

2016 年度 修士学位論文

**Belle II 実験 Aerogel RICH 検出器のための
光検出器制御システムの開発**

2017 年 1 月 10 日

首都大学東京大学院 理工学研究科 物理学専攻
博士前期課程 2 年 15879336

米永匡伸

概要

高エネルギー加速器研究機構で行われる Belle II 実験は、前身の Belle 実験に比べ 50 倍もの積分ルミノシティでの大統計を用いて標準模型を超える新物理現象の探索を行う実験である。Belle II 検出器は 7 つの検出器から成り、Aerogel RICH(Ring Imaging Cherenkov, ARICH) 検出器は Belle II 実験において、エンドキャップ部における荷電 π/K 中間子の識別を担う。ARICH 検出器は輻射体であるエアロゲルと光検出器 HAPD(Hybrid Avalanche Photo Detector) の 2 層構造になっており、荷電粒子が輻射体を通過する際に円錐状に発生するチェレンコフ光を後段の HAPD で 2 次元のリングイメージとして観測し、その放射角を再構成することで粒子の識別を行う。本研究では専用の電源管理システム及びデータ読み出し系の制御システムの開発を行った。

HAPD 1 台の動作には光電子加速用電圧 (-8500 V)、APD 逆バイアス電圧 ($\sim 350 \text{ V} \times 4$)、ガード電極 (175 V) の 3 種類計 6 系統の異なる電圧供給が必要であり、ARICH 検出器に使用する 420 台の HAPD に電圧供給を行う専用の電源装置が必要となる。また HAPD から出力される信号を処理し、チェレンコフ光のヒットパターンを検出するための専用の読み出し回路の開発が行われ、それらは Belle II 実験データ収集フレームワークである Belle2Link を用いて制御される。多数の HAPD を使用するため、電源及び読み出し回路も多数の装置から成っておりその管理は極めて複雑であり、制御ソフトウェアを含むこれらの管理システムの開発は ARICH 検出器の安定した運転については物理データの品質維持における最重要課題となる。本研究で開発した制御システムは 2016 年夏から ARICH 検出器建設時に行われた宇宙線を用いた性能試験ですでに使用されており、その実用性を確認することに成功した。

一方で宇宙線による荷電粒子のリングイメージ検出試験は物理実験に使用する ARICH 検出器実機を用いて初めて荷電粒子の観測を行ったものであり、検出器の特性を実験開始に先立ち理解するため極めて重要な試験と言える。本研究では収集したデータのデータフォーマットやデッドチャンネルの有無の確認から宇宙線荷電粒子によるリングイメージの検出など検出器の動作検証を行った。

本論文では高圧電源装置の性能評価試験の結果と高圧電源及びデータ読み出し制御システムの開発について解説し、宇宙線を用いた ARICH 検出器の性能評価試験と物理測定開始に向けた展望を述べる。

目次

第 1 章	序論	11
1.1	B 中間子の物理・B ファクトリー実験	11
1.1.1	CP 対称性の破れの検証	11
1.1.2	B 中間子の物理	12
1.2	Belle II 実験における新物理事象探索	15
1.2.1	$b \rightarrow s\gamma$ 崩壊	16
1.3	本研究の目的	17
第 2 章	Belle II 実験	19
2.1	SuperKEKB 加速器	19
2.2	Belle II 検出器	20
2.2.1	VXD	22
2.2.2	CDC	23
2.2.3	TOP	24
2.2.4	Aerogel RICH	25
2.2.5	ECL	26
2.2.6	KLM	26
2.2.7	DAQ	27
第 3 章	Aerogel RICH 検出器	29
3.1	エンドキャップ部の粒子識別への性能要求と制限	29
3.2	識別原理と構造	29
3.3	ARICH 検出器の構成要素	32
3.3.1	輻射体	32
3.3.2	光検出器	34
3.3.3	読み出しシステム	36
3.4	ARICH 検出器の建設	38
第 4 章	光検出器用電源装置の性能評価	42
4.1	電源装置への性能要求	42
4.1.1	電源装置の基本性能	42

4.1.2	電源装置の制御機能	44
4.2	電源装置	45
4.3	電源装置の性能評価試験	47
4.3.1	電圧上昇・下降速度	48
4.3.2	トリップ機能	49
4.3.3	インターロック機能	50
4.3.4	HAPD への電圧印加	52
4.3.5	出力電圧安定性	54
4.3.6	電源装置の性能評価試験のまとめ	57
第 5 章	光検出器用電源制御システムの開発	58
5.1	光検出器用電源制御システムの概要	58
5.2	多数チャンネルの操作	60
5.3	電圧印加の自動化	60
5.4	電圧印加の自動停止機能	62
5.5	データベースを用いたパラメータの管理	64
第 6 章	光検出器用読み出し制御システムの開発	66
6.1	光検出器用読み出し制御システムの概要	66
6.2	パラメータの設定	68
6.3	モニターシステム用のトリガー	73
6.4	キャリブレーション	74
第 7 章	宇宙線を用いた ARICH 検出器性能評価	78
7.1	宇宙線試験の概要	78
7.2	光検出器制御システムの運用	79
7.2.1	光検出器用電源制御システム	80
7.2.2	光検出器読み出し制御システム	80
7.3	データ収集に向けた準備	81
7.3.1	オフセット、しきい値電圧の調整	81
7.3.2	トリガータイミング調整	84
7.4	取得データの解析	84
7.4.1	basf2 フレームワークを用いた解析	85
7.4.2	データフォーマットの確認	85
7.4.3	リングイメージの再構成	85
7.4.4	ARICH の性能評価	86
第 8 章	ARICH 開発の今後の予定	88
8.1	ARICH 全体の予定	88
8.2	インストール後の宇宙線試験	89

8.3	物理測定	89
第 9 章	結論	90
	謝辭	91
	参考文献	92

目次

1.1	高エネルギー加速器研究機構の鳥瞰図	11
1.2	非対称エネルギーでの B 中間子の生成とその崩壊の概念図。	12
1.3	$B^0 - \bar{B}^0$ 混合を示す Feynman diagram	13
1.4	$B^0 \rightarrow J/\psi K_S$ への崩壊の Feynman diagram。	14
1.5	mixing-include CP violation の概念図	15
1.6	$B^0 \rightarrow J/\psi K^0$ における崩壊時間 Δt の分布とその結果から得られる CP 非対称度	15
1.7	標準模型での $b \rightarrow s\gamma$	16
1.8	新物理での $b \rightarrow s\gamma$	16
2.1	SuperKEKB 加速器	20
2.2	Belle II 検出器	21
2.3	Belle II 検出器の断面図	22
2.4	VXD 検出器の完成イメージ図	23
2.5	VXD 検出器に使用されるシリコン検出器の構造	23
2.6	CDC の断面図	24
2.7	(a)DIRC の検出原理。(b)TOP モジュールの構成	25
2.8	(a) クォーツ。(b)MCP-PMT	25
2.9	ECL の構成	26
2.10	KLM の設置図	27
2.11	Belle II 実験全体でのデータの流れ	27
3.1	チェレンコフ光の発生原理	30
3.2	ARICH 検出器の基本原理	31
3.3	ARICH 検出器の構造	31
3.4	ARICH 検出器の各構成要素の配置	32
3.5	シリカエアロゲルの構造	33
3.6	シリカエアロゲル	33
3.7	デュアルレイヤーの概念図	33
3.8	チェレンコフ放射角の分布	34
3.9	HAPD の写真	35
3.10	HAPD の寸法	35

3.11	HAPD の動作原理	36
3.12	APD での増幅原理	36
3.13	Frontend board	37
3.14	Merger board	37
3.15	Frontend board での信号読み出しの流れ	38
3.16	ARICH のデータ読み出しの流れ	38
3.17	HAPD モジュール	39
3.18	HAPD の配置番号の対応表	40
3.19	構造体へのインストール	41
4.1	HV の増幅率	44
4.2	Bias の増幅率	44
4.3	CAEN 電源 (前面)	45
4.4	CAEN の電源 (背面)	45
4.5	電源装置試験のセットアップ	47
4.6	電源装置試験のセットアップの写真	48
4.7	HV モジュールのトリップ (改善前)	49
4.8	HV モジュールのトリップ (改善後)	50
4.9	Guard-Bias モジュールのトリップ	50
4.10	Guard-Bias のインターロック	51
4.11	HV モジュールのインターロック	52
4.12	HAPD への電圧印加試験のセットアップ	53
4.13	HAPD への電圧印加試験のセットアップ写真	53
4.14	LED 光入射時の pocket MCA による波高値の分布 (標準の電圧)	54
4.15	LED 光入射時の pocket MCA による波高値の分布 (最大電圧)	54
4.16	HV、Guard-Bias モジュールの出力電圧安定性	55
4.17	HV の安定性	56
4.18	Guard の安定性	56
4.19	Bias-A の安定性	56
4.20	Bias-B の安定性	56
4.21	Bias-C の安定性	56
4.22	Bias-D の安定性	56
5.1	光検出器用電源制御システムの概念図	59
5.2	電源制御用 GUI	60
5.3	Belle II 実験の電源ステイトダイアグラム	61
5.4	電圧印加の自動化の図	62
5.5	自動停止の図 (HV)	63
5.6	自動停止の図 (Bias)	64

5.7	自動停止の図 (Guard)	64
6.1	ARICH の光検出器読み出し制御システムの概念図	67
6.2	ARICH 用読み出し制御 GUI	68
6.3	パラメータ管理用 GUI	68
6.4	トリガー分配システムの写真	74
6.5	トリガー分配システムの概念図	74
6.6	スレッシュホールドスキンの概念図	76
6.7	スレッシュホールドスキンによるデータ収集の流れ	77
7.1	宇宙線試験の写真	79
7.2	ARICH の slow control system の概念図	80
7.3	オフセット調整前の結果	81
7.4	オフセット調整後の結果	82
7.5	光入射時のスレッシュホールドスキンの結果	83
7.6	光入射時のスレッシュホールドスキンの結果 (1 チャンネル)	83
7.7	閾値電圧を固定した際の LED 光によるヒット分布	83
7.8	ノイズデータ取得時のヒットタイミングの分布	84
7.9	宇宙線データ取得時のヒットタイミングの分布	84
7.10	basf2 の概念図	85
7.11	取得したリングイメージ	86
7.12	取得データと予想されるリング半径	87
8.1	ARICH の今後の予定	88

表目次

1.1	X_s の終状態の例	17
2.1	SuperKEKB 加速器と KEKB 加速器の主なパラメータの比較	20
3.1	主要な物質の屈折率	33
3.2	HAPD の基本性能	36
4.1	HAPD 用電源の性能要求	43
4.2	CAEN 電源モジュールの基本性能	46
4.3	CAEN 電源クレートの基本性能	46
4.4	CAEN 電源の各パラメータ	46
4.5	CAEN 電源のチャンネルステイト	47
4.6	HV モジュールでの電圧上昇・下降速度	49
4.7	Guard-Bias モジュールでの電圧上昇・下降速度	49
4.8	ノイズ量と増幅率の変化	57
5.1	電圧印加の状況	62
5.2	データベースに保存するパラメータ	65
6.1	Merger board のパラメータ	69
6.2	Frontend board の FPGA のパラメータ	72
6.3	Frontend board の ASIC のグローバルパラメータ	73
6.4	Frontend board の ASIC のチャンネルパラメータ	73

第 1 章

序論

茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構 (KEK、図 1.1) で行われた Belle 実験 [1] は、CP 対称性の破れの観測を始めとする今日の素粒子物理学における標準模型の構築に多大な貢献を果たしてきた。しかし宇宙観測などの結果からダークマターやダークエネルギーの存在など標準模型では説明できない観測結果が得られ、素粒子実験においても標準模型を超える新物理事象の探索が強く期待されている。Belle II 実験 [2] は検出器・加速器の双方を Belle 実験から改良し、より大統計・高精度の測定を実現することで新物理事象の兆候を探索する実験であり、2017 年度の測定開始を目指して検出器の建設が進められている。この章では Belle II 実験の物理的な背景と新物理事象の寄与が期待される $b \rightarrow s\gamma$ 崩壊事象観測について説明する。



図 1.1 高エネルギー加速器研究機構の鳥瞰図

1.1 B 中間子の物理・B ファクトリー実験

1.1.1 CP 対称性の破れの検証

1964 年に J.W.Cronin、V.L.Fitch らによって、中性 K 中間子系において CP 固有状態の 1 つである K_L が CP 対称性により崩壊しないと考えられていた 2π (CP even) への崩壊をわずかに含むこ

とを観測し、世界で初めて CP 対称性の破れが観測された [3]。1973 年には小林・益川理論 [4] ではクォークにおける CP 固有状態と質量固有状態との変換行列である CKM 行列の中に複素位相が一つ以上含まれていれば CP 対称性が破れることを示した。特に b クォークに関する行列要素 (V_{tb}) が大きな値を持つことが示唆され、b クォークを含む B 中間子の CP 非対称度の測定を行うため Belle 実験や Babar 実験といった B ファクトリー実験 [5] が進められた。両実験は 1990 年代後半より建設が開始され、1999 年に共に実験を開始し、2001 年に世界で初めて小林・益川理論が実験的に証明することに成功した。Babar 実験は 2008 年、Belle 実験は 2010 年に実験終了となった。

1.1.2 B 中間子の物理

B ファクトリー実験では e^-e^+ の対消滅によって生じる $\Upsilon(4s) = (b\bar{b})$ の bottomonium 共鳴状態が $B^0\bar{B}^0$ に崩壊することを利用し B 中間子を生成する。電子・陽電子ビームの衝突エネルギーは重心系で $\Upsilon(4s)$ の質量 $10.58 \text{ GeV}/c^2$ になるように設定される。また B ファクトリー実験の特徴である非対称エネルギー衝突のため SuperKEKB 加速器では e^- は $7.0 \text{ GeV}/c$ 、 e^+ は $4.0 \text{ GeV}/c$ の運動量を持ち、生成された B 中間子対は $3.0 \text{ GeV}/c$ 程度の運動量を持って図 1.2 のように終状態へと崩壊していく。

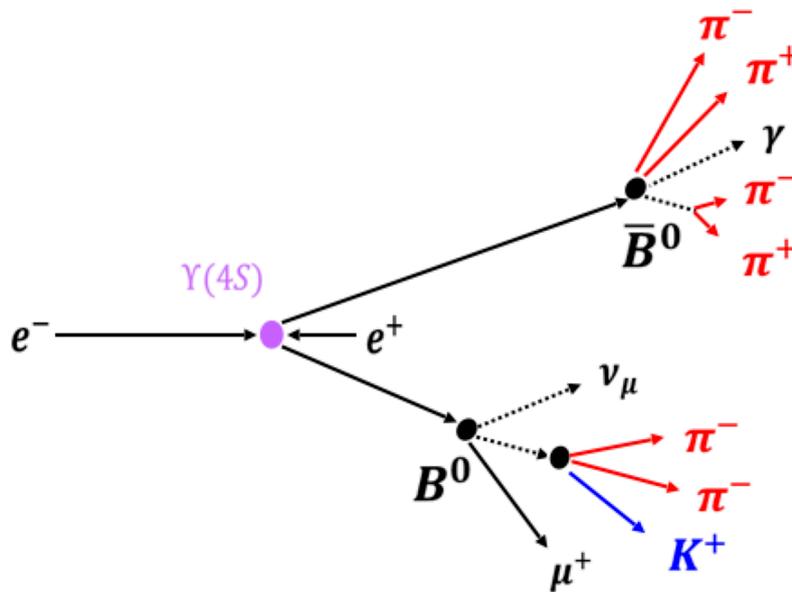


図 1.2 非対称エネルギーでの B 中間子の生成とその崩壊の概念図。

一方で中性 B 中間子と反中性 B 中間子は $B^0 - \bar{B}^0$ 混合 (mixing) により常に入れかわっている (図 1.3)。このような過程は box diagram と呼ばれる。

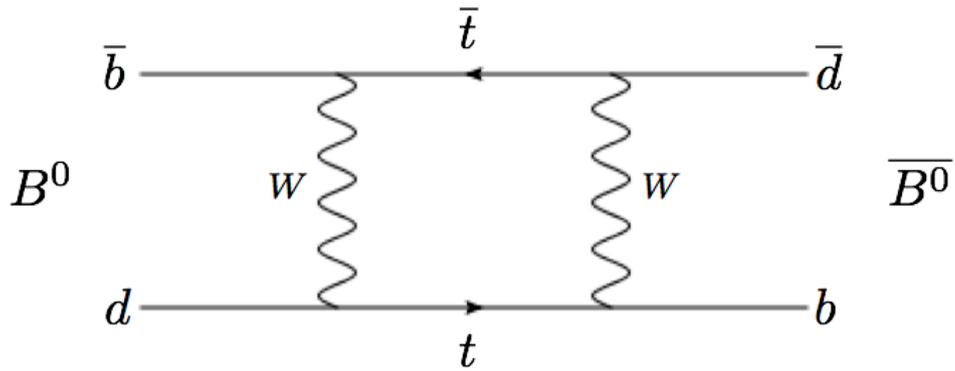


図 1.3 $B^0 - \bar{B}^0$ 混合を示す Feynman diagram

ここで B^0 から \bar{B}^0 も崩壊可能な状態として $J/\psi K_S$ への崩壊を考える。 $J/\psi K_S$ への崩壊は図 1.4 のような tree diagram を経て起こり、 B^0 は 2 種類の経路により $J/\psi K_S$ へ崩壊することが可能である。1 つ目は図 1.4 上図のようにそのまま崩壊する過程であり、2 つ目は図 1.4 下図のように box diagram を介して崩壊する過程である。これらの 2 つの崩壊は終状態の粒子が等しく、終状態からは親粒子が B^0 か \bar{B}^0 かを同定することはできない。そこで親粒子を同定するために観測したい $J/\psi K_S$ へ崩壊する側 (signal side) ではなく、その反対側の崩壊が完全再構成できる時の崩壊 (tag side) を正確に観測することで tag side の親粒子を同定する。 B^0 と \bar{B}^0 は必ず対になっているため一方が B^0 と同定されれば、他方は必ず \bar{B}^0 となる。このような手法をフレーバータギングと呼ぶ。

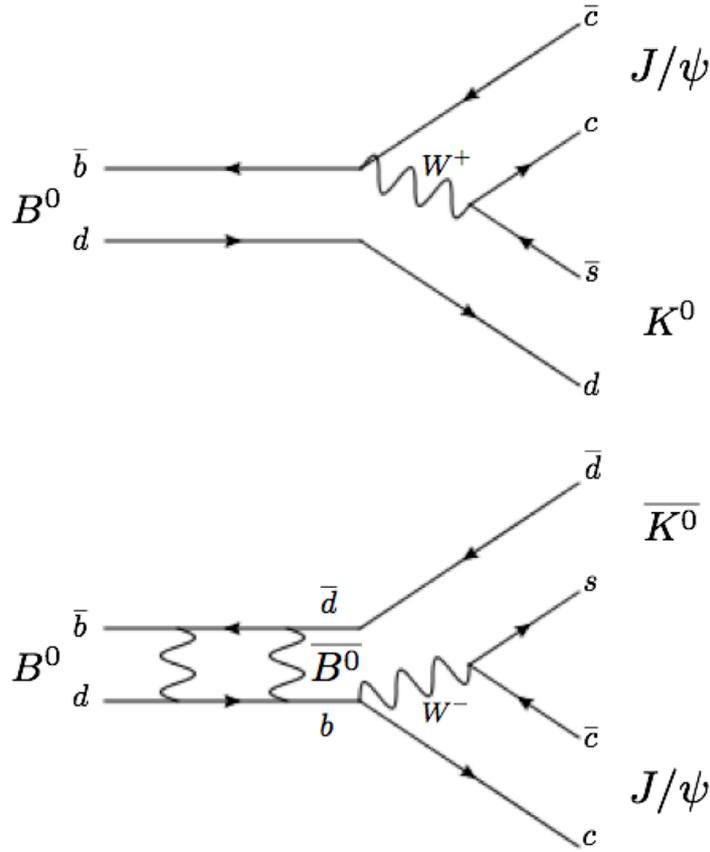


図 1.4 $B^0 \rightarrow J/\psi K_S$ への崩壊の Feynman diagram. 上図が B^0 からそのまま終状態へと崩壊するモード。下図が box diagram を経て $\overline{B^0}$ に遷移してから終状態へと崩壊するモード。 $K^0/\overline{K^0}$ は混合を起こし、 K_S または K_L になる。

図 1.5 のように 2 つの経路により同じ状態へ遷移する際には、 $B^0 - \overline{B^0}$ 混合により 2 つの経路間で干渉が起き、 B^0 中間子から崩壊する場合と $\overline{B^0}$ 中間子から崩壊する場合で崩壊確率が異なる。崩壊確率は崩壊時間差 $\Delta t = t_{sig} - t_{tag}$ を用いると式 1.1 で表される。

$$\Gamma(B^0 \overline{B^0} pair \rightarrow f_{sig}, f_{tag}) = \frac{e^{-\frac{|\Delta t|}{\tau}}}{4\tau} (1 + q(S \sin(\Delta m \Delta t) + A \cos(\Delta m \Delta t))) \quad (1.1)$$

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 $\overline{B^0}$ の質量差をそれぞれ示し、 S と A は CP violation parameter と呼ばれるもので標準模型におけるこのモード ($b \rightarrow c\bar{c}s$) では $S = -\xi_f \sin 2\phi_1$ 、 $A = 0$ である。また $J/\psi K^0$ への崩壊における CP 非対称度 A_{CP} は式 1.2 のように表される。

$$\begin{aligned} A_{CP}(\Delta t) &= \frac{\Gamma(\overline{B^0}(t) \rightarrow f_{CP}) - \Gamma(B^0(t) \rightarrow f_{CP})}{\Gamma(\overline{B^0}(t) \rightarrow f_{CP}) + \Gamma(B^0(t) \rightarrow f_{CP})} \\ &= -\xi_{CP} \sin 2\phi_1 \sin(\Delta m \Delta t) \end{aligned} \quad (1.2)$$

B^0 中間子、 $\overline{B^0}$ 中間子がそれぞれ $J/\psi K^0$ へ崩壊した際の崩壊時間分布が図 1.6 上図である。

$q = +1$ の赤いプロットが $\overline{B}^0 \rightarrow J/\psi K^0$ で、 $q = -1$ の青いプロットが $B^0 \rightarrow J/\psi K^0$ のデータである。その差を取ったものが図 1.6 下図である。

以下に $\sin 2\phi_1$ 、 A_{CP} の最新結果を示す [7]。

$$\begin{aligned}\sin 2\phi_1 &= 0.667 \pm 0.023(stat) \pm 0.012(syst) \\ A_{CP} &= 0.006 \pm 0.016(stat) \pm 0.012(syst)\end{aligned}$$

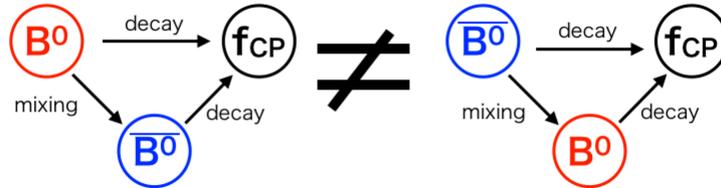


図 1.5 mixing-include CP violation の概念図。どちらも同じ終状態へと崩壊するモードであり、親粒子が B^0 と \overline{B}^0 で崩壊確率に差が生じるか実験的に観測する。

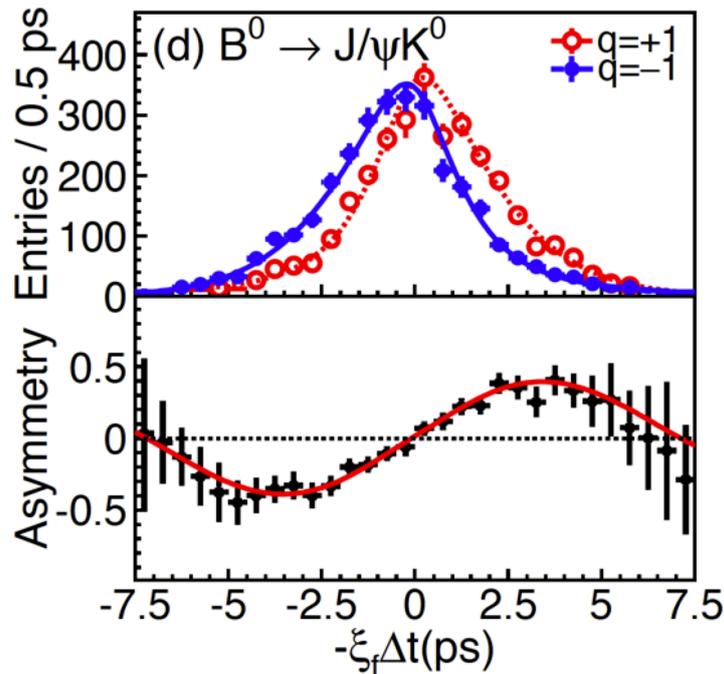


図 1.6 $B^0 \rightarrow J/\psi K^0$ における崩壊時間 Δt の分布 (上) とその結果から得られる CP 非対称度 (下)。青と赤の差を取ると \sin 曲線が得られ、その振幅が $\sin 2\phi_1$ に比例するため ϕ_1 を測定することができる [6]。

1.2 Belle II 実験における新物理事象探索

標準模型を超える新物理事象の探索には大きく分けて 2 種類の手法が知られている。一つ目は LHC 実験に代表される TeV スケールのエネルギー領域における粒子の生成・崩壊を観測し、これまでに観測できなかった TeV スケールの質量を持つ新粒子の直接的な発見を目指す実験であり、エネ

ルギーフロンティアと呼ばれる。他方は大統計の観測データを使って GeV スケールのエネルギーにおける標準模型の崩壊過程に含まれる新粒子の寄与を観測することで間接的に新粒子の存在を検証するルミノシティフロンティアと呼ばれる手法である。Belle II 実験もルミノシティフロンティア実験の一つであり、大統計の B 中間子対により Belle 実験などの測定精度を更新することで新粒子の寄与の発見を目指す。以下では Belle II 実験で期待されている新物理事象について紹介する。

1.2.1 $b \rightarrow s\gamma$ 崩壊

$b \rightarrow s\gamma$ 遷移は電荷が変化せず粒子のフレーバーのみが変化する Flavor Changing Neutral Current (FCNC) 過程である。標準模型においては tree diagram では禁止されており、loop を介した loop diagram により観測される (図 1.7)。荷電ヒッグスなどの新物理の粒子はこの loop における仮想粒子として現れるため (図 1.8)、崩壊分岐比の精密な測定により新粒子の寄与を検証することが可能である他、ハドロン相互作用の不定性が小さいため新物理への感度が高いとして期待されている。

$b \rightarrow s\gamma$ 遷移は $B \rightarrow X_s\gamma$ 崩壊中 (X_s はストレンジネスを一つ含む終状態の総称) として現れるため、Belle II 実験ではこれらの崩壊過程の検証を行う必要がある。 X_s の例を表 1.1 に示す。表 1.1 に示した終状態の例を含めた 38 通りの終状態の解析により式 1.3 の結果が得られた [8]。

$$\mathcal{B}(\bar{B} \rightarrow X_s\gamma) = (3.51 \pm 0.17 \pm 0.33) \times 10^{-4} \quad (M_{X_s} < 2.8 \text{ GeV}/c^2) \quad (1.3)$$

またこの結果から式 1.4 となり、これは標準理論での予言 ($(3.15 \pm 0.23) \times 10^{-4}$) とは 1.3σ のズレがあり [9]、さらなる精密測定が求められる。

$$\mathcal{B}(\bar{B} \rightarrow X_s\gamma) = (3.37 \pm 0.18 \pm 0.35) \times 10^{-4} \quad (E_\gamma > 1.6 \text{ GeV}) \quad (1.4)$$

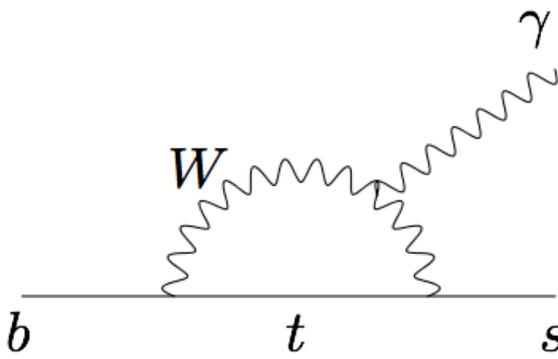


図 1.7 標準模型での $b \rightarrow s\gamma$ 遷移

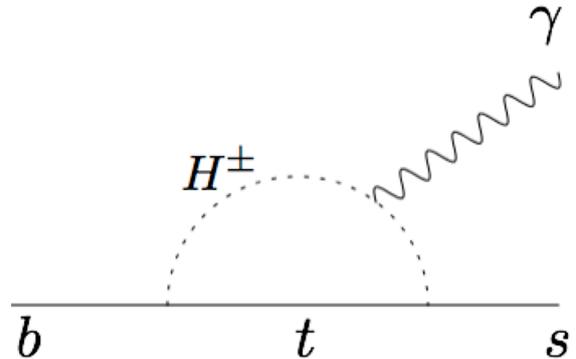


図 1.8 新物理での $b \rightarrow s\gamma$ 遷移

表 1.1 X_s の終状態の例。この例の他に $K3\pi$ モード、 $K4\pi$ モード、 $3K$ モード、 $3K\pi$ モードなどがある。

$K\pi$ モード	$K^+\pi^-$
	$K_S^0\pi^+$
	$K^+\pi^0$
	$K_S^0\pi^0$
$K2\pi$ モード	$K^+\pi^+\pi^-$
	$K_S^0\pi^+\pi^-$
	$K^+\pi^-\pi^0$
	$K_S^0\pi^+\pi^0$

