらつき測定セットアップの概念図

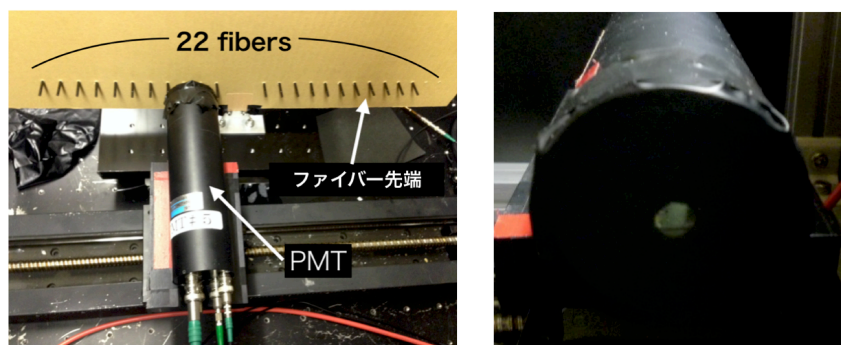


図 4.13 左図は暗箱内のセットアップ。22本の光ファイバーを一行に並べ、各ファイバーからの光を自動ステージ上の PMT によってそれぞれ測定。右図は使用した PMT の受光窓。φ1cm のマスクを被せている。

測定結果

測定によって得られた ADC 値の分布を Gauss 関数でフィッティングを行った。その結果得られる平均値を比較することによって各分岐ファイバーからの光量ばらつきを評価した。図 4.14 に光ファイバーバンドル 6 セットについての測定結果を示す。

全 22 本の分岐ファイバーそれぞれの測定値をプロットし、青い領域は 22 本の平均値から $\pm 10\%$ の範囲を表している。全ての光ファイバーに関して、光が照射が無い等の欠陥は見られなかった。中には平均値から 10% を超えるズレがある端末も見られるが、6 セットの光ファイバーバンドル全てにおいて、少なくとも ARICH で使用する 15 本以上の光ファイバーが平均値から $\pm 10\%$ 以下のばらつきであることが確認できた。光量のばらつきの原因としては、(1) 測定ごとの光源自体の光量のふらつき、(2) LED 光源からの光強度のむら、(3) 各ファイバーの設置精度のばらつきが考えられる。また、光ファイバーバンドル間での平均値の差についても、光源自体の光量のふらつきや LED・光ファイバー取り付け具での設置精度のむらが原因であると考えられる。

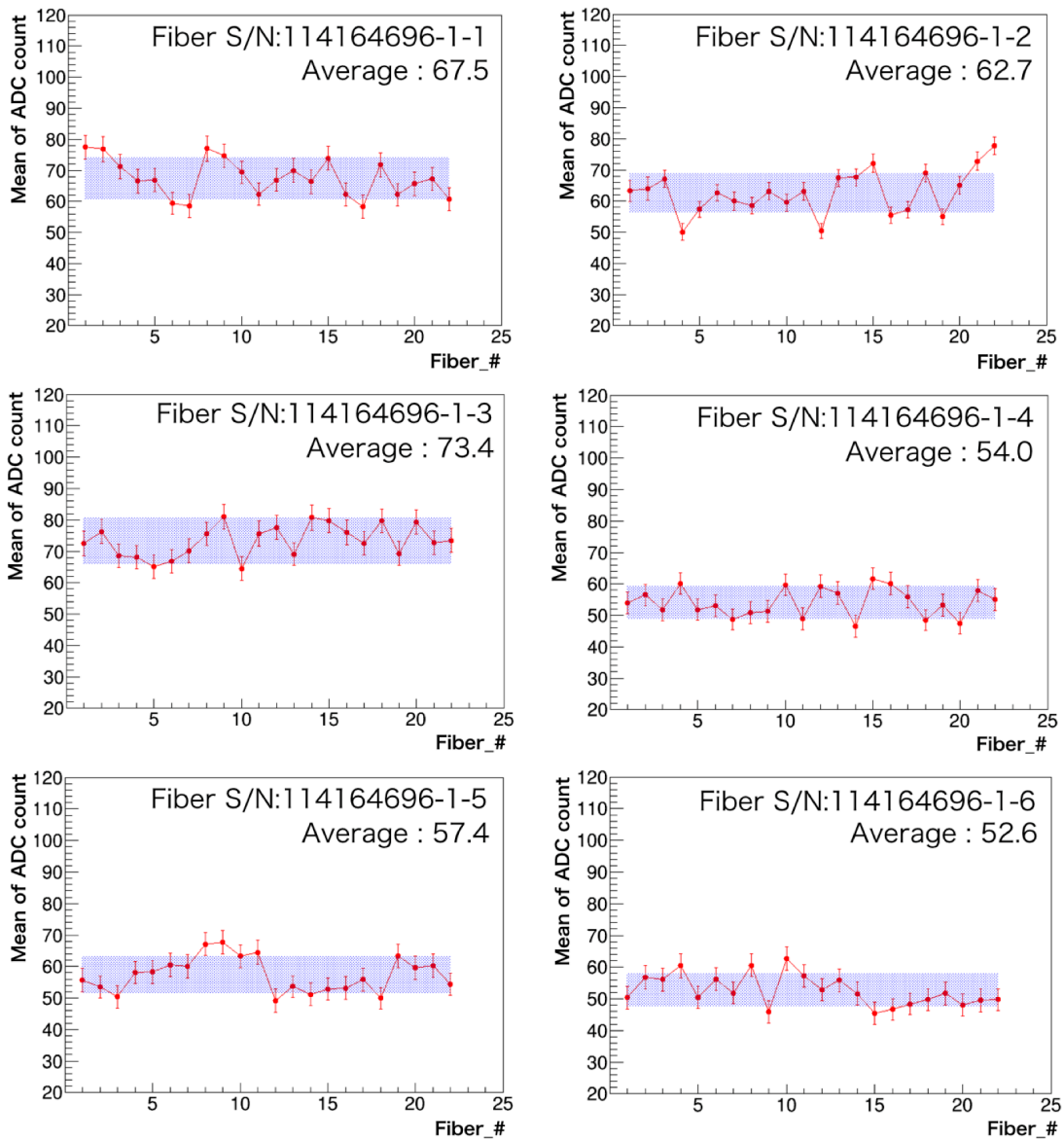


図 4.14 光ファイバーバンドルごとでの光量のばらつき測定結果。青い領域は各光ファイバーの光量の平均値から $\pm 10\%$ の範囲を表している。

4.2.2 光拡散レンズの拡散角測定

測定セットアップ

図 4.15 に拡散角測定時のセットアップの概要図を示す。LED 光を分岐ファイバーによって暗箱内に導入し、先端を PMT に向けて固定した。分岐ファイバーの正面 14cm の位置に PMT を設置し、この位置から 1 cm ずつ図 4.15 の X で示した方向に動かして各位置での光量を測定した。なお、PMT は光量のばらつき測定の時と同様に、自動ステージ上に固定されている。

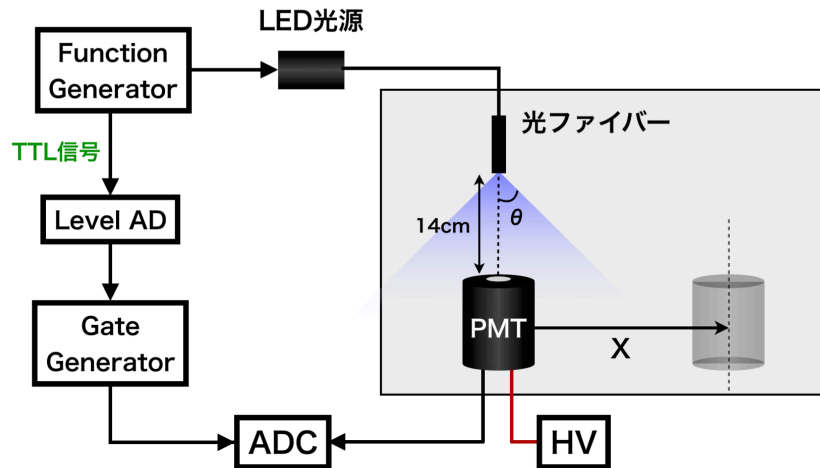


図 4.15 光拡散角測定セットアップの概要図。PMT を自動ステージによって移動し、その位置での光量を測定した。また、PMT の移動距離を X と定義している。

検出光電子数の算出方法

本試験では、各位置における PMT で光量の評価を行った。ADC で得られる情報はアナログ信号の波高値をデジタル値に変換したものであり、このデジタル値は光量に比例する。光量測定で得られた ADC 分布の例を図 4.16 に示す。光量測定で得られた ADC 分布が Gauss 分布で近似できると仮定してフィッティングを行ない、得られた平均値と標準偏差から検出光電子数を見積もる。以下に、検出光子数の算出式を示す。

$$N = 1.2 \times \left(\frac{\mu}{\sigma}\right)^2 \quad (4.1)$$

μ は Gauss 関数でのフィッティングによって得られる平均値、 σ は標準偏差である。また、1.2 は標準的な PMT の excess noise factor である。式 (5.1) を用いて、各測定位置での光電子数を見積もった。

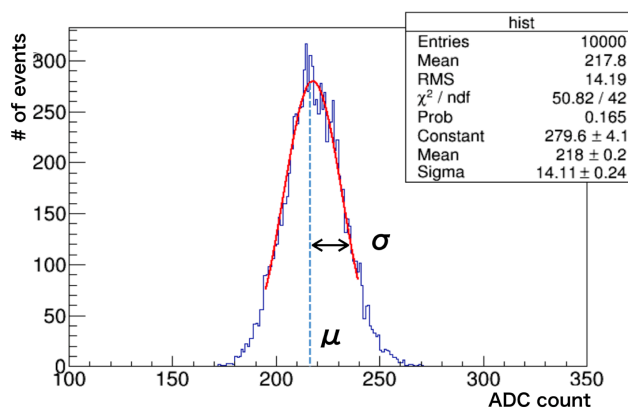


図 4.16 光量測定で得られる ADC 値分布の例

測定結果

測定結果を図 4.17 に示す。横軸を PMT の移動距離 X [cm]、縦軸を検出光電子数として光ファイバーからの放射光の位置分布を示している。約 5.5cm の距離まで光電子が検出できており、LED 光が到達していることを確認した。幾何学的な関係性より $X = 5.5$ cm の位置で拡散角 47° であり、これは $NA = 0.4$ に相当するため拡散レンズへの要求性能が満たされていることが確認できた。

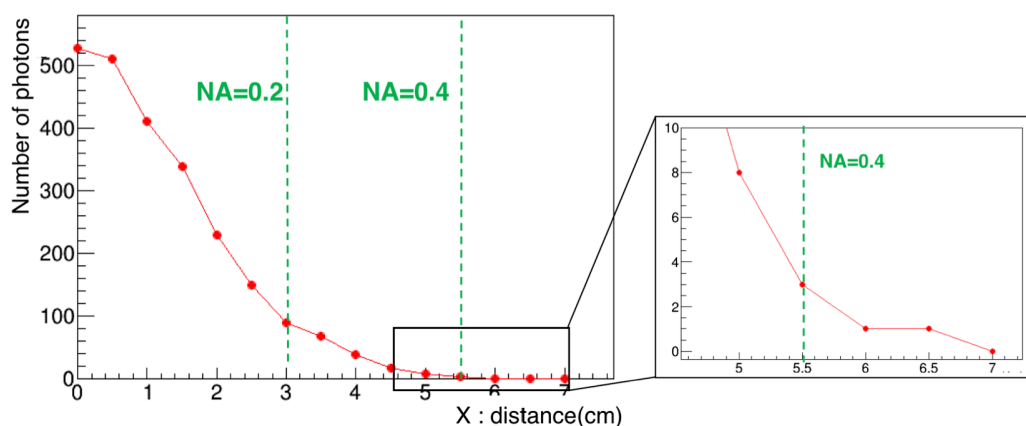


図 4.17 測定結果。緑破線で $NA=0.2$, $NA=0.4$ 相当となる位置を示した。

4.3 モニターシステムの原理検証

4.1 節で述べた ARICH モニターシステムの原理検証として ARICH モニターシステムの構造を模した試作機を制作し、照射したモニター光のエアロゲルでの散乱の有無の検証と散乱光の位置分布測定を行った。以下では測定セットアップの詳細について述べたのち、測定方法であるヒット率測定について解説する。その後、測定結果とそれに基づいた実用性について考察する。

4.3.1 測定方法とセットアップ

測定セットアップ

図 4.18 に散乱光測定に用いたセットアップの概要図、図 4.19 に測定に用いた暗箱内の様子を示す。HAPD を 1 台、シリカエアロゲルタイルを 1 セット、分岐ファイバーを 1 本を用いて、暗箱内に ARICH の構造を模したモニターシステムの試作機を作成し、測定を行った。エアロゲルタイルは $18\text{ cm} \times 18\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ サイズの屈折率の異なるエアロゲルを重ねた 2 層のものを使用した。エアロゲル 2 枚の屈折率は HAPD 側のものからそれぞれ 1.045 と 1.055 である。LED 光源は暗箱外部に配置し、分岐ファイバー 1 本を用いて暗箱内に LED 光を導入した。なお、LED 光源へのパルス信号はファンクションジェネレータによって生成しており、電圧やパルス幅を調

節することで光量を調整した。ファイバー先端は HAPD 光電面より 1 cm 下がった位置で、エアロゲルタイルの中心に向けて固定した。HAPD はエアロゲルから距離 16 cm の位置の自動ステージ上に固定しており、暗箱を開閉することなく移動させることができる。また、信号読み出しには SA03 を 1 つ搭載した 36ch が読み出せるテスト用読み出しボードを使用した。HAPD への電源 (Guard, Bias, HV) 供給には松定プレジジョン社の電源を使用し、電圧値などの各種値の設定及び電源制御は隣接する PC から行えるようになっている。

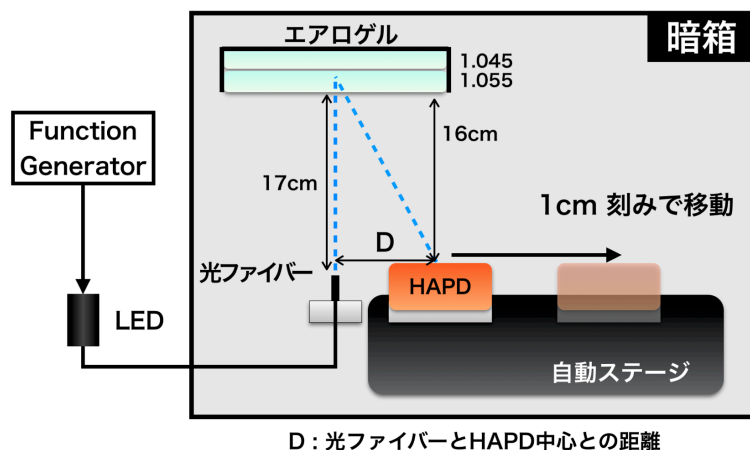


図 4.18 散乱光測定時のセットアップ概念図。光ファイバーと HAPD 中心との距離を D [cm] とした。

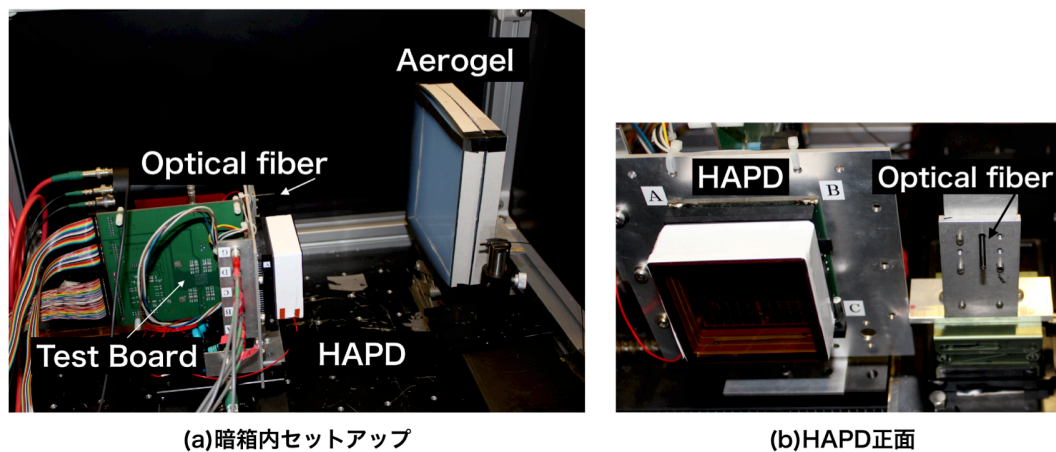


図 4.19 暗箱内の様子。(a) は HAPD 横からの様子、(b) は HAPD 正面 (エアロゲル側) から見た様子である。

なお、HAPD は APD1 チップ分の 36 チャンネルのみを使用しており、HAPD に各種電圧を印加した状態で各チャンネルのオフセットは調節している。HAPD と LED 光源は表 4.3 に示す条件に設定し、測定を行った。

表 4.3 測定時の HAPD と LED 光源の動作条件

HAPD	HV 電圧	-7 kV
	Bias 電圧	310 V
	Guard 電圧	175 V
LED	Amplitude	+3.0 V
	Frequency	1 kHz
	Duty	0.01 %