1.3 本研究の目的

新物理事象探索のためには、フレーバータギングの精度向上や荷電 K 及び π 中間子を含む終状態への B 中間子の稀崩壊の効率的な再構成が必要であり、そのためには荷電 K/π 中間子を精度よく識別することが求められる。しかし、Belle 実験ではエンドキャップ部の粒子識別はフレーバータギングを優先し、 $2.0\text{ GeV}/c$ 以下の運動量領域に限定され、 B 中間子の稀崩壊による高運動量の K 中間子と π 中間子の識別は困難であった。しかしながら前述しているような新物理事象の探索には $3.5\text{ GeV}/c$ 以下の運動量領域まで識別を行う必要があり、Belle II 実験では新型粒子識別装置として Aerogel RICH(Ring Imaging CHerenkov, ARICH) 検出器の開発を行っている。ARICH 検出器は荷電粒子が輻射体を通過する際に発生するチェレンコフ光を光検出器により観測し、その発生パターンから粒子識別を行う。そのため、ARICH 検出器に使用する 420 台の光検出器の安定した動作の実現は検出器の性能を十分に発揮する上で必要不可欠な要素であり、また加速器や他の検出器・環境モニター類との連携は検出器の安定性を確保する上で欠かせない。しかし ARICH 検出器の開発ではこれまで数台程度の光検出器を同時に動作させるのみであり、このような大規模な電源供給を実現する専用の電源装置の開発、また Belle II 実験環境下での運用を想定した制御ソフトウェアの開発が実験開始に向けた緊急課題である。同様に光検出器の信号読み出しも数台程度の試験的な運用にとどまっており ARICH 検出器を Belle II 実験 DAQ システムの枠内で稼働させ、データ取得の管理を行う制御システムの構築が求められる。本研究では ARICH 検出器用光検出器の電源及びデータ収集制御システムを開発し、建設中の ARICH 検出器に組み込んだ上で宇宙線を用いた検出器の動作試験に運用することで、その制御システムの実用性を実証することを目的とした。

光検出器制御システムの開発

光検出器の制御は大きく 2 つの項目に分けられる。一つ目は電圧供給の制御である。光検出器に供給される電圧は直接増幅率やノイズに関係し、ARICH 検出器の性能に大きな影響を与えるため、安定した電圧の供給とその管理が求められる。また光検出器の故障を防ぐための保護機能の実装も長期間の運転には必要である。二つ目は読み出しの制御である。読み出し回路には非常に多くのパラメータが存在し、それらを適切な値に常に設定することがデータ品質維持のために必要となる。また定期

的にキャリブレーションを行い適切なパラメータの維持を行わなければならない。さらにこれらのシステムは効率的な運用、安全確保のため加速器や他検出器と連携したシステムの中で行う必要があり、Belle II 実験 DAQ システムの枠内での実装が求められる。

宇宙線を用いた検出器の性能評価

本測定に向けた ARICH 検出器の建設過程では Belle II 検出器へのインストールの事前試験として宇宙線を用いた性能試験を行った。試験には本研究で開発した制御システムを使用し ARICH 検出器を運用することで宇宙線データの取得を行うと共に、物理本測定に向けた複数台の制御や長時間の安定運用を含む本制御システムの実用性を検証した。

第 2 章

Belle II 実験

Belle II 実験では B 中間子の大統計かつ高精度測定の実現により標準模型を超える新物理の探索を行うことを主な目的とし、Belle 実験の 50 倍の統計量を達成するために加速器・検出器の双方の改良を行う。Belle 実験で使用した KEKB 加速器の後継である SuperKEKB 加速器ではビームサイズをナノメートルのレベルまで絞ることにより衝突頻度を増加させ、ピークルミノシティを 40 倍増強する。一方でルミノシティ増強の改良によってビーム散乱によるバックグラウンドも同様に増加することが予測される。Belle II 検出器は Belle 検出器から放射線耐性、バックグラウンド識別能力を強化し、さらに観測粒子の測定精度を向上させる新検出器である。この章では Belle II 実験に使用される SuperKEKB 加速器と Belle II 検出器について説明する。

2.1 SuperKEKB 加速器

SuperKEKB 加速器は前身の KEKB 加速器からアップグレードされた加速器であり、KEKB 加速器同様の電子・陽電子非対称エネルギー衝突型加速器である。SuperKEKB 加速器は KEKB 加速器の 40 倍のルミノシティを目指し、現在アップグレードが行われている。SuperKEKB 加速器の主な構成を図 2.1 に示す。SuperKEKB 加速器は非対称エネルギー衝突のため電子を 7 GeV まで加速させる High Energy Ring (HER) と陽電子を 4.0 GeV まで加速させる Low Energy Ring (LER) の 2 つのリングから構成されている。線形加速器 (LINAC) から入射された電子・陽電子はそれぞれのリングで加速され、Belle II 検出器が置かれた衝突点で交差する構造になっている。

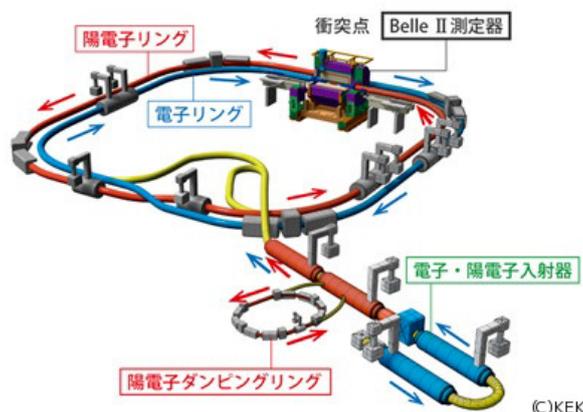


図 2.1 SuperKEKB 加速器

KEKB 加速器と SuperKEKB 加速器の主なパラメータの比較を表 2.1 に示す。SuperKEKB 加速器はルミノシティ向上のために電流を 2 倍に増強し、ビームサイズを 1/20 にまで小さくすることで KEKB 加速器に比べ 40 倍ものルミノシティを実現する。ビームサイズを小さくするとクーロン散乱により、ビーム中の電子・陽電子が互いに衝突・散乱する Touschek 効果が発生してしまう。陽電子が特に影響を受けやすいため、LER のビームエネルギーを KEKB 加速器の 3.5 GeV から 4.0 GeV にすることで対応している。これに伴い HER のビームエネルギーを 8.0 GeV から 7.0 GeV に変更し、 $\Upsilon(4s)$ の生成に必要なエネルギーを保っている。

表 2.1 SuperKEKB 加速器と KEKB 加速器の主なパラメータの比較

	KEKB	SuperKEKB
エネルギー (GeV)(LER/HER)	3.5/8.0	4.0/7.0
ξ_y	0.129/0.090	0.090/0.088
β_y^* [mm]	5.9/5.9	0.27/0.41
I[A]	1.64/1.19	3.6/2.62
Luminosity [$10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]	2.11	80

以上により、SuperKEKB 加速器は KEKB 加速器に比べ 40 倍である $800\text{nb}^{-1}\text{s}^{-1}$ ものルミノシティを目指す。また積分ルミノシティとしては KEKB 加速器により達成された 1ab^{-1} から 50 倍の 50ab^{-1} を目指す。

2.2 Belle II 検出器

Belle II 検出器は異なる目的を持った 7 つの検出器から成る複合型検出器である (図 2.2)。以降では各検出器の概要を述べる。衝突点を囲む様に設置される 6 層の半導体検出器からなる崩壊点検出器 (VerteX Detector、VXD) は内層 2 層のピクセル検出器 (PiXeI Detector、PXD) と外層 4 層のシリコンストリップ検出器 (Silicon strip Vertex Detector、SVD) から構成される。その外側をドリフトチェンバーによる粒子飛跡検出器 (Central Drift Chamber、CDC) がありバレル部、エンド

キャップ部に2種類の粒子識別装置 (Time Of Propagation counter、TOP / Aerogel Ring Imaging Cherenkov counter、ARICH) が設置され、これらの装置をソレノイドコイルが囲む。またその外部には γ 線のエネルギーを測定する電磁カロリメータ (Electromagnetic CaLorimeter、ECL) とミュー粒子・中性K中間子検出器 (K Long and Muon detector、KLM) が囲っている。Belle II 検出器の詳細な構成を図 2.3 に示す。

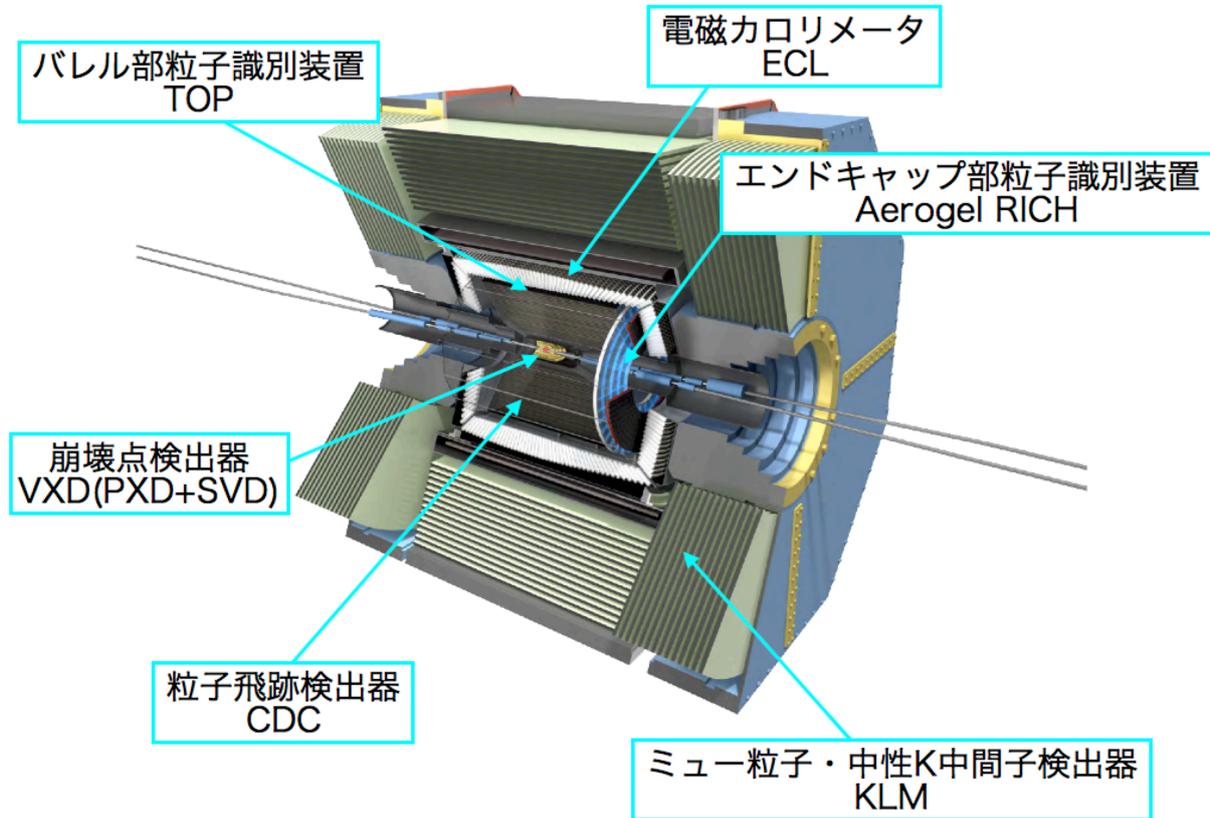


図 2.2 Belle II 検出器

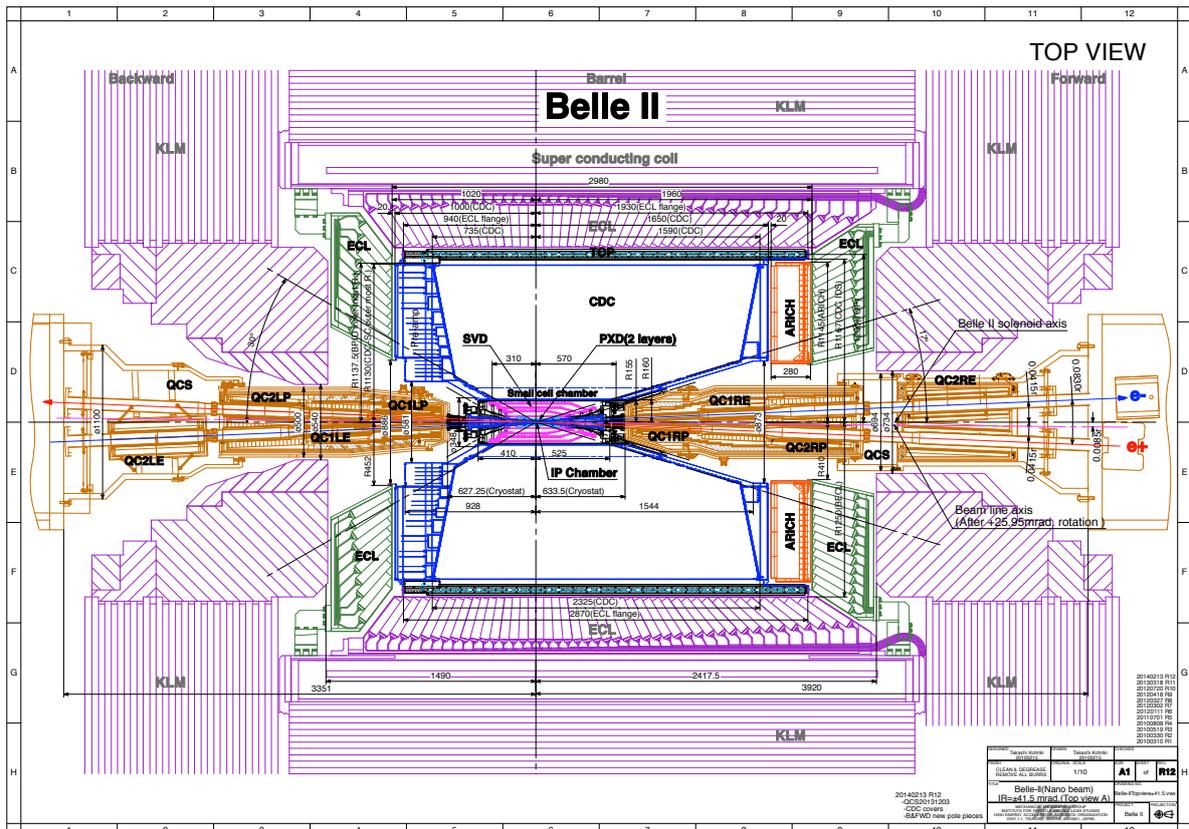


図 2.3 Belle II 検出器の断面図

2.2.1 VXD

Belle II 検出器の最内層にあたり衝突点の最近傍に設置される崩壊点検出器は全 6 層で構成となっており、内側 2 層が Pixel detector (PXD)、外側 4 層が Silicon strip Vertex Detector (SVD) で構成される (図 2.4)。検出方法としては荷電粒子がシリコン板を通過した際に生成される電子とホールを電気信号として検出し、通過位置を測定する。各層での通過位置を 3 次的に結ぶことで、粒子の飛跡を再構成することができる。PXD は DEPFET (DEPleted P-channel Field Effect Transistor) と呼ばれるピクセル化されたシリコン検出器から構成されている (図 2.5(a))。SVD は DSSD (Double sided Silicon Strip Detector) と呼ばれるシリコン検出器が各層の両面に直行するように貼り付けられ、飛跡の検出を行う (図 2.5(b))。

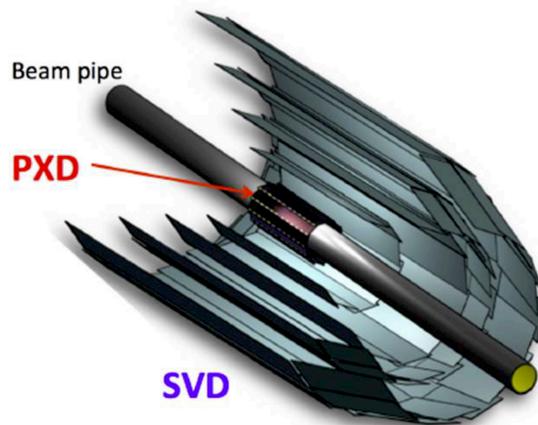
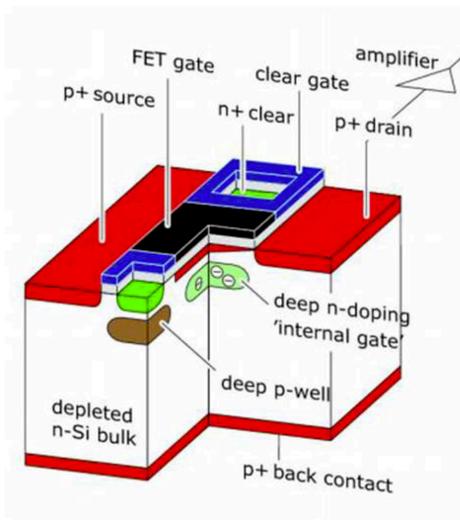
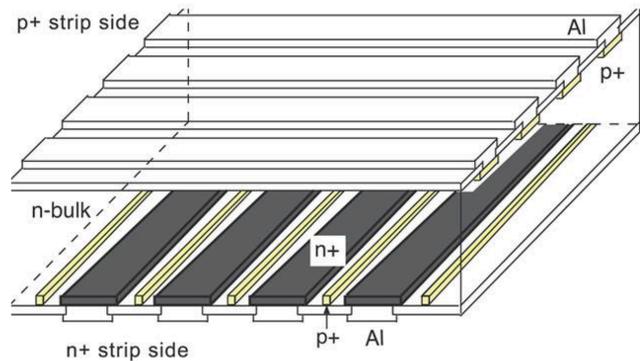


図 2.4 VXD 検出器の完成イメージ図。



(a) DEPFET の構造



(b) DSSD の構造

図 2.5 VXD 検出器に使用されるシリコン検出器の構造。

2.2.2 CDC

CDC(Central Drift Chamber) は VXD のすぐ外側に設置される飛跡検出器であり、荷電粒子のトラッキング・運動量の測定、エネルギーロスからの粒子の識別、トリガーの生成の役割を担っている。陰極と陽極のワイヤーが多数貼られており、その間に $\sim 2300\text{ V}$ の高電圧がかけられている。CDC 内部は $\text{He} - \text{C}_2\text{H}_6$ ガスで満たされており、荷電粒子が通過するとイオン化され電子が生成される。生成された電子は陽極に向かって移動し検出され、その信号から荷電粒子が通過した位置と落としたエネルギーを測定することができる。Belle 実験と Belle II 実験でのワイヤー配置を図 2.6 に示す。CDC は中心部のセルサイズの小型化により位置分解能の改善している。

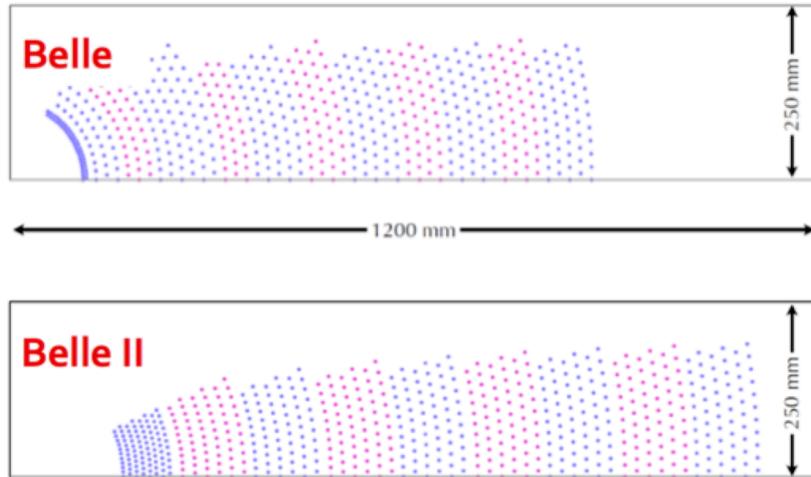


図 2.6 CDC の断面図

2.2.3 TOP

バレル部の荷電 K/π 中間子の識別は TOP(Time-Of-Propagation) 検出器が担う。TOP は DIRC(Detection of Internally Reflected Cherenkov light) と呼ばれるチェレンコフ光検出器の一種であり、荷電粒子が物質を通過する際に発生させるチェレンコフ光により粒子識別を行う。図 2.7(a) に DIRC の検出原理を示し、同図 (b) に TOP モジュールの基本構成を示す。輻射体としてはクォーツを用いる (図 2.8(a))。荷電粒子が通過した際に発生するチェレンコフ光はクォーツバー内部を全反射し、端部で半円として観測される。チェレンコフ光の放射角 θ_C は荷電粒子によって異なるため、リングの半径の差から粒子の識別を行うことができる。また K 中間子と π 中間子のチェレンコフ光は光路差も異なるため検出時間に差が生じる。時間分解能を持つ光検出器を使用することで、位置情報と時間情報からリングイメージを再構成することが可能となる。光検出器として MCP-PMT(Micro-Channel Plate PMT) が採用された (図 2.8(a))。4 × 4 の 16ch アノードプレートからなり、1ch サイズは 5mm × 5mm である。増幅率は 10^6 、時間分解能は 40 ps 程度である。

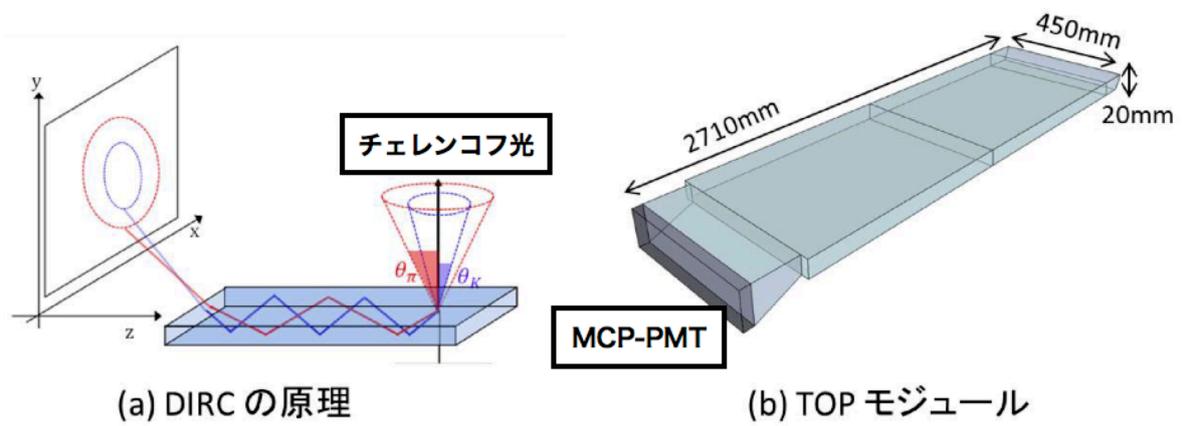


図 2.7 (a)DIRC の検出原理。(b)TOP モジュールの構成

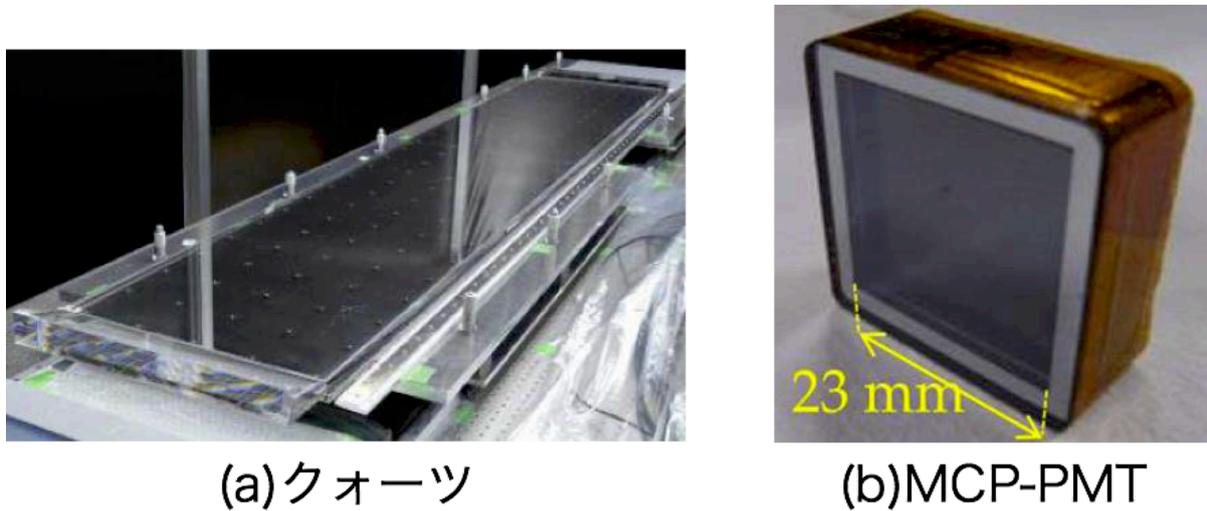


図 2.8 (a)クォーツ。(b)MCP-PMT

2.2.4 Aerogel RICH

エンドキャップ部の荷電 K/π 中間子の識別は Aerogel RICH (Aerogel Ring Imaging Cherenkov) 検出器が担う。ARICH 検出器では荷電粒子が輻射体を通じた際に発生させるチェレンコフ光を光検出器で直接観測する。チェレンコフ光は円錐状に発生するため、入射位置検出能力を有した光検出器でリングイメージとして観測することで、その半径から荷電 K 中間子と荷電 π 中間子の識別を行う。輻射体としてはシリカエアロゲルを使用し、光検出器としては HAPD (Hybrid Avalanche Photo Detector) を使用する。Aerogel RICH の詳細な動作原理や構成に関しては第 3 章で述べる。

2.2.5 ECL

ECL(Electromagnetic Calorimeter) は光子と電子のエネルギーを測定を担う他、トリガー情報の生成も行う。シンチレータに入射した光子や電子が電磁シャワーを作り、ほぼ全エネルギーがシンチレーション蛍光に変換される。シンチレーション光を光検出器で観測することで光子、電子の持っていたエネルギーを測定することができる。また Bhabha 散乱の頻度を見積もり、加速器のルミノシティを測定することもできる。シンチレータにはタリウムを添加した CsI(Tl) を採用し、光検出器としては PIN フォトダイオードを用いる (図 2.9)。

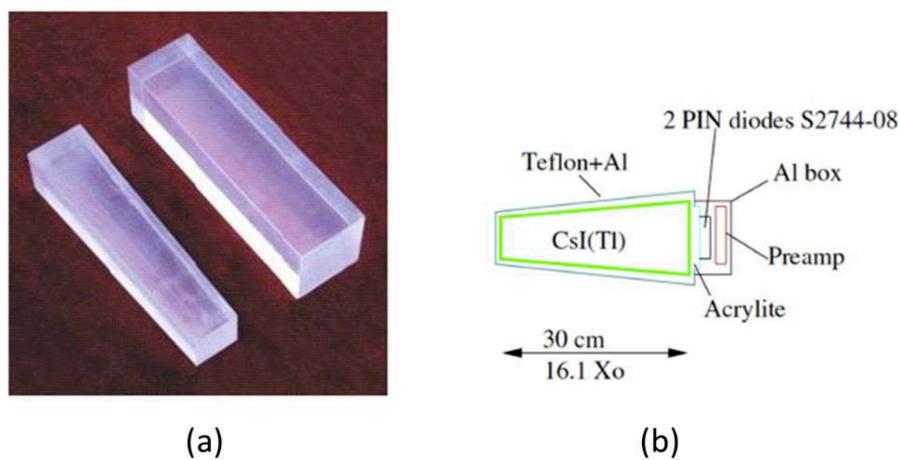


図 2.9 ECL の構成。(a)ECL 用のクリスタル (CsI(Tl))、(b)ECL の 1 ユニットの構成

2.2.6 KLM

KLM(K_L and muon) 検出器は寿命の長い K_L と μ の識別を担う。RPC(Resistive Plate Chambers) と呼ばれるガスチェンバーと鉄のサンドイッチ構造になっており、 K_L と μ の相互作用の違いを用いて粒子の識別を行う (図 2.10)。 K_L は鉄と強い相互作用を起こし KLM を通過することなく崩壊するが、 μ は KLM を通過することができるため、CDC 等の飛跡情報を合わせることで粒子識別が可能となる。RPC は高電圧を印加し、帯電させた高抵抗ガラスでガスを挟んだ構造になっている。ガラス間にはガスが充満されているため荷電粒子が通過した際にストリーム放電が発生し、その信号を検出し粒子の位置情報を得る。しかし、RPC では一度放電が起こると再充電までに約 2 秒 dead time が発生してしまう。Belle II 実験の高レート化により特にエンドキャップ部でバックグラウンドが上昇するため、RPC の代わりにプラスチックシンチレータを使用することでこの問題を解決する。

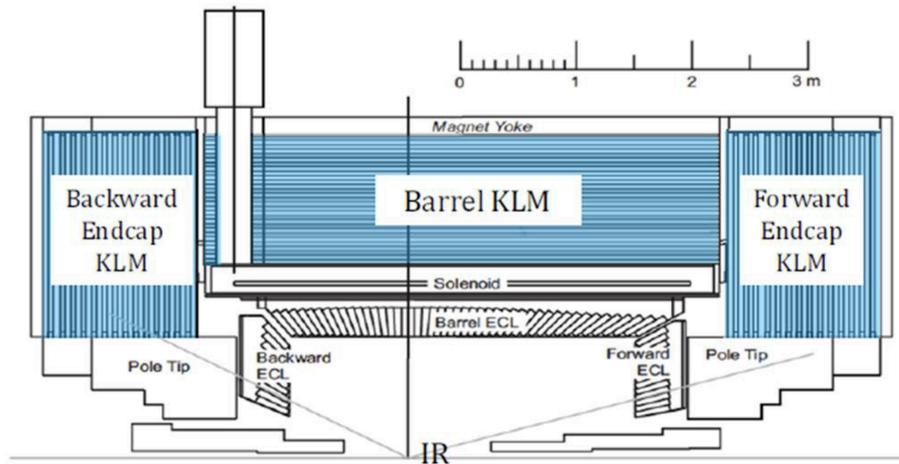


図 2.10 KLM の設置図。

2.2.7 DAQ

Belle II 実験の DAQ(Data AcQuisition)[10] は最大 30 kHz ものイベントレートの読み出しをリアルタイムで処理する。またデータの削減も行いながら物理解析に必要な情報を可能な限り取りこぼさないシステムを実現している。Belle II DAQ では各検出器からのデータを Belle2Link と呼ばれる光ファイバを用いた通信を介して COPPER(Common Platform of Pipe-line Electronics Readout) に送る、共通の読み出しフレームワークを採用している。PXD 以外の検出器のデータは一段目のイベントビルダーにより統合された後、High Level Trigger(HLT) で事象の選別が行われる。一方で PXD は膨大なデータ量を有しているため、ONSEN(Online Select Node) と呼ばれるモジュールを用いてデータ読み出しを行う。HLT と ONSEN のデータを二段目のイベントビルダーで統合し、ストレージに保存される。Belle II 実験全体でのデータの流れを図 2.11 に示す。

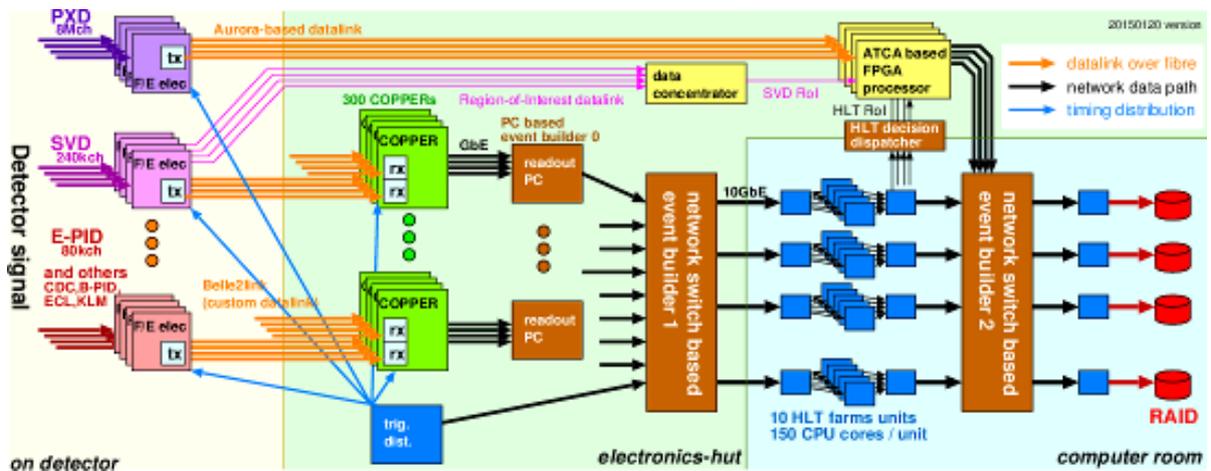


図 2.11 Belle II 実験全体のデータの流れ

各検出器の電源装置や読み出し回路の制御は DAQ グループによって集中管理することによって効率的なデータ収集の実現を果たす。一方で各検出器の電源装置や読み出し回路は多岐に渡るため、それらのシステムを統一的に扱うことは難しい。そこで DAQ グループでは共通の通信規格である NSM2(Network Shared Memory) を開発し、各検出器の制御システムに組み込むことにより、各検出器の制御を統一的に扱うことを可能にした。またグラフィカルユーザインターフェース (GUI) の開発には加速器制御などで実績のある Control System Studio(CSS)[11] を採用し、Belle II グループ内で開発体制を共通化した。

第3章

Aerogel RICH 検出器

Aerogel Ring Imaging Cherenkov (ARICH) 検出器は Belle II 検出器においてエンドキャップ部での粒子識別に特化した検出器であり、荷電 K 中間子と荷電 π 中間子の同定を主目的としている。Belle 実験ではエンドキャップ部の粒子識別に Aerogel Cherenkov Counter (ACC) 検出器を使用していたが、2 GeV/c 以上の高エネルギー粒子の粒子識別能力の低さが欠点であり、新粒子探索に向けた検出器開発の重要課題となっている。Belle II 実験では CDC 検出器と ECL 検出器の間にある限られた設置スペースに対応し、粒子識別能力を改善する新型検出器として ARICH 検出器の導入を進めている。この章では Belle II 検出器エンドキャップ部へ設置される粒子識別装置 Aerogel RICH 検出器について説明する。

3.1 エンドキャップ部の粒子識別への性能要求と制限

新物理事象探索に向けてエンドキャップ部においても 2 GeV/c を超える高エネルギーの粒子に対しても識別能力を有する検出器が必要となるが、ACC の様な閾値型の検出器では実現することが難しく、また TOF 検出器のような到達時間を利用した検出器も制限された設置スペースのため現実的とは言えない。しかしチェレンコフ光の 2 次元平面上の分布を直接観測すれば限られたスペースにおいてもチェレンコフ放射角、更には粒子の同定することが可能である。Belle II 実験では最大 3.5 GeV/c 程度の荷電粒子がエンドキャップ領域に飛来することが予測されており、ARICH 検出器では 0.5~3.5 GeV/c の運動量を持つ荷電粒子を識別し、特に K 中間子/ π 中間子の識別に対して 4σ 以上の分離能を達成することを目指す。

3.2 識別原理と構造

荷電粒子が媒質中を通過する際に媒質中の光速を超えることがある。この時、媒質との相互作用により生じた電磁波は互いに干渉・増幅することで光の衝撃波のように放射される。この光をチェレンコフ光と呼び、粒子の速度に依存する放射角を持った円錐状に光子が放出される (図 3.1)。

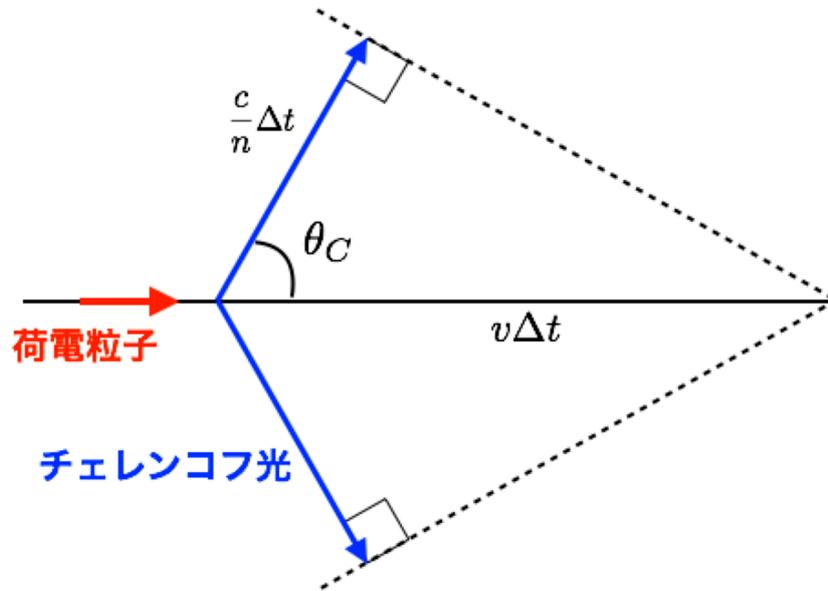


図 3.1 チェレンコフ光の発生原理

この光子を観測しその放射角から粒子の種類を特定することが Ring Imaging Cherenkov (RICH) 検出器の基本原理である。ARICH 検出器ではチェレンコフ光の輻射体の後段に単光子位置検出能力を持つ光検出器を配置することで、円錐状に放射されたチェレンコフ光が作るリングイメージを取得し、放射角を測定することで粒子を決定する (図 3.2)。放射角 θ と粒子の運動量 p 及び質量 m は次の式で関係づけられる。

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

ここで、粒子の運動量 p は内側の CDC により測定され、 n は輻射体の屈折率であり既知である。ARICH 検出器で求めた放射角 θ から粒子の質量 m を求め、粒子の識別を行う。

ARICH 検出器の設計図を図 3.3 に示す。左図の左上が光検出器の配置、左下が輻射体の配置となっている。

3.3 ARICH 検出器の構成要素

ARICH 検出器は Belle II 検出器エンドキャップ部の CDC 検出器と ECL 検出器の間にある 28 cm の非常に限られた領域に設置される。図 3.4 に ARICH 検出器内部での輻射体と光検出器の配置の概念図を示す。ARICH 検出器内部には輻射体と光検出器を約 16 cm 隔てて配置した二層構造になっており、光検出器の背後に更に読み出し用の電子回路を配置する。輻射体、放射空間、光検出器、読み出し回路の大きさはそれぞれ 40 mm、160 mm、30 mm、50 mm となっている。検出器内部に読み出し回路を配置するのは ARICH 検出器が空間だけでなく配線上でも大きな制約を受けており、光検出器の電気信号を即座にデジタル変換し統合することにより検出器外部への配線数を削減するためである。

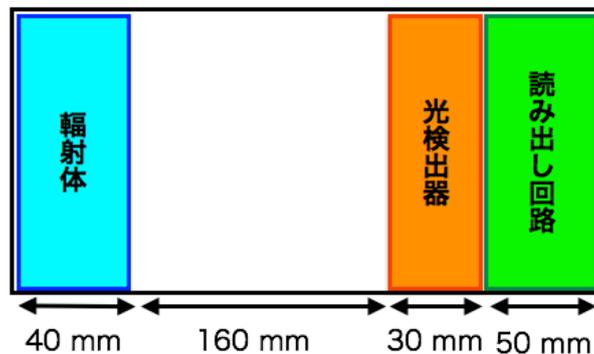


図 3.4 ARICH 検出器の各構成要素の配置

3.3.1 輻射体

チェレンコフ光の輻射体にはシリカエアロゲルを採用している [12]。ARICH グループが開発した独自の製法により、高透過率を維持しながら屈折率を 1.01 から 1.1 の範囲で微調整を行うことが可能であり、また放射線に対する耐性も確認されている。主要な物質の屈折率を表 3.1 に示す。光検出器までの空間を全てシリカエアロゲルで埋め尽くすとチェレンコフ光が飛跡に沿って発生するため観測されるリングイメージがぼやけてしまう。しかし輻射体と光検出器を離すほどリングイメージが大きくなるため放射角の測定能力が向上する。このため、ARICH 検出器ではシリカエアロゲルと光検出器の間に 16cm の空間を設けている。放射角は屈折率が高いほど大きくなるが高すぎると空気との屈折率の差が大きくなり全反射を起こしてしまう。また減衰長を維持することが難しくなる。ARICH 検出器では屈折率 1.05 程度のシリカエアロゲルを採用し、60 mm の減衰長を維持することに成功した。シリカエアロゲルの構造と写真を図 3.5、3.6 に示す。

表 3.1 主要な物質の屈折率

空気	1.0003
CO ₂	1.0004
シリカエアロゲル	1.0004 ~ 1.1
水	1.33
ガラス	1.46

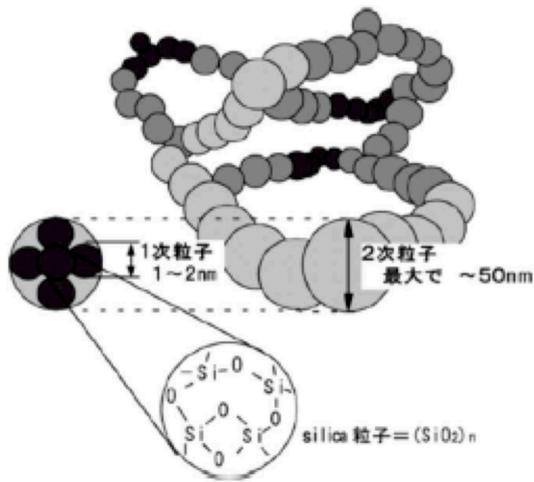


図 3.5 シリカエアロゲルの構造

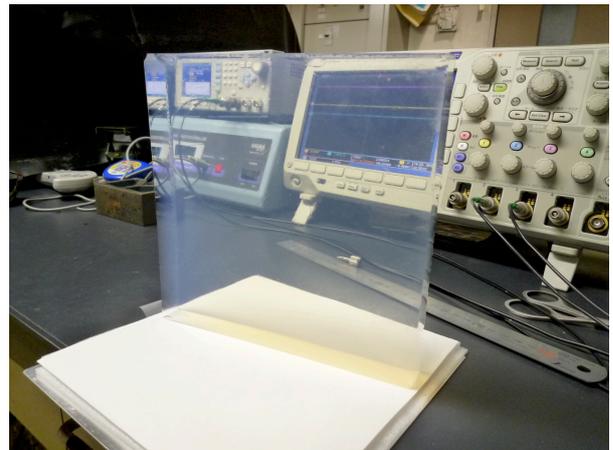


図 3.6 シリカエアロゲル

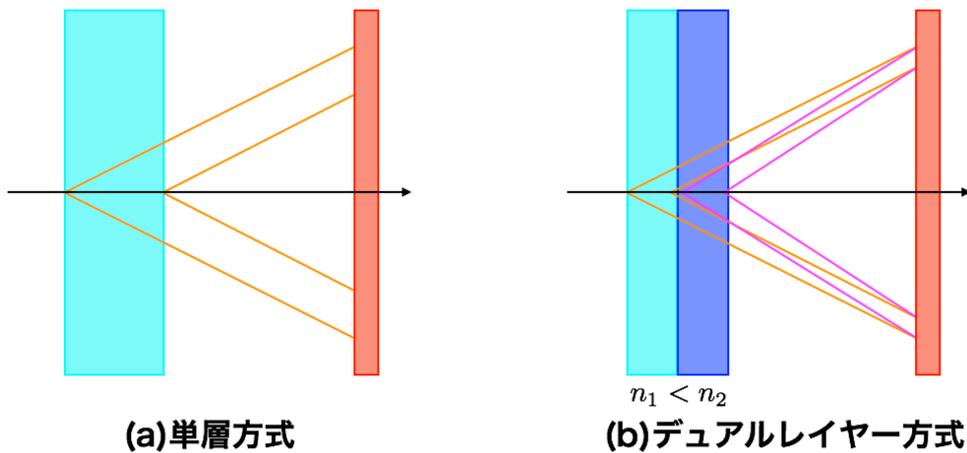


図 3.7 デュアルレイヤーの概念図

また角度分解能の改善のため ARICH ではデュアルレイヤー方式と呼ばれる異なる屈折率を 2 層用いる方式を採用した (図 3.7)。図 3.7(a) が単一の屈折率を持つ輻射体の時、図 3.7(b) が異なる屈折率 n_1 (上流側)、 n_2 (下流側) を用いたときの様子である。それぞれ厚さは同じため生成されるチェ

レンコフ光の個数はほぼ等しい。一方で図 3.7(b) では屈折率を $n_1 < n_2$ に設定することで、上流で発生したチェレンコフ光と下流で発生したチェレンコフ光が絞られ、角度分解能を向上することができる。最適な屈折率として上流では $n_1 = 1.045$ 、下流では $n_2 = 1.055$ のシリカエアロゲルを使用する。

屈折率 1.05 における荷電 K 中間子と荷電 π 中間子のチェレンコフ放射角を図 3.8 に示す。荷電 K 中間子と荷電 π 中間子の放射角の差は運動量 4 GeV/c のとき、最も小さく 23 mrad となる。

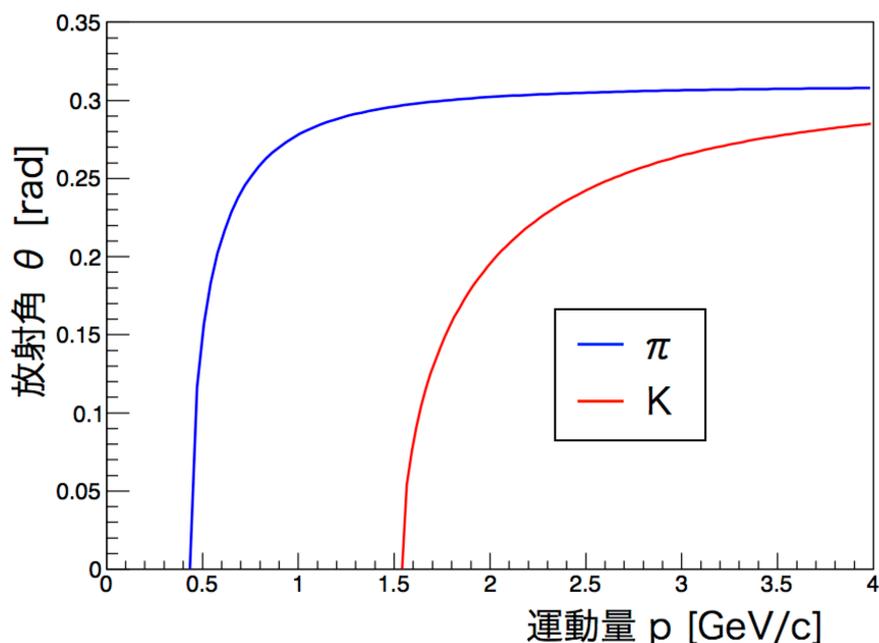


図 3.8 チェレンコフ放射角の分布

3.3.2 光検出器

チェレンコフ光子の検出位置から放射角を精度良く算出するためには 1 飛跡あたりに 10 個程度の光子を観測する必要があり、光検出器には単光子の位置検出が可能でありさらに放射角の違いから粒子識別を行うためには 5 mm 程度の位置分解能が要求される。一般的な光電子増倍管などでは磁場の影響により光子検出能力が低下することがあるが、ARICH 検出器はソレノイドコイル内部で稼働されるため 1.5 T もの強磁場に対応することも求められる。また交換が困難であることから 10 年に及ぶ運用に耐える高い放射線耐性も求められる。

これらの要求を満たす光検出器として HAPD(Hybrid Avalanche Photo Detector)[13] を浜松ホトニクス株式会社と共同開発した。HAPD の写真とその寸法を図 3.9、3.10 に示す。

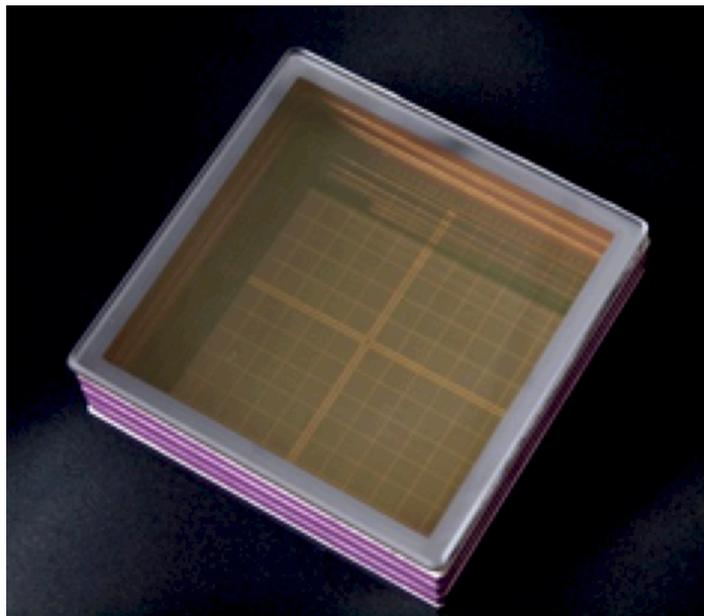
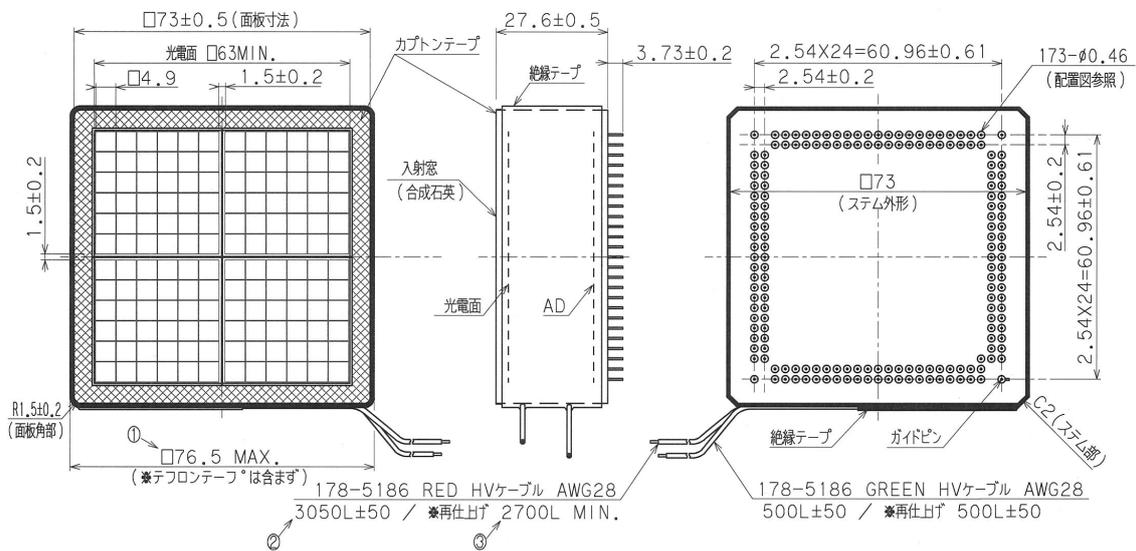


図 3.9 HAPD の写真

R10947-06-M144 図面

2015/08/26



MRAC	日付	変更内容
①	2015. 8.26	寸法変更 □76 MAX. → □76.5 MAX
②	2015. 8.26	寸法変更 3000L → 3050L
③	2015. 8.26	寸法と公差変更 2800L ± 50 → 2700L MIN.

単位: mm

HAMAMATSU
HAMAMATSU PHOTONICS K.K. Electron Tube Division

図 3.10 HAPD の寸法

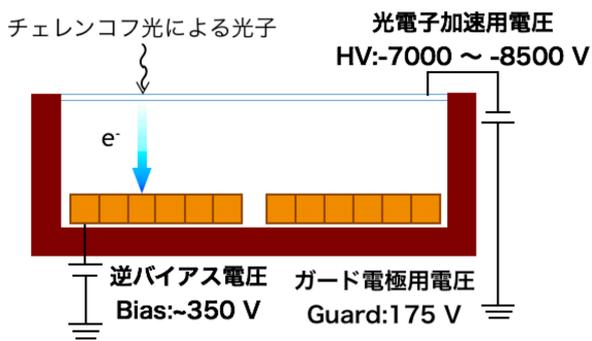


図 3.11 HAPD の動作原理

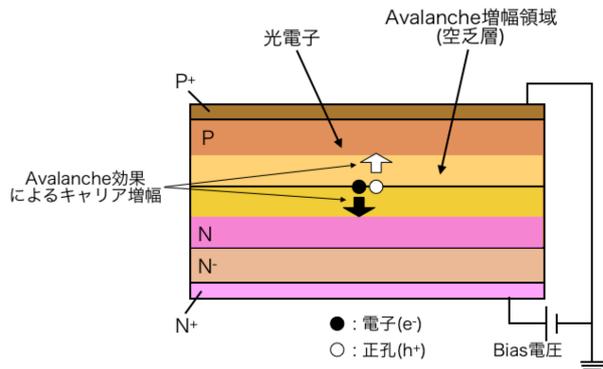


図 3.12 APD での増幅原理

HAPD の検出原理の概念図を図 3.11 に示す。初めにチェレンコフ光による光子は光電面で光電子に変換される。この際の量子効率 η は波長 400nm において約 28% となっている。次に光電子は光電子加速用電圧 (HV : -7000 ~ -8500 V) により加速され、APD に衝突しおよそ 1500 の電子・正孔対を生成する。それらの電子が APD 毎に印加される逆バイアス電圧 (Bias : ~350 V) によりアバランシェ増幅を起こし、およそ 40 倍に増幅される (図 3.12)。HV による電子照射増幅と Bias によるアバランシェ増幅の 2 段階の増幅により、約 60000 倍という高い増幅率を有する。また APD では Bias の印加によるエネルギーギャップのためノイズを抑制される。高い増幅率と低いノイズにより高い S/N 比を達成し、1 光子の検出が可能となる。

表 3.2 HAPD の基本性能

外径	73 × 73 mm ²
量子効率 (λ=400 nm)	28 %
チャンネル数	144
ピクセルサイズ	4.9 × 4.9 mm ²
打ち込み増幅	1500
アバランシェ増幅	40
総増幅率	~60000

3.3.3 読み出しシステム

ARICH 検出器では単光電子レベルの微弱な信号検出するためには十分な低ノイズ、高増幅率を達成し HAPD 1 台あたり 144 チャンネルの信号を効率的に収集する専用のアナログ回路が必要となる。また配線上の制約から光検出器のアナログ信号を検出器内部でデジタル化しデータ量の削減・統合を行って配線数を削減する。ARICH 検出器ではこれらの要件を満たす専用の ASIC を開発しさらに ASIC を搭載し HAPD のアナログ信号をデジタル化するフロントエンド回路 (Frontend board、図 3.13) とデジタル信号を統合し、Belle2Link を通じて Belle II DAQ システムにデータを送信するマージャー回路 (Merger board、図 3.14) を開発した。Frontend board と Merger board は共に FPGA チップを搭載し外部から Belle2Link を通じて設定操作可能にしている。Frontend board に

は Spartan-6、Merger board には Virtex-5 を採用した。



図 3.13 Frontend board



図 3.14 Merger board

HAPD からの信号は図 3.15 に示すデータフローによって処理される。はじめに HAPD からの信号は Frontend board の ASIC に送られ、デジタル化される。デジタル化には比較器を用いて閾値電圧を超えた際にデジタル信号を出力する。また比較器の前段には増幅器と波形整形器がおかれ、増幅率の調整や波形の立ち上がり時間を調整し、比較器で処理しやすい形にしている。ASIC によりデジタル化された情報は FPGA に送られ、外部からのトリガーにより取り出される。また FPGA では ASIC のパラメータ設定の役割も担っている。

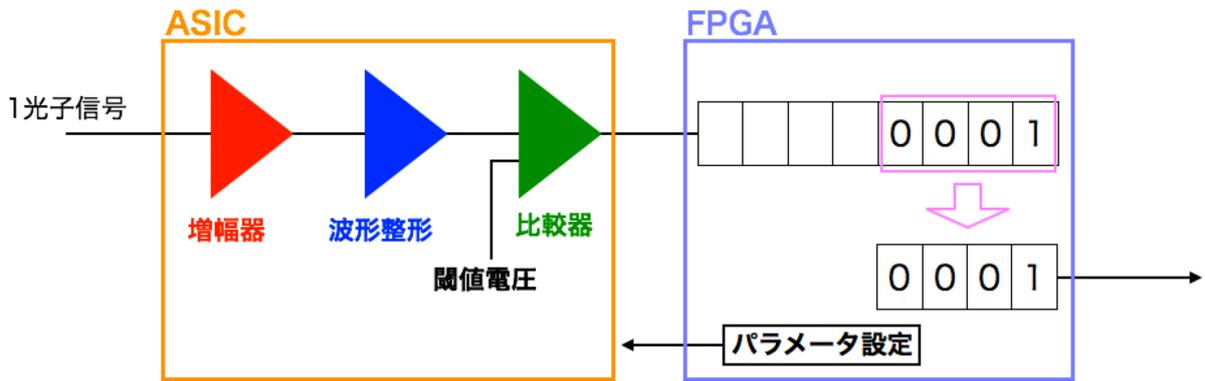


図 3.15 Frontend board での信号処理の流れ

ARICH におけるデータ読み出しの流れを図 3.16 に示す。Frontend board へのトリガーは Merger board が分配し各 Frontend board に送られ、デジタル情報が Merger board へと集められる。Merger board へ集められた Frontend board の情報には Merger board 上でのスロット番号やイベント番号などのヘッダー情報が付与された後、1つのデータへと統合され、Belle2Link へと送られる。Belle2Link ではデータ収集の他、FPGA などのパラメータの設定なども行う。ARICH では Belle2Link への接続は Merger board のみであるが、Merger board を経由して Frontend board の FPGA のパラメータの設定を行うことも可能になっている。