4.3.2 測定結果

散乱光の観測

図 4.20 に HAPD から得られた散乱光によるアナログ信号をオシロスコープで観測した様子を示す。青線がファンクションジェネレーターによって生成されたトリガー信号 (LED 光源へのパルス信号と同期した信号) を表しており、黄線がテスト用読み出しボードを通した HAPD からの出力アナログ信号である。図から分かるようにエアロゲルで散乱されたモニター光が HAPD で観測できることを確認した。図 4.20 は $D = 15 \text{ cm}$ (光ファイバーと HAPD 中心の距離) の時であり、HAPD のある 1 チャンネルの観測結果である。この条件では検出光子の大半が 1 光子であるが、2 光子信号も確認できる強度の散乱光量であることがわかる。

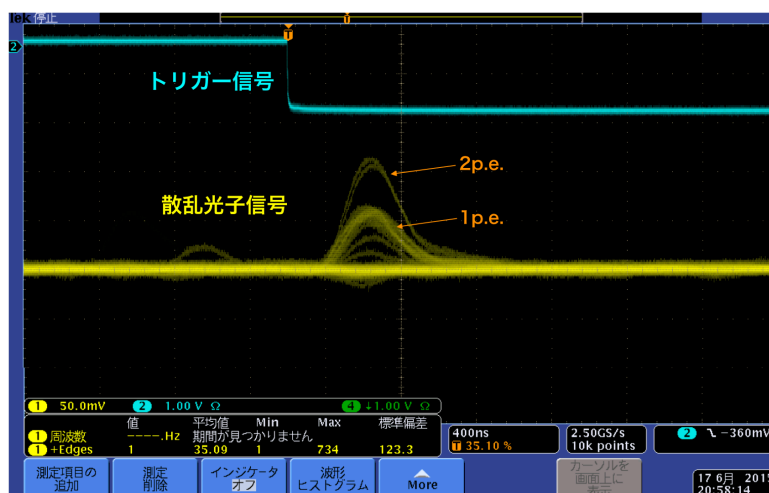


図 4.20 HAPD の 1 チャンネルからの散乱光による信号。青線がトリガー信号、黄色線が散乱光子による信号を示し、LED を発光させているトリガー信号に同期したタイミングで散乱光が検出できていることが確認できる

3.4.3 節で記述した Threshold scan を用いて、36 チャンネルを測定した結果を図 4.21 に示す。

横軸がSA03の全36チャンネル、縦軸が閾値電圧 V_{th} である。図 4.21(a) は LED 光源を発光させていないダークカウント、つまりノイズのみの信号である。各チャンネルのオフセットが一律に調節されていることが分かる。同図 (b) は LED 光源を光らせてエアロゲルでの散乱光を観測したものである。閾値電圧 V_{th} が 0.3 V の辺りまで伸びている信号がエアロゲルからの散乱光であり、およそ 1 光子検出信号にあたる。この情報から、ノイズを除いて散乱光子による信号のみを超える閾値電圧 V_{th} として同図の赤破線で示した 0.22 V を選択し、その後のヒット率測定を行った。

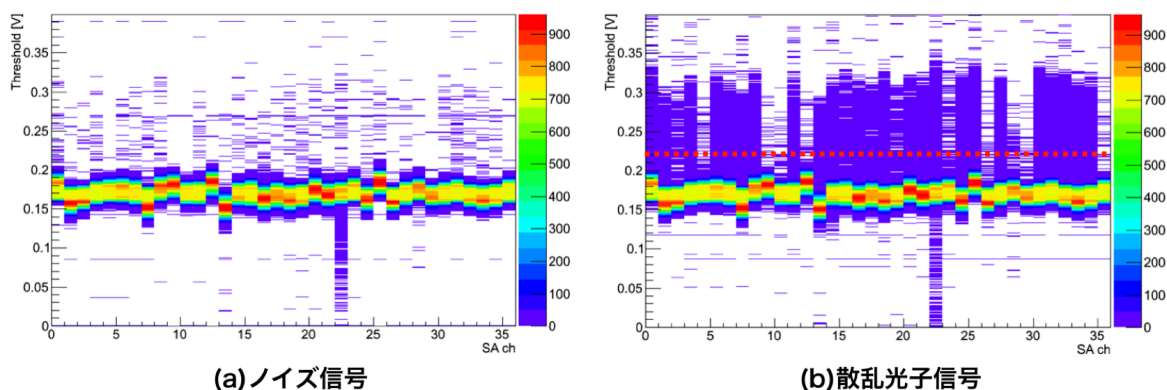


図 4.21 Thresholdscan 測定の結果。(a) 図が LED 光源を発光させていない状態。(b) 図が LED 光源を発光させ、エアロゲルからの散乱光子を検出した際の結果。赤破線はヒット率測定で選択した閾値電圧を示している。

散乱光の位置分布測定

自動ステージによって HAPD を移動させ、その都度ヒット率を測定することで散乱光量の位置依存性を調べた。閾値電圧は前述の通り 0.22 V に設定し、トリガー数は各測定点ごとに 10000 トリガーである。ヒット率 R_{hit} は、閾値電圧を超えたイベント数 N_{eve} とトリガー数 (発光回数) N_{trig} を用いて以下のように定義した。

$$R_{hit} = \frac{N_{eve}}{N_{trig}} \quad (4.2)$$

図 4.22 に $D = 10$ cm の位置での測定結果を示し、HAPD を 3 cm 毎に移動させた時の位置ごとの測定結果を図 4.23 に示す。ヒット率 R_{hit} を各 HAPD チャンネルの配置に対応した 2 次元ヒストグラムによって表示した。

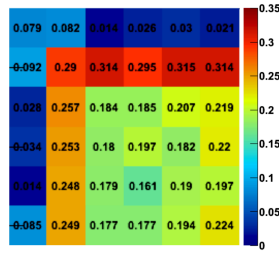


図 4.22 D = 10 cm の位置での Hitmap 図。全 36ch について閾値電圧 V_{th} を 0.22 V に設定。

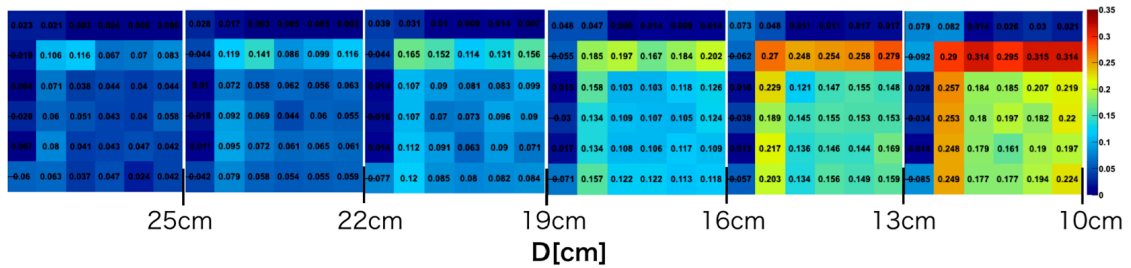


図 4.23 各位置での Hitmap 図。HAPD を移動させることで散乱光の位置分布を測定。

図 4.22 では HAPD 外側のチャンネルのヒット率が低く、その 1 列内側のチャンネルのヒット率が高いことが見て取れる。これは磁場が無い環境下で測定を行ったことによる HAPD 側管での電場の歪みの影響によるものである。その概略図を図 4.24 に示す。

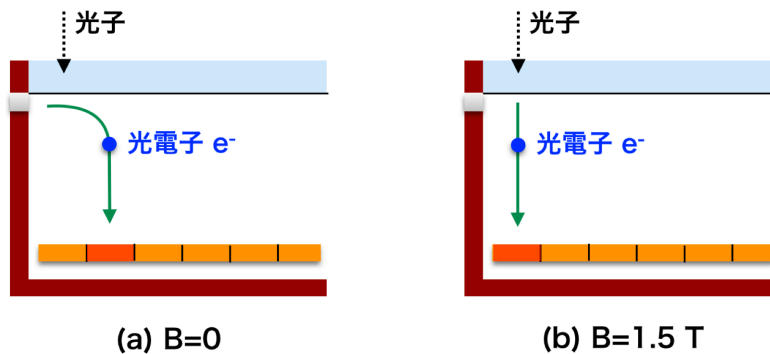


図 4.24 HAPD 断面図。(a) 磁場なし環境下での光電子の振る舞い、(b) 磁場中での動作の様子。

HAPD は光子入射窓とセラミック製の側管を接合するために金属を用いているため、光電面に HV 電圧を印加すると金属部分にも高電圧が印加されてしまう。その結果、図 4.24(a) に示すように側管付近の電場に歪みが生じ、光電子がその電場に沿って加速されることにより本来より内側のピクセルに入射する場合がある。この現象によって HAPD 最外層チャンネルは特にこの影響を受けるため、入射光電子数が減少しヒット率が低く測定される。逆に、最外層から 2 列目のチャンネルは入射光電子数が増え、ヒット率が高くなる。この現象は ARICH を Belle II 測定器に

インストールした時には改善される。Belle II 測定器内では HAPD 内部の電場に対して垂直な磁場が掛かるため、光電面で発生した光電子は磁場に巻きついて垂直に加速される。KEK で行われた 1.5T の磁場中での動作試験においても正常に動作することが確認されている。

次に、HAPD を 1 cm 毎に移動させ、電場が安定したある 1 チャンネルのヒット率に注目することで散乱光分布を調べた結果を図 4.25 に示す。セットアップ上、最も光ファイバーに近接した $D = 4\text{cm}$ の位置から $D = 36\text{cm}$ の位置まで測定を行った。また、モニター光も全 HAPD チャンネルにおける検出光子数が約 1 光子となる光量に設定した。図から、散乱光分布は指数関数に従うように減少することがわかる。また、モニター光が $D = 35\text{cm}$ 付近まで散乱されることが確認でき、縦横の 4 方向に対して同様の光量分布であると推測できる。実機での光ファイバーの間隔は約 15 cm であるから、エアロゲルでの散乱によって十分な範囲に光を拡散させることが可能であると考えられる。

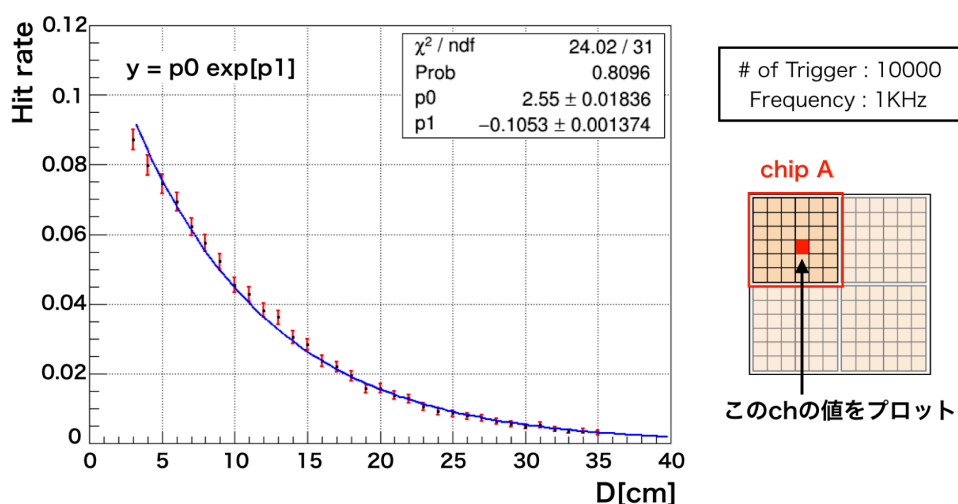


図 4.25 光量の位置依存性測定結果。電場の影響を受けにくい中央付近の 1 チャンネルに注目し、各位置でのヒット率をプロット。

SA03 パラメータの最適化

ここからは、SA03 パラメータ ($hdcycle$, $trgdelay$) についてモニターシステムへの最適化について述べる。3.4.3 節の図 3.18 で記述したように、読み出しシステムは外部トリガー入力によってデータ送信を行っており、データは 4bit のデジタル信号として出力される。この 1bit が持つ時間幅とデータ送信タイミングを調整するパラメータとして “ $hdcycle$ ” と “ $trgdelay$ ” が用意されている。 $hdcycle$ が time window の幅を調整するパラメータであり、 $hdcycle$ の値は時間幅が何クロック分に相当するかに対応している。 $trgdelay$ は FPGA のシフトレジスタに保持されたデジタル情報を後段へ出力するタイミングを指定するパラメータであり、外部トリガーに対して何クロック後に 4bit 分のデータを出力するかに対応している。また、 $hdcycle$ と $trgdelay$ は共に 32 段階で設定可能である。Cherenkov 光及びモニター光を観測する上では検出された光子信号に対し、これらのパラメータを適切に選択する必要がある。モニターシステムでは散乱光を観

測するため、通常の Cherenkov 光観測に比べて散乱の分、発光してから観測までの時間が長い。そこで、ASIC パラメータの中でも特にこの2つのパラメータに影響があると考え、モニターシステムにとっての最適な値を調べた。以下では、その測定方法と結果について報告する。

散乱光測定時と同様のセットアップを用いて、hdcycle・trgdelay をそれぞれ変化させた時のヒット率の変化から各パラメータの適切な値を調べた。測定結果を図 4.26 に示す。縦軸は hdcycle(1～32)、横軸は trgdelay(0～31) であり、ある 1 チャンネル (chip A, ch1) のヒット率を二次元ヒストグラムで示している。結果からヒット率に関しては hdcycle への依存性は少なく、trgdelay が大きく影響していることがわかる。hdcycle = 5 以上の範囲では trgdelay は 5～7 が適切と考えられ、モニターシステムとしては「hdcycle = 7, trgdelay = 6」という値を選定した。

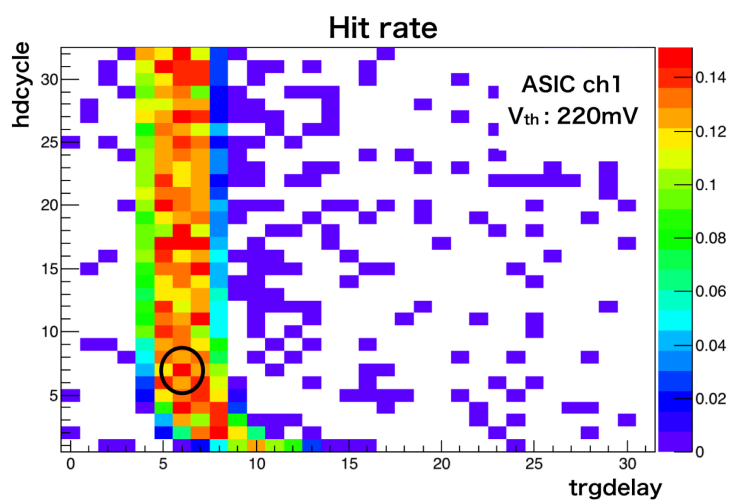


図 4.26 trgdelay と hdcycle とヒット率についての関係。モニターシステムでは、黒丸で囲った hdcycle = 7, trgdelay = 6 という値を選定した。

4.4 長期安定性測定

モニターシステム試作機を使用した長期的なモニタリング試験結果についてまとめる。ARICH のモニターシステムは1日数十分の動作確認やキャリブレーションに使用される予定であるため、HAPD 性能のモニター結果の再現性や安定性が求められる。そこで、HAPD の主な動作である各チャンネル毎のヒット率測定（チャンネルの生死）、ノイズレベル、増幅率の測定を Threshold scan を用いることで可能とした。さらに、それらの長期的なモニタリング試験を行い、モニターシステムの長期的安定性を評価した。

以下ではまず、本試験でのセットアップについて解説し、各項目の測定方法と長期モニタリング試験結果について解説する。

測定セットアップ

図 4.27 にセットアップの概要図を示す。セットアップの大部分は散乱光測定時と同様だが、本試験では実機を想定し、LED 光源へのパルス信号及びトリガー信号をドライバーモジュールから送った。ドライバーモジュールはパルス生成機能は搭載していないため、パルス生成はファンクションジェネレータで行い、信号幅・振幅を調整した後に出力している。また、ファンクションジェネレータは外部の制御用 PC と接続することでパルス信号の ON/OFF 切り替えや設定値の調整を遠隔で行うことが可能になっている。

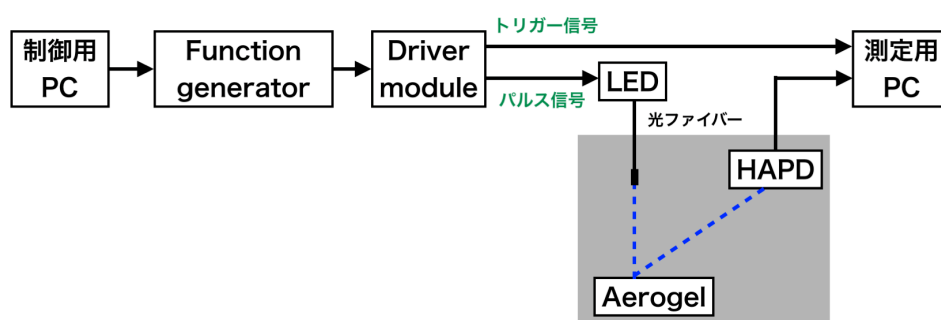


図 4.27 安定性測定時のセットアップの概要図

4.4.1 ヒット率測定

図 4.28 にモニター光がある状態での Threshold scan の結果を示す。 $N_{\text{trig}} = 10000$ 、 V_{th} は $0.12 \sim 0.36 \text{ V}$ の範囲で測定した。図 4.28(a) から測定に使用した全チャンネルで散乱光が検出されていることが確認できる。同図 (b) は SA03 の ch 1 の測定結果を縦軸を検出エンタリー数、横軸を閾値電圧 V_{th} として表したものである。ノイズ部分が高いピークとして見えており、なだらかな段状の部分が 1 光子信号に相当する。ヒット率は前述の測定と同様に式 (4.2) で表すトリガー数に対する閾値電圧を超えたイベント数の割合とする。検出イベント数 N_{eve} は図 4.28(b) 横軸

$V_{th} = 0.22 \text{ mV}$ におけるエン트리数に相当する。さらに、1時間ごとに Threshold scan を行うことでヒット率の時間変化を測定し、長期的な安定性の評価を行った。

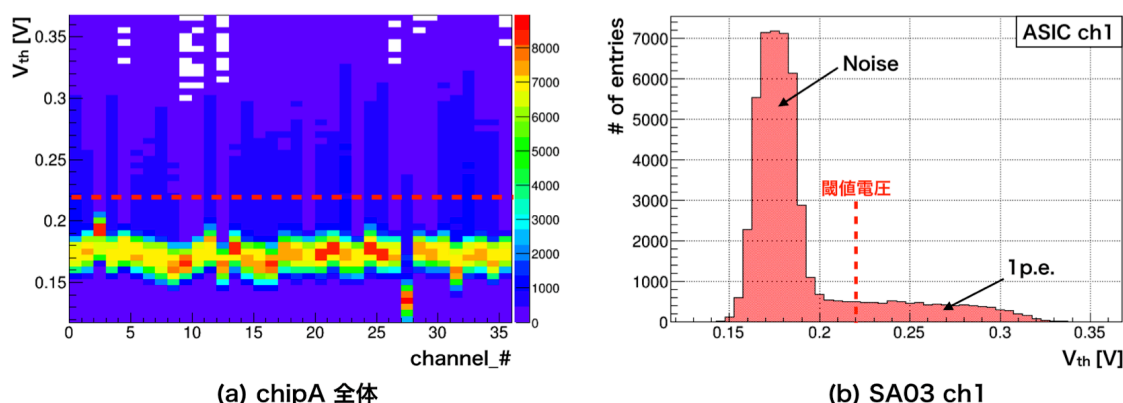


図 4.28 Threshold scan の結果。(a) SA03 1chip の全 36 チャンネルでの結果。赤破線で設定した閾値電圧を示す。ch 27 はオフセット調節が正常に行えていない不良チャンネル。(b) ch 1 のみの結果を表す。

図 4.29 に長期ヒット率測定の結果を示す。測定時間は 471 時間 (約 20 日間) であり、1時間ごとの測定結果をプロットしている。モニター光を導入していない状態ではヒット率 = 0.00 であるため、結果に示したヒット率は有意に散乱光子によるものであることを確認している。4.29 図 (a) よりヒット率の長期的な変動は見られず安定した結果を得た。同図 (b) はヒット率の分布を表している。中心値は 0.52 であり、 ± 0.1 程度のふらつきが見られる。これはモニター光量のふらつきや検出光子の統計的なふらつきが要因であると考えられるがチャンネルの生死判別を行う上では重大な変動ではなく、許容範囲内である。

また、図 4.30 は全チャンネルの測定結果をチャンネルの配置通りに表示したものである。青色の領域は HAPD の外側、橙色の領域が外側から 1 列内側のチャンネルである。前述したように磁場がない環境下での測定のため最外チャンネルにはヒットが少なく、1 つ内側のチャンネルではヒット率が高くなっていることがわかる。それ以外の電場が安定しているチャンネルではおおよそ等しく、安定した結果が得られた。これらの結果より、ヒット率の観測及び各チャンネルの生死判別が長期間に渡って同時に行えることが確認できた。

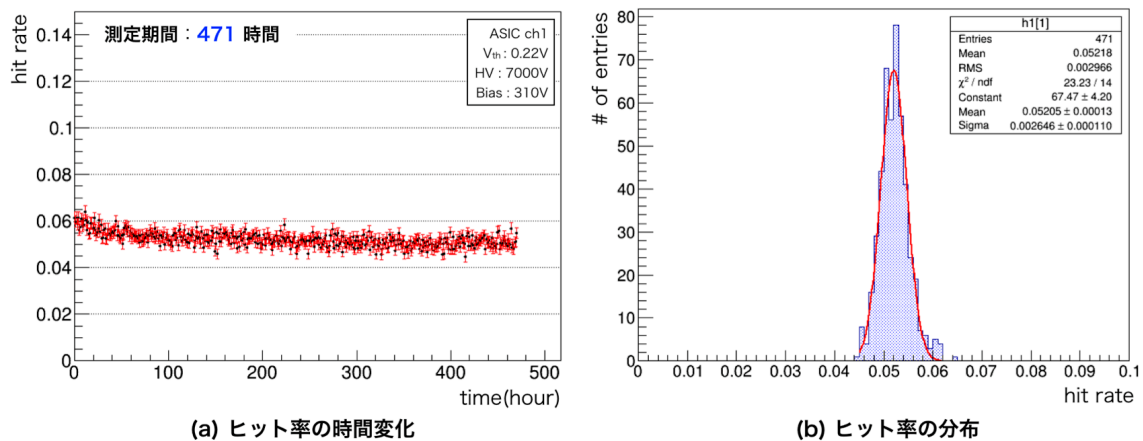


図 4.29 ヒット率の時間変化。(a) 1 時間ごとのヒット率の時間変化。(b) 長期測定におけるヒット率分布。

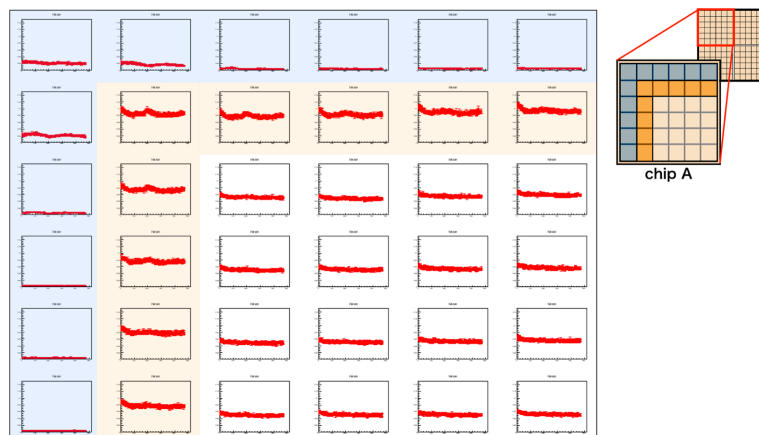


図 4.30 全測定チャンネル (36ch) についてのヒット率の時間変化

4.4.2 増幅率測定

増幅率算出方法

次に Threshold scan によって HAPD の増幅率 G を算出する方法について述べる。増幅率算出方法についての概略図を図 4.31 に示す。最も高いピークがノイズ部分、なだらかな段状の部分が 1 光電子信号に相当する。Threshold scan の結果から 1 光電子の波高値を算出し、SA03 増幅器の増幅率から入力電荷量 (つまり等価電子数) に直すことで HAPD の増幅率 G の実測値と定義する。ノイズのピークを Gauss 関数でフィッティングした時の中心値を μ_0 、1 光電子信号の傾斜部を相補誤差関数でフィッティングした際の中心値を μ_1 とすると、これらの差である $\Delta V = \mu_1 - \mu_0$ が 1 光電子信号の波高値となる。SA03 での増幅率を $G_{\text{Amp}} [\text{mV/fC}]$ とすると

HAPD での増幅率 G は以下の式で表される。

$$G [e^-] = \frac{\Delta V [\text{mV}]}{G_{\text{Amp}} [\text{mV/fC}]} \times \frac{1}{1.6 \times 10^{-4} [\text{fC/e}^-]} \quad (4.3)$$

この式を用いて Threshold scan の結果から増幅率を算出し、HAPD 増幅率 G の時間変動をモニタリングした。

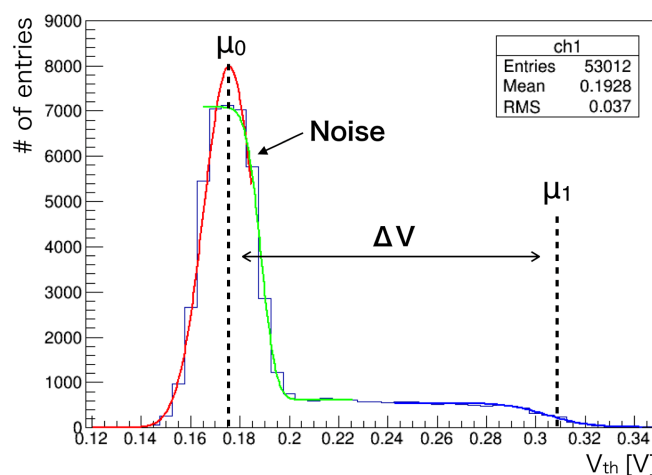


図 4.31 Threshold scan の結果と増幅率の算出方法

長期増幅率測定の結果

増幅率の長期測定結果を図 4.32 に示す。ヒット率測定時と同じ測定データを用いているため測定時間は 471 時間であり、1 時間ごとの測定結果をプロットしている。各チャンネルごとに式 (4.4) から増幅率を算出した。なお、SA03 での増幅率 $G_{\text{Amp}} [\text{mV/fC}]$ は全チャンネル共通で 17.5 mV/fC としている。

図 4.32(a) から増幅率についても長期的には比較的安定した結果が得られたが、測定開始から 100 時間までの期間において緩やかに増幅率が上昇しているように見える。この時、電源供給システムのモニター値から印加電圧の変動は見られず、その他の要因によるものだと考えられる。さらに、図 4.29 に示したヒット率測定の結果についても測定開始から 100 時間までの期間では緩やかな減少が見られ、増幅率の時間変化との関連があると考えられる。考えられる要因としては、まず HAPD 本体、特に光電面が不安定な状態にあった可能性が挙げられる。測定開始時は電圧印加から 1~2 時間の間隔を空けて HAPD の安定を図っていたものの、暗箱の開閉時などに光電面に強い光量が入射してしまったことなどが原因となり、HAPD が安定するまでに通常以上の時間がかかってしまった可能性がある。もう一つの要因としては電圧印加の後、HAPD の側管部が帯電してしまい、その後放電し安定するまでの時間変動が現れている可能性が考えられる。いずれの要因にしてもこれらの時間変動はモニターシステムの監視方法や性能に依るものではないと考えられ、それらに依らない外的要因による変動をモニタリングできたと言える。したがって、本モニターシステムはモニター光のヒット情報から間接的に HAPD の各チャンネルの増幅率をモニ

タリングすることが可能であることを確認した。

同図 (b) は増幅率の分布を表している。HAPD 安定後の増幅率の中心値は $48390 e^-$ である。本測定では、HV 電圧 = $-7 kV$, Bias 電圧 = $310 V$ であり、図 3.13 示したように HAPD(KA0603) のデータシートより HV 電圧による増幅率 $G_{HV} = 1492$, Bias 電圧による増幅率 $G_{Bias} = 40$ である。よって、総増幅率 G_{tot} は $1492 \times 40 = 59680$ となり若干のずれはあるがオーダーでは合っており、比較的近い値が得られた。

図 4.33 に増幅率の時間変動をチャンネルの配置通りに表示したものを示す。電場の歪みの影響によりヒットが少ない最外チャンネルではイベント数が少な過ぎるためにフィッティングができず、増幅率の算出が行えていない。電場が安定している内側のチャンネルでは比較的安定して増幅率測定が行えることが確認できた。

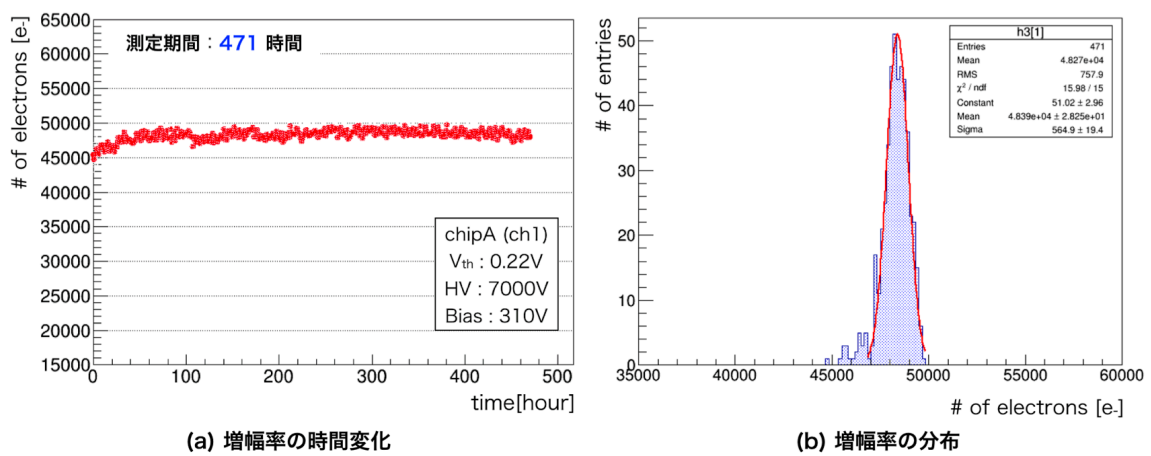


図 4.32 増幅率の時間変化。(a) 1 時間ごとの増幅率の時間変化。(b) 長期測定における増幅率分布。

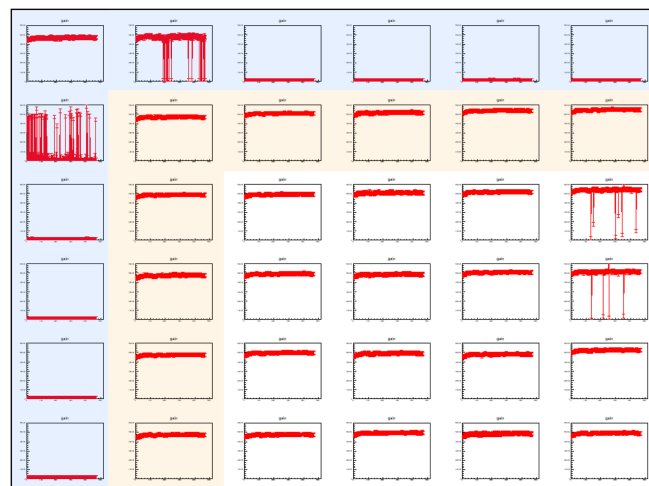


図 4.33 全測定チャンネル (36ch) についての増幅率の時間変化。縦横軸のスケールは図 4.32 と同じである。フィッティングの失敗に伴って増幅率の算出ができていないものもあり、フィッティング手法の改良が求められる。

増幅率変動の測定

モニターシステム試作機での増幅率の測定結果が HV 電圧、Bias 電圧それぞれと相関があるのかを確認し、増幅率の変動をモニタリング可能かを検証した。以下では、電子打ち込み増幅変化時と Avalanche 増幅時のそれぞれについての測定結果についてまとめる。

まず、HV 電圧を変えた時、つまり電子打ち込み増幅率を変化させた時の結果を述べる。Bias 電圧はこれまでの測定と同様に $V_{Bias} = 310\text{ V}$ で固定し、HV 電圧を変化させてその都度増幅率を測定した。図 4.34 に測定結果を示す。HV 電圧を変えた結果、増幅率について正の相関を持つことを確認した。図 4.36 で測定値とデータシートでの電子打ち込み増幅率を比較した結果を示す。データシートより HV 電圧と電子打ち込み増幅率は線形関係にあり、増幅率の増加率に違いは見られるもののこの関係性が測定できていると考えられる。したがって、モニターシステムを用いて HAPD の増幅率を期待通り測定できることを確認した。

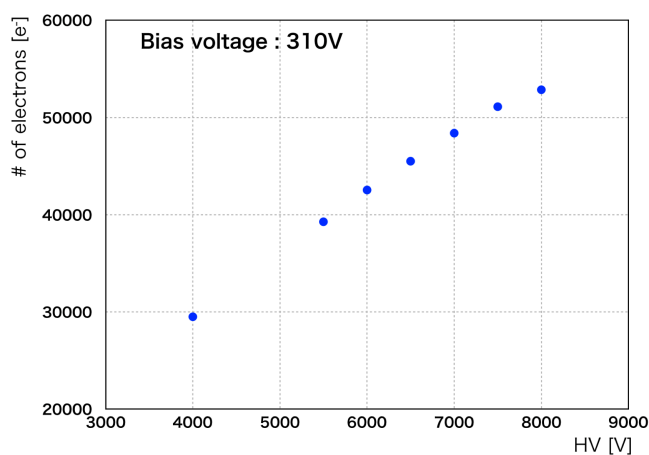


図 4.34 HV 電圧と電子打ち込み増幅率の相関

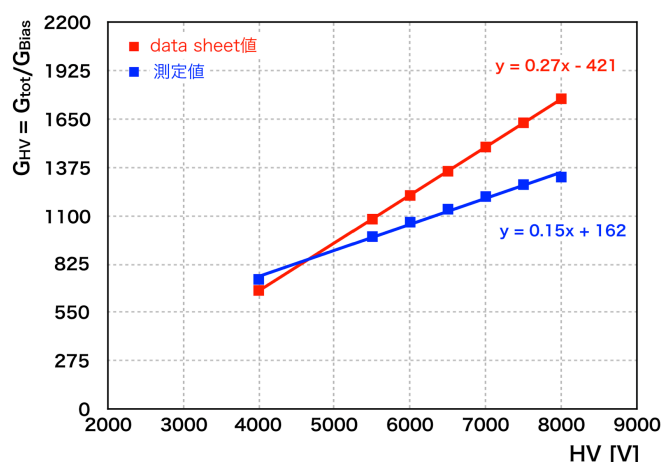


図 4.35 データシート値と測定値の比較。赤点がデータシート値を示し、青点で測定値を Avalanche 増幅率 40(Bias 電圧 : 310V) で割った値を示している。