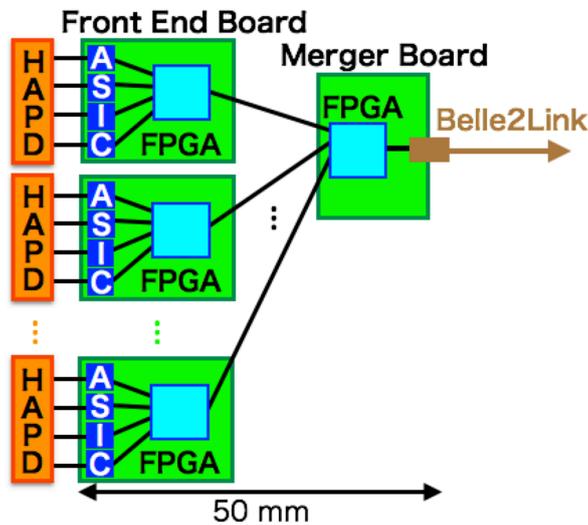


図 3.16 読み出しの流れ

3.4 ARICH 検出器の建設

現在 2017 年の Belle II 検出器へのインストールに向けて ARICH 検出器の建設が進められている。シリカエアロゲルのインストールはすでに全数が完了しており、HAPD 側のインストールが進行中である。HAPD 側のインストールは Frontend board を接続した HAPD モジュール (図 3.17)

を HAPD 用構造体上面に設置し、続けて背面に Merger board の設置を含む読み出し回路の配線、及び電源の配線を行う。HAPD モジュールの配置番号は図 3.18 のように内側一層目から渦巻き状に番号が増えていく形となっている。図 3.19 に現在のインストール中の HAPD 用構造体を示す。現在 HAPD モジュールは 3 分の 1 の 140 台の設置が完了しており、そのうちの 70 台には背面に Merger board を設置し、ケーブル長の調整やインストール手順の確認が行われている。もう一方の 70 台の HAPD モジュールの一部には電源の配線など全配線を行い、宇宙線の観測を行う試験が行われているが、詳細については第 7 章で述べる。

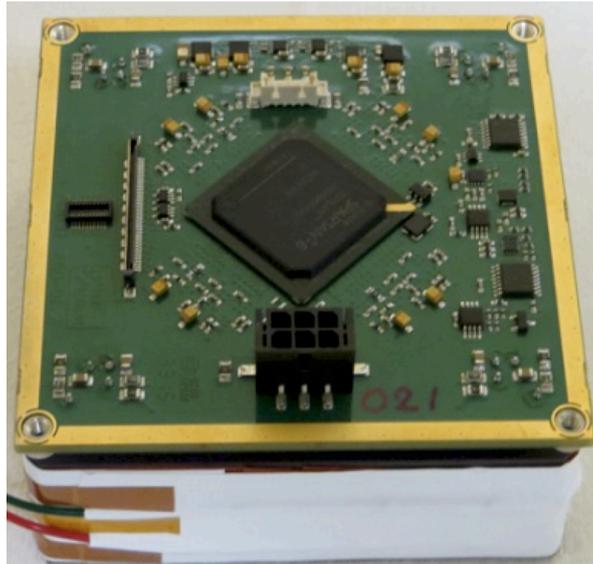


図 3.17 HAPD モジュールの写真

HAPD module slot numbering (electronics side)

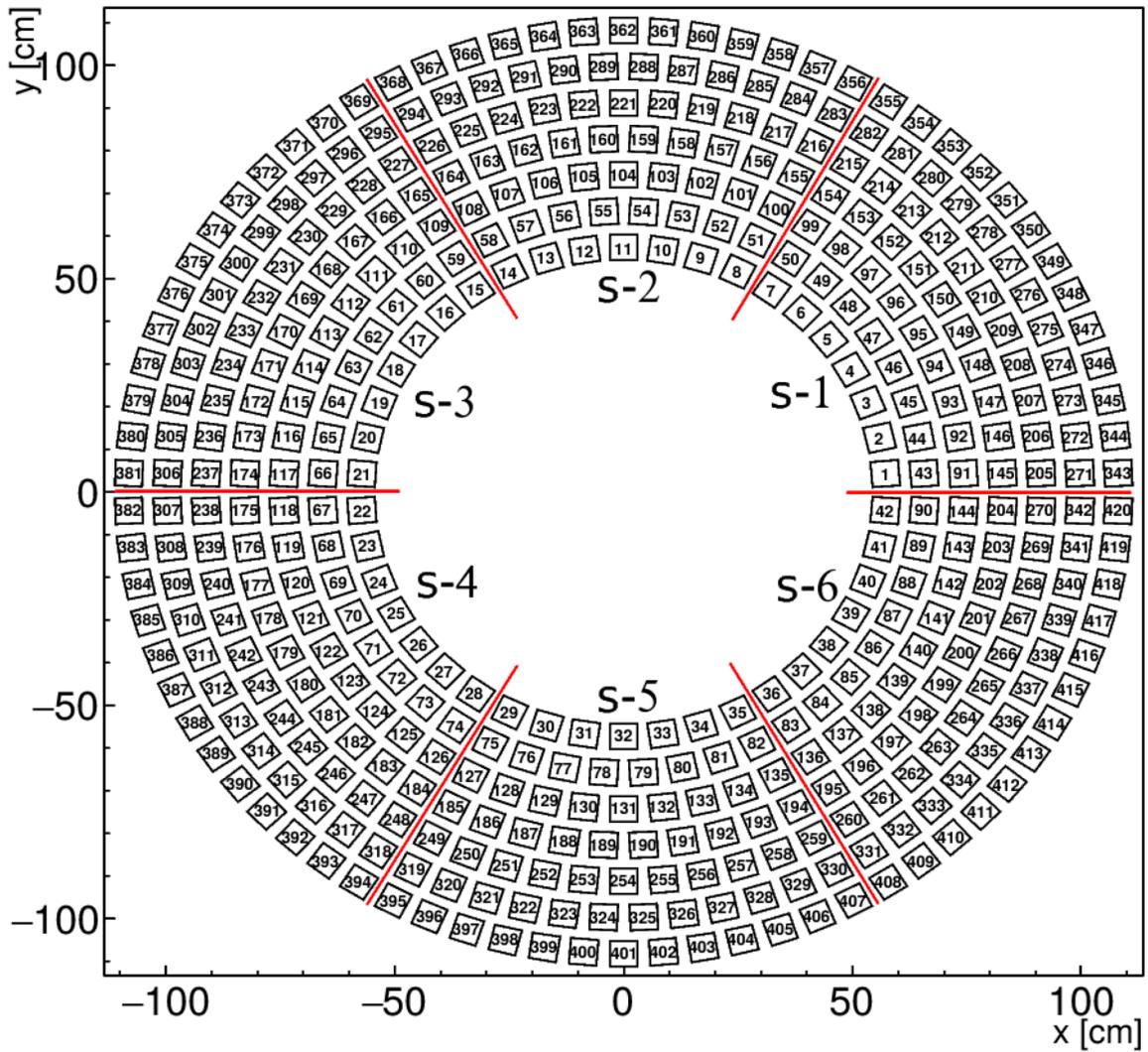


図 3.18 HAPD の配置番号の対応表

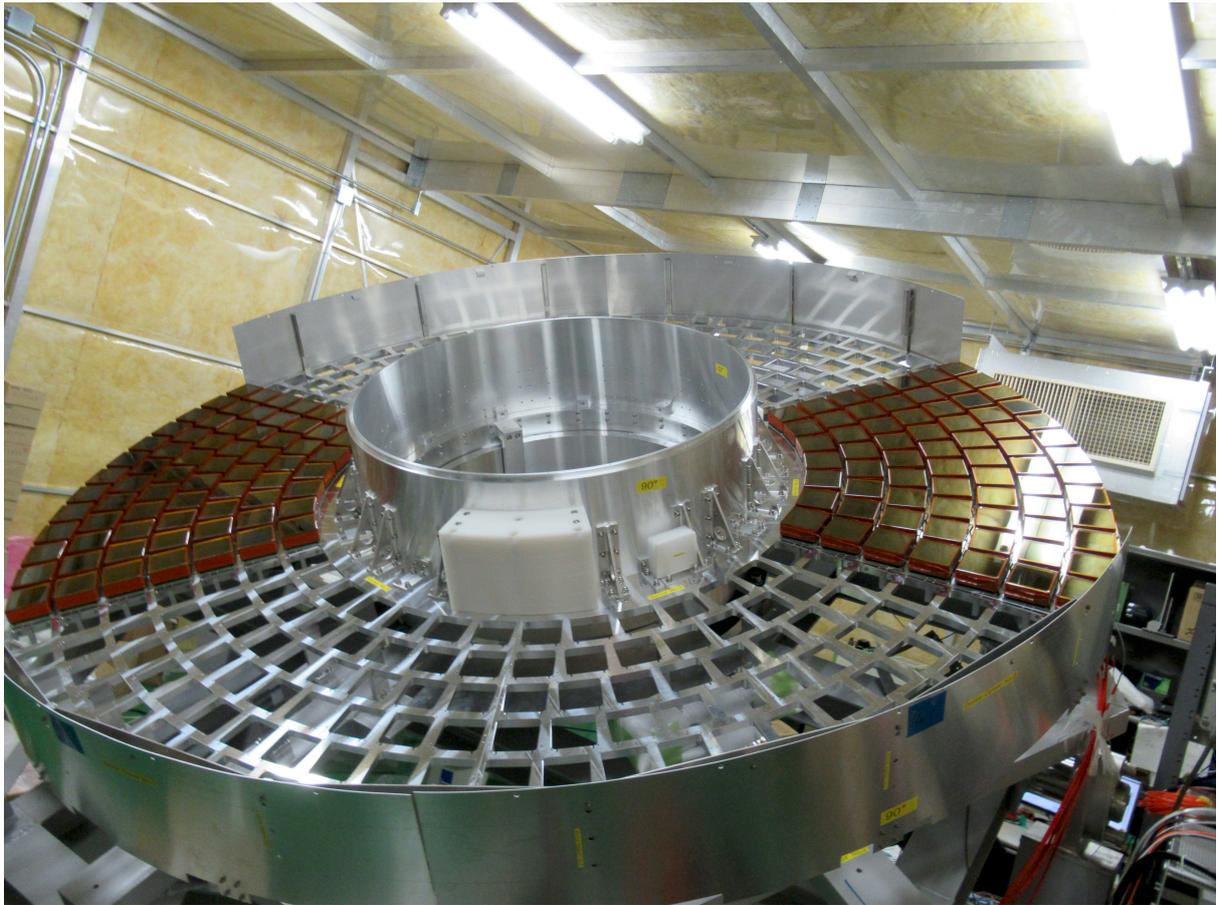


図 3.19 構造体に設置されている HAPD モジュール

第 4 章

光検出器用電源装置の性能評価

ARICH 検出器に用いる光検出器 HAPD は 1 光子に対応する微弱な信号を増幅して検出するものであり、印加電圧の変化は増幅率やノイズの変動に大きく影響を与える。動作電圧をわずかでも超える高電圧の印加は HAPD の故障につながるため、光検出器の保護という点においても電源装置の性能は非常に重要となる。本研究では ARICH 検出器に必要とされる安定性などの要求性能をもとに電源装置の選定及び性能試験を行った。本章では電源装置の選定と性能試験結果について述べる。

4.1 電源装置への性能要求

光検出器の性能の一つに信号増幅率があり、適切な増幅率を維持することは、ARICH 検出器の安定動作の上で重要である。そのため電源装置には光検出器が適切な増幅率を維持できるよう安定した電圧供給が求められる。また他検出器や加速器からのインターロック信号の受信や HAPD 内部での過電流による自動停止などの HAPD の保護機能や円滑な制御のためのネットワーク制御が求められる。

4.1.1 電源装置の基本性能

HAPD に印加する高電圧は-7000 V から-8500 V が要求され、若干の余裕をみると最大-9000 V 程度の電圧供給が可能であることが求められる。また Bias-Guard は 175 V から 350 V 程度の電圧供給が必要なため、余裕をみて最大 500 V 程度が印加可能であることが求められる。出力電圧の安定性については HAPD の増幅率の変化を 1% 以内に収めることが求められる。HAPD の電圧印加を行う装置に求められる性能要求を表 4.1 に示す。

表 4.1 HAPD 用電源の性能要求

要求項目	HV	Bias	Guard
最大出力電圧	-9000 V	+500 V	+250 V
最大出力電流	45 μ A	500 μ A	50 μ A
電圧設定精度	0.3 %	0.3 %	0.3 %
リップル電圧	250 mV(p-p)	30 mV(p-p)	30 mV(p-p)
温度依存性	500 ppm/ $^{\circ}$ C	100 ppm/ $^{\circ}$ C	100 ppm/ $^{\circ}$ C
安定性	500 ppm/H	100 ppm/H	100 ppm/H
オフセット電圧	<5 V	<0.2 V	<0.2 V

ここで HAPD の HV、Bias による増幅率をそれぞれ図 4.1、図 4.2 に示す。HV の 8500 V での増幅率は約 1900 であり、その付近での電圧と増幅率の関係は式 4.1 で示される。

$$\text{増幅率} = 0.31 \times \text{電圧 [V]} \quad (4.1)$$

増幅率の変動が 1% 以内の範囲は式 4.2 のように求められる。

$$\frac{1900}{310} \times 0.01 = 60V \quad (4.2)$$

8500 V に対する 60 V の割合は $60V/8500V = 0.7\%$ となり、ここにファクター 10 の安全マージンを与えると式 4.6 のようになる。

$$0.7\% \times 0.1 = 0.07\% = 700\text{ppm} \quad (4.3)$$

そのため HV の電圧安定性は 700 ppm 以下であることが求められる。

一方で Bias は増幅率 40 に対応する電圧印加を行う。その付近での電圧と増幅率の関係は式 4.4 で示される。

$$\text{増幅率} = 0.94 \times \text{電圧 [V]} \quad (4.4)$$

増幅率の変動が 1% 以内の範囲は式 4.5 のように求められる。

$$\frac{40}{0.94} \times 0.01 = 0.43V \quad (4.5)$$

330 V(増幅率 40 の平均の電圧) に対する 0.43 V の割合は $0.43V/330V = 0.13\%$ となり、ここにファクター 10 の安全マージンを与えると式 4.6 のようになる。

$$0.13\% \times 0.1 = 0.013\% = 130\text{ppm} \quad (4.6)$$

そのため Bias の電圧安定性は 130 ppm 以下であることが求められる。

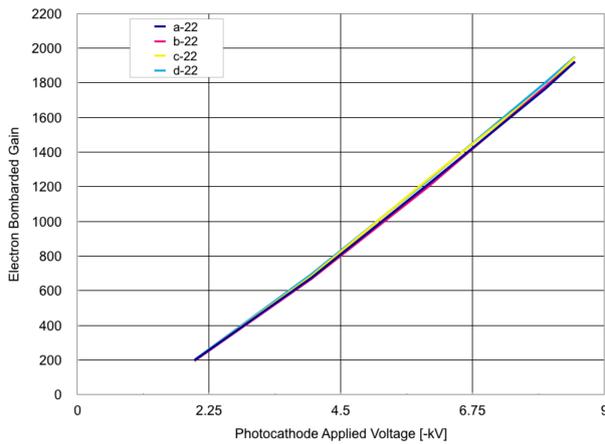


図 4.1 HV の増幅率

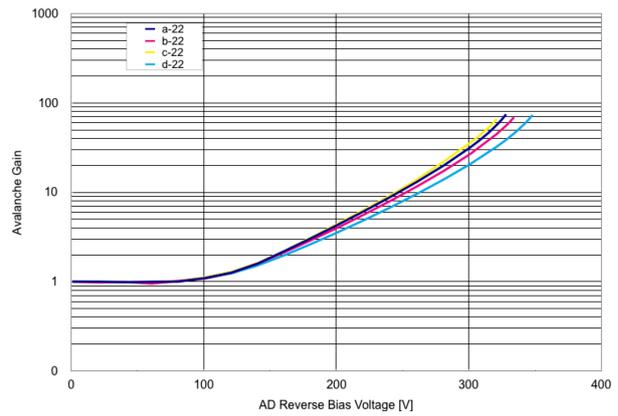


図 4.2 Bias の増幅率

4.1.2 電源装置の制御機能

420 台の HAPD を稼働させるためには複数台の電源クレーンを連携して操作する必要があるが Belle II 実験ではそれらの制御はネットワークを介した遠隔操作により行う。このため電源クレーンにはネットワーク通信により電圧印加・設定変更やモニター値の取得などの機能が必要となる。また印加時に電圧・電流値が上限を超えた際に自動停止するトリップ機能もソフトウェアから管理する必要がある。一方で冷却水の漏洩など重大なトラブルが発生した際にネットワークが不通となる状況も考えられ、緊急時にネットワークを介さずに電圧印加を停止するインターロック機能も検出器保護において重要となる。

インターロック

実際の検出器運転では加速器の運転障害や検出器内での漏水など重要な問題が発生することが想定されるが監視機器から得られる情報をネットワーク経由によるソフトウェア処理により対応する場合には数秒の遅延が起きる可能性があり、その間に障害が拡大してしまう懸念がある。またトラブル時にネットワークが遮断されるなどしてソフトウェア処理が正常に動作しない可能性も考慮しなくてはならない。インターロック機能はセンサー類から送られる NIM アナログ信号から検出器環境の異常を検知し速やかに電源供給を停止する検出器の保護機能である。Belle II 実験環境下でのインターロック機能の外部信号は NIM 信号によって分配され、各検出器の電源に供給される。インターロック信号は加速器のトラブルや冷却パイプの損傷の様な検出器に深刻な異常が発生した際に供給され、即座に電圧印加を停止する。そのため ARICH 検出器の電源装置には NIM 信号を受信し、信号入力がある状況のみで電圧印加を行うように設定した。

トリップによる自動停止

過電流や過電圧はビーム軌道の変化などにより大量のビームバックグラウンドが生じた場合や隣接した HAPD で放電が起きた場合などに発生する。この時、電圧供給を続けてしまうと APD の許容範囲を超える電流が流れる可能性があり、HAPD の故障の危険がある。これらを防ぐため、設定し

た値以上の電流・電圧が流れた際に自動で電圧印加を停止し、HAPD を保護するためのトリップ機能が必要となる。またトリップが発生した際に HAPD では 3 種類の電圧を順番に印加するのに関係して、トリップしていない他の電圧印加の停止が必要となる場合がある。これについては電源による制御ではなく、ソフトウェアにより制御を行っているため、第 5 章で詳細を述べる。

ネットワーク制御

420 台にのぼる HAPD を運用するためには多数の電源装置を連携して動作させることが必要となるが、電源装置設置場所で直接操作を行うことは実際の Belle II 実験環境では現実的ではなくネットワーク操作による管理機能が必要となる。そのため電源クレートには IP ネットワークインターフェースとしてイーサネットコネクタを有し、TCP 通信により電圧設定値などの変更、電圧印加のオン・オフや出力電圧・電流モニタ値の取得などの操作をチャンネル単位で行う機能が求められる。

4.2 電源装置

高圧電源を開発しているメーカーはいくつか知られているが、9000 V もの高電圧を 420 台の HAPD に印加できる装置を開発しているメーカーは限られており、本研究では高エネルギー実験での実績に優れた CAEN[14] に電源試作機 (図 4.3、4.4) の製作と貸出を依頼し、試作装置の性能試験を行った。HV モジュール、Guard-Bias モジュール、電源クレートの電源試作機の仕様を表 4.2、4.3 をまとめる。また CAEN の電源装置におけるチャンネルのパラメータとステイトを表 4.4、4.5 に示す。出力電圧や電圧・電流の制限値の設定はもちろん電圧上昇・下降速度の設定やトリップ時の挙動の設定などが可能であり、ステイトとしても上昇・下降中や電圧印加停止状態の詳細なども確認することができる。



図 4.3 CAEN 電源 (前面)



図 4.4 CAEN の電源 (背面)

表 4.2 CAEN 電源モジュールの基本性能

	HV	Guard-Bias	
型番	A1590	A7042	A7042P
最大出力電圧	-9000 V	+500 V	
最大出力電流	50 μ A	500 μ A	
使用スロット数	2	1	
チャンネル数	16	48	
使用モジュール数	27	45	

表 4.3 CAEN 電源クレートの基本性能

型番	SY4527
スロット数	16
高さ	8 U
使用数	7

表 4.4 CAEN 電源の各パラメータ

パラメータ名	単位	説明
CHANNEL NAME		チャンネルの名前の設定
V0SET	V	電圧値の設定
I0SET	μ A	電流制限値の設定
RU _p	V/sec	電圧上昇速度の設定
RDW _n	V/sec	電圧下降速度の設定
TRIP	sec	過電流を維持する時間の設定
SVMAX	V	最大電圧の設定
VMON	V	電圧値の取得
IMON	μ A	電流値の取得
STATUS		チャンネルステイトの取得
PW		電圧の ON/OFF
PO _n		リセット時のパラメータ記録の可否の設定
PD _{wn}		トリップ時の電圧下降速度の設定 (Ramp:RD _{wn} の速度、Kill:最大速度)

表 4.5 CAEN 電源のチャンネルステイト

ステイト名	説明
OFF	電圧の印加停止中
ON	電圧印加中
RUP	電圧上昇中
RDWN	電圧下降中
OVC	過電流状態
OVV	過電圧状態
UNV	電圧不足状態
I-TRIPPED	内部での過電流・過電圧による電圧印加停止状態
E-TRIPPED	外部からのトリップ信号による電圧印加停止状態
EXT-DIS	インターロックによる電圧印加不可状態

4.3 電源装置の性能評価試験

試験のセットアップを図 4.5、4.6 に示す。電源クレーンは制御用 PC に接続しており、PC からネットワークを介して CAEN のライブラリを用いて電源モジュールの設定やモニタ値の取得を行った。電源モジュールには SHV ケーブルを出力ピンに合うように加工したケーブルをつなぎ、その先に負荷抵抗として高圧プローブを設置した。高圧プローブは抵抗値が $1\text{ G}\Omega$ で分圧比が 1:1000 のものを使用し、 $1/1000$ に分圧された電圧値をマルチメータで測定し、出力電圧値とした。出力電流値は出力電圧値を抵抗値で除算した値を出力電流値とした。

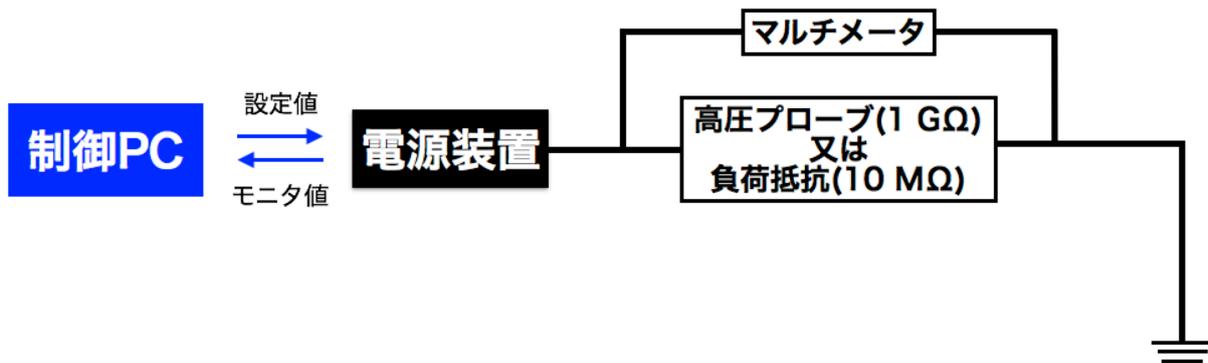


図 4.5 電源装置試験のセットアップ

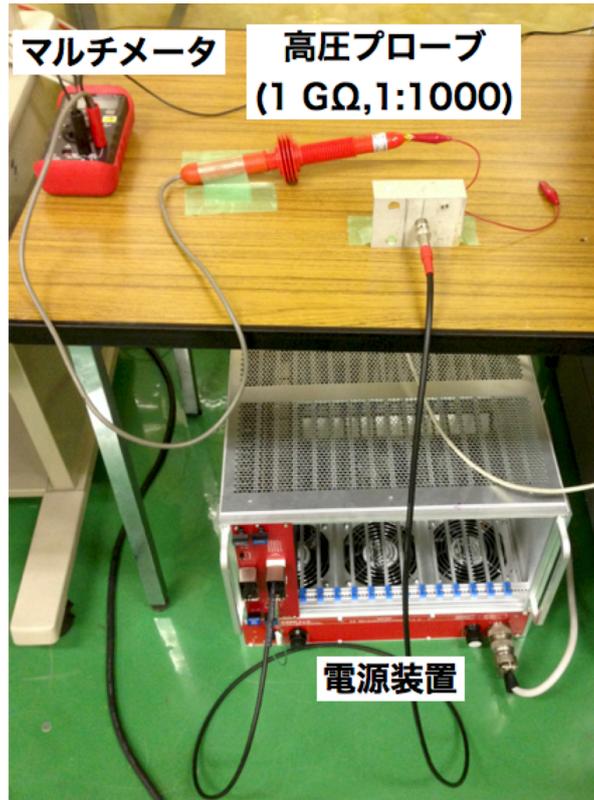


図 4.6 電源装置試験のセットアップ写真

4.3.1 電圧上昇・下降速度

急激な電圧の上昇や下降は過剰な電流を伴い HAPD の故障につながるため、HAPD には標準的な速度として HV は 100 V/s、Guard と Bias は 10 V/s の速度で電圧印加を行う。HAPD 保護のために正しい速度で電圧印加を行うことが求められる。

電圧上昇 (下降) 速度の測定は HV モジュール、Guard-Bias モジュールでそれぞれ 2 つの設定値で行った。標準的な速度とその 1/2 倍の速度測定し、速度の大小による依存がないか確認した。この試験で使用した、電圧上昇 (下降) 速度を求める式は式 4.7 を使用した。

$$\text{上昇 (下降) 速度} = \frac{\text{設定電圧値}}{\text{上昇 (下降) 時間}} \quad (4.7)$$

設定電圧値は HV モジュールでは 7000 V、Guard-Bias モジュールでは 300 V とし、上昇 (下降) 時間は ON(OFF) を押してから、上昇 (下降) 中の状態を経て ON(OFF) のステイトになるまでの時間とした。電圧上昇 (下降) 速度の測定結果を表 4.6、4.7 に示す。全体として相関は見られるが、設定値に対して小さい値を取っていることがわかる。これは上昇 (下降) 中のステイトから ON(OFF) のステイトへの確認時間が必要になるためである。実際 ON(OFF) のステイトになるより前に電圧は設定した電圧に到達していることを確認している。また設定値より小さい値を取ることは確認時間には 1 秒のモニタ間隔も含まれることから想定通りといえ、HAPD 保護のために必要な印加速度が実現できているといえる。

表 4.6 HV モジュールでの電圧上昇・下降速度

設定値	50 V/s	100 V/s
電圧上昇速度測定値	48 V/s	93 V/s
電圧下降速度測定値	49 V/s	93 V/s

表 4.7 Guard-Bias モジュールでの電圧上昇・下降速度

設定値	5 V/s	10 V/s
電圧上昇速度測定値	4 V/s	7 V/s
電圧下降速度測定値	4 V/s	7 V/s

4.3.2 トリップ機能

トリップ機能は抵抗値と電圧値の計算から求まる電流値よりも電流制限値を故意に低い値に設定することで設定したタイミングでトリップを起こし、その挙動を確認した。電流制限値の他、CAENの電源では“Trip”と呼ばれるパラメータがあり、設定した制限電圧・電流値を超えてから、電圧印加を停止するまでの時間を設定することができる。制限値を超えてから電圧印加を停止するまでの間は設定した制限電圧・電流値を超えないように電圧が調整される。

CAENのHVモジュールのトリップ機能結果を図4.7に示す。出力電圧は5000V、電流制限値は $3\mu\text{A}$ に設定し、負荷抵抗として $1\text{G}\Omega$ を使用しているため3000V印加されると $3\mu\text{A}$ 流れることになり、トリップが発生する。電流制限値の $3\mu\text{A}$ に到達する前にトリップが発生しているように見えるが、これはモニタ間隔内でトリップが発生したことが原因である。“Trip”を0.0秒に設定すると自動で電圧印加が停止されることが判明したが、ファームウェアの修正により改善した。修正後の結果を図4.8に示す。“Trip”を0.0秒に設定すると電圧印加が直ちに停止されていることが分かった。またトリップ発生時にはその電圧停止方法を設定されている電圧下降速度で停止させる“Ramp”と可能な限り速い速度で下降させる“Kill”が設定可能である。図4.8ではその双方の設定を行い、それぞれ正しく機能していることを確認した。