次に、Avalanche 増幅率を変化させた場合の測定結果を図 4.36 に示す。各電圧ごとの Avalanche 増幅率のデータシート値と測定値を示している。Bias 電圧を変化させた際の増加率がよく一致しており、精度よく増幅率の変化を観測することができていると考えられる。

以上の結果から、電子打ち込み増幅率及び Avalanche 増幅率と Threshold scan によって得られた増幅率に相関があることが確認できた。モニターシステムによって測定しているのは総増幅率であるため、HAPD の出力変化時に電子打ち込み増幅、Avalanche 増幅のどちらが要因となっているかを断定することはできない。しかし、各種電圧値、電流値のモニタリングと合わせて、定期的に増幅率のモニタリングを行うことによって HAPD 出力の調整が可能であると考えられる。

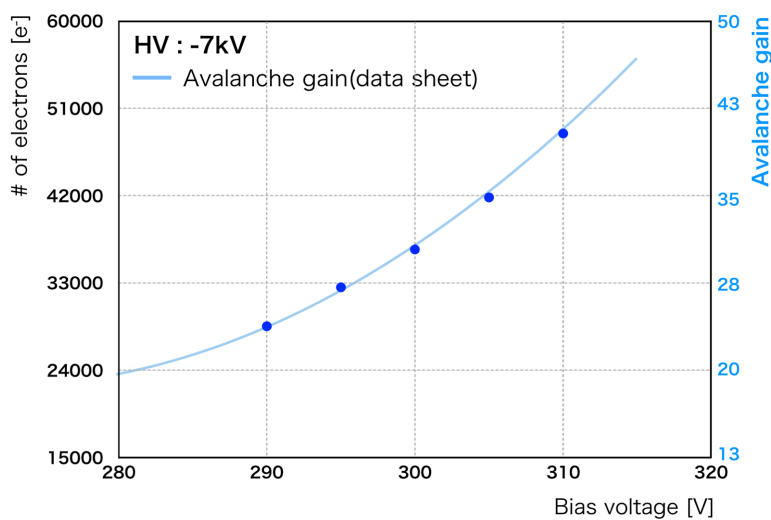


図 4.36 Bias 電圧と Avalanche 増幅率の相関。青点が測定値を示し、薄青線で Avalanche 増幅のデータシート値を示している。

4.4.3 ノイズレベル測定

次に Threshold scan によるノイズレベル測定方法について述べる。図 4.31 に示したノイズピークを相補誤差関数でフィッティングしその標準偏差 σ [mV] をノイズと定義した場合、ノイズレベルは以下の式で算出することができる。

$$\text{Noise [e}^{-}\text{]} = \frac{\sigma \text{ [mV]}}{G_{\text{Amp}} \text{ [mV/fC]}} \times \frac{1}{1.6 \times 10^{-4} \text{ [fC/e}^{-}\text{]}} \quad (4.4)$$

図 4.37 にノイズレベルの時間変化と分布、図 4.38 に全測定チャンネル (36ch) におけるノイズレベルの測定結果をチャンネルの配置通りに表示したものを示す。長期的に大きな変動は見られず、使用した HAPD と SA03 全体でノイズレベルが一定であることをモニタリングできた。また、ヒット率や増幅率の結果とは異なり、外側のチャンネルに関しても磁場の有無に関わらず測定できていることがわかる。これはノイズレベルの測定に光子信号が不要であることに拠る。

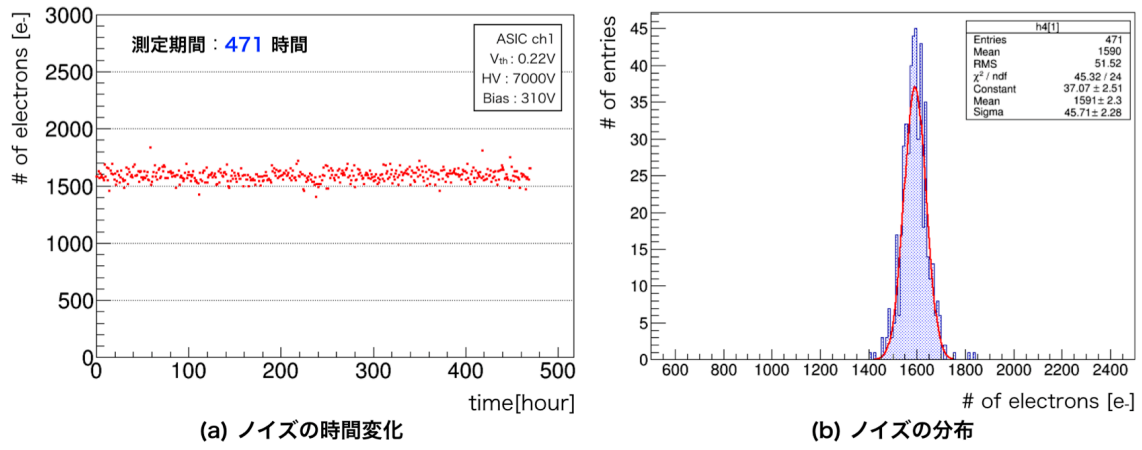


図 4.37 ノイズの時間変化

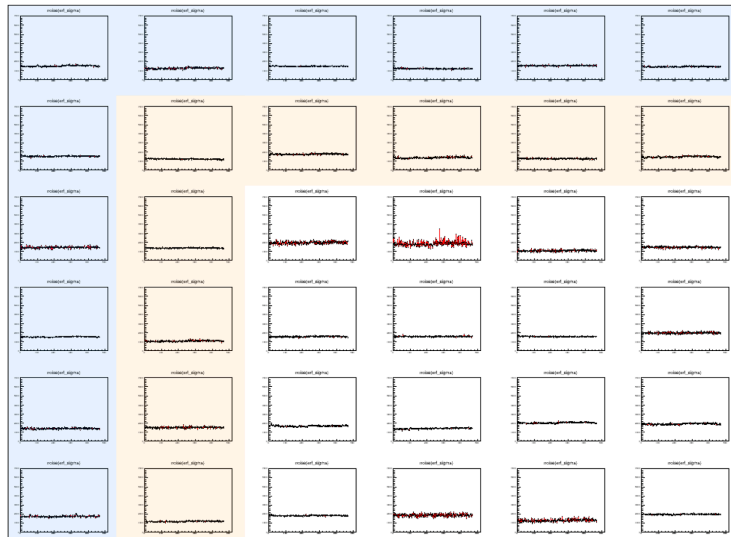


図 4.38 全測定チャンネル (36ch) についてのノイズレベルの時間変化

第5章

モニターシステムの実機運用試験

この章では、2016年夏より行われた ARICH 構造体へのモニターシステムの実装試験について報告する。ARICH 構造体の1セクターへモニターシステムを一部実装し、実機での運用試験を行った。まず、実装試験時のセットアップについて解説し、得られた結果についてまとめる。さらに、ARICH セクター内部におけるモニターシステム用光ファイバーの配置について検討し、配置案を示す。LED 光源の設置位置についても解説し、現在検討されている延長用光ファイバーとその試験結果について報告する。

5.1 実装試験セットアップ

暗箱内部の配置

モニターシステムの実装試験は ARICH の1セクターを外部光を遮蔽した状態で測定を行った。図 5.1 に実装試験用アルミニウムカバーとエアロゲルの外観、図 5.2 に暗箱内部の様子を示す。エアロゲルはサイズ $18 \times 18 \text{ cm}^2$ 、屈折率 1.045 と 1.055 のものを重ねたエアロゲルタイル1セットを使用した。図 5.1 に示すようにアルミフレームに入れたエアロゲルをカバーに固定した。また、暗箱カバー及び暗箱外壁はアルミニウム製のため金属光沢があるため、実際に ARICH のエアロゲル背面に敷かれる黒紙をモニター光の反射を抑える目的で貼った。

本試験時は1セクター内に17台の HAPD が設置され、そのうち図 5.2 右図の橙色で表した11台の HAPD についてデータ読み出しが可能となっている。実運転と同様に FEB board と Merger board を使用し、各 HAPD 毎に取り付けられた11台の FEB board と2台の Merger board によってデータ読み出しを行った。

また、分岐ファイバーは図 5.2 右図の青点で示した位置に計4本を装着した。モニターシステム用光ファイバーバンドルは2セットを使用しており、1セットの分岐ファイバー1本(同図中の2の位置)をエアロゲルタイルに向けて装着し、もう1セットの分岐ファイバー3本を図 5.2 右図の残り3箇所(同図中の1, 3, 4の位置)に装着することでそれぞれの光ファイバーバンドルを独立に発光できるようにした。これは、別々に光らせることでエアロゲルと黒紙それぞれからの散乱光を独立に観測するためである。

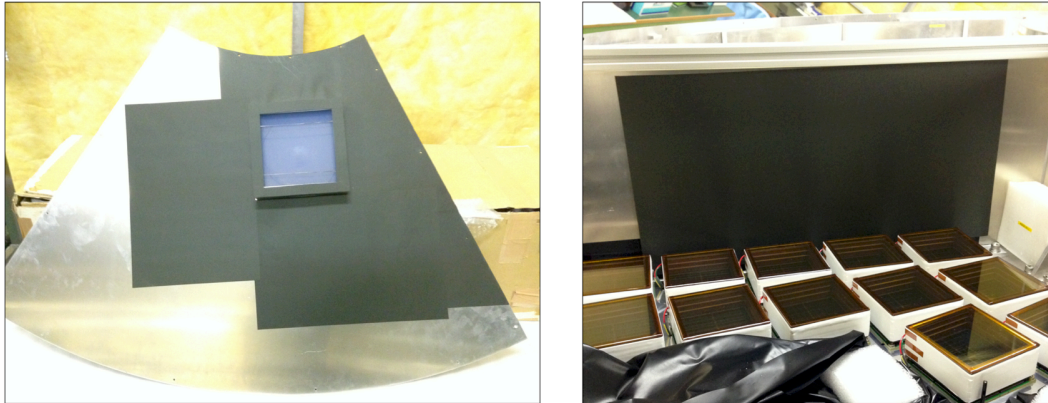


図 5.1 実装試験用アルミニウムカバーとエアロゲル。アルミニウムによる反射を抑えるために黒紙で覆っている。

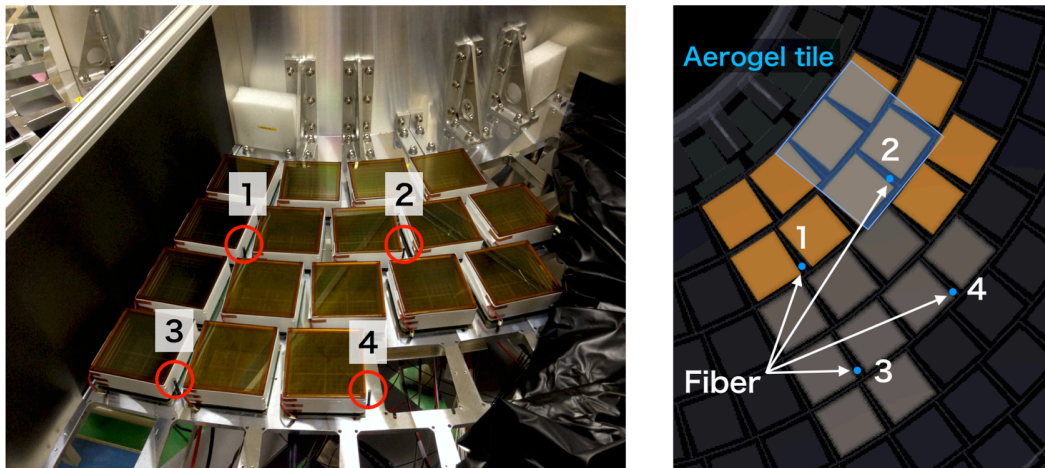


図 5.2 左図の赤円でモニターシステム用光ファイバーの設置位置を示している。右図は各構成要素の配置を表し、薄青の四角でエアロゲル、橙四角でデータ読み出し可能な HAPD、青点でモニターシステム用光ファイバーを示している。

トリガーと LED 光源用パルス信号の生成

ARICH モニターシステムは通常の Cherenkov Ring 観測時とは異なった運用方法となるため、モニターシステム用の独立したトリガー信号生成が必要となる。そこで、モニターシステム用トリガー信号及び LED 光源へのパルス信号は図 5.3 の Trigger Timing I/O(TT-IO) モジュールによって生成する。TT-IO モジュールはトリガー信号や NIM 信号の生成及びそれらの変換が可能なモジュールであり、周波数などの出力信号のパラメータは外部 PC から設定することができる。モニターシステムでは、トリガー信号と同期して TT-IO モジュールから出力された NIM 信号を LED ドライバーモジュール (図 4.10) に入力する。生成されたトリガー信号は FTSW(Frontend Timing SWitch) モジュールを経由し、Merger board や COPPER に分配される。図 5.3 にモ

モニターシステムの概要図、図 5.4 にモジュールラックの様子を示す。

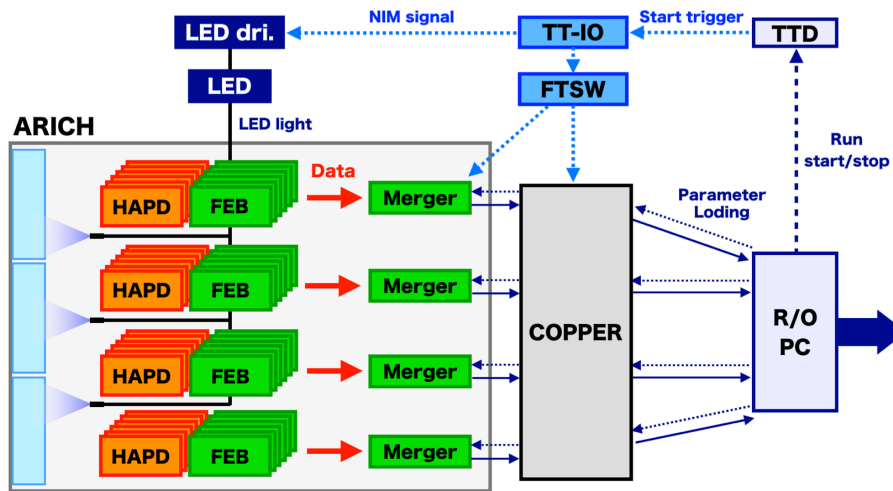


図 5.3 モニターシステム概要図

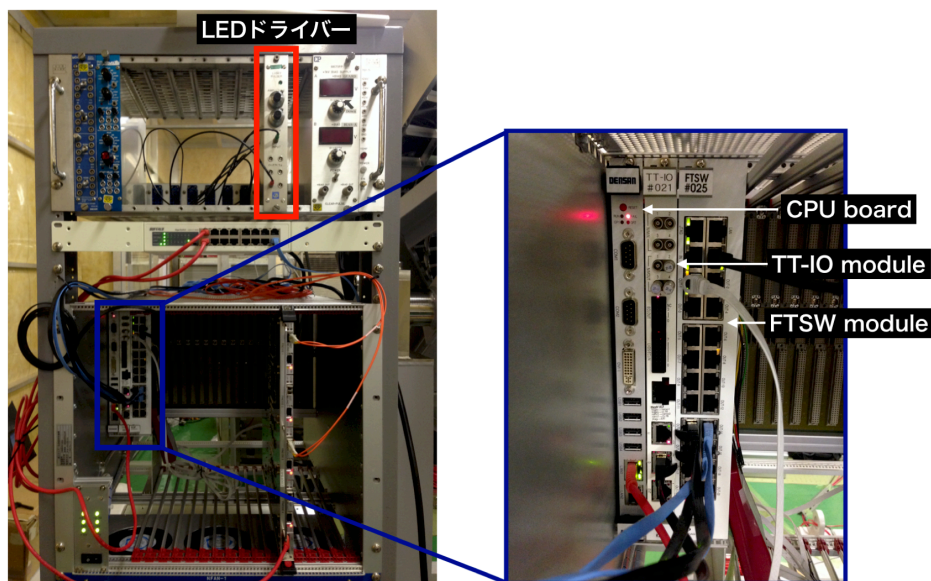


図 5.4 モニターシステムで使用するモジュールの外観

電源供給システム

本測定では 2 種類の高圧電源 (CAEN 社製、ISEG 社製) を使用した。データ読み出しを行った 11 台の HAPD の内 6 台は CAEN 社製電源、5 台には ISEG 社製から各種電圧 (HV, Guard-Bias) を印加した。これらの電源は電源制御用 PC と繋がっており、各出力チャンネルごとの電圧値の設定をはじめ出力の ON/OFF といった操作が可能となっている。図 5.5 に高圧電源装置の外観図を示す。