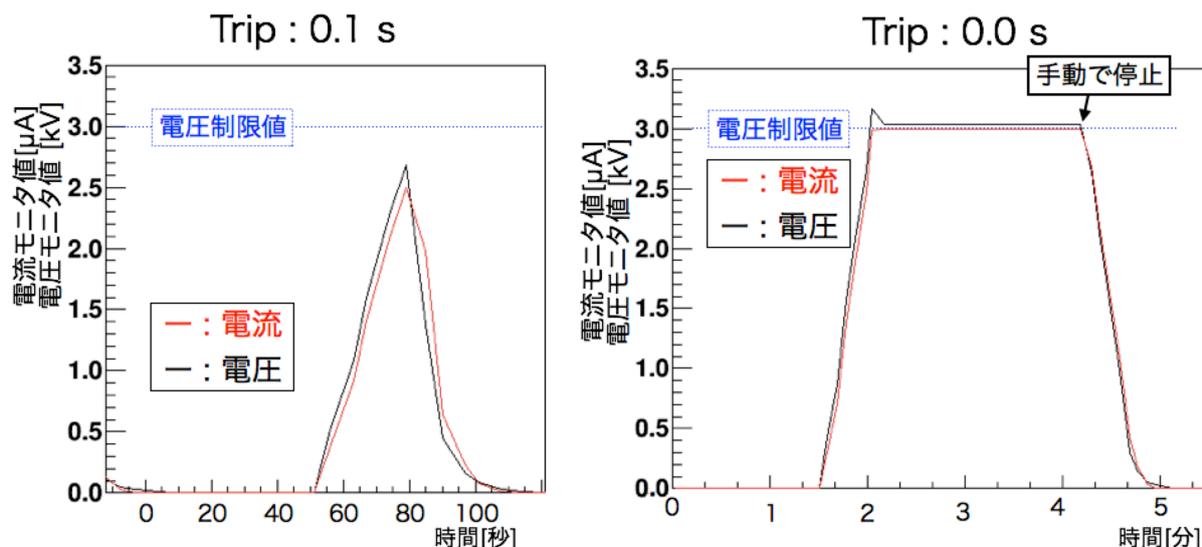


図 4.7 CAEN の HV モジュールでのトリップ機能 1

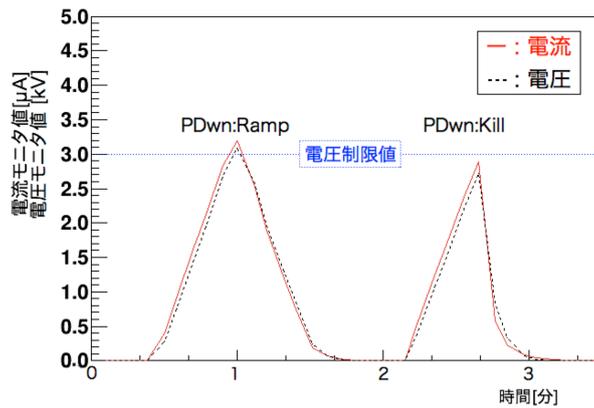


図 4.8 CAEN の HV モジュールでのトリップ機能 2

同様に Guard-Bias モジュールでの結果を図 4.9 に示す。出力電圧は 300 V、電流制限値は 20 μA に設定し、負荷抵抗として 10 M Ω を使用しているため 200 V 印加されると 20 μA 流れることになり、トリップが発生する。パラメータ “Trip” を 10 秒など 0.0 秒以外の時間に設定すると、その間電圧が維持されず上昇し続けるという問題が発見されたハードウェアの修正により改善した。

HV モジュール、Guard-Bias モジュールそれぞれでトリップ機能が正しく動作しており、HAPD を保護する上で問題のない動作であるため、我々の要求を満たしていることを確認した。

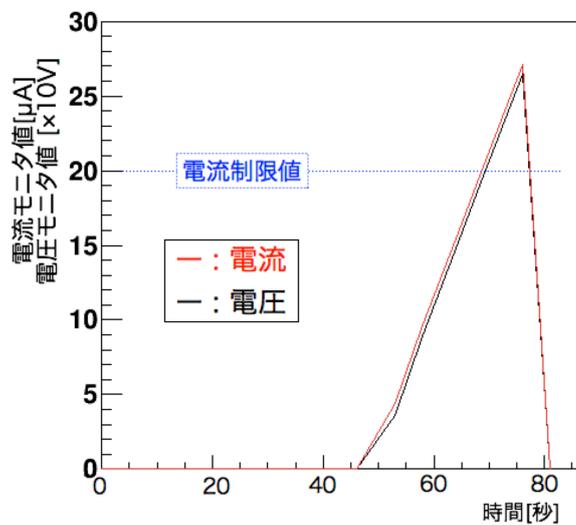


図 4.9 CAEN の Guard-Bias モジュールでのトリップ機能

4.3.3 インターロック機能

インターロック機能は電圧印加中に NIM モジュールにより NIM 信号を CAEN クレートに入力することでその動作を確認した。NIM 信号はモジュール上のスイッチの ON/OFF によりその入力時間を自由に設定できる。電圧印加中にインターロック信号を入力すると即座に電圧印加が停止するこ

とはHV モジュール、Guard-Bias モジュールそれぞれで確認できた。一方でインターロック信号が入力された際には電圧印加が停止されると共にステイトが“External Disable”へ変化し、インターロック信号入力中はもちろん入力が止まった後でも電圧印加ができなくなる。“External Disable”はソフトウェアのコマンドである“Clear Alarm”により解除され再び電圧印加を行うことができるようになる。Guard-Bias モジュールでは以上の動作が正しく行えることが確認できた(図 4.10)。一方でHV モジュールではインターロック信号を入力すると電圧印加は停止するが、ステイトが変化せずインターロックの入力が止まると直ちに電圧印加が可能になることが判明した(図 4.11)が、ファームウェアの問題であり修正により改善され、Guard-Bias モジュールと同様にインターロック信号入力後は“Clear Alarm” コマンドを入力するまで電圧印加ができないようになった。

以上の結果は NIM 信号を入力した際に電圧印加を停止する設定での結果であるが、NIM 信号入力中のみ電圧印加を許可する設定でも同様の結果が得られた。インターロック信号の入力による電圧印加の停止と、停止後の“Clear Alarm” コマンド入力までの“External Disable”ステイトの継続が確認でき、インターロック機能による HAPD の保護の実用可能であることを確認した。

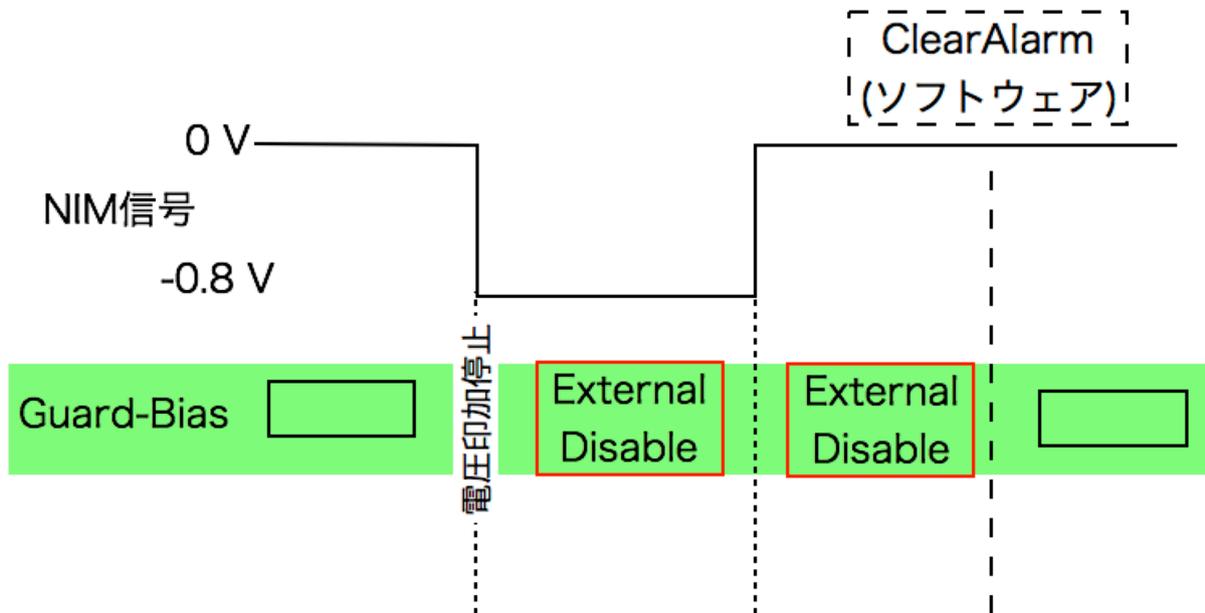


図 4.10 CAEN の Guard-Bias モジュールでのインターロック機能

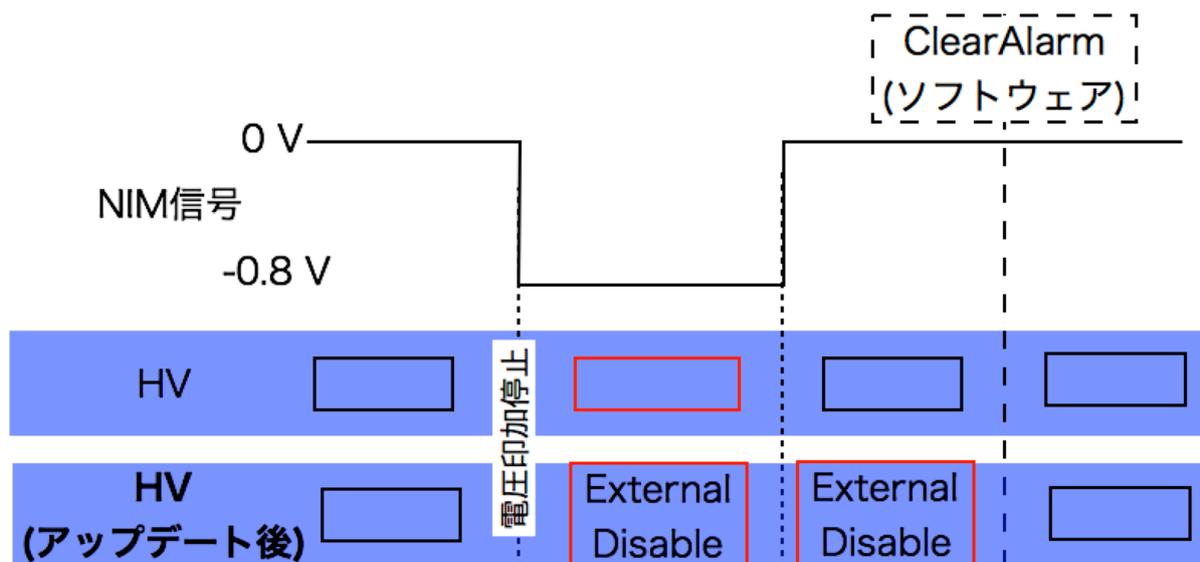


図 4.11 CAEN の HV モジュールでのインターロック機能

4.3.4 HAPD への電圧印加

ここまでの試験により基本的な電源装置の性能確認は完了しているが、最終的に HAPD への電圧印加を行い HAPD の動作を通して電源装置の性能検証を行うことはこれまでの試験以上に重要であると言える。HAPD への電圧印加のためセットアップはこれまでの試験セットアップとは全く異なり、図 4.12、4.12 のようなセットアップを組み行なった。暗箱内には HAPD を設置し暗箱側面のコネクタを経由して電圧印加を行うとともに、暗箱内部で LED 光を HAPD に入射し光信号の確認も可能である。HAPD からの信号は専用の ASIC や Frontend board は使用せず、pre AMP や filterAMP により信号処理と行った後の信号をオシロスコープにより確認すると共に波高型 ADC によりデータ取得を行い、定量的な評価を行なった。波高型 ADC は信号の波高値を測定するため、ノイズ・1 光子信号・2 光子信号がピークとして確認できる。印加電圧を標準の電圧と最大電圧に設定した際の波高型 ADC の結果を図 4.14、4.15 に示す。0 付近にノイズによるピークが確認できたとともに 1・2 光子信号のピークも確認できた。また標準の印加電圧に比べて最大の印加電圧の信号が右にシフトしており、増幅率が対応して増加していることも確認できた。

HAPD に電圧印加を行い 1 光子信号や増幅率の変化が確認でき、この電源装置により HAPD へ電圧印加が正常に行えることを確認できた。

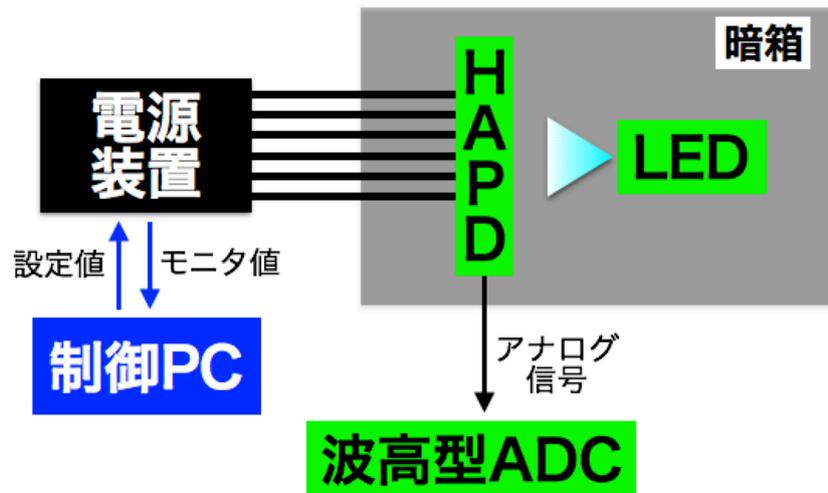


図 4.12 HAPD への電圧印加試験のセットアップ



図 4.13 HAPD への電圧印加試験のセットアップ写真

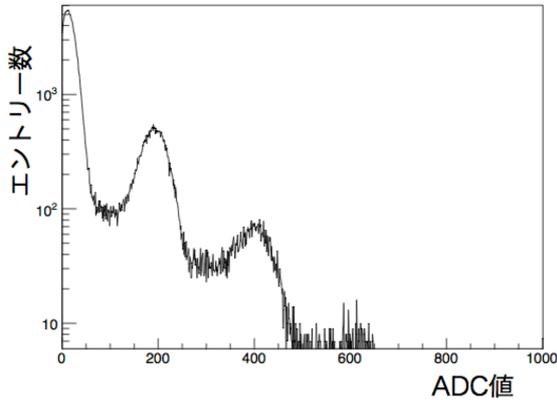


図 4.14 LED 光入射時の pocket MCA による波高値の分布。HV、Bias の電圧は標準値を印加している。

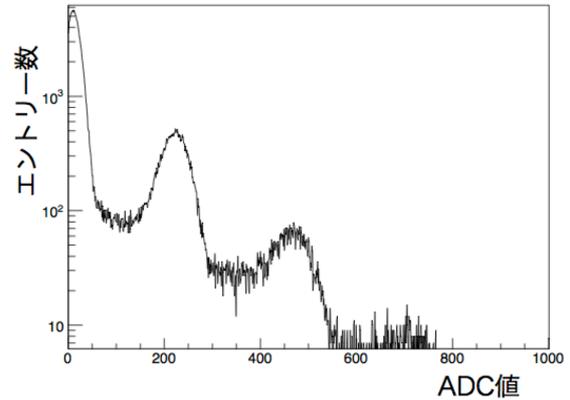


図 4.15 LED 光入射時の pocket MCA による波高値の分布。HV、Bias の電圧は最大値を印加している。

4.3.5 出力電圧安定性

出力電圧の安定性は HAPD の増幅率の安定性に直接影響し、適切な増幅率の範囲内で電圧変化を維持できることが求められる。出力電圧の安定性は先程の HAPD への電圧印加の試験結果をもとに、電圧だけでなく増幅率の安定性の検証も同時に行った。

セットアップは HAPD への電圧印加試験のセットアップを利用し、電圧を印加した状態を約 2 週間維持し、その過程での印加電圧の安定性と増幅率の変動を確認した。図 4.16 に HAPD に印加した HV、Bias(4 チャンネル)、Guard の電圧、電流のグラフを示す。グラフの切れている範囲はソフトウェアのアップデートを行っていたため、モニタ値の取得ができていない範囲である。電圧は変動せずに安定していることがわかる。各チャンネルの電圧値のヒストグラムを図 4.17～4.22 に示す。設定値に対して平均値が要求の範囲内 (HV : $8500 \times 0.003 = 25.5 V$ 、Guard-Bias : $350 \times 0.003 = 1.05 V$) で電圧が出力されていることがわかる。またふらつきを示す値として RMS も要求の範囲内 (HV : $8500 \times 0.0005 = 4.25 V$ 、Guard-Bias : $350 \times 0.0001 = 35 mV$) であることがわかる。

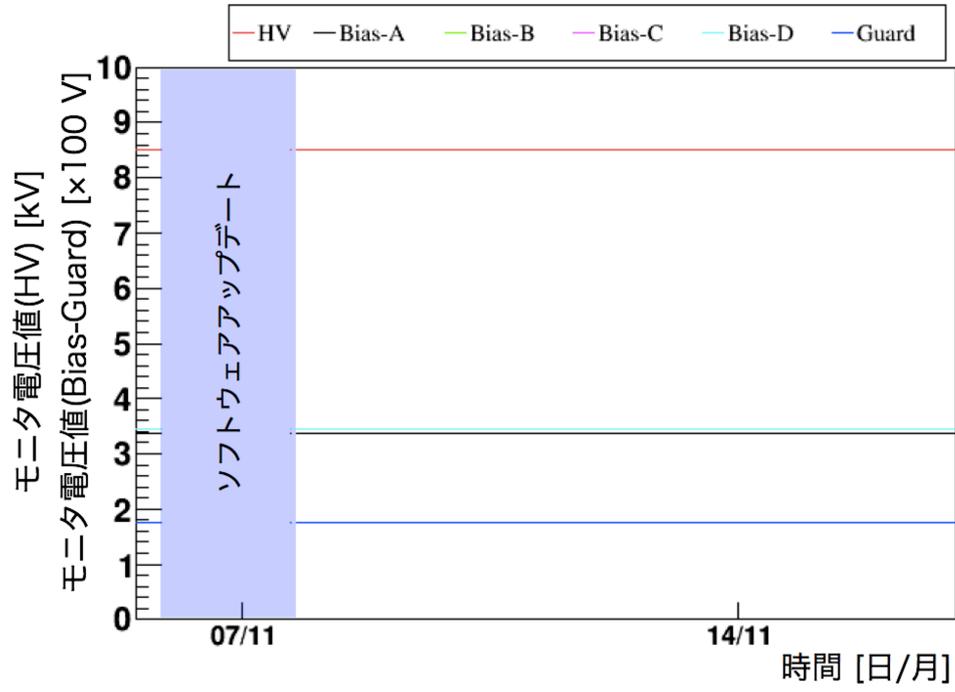


図 4.16 CAEN の HV、Guard-Bias モジュールでの出力電圧安定性

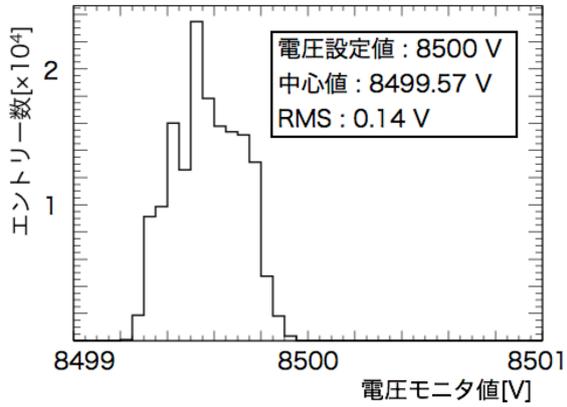


図 4.17 CAEN の HV の安定性

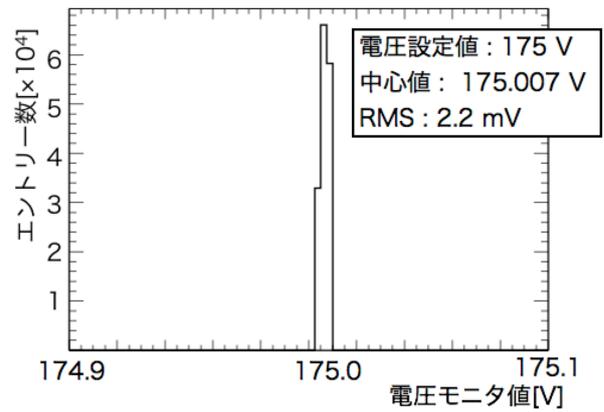


図 4.18 CAEN の Guard の安定性

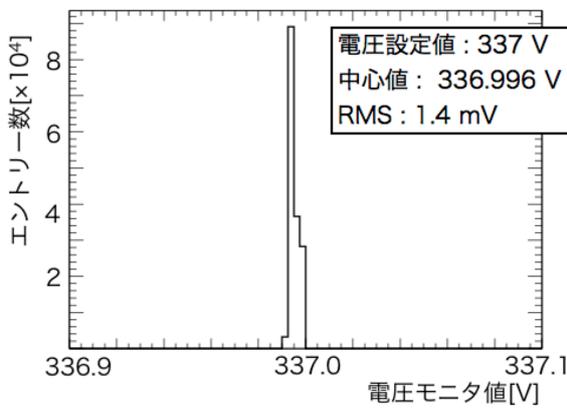


図 4.19 CAEN の Bias-A の安定性

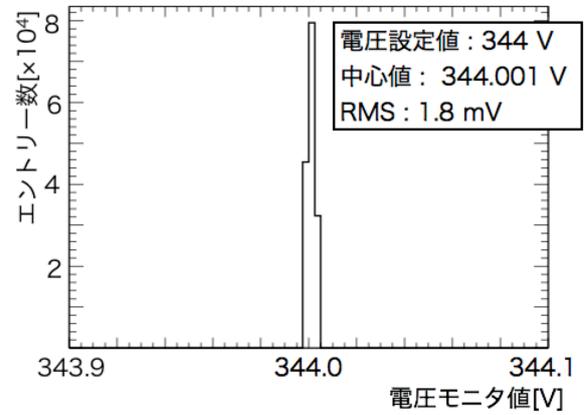


図 4.20 CAEN の Bias-B の安定性

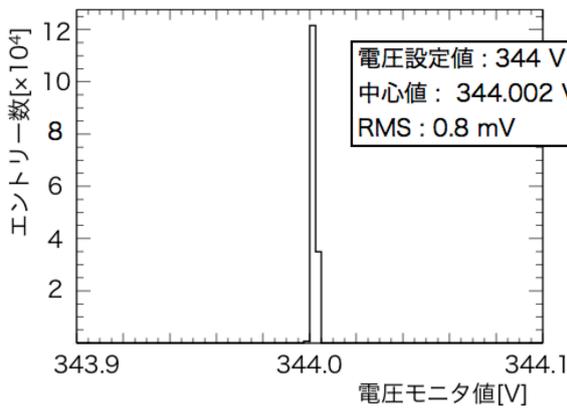


図 4.21 CAEN の Bias-C の安定性

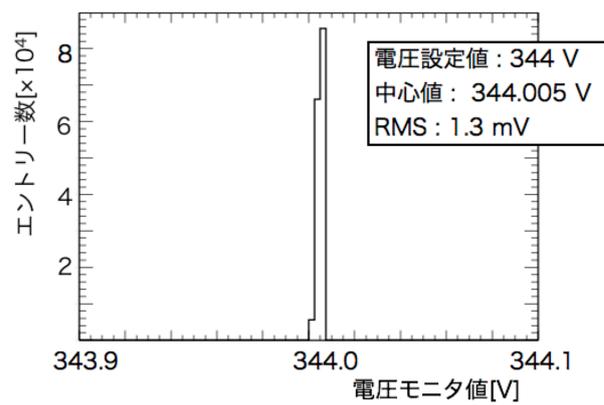


図 4.22 CAEN の Bias-D の安定性

増幅率の安定性は波高型 MCA での波高値の分布でノイズと 1 光子信号のピークをガウス関数でフィッティングを行い、それらの平均値の差をとることで増幅率を算出した。電圧印加直後と測定終了時 (約 270 時間後) でのノイズと増幅率を測定結果を表 4.8 に示す。ノイズ、増幅率共にほとんど

変動がなく安定していることがわかる。

出力電圧の安定性が要求の範囲内であり、それに伴う増幅率も安定しており HAPD の性能を維持するために十分安定した電圧供給が可能である電源装置であることが確認できた。

表 4.8 ノイズ量と増幅率の変化

	ノイズ量 [e^-](変化率)	増幅率 [e^-](変化率)
電圧印加直後	6.70×10^3	1.35×10^5
約 270 時間後	$6.64 \times 10^3(-0.8\%)$	$1.34 \times 10^5(-0.7\%)$

4.3.6 電源装置の性能評価試験のまとめ

電圧上昇・下降速度は設定値からの違いはあったが、ステイトの変化やモニタ間隔により説明できる範囲であることが確認できた。また HAPD を保護するための機能であるトリップ機能やインターロック機能はファームウェア、ハードウェアに問題があったものの修正により改善され、実際の運用において HAPD を問題なく保護できることが確認できた。最終的に行った HAPD への電圧印加や出力電圧の安定性とそれに伴う増幅率の安定性も十分に要求の範囲内であることが確認できた。以上の結果から本研究で試験を行った電源装置は HAPD の性能を維持した上で故障を防ぐための保護機能も正しく動作し、ARICH 検出器の性能を十分に維持できるだけの性能があることが確認できた。

第 5 章

光検出器用電源制御システムの開発

ARICH 検出器に使用する HAPD は 420 台と多いため、電源モジュールを格納する電源クレートは複数台必要である。Belle II 実験ではデータ収集の開始時に複数台の電源クレートを同時に操作することで光検出器への電源供給を行う必要がある。さらには HAPD は 1 台毎に 3 系統の独立した電源入力が必要であり、電圧印加の手順は比較的複雑となる。このため本研究では複数台の電源クレートをネットワークから制御し、電源印加操作と監視を行う専用の制御ソフトウェアシステムの開発を行った。制御システムは Belle II DAQ グループが提供するネットワーク通信・データベース管理フレームワークを採用し、Belle II 実験環境下において加速器や他検出器とネットワーク越しに連携して運用することを目指して開発を行った。

5.1 光検出器用電源制御システムの概要

ARICH における電源制御システムの概念図を図 5.1 に示す。“ARICH HV control” は ARICH 検出器に使用する HAPD の電源を制御するためのメインプログラムであり、HAPD に接続する各電源クレートを統合して検出器全体の電圧管理を行う。電源との通信により、モニタ値の取得や電圧値などのパラメータの設定を行う他、データベースやユーザーインターフェースとのやり取りにより、適切なパラメータの取得や簡単な操作を可能にしている。“ARICH HV control” の開発には Belle II 実験共通のネットワーク通信規格である NSM2 を使用し、ARICH 検出器内の通信だけでなく、他検出器や加速器との通信を容易にした。

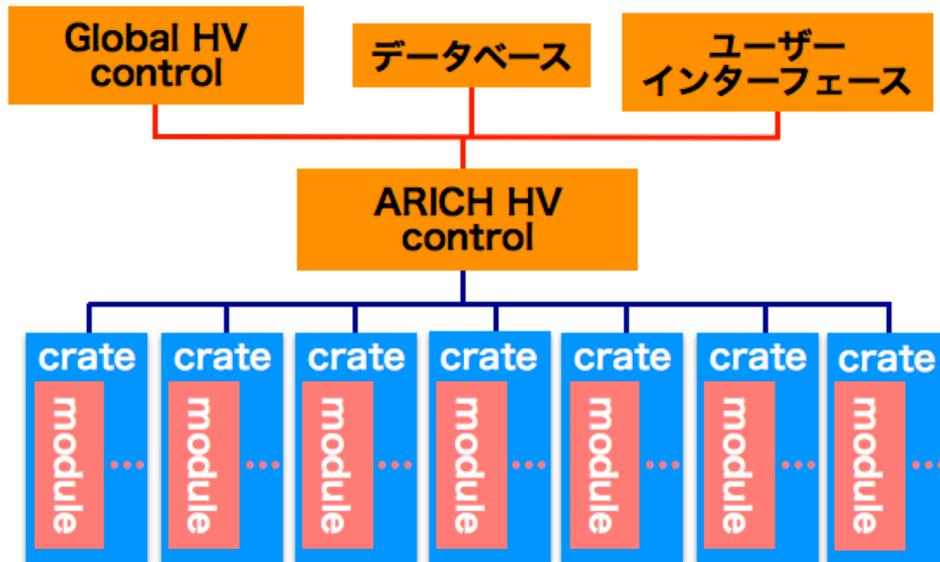


図 5.1 光検出器用電源制御システムの概念図

Graphical User Interface の開発

制御システムのユーザーインターフェースとして Graphical User Interface(GUI) の開発を行った。GUI の開発には総合開発環境である eclipse[15] をもとにした Control System studio(CSS) と呼ばれる大規模な制御システム向けの開発環境を使用した。CSS は加速器の制御や異なるシステム間の連携した制御で実績のあるシステムである。Belle II 実験では NSM2 への命令を GUI 上で実行することで、モニタ値の取得やパラメータの設定、コマンドの実行が可能となっている。本研究で作成した GUI を図 5.2 に示す。詳細な機能については各ソフトウェア制御と関連して説明する。

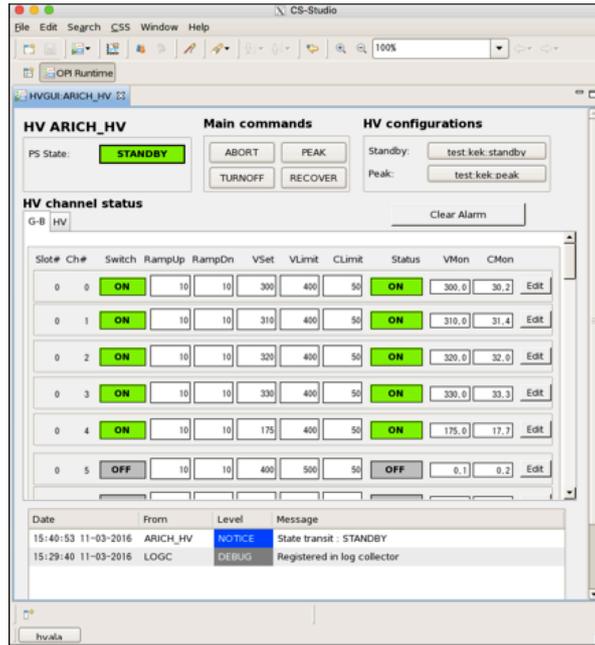


図 5.2 電源制御用 GUI

5.2 多数チャンネルの操作

ARICH では $6 \times 420 = 2520$ チャンネルに対して、電源の ON/OFF や各種パラメータの設定、モニタによる監視などが求められる。チャンネル毎の操作はクレート、スロット、チャンネルをパラメータとして値の設定、取得を行うことで可能にしている。また電源装置毎に異なる制御関数を使用しているため、入出力を統一化するための変換プログラムを用意し、電源装置によらず多チャンネルの制御が行えるようにした。各チャンネルの電圧値を始めとするパラメータは GUI から取得・設定可能であり、チャンネル毎に操作が可能となっている。

5.3 電圧印加の自動化

HAPD に用いる HV、Bias、Guard の 3 種類の電圧は HAPD 保護のため Guard → HV → Bias の順番で印加する必要がある。停止する際も同様であり、印加とは逆の Bias → HV → Guard の順番に電圧を落とす必要がある。また Belle II 実験では電圧印加状態は図 5.3 のようになっており、ARICH 検出器でもこの電源ステイトに対応して制御を行うことが求められる。

Power supply state diagram

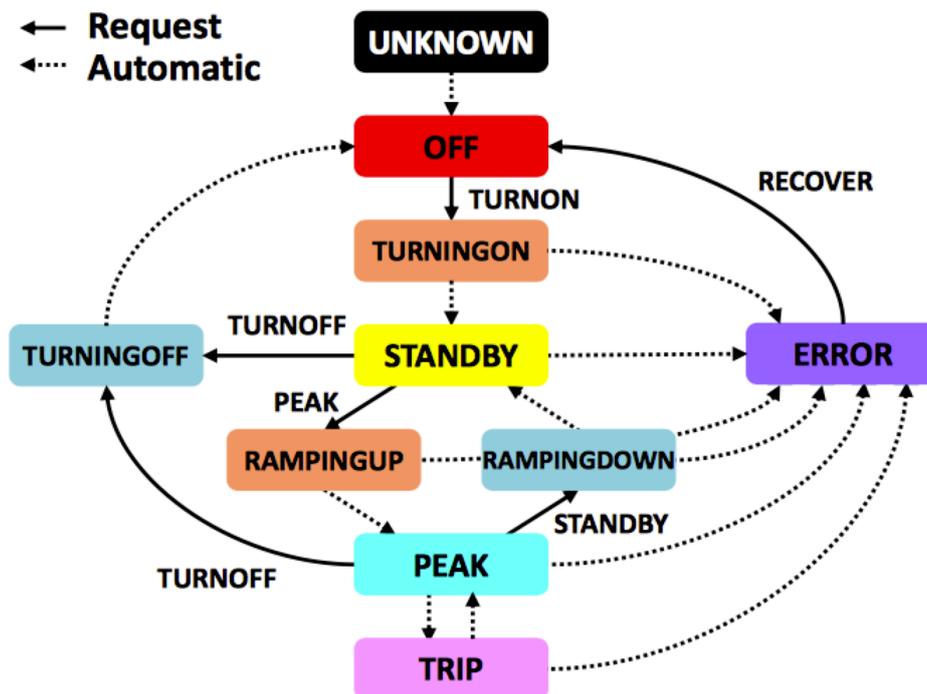


図 5.3 Belle II 実験の電源ステイトダイアグラム

それぞれの電源ステイトを説明する

- UNKNOWN : 電源の状態を取得できない状態
- OFF : 全ての電圧が OFF。
- STANDBY : PEAK へすぐに移行できる電圧状態。ビームバックグラウンドが多い状態。
- PEAK : 物理測定が可能な電圧状態。ビームの連続入射が行われている。
- TURNINGON : OFF から STANDBY への移行中。
- TURNINGUP : STANDBY から PEAK への移行中。
- RAMPINGDOWN : PEAK から STANDBY への移行中。
- TURNINGOFF : PEAK または STANDBY から OFF への移行中
- TRIP : 過電流・過電圧による印加緊急停止 (トリップ)
- ERROR : 自動では回復できない状態

ARICH で現在各電圧状態で表 5.1 のような形で電圧印加を行うことが考えられている。最終的にはビームを用いたコミショニングで実際のバックグラウンドや移行時間などの調整により決定される。

表 5.1 電圧印加の状況

ビーム状況	HV	Bias	Guard
OFF	OFF	OFF	OFF
STANDBY	ON	OFF	ON
PEAK	ON	ON	ON

実際に自動で電圧印加を行っている様子を図 5.4 に示す。この時は試験のため STANDBY と PEAK での各電圧の印加状態を同じにしており、一度の操作で PEAK と同じ電圧状態に移行している。また逆に OFF への移行も一度の操作で可能にしている。

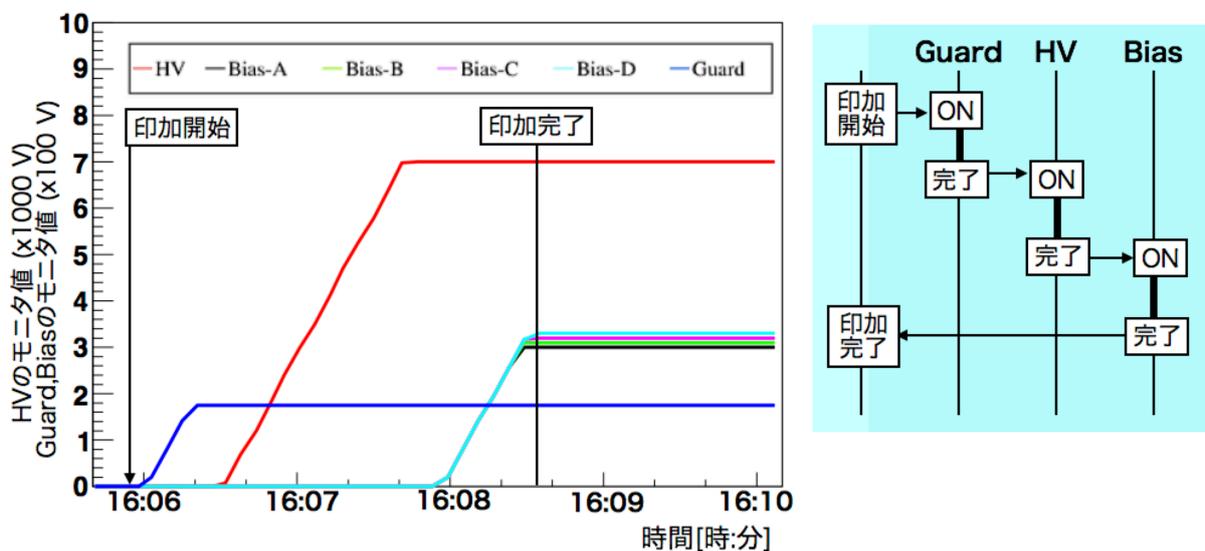


図 5.4 シークエンス動作の図

実際の運用では中間状態である STANDBY も含めた電圧状態の移行が必要になる。また最終的な電圧状態の調整の際に変更になることもあるため、HV、Bias、Guard を独立に印加することを可能にし、それらを組み合わせることで適切な電圧状態の移行のできるようにしている。GUI からは図 5.3 の “Request” に対応する命令を NSM2 を経由して電源に送ることで各電源ステイトへ移行することができる。

5.4 電圧印加の自動停止機能

シーケンス動作に関連して、HAPD 保護のためトリップが発生した場合には他の電圧供給を停止する必要がある。保護のためには以下のような条件がある。

- Guard が印加されている間のみ Bias を印加できる
- Bias 印加中に HV の電圧上昇・下降を行わない

以上の条件のため各電圧でトリップが発生した際には以下の流れで電圧印加を自動で停止する。

- HV トリップ：Bias を OFF
- Bias トリップ：維持
- Guard トリップ：Bias を OFF 後、HV を OFF

トリップを検知したら、通知をすると共にチャンネルを電圧の種類を判断し、適切な電圧に対して印加を停止し、確認を行う。図 5.5、5.6、5.7 に各電圧がトリップした際の自動停止機能の結果を示す。

HV トリップ時には Bias の電圧印加が停止されている事がわかる。Bias トリップ時には他の電圧印加が継続していることがわかる。Guard トリップ時には Bias の電圧印加が停止された後に HV の電圧印加が停止していることがわかる。以上のようにトリップした電圧を判断し、適切な電圧に対して適切な順序で電圧印加を停止させることができ、HAPD の故障を未然に防ぐことができるシステムを構築できた。

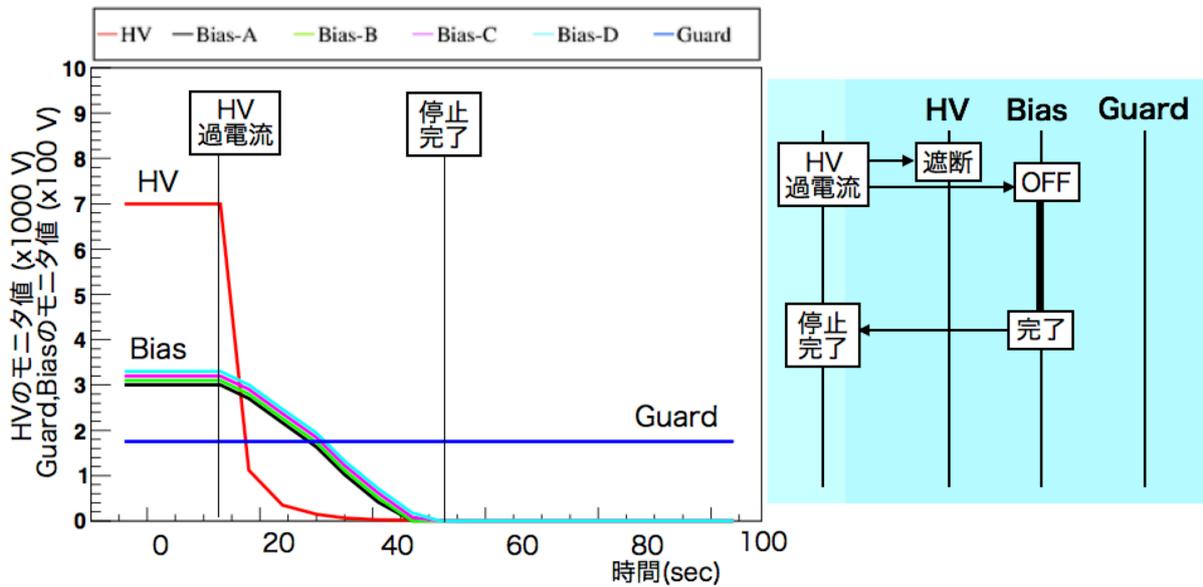


図 5.5 自動停止 (HV) 図

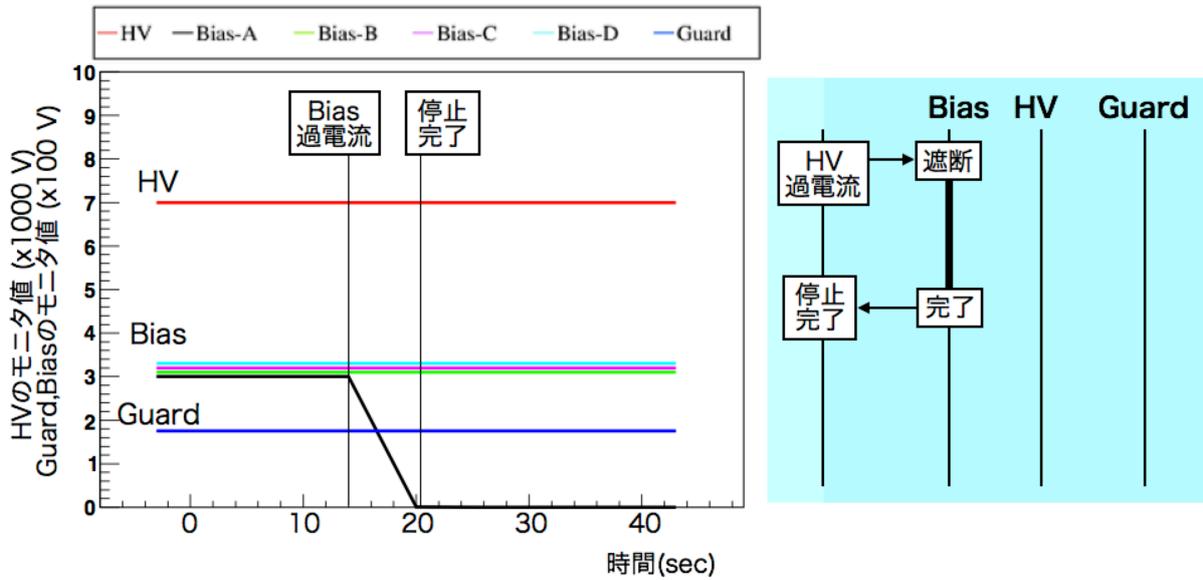


図 5.6 自動停止 (Bias) の図

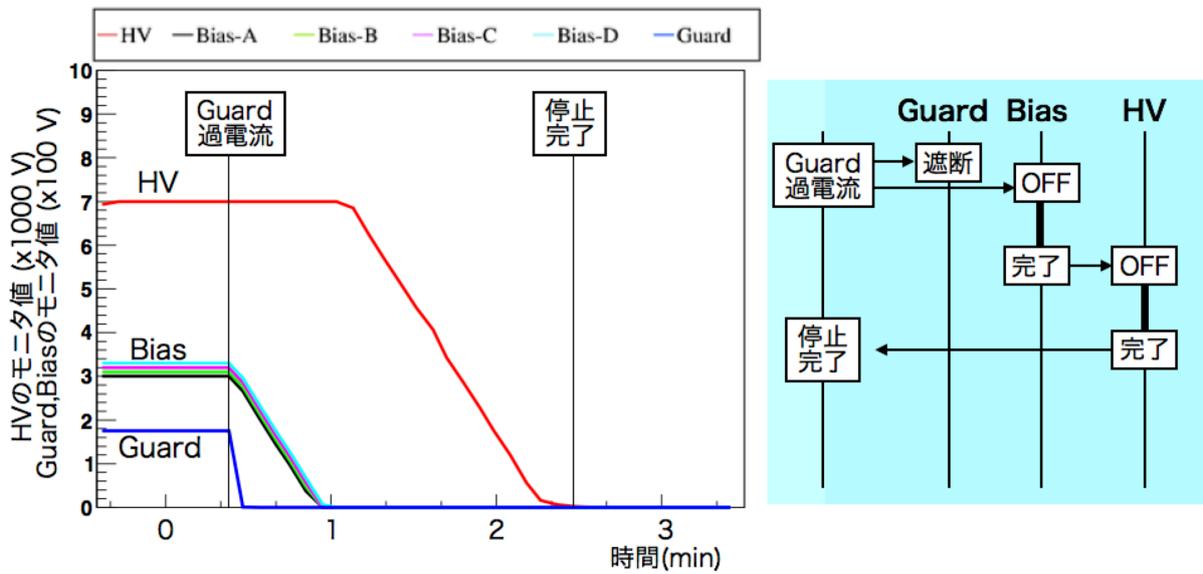


図 5.7 自動停止 (Guard) の図

5.5 データベースを用いたパラメータの管理

HAPD に印加する電圧はその HAPD 毎に異なると共に放射線による損傷により、その印加電圧を調整する必要がある。また電圧上昇・下降速度や電圧・電流保護値などの多くのパラメータが存在する。それらのパラメータの管理を効率的に行うためにデータベースを用いて管理を行う。データベースには以下の情報が含まれている。

表 5.2 データベースに保存するパラメータ

パラメータ名	説明
crate	クレートの番号
slot	スロットの番号
channel	チャンネルの番号
turnon	スイッチ ON/OFF の可否
rampup	電圧上昇速度の設定
rampdown	電圧下降速度の設定
vdemand	出力電圧の設定
vlimit	過電圧保護値の設定
climit	過電流保護値の設定
voffset	電圧のオフセットの設定
vslope	電圧の傾きの設定
coffset	電流のオフセットの設定
cslope	電流の傾きの設定
type	電圧の種類の設定 (Bias,Guard,HV)

ソフトウェア内では以上のデータを利用して、チャンネル毎の操作や HAPD 単位での操作を可能にしている。またこれらのパラメータは OFF、STANDBY、PEAK の電圧状態毎に異なるため、それぞれの電源ステイトに合わせたデータベースを用意した。それぞれの電源ステイト毎のデータベースは GUI から呼び出すことが可能である。

第 6 章

光検出器用読み出し制御システムの開発

HAPD は 1 台あたり 144 の読み出しチャンネルを有し、ARICH 検出器全体では 60480 チャンネルもの読み出しが必要となる。各チャンネルに適切なパラメータを設定しデータ収集を可能にする光検出器読み出し制御システムが必要となる。Belle II 実験では各検出器の出口までは Belle2Link を介して設定操作を行うことが可能であるが、その先のフロントエンドの機器までは各検出器独自のシステムが必要である。ARICH 検出器では Merger board を介して Frontend board および搭載している ASIC まで全てのパラメータ設定を行う。一方で設定パラメータはキャリブレーションデータを用いて算出するが ARICH 検出器ではスレッシュホールドスキャンと呼ばれる独自のデータ収集を行う。また LED 光を導入することで HAPD の動作確認を行うモニターシステムの制御も独自の実装が必要となる。本研究では光検出器読み出しの制御を行うソフトウェアシステムを開発し、キャリブレーションデータ取得手法を構築した。この章では ARICH における光検出器用読み出し制御システムの開発について述べる。

6.1 光検出器用読み出し制御システムの概要

ARICH における光検出器読み出し制御システムの概念図を図 6.1 に示す。中央下の“ARICH run control”が COPPER を介した Belle2Link により読み出し回路の制御やローカルのトリガー制御を行うメインプログラムである。電源制御システム同様にデータベースやユーザーインターフェースとのやり取りにより、適切なパラメータの取得や設定を可能にしている。データ収集を行うためには COPPER や読み出し用 PC、読み出し回路などの全要素が正しく動作している必要があり、それらの管理も行っている。読み出し回路の動作確認は Belle2Link を通じたパラメータから管理を行う。COPPER や読み出し用 PC はそれぞれ制御プログラムが動いており、“ARICH run control”と通信することでその動作を確認している。

また ARICH のキャリブレーションに用いるスレッシュホールドスキャンではパラメータを変化させながらデータ収集を行う独自の手法を用いるため、ARICH グループでトリガーシステムとデータ収集システムを制御し、Belle2Link を通じたパラメータの設定とデータ収集を行う。スレッシュホールドスキャンでは光を導入することで HAPD の光信号を測定し HAPD の動作の確認を行うため、光の導入とデータ収集を同期のため独自にトリガーの生成、入力を行うモニターシステム用のトリガーシステムを用いる。

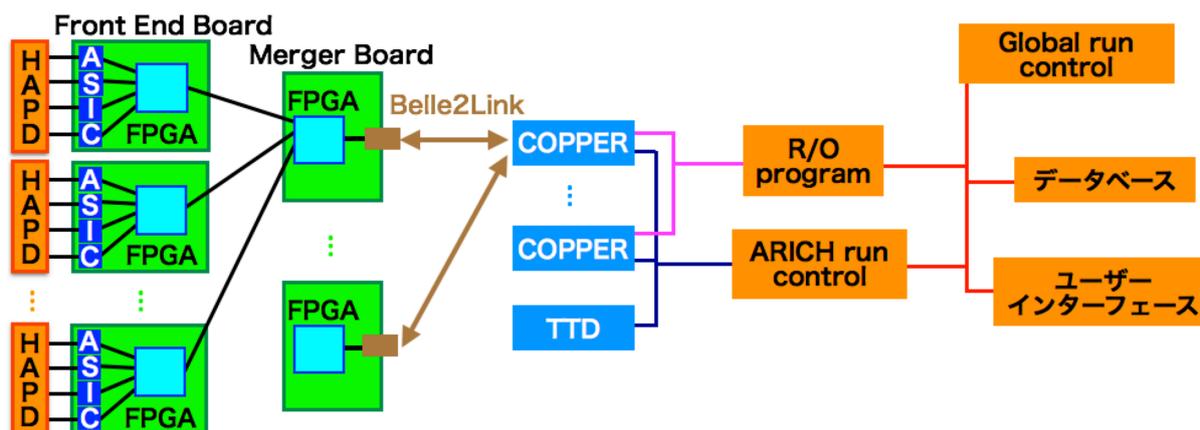


図 6.1 ARICH の光検出器読み出し制御システムの概念図

Graphical User Interface の開発

全体の制御を行う ARICH 用読み出し制御 GUI(図 6.2) と読み出し回路のパラメータの制御を行うパラメータ管理用 GUI(図 6.3) の 2 つの GUI を開発した。GUI は電源制御システムと同様の CSS を用いて開発しており、NSM2 を介して制御を行うことができる。

ARICH 用読み出し制御 GUI は読み出し PC や COPPER、読み出し回路の制御を行うと共に、後述するトリガー分配システムやキャリブレーションシステムの制御も行う。読み出し PC や COPPER の制御は Belle II DAQ グループにより開発が行われており、本研究ではそれらのシステムを実際に使用しフィードバックは行っているが、開発自体は行っていない。ARICH 用読み出し制御 GUI では読み出し回路の制御は各 Merger board、Frontend board の使用・未使用の管理を行うのみで、各パラメータの管理は行っていない。そのため読み出し回路用のパラメータ管理用 GUI を開発した。パラメータ管理用 GUI は ARICH 用読み出し制御 GUI から Merger board 単位で呼び出され、最大 6 つの Frontend board と 24 つの ASIC のパラメータの管理を行う。

詳細な機能については各ソフトウェアの制御で説明する。

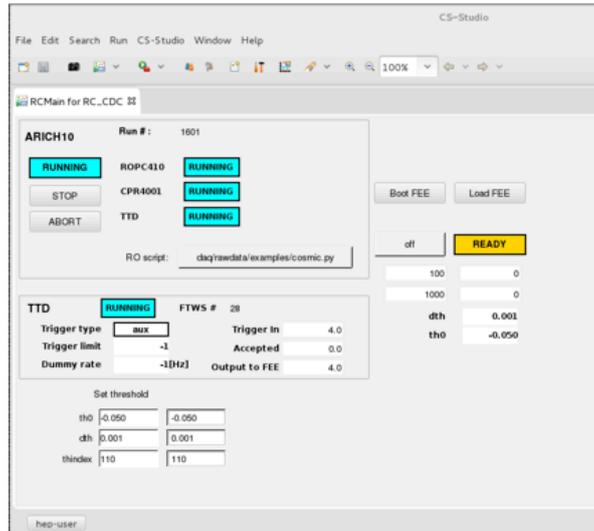


図 6.2 ARICH 用読み出し制御 GUI

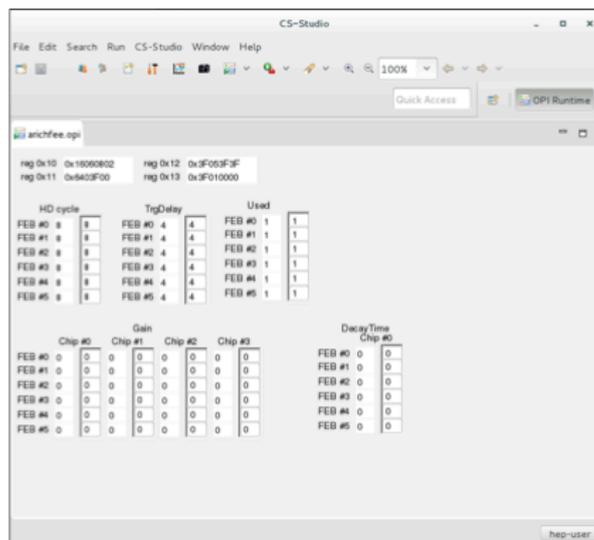


図 6.3 パラメータ管理用 GUI

6.2 パラメータの設定

ARICH の読み出し回路はパラメータの設定が必要な回路が 3 種類の存在している。一つ目は Merger board であり、Frontend board の使用許可やデータフォーマットの設定が可能である他、Belle2Link からは直接制御できない Frontend board 用のパラメータを設定するためのアドレスが用意されている (表 6.1)。二つ目は Frontend board であり、データ送信タイミングの設定が可能である他、ASIC のパラメータ設定を行うためのコマンドとバッファが用意されている (表 6.2)。三つ目は ASIC であるが、ASIC のパラメータにはチップの全チャンネルで共通のグローバルパラメータとチャンネル毎に異なるチャンネルパラメータの 2 種類が存在する。ASIC のグローバルパラメータ

には増幅率や波形整形の時定数の設定など、主にチャンネル毎には変化しないアナログ信号の処理方法に関するパラメータが多く存在している (表 6.3)。同様に ASIC のチャンネルパラメータには主にオフセットの調整に関するパラメータとそのチャンネルの使用許可の設定を行うパラメータが存在している (表 6.4)。

Merger board のパラメータは Belle2Link を通じて直接レジスタの書き込みを行うことで設定される。Frontend board のパラメータは Merger board のレジスタ内に Frontend board 設定用のレジスタが用意され、そこに書き込むことで Merger board を経由して Frontend board のパラメータを設定することが可能である。Frontend board の ASIC は Frontend board の FPGA のレジスタに ASIC 用バッファが用意されており、そこに値を書き込み ASIC 用のパラメータを書き込み、FPGA で書き込みを行うコマンドを入力することで、ASIC へと書き込まれる。

設定値の読み出しは Merger board では設定時と同様に Belle2Link から直接レジスタを読むことを行い、Frontend board の FPGA も同様に Merger board 内に用意された Frontend board の FPGA 用のレジスタから読み出すことが可能である。Frontend board の ASIC は直接読むことはできず、Frontend board の FPGA で一度コマンドを入力し、バッファへと書き出しそのバッファを読むことで読み出すことができる。

表 6.1: Merger board のパラメータ

RBCP アドレス	R/W	名前	機能
0x0010	R/	SYN_DATA	[31:0] 合成日時
0x0011	R/	REV	[31:24] ファームウェアの改訂
	R/W	FEE_CNT0	[23] FEE I/F データ幅 (0:4 bit、1:8 bit) [22:21] データ転送モード { 2b'11 : Raw and Suppressed date 2b'10 : Raw date 2b'01 : Suppressed date 2b'00 : 未使用 } [20:18] 未使用 [17] SCK 信号選択 (0:不可、1:可) [16] FEE リセット (書き込み専用)
	R/W	FEE_CNT1	[15:14] 未使用 [13] FEE #5 選択 (0:不可、1:可) [12] FEE #4 選択 (0:不可、1:可) [11] FEE #3 選択 (0:不可、1:可) [10] FEE #2 選択 (0:不可、1:可) [9] FEE #1 選択 (0:不可、1:可) [8] FEE #0 選択 (0:不可、1:可)
	/W	TEST	[7] 未使用 [6] FEBs へのテストトリガー信号 (書き込み専用)

			[5:1] 未使用 [0] 温度モニタ制御 (0:リセット、1:データ読み出し)
0x0012	R/W	JTAG_CNT0	[31:30] 未使用 [29] FEE #5 JTAG 選択 (0:不可、1:可) [28] FEE #4 JTAG 選択 (0:不可、1:可) [27] FEE #3 JTAG 選択 (0:不可、1:可) [26] FEE #2 JTAG 選択 (0:不可、1:可) [25] FEE #1 JTAG 選択 (0:不可、1:可) [24] FEE #0 JTAG 選択 (0:不可、1:可)
	R/W	JTAG_CNT1	[23:16] JTAG クロック分周器の値
	R/	FEE_DONE	[15:14] 未使用 [13] FEE #5 FPGA 状態確認 [12] FEE #4 FPGA 状態確認 [11] FEE #3 FPGA 状態確認 [10] FEE #2 FPGA 状態確認 [9] FEE #1 FPGA 状態確認 [8] FEE #0 FPGA 状態確認
	R/	FEE_INITB	[7:6] 未使用 [5] FEE #5 FPGA 接続確認 [4] FEE #4 FPGA 接続確認 [3] FEE #3 FPGA 接続確認 [2] FEE #2 FPGA 接続確認 [1] FEE #1 FPGA 接続確認 [0] FEE #0 FPGA 接続確認
0x0013	R/W	FEE_PWR	[31:30] 未使用 [29] FEE #5 電源 (0:OFF、1:ON) [28] FEE #4 電源 (0:OFF、1:ON) [27] FEE #3 電源 (0:OFF、1:ON) [26] FEE #2 電源 (0:OFF、1:ON) [25] FEE #1 電源 (0:OFF、1:ON) [24] FEE #0 電源 (0:OFF、1:ON)
	R/W	FEE_TRG	[23:20] 未使用 [19:16] FEE トリガーチャンネル選択 { [19] チャンネル#3 選択 (0:不可、1:可) [18] チャンネル#2 選択 (0:不可、1:可) [17] チャンネル#1 選択 (0:不可、1:可) [16] チャンネル#0 選択 (0:不可、1:可)
			[15] 未使用