図 5.5 測定で使用した高圧電源の外観。左図は CAEN 社製電源、右図が ISEG 社製電源である。

5.2 試験結果

各種パラメータの設定

以下では、実機での運用試験結果について解説する。3.4.3 節で述べたように、『SA03 の全チャンネルのオフセットが一律に調整されていること』が重要である。図 5.6 にオフセット調整後、LED 光を発生させていない状態での Threshold scan 結果を示す。使用した 11 台の HAPD の全チャンネル ($144 \times 11 = 1584$ ch) のオフセットが 0 mV 付近で揃っていることが確認できる。ノイズ信号以外に光子信号のようなものが確認できるが、これは暗箱内に微少の光が漏れ込んでいるためと思われる。

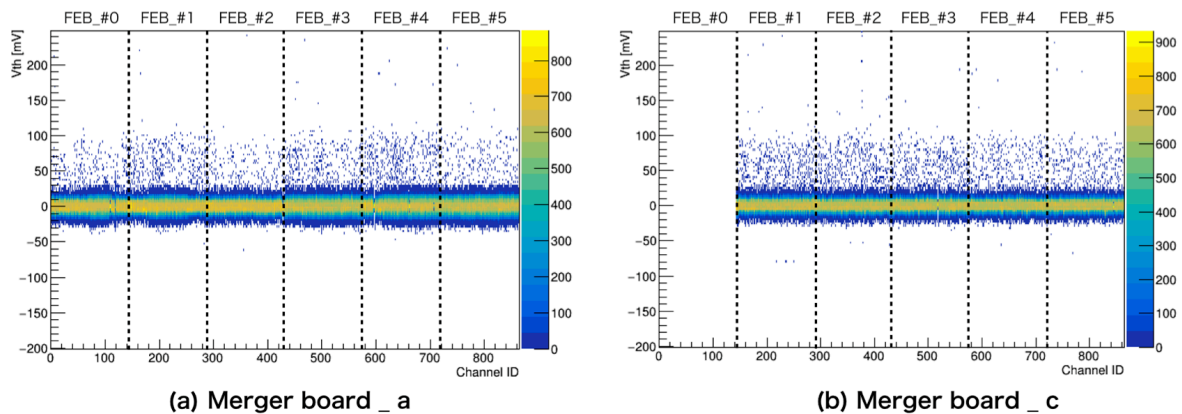


図 5.6 LED 光無しでの Threshold scan 結果。全チャンネルでオフセットが等しく 0 mV 付近に調節されていることが確認できる。なお、MB_c の FEB_# 0 で信号が見られないのは HAPD モジュールが接続されていないためである。

次に、LED 光をエアロゲルに照射した状態 (図 5.2 に 2 で示した分岐ファイバーを発光) での Threshold scan 結果を図 5.7 に示す。トリガー数は 100000、LED ドライバー設定値は Amplitude : 30, Width : 580 に設定し測定を行った。接続された 11 台の HAPD で光子信号を

観測できていることがわかる。この結果より、閾値電圧 V_{th} は光子信号のみを超える 60 mV に設定した (図 5.8)。

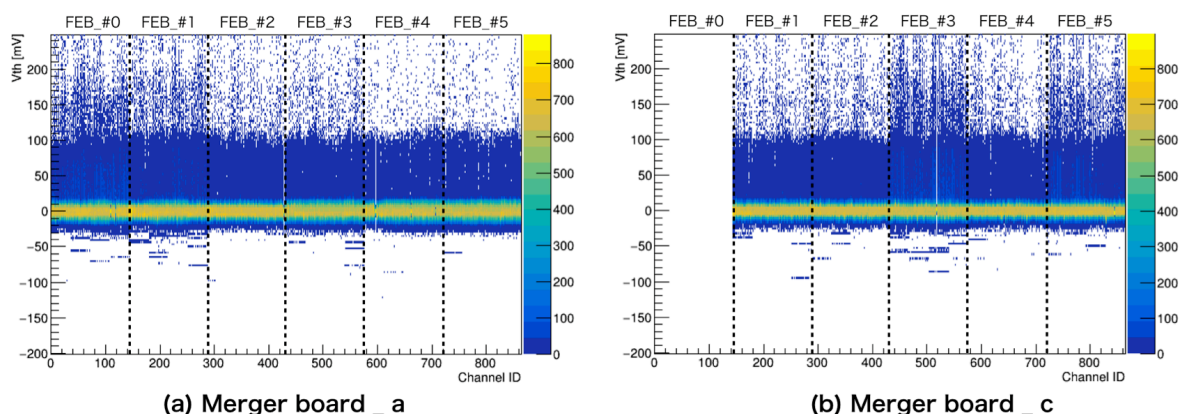


図 5.7 LED 光がある状態での Threshold scan 結果。

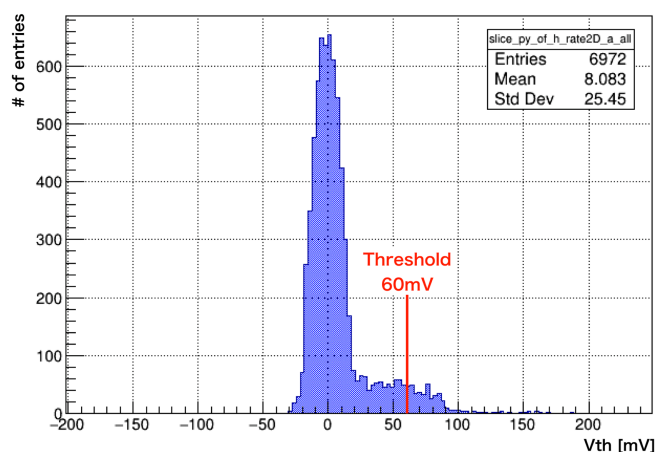


図 5.8 あるチャンネルの LED 散乱光検出時の Threhsold scan 結果。1 光子相当の散乱光信号が確認でき、赤線で示した 60 mV を閾値電圧として設定した。

また、この散乱光子による信号を基に 4 章で述べた time window に関するパラメータである $hdcycle$ と $trgdelay$ を決定した。閾値電圧 $V_{th} = 60 \text{ mV}$ に固定し、閾値電圧を超えたイベント (散乱光子によるイベント) をカウントする。4 bit 単位で読み出されたそのイベントが 1 bit ~ 4 bit のどこにカウントされているかを調べることで、イベントに対して time window が適切な幅・タイミングに調整されているかを確認することができる。信号全体が time window に収まっている状態、つまりイベントが 2 ビット目 ~ 3 ビット目にカウントされる状態が適切だと考えられる。図 5.9 に $hdcycle = 8$, $trgdelay = 6$ に設定した際の Merger board 毎での観測結果を示す。図 5.9 より、イベントは 3 ビット目に最も多くカウントされていることが確認でき、散乱光子信号に対して各パラメータの設定値が適切であることがわかる。よって、モニターシステム使用時の設定値は「 $hdcycle = 8$, $trgdelay = 6$ 」に決定し、散乱光の測定を行った。

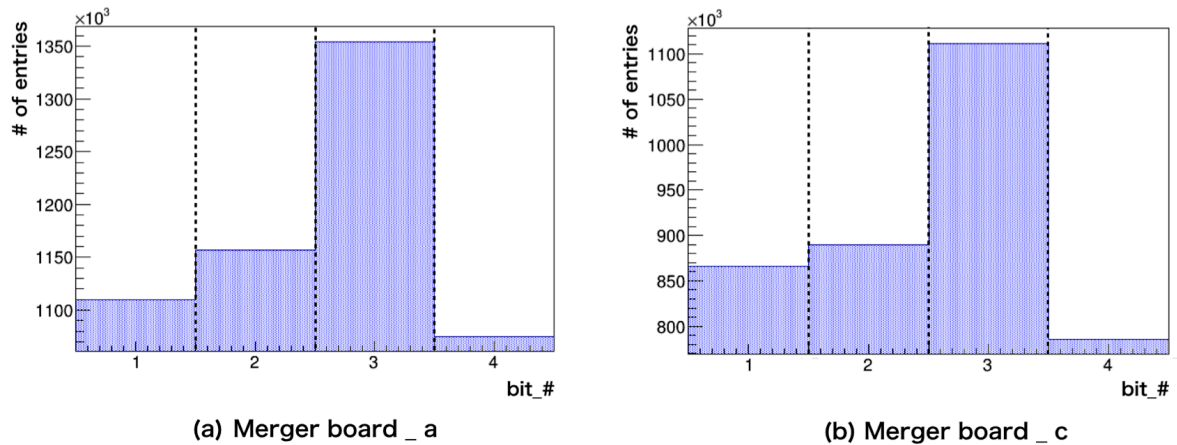


図 5.9 「hdcycle = 8, trgdelay = 6」で測定した時の bit マップ。4 bit 単位で読み出されたそのイベントが 1 bit ~ 4 bit のどこにカウントされているかを表している。

散乱光の位置依存性

各チャンネルで観測したイベント数をチャンネルごとの配置に従って表した 2 次元ヒストグラムを図 5.10 に示す。図 5.10(a) がエアロゲルに向いている分岐ファイバー (図 5.2 の 2) のみから LED 光を照射した際の結果、(b) が黒紙に向いている分岐ファイバー (図 5.2 の 1,3,4) のみから LED 光を照射した際の結果である。つまり、(a) が表すのはエアロゲルでの散乱光子の検出イベントであり、(b) は黒紙での反射光子の検出イベントである。この結果から、黒紙によってもある程度の光が反射されるもののエアロゲルに光を照射した場合にはより多くの光子が拡散され、またその散乱光が期待通りに HAPD に一様に照射できていることを確認した。

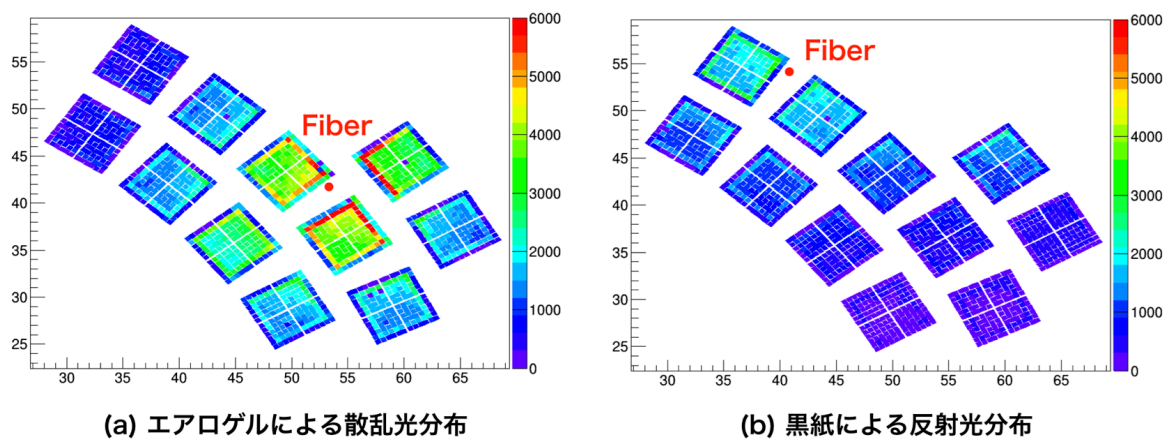


図 5.10 モニターシステム用 LED 光の光量分布。(a) がエアロゲルからの散乱光の位置分布、(b) は黒紙からの反射光の位置分布を表す。LED 光の照射位置を赤点で示している。

図 5.10 の (a)(b) それぞれの場合について、光ファイバーに最も近接した HAPD におけるヒッ

ト率とトリガー当たりのヒットチャンネル数を表 5.1 に示す。それぞれの比較結果から黒紙での反射光量はエアロゲルでの散乱光量に対して、約 1/2 程度であることがわかる。

表 5.1 エアロゲルと黒紙での検出光量の違い

	エアロゲル	黒紙	黒紙/エアロゲル
ヒット率	~0.45	~0.23	0.51
ヒットチャンネル数/HAPD/トリガー	4.13	2.19	0.53

次に、使用した HAPD11 台全ての各チャンネルでのヒット率を分岐ファイバーからの相対距離を関数としてプロットした結果を図 5.11 に示す。図 5.11 では HAPD モジュール番号ごとに配色して表示した。また、電場の歪みの影響により、見かけ上ヒット率が測定できない HAPD の最外層とその 1 列内側のチャンネルは除いてプロットしている。

これは散乱光量の位置依存性と見ることができ、この結果から光量は指数関数に従って減少し、光ファイバーから約 25 cm の位置まで拡散されていることがわかる。この結果と 4 章で述べた試作機を用いた測定結果の比較図を図 5.12 に示す。実機試験での測定結果と試作機での測定結果はよく一致していることが確認できる。

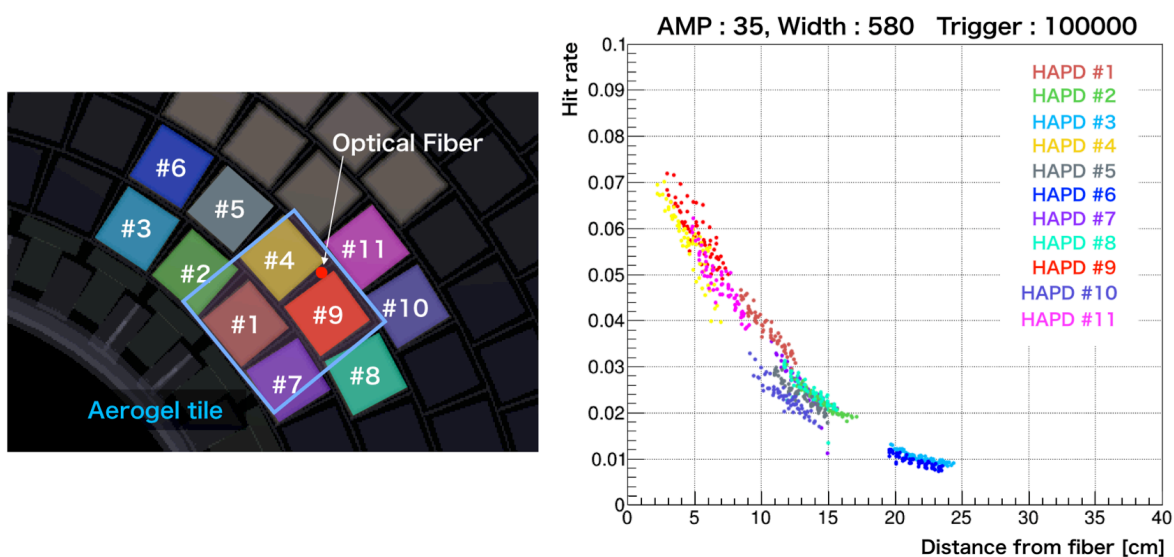


図 5.11 光ファイバーからの距離と光量との相関。左図は各 HAPD モジュールの配置と光ファイバーの配置図。右図は光ファイバーからの距離とヒット率の相関図。

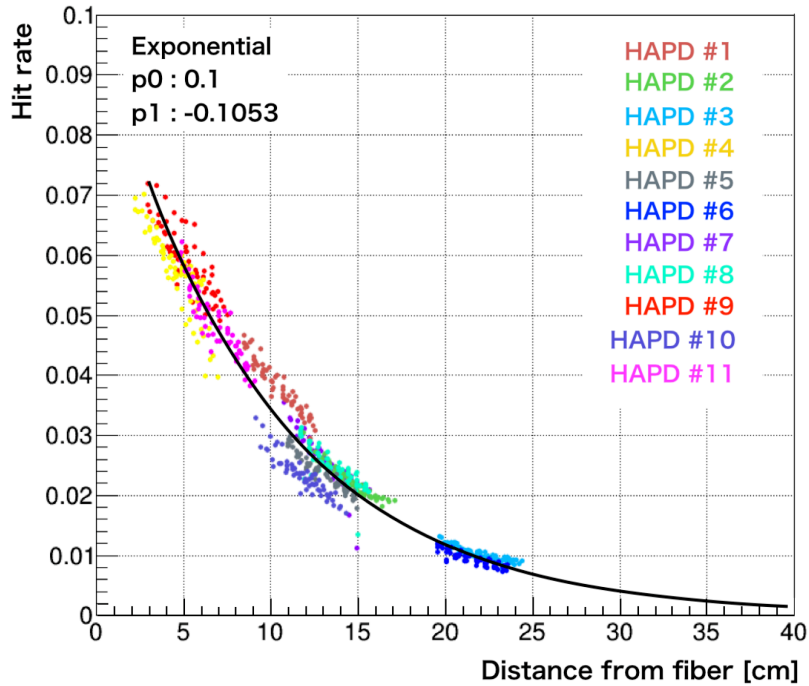


図 5.12 実機試験での測定値と試作機での測定値の比較。試作機での測定値のフィッティング結果を黒線で示した。

LED 発光量 とヒット率の相関

HAPD は単光子程度の微小光量を観測するよう設計されているため、光電面への大強度の光の入射は故障に繋がる恐れがある。HAPD の性能評価のためにも 1 光子レベルの光量で十分であり、モニターシステムの光源光量は各チャンネルあたりの入射光子数が約 1 光子となるよう調節する。照射光量を適切な範囲に調整するために LED ドライバーにおける設定値と照射光量の関係を知る必要がある。そこで、LED ドライバーでの Amplitude(波高値) の値を変化させ、照射光量の強さによる散乱光分布及びヒット率の変化の測定を行った。

Amplitude の各設定値ごとの測定結果を図 5.13 に示す。光量によって光の拡散範囲に変化は見られず、光量変化はヒット率にのみ影響するという結果が得られた。また、分岐ファイバー近傍のチャンネルにおける各設定値ごとのヒット率をプロットした結果を図 5.14 に示す。4 章で述べた試作機を用いた測定から、ヒット率 < 0.1 となる光量が適当な光量 (トリガーあたり平均 1 光子) であり、Amplitude < 40 の設定値が最大許容値であると考えられる。図 5.15 に検出光電子数が単光子レベルの場合 (AMP : 30) と複数光電子レベルの場合 (AMP : 55) の Threshold scan 結果を示す。

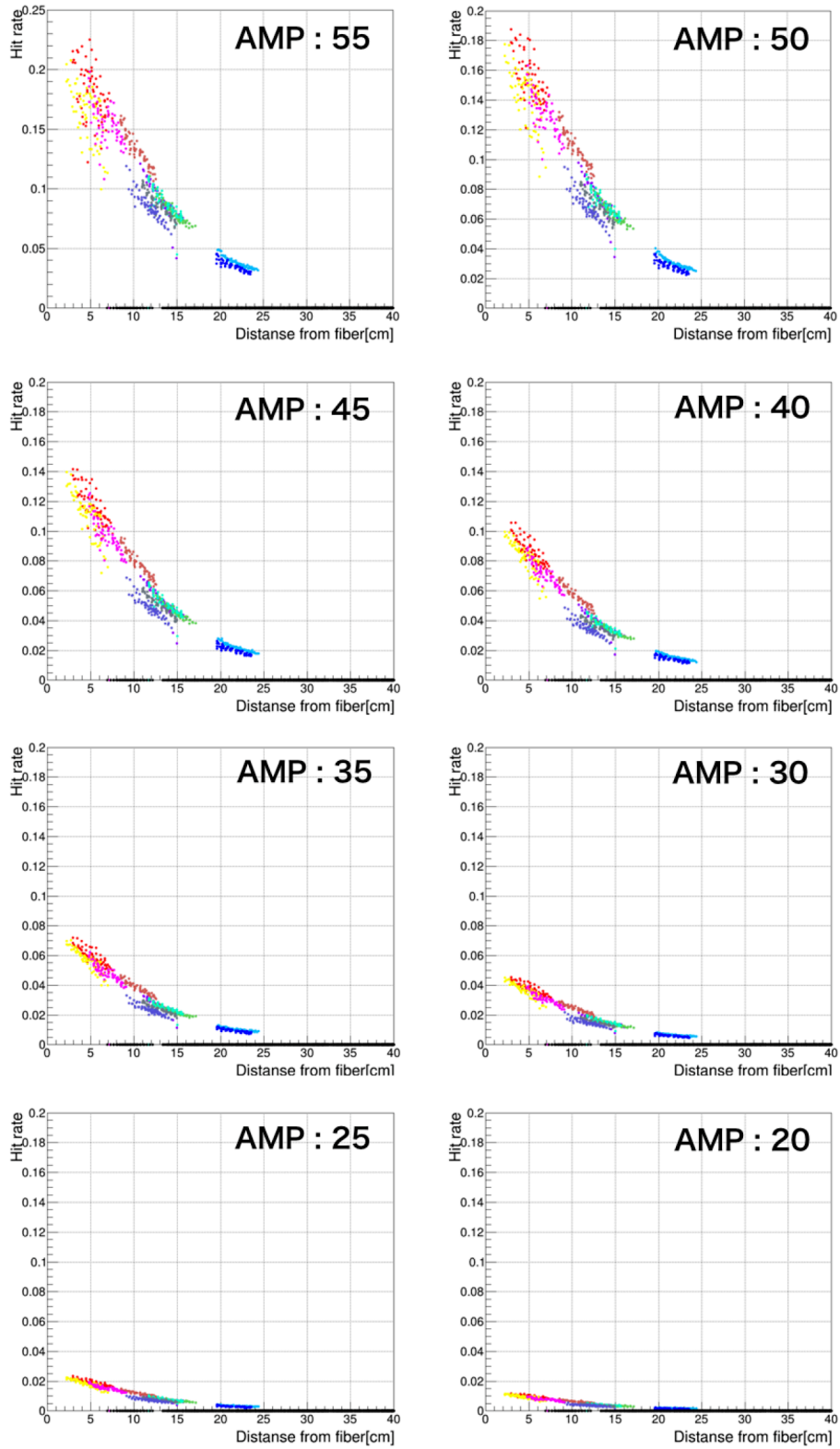


図 5.13 LED driver の各波高値についてのヒット率の変化

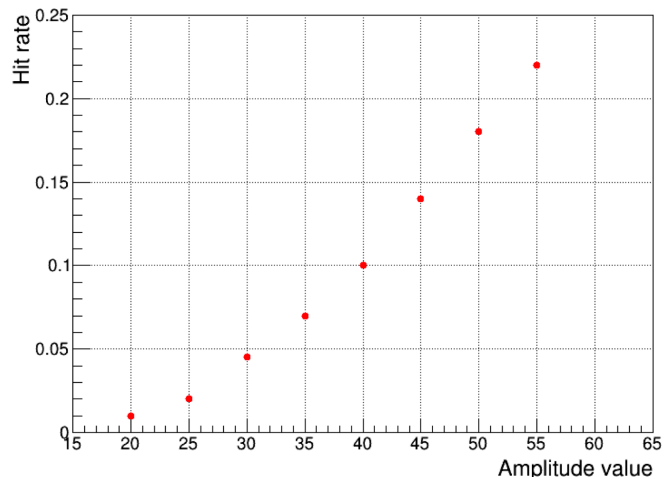


図 5.14 光ファイバー近傍チャンネルでのヒット率と Amplitude の相関

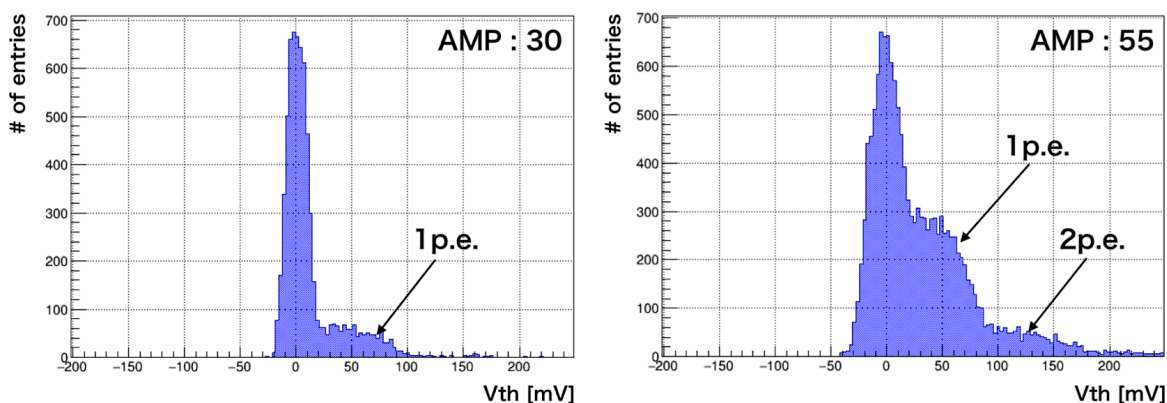


図 5.15 入力波高値による Threshold scan 結果の違い。左図は AMP : 30(+1.3 V), 右図は AMP : 55(+1.55 V) の時の Threshold scan 結果である。左図では検出光電子数が平均 1 光電子程度であるのに対し、右図では検出光電子数が 2 ~ 3 光電子レベルの光量であることがわかる。

セクター全体での散乱光分布の見積もり

実機での散乱光分布の測定結果を基にモンテカルロ (MC)・シミュレーションを用いて、分岐ファイバー 15 本を使用した場合の散乱光分布の簡易的な予測を行った。図 5.16 に実機での測定データのフィッティング結果 (左図) と MC シミュレーションで得られた散乱光分布 (右図) を示す。この結果には ARICH の内部構造や反射鏡が散乱光へ与える影響については考慮していない。右図において、黒枠の内側が ARICH 1 セクターの領域に相当し、光ファイバーの設置位置を黒点で示している。シミュレーション結果から 15 本の光ファイバーを使用した場合はセクター内に満遍なくモニター光を行き渡らせることができるという結果が得られた。

図 5.17 に 1 セクターにおける断面方向での散乱光分布を示す。右図の橙色の領域は HAPD 設

置領域を表す。図の $X = 110$ に当たる ARICH の外側付近では反射鏡の影響によってさらなる光量が見込まれる。この結果から、散乱光量が最も少ない位置での光量は最も多い位置の $1/2$ 程度であり、十分一様に散乱光が拡散されると考えられる。

また、光量が最大の位置でのヒット率を 0.10 (ヒットが大体 1 光子となる光量) 程度に設定した場合、最小光量となるセクターの内側の位置でのヒット率は約 0.045 と見積もられる。これは 4.4 節で述べた結果からも HAPD 性能のモニタリングが可能な光量であることが確認できているため、光ファイバー 15 本によってセクター全体のモニタリングが可能であると考えられる。

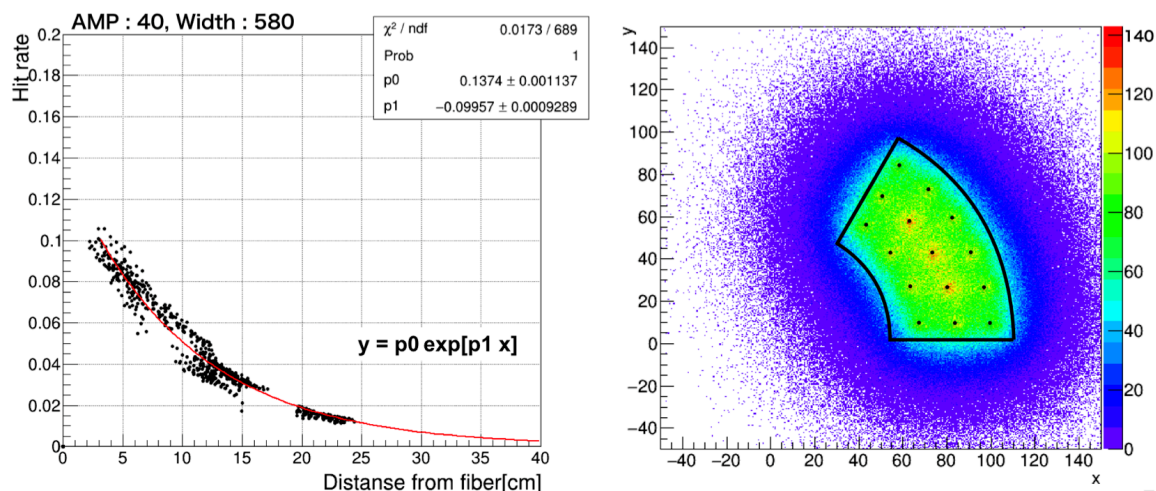


図 5.16 左図は実機試験での測定値のフィッティング結果。右図はフィッティング結果を基に MC シミュレーションで得られた散乱光分布。黒枠の内側が ARICH 1 セクターの領域に相当し、光ファイバーの設置位置を黒点で示している。

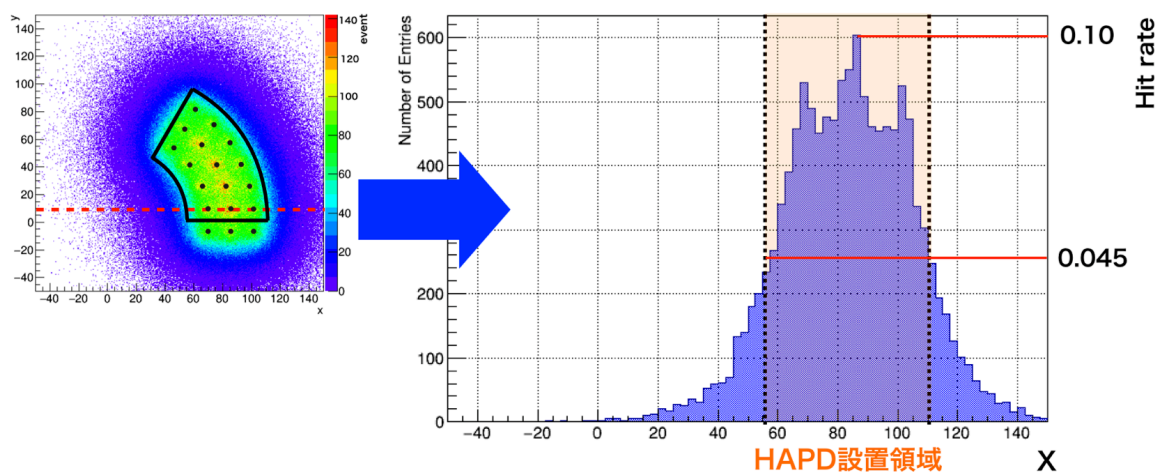


図 5.17 1 セクター断面方向での散乱光分布。左図の赤破線で示した部分の断面を右図に示す。右図の橙色の領域は HAPD 設置領域を表す。

5.3 モニターシステム用機器の設置位置

モニターシステム用光ファイバーは取り付け作業のし易さを考慮し、より効率的な配置を検討する必要がある。また、LED 光源の設置位置についてはいくつかの候補があるが、最も利便性の高い場所を選択し、それに付随して LED ドライバーの設置位置も検討する必要がある。以下では、LED 光源及び LED ドライバーの設置位置について述べ、さらに ARICH セクター内での光ファイバーの配置についてまとめる。

5.3.1 延長用光ファイバー試験

まず、LED 光源の位置について検討する。モニターシステム用 LED 光源の設置位置としては以下の3箇所が候補である。

ARICH 内部 読み出し回路側の空間

ECL 外側の空間 図 5.18 の赤い領域で示した空間

Belle II 測定器の外部 エレクトロニクスハット や Belle II 測定器の上に設置されるラック上

このうち、ARICH の内部と ECL 外側の空間は Belle II 測定器内部であり、実験が開始された後では容易に開閉することができないため LED 光源に問題が起きた場合の点検や交換が不可能である。よって、LED 光源は Belle II 測定器外部に設置することが適当であると考えた。しかし、モニターシステム用光ファイバーバンドルは Belle II 測定器外部まで届かない。そこで、モニターシステム用光ファイバーと LED 光源の間に延長用の光ファイバーを追加することで距離を延ばし、運用上問題がないか検証を行った。延長用光ファイバーを追加した場合、接続部分や光ファイバー長の増加による光量の減衰が考えられ、モニターシステムに十分な光量が供給できるかどうか問題となる。以下では、延長用光ファイバーを用いた場合の光量の減衰測定についてまとめ、LED 光源の位置について検討する。

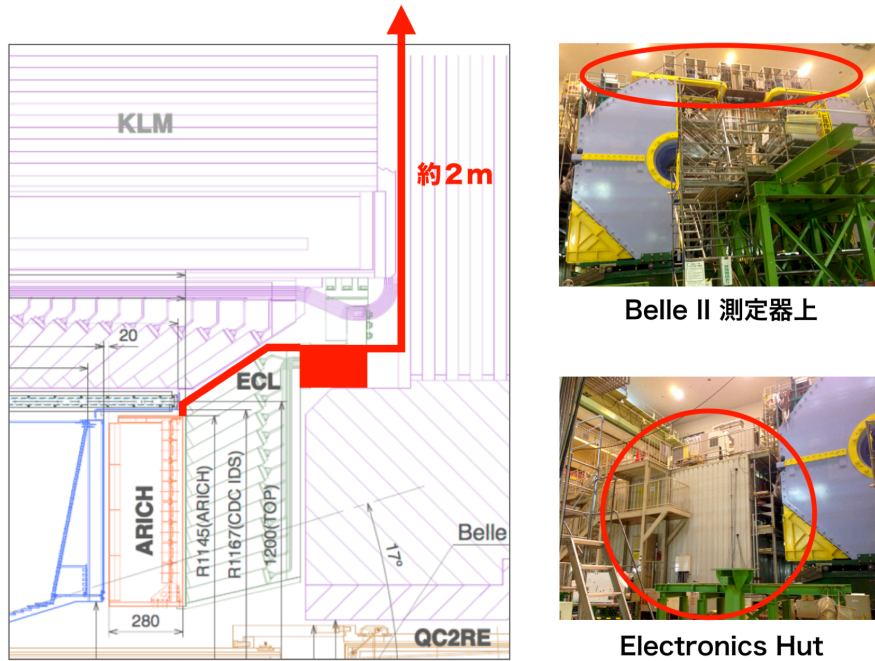


図 5.18 Belle II 測定器内での LED 光源の設置位置

本測定では、試験用としてファイバーパッチケーブル (THORLABS 社製 M29L シリーズ) を使用した。また、モニターシステム用光ファイバーと接続できるよう SMA-SMA アダプタ (THORLABS 社 ADASMA) を取り付けた。図 5.19 に延長用光ファイバー試験で使用した光ファイバーの外観、表 5.20 に仕様を示す。図 5.21 は延長用ファイバーと LED コネクタを接続した時の様子である。



図 5.19 ファイバーパッチケーブルの外観

図 5.20 ファイバーパッチケーブルの仕様

項目	特性
端末	905 SMA コネクタ
コア径	$600 \pm 10 \mu\text{m}$
クラッド径	$630 \pm 10 \mu\text{m}$
開口数 (NA)	0.39
波長領域	400 ~ 2200 nm