	R/W	INT_TRG	<p>[14:12] トリガー速度選択 (STE:Slow Trigger Enable) STE=0 STE=1</p> <p>3'h0 : 10 kHz 37 Hz 3'h1 : 20 kHz 62 Hz 3'h2 : 30 kHz 90 Hz 3'h3 : ——— 333 Hz</p> <p>[11:9] 未使用 [8] 内部トリガー信号選択 (0:不可、1:可)</p>
	R/W	Merger_TEST	<p>[7:5] 未使用 [4] Slow Trigger 使用 (0:不使用、1:使用) [3:1] 未使用 [0] Merger テストモジュール選択 (0:不可、1:可)</p>
0x0014	R	FE_TRG_COUNT	<p>[31:24] 未使用 [23:20] FEB#5 トリガー出力カウンター [19:16] FEB#4 トリガー出力カウンター [15:12] FEB#3 トリガー出力カウンター [11:8] FEB#2 トリガー出力カウンター [7:4] FEB#1 トリガー出力カウンター [3:0] FEB#0 トリガー出力カウンター FEB トリガーカウンターの下位 4bit を表示</p>
0x0015	R	TMP. Monitor	<p>[31:16] 未使用 [15:0] Merger Board の温度</p>
0x0016-0x00FF			Reserved
0x100	R/W	SYS_MON	<p>システムモニター [31] 未使用 [30:24] 読み書きアドレス [23:17] 未使用 [16] 読み書き選択 (0:読み、1:書き) [15:0] 読み・書きデータ</p>
0x0101-0x2FF			Reserved
0x03XX (XX=FE アドレス)	R/W	FEE_SIO	<p>[31:24] FE アドレス (読み専用) [23:20] 未使用 [19:16] FEE 選択 { 4'0101: FEE#5 選択 4'0011: FEE#4 選択 4'0100: FEE#3 選択 4'0010: FEE#2 選択 4'0001: FEE#1 選択</p>

			4'0000: FEE#0 選択 } [15:13] 未使用 [12] Busy 信号 (読み専用) [11:9] 未使用 [8] 読み書き選択 (0:読み、1:書き) [7:0] FEE 読み・書きデータ
--	--	--	--

表 6.2 Frontend board の FPGA のパラメータ

アドレス	R/W	パラメータ名	機能
0x00	/W	CLEAR	クリア (未使用)
0x01	/W	RUNCLEAR	イベント番号クリア
0x02	R/	STAT	内部状態: { tx_busy, veto }
0x03	R/W	CSR1	制御状態レジスタ: { ro_mode, polarity, lvds_trig, mode_edge, vetoen }
0x04	R/W	HDCYCLE	ヒットデータ周期 (5-bit): hdcycle[4:0]
0x05	R/W	TRGDELAY	トリガー遅延 (5-bit): trgdelay[4:0]
0x06	R/W	CSR2	制御状態レジスタ : { pio_trigmask, pio_halfcycle[2:0] }
0x07	/W	SOFTTRIG	ソフトウェアトリガー
0x08	R/W	TP	テストパルス出力 : tp[0]
0x09	R/W	TRIGEN	トリガー許可
0x0a-0b	R/W	UTILBUF	ヘッダー内のバッファ読み出し
0x10	/W	INIT	全 ASIC の初期化
0x11	R/W	SEL	FPGA 内のチップ、チャンネルの選択
0x12	/W	PRMSET	FPGA から ASIC へパラメータ送信
0x13	/W	NDRO	非破壊読み出し (SA03)
0x14-17	R/	LASTSEL	チップ内の選択チャンネル確認
0x20-23	R/W	WPARAM	FPGA 内の ASIC パラメータの設定
0x24-27	R/	RPARAM	ASIC パラメータリードバック

表 6.3 Frontend board の ASIC のグローバルパラメータ

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 6.4 Frontend board の ASIC のチャンネルパラメータ

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)

パラメータの設定は主にパラメータ管理用 GUI から行う。Merger board のパラメータは各アドレス毎に設定・取得が可能である。一方で Frontend board のパラメータ及び ASIC のグローバル・チャンネルパラメータはパラメータ毎に設定・取得が可能である。

6.3 モニターシステム用のトリガー

トリガーの制御はトリガー分配システムの CPU ボードから行われる。トリガー信号は Frontend Timing SWitch(FTSW) モジュールから読み出し回路、COPPER へと送られる。FTSW が作るトリガーには一定の間隔で出力する “pulse” やポアソン分布に従う “poisson” などがある。また FTSW 外からのトリガーに対してトリガーを生成する “AUX” なども設定可能であり、宇宙線トリガーなどに使用する。Trigger Timing I/O(TT-IO) モジュールはトリガー信号の生成や NIM 信号の変換を行うモジュールである。LED 光の導入によるキャリブレーションでは TT-IO モジュールでトリガーを生成し、FTSW への出力と LED ドライバーへ NIM 信号の出力を行う。また宇宙線トリガーは NIM 信号で送られるため TT-IO モジュールにより変換を行い、FTSW へ出力する。トリガー分配システムの写真、概念図を図 6.4、6.5 に示す。

トリガーの種類を選択の他トリガーレートやトリガー数の制御は GUI 上で選択、入力が可能である。さらに出力したトリガー数や受け取ったトリガー数のモニタも可能になっている。

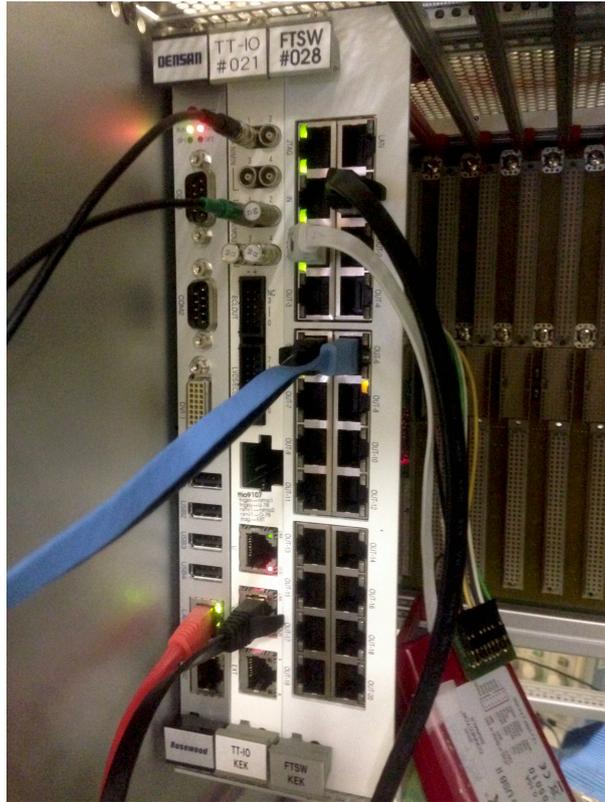


図 6.4 トリガー分配システム。左から CPU ボード、TT-IP モジュール、FTSW モジュール。

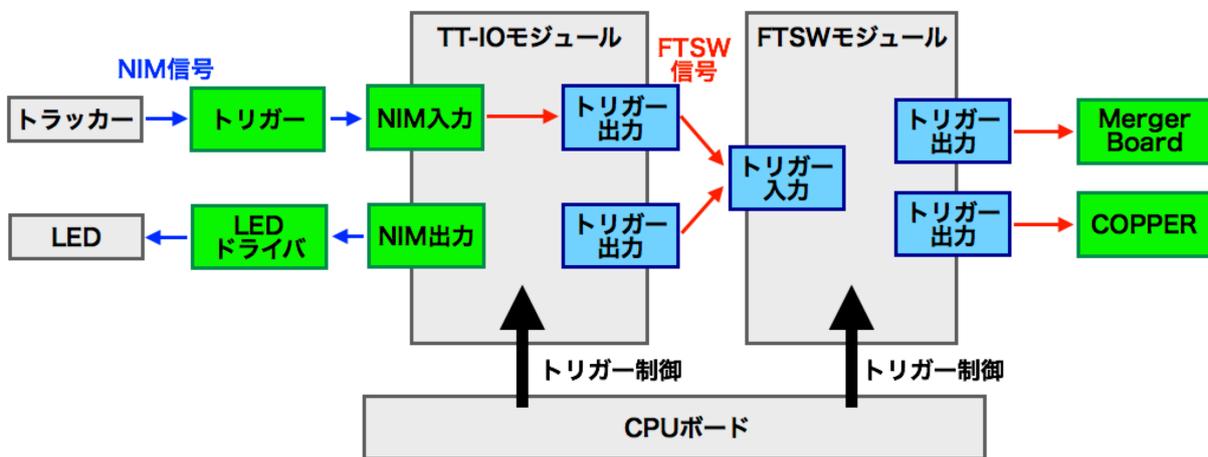


図 6.5 トリガー分配システムの概念図。

6.4 キャリブレーション

ARICH ではスレッシュホールドスキャンと呼ばれる方法を用いてキャリブレーションを行う。スレッシュホールドスキャンは閾値とヒットレートの対応関係からベースライン電圧、ノイズレベル、単光子電圧レベルを測定する手法である。実際の測定では閾値電圧の設定変更とデータ収集を交互に繰り返

し、100 から 400 通りの閾値でのデータを取得する。この過程ではデータ収集そのものよりもパラメータ設定やデータ収集開始・終了処理に時間がかかってしまうため、専用のデータ取得管理プログラムが必要となる。

スレッシュホールドスキンの概念図を図 6.6 に示す。

図 6.6(a) はノイズのみを測定した際の結果である。ノイズの波高値分布はガウス分布に従い、スレッシュホールドスキンの結果はガウス分布で近似することができる。その際の中心値 μ がオフセット電圧、標準偏差 σ がノイズの大きさとなる。

図 6.6(b) は理想的な信号を測定した結果である。ノイズがなく理想的な信号のスレッシュホールドスキンの結果は矩形波となり、電圧の低い側がオフセット電圧、高い側が入力波形の最大値となる。その二つの差から、アナログ信号の波高値を得ることができる。矩形波の近似には式 6.1 に示す、誤差関数を用いる。

$$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-t^2} dt \quad (6.1)$$

また式 6.1 は近似させる場所により式 6.3 のように使い分ける必要がある。

$$\frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{V_{th} - \mu_{sig}}{\sqrt{2}\sigma_{sig}}\right) : (\text{電圧が低い側}) \quad (6.2)$$

$$\frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(-\frac{V_{th} - \mu_{ofs}}{\sqrt{2}\sigma_{ofs}}\right) : (\text{電圧が高い側}) \quad (6.3)$$

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 6.6(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。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となる。

図 6.6(c) は実際に得られる 1 光子信号を測定した結果である。HAPD の光子検出がポアソン分布に従う確率現象であることや HAPD の暗電流や読み出し回路によるノイズを考慮するとこのようなスレッシュホールドスキンの結果となる。スレッシュホールドスキンの一番高いピークはオフセット電圧となるペDESTAL に対応する。図 6.6(b) と同様の解析を行い、 $\mu_1 - \mu_2$ が 1 光子信号によるアナログ信号波高値となる。1 光子信号のノイズや 2 光子信号の検出により、1 光子信号の波高値よりも広い範囲で分布する。

オフセット調整用のパラメータを変化させながらノイズのみのスレッシュホールドスキャンを行うことで電圧値との対応を計算し、チャンネル毎に適切なパラメータを設定することでオフセット電圧を一定にする。またノイズの大きさと 1 光子信号の波高値から適切な閾値電圧を設定することで高効率の 1 光子検出器を可能にする。

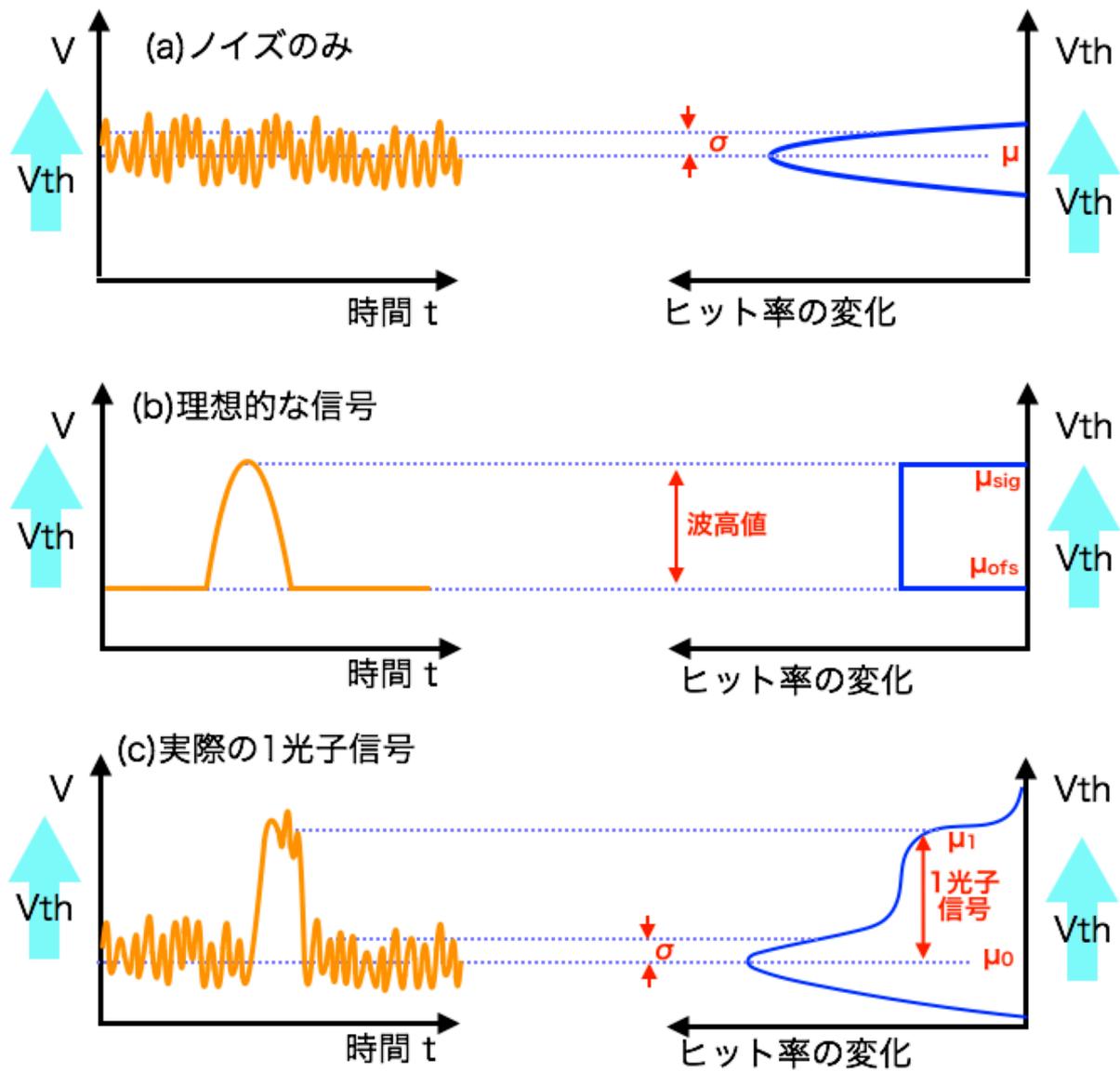


図 6.6 スレッシュホルドスキンの概念図

トリガーシステムとデータ収集の制御を同時に行うことができるデータ取得管理プログラムはスレッシュホルドスキンの効率化を図る上で必要となる。そのためスレッシュホルドスキン専用の制御ソフトウェアを用意した。スレッシュホルドスキンによるデータ収集の流れを図 6.7 に示す。

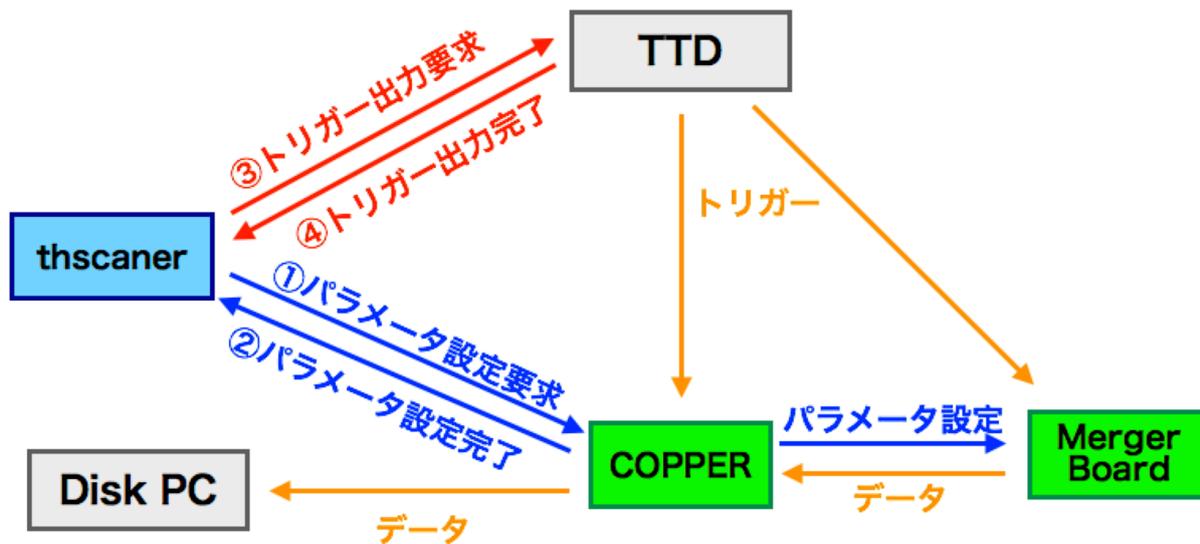


図 6.7 スレッシュホルドスキャンによるデータ収集の流れ。パラメータ設定、トリガー出力を thscanner が管理することでスレッシュホルドスキャンの効率化を実現している。

thscanner ははじめにパラメータ設定を COPPER へ要求する。パラメータ設定が完了したら、トリガーシステムに対してトリガー出力を要求する。その後設定されたトリガー数に達したら、トリガー出力を停止させパラメータの設定を行う。それぞれを thscanner により、管理することでデータ収集とパラメータの設定がスムーズにできるようになっている。また GUI から閾値数やトリガー数などの入力他スレッシュホルドスキャンの開始も行うことができる。

第7章

宇宙線を用いた ARICH 検出器性能評価

ARICH 検出器のシステム全体としての統合的な最終の動作確認を目的として、建設中の ARICH 検出器の一部を使用した宇宙線試験を行っている。特に光検出器制御システムの運用試験はこれまで数台程度の HAPD に限られて行われていたため、多数の HAPD を用いた運用試験によりその実用性の確認が急がれている。さらに電源装置や読み出し回路など最終的に ARICH で使用する機器のみで構成された初のシステムとなり、この運用は今後の ARICH 検出器ひいては Belle II 検出器の建設、性能に大きく影響し重要な試験となる。この章では宇宙線を用いた ARICH 検出器の光検出器制御システムの運用と性能評価試験について述べる。

7.1 宇宙線試験の概要

宇宙線試験のセットアップの写真を図 7.1 に示す。建設中の ARICH 検出器に隣接してラックを置き、COPPER クレート、高圧電源装置、読み出し回路用電源装置を設置した。ARICH 検出器には宇宙線試験用に 6 分の 1 サイズの暗箱を作成し遮光している。シリカエアロゲルは上蓋内側に固定され、荷電粒子の通過の際に発生する Cherenkov 光を観測を行う。暗箱は検出器の一部のみを覆っているため、宇宙線試験と並行して建設作業も進めることが可能になっている。さらに宇宙線検出のために 2 つのプラスチックシンチレータをシリカエアロゲル直上の暗箱上部に設置しており、2 つのシンチレータのコインシデンスを宇宙線によるトリガーとして出力を行っている。



図 7.1 宇宙線試験の写真

7.2 光検出器制御システムの運用

本研究で開発した光検出器制御システムを宇宙線試験用に組み込み、全体の動作の確認や安定性の確認を行った。宇宙線試験におけるシステムの全体図を図 7.2 に示す。ARICH 検出器のシステムを縮小した形となっており、このシステムにより動作や安定性の確認を行うことで、ARICH 検出器完成時のシステムの基礎的な評価を行うことができる。

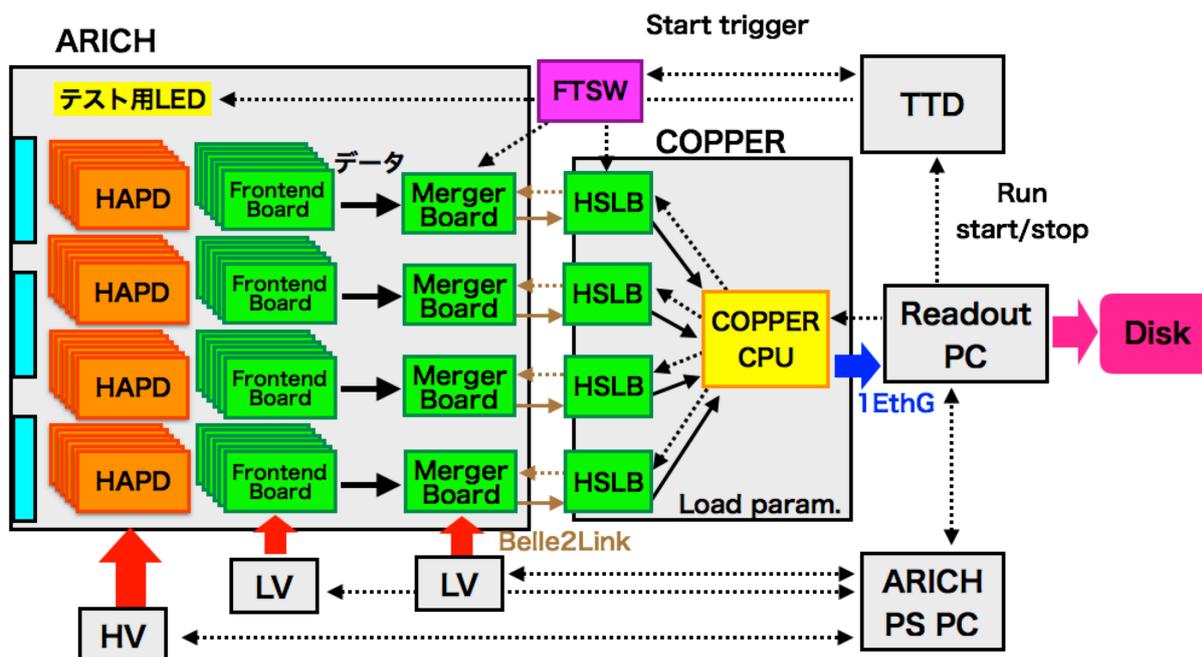


図 7.2 ARICH の slow control system の概念図

7.2.1 光検出器用電源制御システム

CAEN の高圧電源装置を用いて 16 台の HAPD の電源制御を行った。クレートは 1 台でモジュールは以下の 3 台を使用した。

- HV(A1590)
- Guard-Bias1(A7042P)
- Guard-Bias2(A7042AP)

HV 用ケーブルは本測定して使用するケーブルの試作品を用いることで、ケーブルの実用性の検証も同時に行った。Guard-Bias 用ケーブルは他電源で使用していたケーブルを加工し、CAEN 電源に接続することで代用した。

7.2.2 光検出器読み出し制御システム

宇宙線試験では全 23 台の HAPD モジュールと 4 台の Merger board を使用し、データ収集を行った。Merger board から送られたデータはそれぞれ HSLB から COPPER へと集められ Readout PC により一つにまとめられた後、Disk PC へと送られ記録される。COPPER は Readout PC により制御され、Belle2Link を通じて Merger board・Frontend board のパラメータの制御なども行う。またトリガーは宇宙線からのトリガーとモニターのシステム用の内部トリガーの両方を制御可能であり、宇宙線データ及びキャリブレーションデータの取得を同様のセットアップで行うことができる。

7.3 データ収集に向けた準備

データ収集に先立ちパラメータの調整やセットアップの確認を行った。特に宇宙線、モニターシステムによる LED 光など取得データ毎に調節を行い、データ収集の準備をした。

7.3.1 オフセット、しきい値電圧の調整

ARICH 検出器ではチャンネル毎のオフセットを調整し、閾値電圧を共通化させること回路の小型化を行った。共通の閾値電圧を使用するためには全チャンネルのオフセットを調整することが必要となる。オフセットには coarse offset(粗調節) と fine offset(微調節) の 2 種類のパラメータがあり、それぞれ 4bit の 16 段階の調整が可能である。それぞれのパラメータで 16 段階全ての設定しながら、そのたびにスレッシュホールドスキャンをとりその中心値を計算し、その中心値から 16 段階での傾きを求める。その結果からオフセットが 0 に最も近くなる粗調節、微調節のパラメータを計算し、その値をオフセットとして使用するオフセット調整前の結果を図 7.3、調整後の結果を図 7.4 に示す。オフセット調整により、ノイズの位置が全チャンネルでほぼ同じ位置に設定できていることがわかる。