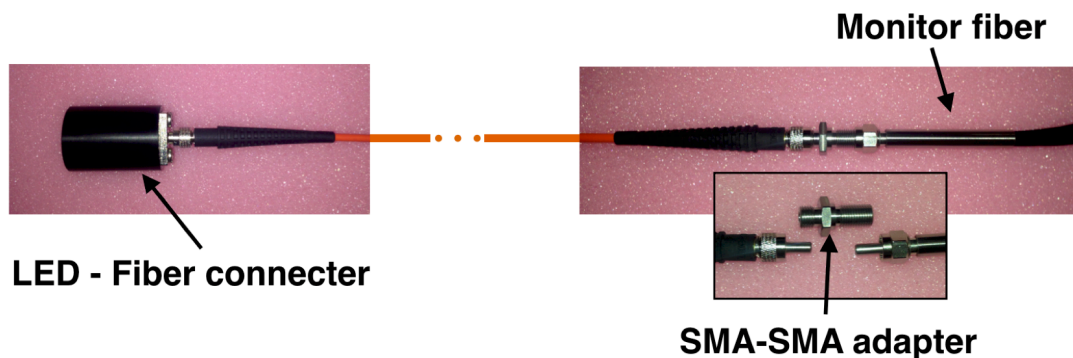


図 5.21 LED コネクタ、延長用光ファイバー、モニターシステム用光ファイバーを接続した様子

延長用光ファイバーによる光量の減衰測定の際のセットアップの概要図を図 5.22 に示す。モニターシステム用光ファイバーバンドルと LED 光源の間に延長用光ファイバーを経由し、モニターシステム用光ファイバーの正常な 1 本からの光を PMT によって測定した。「オシロスコープで見た光電子増倍管からのアナログ信号の波高値」と「ADC 値から算出した検出光電子数」を光量として評価を行った。以下で測定結果について述べる。

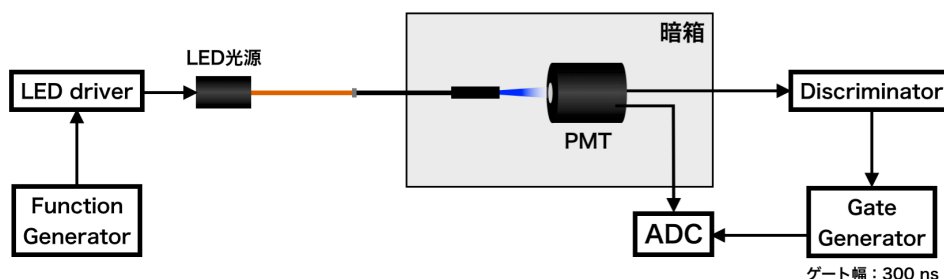


図 5.22 光量の減衰測定の際のセットアップの概要図。モニターシステム用光ファイバーバンドルと LED 光源との間に延長用光ファイバーを経由した。

まず、1 m の延長用光ファイバーを経由した場合の結果をまとめる。延長用光ファイバーを接続した場合としていない場合のオシロスコープ画像と得られた ADC 値分布のフィッティング結果を図 5.23 に示す。また、フィッティング結果から光電子数を見積もるために式 (5.1) を使用した。いずれの結果からも延長用光ファイバーを経由することによって光量が減衰していることが確認できる。光ファイバーによる延長がない時の光量を P_1 、延長用光ファイバーを接続した時の光量を P_2 として減衰率を

$$R_{ad} = (P_1 - P_2)/P_1 \quad (5.1)$$

と定義する。その時の照射光量の比較結果を表 5.2 に示す。オシロスコープから読み取った波高値、算出した検出光電子数のいずれの比較結果からも $R_{ad} \simeq 0.5$ であり、1 m の光ファイバーを接続することで照射光量が半減することがわかった。

さらに、延長用光ファイバーを 1 m から 2 m, 5 m と長さの異なるものに取り替えることで減衰率の長さ依存性を調べた結果、1 m を接続した場合と照射光量に変化は見られず、いずれの長さにおいても減衰率 $R_{ad} \simeq 0.5$ であることがわかった。以上の結果より、延長用光ファイバーの接続による照射光量の減衰率は光ファイバーの長さに依らず一定の約 50% であることを確認した。

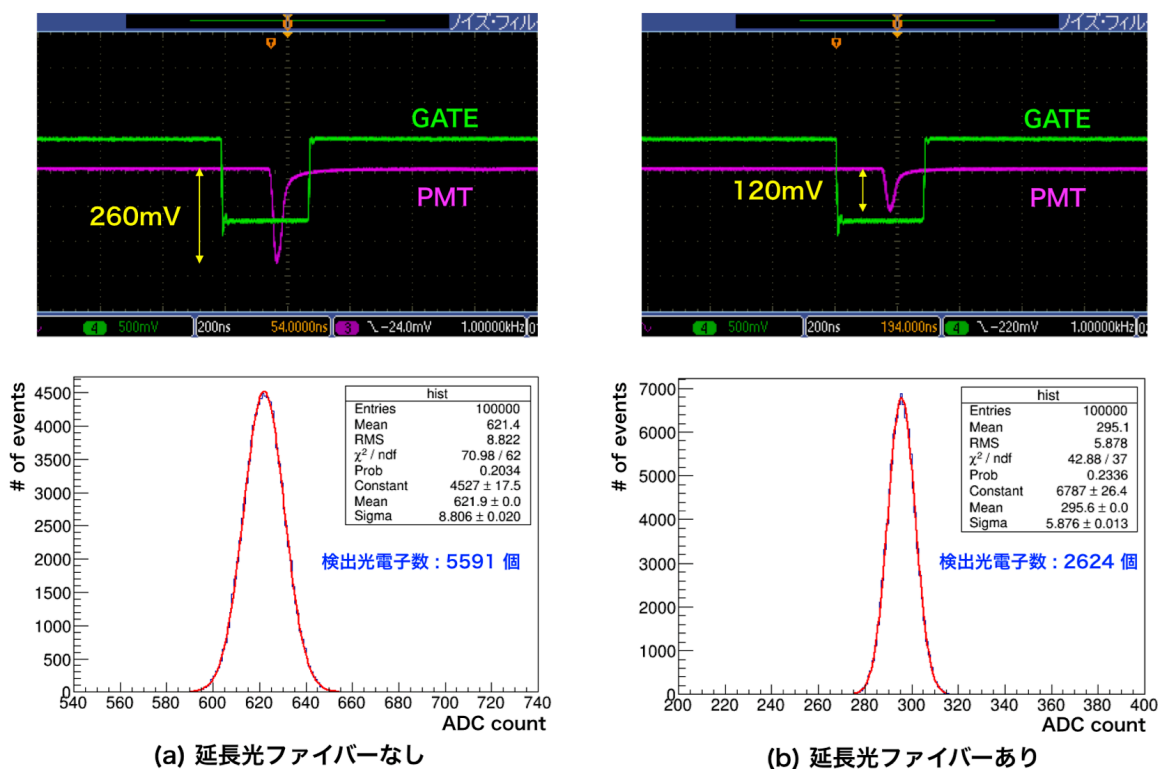


図 5.23 (a) 「延長用光ファイバーを接続していない場合」と (b) 「接続した場合」 のアナログ信号と ADC 値分布。光ファイバーを接続することで波高値・検出光電子数共に約 1/2 に減少していることがわかる。

表 5.2 ADC 値から算出した検出光電子数での比較

	延長なし	延長あり	R_{ad}
波高値	260 mV	120 mV	0.538
光電子数	5591 個	2624 個	0.531

次に、複数本の光ファイバーを接続した時の光量の減衰測定について述べる。延長用光ファイバーを用いて LED 光を Belle II 測定器外部から ARICH 内に導入する場合、配線の都合上、最低 2 本の延長用光ファイバーを使用する必要がある。つまり、光ファイバーの接続点が最低 2 箇所となり、光量がさらに減衰する可能性がある。そこで、複数本の光ファイバーを接続した場合でも十分な光量が得られるかどうかの確認を行った。

図 5.22 に示したセットアップと同様のものを用いて、LED 光源とモニターシステム用光ファイバーバンドルの間の光ファイバー数を増やして光量測定を行った。図 5.24 に長さの異なる光ファイバーを複数本接続した時のアナログ波形、表 5.3 に各本数での検出光電子数を示す。

波高値・検出光子数共に光ファイバーを 1 本以上使用した場合には、大きな差は見られない。光量の減衰量は約 10 % 程度であり、照射光量はほとんど減少しないという結果が得られた。したがって、延長用光ファイバーの接続による光量減衰は LED 光源と延長用光ファイバーの接続部で起こっていると考えられる。これは、LED 光源から直接モニターシステム用光ファイバーに入射する場合に比べ、延長用光ファイバーの接続によってへの入射光量が減少するためと考えられる。

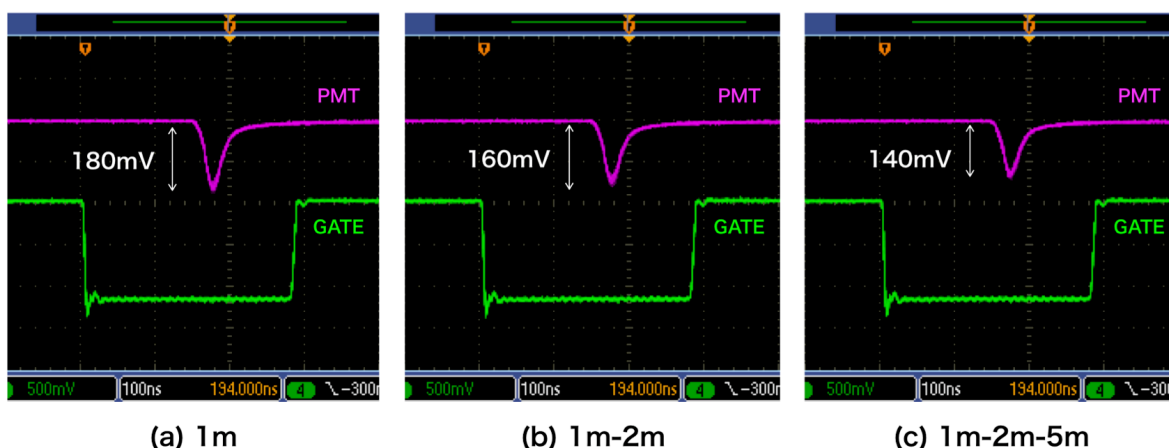


図 5.24

表 5.3 光ファイバーの本数ごとの ADC 値から算出した検出光電子数

	延長なし	1 本 (1m)	2 本 (1m-2m)	3 本 (1m-2m-5m)
波高値	400 mV	180 mV	160 mV	140 mV
光電子数	4890 個	2070 個	1880 個	1670 個

以上の測定結果から、複数本の光ファイバーを使用して延長する場合においても、照射光量の減衰は 50% 程度であることがわかった。LED 光源の光量は LED ドライバーからの出力波高値の調整による増強が可能であるため、この程度の減衰率であれば問題なく十分な光量を ARICH 内部に導入することができると考えられる。したがって、延長用光ファイバーを用いることで LED 光源を Belle II 測定器外部に設置することが可能であると考えられる。

5.3.2 モニター用ファイバーの配置

セクター内部でのモニター用ファイバーの配置と設置方法について記述する。モニターシステム用光ファイバーは読み出し回路側からインストールする。読み出し回路側は多数の配線により非常に複雑で狭い。さらに、光ファイバーはブランチ毎に長さが異なっているため、効率的な配

置を検討する必要がある。

図 5.25 に光ファイバーの配置案を示す。ARICH 構造体への光ファイバー入り口の位置ごとに 2 通りの配置案を示した。図における各色の点が光ファイバーを表し、光ファイバーの長さによって色分けしている。光ファイバー 22 本に対して設置位置は 15 箇所であるため、7 本を予備として扱う。入り口から遠い位置から順に長い光ファイバーを配置した。最も長い光ファイバーはどの位置にも設置可能であるため、優先的に予備として 2 本を残している。

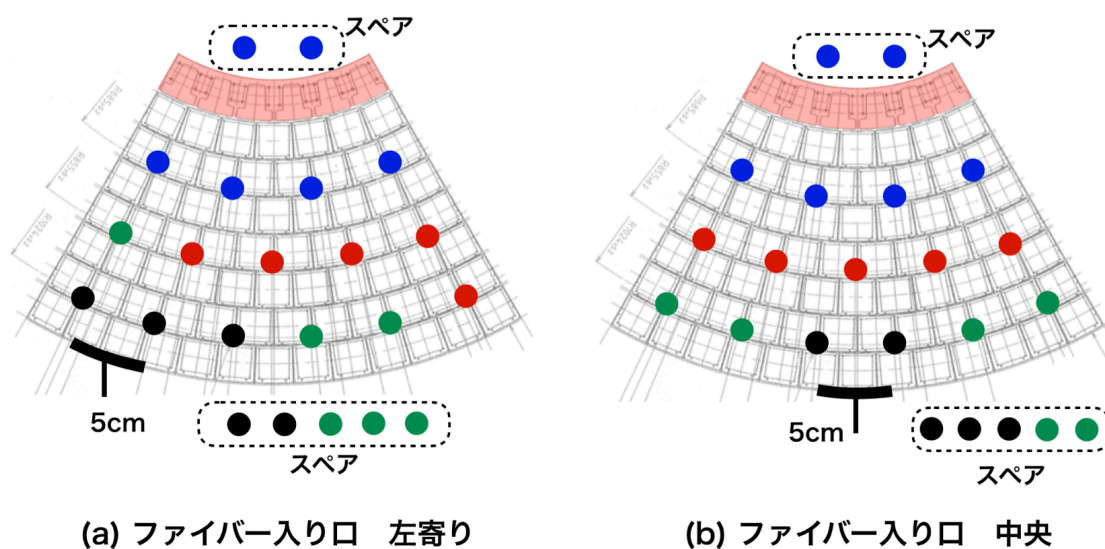


図 5.25 光ファイバー配置案。黒:No,1 ~ 5、緑:No,6 ~ 11、赤:No,12 ~ 16、青:No,17 ~ 22 を表している。

第 6 章

ARICH 建設状況

以下では、ARICH の主な構成要素である光検出器、シリカエアロゲル、読み出し回路の量産状況についてまとめる。また、各構成要素の構造体へのインストール状況と宇宙線を用いた性能評価試験について紹介する。

6.1 Aerogel RICH 検出器開発の現状

構成要素の量産状況

光検出器 HAPD

HAPD は実機搭載される 420 台と予備の 30 台、計 450 台が量産される。量産は 2013 年 9 月より浜松ホトニクス (株) で行われ、現在では全ての生産が終了している。生産された HAPD は浜松ホトニクスでの性能評価に加えて KEK でも順次性能評価試験を行い、性能ごとに選定された。

エアロゲル

エアロゲルの開発は千葉大学のグループが行っている。製造手法の改良によって屈折率や透過率などの要求性能 (表 6.1) を満たし、かつ大型 ($18 \times 18 \times 2 \text{ cm}^3$) のシリカエアロゲルタイルの生産が可能となった。実機には 124 箇所の設置フレームに 2 枚ずつ搭載するため 248 枚、予備を含めて計 350 枚以上のエアロゲルタイルが必要である。現在までに量産、性能評価は共に完了している。

表 6.1 量産版エアロゲルのパラメータ

	上流	下流	備考
屈折率	$n_1 = 1.045$	$n_2 = 1.055$	$0.008 < n_2 - n_1 < 0.012$
透過長	30 ~ 35 mm	40 ~ 45 mm	波長 400 nm の場合

読み出し回路

Flont-end board、Marger board 共に量産は全て完了し、全て正常に動作することが確認されている。

ARICH 本体への構成物のインストール

ARICH は 2017 年春に予定されている Belle II 測定器へのインストールへ向けて、建設作業が進められている。シリカエアロゲルについては 248 枚全てのインストールが完了し、現在は HAPD と読み出し回路のインストールが随時行われている。

HAPD は Front-end board と接続した状態 (HAPD モジュール) でインストールされ、現在は ARICH の 1/3 に当たる 2 セクター分 (140 台) のインストールが完了している。これら HAPD モジュールの設置が完了したセクターの内、1 セクターには Front-end board の背面に Merger board が設置されており、配線などについての確認が成されている。もう一方のセクターでは宇宙線を用いた性能試験のため、外部からの光を遮蔽できるように仕切りやカバーが取り付けられ、一部の HAPD がデータ読み出しを行える状態にまで組み上げられている。宇宙線試験の詳細については、第 5 章で述べる。HAPD モジュールが ARICH 構造体に設置された現在の様子を図 6.1 に示す。

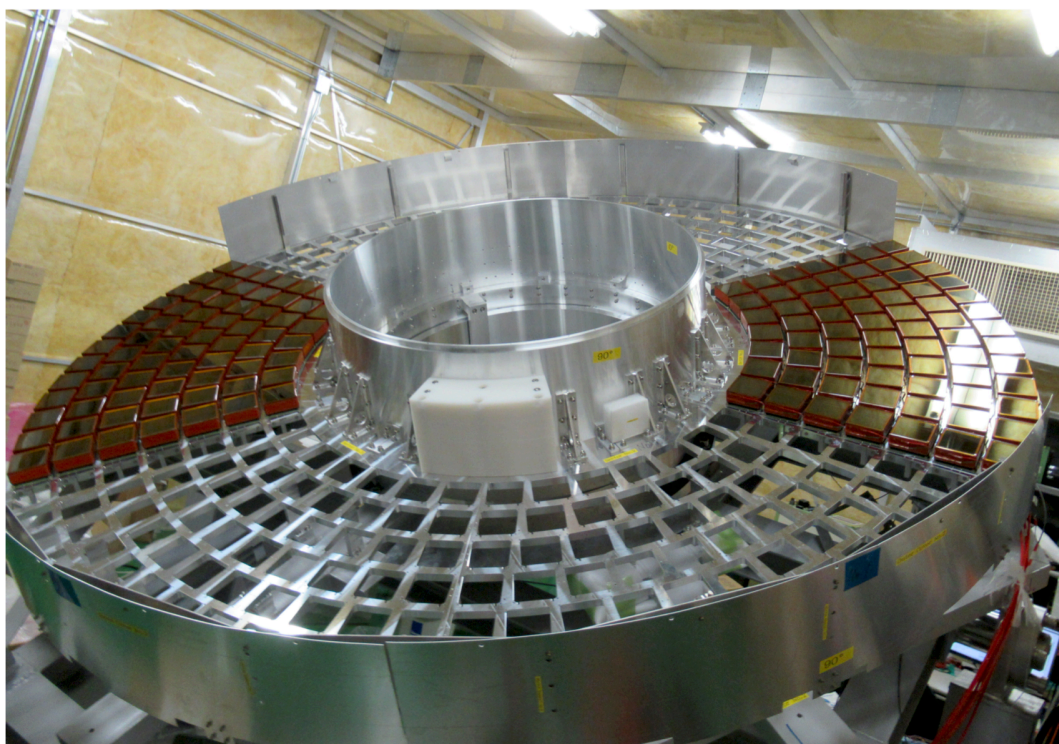


図 6.1 KEK で建設が進む ARICH の様子。2 セクター分の HAPD の設置が完了している。

6.2 宇宙線試験

モニターシステム実装試験と並行して行われた宇宙線を用いた ARICH の最終的な総合動作試験について紹介する。宇宙線由来の Cherenkov 光をリングイメージとして観測することができるかを確認することで、データ収集システム及び各種パラメータの妥当性を評価した。

宇宙線トリガー

図 6.2 に宇宙線トリガーシステムの概要図を示す。暗箱上 (エアロゲル直上) に設置した 2 つのシンチレーションカウンターからの信号を利用する。2 つのシンチレーションカウンターで検出された信号のコインシデンスを取ることで、2 つのシンチレーターを通過した宇宙線の飛来時刻を知ることが可能となる。宇宙線試験時はこのコインシデンス信号をトリガーとして利用する。シンチレーションカウンターは PMT とプラスチックシンチレーター (有効面積: $7 \times 7 \text{ cm}^2$) で構成されたものを使用し、約 12 cm 離して設置した。



図 6.2 右図は宇宙線試験時の外観。左図は宇宙線トリガーの概要図。

宇宙線の Cherenkov 光観測

宇宙線による Cherenkov 光は発生から検出されるまでの時間がモニター光とは異なる。そのため、ASIC パラメータである `hdcycle`, `trgdelay` もずれることが考えられ、宇宙線試験用パラメータを調べた。モニターシステムの際と同様に、信号が 1 ~ 4 bit のいずれにカウントされているかを確認し、適切な値に調整した。その結果、「`hdcycle = 8`, `trgdelay = 3`」という値に決定し、測定を行った。図 6.3 に宇宙線トリガーで取得したデータから得られたヒットパターンを示す。この結果より、各 HAPD モジュールで取得したデータのイベントナンバーがずれていないことが確認できる。また、モニターシステムによって決定した閾値電圧も適切であることがわかる。

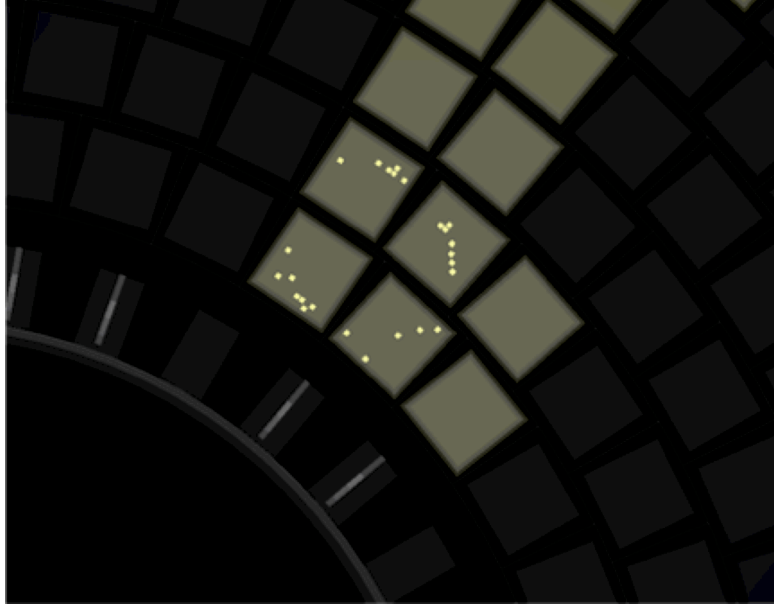


図 6.3 ARICH の一部を使った宇宙線観測試験のイベントディスプレイの例。この例は宇宙線による Cherenkov 光が綺麗にリング状に観測できた最初の観測イベントである。

第7章

結論

Belle II 実験は高エネルギー加速器研究機構 (KEK) にある電子・陽電子非対称エネルギー衝突型加速器 SuperKEKB を用いた大規模素粒子実験である。検出器・加速器のアップグレードによって Belle 実験の 50 倍に匹敵するルミノシティを達成し、新物理事象の探索を主な目的としている。Belle II 測定器に搭載され、Endcap 部での粒子識別を担う検出器が Aerogel RICH 検出器 (ARICH) であり、現在開発が進められている。ARICH は荷電粒子から放出された Cherenkov 光を光検出器によって二次元リングイメージとして観測することで粒子識別を行う。よって、粒子識別性能を維持するためには光検出器の定期的な動作確認が不可欠である。

本研究では、ARICH に使用される光検出器 HAPD のためのモニターシステムの開発を行った。ARICH モニターシステムでは光ファイバーから輻射体に LED 光を照射し、その際輻射体で散乱された光子を利用する。モニターシステムの構成要素の評価試験として光ファイバーバンドルの性能評価を行った。その結果、光ファイバーごとの光量のばらつきが 10% 以下、光拡散レンズの開口数 $NA = 0.4$ (拡散角: 47°) 相当と設計値通りの結果が得られ、問題がないことを確認した。また、モニターシステムの試作機を用いたモニター方法の原理検証を行うことで、モニタリングに十分な光量が光ファイバーから 25 cm 程度まで拡散されることを確認した。HAPD からの散乱光子信号を用いての HAPD 全チャンネルの生死判定・ノイズレベル・増幅率といった基本性能の測定方法を確立し、長期的な同時モニタリングが可能であることを確認した。

さらに、現在建設中である ARICH 構造体へ一部モニターシステムを実装し、評価試験を行った。その結果、散乱光分布について実機内においても試作機の結果と同様の分布を取ることを確認した。また、モニターシステムを利用し、実機に組み上げたシステムの健全性の確認や各種パラメータの設定が可能であることも確認でき、モニターシステムの試験と並行して行った宇宙線試験でも活用されている。

今後は ARICH 全体へのモニターシステムの拡張と実機での増幅率測定及び運用方法の確立を行っていく予定である。また、ARICH の建設作業や宇宙線を用いた性能評価試験も並行して継続し、2017 年夏の Belle II 測定器へのインストール及び実験の開始に向けて準備を進める。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々にご指導とご協力いただきましたこと、ここに深く感謝の意を申し上げます。首都大学東京の住吉孝行教授には Belle II 実験に参加させていただき、国際会議への出席や海外の研究者の方々に関わる貴重な機会を与えて下さったことに深く感謝申し上げます。住吉孝行教授をはじめ、角野秀一准教授、汲田哲郎助教には素粒子実験について様々な知識をご教授いただき、学会発表資料や本修論に対して助言・添削していただいたこと、誠に感謝致します。松原綱之特任准教授、千葉雅美客員助教、浜津良輔客員准教授は他実験グループながら、様々な面でご指導をいただきました。今野智之客員研究員、岩田修一客員研究員には研究方針や解析技術に関する丁寧なご指導、発表資料等への様々なアドバイスや添削作業など、多大な時間を割いてご協力いただいたことに大変感謝しております。研究以外の場面でも多大なるご支援をいただき、ありがとうございました。皆様のご指導・ご協力がなければ、本論文を書き上げることはできませんでした。深く感謝申し上げます。

研究室の同期である米永匡伸君、町田篤志君、伊藤隆晃君とは学部生時代から共に研究に励み、学業に限らず様々な面で協力し合えたことで学生生活を有意義に過ごすことができました。特に米永匡伸君とは同じ ARICH グループに所属し、研究活動や数々の出張を共にできたことで、それらがより楽しく、充実したものとなりました。心より感謝致します。

また、高エネルギー加速器研究機構の足立一郎准教授、西田昌平准教授をはじめ、Belle II 実験 ARICH グループの共同研究者の方々に感謝申し上げます。足立一郎准教授には研究面でのご指摘やアドバイスをいただき、国際学会に参加した際にも大変お世話になりました。西田昌平准教授には現場での作業やミーティングを通して丁寧にご指導していただき、深く感謝申し上げます。

新潟大学の遊佐洋右助教、小川和也君、吉澤司人君、首都大学東京の野口光太君、総研大の金道玄樹君、東京理科大学の町田聖寛君には研究を進める上で大変お世話になりました。特に同期である小川和也君、金道玄樹君には研究会や学会など様々な場面で支えていただきました。首都大学東京の米永匡伸君を含め、ARICH グループで共に研究をしてきた同期とは進む道が異なりますが、今後のご活躍を心より期待しております。

最後になりますが、本研究に携わり、やり遂げられるよう経済面・精神面で支えていただいた両親に感謝申し上げ、謝辞とさせていただきます。

参考文献

- [1] A. Abashian et al. [Belle Collaboration], Nucl. Inst. Meth. A 479, 117 (2002).
- [2] M. Kobayashi and T. Maskawa. “CP-Violation in the Renormalization Theory of Weak Interaction”, Prog. Theor. Phys. 49(1973), pp.552-657
- [3] T. Abe et al. [Belle II Coraboration], “Belle II Technical Design Report”, arXiv:1011.0352 [physics.ins-det] [Search in SPIRE].
- [4] 山田作衛他編, “素粒子物理学ハンドブック”, 朝倉書店 (2010), [ISBN 978-4-254-13100-0 C 3042]
- [5] A. Abashian et al. “The Belle Detector”, Nucl. Inst. Meth. A 479 (2002) 117
- [6] M.H.R Khan et al. “The monitoring system for the aerogel Cherenkov counter of the BELLE detector”, arXiv:9803027v1 [hep-ex].
- [7] A. I. Sanda and S. Suzuki, “B PHYSICS: Physics Beyond the Standard Model at the B Factory”, (World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1995), [ISBN 981-02-2224-6]
- [8] K. Abe et al. [Belle II Coraboration], “Observation of Mixing-induced CP Violation in the Neutral B Meson System”, arXiv:0202027v3 [physics.ins-det].
- [9] I.Adachi et al. “Precise measurement of the CP violation parameter $\sin 2\phi_1$ in $B^0 \rightarrow (c\bar{c})K^0$ decays”, Phys. Rev. Lett. 108, 171802 (2012), arXiv:1201.4643 [hep-ex].
- [10] CKM fitter group web site, http://ckmfitter.in2p3.fr/www/results/plots_ichep16/ckm_res_ichep16.html
- [11] [HFAG], <http://www.slac.stanford.edu/xorg/hfag/triangle/summer2014/index.shtml>
- [12] [CKM fitter Group], http://ckmfitter.in2p3.fr/www/results/plots_eps15/ckm_res_eps15.html
- [13] [SuperKEKB], <http://www-superkekb.kek.jp/>
- [14] Moser H. G. “The Belle II DEPFET pixel detector”, Nucl. Inst. Meth. A831 (2016) pp.85-87
- [15] K. Adamczyk et al. “Belle II silicon vertex detector”, Nucl. Inst. Meth. A831 (2016) pp.80-84
- [16] N. Taniguchi et al. “All-in-one readout electronics for the Belle-II Central Drift Chamber”, Nucl. Inst. Meth. A732 (2013) pp.540-542

- [17] K. Matsuoka et al. [Belle II PID Group] "Design and performance study of the TOP counter", Nucl. Inst. Meth. A732 (2013) pp.357-360
- [18] [Belle-ECL] "Electromagnetic calorimeter for Belle II", doi:10.1088/1742-6596/587/1/012045
- [19] E. Tarkovsky. "Performance of a scintillating strip detector with G-APD readout", Nucl. Inst. Meth. A628 (2011) pp.372-375
- [20] Timofey Uglov. "SiPM application for K_L/μ detector at Belle II", International Conference on New Photo-detectors, PhotoDet2015
- [21] <http://www.jahep.org/hepnews/2014/14-3-2-BelleIIDAQ.pdf>
- [22] 岩田修一 首都大学東京大学院 理工学研究科 修士論文 (2010)
- [23] S. Iwata "Development of the Aerogel RICH counter for a super B-factory experiment"
- [24] 吉田圭祐 首都大学東京大学院 理工学研究科 修士論文 (2014)
- [25] 片浦隆介 新潟大学大学院 自然科学研究科 数理物質科学専攻 修士課程 (2015)
- [26] 小林哲也 新潟大学大学院 自然科学研究科 数理物質科学専攻 修士課程 (2015)
- [27] T. Iijima et al. "A novel type of proximity focusing RICH counter with multiple refractive index aerogel radiator", Nucl. Inst. Meth. A548 (2005) pp.383-390
- [28] HAPD 仕様書
- [29] H.Kakuno et al. "Readout ASIC and electronics for the 144ch HAPD for Aerogel RICH at Belle II", Nucl.Instrum.Meth. A766 (2014) 225-227
- [30] ARICH 用光ファイバー仕様書：株式会社フジクラ
- [31] LED 光源 (NSPB300B) 仕様書： <http://docs-asia.electrocomponents.com/webdocs/13b6/0900766b813b691a.pdf>

付録

7.0.1 ASIC(SA03) パラメータ

ASIC はアナログ処理を行う上での回路パラメータを 2 種類備えている。1 つは ASIC の全 36 チャンネルで共通に設定される「グローバルパラメータ」、もう 1 つが各チャンネル毎に設定が可能である「チャンネルパラメータ」である。これらのパラメータはデジタルスイッチング回路によって設定される。この 2 種類を設定するために 2 種類の設定回路が存在し、グローバルパラメータ 設定回路は 1 基、チャンネルパラメータ設定回路は全チャンネル毎に搭載される。表 7.1、表 7.2 に設定可能なパラメータをまとめる。パラメータの略称、機能、設定スイッチ (SW) のビット数を表している。

表 7.1 Frontend board の ASIC(Global)

パラメータ名	使用ビット	機能
PHASECMPS	[1:0]	位相補償用帰還容量の設定
GAIN	[3:2]	増幅率の設定 (3=min,0=max)
SHAPINGTIME	[5:4]	波形整形の時定数の設定 (0=min,3=max)
COMPARATOR	[6]	比較器の選択 (0=リーディング型,1=ゼロクロス型)
VRDRIVE	[14:7]	比較器出力回路の調整
MONITOR	[16:15]	モニターする信号の選択
ID	[25:17]	チップ識別子 (設定不可、読み出し専用)

表 7.2 Frontend board の ASIC(Channel)

パラメータ名	使用ビット	機能
DECAYTIME	[2:0]	増幅器出力信号の減衰時間の設定
OFFSET	[6:3]	オフセット粗調整
FINEADJ_UNIPOL	[10:7]	オフセットの微調整 (UNIPOL)
FINEADJ_DIFF	[14:11]	オフセットの微調整 (DIFF)
-	[15]	reserved
TPENB	[16]	テストパルスの使用許可 (1=不可,0=可)
KILL	[17]	チャンネルの使用許可 (1=不可,0=可)

7.0.2 Merger board

Merger board は最大 6 台の Front-end board から送られてくるデジタル信号を圧縮しデータ収集システムに転送する。Merger board によりデータ量の圧縮とケーブル数の削減が可能となる。図 7.1 に Merger board の外観を示す。

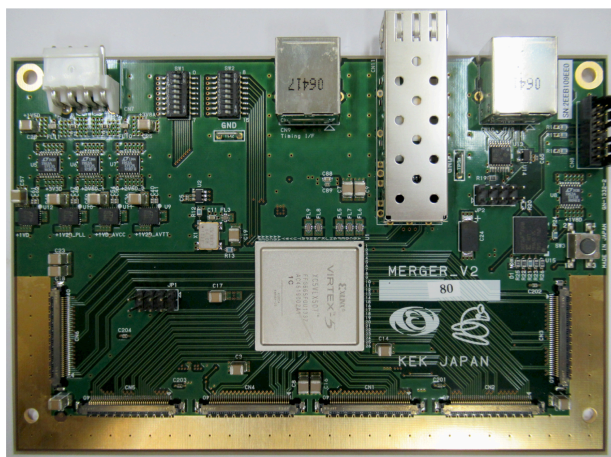


図 7.1 Merger board の外観図。