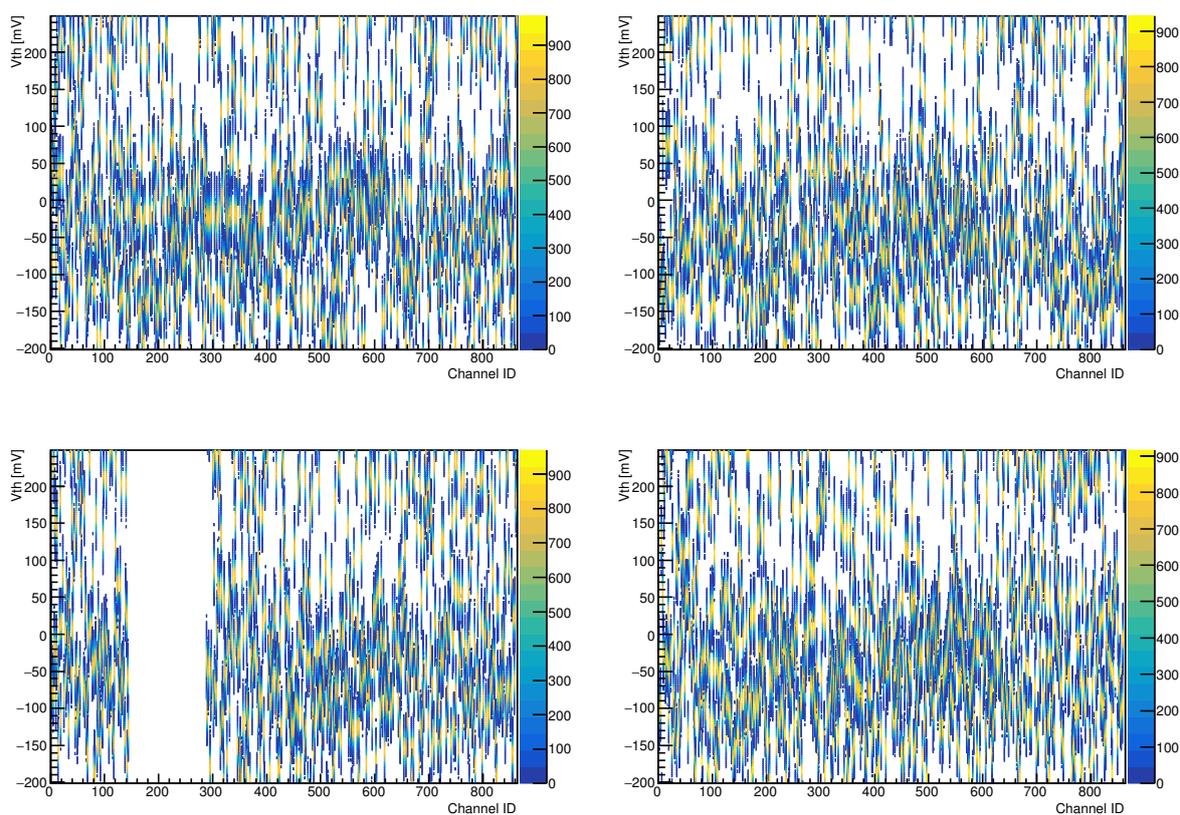


図 7.3 オフセット調整前の結果

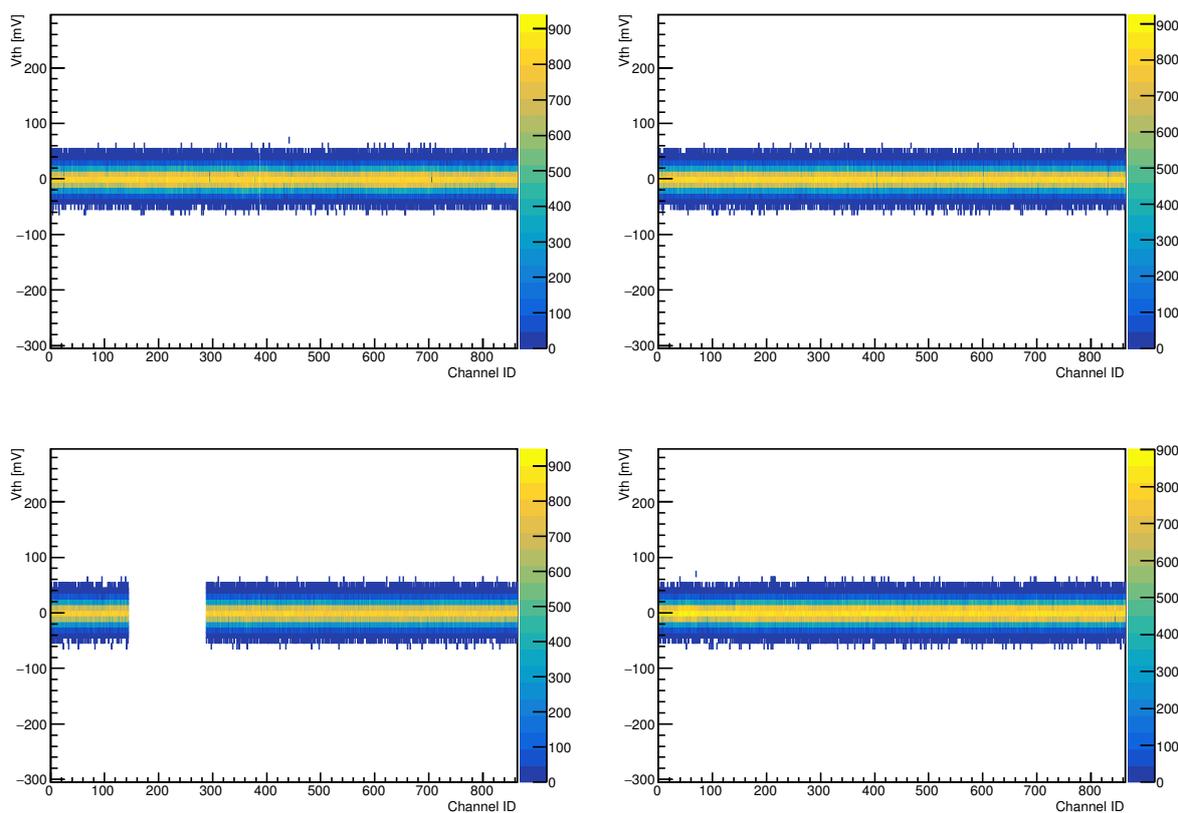


図 7.4 オフセット調整後の結果

オフセットの調整が完了した後、モニターシステムを用いて閾値電圧の決定を行う。モニターシステムにより光を HAPD へと入射し、光子による出力信号のスレッシュドスキャンを得る。その結果から 1 光子信号の波高値を求め、光を入射しないノイズの結果と合わせて閾値電圧を決定する。また決定した閾値電圧を用いて光入射あり、なしでデータ取得を行うことでノイズとの分離ができているかを確認する。

光入射時のスレッシュドスキャンの結果を図 7.5 に示す。ノイズの分布よりも電圧の高い位置に分布を見ることができ、光入射による信号が出力されていることがわかる。また 1 チャンネルの結果を図 7.6 に示す。この分布からノイズ量と光信号波高値を算出し閾値電圧を 60 mV に決定した。決定された閾値電圧に設定し上で光を入射した際の結果を図 7.7 に示す。

全チャンネルのオフセットを調整と閾値電圧を設定した上でデータ収集を行い、光信号をノイズを分離してデータ収集を行うことができた。

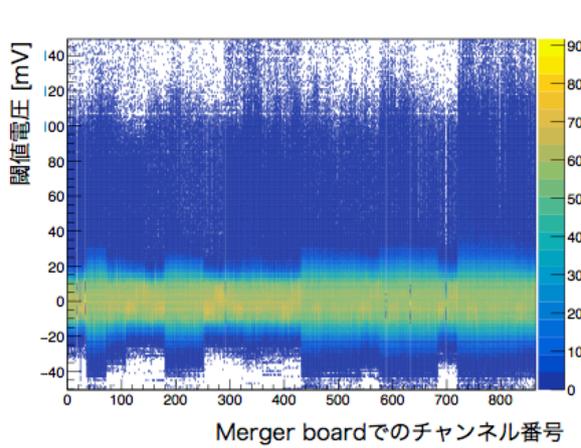


図 7.5 光入射時のスレッシュホルドスキャンの結果

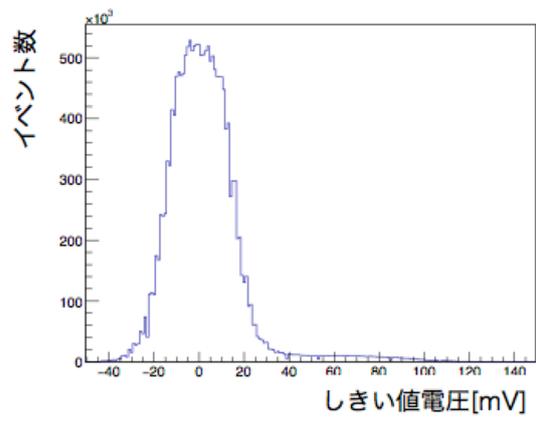


図 7.6 光入射時のスレッシュホルドスキャンの結果 (1 チャンネル)

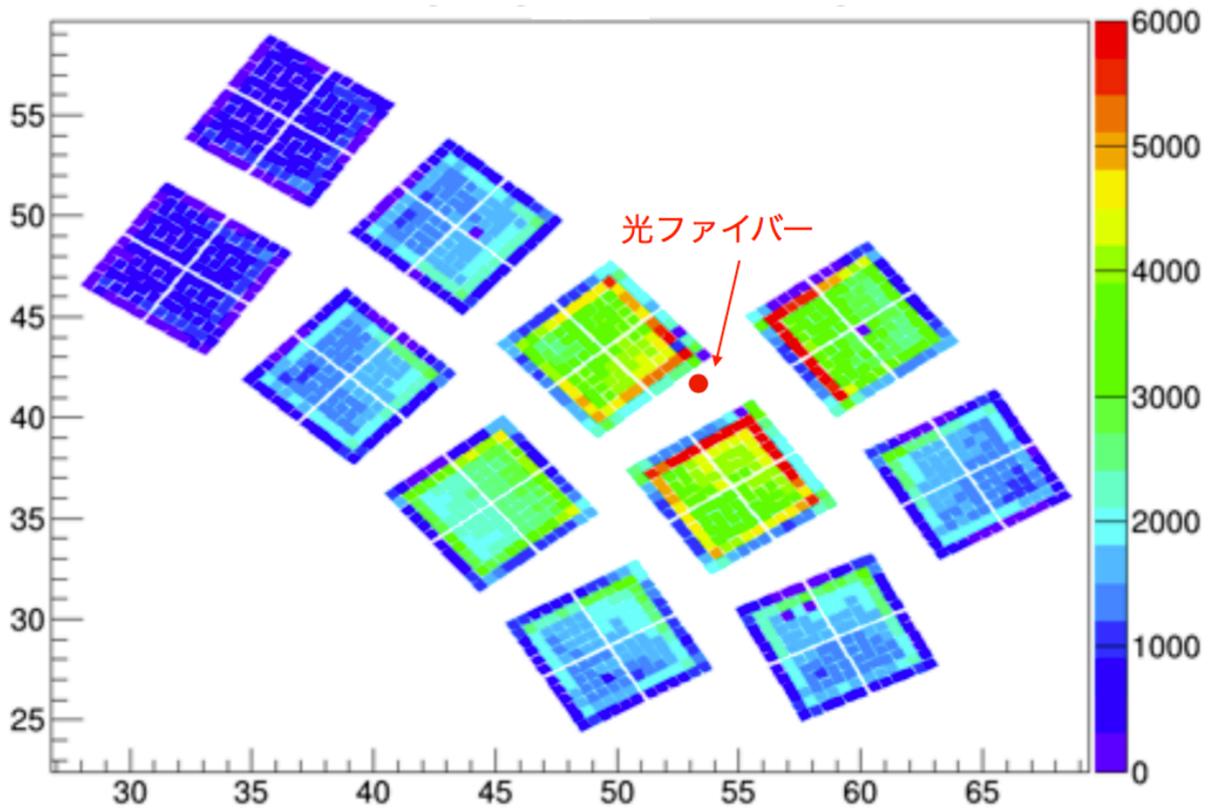


図 7.7 閾値電圧を固定した際の LED 光によるヒット分布

7.3.2 トリガータイミング調整

ARICH 検出器の読み出し回路ではデータを 4bit 単位で送信する。その 4bit の範囲とタイミングを決めるためのパラメータとして、“hdcycle” と “trigger delay” と呼ばれるパラメータが存在する。“hdcycle” は 4bit の幅を決めるパラメータである。“trigger delay” はデータ取得のタイミングを決めるパラメータである。

トリガーのタイミングは取得データにより、異なるためそれぞれで調整が必要である。ノイズはトリガーのタイミングに依存せずにヒットが現れるため、bit タイミングは一様に分布する。モニターや宇宙線ではトリガーのタイミングに対して決まったタイミングで HAPD にヒットが現れるため、調整が必要となる。モニターのトリガーは LED を光らせるタイミングで発生させるが、その光は HAPD に到達するまでの時間やトリガー信号がエレキを通る時間により、ずれが発生する。宇宙線のトリガーは 2 枚のプラスチックシンチレータのコインシデンスをトリガーとしているが、こちらも宇宙線が通るタイミングやエレキでの信号処理の時間によってずれが発生する。

ヒットタイミングの分布をノイズ (図 7.8)、宇宙線 (図 7.9) でそれぞれ示す。ノイズは一様に分布しており、宇宙線ではピークをピークを持つ分布になっており、4bit の範囲内に調整できていることがわかる。トリガータイミングを調整し、モニターシステム・宇宙線でそれぞれ適切なパラメータを設定し、データ収集ができた。

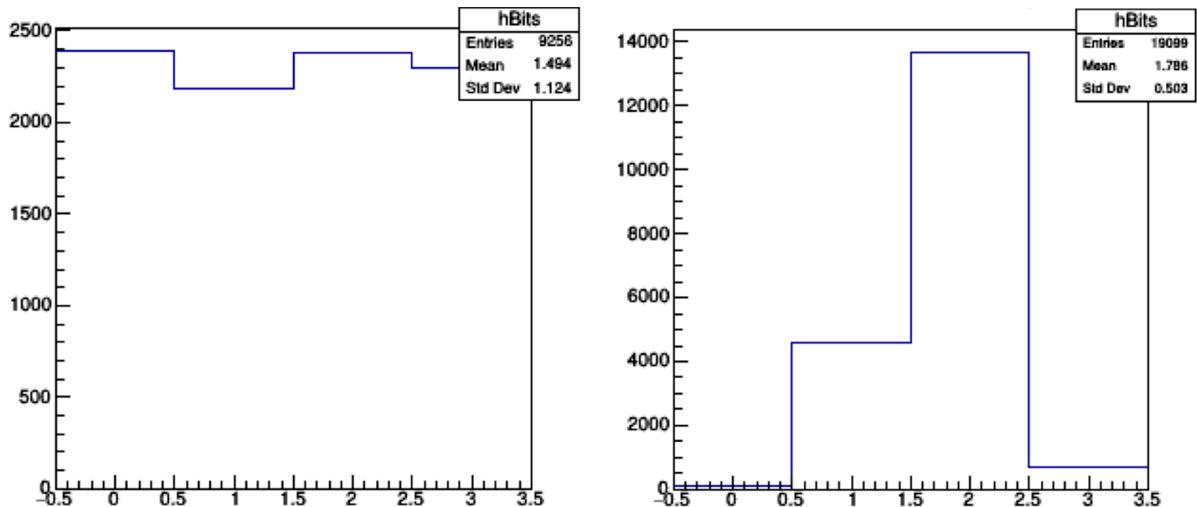


図 7.8 ノイズデータ取得時のヒットタイミングの分布 図 7.9 宇宙線データ取得時のヒットタイミングの分布

7.4 取得データの解析

データ収集と共にそのデータが壊れていないか、正しいものであるかを確認することは重要な課題となる。データを直接解析し、そのデータが正しいものであるかを Belle II 実験共通の解析フレームワークにより解析を行い、そのデータの検証を行った。また宇宙線データに対しては宇宙線由来のイベントによるデータであるか解析を行い、データの信頼性も検証した。

7.4.1 basf2 フレームワークを用いた解析

basf2(belle analysis software framework 2) は Belle で使われていたデータ解析フレームワークのアップグレードであり、データ収集時におけるオンラインでの解析にも用いられる。図 7.10 に basf2 の概念図を示す。basf2 はモジュールと呼ばれるプロセスを複数組み合わせることで一つの解析を作り上げる。またモジュール間でのデータのやり取りはデータストアと呼ばれるストレージを用いて行われる。

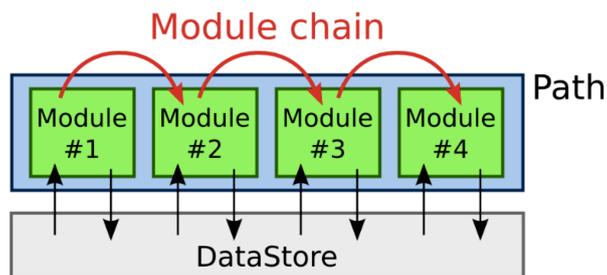


図 7.10 basf2 の概念図

7.4.2 データフォーマットの確認

初期解析としてデータフォーマットの解析を行った。収集したのから COPPER や Belle2Link を除いて Merger board が出力するデータのヘッダーを確認しデータが壊れていないか、ずれたりしていないかを確認した。Merger board のヘッダーには以下の値が含まれている。

- ファームウェアのバージョン
- ボードのタイプ
- ボードの番号 (Merger:8、FEB:0~ 5)
- トリガー番号
- ボード ID

トリガー番号以外の項目は予め値が決まっているため、データフォーマットに従いその値を取得し正しい値と一致しているかを確認した。トリガー番号はイベント毎に変わる値であるため、一つ前のイベントのトリガー番号から今のイベントのトリガー番号が1つ増えているか確認した。また Merger board のヘッダーと Frontend board のヘッダーでトリガー番号が一致しているかも確認した。

7.4.3 リングイメージの再構成

ここまででデータフォーマットの確認などを行った上で、正しいことが確認されたデータを用いて宇宙線によるトリガーのイベントを収集し、リングイメージの再構成を行った。1 イベント毎に HAPD 上でのヒット分布を作成し確認を行った。実際に取得出来た宇宙線イベントが図 7.11 であ

る。ヒット分布が円状になっており、リングイメージが取得に成功した。

しかし、全イベント数に対してこのようなリングイメージが見えているイベントは非常に少なく、1割程度である。リングイメージの再構成に失敗しているイベントの主な要因は、トリガーの位置によって決まる宇宙線の角度分布に対して HAPD の範囲が狭いことである。今後はトリガー用シンチレータの距離は離したり、小さなものを使うことで角度分布への制限を行うことでリングイメージの再構成の効率を上げる。



図 7.11 取得したリングイメージ

7.4.4 ARICH の性能評価

リングイメージの再構成は複数の Merger board をまたいだ複数の HAPD を用いても成功しており、Merger board 間でのイベントのずれがなくデータが統合されていることが確認できた。またリングイメージがチェレンコフ光由来のものであるか確認を行った。実際に取得したデータを宇宙線として $\beta = 1$ のミュオンを仮定した時のリング半径の予想を図 7.12 に示す。予想されるリング半径は 5 cm であり、取得したデータのリング半径もおおよそ 5 cm となっており、宇宙線由来のミュオンによるリングイメージの再構成が成功していると言える。

適切な電圧を HAPD に印加し、閾値電圧やトリガータイミングを正しく設定し要求通りの光信号によるヒットデータを取得できた。また複数の Merger board からのデータを正しく統合し、イベントを再構成できており、データ収集が成功していると言える。さらに取得したリングイメージも予想しているリングイメージと一致しており、期待されている性能を確認できた。

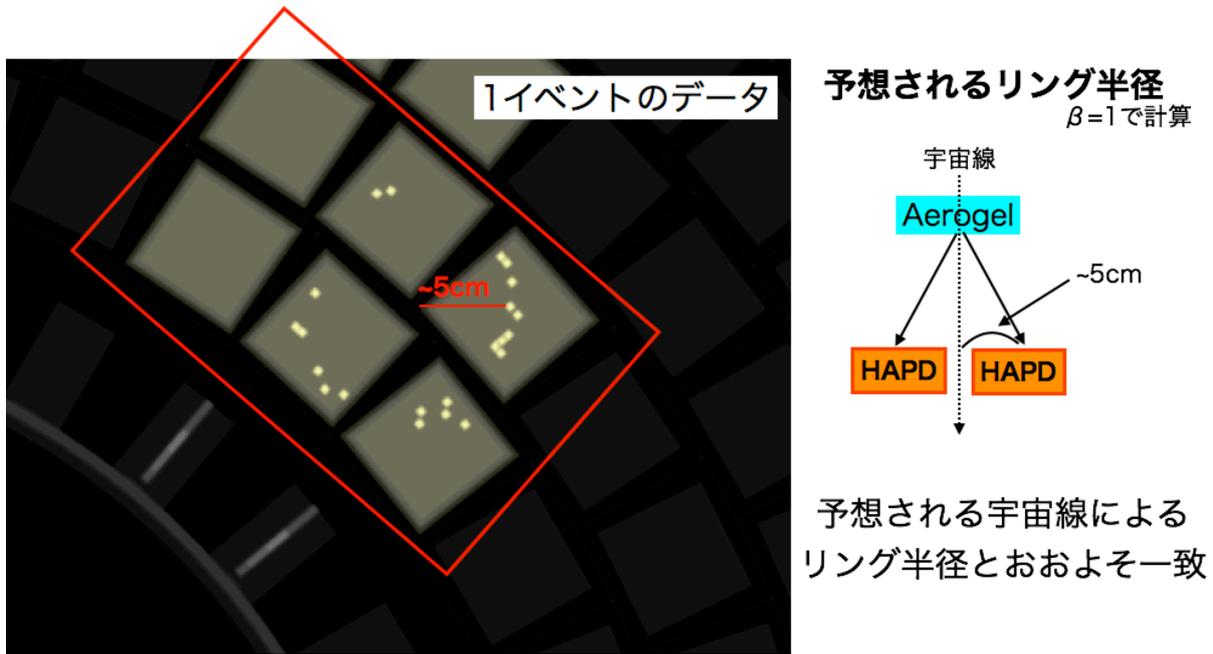


図 7.12 取得データと予想されるリング半径

第 8 章

ARICH 開発の今後の予定

8.1 ARICH 全体の予定

ARICH 検出器は 2017 年 5 月に構造体の建設が完了する。建設は HAPD モジュール、高圧ケーブル、回路用ケーブル、読み出しケーブルを順に設置する。ARICH 検出器の建設スケジュールを図 8.1 に示す。建設と並行して、構造体の一部を用いた宇宙線を用いた試験が進められ、最終的な電圧印加やデータ読み出しなど一連の動作確認が行われる。ARICH 検出器の最終的な動作が確認できた後、エンドキャップ ECL と連結され 2017 年 9 月に Belle II 検出器へとインストールされる。

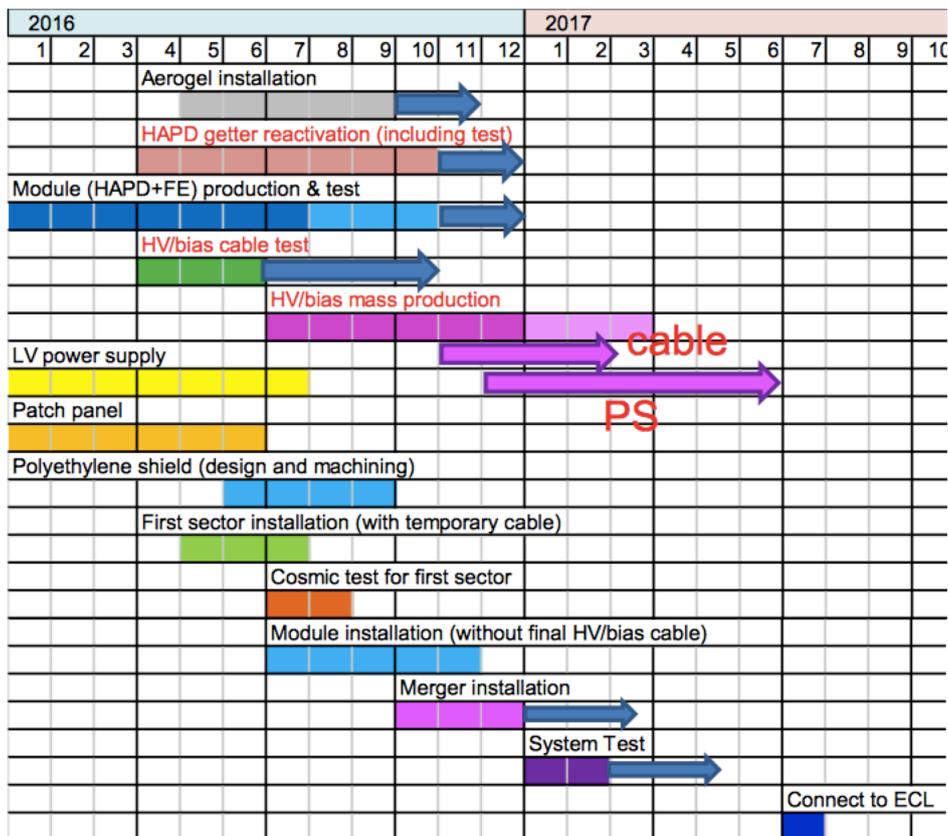


図 8.1 ARICH の今後の予定

8.2 インストール後の宇宙線試験

2017 年末には VXD 検出器の各層ラダー 1 枚ずつとその他の全検出器が Belle II 検出器へインストールされ、ビームを用いた試験の前に宇宙線を用いた試験が行われる。宇宙線試験では全検出器を同時に管理することで、ビームを用いたコミッショニング前に一連の動作検証を行う。実験シフトも生まれ、実際の運転を想定した試験となる。

8.3 物理測定

宇宙線試験が完了した後はビームを用いたコミッショニングが行われる。ビーム衝突に伴うバックグラウンドの測定とそれに対する各検出器の応答の検証であるが、同時に物理データの取得も行う。VXD 検出器が完全にはインストールされていないため、崩壊点情報の必要なモードの測定はできない。一方で崩壊点情報を必要としない崩壊モードの解析は行うことが可能であるため、各検出器のビームを用いた性能評価を行うとともにいくつかの崩壊モードの解析により新物理へのアプローチが可能となる。

2018 年には VXD 検出器を含む全検出器が Belle II 検出器へとインストールされ、本格的な物理測定が開始される。10 年間の運転により Belle 実験の 50 倍もの積分ルミノシティを達成し、新物理事象を始めとする様々な解析が行われる。

第9章

結論

Belle II 実験は茨城県つくば市高エネルギー加速器研究機構で行われる電子・陽電子非対称エネルギー衝突加速器実験であり、2017年の実験開始に向けて SuperKEKB 加速器、Belle II 検出器の開発が進められている。Belle II 検出器のエンドキャップ部における粒子識別を担うのが Aerogel RICH 検出器である。Aerogel RICH 検出器に用いる光検出器 HAPD には3系統6種類の電圧供給と144チャンネルの読み出しが必要となる。

本研究では Belle II 実験 DAQ システムフレームワークを用いた光検出器制御システムの開発を行った。電源装置は出力電圧が -9000 V の HV モジュールと $+500\text{ V}$ のガードバイアスモジュールの2種類のモジュールの性能評価を行った。要求されている出力電圧の安定性やトリップ・インターロックによる保護機能、ネットワーク制御の機能を有していることを確認した。電源制御システムでは HAPD への電圧印加の自動化やトリップ時に指定された電圧印加を順に停止する自動停止システムを開発した。読み出し制御システムでは Belle2Link を介した読み出し回路のパラメータの制御やモニターシステムのためのトリガーシステムを開発した。また ARICH 独自のキャリブレーション手法であるスレッシュホールドスキャンのためにトリガーやデータ収集を制御するためのシステムを開発した。

本研究で開発した制御システムは建設中の ARICH 検出器の一部を用いた宇宙線試験で使用されており、その実用性を確認した。HAPD への電圧印加やパラメータの設定により宇宙線データを取得でき、各制御システムが期待通りに動作していることを確認した。また宇宙線データの解析によりリングイメージを再構成に成功し、建設中の ARICH 検出器を用いて荷電粒子のリングイメージ検出が可能であることを確認した。

今後は ARICH 検出器の建設を進めると共にシステムの拡張を行い、2017年夏の Belle II 検出器へのインストールへ向け準備を整える。また宇宙線データの解析も行い、ARICH 検出器の特性の理解を進める。

謝辞

本研究は多くの方々の多大なるご支援により、進めることができました。首都大学東京では住吉孝行教授、角野秀一准教授、汲田哲郎助教をはじめ、同研究室の皆様には大変お世話になりました。住吉教授には Belle II 実験という世界有数の国際実験への参加や国際会議への参加など貴重な経験をたくさんさせて頂き、大変感謝しております。指導教員である角野准教授には本研究を進める上で非常にたくさんの指導をして頂き、行き詰まった時には何回も助けて頂きました。深く感謝申し上げます。汲田助教には研究での様々な意見の他、英語が苦手な私に丁寧に指導をして頂き、感謝しております。今野智之客員研究員には研究の指導から、研究の進め方、資料の添削など非常に多くの時間を割いて頂きました。今野客員研究員のご指導がなければ、本論文を完成させることはできませんでした。心より感謝申し上げます。岩田修一客員研究員には実験、研究の基本を一から教えて頂きました。松原綱之特任准教授、浜津良輔客員准教授、千葉雅美客員助教には Belle II 実験以外の観点から様々な意見を頂きました。皆様のご指導・ご支援により、本論文を書き上げることができました。心より感謝申し上げます。

同期の幡谷航暉君、町田篤志君、伊藤隆晃君とは研究室に配属された学部4年生の頃から共に学び、充実した研究室生活を送ることができました。特に幡谷君とは同じ ARICH グループで議論を交わしながら研究を行い、苦楽を共にしてきました。後輩の市川星磨、佐々木慎之介君、野口光太君、吉岡輝昭君、柿本詩織さん、小西達也君、為近彩智さん、吉川広陽君には楽しい研究室生活を送らせてもらいました。皆様に心より感謝致します。

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) では足立一郎准教授、西田昌平准教授をはじめ、多くの方々に感謝申し上げます。足立准教授には ARICH 全体のみならず、本研究に対しても非常に重要な意見をいくつも頂きました。西田准教授には研究面での数多くの指導だけでなく、スライドの添削なども指導して頂きました。心より感謝申し上げます。

同じ ARICH グループの新潟大学の遊佐洋祐助教、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も大変お世話になりました。特に小川君には研究以外の面でも大変楽しませてもらいました。また、他グループではありますが、Belle II Japan Student の同期とは共に作業をしたり、助け合いながら研究を進めることができました。それぞれ進む道は違いますが、今後のご活躍を期待致します。

最後になりますが本研究を進めるにあたり経済面、精神面で支えて頂いた両親に感謝を申し上げ、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] T. Abe et al. [Belle II Collaboration], [arXiv:1011.0352 [physics.ins-det]] [Search inSPIRE].
- [3] J. H. Christenson, J. W. Cronin, V. L. Fitch and R. Turlay, “Evidence for the 2π Decay of the K_0^2 Meson”, Phys. Rev. Lett. 13, pp.138-140 (1964).
- [4] M. Kobayashi and T. Maskawa, Prog. Theor. Phys. 49, 652 (1973).
- [5] A. Bevan (ed.) et al., Eur. Phys. J. C 74 (2014).
- [6] A. G. Akkeroyd, et al. [BELLE collaboration], “ Physics at Super B Factory ”, arXiv:1002.5012v1 [hep-ex].
- [7] arXiv:1201.4643v2 [hep-ex] 20 Dec 2012
- [8] T. Saito, and Belle Collaboration, Phys. Rev. D 91, 052004 (2015)
- [9] 齋藤 智之 東北大学大学院 博士論文 (2014)
- [10] S. Yamada, et al., IEEE TNS Volume 62, Issue 3, 1175-1180, 2015
- [11] <http://controlsystemstudio.org>
- [12] M. Tabata et al. / J. of Supercritical Fluids 110 (2016) 183-192
- [13] S. Korpar et al., Nucl. Instrum. Meth. A 766 145 (2014).
- [14] <http://www.caen.it>
- [15] <https://eclipse.org>